

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

**“FLUIDODINÂMICA DE LEITOS FLUIDIZADOS E VIBROFLUIDIZADOS  
OPERANDO COM PARTÍCULAS PLANAS”**

Renata de Aquino Brito Lima

SÃO CARLOS - SP

2009

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

**“FLUIDODINÂMICA DE LEITOS FLUIDIZADOS E VIBROFLUIDIZADOS  
OPERANDO COM PARTÍCULAS PLANAS”**

Renata de Aquino Brito Lima

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Maria do Carmo Ferreira

SÃO CARLOS - SP

2009

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

L732fl

Lima, Renata de Aquino Brito.

Fluidodinâmica de leitos fluidizados e vibrofluidizados operando com partículas planas / Renata de Aquino Brito Lima. -- São Carlos : UFSCar, 2009.

127 f.

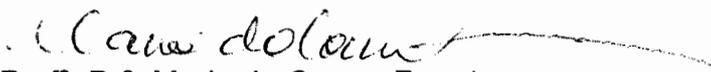
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Fluidização. 2. Leito vibrofluidizado. 3. Esfericidade. 4. Partículas de biomassa. I. Título.

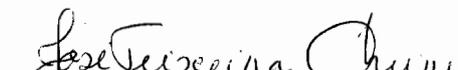
CDD: 660.284292 (20<sup>a</sup>)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE  
**RENATA DE AQUINO BRITO LIMA** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
SÃO CARLOS, EM 12 DE MARÇO DE 2009.

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Maria do Carmo Ferreira  
**Orientadora, PPG-EQ/UFSCar**

  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Meuris Gurgel Carlos da Silva  
**FEQ/UNICAMP**

  
Prof. Dr. José Teixeira Freire  
**PPG-EQ/UFSCar**

À minha família,  
por tudo que representam em minha vida.

“Tudo tem o seu tempo determinado,  
e há tempo para todo propósito debaixo do céu ...”

(Eclesiastes 3:1)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pela oportunidade de mais uma conquista.

Aos meus pais Nilson de Brito Lima e Sônia Lima de Aquino e à minha avó Thelma Lima de Aquino (*in memoriam*) pelo amor, confiança e apoio despendido durante toda a minha vida.

Aos meus irmãos Marcelo, Marcela, Vinícius e Fernanda, e ao meu pequeno sobrinho Daniel pela amizade incondicional.

Ao meu namorado Mauro por todo incentivo, paciência e amor.

À minha orientadora Maria do Carmo Ferreira pela orientação dedicada, incentivo constante e pelo exemplo de profissionalismo.

Ao professor José Teixeira Freire pelo estímulo e valiosas sugestões em todas as fases de realização deste trabalho e por ter aceito fazer parte da minha banca de qualificação e defesa.

À professora Meuris Gurgel por ter aceito o convite de participar da minha banca de defesa.

Aos professores Ana Maria da Silveira, Dermeval José Mazzini Sartori e Ronaldo Guimarães Corrêa pelas sugestões dadas nos seminários do Centro de Secagem.

Aos amigos do Centro de Secagem André, Cezar, Lucas, e Rodrigo pela boa vontade e disponibilidade em ajudar e pelo agradável convívio.

Aos técnicos Edilson Milaré, Oscar da Silva e Juliana Milanez pelo apoio prestado.

Aos amigos Bruna, Ediane, Natália, Aruana, Robson, Eduardo (Japa), Anamaria, Isabel, Priscila, Juliana, Érika, Viviane, Sandra, Giann, Giovana, Sérgio e Clarice por compartilharem os prazeres e dificuldades desta jornada.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>x</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xv</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>4</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Leito Fluidizado.....	4
2.1.1 Propriedades Fluidodinâmicas de um Leito Fluidizado .....	5
2.2 Leito Vibrofluidizado .....	8
2.2.1 Adimensional de Vibração ( $\Gamma$ ) .....	8
2.2.2 Propriedades Fluidodinâmicas de um Leito Vibrofluidizado.....	9
2.3 Fluidização e Vibrofluidização de Partículas Planas.....	12
2.4 Leito Fixo .....	18
2.5 Propriedades Físicas de Materiais .....	21
2.5.1 Dimensões Características.....	22
2.5.2 Forma.....	24
2.5.3 Massa Específica .....	28
2.5.4 Porosidade .....	30
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>33</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>33</b>
3.1 Materiais .....	33
3.1.1 Partículas Sólidas.....	33

3.2. Equipamentos .....	41
3.2.1 Leito Vibrofluidizado .....	41
3.2.2 Leito Fixo .....	44
3.3 Metodologia Experimental .....	46
3.3.1 Caracterização das Partículas Sólidas.....	46
3.3.2 Análise Fluidodinâmica do Leito Fixo .....	48
3.3.3 Análise Fluidodinâmica do Leito Fluidizado e Vibrofluidizado .....	50
3.3.4 Porosidade do leito na condição de mínima fluidização .....	53
3.3.5 Ensaios Fluidodinâmicos Preliminares.....	54
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>55</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
4.1 Caracterização dos Materiais Sólidos.....	55
4.2 Leito Fixo .....	59
4.2.1 Porosidade do Leito .....	59
4.2.2 Análise Fluidodinâmica.....	62
4.3 Leito Fluidizado.....	72
4.3.1 Ensaios Fluidodinâmicos Preliminares.....	72
4.3.2 Análise Fluidodinâmica.....	73
4.3.2.1 Reprodutibilidade das Curvas Características .....	73
4.3.2.2 Comportamento Fluidodinâmico.....	76
4.3.2.3 Influência da Altura Estática do Leito.....	88
4.4 Leito Vibrofluidizado .....	90
4.4.1 Reprodutibilidade das Curvas Características .....	90
4.4.2 Comportamento Fluidodinâmico.....	92
4.4.3 Efeito do Adimensional de Vibração.....	104
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>105</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>

5.1 Leito Fixo .....	105
5.2 Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado.....	106
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>115</b>
<b>Representação gráfica das curvas de <math>\Delta P/LU</math> em função de U para os ensaios fluidodinâmicos em leito fixo.....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>120</b>
<b>Representação gráfica das curvas de <math>\Delta P</math> em função de U para os ensaios fluidodinâmicos em leito fluidizado. ....</b>	<b>120</b>
<b>APÊNDICE C .....</b>	<b>123</b>
<b>Representação gráfica das curvas de <math>\Delta P</math> em função de U para os ensaios fluidodinâmicos em leito vibrofluidizado.....</b>	<b>123</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Representação de uma curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para um leito fluidizado convencional (adaptado de Kunii e Levenspiel, 1969).....	6
<b>Figura 2.2:</b> Tipos de curvas fluidodinâmicas: (a) leitos fluidizados; (b), (c) e (d) leitos vibrofluidizados (adaptado de Strumillo e Pakowski, 1980).....	10
<b>Figura 2.3:</b> Variação da queda de pressão com a esfericidade, definida pela relação entre a área superficial de uma esfera com o mesmo volume da partícula e a superfície da partícula: (a) $\phi=1,00$ ; (b) $\phi=0,85$ ; (c) $\phi=0,70$ e (d) $\phi=0,60$ (adaptado de Liu <i>et al.</i> , 2008). .....	13
<b>Figura 2.4:</b> Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para uma placa distribuidora com 13% de área aberta (adaptado de Temple e van Boxtel, 1999)..	15
<b>Figura 2.5:</b> Definições de circularidade e esfericidade utilizadas para a descrição da forma de grãos e pedregulhos (adaptado de Curray, 1951 <i>apud</i> Mohsenin, 1970).....	26
<b>Figura 2.6:</b> Diferentes arranjos de grãos de feijão levando a formação de espaços intergranulares distintos (Mata e Duarte, 2002).....	32
<b>Figura 3.1:</b> Fotografias das partículas utilizadas nos experimentos; Grupo I: (a) sementes de abóbora; (b) sementes de girassol; (c) lentilhas; (d) flocos grossos de aveia. ....	35
<b>Figura 3.2:</b> Fotografias das partículas utilizadas nos experimentos; Grupo II: (a) folhas de pingo de ouro; (b) folhas de aroeira; (c) folhas de falso-boldo cortadas em quadrados; (d) folhas de buxinho; (e) brácteas de primavera. ....	37
<b>Figura 3.3:</b> Fotografias das partículas utilizadas nos experimentos; Grupo III: (a) “folhas” de papel; (b) quadrados de papel; (c) lentilhas de plástico; (d) lantejoulas; (e) paetês. ....	38
<b>Figura 3.4:</b> Esquema geral do equipamento de leito vibrofluidizado. ....	43
<b>Figura 3.5:</b> Esquema geral do equipamento de leito fixo.....	45
<b>Figura 4.1:</b> Porosidade bulk dos leitos fixos em função do número de Arquimedes.....	60
<b>Figura 4.2:</b> Leito fixo; $\Delta P/LU$ em função de $U$ para esferas de vidro “ballotini”; $d_v=2180\mu\text{m}$ ; $\rho_p=2,500\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .....	62
<b>Figura 4.3:</b> Leito fixo; Lentilhas; $\phi=0,574$ ; $d_v=0,456\text{cm}$ ; $\rho_p=1,33\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a) $\Delta P/LU$ em função de $U$ ; (b) Fotografia do leito na condição inicial. ....	64

- Figura 4.4:** Leito fixo; Lantejoulas;  $\varphi=0,228$ ;  $d_v=0,286\text{cm}$ ;  $\rho_p=1,20\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; (b) Fotografia do leito na condição inicial. .... 64
- Figura 4.5:** Leito fixo; Brácteas de primavera;  $\varphi=0,072$ ;  $d_v=0,740\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,52\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Fotografias: (b) Leito na condição inicial; (c) Elevação das partículas. .... 65
- Figura 4.6:** Leito fixo; Folhas de aroeira;  $\varphi=0,213$ ;  $d_v=0,480\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,97\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Fotografias: (b) Leito na condição inicial; (c) Elevação das partículas. 66
- Figura 4.7:** Leito fixo; “Folhas” de papel;  $\varphi=0,063$ ;  $d_v=0,424\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,83\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Fotografias: (b) Leito na condição inicial; (c) Elevação das partículas. 67
- Figura 4.8:** Leito fixo; Paetês;  $\varphi=0,107$ ;  $d_v=0,578\text{cm}$ ;  $\rho_p=1,31\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; (b) Fotografia do leito na condição inicial. .... 68
- Figura 4.9:** Leito fixo; Folhas de buxinho;  $\varphi=0,167$ ;  $d_v=1,691\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,85\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; (b) Fotografia do leito na condição inicial. .... 69
- Figura 4.10:** Leito fixo; (a) Permeabilidade do leito em função do número de Arquimedes e (b) Fator  $c$  em função do número de Arquimedes. .... 70
- Figura 4.11:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; esferas de vidro (EV);  $d_v=925\mu\text{m}$ ;  $\rho_p=2,500\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . .... 72
- Figura 4.12:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; Partículas do Grupo I: Sementes de girassol (SG);  $A_p=3,42\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,524$  e Flocos grossos de aveia (AB);  $A_p=0,84\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,431$ . .... 74
- Figura 4.13:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; Partículas do Grupo II: Folhas de pingo de ouro (FO);  $A_p=4,48\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,201$  e Folhas de buxinho (FB);  $A_p=53,9\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,167$ . .... 75
- Figura 4.14:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; Partículas do Grupo III: “Folhas” de papel (FP);  $A_p=8,98\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,063$  e Paetês (PA);  $A_p=9,80\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,107$ . .... 76
- Figura 4.15:** Leito fluidizado;  $H_0=3,5\text{cm}$ : (a) Queda de pressão no leito em função de  $U$  para as partículas do Grupo I; Fotografias: (b) Sementes de girassol; Leito estático (c) Leito fluidizado;  $U=1,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (d) Aveia; Leito estático (e) Leito fluidizado. .... 77
- Figura 4.16:** Leito fluidizado;  $H_0=3,5\text{cm}$ : (a) Queda de pressão no leito em função de  $U$  para as folhas de buxinho (FB) e boldo (QB); Grupo II; Fotografias; Regime expandido: (b)

Folhas de buxinho; Visão frontal (c) Visão de topo; (d) Boldo; Visão frontal (e) Visão de topo. ....	78
<b>Figura 4.17:</b> Leito fluidizado; $H_0=3,5\text{cm}$ : (a) Queda de pressão no leito em função de $U$ para a primavera (BP), pingo de ouro (FO) e aroeira (FA), Grupo II; Fotografias: (b) Primavera; Leito estático (c) Leito fluidizado; (d) Aroeira; Leito estático (e) Leito fluidizado. ....	79
<b>Figura 4.18:</b> Leito fluidizado; $H_0=3,5\text{cm}$ : (a) Queda de pressão no leito em função de $U$ para partículas do Grupo III; Fotografias: (b) Quadrados de papel; Leito estático (c) Leito fluidizado; (d) Paetês; Leito estático (e) Leito fluidizado. ....	81
<b>Figura 4.19:</b> Leito fluidizado; (a) Velocidade de mínima fluidização em função do número de Arquimedes e (b) Queda de pressão na condição de mínima fluidização em função do número de Arquimedes. ....	83
<b>Figura 4.20:</b> Leito fluidizado; (a) Porosidade bulk em função do número de Arquimedes e (b) Porosidade de mínima fluidização em função do número de Arquimedes. ....	84
<b>Figura 4.21:</b> Leito fluidizado; Curvas características de fluidização parametrizadas em $H_0$ para folhas de pingo de ouro (FO) e sementes de girassol (SG). ....	89
<b>Figura 4.22:</b> Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de $U$ ; $H_0=3,5\text{cm}$ ; $A=5,0 \times 10^{-3}\text{m}$ ; $\Gamma=0,5$ ; Partículas do Grupo I: Sementes de abóbora (SA); $A_p=5,78\text{cm}^2$ ; $\varphi=0,523$ e Lentilhas (LE); $A_p=1,14\text{cm}^2$ ; $\varphi=0,574$ . ....	90
<b>Figura 4.23:</b> Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de $U$ ; $H_0=3,5\text{cm}$ ; $A=5,0 \times 10^{-3}\text{m}$ ; $\Gamma=0,5$ ; Partículas do Grupo II: Brácteas de Primavera (BP); $A_p=24,0\text{cm}^2$ ; $\varphi=0,072$ e Folhas de aroeira (FA); $A_p=3,40\text{cm}^2$ ; $\varphi=0,213$ . ....	91
<b>Figura 4.24:</b> Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de $U$ ; $H_0=3,5\text{cm}$ ; $A=5,0 \times 10^{-3}\text{m}$ ; $\Gamma=0,5$ ; Partículas “artificiais”: Quadrados de papel (QP); $A_p=3,06\text{cm}^2$ ; $\varphi=0,090$ e Lentilhas de plástico (LP); $A_p=2,75\text{cm}^2$ ; $\varphi=0,568$ . ....	92
<b>Figura 4.25:</b> Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de $U$ parametrizado no adimensional de vibração; Grupo I: (a) Sementes de abóbora (SA); $A_p=5,78\text{cm}^2$ ; $\varphi=0,523$ ; $\rho_p=0,73\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (b) Lentilhas (LE); $A_p=1,14\text{cm}^2$ ; $\varphi=0,574$ ; $\rho_p=1,33\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . ....	94
<b>Figura 4.26:</b> Metodologia utilizada para a obtenção dos parâmetros $U_{mf}$ e $\Delta P_{mf}$ da curva fluidodinâmica obtida para o leito de lentilhas; $A = 4,0 \times 10^{-3}\text{m}$ e $\Gamma = 1,0$ . ....	95
<b>Figura 4.27:</b> Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de $U$ parametrizado no adimensional de vibração; Grupo II; Brácteas de primavera; $A_p=24,0\text{cm}^2$ ; $\varphi=0,072$ ; $\rho_p=0,52\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . ....	96

- Figura 4.28:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Grupo II: (a) Folhas de pingo de ouro;  $A_p=4,48\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,201$ ;  $\rho_p=0,95\text{g.cm}^{-3}$ ; (b) Folhas de Aroeira;  $A_p=3,40\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,213$ ;  $\rho_p=0,97\text{g.cm}^{-3}$ . 97
- Figura 4.29:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Grupo III: (a) Lentilhas de plástico;  $A_p=2,75\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,568$ ;  $\rho_p=1,04\text{g.cm}^{-3}$ ; (b) Lantejoulas;  $A_p=1,12\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,228$ ;  $\rho_p=1,20\text{g.cm}^{-3}$ ..... 98
- Figura 4.30:** Metodologia utilizada para a obtenção dos parâmetros  $U_{mf}$  e  $\Delta P_{mf}$  da curva fluidodinâmica obtida para o leito de lentilhas de plástico;  $A = 4,0 \times 10^{-3}$  m e  $\Gamma = 1,0$ .... 98
- Figura 4.31:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Quadrados de papel: (a)  $A=4,0 \times 10^{-3}$  m; (b)  $A=5,0 \times 10^{-3}$  m. .... 100
- Figura 4.32:** Fotografias (topo do leito); Leito vibrofluidizado;  $A=4,0 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma=1,0$ ;  $U=1,05U_{mf}$ : (a) Quadrados de papel, tempo=0' e (b) tempo=20'; (c) "Folhas" de papel, tempo=0' e (d) tempo=30'. .... 101
- Figura 4.33:** Leito vibrofluidizado; Paetês: (a) Queda de pressão no leito em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Fotografias (vista do topo): (b) Leito estático e (c) Vibrofluidizado;  $A=4,0 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma=0,5$ . .... 102
- Figura 4.34:** Leito vibrofluidizado; Folhas de buxinho: (a) Queda de pressão no leito em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Fotografias (vista do topo): (b) Leito estático e (c) Vibrofluidizado;  $A=4,0 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma=1,0$ ..... 103
- Figura A.1:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Sementes de girassol;  $\varphi=0,524$ ;  $d_v=0,755\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,52\text{g.cm}^{-3}$ ..... 116
- Figura A.2:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Sementes de abóbora;  $\varphi=0,523$ ;  $d_v=0,980\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,73\text{g.cm}^{-3}$ ..... 116
- Figura A.3:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Flocos de aveia;  $\varphi=0,431$ ;  $d_v=0,338\text{cm}$ ;  $\rho_p=1,20\text{g.cm}^{-3}$ ..... 117
- Figura A.4:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Lentilhas de plástico;  $\varphi=0,568$ ;  $d_v=0,705\text{cm}$ ;  $\rho_p=1,04\text{g.cm}^{-3}$ ..... 117
- Figura A.5:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Folhas de pingo de ouro;  $\varphi=0,201$ ;  $d_v=0,535\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,95\text{g.cm}^{-3}$ ..... 118
- Figura A.6:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Folhas de boldo cortadas em quadrados;  $\varphi=0,193$ ;  $d_v=0,506\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,92\text{g.cm}^{-3}$ . .... 118

- Figura A.7:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Quadrados de papel;  $\varphi=0,090$ ;  $d_v=0,296\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,83\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ..... 119
- Figura B.1:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; Partículas do Grupo I: Sementes de abóbora (SA);  $A_p=5,78\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,523$  e Lentilhas (LE);  $A_p=1,14\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,574$ ..... 121
- Figura B.2:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; Partículas do Grupo II: Brácteas de primavera (BP);  $A_p=24,0\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,072$ ; Folhas de aroeira (FA);  $A_p=3,40\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,213$  e Quadrados de boldo (QB);  $A_p=4,18\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,193$ . ..... 121
- Figura B.3:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; Partículas do Grupo III: Quadrados de papel (QP);  $A_p=3,06\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,090$ ; Lentilhas de plástico (LP);  $A_p=2,75\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,568$  e Lantejoulas (LA);  $A_p=1,12\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,228$ . ..... 122
- Figura C.1:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ;  $A=5,0\times 10^{-3}\text{m}$ ;  $\Gamma=0,5$ ; Partículas do Grupo I: Sementes de girassol (SG);  $A_p=3,42\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,524$  e Flocos de aveia (AB);  $A_p=0,84\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,431$ ..... 124
- Figura C.2:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ;  $A=5,0\times 10^{-3}\text{m}$ ;  $\Gamma=0,5$ ; Partículas do Grupo II: Folhas de pingo de ouro (FO);  $A_p=4,48\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,201$  e Folhas de buxinho (FB);  $A_p=53,9\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,167$ ..... 124
- Figura C.3:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ;  $A=5,0\times 10^{-3}\text{m}$ ;  $\Gamma=0,5$ ; Partículas do Grupo III: Lantejoulas (LA);  $A_p=1,12\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,228$ ; “Folhas” de papel (FP);  $A_p=8,98\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,063$  e Paetês (PA);  $A_p=9,80\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,107$ .. 125
- Figura C.4:**  $\Delta P$  em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Leito vibrofluidizado; Sementes de girassol;  $A_p=3,42\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,524$ ;  $\rho_p=0,52\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ..... 125
- Figura C.5:**  $\Delta P$  em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Leito vibrofluidizado; Flocos de aveia;  $A_p=0,84\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,431$ ;  $\rho_p=1,20\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . ..... 126
- Figura C.6:**  $\Delta P$  em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Leito vibrofluidizado;  $A=4,0\times 10^{-3}\text{m}$ ; “Folhas” de papel;  $A_p=8,98\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,063$ ;  $\rho_p=0,83\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . ..... 126
- Figura C.7:**  $\Delta P$  em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Leito vibrofluidizado;  $A=5,0\times 10^{-3}\text{m}$ ; “Folhas” de papel;  $A_p=8,98\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,063$ ;  $\rho_p=0,83\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . ..... 127

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

<b>Tabela 2.1:</b> Equações obtidas para diferentes categorias de partículas segundo seu fator de forma (Lucas <i>et al.</i> , 1986).....	17
<b>Quadro 2.2:</b> Termos descritivos utilizados para descrição da forma de objetos por comparação visual (Mohsenin, 1970).....	25
<b>Quadro 3.1:</b> Características físicas das partículas.....	40
<b>Tabela 3.2:</b> Partículas e respectivas massas utilizadas nos recheios dos leitos fixos.....	50
<b>Tabela 3.3:</b> Valores de $H_0$ e respectivas massas dos leitos de partículas utilizados nos experimentos.....	51
<b>Tabela 3.4:</b> Valores dos parâmetros vibracionais utilizados nos experimentos fluidodinâmicos.....	52
<b>Tabela 4.1:</b> Propriedades físicas dos materiais particulados.....	57
<b>Tabela 4.2:</b> Porosidade média dos leitos fixos constituídos por partículas com esfericidade $\phi$ e diâmetro volumétrico $d_v$ e respectivos números de Arquimedes.....	59
<b>Tabela 4.3:</b> Valores de permeabilidade e fator $c$ obtidos para os leitos fixos de partículas e respectivos números de Arquimedes.....	70
<b>Tabela 4.4:</b> Valores experimentais dos parâmetros $U_{mf}$ , $\Delta P_{mf}$ , $\varepsilon_b$ e $\varepsilon_{mf}$ , e números de Arquimedes dos sistemas gás-sólido.....	82
<b>Tabela 4.5:</b> Valores teóricos da velocidade de mínima fluidização e da queda de pressão de mínima fluidização.....	88
<b>Tabela 4.6:</b> Valores de $U_{mf}$ e $\Delta P_{mf}$ para diferentes alturas de leito estático, $H_0=3,5$ e $4,5$ cm.....	89

## LISTA DE SÍMBOLOS

a	Área da seção transversal do leito	[L <sup>2</sup> ]
A	Amplitude de vibração	[L]
A <sub>c</sub>	Área do menor círculo circunscrito ao material	[L <sup>2</sup> ]
A <sub>p</sub>	Área superficial da partícula	[L <sup>2</sup> ]
A <sub>proj</sub>	Área projetada da partícula	[L <sup>2</sup> ]
c	Fator c (Parâmetro da Equação de Forchheimer – Equação 12)	[-]
C	Circularidade	[-]
C <sub>1</sub> e C <sub>2</sub>	Constantes definidas pela Equação 8	[-]
d <sub>c</sub>	Diâmetro do menor círculo circunscrito ao material	[L]
d <sub>F</sub>	Dimensões de Feret	[L]
d <sub>i</sub>	Diâmetro do maior círculo inscrito ao material	[L]
d <sub>m</sub>	Diâmetro médio geométrico	[L]
d <sub>p</sub>	Diâmetro da partícula	[L]
d <sub>v</sub>	Diâmetro de volume	[L]
D	Diâmetro do leito	[L]
f	Frequência de vibração	[T <sup>-1</sup> ]
F <sub>z</sub>	Fator Zingg	[-]
g	Aceleração da gravidade	[LT <sup>-2</sup> ]
H <sub>0</sub>	Altura do leito fixo	[L]
H <sub>mf</sub>	Altura do leito na mínima fluidização	[L]
l	Comprimento da partícula	[L]
l <sub>F</sub>	Comprimento de Feret da partícula	[L]
l <sub>1</sub> e l <sub>2</sub>	Dimensões da partícula definidas pela Equação 16	[L]
L	Comprimento do leito	[L]
m <sub>p</sub>	Massa da partícula	[M]
N	Parâmetro da Equação 16	[-]
p <sub>1</sub>	Pressão inicial no aparato desenvolvido por DAY (1965) para medir porosidade	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
p <sub>2</sub>	Pressão final no aparato desenvolvido por DAY (1965) para medir porosidade	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]

P	Perímetro da partícula	[L]
r	Raio das curvaturas do material	[L]
r'	Raio da curvatura do ângulo mais acentuado do material	[L]
R	Raio do maior círculo inscrito ou raio médio do material	[L]
U	Velocidade superficial do ar	[L.T <sup>-1</sup> ]
U <sub>mf</sub>	Velocidade de mínima fluidização	[L.T <sup>-1</sup> ]
U <sub>mm</sub>	Velocidade mínima de mistura	[L.T <sup>-1</sup> ]
U <sub>mvf</sub>	Velocidade mínima de vibrofluidização	[L.T <sup>-1</sup> ]
V <sub>b</sub>	Volume do leito de partículas	[L <sup>3</sup> ]
V <sub>p</sub>	Volume da partícula	[L <sup>3</sup> ]
V <sub>s</sub>	Volume do material sólido	[L <sup>3</sup> ]
w	Largura da partícula	[L]
w <sub>F</sub>	Largura de Feret da partícula	[L]

### SÍMBOLOS GREGOS

δ	Espessura da partícula	[L]
ε	Porosidade	[-]
$\bar{\varepsilon}_b$	Porosidade bulk média do leito	[-]
ε <sub>mf</sub>	Porosidade do leito na mínima fluidização	[-]
ε <sub>p</sub>	Porosidade da partícula	[-]
ε <sub>b</sub>	Porosidade do leito (ou bulk)	[-]
ε <sub>t</sub>	Porosidade total do leito	[-]
φ	Esfericidade da partícula	[-]
κ	Permeabilidade	[L <sup>2</sup> ]
μ	Viscosidade do fluido	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup> ]
ρ	Densidade do fluido	[ML <sup>-3</sup> ]
ρ <sub>s</sub>	Massa específica real da partícula	[ML <sup>-3</sup> ]
ρ <sub>p</sub>	Massa específica aparente da partícula	[ML <sup>-3</sup> ]
ρ <sub>b</sub>	Massa específica do leito de partículas (ou bulk)	[ML <sup>-3</sup> ]
ΔP	Queda de pressão no leito	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]
ΔP <sub>mf</sub>	Queda de pressão na mínima fluidização	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]

$\Gamma$  Adimensional de vibração [-]

### ADIMENSIONAIS

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

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

## RESUMO

A secagem de sistemas particulados com emprego de leitos fluidizados é uma operação unitária comum na indústria. Entretanto, a maioria dos trabalhos publicados foca a secagem de partículas regulares em estreita faixa de distribuição granulométrica. As características vantajosas dos leitos fluidizados têm levado alguns autores a propor seu uso na secagem de partículas com baixas esfericidades ( $\phi < 0,5$ ), fora da faixa usual de fluidização. A fim de contribuir para a compreensão do comportamento fluidodinâmico deste tipo de material, neste trabalho foi realizada uma caracterização fluidodinâmica de leitos fluidizados operando com partículas planas com esfericidades ( $\phi$ ) variando de 0,063 a 0,574, densidade bulk ( $\rho_b$ ) de 0,038 a 0,923 g.cm<sup>-3</sup> e relações  $A_p/V_p$  (área superficial pelo volume) entre 12 e 226 cm<sup>-1</sup>. As investigações experimentais foram realizadas em um leito fluidizado com altura de 0,30 m e seção de área transversal de 0,20 m x 0,11 m. O objetivo dos ensaios foi avaliar como a forma, dimensões e massa específica das partículas afetam a fluidização e suas características fluidodinâmicas. A vibrofluidização foi avaliada como alternativa de melhorar a qualidade da fluidização. De forma complementar, realizou-se uma caracterização em leito fixo com o intuito de avaliar a resistência que os meios constituídos por estas partículas oferecem à passagem do ar. Os ensaios foram realizados com 14 materiais, sendo 9 de origem natural (folhas, sementes e cereais) e 5 partículas manufaturadas de origem sintética. O uso destas partículas objetivou evitar a interferência da rugosidade superficial e minimizar variações no tamanho e na forma inerentes às partículas naturais, o que poderia dificultar a análise fluidodinâmica num estágio inicial. O comportamento fluidodinâmico, assim como, a qualidade da fluidização foram analisados através de curvas de  $\Delta P$  versus  $U$  e da observação visual do leito. Os resultados indicam que somente as partículas de esfericidades em torno de 0,5 e menores relações  $A_p/V_p$  apresentaram fluidização homogênea, semelhante à observada em leitos fluidizados de partículas convencionais. Para as partículas com  $\phi \leq 0,228$  foram obtidos padrões de fluidização irregulares e leitos altamente não homogêneos. As porosidades bulk dos leitos estáticos foram superiores a 80% para os leitos constituídos por folhas e variaram entre aproximadamente 30 e 70% para as demais partículas. Em geral, observou-se que  $\varepsilon_b$  e  $\varepsilon_{mf}$  tendem a diminuir com o aumento de  $Ar$ ,  $\Delta P_{mf}$  tende a diminuir quando  $Ar$  aumenta e  $U_{mf}$  não apresentou dependência clara em relação a este adimensional para a faixa de condições investigadas. A introdução de vibração não proporcionou reduções significativas

na  $U_{mf}$  para estas partículas e não melhorou significativamente a qualidade da fluidização obtida, exceto para as partículas de maiores esfericidades (em torno de 0,5). Contudo, em algumas condições, obtidas com partículas rígidas e de elevada área superficial, a vibração provocou o alinhamento das partículas no interior do leito, resultando em uma configuração onde a área de contato entre as partículas e o fluido é máxima, o que pode ser interessante para a secagem. Para as partículas de maiores  $\phi$ , o uso de vibração levou a uma melhora significativa na qualidade da fluidização.

## ABSTRACT

The use of fluidized beds as a unit operation for drying of particulate materials is common in industrial processes. However, most works published in the literature, focus the drying of uniform particles, in a narrow range of size distribution. The appealing characteristics of fluidization for drying led some authors to suggest its use for drying of particles of low sphericity ( $\phi < 0.5$ ), which are out of the range of usually fluidized particles. Aiming to contribute for the assessment of fluid dynamic behavior of this class of particles, in the present work was investigated the fluidization of flat particles, with  $\phi$  varying from 0.063 up to 0.574, bulk density ( $\rho_b$ ) from 0.038 to 0.923 g.cm<sup>-3</sup> and ratios  $A_p/V_p$  (superficial area to volume) between 12 and 226 cm<sup>-1</sup>. The essays were carried out in a fluidized bed with a height of 0.30 m, and cross section of 0.20 m x 0.11 m, which could be also operated as a vibro-fluidized bed. The tests aimed to investigate the effects of size, shape and specific mass of particles in fluidization and fluid-dynamic behavior of such particles. Vibro-fluidization was tested as an alternative to improve fluidization patterns. Fluid dynamic characteristic curves of  $\Delta P$  as a function of air velocity were also obtained for the fixed beds in order to evaluate the resistive parameters of these beds as a way to quantify their resistance to the air flow. Tests were conducted using 14 different particulate materials, 9 of them being natural particles (leaves, seeds and cereals) and 5 being manufactured particles. The use of manufactured particles allowed to minimize size distribution and shape variations that are inherent to the natural products, avoiding interfering effects that might complicate an initial analysis. The fluid dynamic behavior was investigated through experimental curves of  $\Delta P$  versus  $U$  and visual observation of the beds. The results showed that only the particles with sphericity around 0.5 and low ratios  $A_p/V_p$  presented homogeneous fluidization patterns, similar to the observed in fluidization of conventional particles. In fluidization of particles with  $\leq 0.228$  were observed poor fluidization patterns and highly non-homogeneous beds. The values of bulk porosity of static beds were higher than 80% for the beds constituted by leaves, and stayed between 30 and 70% for the remaining particles. The values of  $\varepsilon_b$  and  $\varepsilon_{mf}$  tended to decrease as the values of  $Ar$  increased, while  $\Delta P_{mf}$  tended to increase and  $U_{mf}$  showed no clear dependence of  $Ar$ . The use of vibration did not reduce significantly the values of  $U_{mf}$  and did not improve much the quality of fluidization as well, excepting for the particles of higher sphericity (around 0.5). But for some conditions obtained as fluidizing rigid particles,

with large superficial areas, the vibration did provoke the alignment of particles into the beds, leading to a packing in which the contact area between particle and fluid is optimized, which might be interesting as drying applications are concerned.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A secagem de materiais particulados utilizando leitos fluidizados é uma técnica que tem sido largamente aplicada em diversos setores da indústria. Este tipo de secador proporciona um bom efeito de mistura entre as fases e oferece elevadas taxas de transferência de calor e massa, propiciando melhor uniformidade e qualidade ao produto seco. Contudo, a maior parte dos estudos envolvendo operações de secagem em leitos fluidizados foca a secagem de materiais com forma esférica ou semelhante a uma esfera, com estreita distribuição de tamanhos. Liu *et al.* (2008) afirmam, entretanto, que muitos sistemas industriais gás-sólido são compostos por partículas não-esféricas. As partículas originárias de produtos naturais são um dos importantes exemplos de partículas com morfologias que fogem das usualmente utilizadas em processos de fluidização. Estas partículas possuem propriedades físicas singulares no que diz respeito à forma, tamanho, massa específica e rugosidade superficial, sendo consideradas partículas de difícil fluidização. Uma revisão da literatura especializada mostra que informações acerca do comportamento fluidodinâmico de leitos fluidizados e vibrofluidizados operando com partículas de baixa esfericidade são escassas. No entanto, as características favoráveis destes equipamentos têm levado alguns autores a investigarem sua aplicação na secagem de algumas espécies de folhas (Shah e Goyel, 1980; Temple e van Boxtel, 1999; Zanoelo, 2007) e sementes (Almeida e Rocha, 2002).

Para entender melhor o processo de secagem envolvendo partículas irregulares e de baixas esfericidades, a caracterização do comportamento fluidodinâmico destas partículas é de fundamental importância. É conhecido que a forma irregular, tamanhos extremos e baixas massas específicas interferem na qualidade da fluidização e, assim, as informações baseadas no conhecimento da fluidização convencional nem sempre podem ser estendidas para este tipo de partícula. Segundo Cui e Grace (2007), geralmente parece-se assumir que o projeto e a operação de equipamentos envolvendo partículas de origem natural possam ser baseados nos conhecimentos e metodologias de um leito fluidizado convencional. Entretanto, estas partículas possuem características suficientemente únicas e a importância de uma caracterização fluidodinâmica adequada tem sido subestimada. Os autores apontam a necessidade de se entender como as características morfológicas da partícula afetam o comportamento fluidodinâmico em escoamentos multifásicos e afirmam ser pouco provável que as correlações existentes para estimar a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) possam

fornecer resultados acurados para este tipo de partícula. A necessidade de se considerar a influência do fator de forma ( $\phi$ ) e da porosidade do leito ( $\varepsilon_{mf}$ ) na determinação da velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) tem sido enfatizada em muitos trabalhos encontrados na literatura (Lucas *et al.*, 1986; Reina *et al.*, 2000; Coltters e Rivas, 2004).

É interessante notar que a própria definição de qual fator de forma deve ser usado para caracterizar a forma de partículas planas e irregulares não é bem definida e distintas definições podem ser utilizadas dependendo da aplicação (Taylor, 2002). Na literatura podem ser encontradas muitas definições e técnicas diferentes para a determinação das propriedades físicas de materiais irregulares, entretanto estas definições variam entre diferentes autores.

Embora o leito fluidizado convencional promova um contato efetivo entre as fases sólida e fluida, a introdução de vibração mecânica vertical em um leito fluidizado convencional tem sido recomendada para a secagem de materiais difíceis de fluidizar, como materiais polidispersos adesivos e coesivos, visto que pode aumentar a eficiência da transferência de calor e massa, reduzir a velocidade e a queda de pressão na condição de mínima fluidização, além de reduzir o aparecimento de zonas mortas e canais preferenciais (Kunii e Levenpiel, 1991). Shah and Goyel (1980) verificaram que folhas de chá verde úmidas podem ser efetivamente fluidizadas com a adição de vibração e que os parâmetros vibracionais utilizados apresentam um efeito significativo na qualidade do chá obtido.

Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho é efetuar um estudo do comportamento fluidodinâmico em leito fluidizado e vibrofluidizado operando com partículas de baixa esfericidade. Os materiais utilizados foram partículas naturais (folhas, sementes e cereais) e manufaturadas, escolhidas com o objetivo de fornecer uma diversidade de características quanto à forma, tamanho, massa específica e textura superficial. O propósito desta pesquisa é avaliar o efeito destes parâmetros no comportamento fluidodinâmico dos leitos, assim como nos parâmetros dinâmicos, tais como  $U_{mf}$ ,  $\varepsilon_{mf}$  e  $\Delta P_{mf}$ . De forma complementar, será realizada uma caracterização fluidodinâmica em leito fixo com o intuito de se obter informações sobre a resistência que os meios constituídos por estas partículas oferecem à passagem do ar; para tanto, propôs-se efetuar um estudo sobre o tema por meio das seguintes etapas:

- adaptações no equipamento de leito vibrofluidizado de geometria retangular e instalação de um sistema de aquisição de dados;
- adaptação e instrumentação de um leito fixo com geometria circular;

- 
- caracterização das partículas utilizadas quanto à forma, dimensões, área, volume, massa específica, dentre outras;
  - realização de ensaios fluidodinâmicos em leito fluidizado para avaliar os efeitos das características morfológicas das partículas (forma, tamanho, rugosidade superficial, massa específica) no processo de fluidização;
  - realização de testes fluidodinâmicos em leito vibrofluidizado para avaliar a influência da vibração na obtenção de uma fluidização de melhor qualidade;
  - realização de ensaios fluidodinâmicos em leito fixo para determinar a permeabilidade dos leitos e avaliar a reprodutibilidade do empacotamento de leitos constituídos por partículas planas e irregulares.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica apresentada aborda os aspectos fluidodinâmicos fundamentais relacionados aos leitos fluidizado, vibrofluidizado e fixo, enfatizando a operação destes leitos com partículas de baixas esfericidades, e estudos envolvendo a caracterização das propriedades físicas das partículas a fim de se entender como estas propriedades influem no comportamento fluidodinâmico de escoamentos multifásicos.

#### **2.1 Leito Fluidizado**

A operação de fluidização existe desde 1926 e foi inicialmente concebida para a gaseificação de carvão. Entretanto, somente a partir da década de 40, a técnica expandiu-se com a construção do primeiro leito fluidizado para craqueamento de carvão e experimentou um acentuado desenvolvimento em muitas outras áreas. Atualmente os leitos fluidizados apresentam diversas aplicações industriais. Alguns exemplos típicos de aplicações de leitos fluidizados na indústria são as sínteses e reações catalíticas, a regeneração catalítica, a combustão e gaseificação de carvão, além do emprego em processos não reacionais como, por exemplo, na secagem de partículas, no recobrimento e granulação de sólidos, etc. (Kunii e Levenspiel, 1969).

Os sistemas fluidizados gás-partícula são amplamente utilizados na indústria química para a secagem de materiais. Suas principais vantagens estão relacionadas ao fato de que este tipo de secador proporciona um excelente efeito de mistura entre as partículas e o gás, oferecendo, assim, altas taxas de transferência de calor e massa e resultando em uma secagem bastante homogênea.

Em um secador de leito fluidizado, o leito de partículas sólidas oferece uma resistência ao escoamento do fluido que passa verticalmente através dele e, à medida que se aumenta a vazão de ar, aumenta-se também a força de arraste exercida pelo fluido sobre as partículas. Quando esta força de arraste se torna igual ao peso das partículas no leito, as mesmas são erguidas pelo fluido, a separação entre as partículas aumenta e o leito torna-se fluidizado.

O projeto e a operação de um secador de leito fluidizado devem ser realizados com o conhecimento de alguns parâmetros característicos, dentre eles, pode-se destacar: velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ), queda de pressão na condição de mínima fluidização ( $\Delta P_{mf}$ ), porosidade do leito fixo ( $\epsilon$ ) e porosidade na mínima fluidização ( $\epsilon_{mf}$ ). Assim, a análise fluidodinâmica se torna de fundamental importância para a otimização do processo de fluidização possibilitando o dimensionamento apropriado de equipamentos, juntamente com a definição de parâmetros de operação adequados (Kunni e Levenspiel, 1991).

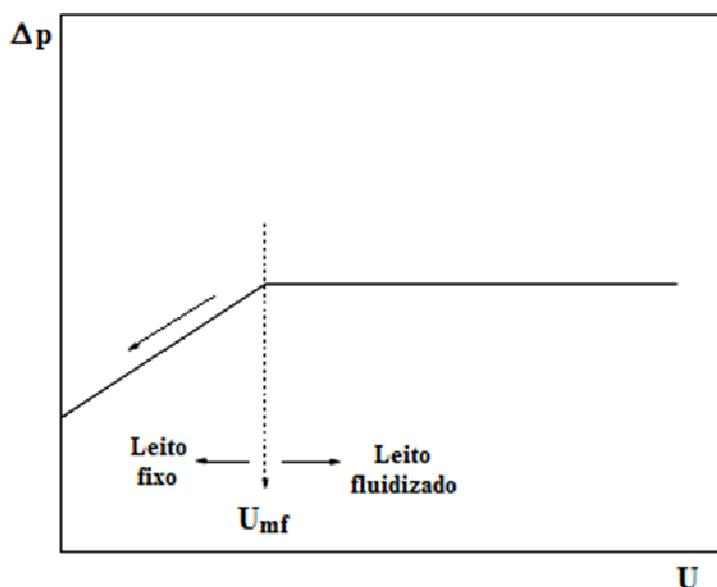
### 2.1.1 Propriedades Fluidodinâmicas de um Leito Fluidizado

Para analisar o comportamento fluidodinâmico da interação fluido-partículas em leito fluidizado é necessário avaliar sua curva característica, que corresponde a uma representação gráfica do comportamento da queda de pressão no leito em função da velocidade superficial ou da vazão de ar que o percola (Figura 2.1). Este diagrama é útil na identificação da qualidade da fluidização, especialmente quando as observações visuais não são possíveis (Kunii e Levenspiel, 1969).

A velocidade superficial do gás ( $U$ ) na qual um leito fixo torna-se um leito fluidizado é denominada velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ). Em um leito fluidizado bifásico, uma boa estimativa da velocidade de mínima fluidização é obtida pela intersecção das duas linhas retas que descrevem a curva experimental da queda de pressão no leito ( $\Delta P$ ) como uma função da velocidade superficial do ar. Nesta situação, o ponto em que ocorre a transição de um leito fixo para um leito fluidizado é bem-definida e a incerteza dos valores estimados é muito pequena (Daleffe e Freire, 2004). A velocidade de mínima fluidização é uma das variáveis operacionais mais importantes em um projeto de unidade de fluidização sendo esta relevância evidenciada pela abundância de trabalhos experimentais reportados na literatura para uma grande variedade de condições (Coltters e Rivas, 2004; Lacerda Júnior *et al.*, 2005).

Como pode ser visto pela Figura 2.1, para valores de velocidade superficial do ar relativamente baixos (região de leito fixo) tem-se que a queda de pressão no leito aumenta de forma aproximadamente proporcional à velocidade do gás. Com um aumento no fluxo de ar, atinge-se o ponto definido como de mínima fluidização ou de fluidização incipiente (a ordenada deste ponto corresponde à queda de pressão de mínima fluidização,  $\Delta P_{mf}$ ). Um

aumento na velocidade do gás a partir deste ponto, provoca a expansão do leito fixo ou em outras palavras, a porosidade ou fração de vazios cresce de  $\epsilon$  para  $\epsilon_{mf}$  (porosidade do leito na condição de mínima fluidização), resultando em uma diminuição na queda de pressão para a pressão estática do leito. Para velocidades acima da  $U_{mf}$ , a queda de pressão por unidade de comprimento do leito permanece constante para um regime fluidodinâmico estável e fluidização de boa qualidade. Este comportamento ocorre porque a fase densa gás-sólido é bem aerada e pode deformar-se facilmente apresentando, assim, uma resistência desprezível (Kunii e Levenspiel, 1969).



**Figura 2.1:** Representação de uma curva de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para um leito fluidizado convencional (adaptado de Kunii e Levenspiel, 1969).

Inúmeros fatores podem afetar a qualidade da fluidização de um sistema gás-sólido, tais como a geometria do leito, sistema de distribuição do gás na entrada do leito, altura estática do leito, tipo, tamanho médio e distribuição de tamanhos do sólido utilizado. Coltters e Rivas (2004) ressaltam a forte dependência das propriedades físicas e químicas da superfície da partícula na velocidade de mínima fluidização. Segundo os autores, a influência da natureza da superfície das partículas faz com que equações empíricas para prever a velocidade de mínima fluidização sejam aplicadas em casos específicos, não podendo ser generalizadas.

Na literatura podem ser encontradas inúmeras correlações para estimar a velocidade de mínima fluidização em leito fluidizado. Lippens e Mulder (1993) apresentam mais de 30 correlações de diversos autores para determinação direta da velocidade de mínima fluidização, que foram reformuladas como funções de grupos adimensionais como os números de Arquimedes e Reynolds na mínima fluidização. Colters e Rivas (2004) propõem o uso de uma equação original para prever a velocidade de mínima fluidização sem a necessidade de realizar determinações experimentais de porosidades do leito e fatores de forma. Eles testaram esta nova correlação usando 189 medidas relatadas na literatura para 90 diferentes materiais e concluíram haver boa concordância com os dados experimentais.

Dentre as equações propostas na literatura para estimar a velocidade de mínima fluidização, uma das mais amplamente utilizadas é a correlação empírica de Wen e Yu (1966), válida para esferas na faixa de  $(Re_p)_{mf} < 20$ :

$$U_{mf} = \frac{(Re_p)_{mf} \mu}{\rho_p d_p} \quad (1)$$

onde:

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

$$Ar = \frac{(\varphi d_v)^3 \rho (\rho_p - \rho) g}{\mu^2} \quad (3)$$

Para leitos fluidizados operando com partículas esféricas ou com formas próximas à de uma esfera, o comportamento fluidodinâmico do sistema, bem como os parâmetros que influem no processo de fluidização, se encontram satisfatoriamente definidos na literatura clássica.

## 2.2 Leito Vibrofluidizado

Um leito vibrofluidizado consiste de um leito fluidizado convencional ao qual são aplicadas vibrações mecânicas verticais, horizontais ou inclinadas, a fim de se melhorar as propriedades de transporte. Data de 1938 um dos primeiros artigos publicados sobre a aplicação comercial de um leito vibrofluidizado, quando Allis Halmers operou uma unidade para secagem de molibdênio (Gupta e Mujumdar, 1980b). Atualmente, os leitos vibrofluidizados têm encontrado numerosas aplicações industriais para a secagem ou processamento térmico de diversos tipos de materiais particulados, merecendo destaque os materiais considerados de difícil fluidização, além do uso como reatores catalíticos heterogêneos, granuladores, resfriadores, para recobrimento de partículas, etc. (Mujumdar, 1984).

Segundo Strumillo e Pakowski (1980), a introdução de vibração em um leito fluidizado oferece uma série de vantagens em relação a um leito fluidizado convencional. De acordo com os autores, a vibração leva a um aumento considerável nas taxas de transferência de calor e massa, além de proporcionar uma mistura mais uniforme entre as fases. Mujumdar (1984) afirma ainda que a inserção de vibração possibilita uma maior facilidade no controle do tempo de residência e na intensidade de agitação pela manipulação dos parâmetros vibracionais, além de possibilitar a fluidização de materiais adesivos e pegajosos. A vibração quando usada corretamente, pode provocar reduções significativas na rigidez de uma massa de sólidos que apresentam tendência de se aglomerar ou colar uns sobre os outros (como em leitos de partículas pequenas - 0,1 a 0,5 cm, ou de materiais úmidos) rompendo as forças de atração existentes entre as partículas e melhorando, assim, a qualidade da fluidização (Della Tonia Júnior, 1990). Zaitsev *et al.* (1976) observam que a introdução de vibração no leito pode induzir um estado de fluidização impossível de ser obtido somente com o auxílio do escoamento de ar.

### 2.2.1 Adimensional de Vibração ( $\Gamma$ )

Para o estudo do comportamento dinâmico de leitos vibrofluidizados, é importante quantificar a energia vibracional imposta ao sistema. A forma mais utilizada na

literatura para quantificar esta energia vibracional inserida no leito é através do adimensional de vibração proposto por Chlenov e Mikhailov (1972). Este adimensional é frequentemente referido como parâmetro vibracional e é definido como:

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g} \quad (4)$$

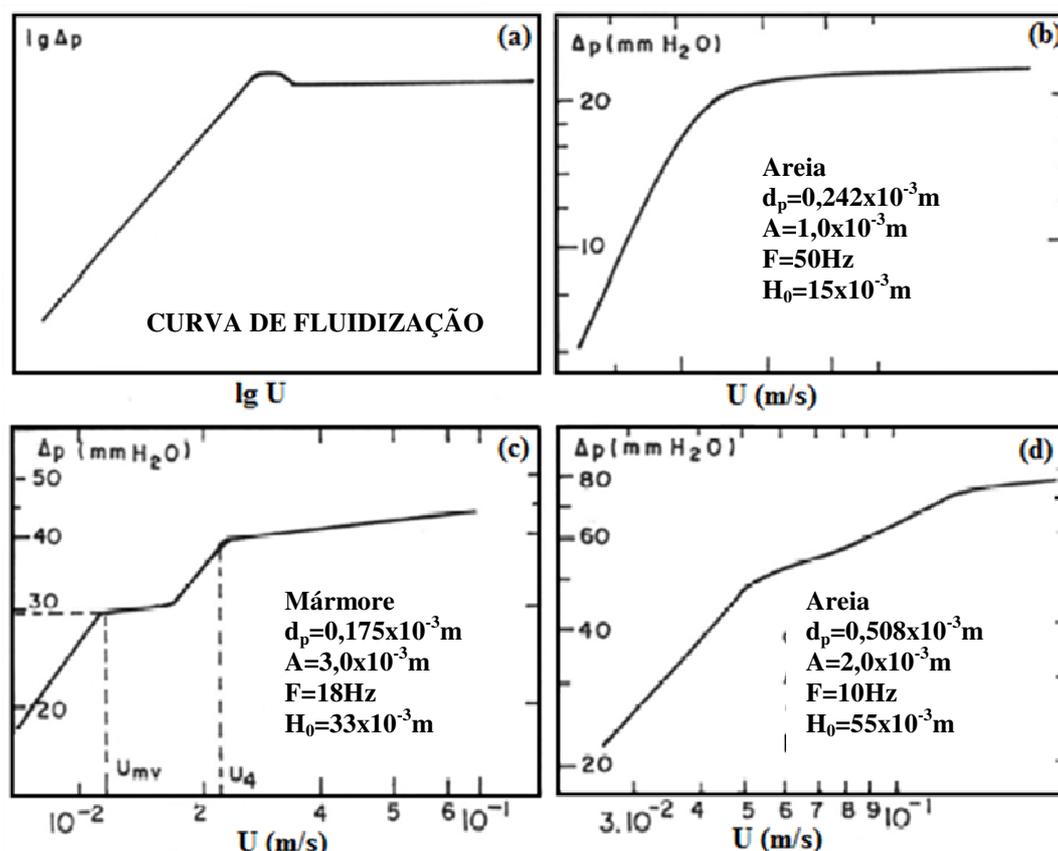
onde A e f são, respectivamente, a amplitude e a frequência de vibração e g é a aceleração gravitacional. De acordo com Erdész (1990), este adimensional de vibração pode ser fisicamente interpretado como sendo a relação entre a aceleração média vibracional exercida sobre o sistema e a aceleração gravitacional.

O parâmetro vibracional ( $\Gamma$ ) é frequentemente utilizado na literatura como um parâmetro universal para caracterizar os efeitos da vibração em leitos fluidizados. Entretanto, Daleffe *et al.* (2005) realizaram uma série de investigações experimentais sobre o comportamento fluidodinâmico de leitos vibrofluidizados e constataram a existência de diferentes padrões dinâmicos para idênticos valores de  $\Gamma$ , já que um mesmo valor de  $\Gamma$  pode ser obtido usando diferentes combinações entre amplitude (A) e frequência de vibração (f). Os autores questionam se os efeitos da vibração sobre a dinâmica do leito podem ser representados somente pelo adimensional de vibração e sugerem que, além deste, a amplitude ou frequência vibracional deva ser utilizada para a caracterização completa de uma dada condição operacional.

### 2.2.2 Propriedades Fluidodinâmicas de um Leito Vibrofluidizado

A técnica comumente utilizada para investigar os efeitos da vibração na estrutura do leito fluidizado faz uso de sua curva característica de fluidização, ou seja, da relação entre a perda de pressão do gás no leito e da velocidade ou vazão do ar que o percola. Na Figura. 2.2 podem ser visualizadas algumas curvas características apresentadas por Strumillo e Pakowski (1980) para leitos vibrofluidizados. A forma destas curvas é principalmente dependente da relação entre as forças vibracionais e as forças fluidodinâmicas agindo sobre o leito.

A curva do tipo “a” é típica de leitos fluidizados convencionais. Quando submetida à vibração, esta curva é amortecida resultando em uma curva do tipo “b”, onde nenhum ponto máximo de pressão é observado e a região de transição entre os regimes fixo e fluidizado se estende em uma ampla faixa de velocidades do fluido. Para baixas acelerações vibracionais, entretanto, a curva “a” também pode ser observada.



**Figura 2.2:** Tipos de curvas fluidodinâmicas: (a) leitos fluidizados; (b), (c) e (d) leitos vibrofluidizados (adaptado de Strumillo e Pakowski, 1980).

A curva do tipo “c” foi inicialmente relatada por Bratu e Jinescu (1971). Esta curva apresenta como principal característica a presença de dois patamares ao invés de apenas um, como é observado para os leitos fluidizados convencionais. No primeiro ponto de inflexão inicia-se o movimento das partículas no leito, uma função da amplitude e da frequência de vibração, e no segundo, atinge-se uma fluidização desenvolvida. Neste caso, a vazão de ar é suficiente para sustentar as partículas, reduzindo a contribuição da vibração. Na curva do tipo “d”, a região de transição entre os regimes de leito fixo e fluidizado estende-se

em uma ampla faixa de velocidades do fluido e a curva pode ser subdividida em três segmentos de reta distintos. As curvas dos tipos “c” e “d” são obtidas em casos típicos onde a vibração domina a dinâmica do leito.

Para o leito vibrofluidizado, dependendo da faixa dos parâmetros vibracionais utilizados, a transição entre os regimes fixo e fluidizado pode ocorrer em uma considerável faixa de velocidades do gás, dificultando a determinação da velocidade de mínima fluidização pelo uso da metodologia proposta para leitos fluidizados convencionais. Gupta e Mujumdar (1980a) observaram em seus experimentos que a velocidade de mínima fluidização estimada por esta metodologia aumentava com a frequência vibracional. De acordo com os autores, os resultados obtidos eram fisicamente incoerentes, pois a velocidade de mínima vibrofluidização ( $U_{mvf}$ ) deveria diminuir com o aumento do adimensional de vibração, para uma amplitude vibracional constante. Assim, eles introduziram o conceito de velocidade mínima de mistura ( $U_{mm}$ ). Esta velocidade é determinada visualmente e é definida como a velocidade a partir da qual as partículas iniciam movimento umas com relação às outras no interior do leito. Entretanto, devido à dificuldade na visualização do momento em que as partículas iniciam movimento, a determinação desta velocidade torna-se muitas vezes impraticável. Garim e Freire (1994) verificaram o aumento da velocidade de mínima fluidização com o aumento da intensidade vibracional em um leito de partículas de vidro “ballotini” para adimensionais de vibração entre 0,0 e 1,0. Apesar de sugerirem que a medida de  $U_{mm}$  seria provavelmente o método mais adequado para leitos vibrofluidizados, os autores não puderam determiná-la devido à dificuldade encontrada em visualizar o momento em que as partículas começavam a se movimentar.

Assim como para a velocidade de mínima fluidização, a vibração deve provocar reduções na queda de pressão em leitos vibrofluidizados. Mujumdar (1984) realizou um estudo experimental com partículas de polietileno e peneiras moleculares e constatou que a queda de pressão de mínima fluidização reduziu como resultado da inserção de vibração no leito. Segundo o autor, a extensão da redução depende da altura do leito, da massa específica da partícula e da amplitude vibracional.

### 2.3 Fluidização e Vibrofluidização de Partículas Planas

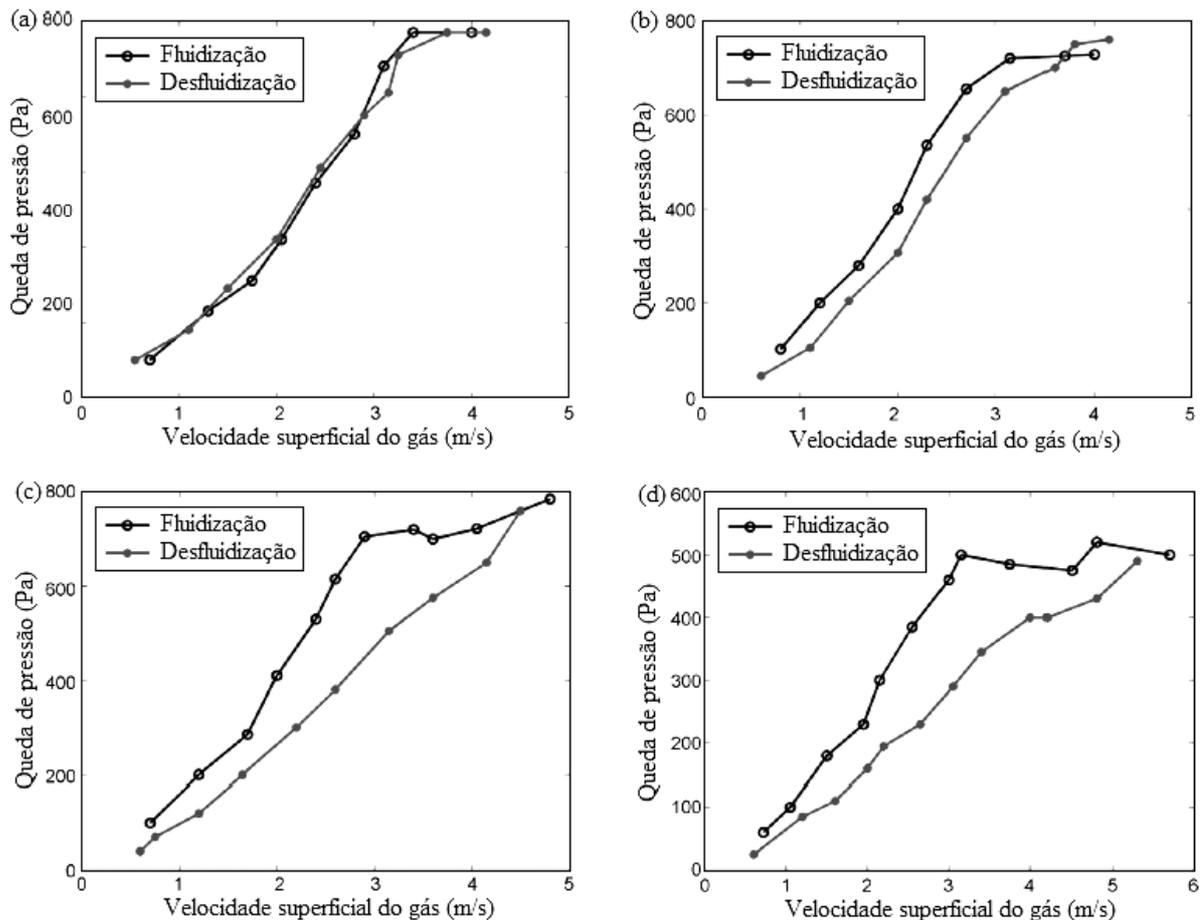
Os leitos fluidizados têm sido largamente utilizados em processos de secagem dos mais diversos tipos de materiais devido à sua versatilidade para operar com materiais em uma larga faixa de tamanhos e também por proporcionarem um bom efeito de mistura, assegurando um excelente contato gás-sólido e elevadas taxas de transferência de calor e massa. Entretanto, como apontado por Cui e Grace (2007), a grande maioria dos trabalhos publicados em processos particulados foca a secagem de materiais de formas geométricas regulares, semelhantes a esferas, com poucos trabalhos encontrados para partículas de tamanhos extremos e formas irregulares, como é o caso das partículas de origem natural, como folhas, sementes e grãos, que encontram inúmeras aplicações nas indústrias químicas, farmacêuticas, de cosméticos e produtos de limpeza, alimentícia e também no setor agrícola.

Estas partículas apresentam características como tamanho, massa específica e fator de forma singulares, características estas que possuem notável influência no comportamento fluidodinâmico de leitos fluidizados e vibrofluidizados (Gupta e Mujumdar, 1980a; Verma e Saxena, 1984; Reina *et al.*, 2000). Assim, as informações baseadas no conhecimento da fluidização convencional nem sempre podem ser estendidas para este tipo de partícula, gerando a necessidade de se estudar o comportamento fluidodinâmico característico destes materiais. De acordo com Liu *et al.* (2008), muitos sistemas industriais gás-sólido consistem de partículas não-esféricas, sendo que as características destes processos, como o de fluidização, dependem grandemente da morfologia da partícula. A forma, geralmente caracterizada pela esfericidade, é uma das propriedades que definem a morfologia. Cui e Grace (2007) apresentam uma revisão da literatura na qual discutem assuntos pertinentes à fluidização, mistura e segregação de partículas de biomassa em leito fluidizado. Os autores apontam a necessidade de se entender como as propriedades fluidodinâmicas de leitos fluidizados são afetadas pelo tamanho e forma extrema de “partículas de biomassa”.

Poucos trabalhos relacionados a leitos fluidizados e vibrofluidizados operando com partículas de baixa esfericidade foram encontrados na literatura consultada. Além disso, em alguns destes trabalhos, falta uma caracterização física adequada das partículas utilizadas.

Liu *et al.* (2008) realizaram um estudo da fluidização de partículas não-esféricas de densidade  $\rho_p = 1,476 \text{ g.cm}^{-3}$ . Eles utilizaram partículas com forma cilíndrica ( $\phi = 0,80$ ), cilíndrica com base quadrada ( $\phi = 0,60$ ) e partículas semelhantes a placas circulares (esfericidades de 0,70 a 0,85). Os autores constataram uma variação na queda de pressão no

leito com a esfericidade para ambos os estágios, de fluidização e desfluidização, sugerindo uma tendência das partículas não-esféricas de se acumular no interior do leito (Figura 2.3), resultando em uma fluidização de má qualidade.



**Figura 2.3:** Variação da queda de pressão com a esfericidade, definida pela relação entre a área superficial de uma esfera com o mesmo volume da partícula e a superfície da partícula: (a)  $\phi=1,00$ ; (b)  $\phi=0,85$ ; (c)  $\phi=0,70$  e (d)  $\phi=0,60$  (adaptado de Liu *et al.*, 2008).

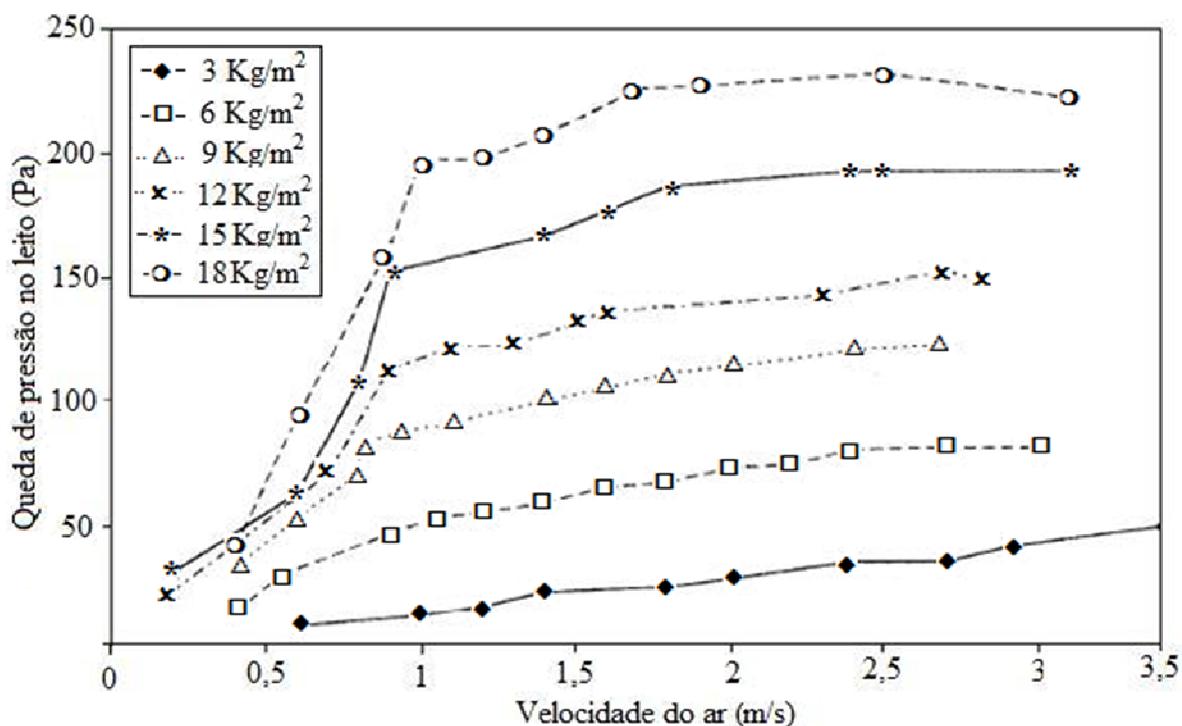
De acordo com os autores, partículas não-esféricas possuem valores de  $U_{mf}$  inferiores aos de partículas esféricas e os valores de  $U_{mf}$  obtidos variam para as diferentes formas de partículas. Para partículas cilíndricas de baixa esfericidade foram encontrados valores de velocidade de mínima fluidização menores, enquanto que as partículas na forma de placas com relação comprimento/espessura igual a 2, apresentaram valores mais altos de  $U_{mf}$ . Estas partículas tiveram também valores mais altos de  $U_{mf}$  do que os cilindros com base quadrada de mesma esfericidade.

Os autores sugerem em seu trabalho o uso de um fator de forma dinâmico ou fator Zingg ( $F_z$ ) para quantificar os efeitos da morfologia da partícula na fluidização de materiais regulares com esfericidade entre 0,60 e 0,85. O fator Zingg é definido como  $F_z = l\delta/w^2$ , onde  $l$ ,  $w$  e  $\delta$  são, respectivamente, o comprimento, a largura e a espessura da partícula.

Gupta e Mujumdar (1980a) avaliaram a influência do tamanho, densidade e fator de forma de partículas em leitos vibrofluidizados. Como partículas planas eles utilizaram discos de polietileno de densidade bulk  $0,576 \text{ g.cm}^{-3}$ , dimensão média de 0,31 cm e esfericidade igual a 0,55. Como resultado, obtiveram que o tamanho e a forma da partícula exerceram efeito de primeira ordem na queda de pressão obtida no leito vibrofluidizado.

Temple e van Boxtel (1999) estudaram parâmetros fluidodinâmicos para a fluidização de folhas de chá preto secas com dimensão média de 0,084 cm para diferentes cargas de leito. Eles observaram que a elutriação das partículas leves ocorria logo após o início da fluidização, reduzindo as velocidades de escoamento de ar aceitáveis para uma estreita faixa. Os autores notaram também que o projeto da placa distribuidora influenciava a estabilidade da fluidização, sendo que placas com menor percentual de área aberta permitiam que a fluidização fosse atingida para um maior número de cargas do leito. Fluidização de boa qualidade não foi obtida em todas as condições testadas, não sendo possível, em alguns casos, obter clara transição entre as regiões de leito fixo e expandido (Figura 2.4). Onde foi possível obter boa fluidização, a velocidade de mínima fluidização ficou entre 0,9 e 1,2  $\text{m.s}^{-1}$ .

Zanoelo (2007) realizou um estudo teórico e experimental sobre as resistências simultâneas ao transporte de calor e massa na secagem de folhas de chá mate (*Ilex paraguariensis*) cortadas na forma de quadrados, com lados variando de 0,65 a 1,3 cm e espessura igual a 0,4 cm. Ainda que o objetivo principal do trabalho não fosse caracterizar parâmetros fluidodinâmicos, o autor observa que as partículas de mate, em geral, não apresentaram boa fluidização como consequência da elevada área superficial das mesmas, levando à formação de blocos coesivos de folhas no topo do leito. Onde boa fluidização foi atingida, o valor para a velocidade de mínima fluidização permaneceu entre 0,6 e 1,0  $\text{m.s}^{-1}$ . Segundo o autor, uma linha horizontal era formada no topo do leito devido às características agregativas das partículas, permitindo a determinação da altura do leito em que o movimento relativo das partículas se iniciava. Assim, a porosidade do leito na condição de mínima fluidização foi calculada e um valor de aproximadamente 0,92 foi encontrado para todas as condições experimentais testadas.



**Figura 2.4:** Queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar para uma placa distribuidora com 13% de área aberta (adaptado de Temple e van Boxtel, 1999).

Shah e Goyel (1980) estudaram as características da secagem de folhas de chá verde (cortadas em pedaços) em um leito vibrofluidizado. Nenhuma caracterização do material utilizado, no que diz respeito à forma, dimensões, massa específica, entre outras, foi realizada. Entretanto, as partículas passaram por etapas de emurchamento, enrolamento e fermentação antes de serem submetidas ao processo de secagem. Os autores concluíram que o chá úmido pode ser efetivamente fluidizado com a adição de vibração, ocorrendo uma exposição extremamente uniforme do chá ao ar quente e, assim, obtendo-se um produto com qualidade superior à do chá obtido em secadores convencionais. Os autores constataram que o grau de fluidização e a qualidade do chá produzido variavam com a frequência e a amplitude vibracional. Produto de boa qualidade era obtido dentro de uma determinada faixa de excitação, e quando esta era continuamente aumentada, a qualidade do chá diminuía. Além disso, observaram que para valores de percentagem de abertura da placa distribuidora muito altos ou baixos, a taxa de secagem e o grau de fluidização das partículas no leito eram seriamente afetados.

Almeida e Rocha (2002) realizaram um estudo fluidodinâmico com diferentes cargas de sementes de brócolos (*Brassica oleraceae* L. variedade *Italica*) em um leito

fluidizado. As propriedades físicas das sementes foram determinadas: diâmetro médio de Sauter igual a 0,17 cm, densidade real de 1,08 g.cm<sup>-3</sup>, porosidade média do leito fixo de sementes de 0,34 e esfericidade igual a 0,48. As curvas fluidodinâmicas obtidas para todas as cargas de sementes apresentaram características similares, entretanto, a curva obtida para a altura estática do leito ( $H_0$ ) de 6,0 cm apresentou menores variações de queda de pressão no leito, tornando mais fácil a visualização do comportamento fluidodinâmico. Os valores experimentais obtidos para as velocidades de mínima fluidização foram comparados com os previstos pela equação de Ergun, simplificada por Chitester *et al.* (Kunii e Levenspiel, 1991):

$$\frac{d_p U_{mf} \rho}{\mu} = \left[ 28,7^2 + 0,0494 \left( \frac{d_p^3 \rho (\rho_p - \rho) g}{\mu^2} \right) \right]^{0,5} - 28,7 \quad (5)$$

A queda de pressão na mínima fluidização ( $\Delta P_{mf}$ ) foi calculada pela equação baseada no princípio da fluidização, em que no ponto de mínima fluidização a perda de carga através do leito de partículas se iguala ao peso aparente das mesmas:

$$\Delta P_{mf} = H_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho) g \quad (6)$$

As previsões teóricas encontradas tanto para  $U_{mf}$  quanto para  $\Delta P_{mf}$  foram próximas dos valores experimentais, com desvios relativos inferiores a 20% (exceto o valor de  $\Delta P_{mf}$  para  $H_0 = 1,9$  cm). As autoras concluíram ser possível fluidizar as sementes de brócolos, em escala de laboratório, sem causar quaisquer danos às estruturas essenciais do embrião, possibilitando posterior germinação das sementes.

Para partículas consideradas de difícil fluidização, como aquelas com formas, tamanhos e massas específicas peculiares, as correlações convencionais utilizadas para a previsão da velocidade de mínima fluidização são improváveis de fornecer resultados acurados (Cui e Grace, 2007).

Muitos trabalhos têm enfatizado a necessidade de se considerar a influência do fator de forma ( $\phi$ ) e da porosidade do leito na condição de mínima fluidização ( $\varepsilon_{mf}$ ) para a determinação da velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ) (Coltters e Rivas, 2004). Apesar da dificuldade associada na determinação desses fatores e, assim, das constantes  $C_1$  e  $C_2$ , o uso da equação de Ergun aplicada à fluidização incipiente é considerado por muitos autores como o melhor caminho para relacionar os parâmetros característicos do leito fluidizado ( $Ar$  e  $Re_{mf}$ ),

pois leva em conta o tipo de partícula, assim como o comportamento fluidodinâmico do agente fluidizante (Reina *et al.*, 2000):

$$\text{Re}_{\text{mf}} = \left[ \left( 42,857 \frac{C_2}{C_1} \right)^2 + \frac{\text{Ar}}{1,75C_1} \right]^{1/2} - 42,857 \frac{C_2}{C_1} \quad (7)$$

onde,

$$C_1 = \frac{1}{\varphi \epsilon_{\text{mf}}^3} \quad \text{e} \quad C_2 = \frac{1 - \epsilon_{\text{mf}}}{\varphi^2 \epsilon_{\text{mf}}^3} \quad (8)$$

Lucas *et al.* (1986) classificaram partículas sólidas em três diferentes categorias de acordo com a sua esfericidade e determinaram valores ótimos para as constantes  $C_1$  e  $C_2$  em cada categoria, obtendo equações em que, segundo os autores, o erro no cálculo da  $U_{\text{mf}}$  seria minimizado. As equações obtidas para as categorias de partículas classificadas de acordo com seu fator de forma são apresentadas na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1:** Equações obtidas para diferentes categorias de partículas segundo seu fator de forma (Lucas *et al.*, 1986).

<b>Categoria</b>	<b>Fator de forma</b>	<b>Equação</b>
Redonda	$0,8 \leq \varphi \leq 1,0$	$\text{Re}_{\text{mf}} = (29,5^2 + 0,0357\text{Ar})^{1/2} - 29,5 \quad (9)$
Fina, afiada	$0,5 \leq \varphi < 0,8$	$\text{Re}_{\text{mf}} = (32,1^2 + 0,0571\text{Ar})^{1/2} - 32,1 \quad (10)$
Outras formas	$0,1 < \varphi < 0,5$	$\text{Re}_{\text{mf}} = (25,2^2 + 0,0672\text{Ar})^{1/2} - 25,2 \quad (11)$

Reina *et al.* (2000), analisando os resultados obtidos por Lucas *et al.* (1986), sugerem que cada ponto experimental requer valores específicos de  $C_1$  e  $C_2$  e, assim, formulações baseadas em valores únicos destas constantes para cobrir uma larga faixa de fatores de forma, introduzem necessariamente um erro significativo na determinação da  $U_{\text{mf}}$ . Os autores propuseram uma correlação para prever a velocidade de mínima fluidização de um sistema polidisperso de partículas de aparas de madeira de baixa esfericidade média ( $\varphi =$

0,35). Segundo eles, a baixa massa específica das partículas e a forma altamente irregular apresentam notável influência em seu comportamento fluidodinâmico, produzindo leitos de alta porosidade média,  $\varepsilon_{mf} = 0,61$ .

Yu e Standish (1993) observaram em seu trabalho que partículas classificadas como de difícil fluidização, que são aquelas com fator de forma entre 0,1 e 0,5, apresentam altos valores de porosidades de leito quando comparadas com partículas de fatores de forma mais elevados.

## 2.4 Leito Fixo

O escoamento de fluidos em meios porosos tem sido largamente utilizado em diversas atividades industriais com o objetivo de promover o contato íntimo entre as fases envolvidas no processo. Algumas aplicações de leitos fixos são encontradas em torres de absorção, dessorção e adsorção, reatores de leitos catalíticos, filtros biológicos para tratamento de águas residuais, reatores com enzimas imobilizadas, reatores para a oxidação de contaminantes orgânicos em gases residuais, na transferência de calor e massa em leitos particulados e em processos de secagem (Staněk, 1994).

Um fator significativo para a otimização do projeto e operação de leitos fixos é a determinação de como a vazão varia em função da diferença de pressão do meio poroso. A determinação desta relação pode ser realizada conhecendo-se alguma grandeza física que represente a resistência do meio poroso ao escoamento. Esta resistência pode ser expressa de diversas maneiras, como por exemplo, pelo fator de atrito ou pela permeabilidade ( $\kappa$ ).

O comportamento fluidodinâmico de colunas recheadas a altas vazões é descrito pela equação de Forchheimer, que relaciona a perda de carga com a velocidade superficial, segundo um polinômio de 2º grau (Equação 12). Esta equação apresenta a vantagem de separar os efeitos viscosos (1º termo do lado direito da equação) e inerciais (2º termo do lado direito da equação) sobre o escoamento. Os efeitos de interação viscosos são os gerados pelo atrito entre as moléculas do fluido e entre o fluido e o meio poroso, e os efeitos inerciais são causados pela turbulência do fluido escoante e/ou pela tortuosidade do meio poroso. Quanto mais tortuoso um meio poroso, maior a região de interação entre o fluido e as paredes do poro e maior é a perda de pressão durante o seu escoamento, principalmente a altas velocidades. A predominância de um ou outro termo para um determinado fluido é função da

faixa de velocidade utilizada. Em baixas velocidades, somente o 1º termo é significativo e, assim, a equação de Forchheimer se reduz à Lei de Darcy.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{\kappa} U + \frac{c\rho}{\sqrt{\kappa}} U^2 \quad (12)$$

onde  $\mu$  e  $\rho$  são, respectivamente, a viscosidade e a densidade do fluido newtoniano,  $\kappa$  e  $c$  são parâmetros que dependem apenas de fatores estruturais da matriz porosa na ausência de interações físico-químicas entre a matriz e o fluido (Massarani, 1989).

A Equação 12 é válida para o escoamento viscoso em meios isotrópicos homogêneos ou heterogêneos, ou seja, meios em que  $\kappa$  e  $c$  são, respectivamente, constantes ou variáveis com a posição no sistema (Massarani, 1967 *apud* Massarani, 2002). A equação é válida também em condições não isotérmicas, desde que a variação da viscosidade e da densidade do fluido ao longo do escoamento seja verificada (Massarani, 1969 *apud* Massarani, 2002).

A permeabilidade ( $\kappa$ ) e o fator  $c$  podem ser determinados experimentalmente por permeamtria através de um conjunto de medidas de vazão e queda de pressão efetuadas com a amostra no leito. A construção de gráficos de  $\Delta P/LU$  em função de  $U$  permite a determinação dos coeficientes linear e angular da equação. De acordo com Zotin (1985), a homogeneidade do leito pode ser verificada através de uma análise dos parâmetros  $\kappa$  e  $c$  obtidos para tomadas de pressão em intervalos sucessivos de um leito fixo. Além disso, a comparação desses parâmetros após um reempacotamento permite averiguar a reprodutibilidade da técnica utilizada para um determinado empacotamento.

A permeabilidade ( $\kappa$ ) é a propriedade que tem a matriz porosa de permitir a passagem de fluidos através de seus vazios ou interstícios, sem se deformar estruturalmente ou ocasionar o deslocamento relativo de suas partes. Seu valor é afetado por fatores como granulometria, dimensões, forma e disposição espacial das partículas no interior do leito. Com exceção de alguns casos, a permeabilidade da matriz porosa está relacionada à sua porosidade, e esta por sua vez, é determinada pela forma de empacotamento das partículas no interior do leito. Segundo Oliveira *et al.* (2000), um dos fatores que afeta o empacotamento das partículas é a sua forma: quanto menos esférica for a partícula, menor será a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha e, isto ocorre, devido ao atrito entre as partículas gerado a partir do contato entre suas superfícies irregulares. Os autores afirmam ainda que quanto menor o tamanho das partículas irregulares, maior será este efeito, devido à

maior área superficial específica. Desta forma, conhecimentos acerca da técnica de empacotamento e da porosidade do leito geram informações úteis a respeito da permeabilidade do ar através de sua matriz porosa.

Staněk (1994) afirma que partículas altamente não-esféricas, tais como anéis de Raschig e selas de Borl, diferem substancialmente de partículas esféricas no que diz respeito à fração de vazios no leito. Segundo Yu e Standish (1993), a forma das partículas afeta a porosidade do leito devido às possíveis orientações que as partículas assumem em um empacotamento realizado ao acaso. Os autores afirmam que, à medida que se aumenta o desvio da forma esférica, aumenta-se a porosidade inicial do leito e isto ocorre devido à maior probabilidade de se formar pontes pelos cantos angulares das partículas ou pela maior fricção gerada entre elas. Assim, partículas de formas irregulares permitem um empacotamento mais frouxo, fazendo com que maiores valores de porosidade sejam obtidos (Gomes, 2002). Staněk (1994) afirma ainda que a rugosidade da superfície das partículas afeta a permeabilidade do leito. Entretanto, apesar de este efeito ser muito significativo, não pode ser distinguido com precisão suficiente do efeito da forma irregular.

Zotin (1985) determinou experimentalmente o perfil de porosidade para leitos fixos de partículas esféricas, cilíndricas, anéis de Raschig e lascas. De modo geral, a autora observou que leitos preenchidos com esferas e partículas cilíndricas apresentaram perfis radiais de porosidade altamente oscilatórios, com o amortecimento atingido por volta de 3 diâmetros de partícula, a partir da parede. Para anéis de Raschig e lascas, o perfil obtido foi praticamente uniforme, fato associado ao formato mais irregular da partícula quando comparada a uma esfera, permitindo uma melhor acomodação no interior do leito. As razões ( $D/d_p$ ) (razão entre o diâmetro da coluna e o diâmetro da partícula) críticas abaixo do qual o efeito da parede é atuante foram menores para partículas irregulares. Os valores obtidos para leitos de anéis de Raschig e leitos de lascas foram de 7 e 8, respectivamente, enquanto os valores encontrados para cilindros e esferas foram de 16 e 24, respectivamente. Esta característica do perfil de porosidade ocorre principalmente pelo contato entre as partículas e as paredes do leito, forçando esta primeira camada de partículas a se ordenar. A partir daí, a ordenação diminui gradativamente à medida que se distancia da parede, resultando em um leito com elevada porosidade e permeabilidade junto às paredes, e uma região central, que se apresenta menos porosa (Singulani, 2001). Entretanto, de acordo com Staněk (1994), o efeito da parede do leito na permeabilidade é particularmente importante apenas para partículas próximas a esferas (que ele denomina de partículas “técnicas”, como partículas de coque e minério).

Montillet e Le Coq (2001) analisaram os efeitos do topo, da base e da parede lateral de um leito cilíndrico através do estudo de seções transversais e longitudinais de leitos empacotados com cilindros longos (altura/diâmetro = 5,29) e com paralelepípedos planos de base quadrada (espessura/lado = 0,209), e consolidados com resina. Os autores observaram variações locais da porosidade radial em cortes transversais sucessivos dos leitos, mostrando serem estas variações de natureza aleatória. Os dados obtidos foram comparados com os de leitos constituídos por esferas homogêneas e foi encontrado que a influência da parede na porosidade radial foi menor para leitos constituídos por partículas anisotrópicas, o que pode indicar que os perfis de velocidade para estas partículas devem ser pouco influenciados pelas paredes laterais do leito. Os autores concluíram ainda ser o efeito da base do leito, em termos de diâmetros de esfera equivalente, maior do que o observado para leitos de esferas e que, o efeito do topo foi uma elevada porosidade média ao longo de dois a três diâmetros equivalentes de esfera. Segundo os autores estes resultados são consistentes com os obtidos por diversos autores para leitos fixos de diferentes formas de partículas.

Partículas não-esféricas são comumente utilizadas para aplicações industriais e ambientais. Contudo, estudos envolvendo leitos empacotados de partículas não-esféricas ainda são escassos na literatura. De acordo com Gupta *et al.* (2007), a resistência que o material oferece ao escoamento de ar é dependente da altura de partículas no leito, forma e rugosidade superficial da partícula, além da maneira com que o material se encontra orientado no interior do leito. Assim, torna-se de fundamental importância o conhecimento de como estas variáveis afetam a permeabilidade do leito.

## 2.5 Propriedades Físicas de Materiais

O conhecimento das propriedades físicas de partículas constituem dados importantes e necessários de engenharia para a otimização de equipamentos e operações a que os mesmos se destinam, bem como para o desenvolvimento de novos produtos de consumo e avaliação e retenção da qualidade final dos mesmos. Forma, tamanho, volume, área superficial, densidade, porosidade e cor são algumas destas características que apresentam grande relevância em muitos problemas associados ao projeto de uma máquina específica ou à análise do comportamento do material durante o seu processamento (Mohsenin, 1970). O projeto de equipamentos onde tais propriedades não são levadas em consideração pode levar a

aplicações inadequadas, com conseqüentes perdas de produção e baixa eficiência de operação a que se destina o equipamento (Freitas *et al*, 2006). Entretanto, pouco é conhecido sobre as características físicas básicas e propriedades de partículas irregulares, como aquelas de origem animal e vegetal (Mohsenin, 1970).

Os materiais biológicos não possuem a uniformidade apresentada por produtos confeccionados e moldados pela indústria química, mecânica e/ou elétrica. Assim, essas variações tornam o estudo das características físicas dos materiais biológicos difíceis de serem consideradas com determinados padrões (Mata e Duarte, 2002). Muitas técnicas e definições diferentes têm sido utilizadas na determinação das propriedades físicas destes materiais. A própria definição de qual fator de forma deve ser usado para caracterizar estas partículas irregulares não é clara, diferindo entre autores (Taylor, 2002).

### 2.5.1 Dimensões Características

Informações relativas ao tamanho e forma, entre outras, são consideradas de suma importância para estudos envolvendo transferência de calor e massa e transporte de materiais sólidos por fluidos. Estimativas acuradas da área frontal e dos diâmetros relacionados são essenciais para a determinação, por exemplo, da velocidade terminal, coeficiente de arraste e número de Reynolds (Mohsenin, 1970).

Uma definição científica típica de tamanho é ‘a quantidade de espaço ocupado’ ou ‘o volume ocupado’. Um corpo regular pode ser descrito por uma forma limitada por superfícies que estão bem definidas matematicamente e, assim, o volume pode ser calculado. Para corpos irregulares, entretanto, o tamanho precisa ser medido ou estimado. Dentre as técnicas conhecidas para a determinação das dimensões de um material está a do deslocamento de líquidos, onde o volume de uma partícula ou de uma amostra contendo um pequeno número de partículas pode ser estimado (Taylor, 2002). A partir do volume de uma forma geométrica que seja semelhante ao volume do material de estudo, é possível calcular o diâmetro de volume equivalente deste. Para o caso de uma esfera, este diâmetro é determinado através da equação:

$$d_v = \left( \frac{6}{\pi} V_p \right)^{1/3} \quad (13)$$

onde  $d_v$  é denominado diâmetro de volume e definido como sendo o diâmetro da esfera com o mesmo volume da partícula.

Zanoelo (2007) calculou o diâmetro da esfera equivalente de partículas quadradas de chá mate como sendo o diâmetro de uma esfera com a mesma área superficial da encontrada para as partículas reais por ele estudadas.

A técnica de peneiramento, em que a amostra é agitada através de um conjunto padrão de peneiras, também pode ser utilizada na determinação das dimensões de um material. Esta técnica foi empregada por Temple e van Boxtel (1999) para a determinação do tamanho médio de folhas de chá preto. Contudo, qualquer definição de tamanho baseada nesta técnica não é clara, sendo incapaz de fornecer informações tridimensionais a respeito da partícula em estudo (Taylor, 2002).

Outra técnica frequentemente usada e especialmente importante para o caso de partículas irregulares é a técnica de análise de imagens, pois, através desta podem ser determinadas muitas dimensões da partícula como diâmetros de Feret, diâmetro médio, perímetro, área projetada, dentre outras.

Vários pesquisadores descrevem o tamanho de partículas através de medidas das dimensões dos três principais eixos utilizando micrômetros ou paquímetros. Esta metodologia foi usada por Teixeira *et al.* (2003), Costa Júnior *et al.* (2006), Razavi *et al.* (2008) e Perez *et al.* (2007) para determinar o tamanho de grãos de milho (*Zea mays* L.), grãos de girassol (*Helianthus annuus* L.), sementes de *Lallemantia royleana* e sementes de girassol, *Helianthus petiolaris* Nutt, respectivamente. Gupta *et al.* (2007) utilizaram um micrômetro para medir as duas maiores dimensões ( $l_1$  e  $l_2$ ) de sementes de girassol (*Helianthus annuus* L.) e os valores obtidos foram utilizados no cálculo da área projetada ( $A_{proj}$ ) da semente através da Equação 14:

$$A_{proj} = \left(\frac{\pi}{4}\right)l_1l_2 \quad (14)$$

Mohsenin (1970) apresenta alguns métodos para a medida da área superficial de folhas e hastes. Segundo o autor, a área superficial deste tipo de material pode ser medida copiando-se a superfície do material em um papel milimetrado ou em um papel para desenho onde, posteriormente, a área pode ser determinada com o uso de um planímetro. A superfície das folhas e hastes pode ser determinada ainda utilizando-se um planímetro de fluxo de ar que mede a área como uma função da superfície que obstrui a passagem do ar.

### 2.5.2 Forma

Tamanho e forma são duas variáveis inseparáveis em um objeto físico e ambos são necessários para que o material seja satisfatoriamente descrito. De maneira geral, muitos parâmetros dimensionais precisam ser medidos para a definição da forma de um material. No caso de materiais irregulares, um número infinito de medidas se torna necessário para uma completa definição de sua forma. Entretanto, do ponto de vista prático, a medida de muitos eixos perpendiculares mútuos é suficiente, sendo que, o número destas medidas aumenta com o aumento da irregularidade na forma (Mohsenin, 1970).

A determinação da forma de partículas apresenta muitos problemas teóricos e práticos (Eriksson *et al.*, 1997). De acordo com Yu e Standish (1993), partículas não-esféricas são usualmente caracterizadas em termos do diâmetro de uma esfera que apresenta o mesmo volume da partícula (diâmetro de volume). Entretanto, sabe-se que à exceção de partículas esféricas, diferentes propriedades que dependem das dimensões da partícula podem resultar em diferentes diâmetros de volume, conseqüentemente, a aplicação desta definição deve ser feita com cuidado.

Muitos critérios têm sido utilizados para descrever a forma de materiais, dentre eles podemos citar:

- Comparação visual:

A determinação da forma através da comparação visual de um objeto com um padrão é uma técnica muito simples, entretanto subjetiva, onde o resultado encontrado por diferentes observadores poderá resultar em diferentes formas. Isto requer precauções e um observador experiente para assegurar razoável reprodutibilidade (Mohsenin, 1970).

Segundo Neves *et al.* (2004), grãos e frutos, de uma maneira geral, não apresentam um formato geométrico perfeitamente definido e, assim, para a solução de problemas relacionados a sua geometria, a forma do material é muitas vezes assumida como sendo uma forma geométrica conhecida, levando à aproximações inadequadas e possíveis erros.

Alguns dos termos descritivos freqüentemente usados para comparação estão presentes no Quadro 2.2 (Mohsenin, 1970):

**Quadro 2.2:** Termos descritivos utilizados para descrição da forma de objetos por comparação visual (Mohsenin, 1970).

Forma	Descrição
Redonda	Próxima a uma esfera
Esferóide	Com base e ápice nivelados
Retangular	Diâmetro vertical maior que o diâmetro horizontal
Cônica	Afilada na direção vertical
Oval	Forma de um ovo e mais larga na base

Verma e Saxena (1984) consideraram a esfericidade de três diferentes sementes agrícolas (lentilha, painço e ervilhaca-alho-de-boneca) como sendo igual a 1,0. Os autores justificaram tal aproximação baseando-se em observações subjetivas.

Soares (1986) *apud* Neves *et al.* (2004) visando estimar o volume de grãos de soja aproximou a forma destes grãos à forma de um esferóide e de um elipsóide. Estes resultados foram comparados com os volumes medidos pelo método de picnometria líquida usando tolueno como líquido de referência. O autor encontrou que os valores obtidos pelas aproximações foram levemente superestimados, apresentando erros próximos a 1,2%.

- Circularidade (C):

A circularidade é uma medida da intensidade dos cantos ou ângulos do sólido. Muitos métodos têm sido propostos para estimar a circularidade. Os mais acurados são apresentados abaixo e se encontram ilustrados na Figura 2.5 (Curry, 1951 *apud* Mohsenin, 1970):

$$C = \frac{A_{\text{proj}}}{A_c} \quad (15)$$

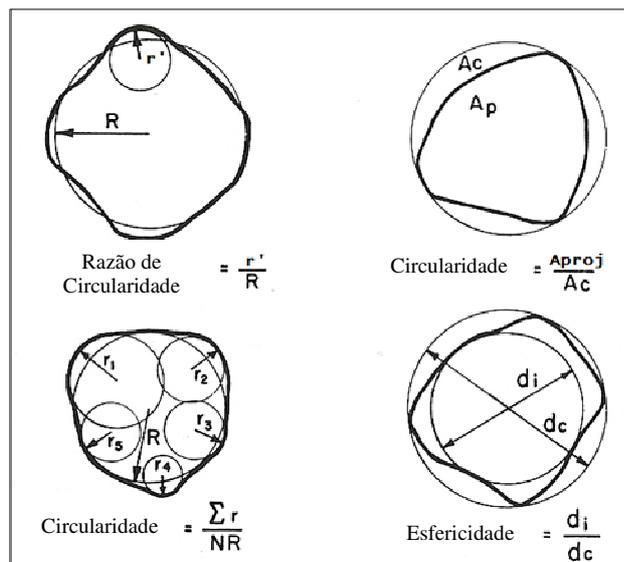
onde  $A_{\text{proj}}$  é a maior área projetada do objeto na posição de repouso natural e  $A_c$  é a área do menor círculo circunscrito. A área projetada pode ser obtida por projeção do material em estudo em um papel milimetrado ou através da técnica de análise de imagens.

$$C = \frac{\sum r}{NR} \tag{16}$$

onde  $r$  é o raio da curvatura como definido pela Figura 2.5,  $R$  é o raio do maior círculo inscrito e  $N$  é o número total de ângulos somados no numerador.

$$\text{Razão de Circularidade} = \frac{r'}{R} \tag{17}$$

em que  $r'$  é o raio da curvatura de ângulo mais acentuado e  $R$  representa o raio médio do objeto. Este método apresenta o inconveniente de um único raio de curvatura determinar a circularidade do objeto.



**Figura 2.5:** Definições de circularidade e esfericidade utilizadas para a descrição da forma de grãos e pedregulhos (adaptado de Curray, 1951 *apud* Mohsenin, 1970).

- Esfericidade ( $\phi$ ):

O embasamento geométrico do conceito de esfericidade repousa sobre a propriedade isométrica da esfera. Curray (1951) *apud* Mohsenin (1970) propõe uma expressão prática tridimensional para estimar a esfericidade de um objeto através da seguinte definição:

$$\phi = \frac{d_v}{d_c} \quad (18)$$

onde  $d_v$  é o diâmetro da esfera de mesmo volume que o objeto e  $d_c$  é o diâmetro da menor esfera circunscrita ou usualmente o maior diâmetro do material. Esta equação expressa a forma de um sólido relativamente a uma esfera de igual volume.

Outra definição de esfericidade sugerida pelo autor é dada por:

$$\phi = \frac{d_i}{d_c} \quad (19)$$

onde  $d_i$  é o diâmetro do maior círculo inscrito e  $d_c$  é o diâmetro do menor círculo circunscrito como mostrado na Figura 2.5.

A esfericidade de grãos de feijão verde, *Vigna unguiculata*, foi determinada por Medeiros (2004) através da projeção em retroprojetor de amostras do material em papel milimetrado. O autor determinou o diâmetro dos círculos inscrito e circunscrito na projeção do objeto em repouso e, assim, calculou a esfericidade dos grãos pelo uso da Equação 19.

Massarani (2002) sugere o uso da esfericidade definida pelo quociente entre a superfície da esfera com o mesmo volume da partícula e a superfície da partícula ( $A_p$ ):

$$\phi = \frac{\pi d_v^2}{A_p} \quad (20)$$

onde  $d_v$  é o diâmetro volumétrico definido pela Equação (13).

Este fator de forma definido pela Equação 20 tem sido extensamente utilizado na literatura para quantificar a forma de partículas (Reina *et al.*, 2000; Zanoelo, 2007; Liu *et al.*, 2008).

Mohsenin (1970) propõe o cálculo da esfericidade baseando-se na média geométrica dos três eixos perpendiculares ao corpo em relação ao maior eixo do material, conforme a relação:

$$\phi = \frac{(Iw\delta)^{1/3}}{l} \quad (21)$$

em que  $l$ ,  $w$  e  $\delta$  são, respectivamente, o comprimento, a largura e a espessura do material, e  $(lw\delta)^{1/3}$  é o diâmetro médio geométrico da partícula ( $d_m$ ).

Esta equação vem sendo largamente utilizada para a determinação da esfericidade de produtos biológicos (Teixeira *et al.*, 2003; Neves *et al.*, 2004; Freitas *et al.*, 2006; Perez *et al.*, 2007; Razavi *et al.* 2008). Costa Júnior *et al.* (2006) determinaram a esfericidade de sementes de três variedades diferentes de girassol (*Helianthus annuus L.*) digitalizando os grãos em posição de repouso natural e transferindo as imagens para o software Autocad 2000. As dimensões foram determinadas (comprimento, largura e espessura) utilizando a função dimension do software e a esfericidade foi calculada pela equação acima. Os autores verificaram que a esfericidade foi diretamente proporcional ao teor de água das sementes e o valor de esfericidade, que variou de 0,50 a 0,58 para as diferentes variedades e conteúdos de umidade das sementes, foi distante de 1,0, indicando que a forma dos grãos não se aproxima de uma esfera.

### 2.5.3 Massa Específica

Para materiais particulados porosos podem ser encontradas três definições diferentes de massa específica, as quais são apresentadas a seguir.

A massa específica real é aquela dada pela razão entre a massa do material e o seu volume sólido, excluindo-se o volume de todos os poros abertos e fechados ( $V_s$ ):

$$\rho_s = \frac{m_p}{V_s} \quad (22)$$

A massa específica aparente é aquela obtida a partir da relação entre a massa e o volume da partícula ( $V_p$ ), incluindo seus poros abertos e fechados, dada pela equação:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (23)$$

onde  $m_p$  é a massa de uma partícula e  $V_p$  é o seu volume aparente.

A massa específica do leito de partículas ou densidade bulk é aquela obtida pela razão entre a massa de partículas e o volume do leito empacotado ( $V_b$ ), dada pela seguinte equação:

$$\rho_b = \frac{m_p}{V_b} \quad (24)$$

O volume bulk depende não apenas do volume das partículas e de seus poros, como também dos espaços vazios entre as partículas do leito empacotado.

A forma irregular e a natureza dos poros levam a dificuldades na determinação do volume e da massa específica dos materiais. Para a determinação da massa específica real, muitos pesquisadores têm usado o método de deslocamento de gás. O instrumento baseia-se no princípio de Arquimedes de deslocamento de gás, em que o gás é capaz de penetrar em todos os poros abertos maiores que o diâmetro de sua molécula. O método de deslocamento de líquido, apesar de ser utilizado para a determinação da massa específica real, não é o mais adequado devido à possível absorção dos líquidos utilizados e à dificuldade apresentada pelos mesmos em penetrar nos poros dos materiais.

O volume aparente de muitos materiais de formato irregular também tem sido calculado pela técnica do deslocamento de líquido. Entretanto, o uso desta simples técnica utilizando a água como líquido de referência pode resultar em erros apreciáveis para materiais altamente higroscópicos (Mohsenin, 1970). Assim, na escolha do líquido a ser utilizado deve-se levar em consideração a interação existente entre o sólido e o líquido, com o intuito de evitar que este seja facilmente absorvido pelo sólido, influenciando na determinação de sua massa específica. Devido à baixa tendência de penetrar no interior dos sólidos, solventes orgânicos têm sido utilizados para a determinação da massa específica aparente de materiais.

Medeiros (2004) determinou o volume de grãos de feijão através do volume de líquido deslocado quando amostras de grãos eram imersas em álcool etílico (líquido de densidade inferior à dos grãos). O volume de cada grão foi determinado pela divisão do volume total de líquido deslocado pelo número de grãos da amostra e a massa específica do material foi obtida através da divisão da massa da amostra inserida no picnômetro pelo volume total dos grãos.

Freitas *et al.* (2006) determinaram a densidade aparente de um leito composto por frutos e amêndoas de tucumã (*Astrocaryum vulgare*, Mart.) com base no volume ocupado por uma quantidade de amostra com massa determinada. Como resultado, os autores

encontraram que o leito de partículas formado pelas amêndoas ( $\phi = 0,88$ ) e pelos frutos de tucumã ( $\phi = 0,86$ ) apresentaram densidades semelhantes e iguais a  $0,646$  e  $0,649 \text{ g.cm}^{-3}$ , respectivamente.

#### 2.5.4 Porosidade

A percentagem de vazios em uma massa de sólidos inconsolidados é freqüentemente necessária para estudos envolvendo escoamentos de ar e transferência de calor, bem como em outras aplicações (Mohsenin, 1970). Baseando-se nas definições de massa específica, pode-se distinguir três tipos de porosidade: porosidade da partícula, porosidade bulk e porosidade total do leito.

A porosidade da partícula é dada pela razão entre o volume de poros abertos da partícula e o seu volume total e pode ser calculada pelo uso da equação:

$$\epsilon_p = 1 - \frac{\rho_p}{\rho_s} \quad (25)$$

A porosidade bulk é entendida como os espaços aleatórios formados pelo agrupamento de um produto em um volume pré-determinado e pode ser calculada através da relação entre o volume de vazios de ar interpartícula e o volume total do leito:

$$\epsilon_b = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (26)$$

A porosidade total do leito é dada pela relação entre o volume de poros abertos das partículas e os vazios interpartículas e o volume total do leito e pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\epsilon_t = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (27)$$

Freitas *et al.* (2006) utilizando a Equação 27 determinaram a porosidade de leitos constituídos por frutos ( $d_m=3,40$  cm) e amêndoas ( $d_m=2,61$  cm) de tucumã e encontraram que o leito de partículas formado pelas amêndoas ( $\phi=0,88$ ) apresentou uma porosidade de 0,48, superior ao valor obtido para o leito formado pelos frutos ( $\phi=0,86$ ), que foi de 0,43.

Day (1964) *apud* Mohsenin (1970) apresenta um método simples para determinação da porosidade de materiais porosos através do uso de um picnômetro de comparação a ar. Este dispositivo consiste basicamente de dois recipientes idênticos, um contendo ar sob pressão  $p_1$  e o outro a amostra do material. Quando uma válvula que liga os dois recipientes é aberta, a pressão em ambos equaliza-se a um valor  $p_2$ . A porosidade é então calculada a partir da equação:

$$\varepsilon = \frac{(p_1 - p_2)}{p_1} \cdot 100 \quad (28)$$

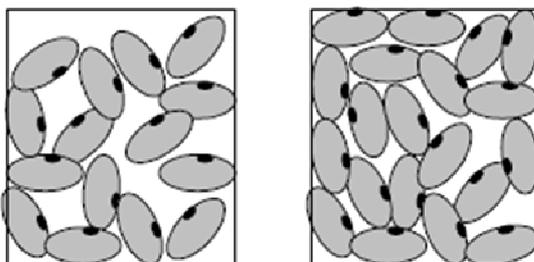
A porosidade pode ser afetada por muitos fatores, dentre os quais podem ser destacados a forma e o tamanho do produto, o teor de umidade, a altura de queda das partículas durante o empacotamento do leito, o arranjo das partículas no escoamento e a compactação do material.

Mata e Duarte (2002) apresentam uma descrição sobre a influência desses fatores na porosidade intergranular de produtos agrícolas. Eles observaram, através de experiências realizadas, que um produto de forma mais arredondada, como grãos de soja, forma maiores espaços intergranulares que grãos de feijão que têm a forma de um elipsóide e estes, por sua vez, têm maior porosidade que grãos de forma elipsoidal mais alongada, como são o caso do trigo e do arroz. Estas observações contrariam os resultados apresentados por Yu e Standish (1993) e Oliveira *et al.* (2000), em que um aumento no desvio da forma esférica deveria levar a maiores porosidades do leito.

A influência do tamanho na formação de espaços interpartículas é analisada pelos autores através da comparação de produtos de formas semelhantes como a soja e a laranja, onde eles observam que a soja, produto de menor dimensão, apresentou uma porosidade de aproximadamente 37%, inferior à obtida para a laranja (45%). No caso da altura de queda das partículas eles perceberam que, para compartimentos de alturas diferentes sendo alimentados por um mesmo produto, irão existir dois valores não proporcionais de porosidade para a câmara completa. No compartimento de menor altura, a partícula sofrerá

uma altura de queda menor e o produto se acomodará de uma determinada forma. Já no compartimento de maior altura, a força da queda tenderá a causar um maior impacto levando a uma melhor acomodação dos materiais que estão abaixo da zona de descarga.

Outro fato observado pelos autores está relacionado à forma como um mesmo produto pode se arranjar em um determinado espaço, levando a formação de porosidades diferentes e em um processo que não depende da vontade do operador. Materiais com formas irregulares e distintas de uma esfera perfeita contribuem para que este fato ocorra com maior intensidade. Um exemplo de como um mesmo volume de materiais, neste caso, grãos de feijão, pode ser arranjado diferentemente, provocando espaços intergranulares desiguais é mostrado na Figura 2.6.



**Figura 2.6:** Diferentes arranjos de grãos de feijão levando a formação de espaços intergranulares distintos (Mata e Duarte, 2002).

De acordo com Mata e Duarte (2002), outro fator que pode alterar a porosidade intergranular é a compactação do material. Quando uma grande carga é exercida sobre o mesmo, as partículas que se encontram na região próxima à base sofrem toda a carga das que estão sobre elas. Os autores ressaltaram, entretanto, que este fato só pode ser observado em compartimentos elevados, superiores a quatro metros de altura.

## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados nos experimentos e os equipamentos e metodologias para a determinação de suas propriedades físicas. Também serão apresentados os equipamentos e procedimentos usados na caracterização fluidodinâmica nos leitos fixo, fluidizado e vibrofluidizado, bem como os métodos empregados para a análise dos resultados.

#### **3.1 Materiais**

##### **3.1.1 Partículas Sólidas**

Ensaio preliminares foram realizados com esferas de vidro “ballotini” ( $\phi=1,0$ ) com a finalidade de serem obtidos dados do comportamento fluidodinâmico destas partículas, amplamente estudadas na literatura, que pudessem ser comparados com os dados obtidos para partículas de baixas esfericidades, fora da faixa usual de fluidização. As partículas de vidro utilizadas nos experimentos em leito fluidizado e vibrofluidizado possuem diâmetro médio de 925  $\mu\text{m}$  e foram obtidas por peneiramento, com a média calculada a partir da abertura de duas peneiras sucessivas. A massa específica foi determinada através da técnica de picnometria utilizando água como líquido de referência e o valor obtido foi igual a 2,500  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . A realização dos ensaios preliminares também teve por objetivo avaliar a necessidade de adaptações no equipamento e nos sistemas de medida. Para a caracterização em leito fixo utilizou-se esferas de vidro de massa específica similar à anterior e diâmetro médio igual a 2180  $\mu\text{m}$ . A escolha destes diâmetros se deu em função da abertura dos furos da placa distribuidora e da tela utilizadas para sustentar as partículas no interior dos leitos vibrofluidizado e fixo, respectivamente.

As partículas utilizadas neste trabalho foram partículas de baixas esfericidades escolhidas com o objetivo de fornecer uma diversidade de características no que diz respeito à forma, massa específica e textura superficial. As partículas foram divididas em três diferentes

grupos sendo os grupos I e II constituídos por partículas “naturais” e o Grupo III composto por partículas “artificiais”, ou seja, fabricadas a partir de materiais sintéticos.

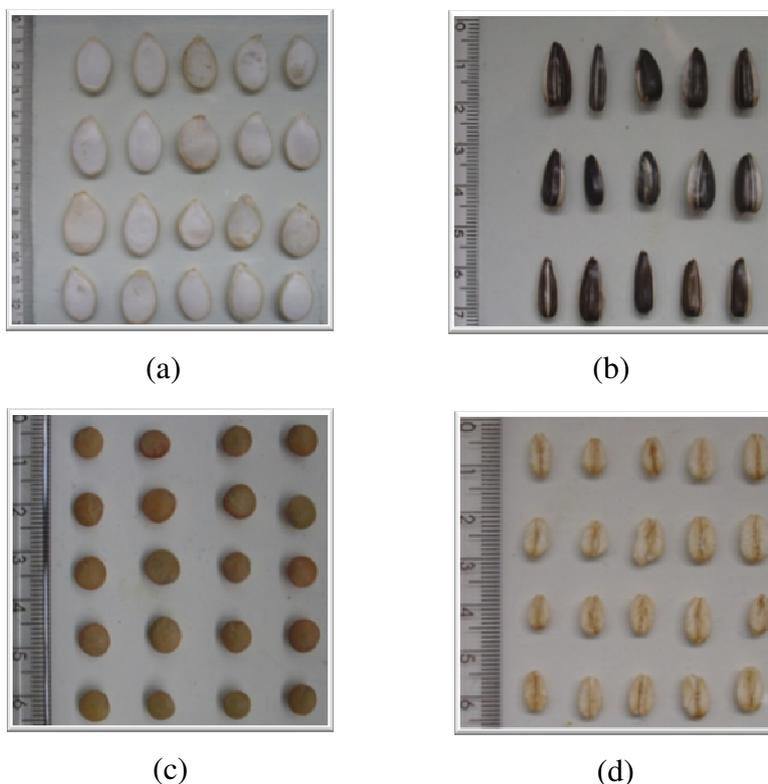
As partículas do Grupo I foram sementes das espécies *Cucurbita maxima*, *Helianthus annuus*, *Lens esculenta*, e flocos grossos de *Avena sativa*. A Figura 3.1 traz fotografias destes materiais. O Grupo II foi composto por folhas das espécies *Duranta repens*, *Schinus molle*, *Coleus barbatus*, *Buxus sempervirens* e brácteas de *Bougainvillea spectabilis* (fotografias destes materiais se encontram na Figura 3.2). Essas partículas foram cuidadosamente selecionadas com o intuito de reduzir a variabilidade natural no que concerne à forma e dimensões. Uma breve descrição dos materiais naturais estudados e de suas respectivas espécies se encontra a seguir:

### Grupo I:

- Sementes de abóbora da espécie *Cucurbita maxima* (Família Cucurbitaceae), conhecida como abóbora moranga. A semente de abóbora apresenta alto teor de fibra alimentar podendo exercer efeitos fisiológicos como laxante e atuar na prevenção de doenças intestinais. Apresenta também elevado teor de minerais, como o zinco, que influencia, por exemplo, no crescimento, formação de ossos e desenvolvimento fetal (Sá, 2007). Estas sementes são achatadas, possuem forma próxima a uma elipse sendo mais afilada em uma de suas extremidades. Têm coloração que varia do branco puro ao bistre escuro e apresentam superfície e bordas lisas.
- Sementes de girassol da espécie *Helianthus annuus*. Estas sementes possuem muitas aplicações, dentre as quais se destacam a fabricação de azeite comestível e o emprego na alimentação de aves e pássaros. O óleo de girassol tem sido indicado na dieta do colesterol, que é o responsável por doenças coronárias (Campos e Canéchio Filho, 1973). As sementes de girassol têm forma oval, possuem uma das extremidades mais afiladas e um ápice truncado. Possuem cor marrom escuro com listras de cor mais clara, borda lisa e superfície irregular.
- Lentilhas (*Lens esculenta*): é uma planta anual da Família Leguminosaceae que pode atingir de 20 a 50 cm de altura. As sementes são a parte usada como alimento e apresentam alto valor nutritivo, sendo fonte de proteínas, amidos, vitaminas do

complexo B, minerais e fibras. As sementes são castanho-avermelhadas, achatadas, têm forma de discos, borda e superfície lisa.

- Flocos Grossos de Aveia, *Avena sativa*. A aveia é uma gramínea anual pertencente à família Poacea. Estima-se que esta espécie, conhecida como aveia-branca, cubra cerca de 80% da área cultivada no mundo. É uma cultura de inverno, que pode atingir de 1,0 a 1,5 m de altura e apresenta demanda tanto para consumo humano quanto para ração animal. De maneira geral, o processamento da aveia fornece os seguintes produtos: flocos grossos ou inteiros, flocos médios e finos, além de farelo e farinha. É um alimento único entre os cereais em função de seu elevado teor de lipídios, proteínas e fibras (Gutkoski e Pedó, 2000). Os flocos grossos deste cereal apresentam forma elíptica, bordas lisas e superfície áspera com uma incisão longitudinal no centro do material.



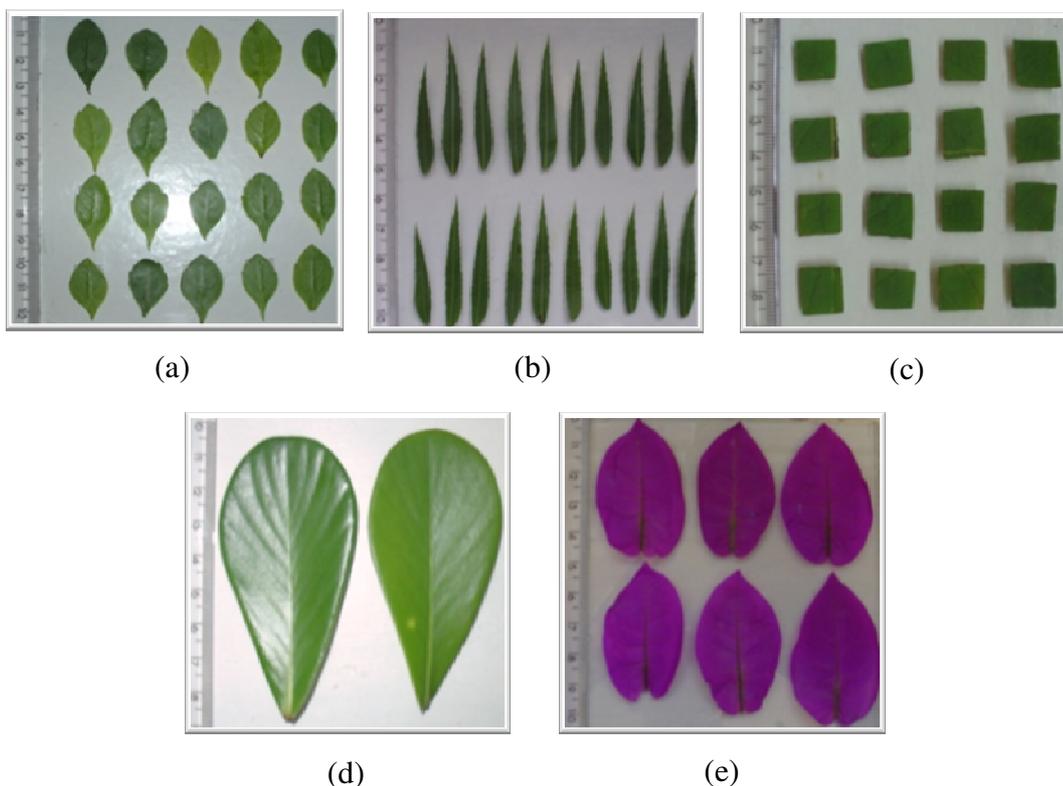
**Figura 3.1:** Fotografias das partículas utilizadas nos experimentos; Grupo I: (a) sementes de abóbora; (b) sementes de girassol; (c) lentilhas; (d) flocos grossos de aveia.

**Grupo II:**

- *Duranta repens*, também conhecida como pingo-de-ouro (Família Verbenaceae), é um arbusto lenhoso, de ramagem densa e ornamental, que pode atingir de 1,0 a 1,5 m de altura. Possui inflorescências longas e pendentes, com flores pequenas, azul-arroxeadas ou brancas, formadas na primavera-verão e de pouca importância ornamental, e frutos arredondados, amarelo-ouro, ornamentais e atraentes para pássaros (Lorenzi e Souza, 2001). Suas folhas possuem cor amarelo-dourado, principalmente as folhas jovens, forma oval com ápice agudo, superfície lisa e bordas levemente serreadas.
- *Schinus molle* é uma árvore ornamental, sendo amplamente empregada na arborização de ruas e no paisagismo em geral. Pertence à Família Anacardiaceae, sendo conhecida pelos nomes vulgares de aroeira-piriquita e aroeira-mansa, dentre outros. Mede em torno de 6,0 a 10 m de altura e apresenta tronco com até 40 cm de diâmetro. Possui flores brancas e pequenas que aparecem nas pontas dos ramos nos meses de setembro e outubro, e frutos que, quando maduros, apresentam cor castanho-esbranquiçada. As folhas são lanceoladas, perenes, compostas, de cor verde-claro acinzentada com bordos serrilhados (Longhi, 1995; Lorenzi, 2002).
- *Coleus barbatus* é uma planta da Família Lamiaceae, popularmente conhecida como falso-boldo, boldo-brasileiro e boldo-do-jardim. Caracteriza-se por ser uma planta herbácea, aromática, perene, erecta quando jovem e decumbente após 1 - 2 anos, pouco ramificada, com até 1,5 m de altura. Possui flores azuis, dispostas em inflorescências racemosas apicais. Suas folhas medem de 5,0 a 8,0 cm de comprimento, são opostas, simples, ovaladas, de bordas denteadas e apresentam aspecto aveludado, devido à presença de pêlos longos, retos e macios na superfície. Possuem sabor muito amargo, sendo mais espessas e suculentas quando frescas (Lorenzi e Matos, 2002).
- *Buxus sempervirens*, popularmente conhecida como buxinho (Família Buxaceae), é uma planta ornamental frequentemente utilizada para bordadura de jardins e muros. Este arbusto provido de textura lenhosa possui crescimento muito lento e pode atingir

de 2,0 a 5,0 m de altura (Lorenzi e Souza, 2001). Apresenta folhas verdes, ovaladas, de ápice obtuso e base atenuada, borda e superfície lisas, e textura quebradiça (folhagem coriácea).

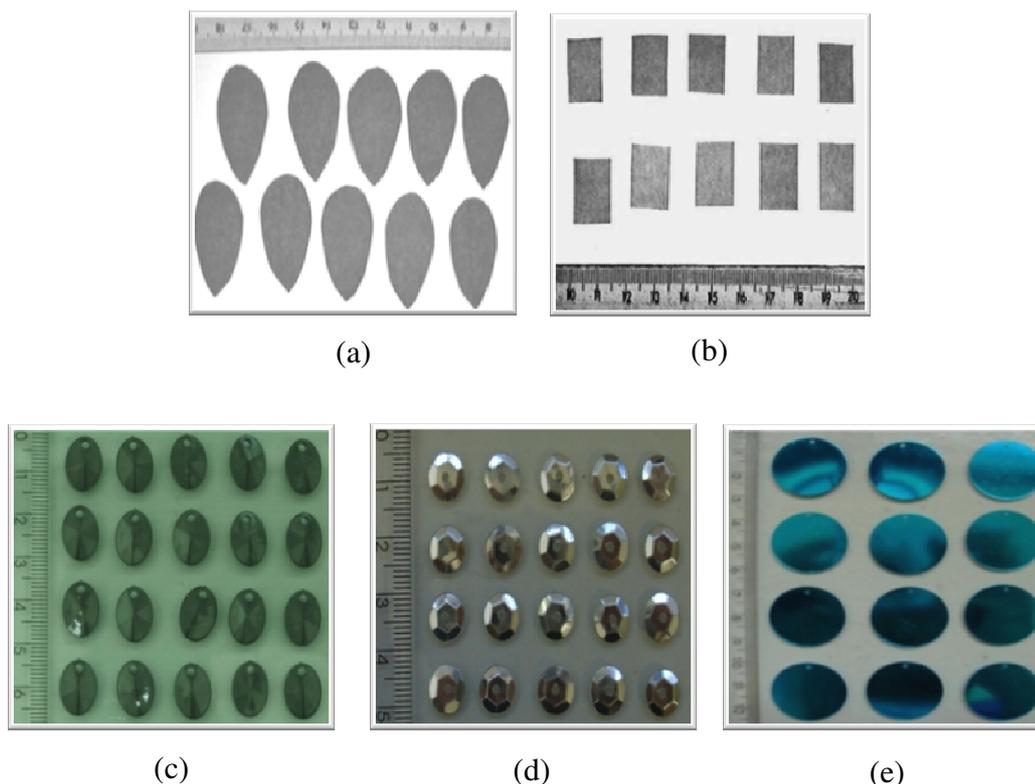
- *Bougainvillea spectabilis* é um arbusto lenhoso, espinhento e escandente que pode atingir de 5,0 a 10 m de altura quando adulto. Esta espécie, pertencente à Família Nyctaginaceae, foi intensamente melhorada, existindo hoje em nosso país uma vasta gama de cultivares. Apresenta folhas levemente pubescentes e flores envolvidas por três brácteas vistosas, simples ou dobradas, de cores vinho, laranja, ferrugem, branca e rosa (Lorenzi e Souza, 2001). Brácteas são folhas modificadas, quase sempre coloridas, que protegem flores isoladas ou inflorescências (Modesto e Siqueira, 1981). Estas folhas modificadas são cordiformes, com bordas e superfícies lisas e textura semelhante à do papel.



**Figura 3.2:** Fotografias das partículas utilizadas nos experimentos; Grupo II: (a) folhas de pingo de ouro; (b) folhas de aroeira; (c) folhas de falso-boldo cortadas em quadrados; (d) folhas de buxinho; (e) brácteas de primavera.

Como partículas “artificiais” (Grupo III) foram usadas partículas de papel branco com gramatura de  $75 \text{ g.m}^{-2}$  ( $\delta = 90 \text{ }\mu\text{m}$ ) cortadas na forma de folhas e quadrados, lentilhas de plástico, lantejoulas e paetês. Estas três últimas partículas são utilizadas na confecção de bijuterias e podem ser encontradas em lojas do ramo. A Figura 3.3 apresenta fotografias das partículas pertencentes ao Grupo III. O uso destas partículas “artificiais” teve o intuito de evitar efeitos de segregação devido a variações no tamanho e na forma das partículas, o que poderia dificultar a análise fluidodinâmica num estágio inicial. As partículas confeccionadas em papel foram utilizadas como um “padrão”, pois além do tamanho e formato uniformes, a superfície lisa e sem textura é uma característica desejável. A seguir encontra-se uma curta descrição dos materiais utilizados pertencentes ao Grupo III:

### Grupo III:



**Figura 3.3:** Fotografias das partículas utilizadas nos experimentos; Grupo III: (a) “folhas” de papel; (b) quadrados de papel; (c) lentilhas de plástico; (d) lantejoulas; (e) paetês.

- “Folhas” de papel de forma oval e ápice agudo. Estas partículas foram cortadas manualmente com a finalidade de se obter peças homogêneas em forma e tamanho.

- 
- Quadrados de papel de aproximadamente 1,45 cm de lado. Com o mesmo objetivo anterior, estas partículas foram cortadas manualmente e apresentam bordas e superfícies lisas.
  - Lentilhas de plástico de forma elíptica, borda lisa e superfície com rugosidade ordenada, apresentando maior espessura na região central e um pequeno furo em uma de suas extremidades.
  - Lantejoulas de forma circular e bordas lisas. Apresentam superfície com rugosidade ordenada e possuem um pequeno orifício central.
  - Paetês circulares e perfeitamente planos, com bordas e textura lisa. Estas partículas apresentam superfície bastante rígida com um pequeno furo próximo à borda.

No Quadro 3.1 estão sumarizadas características relativas à forma e rugosidade superficial de todas as partículas utilizadas nos experimentos, assim como, a forma em que foram utilizadas.

**Quadro 3.1:** Características físicas das partículas.

	<b>Material</b>	<b>Forma de uso</b>	<b>Forma da partícula</b>	<b>Borda</b>	<b>Textura Superficial</b>
<b>Grupo I</b>	Sementes de abóbora ( <i>C. maxima</i> ) (SA)	Inteiras	Elíptica	Lisa	Lisa
	Sementes de girassol ( <i>H. annuus</i> ) (SG)	Inteiras	Oval (ápice truncado)	Lisa	Lisa e irregular
	Lentilhas ( <i>L. esculenta</i> ) (LE)	Inteiras	Redonda	Lisa	Lisa
	Aveia branca ( <i>A. sativa</i> ) (AB)	Flocos grossos	Elíptica	Lisa	Áspera (Reentrância)
<b>Grupo II</b>	Brácteas de <i>B. spectabilis</i> (Primavera) (BP)	Inteiras	Cordiforme	Lisa	Lisa
	Folhas de <i>D. repens</i> (Pingo de Ouro) (FO)	Inteiras	Oval	Levemente serreada	Lisa
	Folhas de <i>S. molle</i> (Aroeira) (FA)	Inteiras	Lanceolada	Serreada	Lisa
	Folhas de <i>B. sempervirens</i> (Buxinho) (FB)	Inteiras	Oval (ápice obtuso)	Lisa	Coriácea (Rígida)
	Folhas de <i>C. barbatus</i> (Falso Boldo) (QB)	Quadrados	Quadrada	Lisa	Pilosa
<b>Grupo III</b>	“Folhas” de papel (FP)	Inteiras	Oval	Lisa	Lisa
	Quadrados de papel (QP)	Quadrados	Quadrada	Lisa	Lisa
	Lentilhas de Plástico (LP)	Inteiras	Elíptica	Lisa	Rugosidade ordenada
	Lantejoulas (LA)	Inteiras	Redonda	Lisa	Rugosidade ordenada
	Paetês (PA)	Inteiros	Redonda	Lisa	Lisa e rígida

## 3.2. Equipamentos

### 3.2.1 Leito Vibrofluidizado

Um esquema geral do leito vibrofluidizado utilizado nos experimentos está representado na Figura 3.4. O ar é provido por um soprador (1) da marca IBRAM de 7,5 cv, o qual passa por uma válvula “by-pass” que auxilia no ajuste da vazão de ar. A vazão é obtida através de uma placa de orifício (3) previamente calibrada. A pressão na placa de orifício foi medida por um transdutor de pressão (5) (Auto Tran Incorporated, 0 a 5 psi) ligado a um sistema de aquisição de dados (microcomputador (11) com placa de aquisição A/D PCI-6024E da National Instruments (12)). A queda de pressão na base do leito (8), logo abaixo da placa distribuidora de ar, foi medida de maneira semelhante à medida da queda de pressão na placa de orifício. Entretanto, o transdutor (5) utilizado opera na faixa de 0 a 2 in H<sub>2</sub>O e, neste caso, foi obtida uma equação que representasse a queda de pressão provocada pela placa distribuidora. Esta equação é utilizada para descontar a contribuição da queda de pressão gerada pela placa daquela provocada pelas partículas no leito. Cada ponto de vazão do ar e queda de pressão no leito fornecido pelo sistema de aquisição de dados foi obtido pela média aritmética de 512 pontos coletados no intervalo de 3 segundos.

A temperatura média do ar injetado no sistema foi medida através de um termopar tipo T (9) inserido na base do leito e ligado a um controlador de temperaturas Flyever FE50RP (6). A temperatura do ar foi mantida em 25°C com o auxílio de um refrigerador a água (2) que amenizava o aquecimento natural provocado pelo soprador e pelo atrito do ar na tubulação (os ensaios preliminares com esferas de vidro foram realizados a 20°C). O aquecedor a resistências elétricas (4) que se encontra ligado ao controlador de temperaturas não foi utilizado nesta etapa do trabalho.

A fim de homogeneizar o ar atmosférico que entra na câmara do leito, este é injetado em contracorrente através de duas entradas no pleno, abaixo da placa distribuidora de ar. Este distribuidor consiste de uma placa de  $2,0 \times 10^{-3}$  m de espessura com furos de  $0,8 \times 10^{-3}$  m de diâmetro, resultando em uma área aberta de aproximadamente 10% da placa. Samogin (1997) realizou testes mostrando a homogeneidade do escoamento de ar no interior de um leito vibrofluidizado de estrutura semelhante ao deste estudo.

O leito vibrofluidizado utilizado nos ensaios preliminares foi composto por uma câmara retangular de aço galvanizado (10), com altura de 0,30 m, e secção de área transversal de 0,20 m x 0,11 m. Entretanto, para uma melhor visualização da dinâmica das partículas no leito, esta câmara foi substituída por uma de acrílico de dimensões similares.

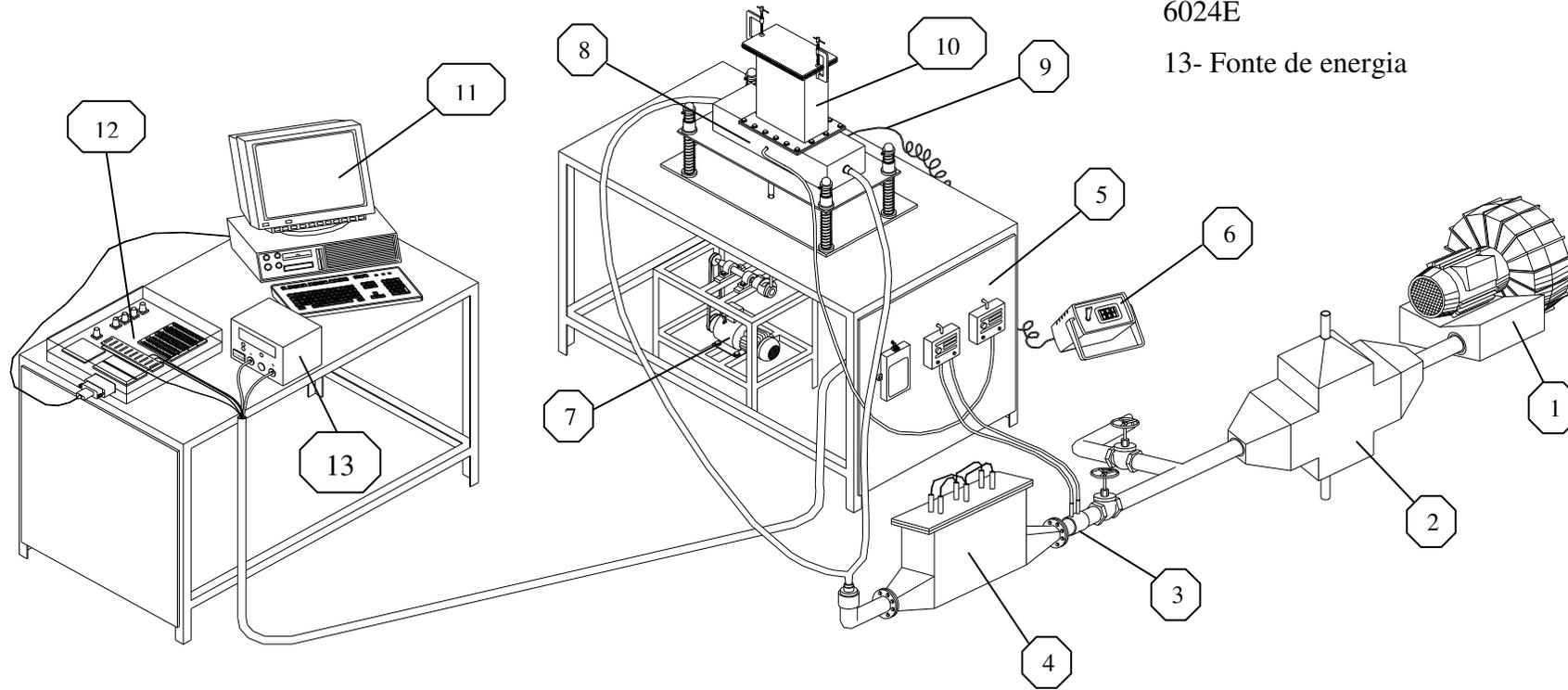
Não foi observada, nas condições investigadas, a presença de efeitos eletrostáticos ou alterações significativas no comportamento da fluidização em relação à câmara de aço galvanizado. Nos dois casos, uma tela foi adaptada no topo do leito para evitar a elutriação das partículas.

Para operação em modo vibrofluidizado, as vibrações são impostas no leito através de uma haste ligada a um mecanismo excêntrico, que converte o movimento rotacional produzido por um motor WEG de 0,5 HP (7) para movimento vertical senoidal no leito. O ajuste da amplitude de vibração foi feito no próprio excêntrico e um variador de velocidade Ringcogne RXM-750 localizado no eixo do motor elétrico permitiu o ajuste da frequência de vibração. A frequência de vibração foi medida com o uso de um tacômetro óptico Minipa MDT-2244

- 1- Soprador de ar
- 2- Resfriador
- 3- Placa de orifício
- 4- Aquecedor

- 5- Transdutores de pressão
- 6- Controlador de temperatura
- 7- Motor
- 8- Tomada de pressão

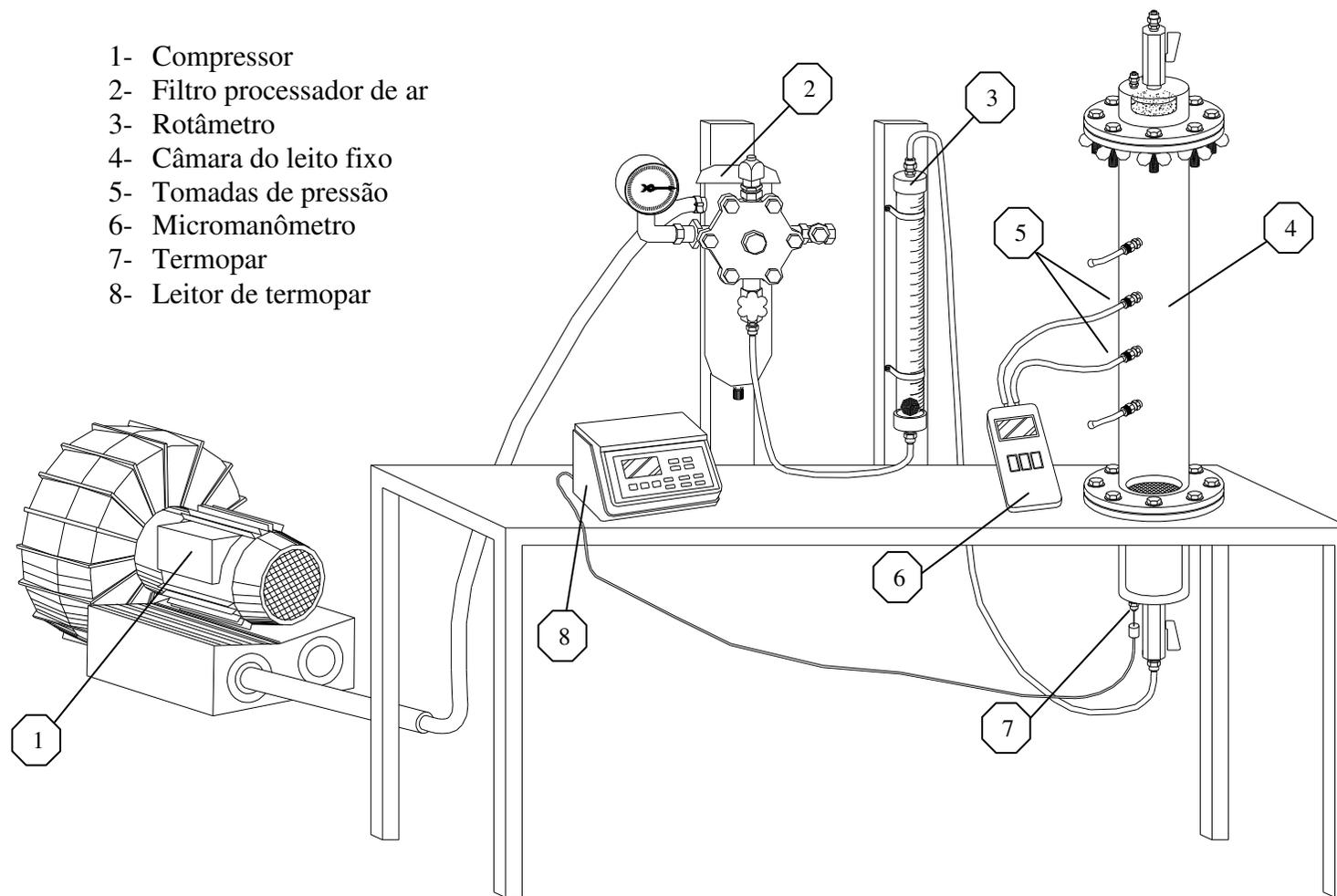
- 9- Termopar
- 10- Câmara do leito vibrofluidizado
- 11- Microcomputador
- 12- Placa de aquisição A/D PCI-6024E
- 13- Fonte de energia



**Figura 3.4:** Esquema geral do equipamento de leito vibrofluidizado.

### 3.2.2 Leito Fixo

Para o estudo da caracterização de leitos fixos, utilizou-se o equipamento cujo esquema encontra-se na Figura 3.5. O ar comprimido fornecido por um compressor (1) passa por um filtro processador de ar ARPRES F-2000 (2) para filtração de partículas sólidas e desumidificação. A vazão de ar que chega ao leito é regulada através das válvulas presentes no filtro processador e medida através de um rotâmetro GILMONT® (3) com vazão máxima de 154 L/min. O leito fixo é composto por uma câmara cilíndrica de acrílico (4) de  $5,0 \times 10^{-2}$  m de diâmetro e  $29,5 \times 10^{-2}$  m altura. Esta câmara apresenta quatro tomadas de pressão (5) distanciadas entre si de  $5,0 \times 10^{-2}$  m. Uma distância de  $7,3 \times 10^{-2}$  m foi mantida entre as extremidades da câmara e as tomadas de pressão mais próximas de forma a minimizar os efeitos de borda. A queda de pressão no leito foi medida através de um micromanômetro da marca Alnor®, modelo AXD 530 (6) e a temperatura do ar injetado no sistema (ar à temperatura ambiente) foi medida com um termopar tipo T (7) inserido na base do leito e ligado a um leitor de temperaturas Digi-Sense® da Cole-Parmer Instrument (8). No topo e na base do leito, duas telas foram adaptadas de forma a assegurar que as partículas se mantivessem fixas em seu interior.



- 1- Compressor
- 2- Filtro processador de ar
- 3- Rotâmetro
- 4- Câmara do leito fixo
- 5- Tomadas de pressão
- 6- Micromanômetro
- 7- Termopar
- 8- Leitor de termopar

**Figura 3.5:** Esquema geral do equipamento de leito fixo.

### 3.3 Metodologia Experimental

#### 3.3.1 Caracterização das Partículas Sólidas

Todas as partículas foram caracterizadas em função de suas dimensões características, espessura média, volume, massa específica, área superficial, esfericidade e densidade bulk do leito de partículas.

As dimensões características – dimensões de Feret ( $d_F$ ), área projetada ( $A_{proj}$ ) e perímetro (P) - foram obtidas através da técnica de Análise de Imagens utilizando-se o analisador Galai Macro Viewer com o software Image Pró-Plus 3.0 para dez partículas aleatoriamente selecionadas e a média obtida foi utilizada.

A espessura de cada material foi medida usando-se um micrômetro Mitutoyo de 0,01 mm de precisão. Vários pontos da superfície do material foram medidos para dez partículas aleatoriamente selecionadas e o valor médio foi utilizado.

O volume aparente das partículas foi determinado pela técnica de picnometria líquida usando-se o hexano como líquido de referência. A diferença entre o volume do picnômetro e o volume ocupado pelo hexano fornece o volume ocupado pela amostra sólida. O volume de cada partícula foi calculado dividindo-se o volume total de sólidos pelo número de partículas contidas na amostra.

A massa específica aparente dos materiais ( $\rho_p$ ) foi calculada pela relação entre a massa das partículas ( $m_p$ ) e o seu volume aparente ( $V_p$ ), usando-se a Equação 23:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (23)$$

A massa unitária de cada partícula foi medida pela pesagem em balança digital AND modelo FR200, com precisão de  $1,0 \times 10^{-4}$  g de um dado número de partículas e, então, dividindo a massa total obtida pelo número de partículas contidas na amostra. O volume do material foi obtido conforme descrito anteriormente.

A área superficial ( $A_p$ ) das partículas foi obtida através da Equação 29, onde a área total foi estimada a partir da área projetada ( $A_{proj}$ ), obtida pela técnica de análise de

imagens, e da área lateral, obtida pelo produto entre o perímetro da partícula (P) e a espessura ( $\delta$ ) da mesma:

$$A_p = 2 \times A_{\text{proj}} + P \times \delta \quad (29)$$

A esfericidade ( $\phi$ ) das partículas foi determinada pela relação entre a superfície da esfera com o mesmo volume da partícula e a superfície da partícula ( $A_p$ ):

$$\phi = \frac{\pi d_v^2}{A_p} \quad (20)$$

onde  $d_v$  é o diâmetro volumétrico da partícula, definido pela Equação 13:

$$d_v = \left( \frac{6}{\pi} V_p \right)^{1/3} \quad (13)$$

A esfericidade adotada por Mohsenin (1970) também foi utilizada para caracterizar a forma das partículas visando posterior comparação entre as diferentes definições nas velocidades de mínima fluidização obtidas para os leitos de partículas. Esta equação se encontra representada pela Equação 21:

$$\phi = \frac{(1w\delta)^{1/3}}{1} \quad (21)$$

A densidade bulk ( $\rho_b$ ) do leito foi determinada pela pesagem da massa de partículas contidas em um volume de leito conhecido quando em arranjo normal, ou seja, sem compactação do material, conforme a Equação 24:

$$\rho_b = \frac{m_p}{V_b} \quad (24)$$

### 3.3.2 Análise Fluidodinâmica do Leito Fixo

Os ensaios fluidodinâmicos em leito fixo tiveram como objetivo obter informações a respeito da resistência que as partículas planas estudadas oferecem ao escoamento do ar e consistiram na passagem do ar através do leito de partículas, onde foram obtidos valores de queda de pressão para velocidades crescentes do ar. A configuração de leito fixo foi escolhida porque permite avaliar o efeito da forma em uma situação em que não existe movimento relativo entre as partículas.

Foram utilizados dois diferentes métodos para o empacotamento das partículas no leito. A primeira técnica utilizada (Técnica I) consistiu no derramamento de quantidades fixas de partículas, em etapas, de tal forma que todas viessem a sofrer a mesma altura de queda. Após cada adição de partículas no leito, realizavam-se inúmeras ‘batidas’ na coluna com o objetivo de melhorar a acomodação do material no interior do leito (Zotin, 1985). O empacotamento das “folhas” e quadrados de papel, folhas de buxinho e paetês através desta técnica levou a leitos altamente não-homogêneos e, em alguns casos, a utilização da Técnica I não foi possível devido à elevada área superficial e rigidez superficial apresentada por estas partículas. Diante disso, houve a necessidade de se optar por um método igualmente reprodutível e homogêneo para o empacotamento destes materiais no leito. Este método (Técnica II) consistiu na acomodação manual das partículas, buscando orientá-las sempre na mesma direção. As “folhas” e quadrados de papel e os paetês foram orientados com a superfície de maior área perpendicular à direção de escoamento do ar, enquanto as folhas de buxinho, que apresentam dimensões superiores ao diâmetro do leito, foram orientadas paralelamente à passagem do ar.

Foi realizada uma caracterização de leito fixo constituído por esferas de vidro de diâmetro médio igual a 2180  $\mu\text{m}$  e densidade de 2,500  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  com o objetivo de serem obtidos dados destas partículas regulares em tamanho e forma, que pudessem ser comparados com os dados obtidos para as partículas planas.

Para obter informações sobre a resistência que os meios oferecem à passagem do ar, determinou-se a permeabilidade do meio poroso, relacionando os dados de perda de carga com suas respectivas velocidades superficiais através da equação de Forchheimer (Equação 12):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{\kappa} U + \frac{c\rho}{\sqrt{\kappa}} U^2 \quad (12)$$

A Equação 12 foi linearizada dividindo-se os termos da equação por  $U$  e, assim, os valores experimentais dos parâmetros  $\kappa$  e  $c$  foram obtidos pela determinação dos coeficientes linear e angular dos gráficos de  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ . Todos os ensaios foram realizados em triplicata com reempacotamento da coluna a cada novo experimento e o valor médio dos parâmetros foi utilizado. Para as partículas do Grupo II, o reempacotamento do leito foi realizado com folhas novas (frescas).

A reprodutibilidade da técnica utilizada para o empacotamento do leito foi verificada realizando-se uma comparação dos parâmetros  $\kappa$  e  $c$ , para um mesmo intervalo de tomadas de pressão, após cada reempacotamento.

A porosidade média ( $\bar{\varepsilon}_b$ ) dos leitos de partículas foi obtida nas colunas de recheio montadas segundo as técnicas de empacotamento descritas anteriormente. O procedimento experimental resumiu-se na pesagem das partículas que constituíam o leito e, com o conhecimento da massa específica aparente das partículas ( $\rho_p$ ) utilizadas, a  $\bar{\varepsilon}_b$  foi determinada mediante o uso da Equação 26:

$$\bar{\varepsilon}_b = 1 - \frac{m_p}{aH_0\rho_p} \quad (26)$$

onde  $m_p$  é a massa de partículas no interior do leito e  $a$  e  $H_0$  são, respectivamente, a área da seção transversal e a altura do leito fixo.

Na Tabela 3.2 encontram-se as partículas e respectivas massas utilizadas no recheio dos leitos fixos.

**Tabela 3.2:** Partículas e respectivas massas utilizadas nos recheios dos leitos fixos.

	<b>Material</b>	<b>Massa (g)</b>
<b>Grupo I</b>	Esferas de vidro	1013,06
	Sementes de abóbora	234,64
	Sementes de girassol	199,05
	Lentilhas	522,45
	Flocos de aveia	355,54
<b>Grupo II</b>	Brácteas de primavera	24,19
	Folhas de pingo de ouro	108,22
	Folhas de aroeira	107,34
	Folhas de buxinho	143,58
	Quadrados de boldo	67,61
<b>Grupo III</b>	“Folhas” de papel	158,43
	Quadrados de papel	143,58
	Lentilhas de plástico	370,81
	Lantejoulas	244,70
	Paetês	255,59

### 3.3.3 Análise Fluidodinâmica do Leito Fluidizado e Vibrofluidizado

Para a realização dos experimentos em leito fluidizado, a vazão do ar foi aumentada de zero para o valor máximo inferior ao de elutriação das partículas e, depois de alcançado o regime estacionário, os valores de queda de pressão no leito foram obtidos para velocidades decrescentes do ar (estágio de desfluidização). Para a obtenção do comportamento fluidodinâmico do leito vibrofluidizado, seguiu-se o mesmo procedimento experimental, entretanto, as vibrações eram impostas ao sistema após este ter atingido o regime estacionário.

Os valores de altura estática de leito ( $H_0$ ) utilizados nos experimentos e suas respectivas massas de partículas estão apresentados na Tabela 3.3. Inicialmente, decidiu-se trabalhar com leitos de partículas com massa total constante. Isto pode ser visto pelos ensaios realizados com as “folhas” e quadrados de papel em que a massa do leito foi mantida

constante e  $H_0$  variou. Dentre as partículas da Tabela 3.3, estas partículas foram as primeiras a serem estudadas e, com a realização destes testes, verificou-se a inviabilidade de se trabalhar fixando a massa total das partículas no interior do leito, já que, para as partículas de baixa massa específica, a altura estática de leito obtida com esta massa (aproximadamente 128 g) foi muito elevada. Assim, optou-se por manter a altura estática do leito constante para a realização dos demais experimentos. A influência da altura do leito no comportamento do sistema foi avaliada através das curvas características obtidas para duas alturas,  $H_0=3,5$  e  $4,5$  cm.

**Tabela 3.3:** Valores de  $H_0$  e respectivas massas dos leitos de partículas utilizados nos experimentos.

	<b>Material</b>	<b><math>H_0</math> (cm)</b>	<b>Massa (g)</b>
<b>Grupo I</b>	Sementes de abóbora	3,5 e 4,5	283,50 e 385,74
	Sementes de girassol	3,5 e 4,5	253,61 e 324,19
	Lentilhas	3,5 e 4,5	671,79 e 821,88
	Flocos de aveia	3,5 e 4,5	392,89 e 470,75
<b>Grupo II</b>	Brácteas de primavera	3,5 e 4,5	27,39 e 34,97
	Folhas de pingo de ouro	3,5 e 4,5	74,57 e 94,10
	Folhas de aroeira	3,5 e 4,5	112,97 e 142,84
	Folhas de buxinho	3,5 e 4,5	182,38 e 236,50
	Quadrados de boldo	3,5	103,32
<b>Grupo III</b>	“Folhas” de papel	3,0	128,39
	Quadrados de papel	3,5	128,42
	Lentilhas de plástico	3,5 e 4,5	487,06 e 608,04
	Lantejoulas	3,5 e 4,5	296,56 e 394,08
	Paetês	3,5 e 4,5	355,38 e 456,14

De acordo com a literatura, a introdução de vibração mecânica vertical em um leito fluidizado possibilita aumentar as taxas de transferência de calor e massa, reduzir a velocidade de mínima fluidização e a perda de carga no leito, além de diminuir a formação de zonas mortas e canais preferenciais. Assim, a vibrofluidização foi avaliada como alternativa de assegurar uma boa mistura entre as fases e a homogeneidade da fluidização. O parâmetro

vibracional ( $\Gamma$ ), definido pela Equação 4 foi adotado para quantificar a intensidade da vibração no leito. Nos experimentos realizados, adimensionais de vibração ( $\Gamma$ ) iguais a 0,5; 1,0 e 1,5 foram testados utilizando-se duas diferentes amplitudes ( $A$ ) vibracionais, 0,4 e 0,5 cm. As diferentes combinações entre amplitude e frequência ( $f$ ) de vibração obtidas para os valores de  $\Gamma$  utilizados encontram-se na Tabela 3.4. Nos ensaios realizados para as partículas de papel observou-se que o uso de  $\Gamma = 1,5$  diminuía a estabilidade estrutural do leito. Desta forma, devido às dificuldades operacionais encontradas este adimensional de vibração não foi testado para as demais partículas.

**Tabela 3.4:** Valores dos parâmetros vibracionais utilizados nos experimentos fluidodinâmicos.

		$\Gamma = 0,5$	$\Gamma = 1,0$	$\Gamma = 1,5$
$f$ (Hz)	$A = 0,4$ cm	5,6	7,9	9,7
	$A = 0,5$ cm	5,0	7,1	8,6

Cada ponto fornecido pelo sistema de aquisição de dados de vazão de ar e queda de pressão no leito foi obtido pela média de 512 pontos coletados no intervalo de 3 segundos. Estes valores médios foram utilizados para a construção das curvas características de fluidização. Em todos os ensaios, a temperatura média do ar foi mantida em 25°C.

A velocidade de mínima fluidização para o leito fluidizado ( $U_{mf}$ ) e vibrofluidizado ( $U_{mvf}$ ) foi determinada utilizando-se a metodologia clássica empregada para leitos fluidizados convencionais, ou seja, pela intersecção das duas retas que descrevem a curva experimental, uma tangente à curva de leito fixo e a outra tangente à curva de leito fluidizado. Todos os ensaios foram realizados em triplicata (para as partículas do Grupo II, folhas frescas foram utilizadas nos diferentes ensaios) e os valores médios das velocidades de transição e  $\Delta P_{mf}$  foram considerados. Para o leito fluidizado, os valores de  $U_{mf}$  obtidos experimentalmente foram comparados com os preditos pelas correlações de Wen e Yu (1966) (Equações 1, 2 e 3), de Ergun aplicada à fluidização incipiente (Equações 7 e 8) utilizando-se a metodologia proposta por Reina *et al.* (2000) e de Lucas *et al.* (1986) para a categoria de partículas com  $0,1 < \phi < 0,5$  (Equação 11). Para as duas últimas correlações, que levam em conta a esfericidade das partículas, calculou-se a  $U_{mf}$  utilizando os valores de esfericidade obtidos pelas Equações 20 e 21, propostas por Massarani (2002) e Mohsenin (1970),

respectivamente. O diâmetro utilizado nas correlações foi o diâmetro de volume definido pela Equação 13. Os resultados obtidos para o leito vibrofluidizado foram analisados visando identificar a influência da introdução de vibração na dinâmica do leito, assim como, nos parâmetros  $U_{mf}$  e  $\Delta P_{mf}$ .

Os valores de queda de pressão experimentais foram comparados com os obtidos através da equação baseada no princípio da fluidização, em que no ponto de mínima fluidização a perda de carga através do leito de partículas se iguala ao peso aparente das mesmas (Equação 6):

$$\Delta P_{mf} = H_{mf}(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho)g \quad (6)$$

onde  $H_{mf}$  e  $\varepsilon_{mf}$  são, respectivamente, a altura e a porosidade do leito na condição de mínima fluidização e  $\rho_p$  e  $\rho$  são, respectivamente, a massa específica da partícula e do ar.

### 3.3.4 Porosidade do leito na condição de mínima fluidização

A porosidade de mínima fluidização do leito ( $\varepsilon_{mf}$ ) foi obtida da maneira proposta por Reina *et al.* (2000). Massas conhecidas das partículas foram introduzidas no leito e foram realizadas medidas simultâneas da queda de pressão e da altura do leito para velocidades decrescentes do ar, o que permitiu determinar a expansão do leito em função da velocidade do ar. Estes ensaios foram realizados no leito constituído de acrílico e as alturas foram medidas visualmente através de uma régua milimetrada inserida no leito. Dessa forma, foi possível encontrar a altura do leito na condição de mínima fluidização ( $H_{mf}$ ) e, assim, calcular a porosidade de mínima fluidização através da equação:

$$\varepsilon_{mf} = \frac{m_p}{aH_{mf}\rho_p} \quad (30)$$

onde  $m_p$  é a massa de partículas no interior do leito,  $a$  é a área da seção transversal do leito retangular e  $\rho_p$  é a massa específica das partículas utilizadas no experimento.

### 3.3.5 Ensaios Fluidodinâmicos Preliminares

Os ensaios fluidodinâmicos preliminares foram realizados com partículas de vidro “ballotini” ( $\phi=1,0$ ) com diâmetro médio de  $925 \mu\text{m}$  e densidade igual a  $2,500 \text{ g.cm}^{-3}$ . As curvas características de fluidização foram obtidas para a altura estática de leito ( $H_0$ ) de 3,5 cm (massa igual a 1396,83 g) e o valor de velocidade de mínima fluidização obtido foi comparado com os valores preditos através da correlação clássica de Wen e Yu (1966) (Equações 1, 2 e 3) e da equação de Lucas *et al.* (1986) para a categoria de partículas com esfericidades entre 0,8 e 1,0 (Equação 9).

Estes ensaios preliminares foram realizados com o intuito de verificar o bom funcionamento do equipamento e dos sistemas de medida. Os dados obtidos foram utilizados também como referência de um comportamento fluidodinâmico de qualidade, visto que, as demais partículas apresentam esfericidades reduzidas e são consideradas de difícil fluidização.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos neste trabalho a partir da metodologia descrita no Capítulo 3.

Inicialmente, serão apresentadas as características físicas obtidas para as partículas em estudo. Em seguida, serão analisados os resultados obtidos para a caracterização em leito fixo com o intuito de se obter informações sobre a resistência que meios constituídos por partículas planas oferecem à passagem do ar. No item seguinte será analisado o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado, onde será examinada a dependência das propriedades físicas das partículas no processo de fluidização. No final é feita uma análise da influência da vibração na qualidade da fluidização obtida para diferentes parâmetros vibracionais.

Os resultados serão apresentados graficamente de forma padronizada, entretanto, como as partículas utilizadas apresentam uma grande variação de tamanho e massa específica, em algumas situações, as escalas tiveram que ser redimensionadas para facilitar a visualização e interpretação dos resultados.

#### 4.1 Caracterização dos Materiais Sólidos

Na Tabela 4.1 estão apresentados os valores das dimensões características das partículas estudadas: dimensões de Feret ( $d_F$ ) – comprimento ( $l_F$ ) e largura ( $w_F$ ), áreas projetadas ( $A_{proj}$ ) e perímetros ( $P$ ), as espessuras ( $\delta$ ), áreas superficiais ( $A_p$ ), volumes ( $V_p$ ) e razões  $A_p/V_p$ . Os valores de esfericidade apresentados foram calculados através das equações propostas por Massarani (2002) e Mohsenin (1970), Equações 20 e 21, respectivamente. A esfericidade obtida pelo uso da Equação 21 ( $\phi'$ ) foi utilizada somente como mais uma opção de verificar a validade das correlações usadas para prever a velocidade de mínima fluidização. É possível observar que o uso desta equação resultou em valores de esfericidade mais elevados para algumas partículas e menos elevados para outras em relação aos valores obtidos pela Equação 20, denotados por  $\phi$ . Nota-se que as partículas estudadas apresentam

esfericidades que vão de valores inferiores a 0,1 até valores próximos a 0,6, ou seja, fora da faixa usualmente utilizada em fluidização.

Em geral, as partículas do Grupo I são as que apresentam as maiores esfericidades ( $0,431 \leq \phi \leq 0,574$ ) e menores áreas ( $0,33 \leq A_{\text{proj}} \leq 2,08 \text{ cm}^2$ ) e razões  $A_p/V_p$  ( $12 \leq A_p/V_p \leq 41 \text{ cm}^{-1}$ ) e têm massas específicas que variam de 0,52 a 1,33  $\text{g.cm}^{-3}$ . Dentre os materiais do grupo II estão aqueles que apresentam áreas mais elevadas, que são as brácteas de primavera e folhas de buxinho, com áreas projetadas de 11,9 e 25,9  $\text{cm}^2$ , respectivamente. As esfericidades das partículas deste grupo variam de 0,072 a 0,213 e as massas específicas de 0,52 a 0,97  $\text{g.cm}^{-3}$ . Os valores obtidos para as relações  $A_p/V_p$  são, na grande maioria dos casos, superiores aos obtidos para os materiais do Grupo I, variando na faixa entre 21 e 113  $\text{cm}^{-1}$ . Entre as partículas do Grupo III estão aquelas que apresentam os menores volumes: 0,012 e 0,014  $\text{cm}^3$  para as lantejoulas e quadrados de papel, respectivamente. Neste grupo estão contidas tanto partículas com esfericidades muito baixas, como as “folhas” de papel ( $\phi=0,063$ ) e quadrados de papel ( $\phi=0,090$ ), quanto partículas que apresentam esfericidades mais elevadas, como as lentilhas de plástico ( $\phi=0,568$ ). As partículas deste grupo apresentam massas específicas que variam de 0,83 a 1,31  $\text{g.cm}^{-3}$ .

**Tabela 4.1:** Propriedades físicas dos materiais particulados.

Partícula	$d_F$ (cm)	$A_{proj}$ ( $cm^2$ )	$P$ (cm)	$\delta$ (cm)	$A_p$ ( $cm^2$ )	$V_p$ ( $cm^3$ )	$A_p/V_p$ ( $cm^{-1}$ )	$\varphi$ (-)	$\varphi'$ (-)	$\rho_p$ ( $g.cm^{-3}$ )	
GRUPO I	SA	$\frac{l_F - 2,25 \pm 0,18}{w_F - 1,23 \pm 0,07}$	$2,08 \pm 0,21$	$5,83 \pm 0,37$	0,277	5,78	0,493	12	0,523	0,407	0,73
	SG	$\frac{l_F - 1,41 \pm 0,11}{w_F - 0,80 \pm 0,12}$	$0,91 \pm 0,16$	$3,79 \pm 0,28$	0,421	3,42	0,225	15	0,524	0,554	0,52
	LE	$\frac{l_F - 0,67 \pm 0,05}{w_F - 0,63 \pm 0,05}$	$0,34 \pm 0,04$	$2,11 \pm 0,14$	0,218	1,14	0,050	23	0,574	0,674	1,33
	AB	$\frac{l_F - 0,86 \pm 0,06}{w_F - 0,48 \pm 0,03}$	$0,33 \pm 0,03$	$2,42 \pm 0,29$	0,072	0,84	0,020	41	0,431	0,361	1,20
GRUPO II	BP	$\frac{l_F - 4,66 \pm 0,03}{w_F - 3,42 \pm 0,34}$	$11,9 \pm 1,70$	$13,6 \pm 1,01$	0,018	24,0	0,212	113	0,072	0,141	0,52
	FO	$\frac{l_F - 2,56 \pm 0,27}{w_F - 1,36 \pm 0,10}$	$2,18 \pm 0,29$	$6,48 \pm 0,58$	0,018	4,48	0,080	56	0,201	0,156	0,95
	FA	$\frac{l_F - 3,88 \pm 0,34}{w_F - 0,65 \pm 0,05}$	$1,63 \pm 0,22$	$8,59 \pm 0,77$	0,017	3,40	0,058	59	0,213	0,090	0,97
	FB	$\frac{l_F - 7,71 \pm 0,51}{w_F - 4,98 \pm 0,34}$	$25,9 \pm 3,15$	$21,1 \pm 1,25$	0,098	53,9	2,531	21	0,167	0,201	0,85
	QB	$\frac{l_F - 1,74 \pm 0,19}{w_F - 1,66 \pm 0,19}$	$1,93 \pm 0,27$	$5,64 \pm 0,46$	0,058	4,18	0,068	62	0,193	0,316	0,92

**Tabela 4.1:** Propriedades físicas dos materiais particulados (continuação).

<b>GRUPO III</b>	FP	$\frac{l_F - 3,28 \pm 0,06}{w_F - 1,90 \pm 0,08}$	4,45±0,23	8,41±0,18	0,009	8,98	0,040	224	0,063	0,117	0,83
	QP	$\frac{l_F - 1,49 \pm 0,15}{w_F - 1,41 \pm 0,16}$	1,51±0,09	4,98±0,18	0,009	3,06	0,014	226	0,090	0,179	0,83
	LP	$\frac{l_F - 1,27 \pm 0,01}{w_F - 0,90 \pm 0,01}$	0,88±0,01	4,28±0,05	0,231	2,75	0,183	15	0,568	0,505	1,04
	LA	$\frac{l_F - 0,82 \pm 0,01}{w_F - 0,81 \pm 0,01}$	0,52±0,01	3,26±0,07	0,025	1,12	0,012	92	0,228	0,312	1,20
	PA	$\frac{l_F - 2,47 \pm 0,02}{w_F - 2,43 \pm 0,03}$	4,82±0,08	8,14±0,07	0,020	9,80	0,101	97	0,107	0,200	1,31

**Legenda:** SA – semente de abóbora; SG – semente de girassol; LE – lentilha; AB – floco de aveia branca; BP – bráctea de primavera; FO – folha de pingo de ouro; FA – folha de aroeira; FB – folha de buxinho; QB – quadrado de boldo; FP – “folha” de papel; QP – quadrado de papel; LP – lentilha de plástico; LA – lantejola; PA – paetê.

## 4.2 Leito Fixo

### 4.2.1 Porosidade do Leito

Os resultados obtidos para a porosidade bulk média ( $\bar{\epsilon}_b$ ) dos leitos fixos encontram-se na Tabela 4.2, onde foram incluídos os valores das esfericidades e dos diâmetros volumétricos de todas as partículas, além do produto  $\phi d_v$ . Estes resultados estão organizados em dois grupos segundo as técnicas de empacotamento utilizadas que se encontram descritas no item 3.3.2.

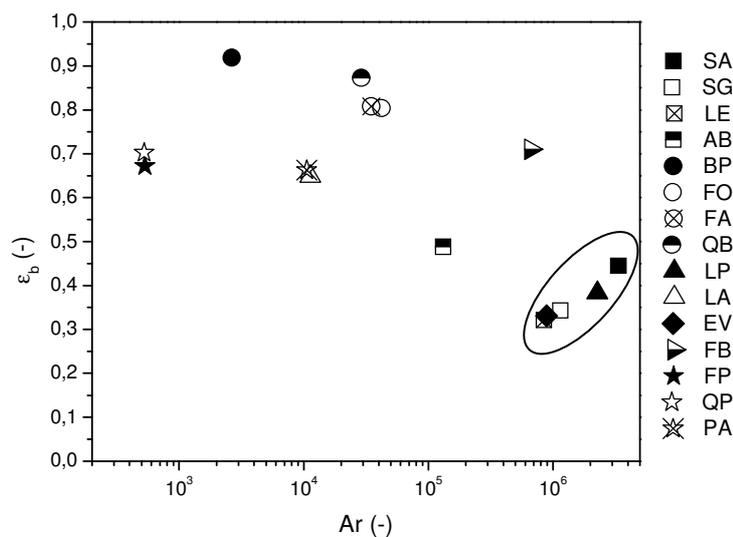
**Tabela 4.2:** Porosidade média dos leitos fixos constituídos por partículas com esfericidade  $\phi$  e diâmetro volumétrico  $d_v$  e respectivos números de Arquimedes.

	Material	$\phi$ (-)	$d_v$ (cm)	$\phi * d_v$ (cm)	$\bar{\epsilon}_b$ (-)	Ar (-)
Técnica I	Sementes de abóbora	0,523	0,980	0,513	0,445	$3,36 \times 10^6$
	Sementes de girassol	0,524	0,755	0,396	0,343	$1,15 \times 10^6$
	Lentilhas	0,574	0,456	0,262	0,321	$8,47 \times 10^5$
	Flocos de aveia	0,431	0,338	0,146	0,488	$1,32 \times 10^5$
	Brácteas de primavera	0,072	0,740	0,053	0,919	$2,65 \times 10^3$
	Folhas de pingo de ouro	0,201	0,535	0,108	0,804	$4,21 \times 10^4$
	Folhas de aroeira	0,213	0,480	0,102	0,808	$3,48 \times 10^4$
	Quadrados de boldo	0,193	0,506	0,098	0,873	$2,90 \times 10^4$
	Lentilhas de plástico	0,568	0,705	0,400	0,383	$2,27 \times 10^6$
	Lantejoulas	0,228	0,286	0,065	0,648	$1,13 \times 10^4$
Técnica II	Esferas de vidro	1,000	0,218	0,218	0,304	$8,89 \times 10^5$
	“Folhas” de papel	0,063	0,424	0,027	0,672	$5,33 \times 10^2$
	Quadrados de papel	0,090	0,296	0,027	0,702	$5,25 \times 10^2$
	Paetês	0,107	0,578	0,062	0,663	$1,06 \times 10^4$
	Folhas de buxinho	0,167	1,691	0,282	0,710	$6,62 \times 10^5$

Para auxiliar na interpretação dos resultados e na avaliação da influência destes fatores, assim como da massa específica da partícula, na porosidade bulk obtida, estas características dos materiais foram agrupadas através do número de Arquimedes, que engloba estes três parâmetros de acordo com a equação:

$$Ar = \frac{(\phi d_v)^3 \rho (\rho_p - \rho) g}{\mu^2} \tag{3}$$

Os resultados obtidos foram utilizados para a construção do gráfico de porosidade bulk do leito fixo em função do número de Arquimedes das partículas e se encontra apresentado na Figura 4.1.



**Figura 4.1:** Porosidade bulk dos leitos fixos em função do número de Arquimedes.

Nota-se na figura que, em geral, as porosidades tendem a diminuir com o aumento de Ar e que os dados separam-se em dois grupos distintos, com as partículas do Grupo II (folhas), em geral, apresentando porosidades mais altas do que as demais. Avaliando-se o efeito do produto  $\phi d_v$  sobre a porosidade obtida no leito, é possível constatar pelos resultados apresentados na Tabela 4.2 e Figura 4.1 que os materiais com maiores  $\phi d_v$  apresentaram as menores porosidades bulk. Dentre estes materiais se encontram as partículas do Grupo I, assim como as lentilhas de plástico (Grupo III) e esferas de vidro (EV), que são as

partículas que possuem os maiores valores de  $\phi$  dentre todos os materiais investigados. Para este grupo de partículas, com exceção dos flocos de aveia, nota-se uma tendência de crescimento linear de  $\overline{\varepsilon_b}$  com o aumento de Ar (região destacada na Figura 4.1). As esferas de vidro e lentilhas de plástico, mesmo apresentando esfericidades, diâmetros volumétricos e massas específicas diferentes, apresentaram valores similares de Ar e as porosidades bulk obtidas para os leitos destas partículas foram próximas.

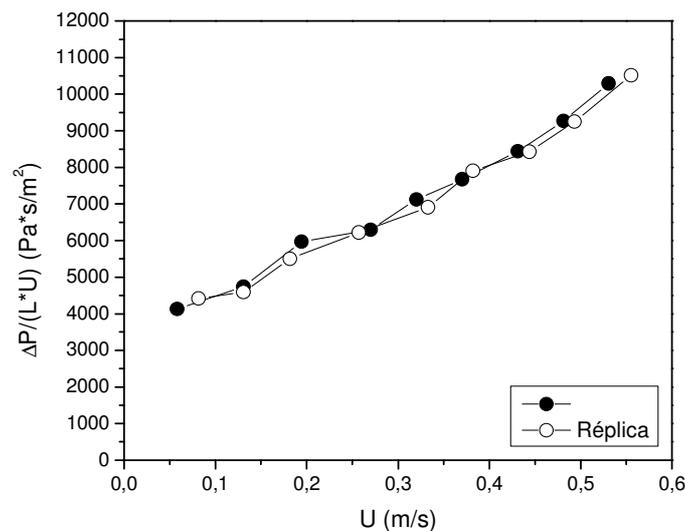
Para as partículas do Grupo II, empacotadas pela técnica convencional, foram obtidos valores de  $\phi d_v$  inferiores a 0,108 cm e porosidades bulk superiores a 0,8. Para este grupo de partículas, nota-se que a  $\overline{\varepsilon_b}$  aumenta ligeiramente com a diminuição do produto  $\phi d_v$ . As folhas de pingo de ouro, aroeira e boldo (na forma de quadrados), que apresentam valores de  $\phi$ ,  $d_v$  e  $\rho_p$  similares e, assim, possuem números de Arquimedes próximos, se posicionaram em uma mesma região do gráfico, sendo a porosidade destes leitos muito semelhantes, variando de 0,804 a 0,873. Para as brácteas de primavera, que apresentam massa específica similar à das sementes de girassol, obteve-se um valor de Ar muito inferior ( $2,65 \times 10^3$ ) e uma porosidade elevada. Isto indica, provavelmente, que a forma altamente irregular e os tamanhos extremos apresentados pelas folhas do Grupo II, exerceram maior influência na  $\overline{\varepsilon_b}$  obtida do que a massa específica das partículas. Este comportamento também foi observado entre as lantejoulas e lentilhas de plástico, pertencentes ao Grupo III.

As partículas de papel e paetês foram acomodadas manualmente no interior do leito (Técnica II) com a superfície de maior área orientada perpendicularmente à direção do escoamento de ar. O leito constituído pelas folhas de buxinho também foi empacotado segundo a Técnica II, entretanto, as folhas foram alinhadas com as faces de maior área no sentido do escoamento. Através da Figura 4.1 podemos perceber que valores de porosidade bulk similares foram encontrados para os diferentes leitos de partículas ( $0,663 < \overline{\varepsilon_b} < 0,710$ ). As “folhas” e quadrados de papel foram os materiais que apresentaram os menores valores de  $\phi d_v$  dentre todos os materiais investigados. Estas partículas, cortadas em diferentes formas e com diâmetros volumétricos diferentes, apresentaram o mesmo valor de  $\phi d_v$ , igual a 0,027 cm e os valores de porosidade bulk também foram parecidos (0,672 e 0,702 para as “folhas” e quadrados de papel, respectivamente).

### 4.2.2 Análise Fluidodinâmica

Os ensaios em leito fixo foram inicialmente realizados para as esferas de vidro “ballotini” ( $\phi=1,0$ ) de diâmetro médio igual a  $2180 \mu\text{m}$  e massa específica de  $2,500 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Os valores de queda de pressão para velocidades crescentes do ar foram utilizados para a construção dos gráficos de  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ , onde foram assumidas as hipóteses de meio poroso isotrópico, homogêneo e fluido incompressível.

A Figura 4.2 exibe os gráficos obtidos nestes testes preliminares. A réplica do gráfico foi obtida para a verificação da reprodutibilidade dos ensaios realizados e, analisando-se a Figura 4.2, podemos perceber que os dois gráficos encontram-se praticamente sobrepostos, mostrando a boa reprodutibilidade dos dados obtidos nestas condições.



**Figura 4.2:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$  para esferas de vidro “ballotini”;  $d_v=2180\mu\text{m}$ ;  $\rho_p=2,500\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Através da análise dos resultados foi possível verificar que a equação de Forchheimer descreveu satisfatoriamente os dados experimentais na faixa investigada.

Para a determinação dos parâmetros  $\kappa$  e  $c$ , foi feito um ajuste linear dos pontos experimentais e os coeficientes linear e angular foram obtidos. Estes coeficientes foram, então, comparados com os coeficientes  $\mu/\kappa$  (linear) e  $c\rho/\sqrt{\kappa}$  (angular) da equação de Forchheimer (Equação 12) e os valores médios de  $\kappa$  e  $c$  encontrados, foram, respectivamente, iguais a

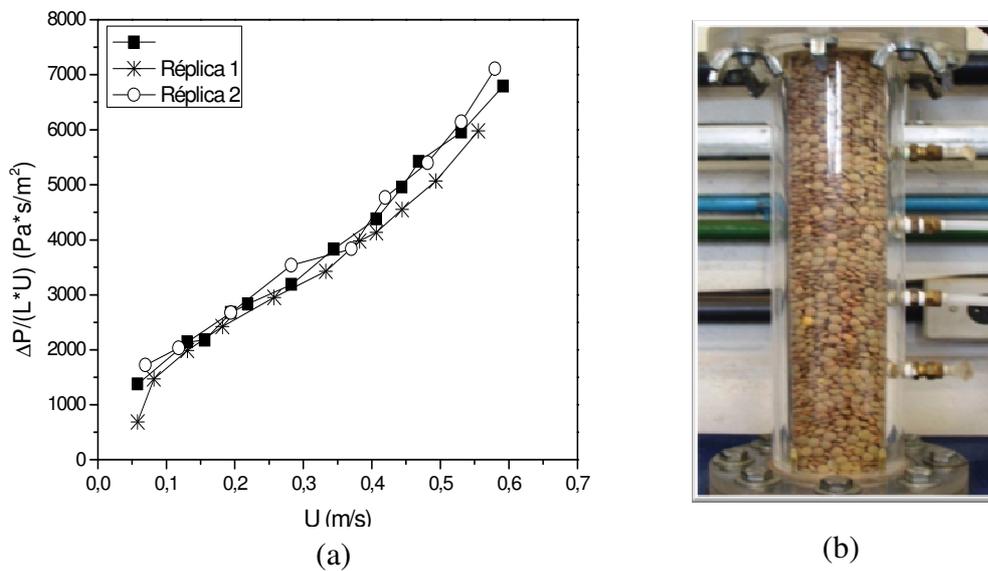
$5,88 \times 10^{-9} \pm 1,63 \times 10^{-10} \text{ m}^2$  e  $0,81 \pm 0,01$ , valores compatíveis com os relatados na literatura para leitos de esfera com porosidades médias similares (Silva Telles e Massarani, 1979). Visto que estas partículas são regulares em forma e tamanho, e amplamente estudadas na literatura, estes dados serão utilizados como referência para os resultados encontrados para as partículas de baixa esfericidade.

Os ensaios em leito fixo foram, então, realizados para as demais partículas. Os resultados foram organizados em dois grupos segundo as técnicas de empacotamento utilizadas, que estão descritas no item 3.3.2, e serão analisados separadamente.

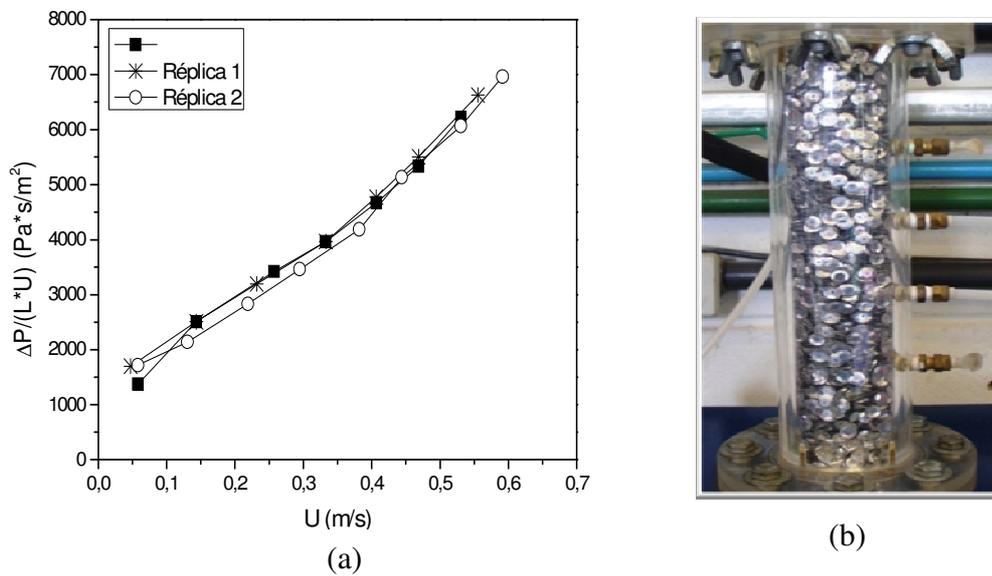
Inicialmente, serão apresentados os resultados referentes às partículas empacotadas através do método clássico, que foram as sementes de abóbora e girassol, lentilhas, flocos de aveia, lentilhas de plástico, lantejoulas, brácteas de primavera, folhas de pingo de ouro e aroeira, e quadrados de boldo.

As curvas obtidas para os leitos de partículas do Grupo I (sementes de abóbora, semente de girassol, lentilhas e flocos de aveia) e III (lentilhas de plástico e lantejoulas), exibiram comportamento semelhante ao obtido para as esferas de vidro. As Figuras 4.3(a) e 4.4(a) exibem os gráficos de  $\Delta P/LU$  em função de  $U$  obtidos para as lentilhas e lantejoulas, respectivamente, onde é possível perceber a boa reprodutibilidade dos dados obtidos para estas partículas nas condições investigadas. Os parâmetros  $\kappa$  e  $c$  foram determinados utilizando-se a mesma metodologia descrita para as esferas de vidro e os valores obtidos se encontram na Tabela 4.3 e serão discutidos posteriormente. As Figuras 4.3(b) e 4.4(b) apresentam fotografias dos leitos constituídos por tais partículas na condição inicial dos experimentos. Para os leitos constituídos por estes materiais foi possível verificar através de análise visual a movimentação de algumas partículas no interior da câmara a partir de uma determinada velocidade de escoamento do ar.

Os resultados obtidos para os demais materiais dos Grupos I e III estão, por motivos de concisão, apresentados no Apêndice A (Figuras A.1, A.2, A.3 e A.4). Através das réplicas apresentadas é possível verificar que os dados obtidos para as sementes de girassol apresentaram boa reprodutibilidade. Entretanto, para as sementes de abóbora, aveia e lentilhas plásticas maiores desvios foram observados entre a medida e suas réplicas.



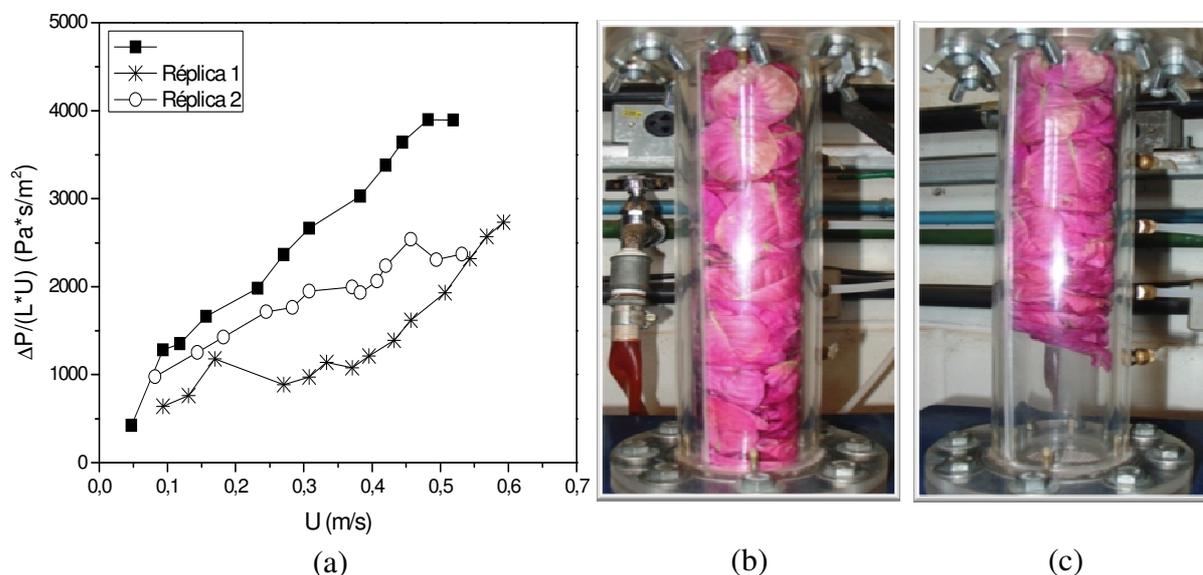
**Figura 4.3:** Leito fixo; Lentilhas;  $\phi=0,574$ ;  $d_v=0,456\text{cm}$ ;  $\rho_p=1,33\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; (b) Fotografia do leito na condição inicial.



**Figura 4.4:** Leito fixo; Lantejoulas;  $\phi=0,228$ ;  $d_v=0,286\text{cm}$ ;  $\rho_p=1,20\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; (b) Fotografia do leito na condição inicial.

A Figura 4.5(a) traz os gráficos de  $\Delta P/LU$  em função de  $U$  obtidos para as brácteas de primavera. É possível notar que os gráficos obtidos para estas partículas não

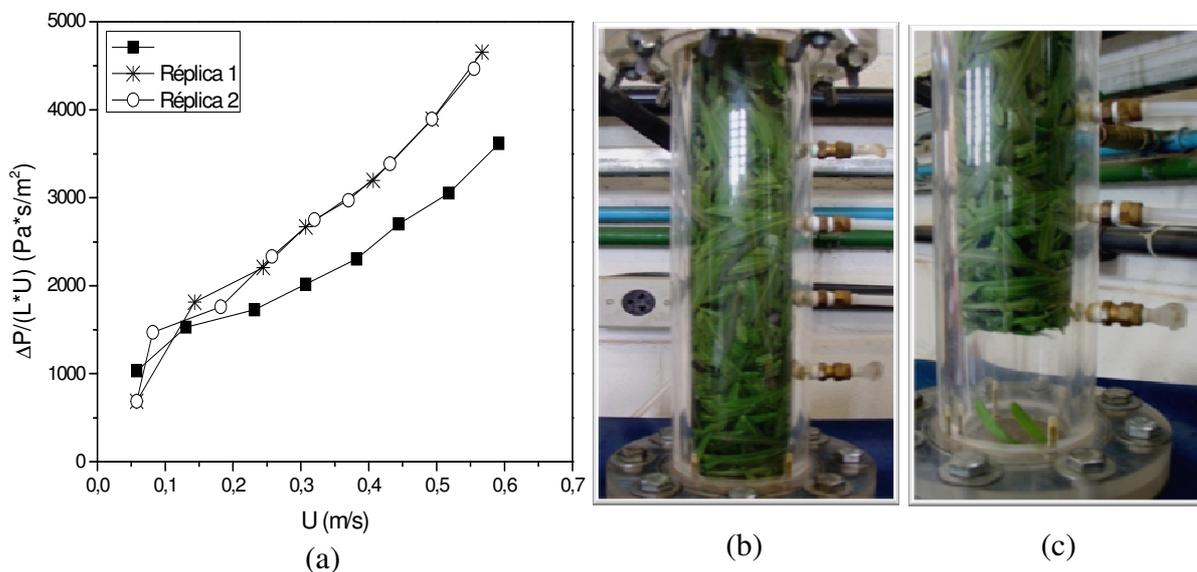
apresentaram boa reprodutibilidade, visto que o empacotamento de leitos constituídos por partículas com formas extremas e tamanhos irregulares resulta em leitos orientados inteiramente ao acaso, dificultando a reprodução do mesmo empacotamento em diferentes ensaios. Visualmente, observou-se que o aumento contínuo da velocidade do ar fez com que o leito de partículas fosse levantado como um todo (Figuras 4.5(b) e 4.5(c)), limitando a faixa de velocidades aceitáveis para um valor inferior ao da velocidade em que este comportamento é observado. Este comportamento é peculiar deste tipo de material, que apresenta como característica a ausência de rigidez, podendo se deformar com o escoamento do ar.



**Figura 4.5:** Leito fixo; Brácteas de primavera;  $\phi=0,072$ ;  $d_v=0,740\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,52\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Fotografias: (b) Leito na condição inicial; (c) Elevação das partículas.

As curvas de  $\Delta P/LU$  em função da velocidade superficial do ar para as folhas de aroeira são mostradas na Figura 4.6(a), onde se nota que embora os desvios entre as réplicas tenham sido inferiores aos obtidos para a primavera, não foi possível verificar uma boa reprodutibilidade dos ensaios. A elevação do leito com o escoamento do ar também foi verificada para estas partículas (ver Figuras 4.6(b) e 4.6(c)), assim como para os demais materiais do Grupo II. Os gráficos de  $\Delta P/LU$  em função da velocidade superficial do ar obtidos para as folhas de pingo de ouro e boldo (quadrados) estão dispostos no Apêndice A (Figuras A.5 e A.6, respectivamente), onde se nota que a reprodutibilidade dos dados observada para o pingo de ouro foi mais parecida com a obtida para as folhas de aroeira,

entretanto, para os quadrados de boldo, maiores diferenças foram obtidas entre a medida e suas réplicas em toda a extensão dos gráficos.



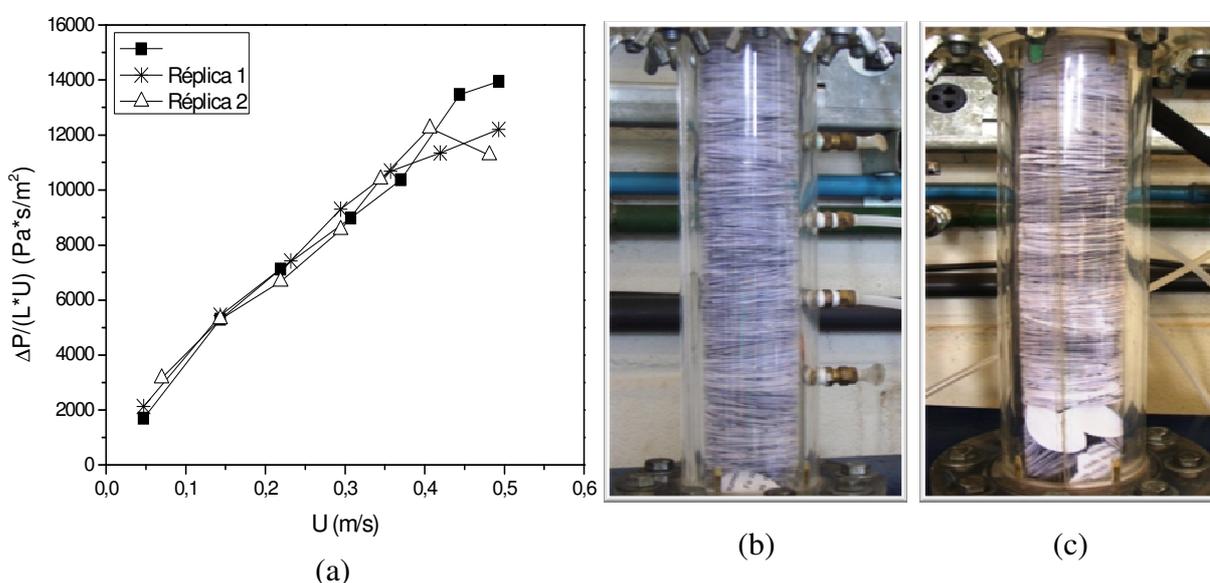
**Figura 4.6:** Leito fixo; Folhas de aroeira;  $\phi=0,213$ ;  $d_v=0,480\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,97\text{g.cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Fotografias: (b) Leito na condição inicial; (c) Elevação das partículas.

Continuando a análise dos ensaios em leito fixo, serão apresentados os dados obtidos para as partículas empacotadas manualmente. Sabe-se que a maneira como as partículas se orientam no interior do leito exerce grande influência na resistência imposta ao escoamento. Se as partículas são alinhadas no sentido do escoamento, a resistência oferecida à passagem do ar é inferior à apresentada quando elas estão orientadas perpendicularmente ao escoamento. Assim, o comportamento fluidodinâmico foi avaliado para leitos de partículas empacotadas manualmente, em diferentes configurações dependendo da partícula. As “folhas” de papel, quadrados de papel e paetês foram acomodados manualmente no interior do leito com a superfície de maior área orientada perpendicularmente à direção de escoamento do ar e as folhas de buxinho foram orientadas paralelamente à direção do escoamento.

Os resultados obtidos para as “folhas” de papel estão dispostos na Figura 4.7. Analisando-se os gráficos de  $\Delta P/LU$  em função da velocidade superficial do ar (Figura 4.7(a)), é possível constatar que a reprodutibilidade obtida para estas partículas foi muito superior à obtida para as folhas do Grupo II. Visualmente, entretanto, o comportamento apresentado foi

similar, onde novamente se observou a desestruturação do leito de partículas, como mostram as Figuras 4.7(b) e 4.7(c).

Quanto à queda de pressão obtida no leito fixo, percebe-se que os valores encontrados foram bastante elevados. Este aumento era esperado e ocorre em função da orientação das partículas no interior do leito. Assim, as perdas de carga foram superiores, por exemplo, aos valores encontrados para os leitos constituídos por brácteas de primavera, que apresentam dimensões de Feret maiores que as das “folhas” de papel, mas que se encontram aleatoriamente organizadas no leito.



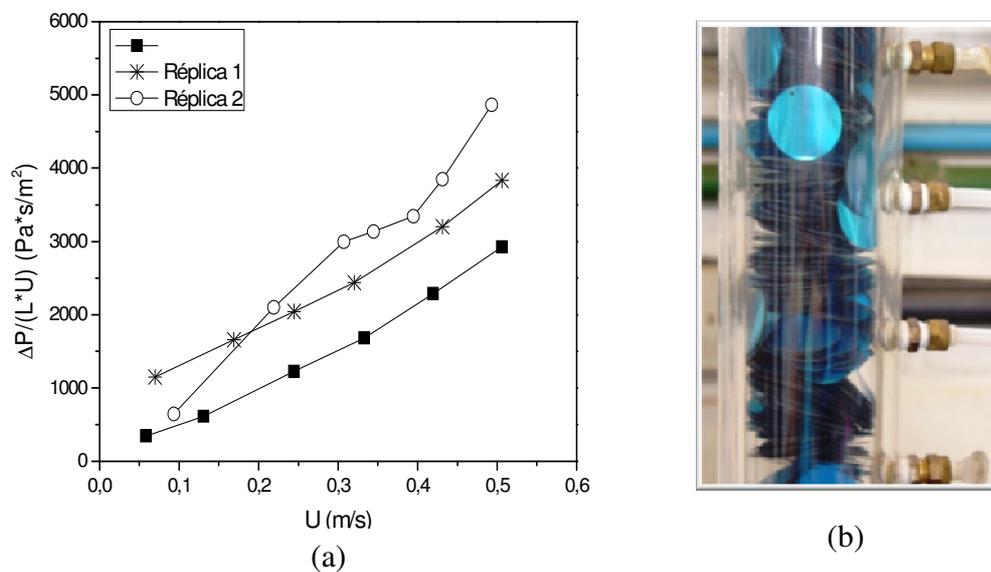
**Figura 4.7:** Leito fixo; “Folhas” de papel;  $\phi=0,063$ ;  $d_v=0,424\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,83\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Fotografias: (b) Leito na condição inicial; (c) Elevação das partículas.

Para os quadrados de papel (Figura A.7, Apêndice A) verificou-se o mesmo comportamento fluidodinâmico apresentado pela “folhas” de papel, com uma ressalva: a queda de pressão no leito foi inferior à obtida para o leito de “folhas” de papel. Este resultado está associado à menor organização dos quadrados de papel no leito e também à menor área superficial destas partículas.

O leito de paetês também apresentou comportamento similar às “folhas” de papel. Os gráficos obtidos para este material estão apresentados na Figura 4.8(a), onde se verifica que a reprodutibilidade obtida nos ensaios foi inferior à obtida para as partículas de papel. Este fato pode ser justificado pela rigidez superficial apresentada pelos paetês, que aumenta a dificuldade associada ao emparelhamento das partículas no leito, como pode ser

verificado pela Figura 4.8(b), facilitando a formação de canais preferenciais de escoamento de ar.

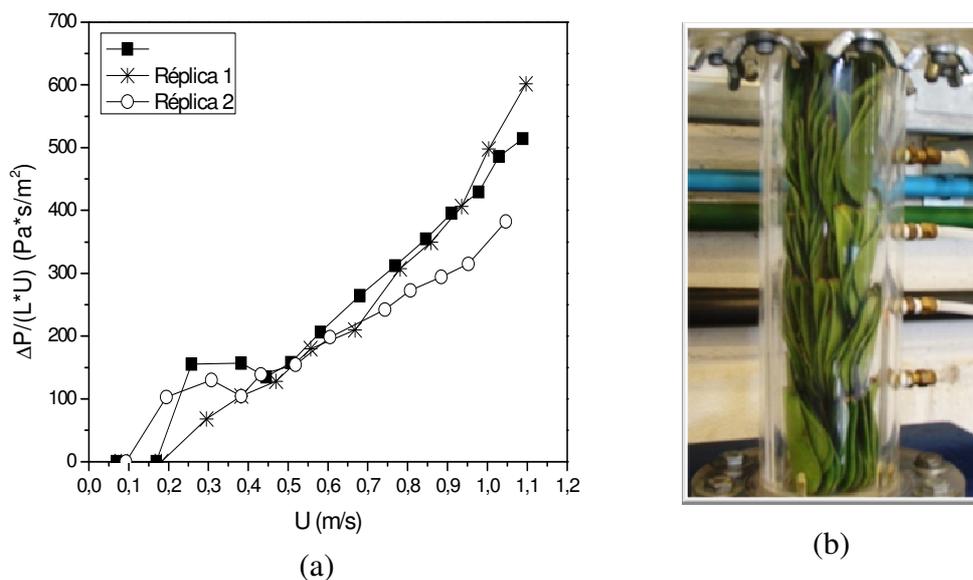
O ajuste linear destas curvas resultou em coeficientes lineares negativos para dois dos três ensaios, e isto, provavelmente, está associado com a dispersão apresentada pelos dados na região próxima de  $U$  tendendo a zero. Acredita-se que a dificuldade de reproduzir o emparelhamento das partículas no leito e a formação de canais preferenciais possa estar contribuindo para esta dispersão.



**Figura 4.8:** Leito fixo; Paetês;  $\phi=0,107$ ;  $d_v=0,578\text{cm}$ ;  $\rho_p=1,31\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; (b) Fotografia do leito na condição inicial.

A Figura 4.9(a) exibe as curvas fluidodinâmicas obtidas para o leito de folhas de buxinho, empacotado de forma que as partículas ficassem orientadas paralelamente ao escoamento (ver Figura 4.9(b)). Verifica-se nesta circunstância que a perda de carga no leito foi significativamente reduzida, tornando a operação de leitos com partículas orientadas nesta direção extremamente vantajosa.

As curvas obtidas se assemelharam às encontradas para os leitos de “folhas” e quadrados de papel, entretanto, como pode ser percebido pelos gráficos da Figura 4.9(a), o ajuste linear dos gráficos resultou em coeficientes lineares negativos. Novamente, a elevada dispersão dos dados nesta região provoca dificuldades para o ajuste do termo linear da forma linearizada da equação de Forchheimer, como ocorreu também para os paetês.



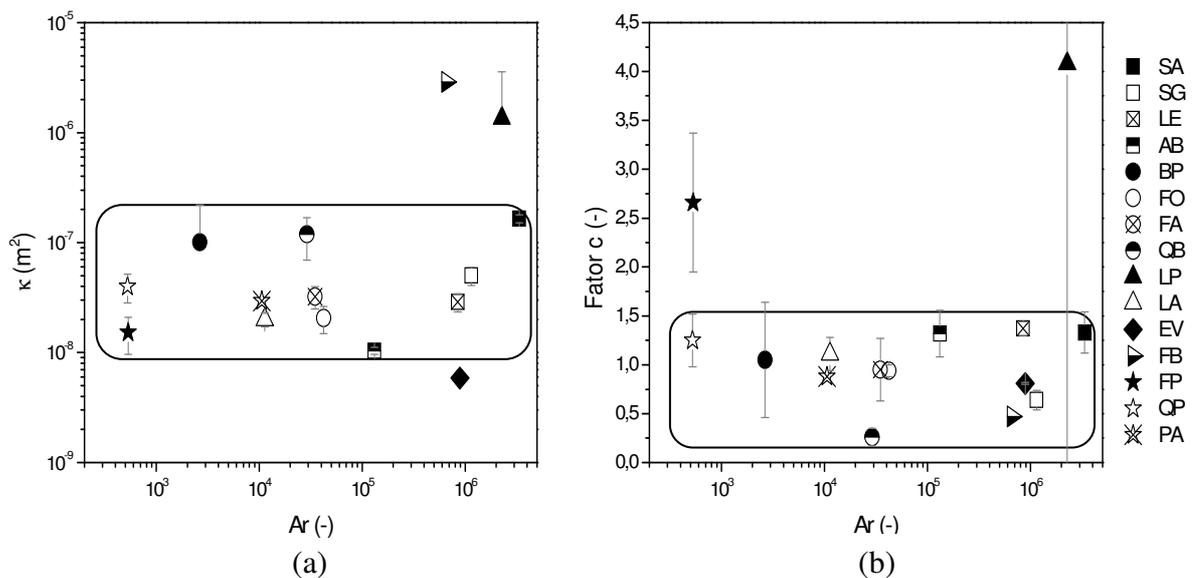
**Figura 4.9:** Leito fixo; Folhas de buxinho;  $\phi=0,167$ ;  $d_v=1,691\text{ cm}$ ;  $\rho_p=0,85\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (a)  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; (b) Fotografia do leito na condição inicial.

Os valores médios dos parâmetros  $\kappa$  e  $c$  obtidos para todos os casos acima discutidos e os respectivos desvios padrão encontrados entre a medida e suas réplicas são apresentados na Tabela 4.3, que inclui os valores calculados para o número de Arquimedes através da equação 3. Estes valores foram utilizados para a construção das Figuras 4.10(a) e 4.10(b), que trazem os gráficos de permeabilidade e fator  $c$  em função do número de Arquimedes, respectivamente, assim como, os respectivos desvios padrão obtidos da média.

Através da análise da Tabela 4.3 e Figura 4.10, percebe-se inicialmente que os desvios apresentados nos valores de permeabilidade e fator  $c$  obtidos para as lentilhas de plástico e brácteas de primavera foram, na maioria dos casos, superiores aos valores obtidos para a média. Este resultado é consequência da má reprodutibilidade apresentada pelas curvas destas partículas. Para as demais partículas é possível notar que os valores de permeabilidade e fator  $c$  obtidos permaneceram na faixa entre  $1,04 \times 10^{-8}$  e  $1,65 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ , e 0,26 e 1,37, respectivamente, apesar das acentuadas diferenças entre os números de Arquimedes das partículas. As folhas de pingo de ouro e aroeira, por exemplo, que apresentam  $Ar = 4,21 \times 10^4$  e  $3,48 \times 10^4$ , respectivamente, tiveram valores de permeabilidade similares ( $\kappa = 2,06 \times 10^{-8}$  e  $3,23 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ , respectivamente) ao obtido para as lentilhas ( $\kappa = 2,88 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ ), cujo número de Arquimedes é superior em uma ordem de grandeza ( $Ar = 8,47 \times 10^5$ ).

**Tabela 4.3:** Valores de permeabilidade e fator c obtidos para os leitos fixos de partículas e respectivos números de Arquimedes.

	Material	$\kappa$ (m <sup>2</sup> )	c (-)	Ar (-)
Técnica I	Sementes de abóbora	$1,65 \times 10^{-7} \pm 1,40 \times 10^{-8}$	$1,33 \pm 0,21$	$3,36 \times 10^6$
	Sementes de girassol	$5,03 \times 10^{-8} \pm 9,47 \times 10^{-9}$	$0,64 \pm 0,10$	$1,15 \times 10^6$
	Lentilhas	$2,88 \times 10^{-8} \pm 5,39 \times 10^{-9}$	$1,37 \pm 0,07$	$8,47 \times 10^5$
	Flocos de aveia	$1,04 \times 10^{-8} \pm 7,35 \times 10^{-10}$	$1,32 \pm 0,24$	$1,32 \times 10^5$
	Brácteas de primavera	$1,01 \times 10^{-7} \pm 1,19 \times 10^{-7}$	$1,05 \pm 0,59$	$2,65 \times 10^3$
	Folhas de pingo de ouro	$2,06 \times 10^{-8} \pm 5,71 \times 10^{-9}$	$0,94 \pm 0,06$	$4,21 \times 10^4$
	Folhas de aroeira	$3,23 \times 10^{-8} \pm 7,43 \times 10^{-9}$	$0,95 \pm 0,32$	$3,48 \times 10^4$
	Quadrados de boldo	$1,19 \times 10^{-7} \pm 4,97 \times 10^{-8}$	$0,26 \pm 0,09$	$2,90 \times 10^4$
	Lentilhas de plástico	$1,35 \times 10^{-6} \pm 2,22 \times 10^{-6}$	$4,08 \pm 5,20$	$2,27 \times 10^6$
	Lantejoulas	$2,00 \times 10^{-8} \pm 2,86 \times 10^{-9}$	$1,11 \pm 0,17$	$1,13 \times 10^4$
	Esferas de vidro	$5,88 \times 10^{-9} \pm 1,63 \times 10^{-10}$	$0,81 \pm 0,01$	$8,89 \times 10^5$
Técnica II	Folhas de buxinho	$2,88 \times 10^{-6}$	0,47	$6,62 \times 10^5$
	“Folhas” de papel	$1,53 \times 10^{-8} \pm 5,66 \times 10^{-9}$	$2,66 \pm 0,71$	$5,33 \times 10^2$
	Quadrados de papel	$4,00 \times 10^{-8} \pm 1,17 \times 10^{-8}$	$1,25 \pm 0,27$	$5,25 \times 10^2$
	Paetês	$2,95 \times 10^{-8}$	0,88	$1,06 \times 10^4$



**Figura 4.10:** Leito fixo; (a) Permeabilidade do leito em função do número de Arquimedes e (b) Fator c em função do número de Arquimedes.

Como observado no item 4.2.1, as partículas do Grupo II foram as que apresentaram as maiores porosidades bulk. Sabe-se que a porosidade é uma propriedade que está fortemente relacionada à permeabilidade de uma matriz porosa e, assim, leitos que apresentam alta porosidade são muito permeáveis. Entretanto, analisando-se os resultados é possível constatar que os valores de permeabilidade nem sempre aumentaram com o aumento da porosidade. Este comportamento atípico pode ser justificado pelas características apresentadas pelos materiais analisados. Ainda que os leitos formados por estas partículas apresentem alta porosidade bulk, as formas e tamanhos extremos das partículas, orientadas, em grande parte, perpendicularmente à direção do escoamento do ar, dificultam a passagem do fluido, diminuindo a permeabilidade dos leitos e fazendo com que estas sejam parecidas com a de leitos de menores  $\overline{\epsilon}_b$ . Assim como esperado, as folhas de buxinho, empacotadas manualmente no leito em uma configuração paralela ao escoamento do ar, foram as partículas que apresentaram maior permeabilidade ( $\kappa = 2,88 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ).

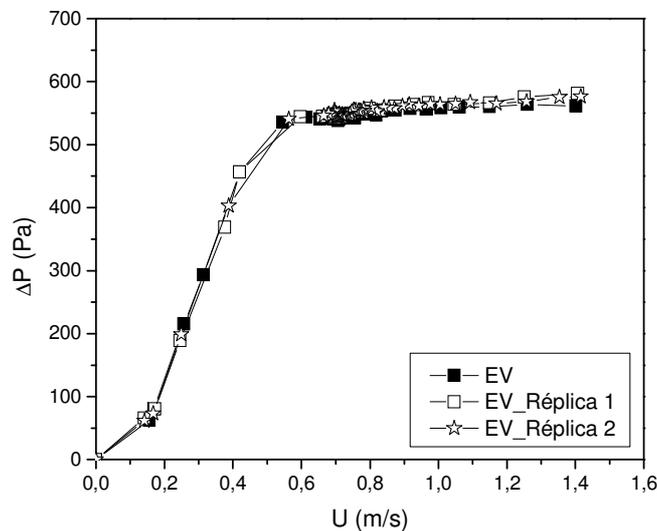
Outro fator a ser considerado é que a equação de Forchheimer descreve o comportamento do escoamento de fluidos através de uma matriz porosa que apresenta propriedades constantes (meio poroso isotrópico, homogêneo). Entretanto, como o empacotamento dos leitos foi altamente aleatório, resultando na maior parte dos casos em leitos não-homogêneos, um valor de porosidade média foi considerado para todos os leitos de partículas. Assim, a hipótese de meio poroso homogêneo não se aplica necessariamente para todos os casos aqui estudados. Deve-se ressaltar que os valores dos parâmetros  $\kappa$  e  $c$  obtidos para o leito de esferas de vidro apresentaram desvios pouco significativos, indicando que os elevados desvios observados para alguns dos materiais estão associados às características do tipo de partícula estudada.

Por último, deve-se ressaltar que, assim como descrito anteriormente, para os paetês e folhas de buxinho não foi possível obter os desvios padrão dos valores de  $\kappa$  e  $c$ , visto que o ajuste linear dos dados obtidos para estas partículas resultou em coeficientes lineares negativos. Entretanto, apesar das características diferenciadas dos materiais aqui investigados, para a maioria dos casos a obtenção desses parâmetros foi possível e os valores de permeabilidade obtidos foram da ordem de  $10^{-8} \text{ m}^2$  para a maior parte dos materiais, valor superior ao obtido para o leito de esferas que foi igual a  $5,88 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ , enquanto o fator  $c$  variou entre aproximadamente 0,3 e 1,5.

### 4.3 Leito Fluidizado

#### 4.3.1 Ensaios Fluidodinâmicos Preliminares

Os ensaios fluidodinâmicos preliminares em leito fluidizado foram realizados com esferas de vidro “ballotini” de 925  $\mu\text{m}$  de diâmetro para a altura de leito estático,  $H_0 = 3,5$ . Os valores obtidos de queda de pressão no leito para valores decrescentes da velocidade superficial do ar foram utilizados para a construção das curvas características de fluidização, que estão apresentadas na Figura 4.11. A partir desta figura, observa-se que as curvas para a medida e as suas réplicas encontram-se praticamente sobrepostas, confirmando a reprodutibilidade dos dados obtidos nestes ensaios. É possível constatar que as curvas obtidas são graficamente semelhantes à de um leito fluidizado convencional, sendo possível identificar uma região de transição bem definida entre os regimes de leito fixo e leito fluidizado.



**Figura 4.11:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; esferas de vidro (EV);  $d_v=925\mu\text{m}$ ;  $\rho_p=2,500\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

A velocidade de mínima fluidização foi obtida pela intersecção das duas linhas retas que descrevem a curva experimental: a linha para o leito fixo, onde  $\Delta P$  é uma função da velocidade superficial do ar e a linha que corresponde ao leito fluidizado, onde a queda de

pressão permanece constante para um regime fluidodinâmico estável e fluidização de boa qualidade. O valor de  $U_{mf}$  obtido experimentalmente foi de  $0,47 \pm 0,01 \text{ m.s}^{-1}$ . Este valor apresenta excelente concordância com os estimados pelas correlações de Wen e Yu (1966),  $U_{mf} = 0,46 \text{ m.s}^{-1}$ , e Lucas *et al.* (1986) para partículas com esfericidades entre 0,8 e 1,0,  $U_{mf} = 0,45 \text{ m.s}^{-1}$ , evidenciando a qualidade do equipamento e da instrumentação utilizados para as medidas fluidodinâmicas.

### 4.3.2 Análise Fluidodinâmica

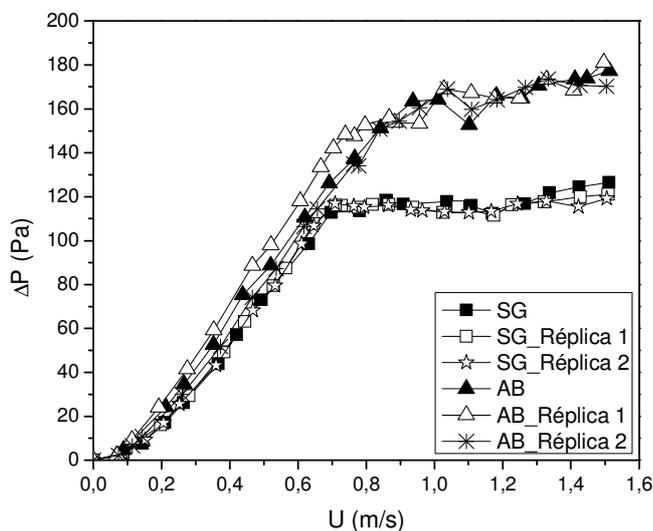
Os resultados obtidos para o comportamento fluidodinâmico em leito fluidizado serão apresentados e discutidos de acordo com os grupos apresentados no item 3.1.1, a saber: Grupo I, composto pelas sementes de abóbora, sementes de girassol, flocos grossos de aveia e lentilhas; Grupo II, constituído pelas brácteas de primavera, folhas de pingo de ouro, folhas de aroeira, folhas de buxinho e quadrados de boldo e o Grupo III, composto pelas partículas “artificiais” (“folhas” de papel, quadrados de papel, lentilhas plásticas, lantejoulas e paetês).

#### 4.3.2.1 Reprodutibilidade das Curvas Características

Para verificar a reprodutibilidade dos ensaios fluidodinâmicos foram obtidas réplicas das curvas de queda de pressão no leito versus velocidade superficial do ar para as partículas dos três diferentes grupos, com os dados obtidos na condição de velocidade decrescente do ar.

O empacotamento de leitos constituídos pelas partículas aqui estudadas, com tamanhos e formas extremos, é extremamente aleatório e de difícil reprodução e, embora as curvas fluidodinâmicas tenham sido obtidas no estágio de desfluidização do leito, a variabilidade não pode ser completamente eliminada. Esta dificuldade é acentuada em leitos constituídos por partículas naturais, visto que estas apresentam variações inerentes à forma e dimensões, não obstante o cuidado tomado na seleção dos materiais.

A Figura 4.12 mostra os gráficos de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar obtidos para as sementes de girassol e flocos grossos de aveia, pertencentes ao Grupo I.

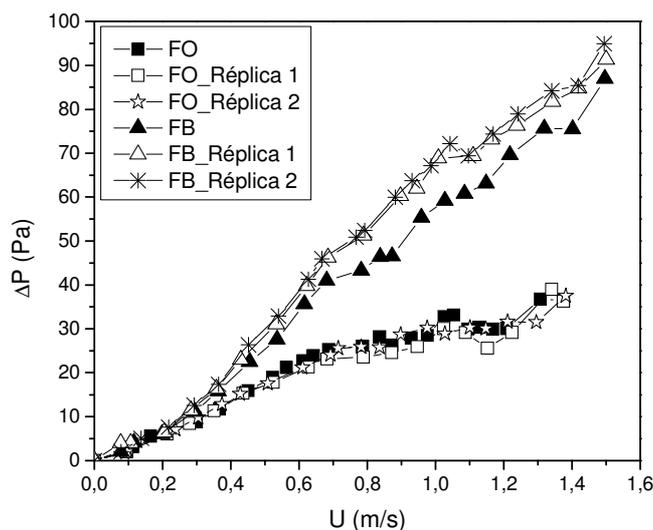


**Figura 4.12:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; Partículas do Grupo I: Sementes de girassol (SG);  $A_p=3,42\text{cm}^2$ ;  $\phi=0,524$  e Flocos grossos de aveia (AB);  $A_p=0,84\text{cm}^2$ ;  $\phi=0,431$ .

Nota-se que as curvas obtidas para as sementes de girassol encontram-se praticamente sobrepostas, confirmando a boa reprodutibilidade dos dados obtidos nestas condições. A boa reprodutibilidade verificada para estas partículas é representativa da observada para os demais materiais do Grupo I (ver Figura B.1, Apêndice B). Os flocos grossos de aveia apresentam maiores diferenças entre a medida e suas réplicas em relação aos demais materiais deste grupo. Entretanto, estas diferenças são pouco significativas quando comparadas às encontradas para as partículas do Grupo II, que serão apresentadas a seguir.

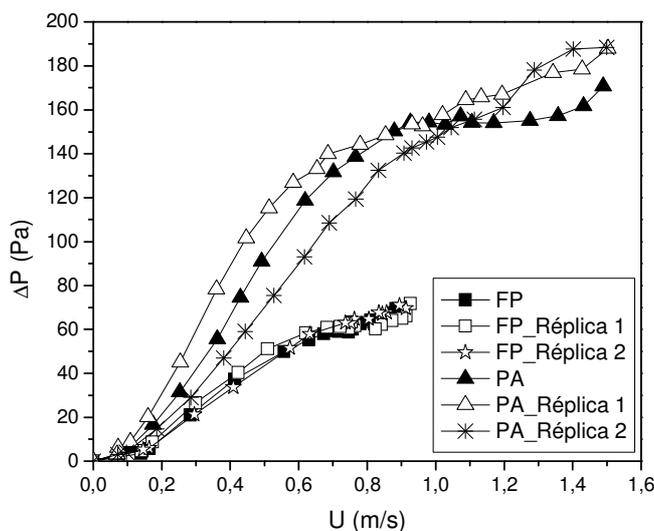
Na Figura 4.13 são mostradas as curvas características obtidas para as folhas de pingo de ouro e buxinho (Grupo II), onde é possível notar que as primeiras apresentaram uma melhor reprodutibilidade dos dados quando comparada à obtida para as segundas. Ainda que o empacotamento de leitos constituídos por tais partículas seja difícil de ser reproduzido, devido às elevadas dimensões e formas altamente irregulares, é possível considerar que não ocorreram variações expressivas entre os diferentes ensaios. As maiores variações foram obtidas para as folhas de buxinho e boldo, que são, respectivamente, as que apresentam maior área superficial e textura superficial mais acentuada (densamente pilosa). As curvas obtidas

para as folhas de aroeira e brácteas de primavera foram mais parecidas com às das folhas de pingo de ouro, apresentando menores variações. Os gráficos de  $\Delta P$  versus  $U$  obtidos para as brácteas de primavera, folhas de aroeira e quadrados de boldo estão apresentados no Apêndice B (Figura B.2).



**Figura 4.13:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; Partículas do Grupo II: Folhas de pingo de ouro (FO);  $A_p=4,48\text{cm}^2$ ;  $\phi=0,201$  e Folhas de buxinho (FB);  $A_p=53,9\text{cm}^2$ ;  $\phi=0,167$ .

A Figura 4.14 apresenta as curvas de  $\Delta P$  no leito em função da velocidade superficial do ar obtidas para as “folhas” de papel e paetês (Grupo III). As réplicas mostram que para os paetês foram obtidas variações significativas entre a medida e suas réplicas em toda a extensão da curva fluidodinâmica. A baixa reprodutibilidade obtida para estas partículas foi anteriormente observada nos ensaios realizados em leito fixo, onde os desvios encontrados entre a medida e as réplicas foram muito superiores aos apresentados pelas demais partículas do grupo. Para as “folhas” de papel, entretanto, estas diferenças foram muito inferiores, mostrando a boa reprodutibilidade dos dados obtidos. A boa reprodutibilidade dos dados também foi observada para as partículas de papel na forma de quadrados, lentilhas de plástico e lantejoulas, que por motivos de concisão estão apresentados no Apêndice B (Figura B.3).



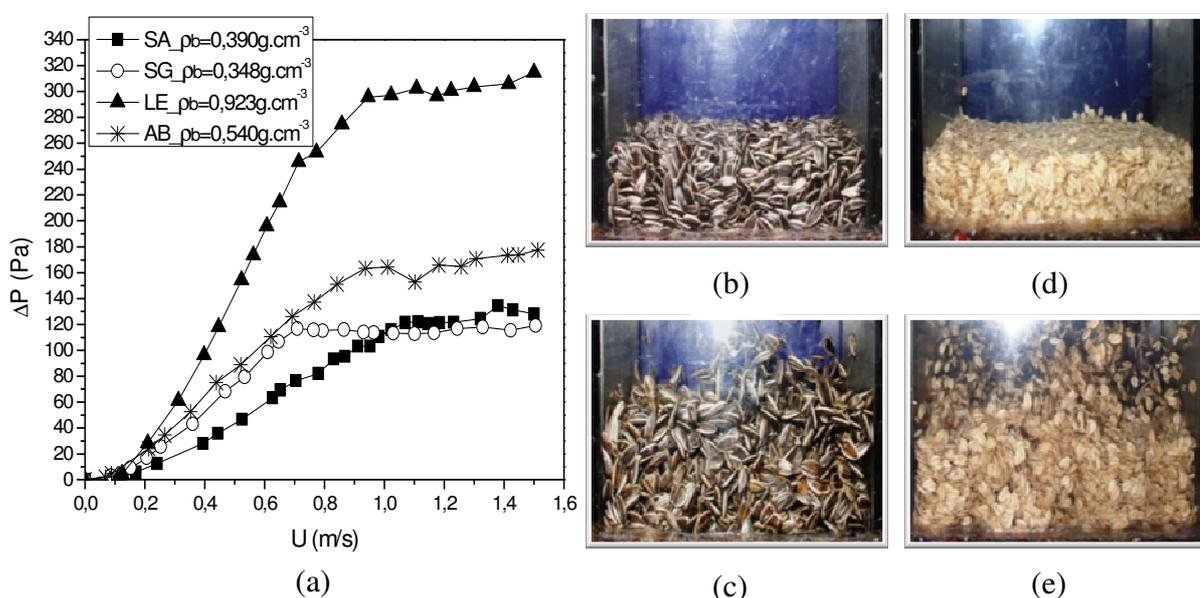
**Figura 4.14:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; Partículas do Grupo III: “Folhas” de papel (FP);  $A_p=8,98\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,063$  e Paetês (PA);  $A_p=9,80\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,107$ .

#### 4.3.2.2 Comportamento Fluidodinâmico

A Figura 4.15(a) apresenta as curvas fluidodinâmicas obtidas para as partículas do Grupo I. É possível notar que estas curvas foram semelhantes às aquelas obtidas para leitos fluidizados convencionais, apresentando uma região característica de leito fixo, seguida por uma região onde a  $\Delta P$  praticamente não se altera com o aumento na taxa de escoamento de ar, característica de leito fluidizado. A região de transição entre os regimes de leito fixo e fluidizado foi facilmente perceptível em todos os casos, ocorrendo em uma pequena faixa de velocidades de ar.

A observação visual reforçou a constatação obtida da análise das curvas fluidodinâmicas de que estas partículas, que apresentam valores de esfericidade entre 0,431 e 0,574, e relações  $A_p/V_p$  entre 12 e  $41\text{ cm}^{-1}$ , atingiram condições reais de fluidização no leito. Este comportamento pode ser observado nas Figuras 4.15(b) e 4.15(c) para as sementes de girassol e nas Figuras 4.15(d) e 4.15(e) para os flocos de aveia, que ilustram padrões típicos obtidos para os leitos estático e fluidizado, respectivamente. No regime fluidizado observou-se um leito de partículas homogeneamente percolado pelo ar, não sendo possível notar a presença de canais preferenciais de escoamento.

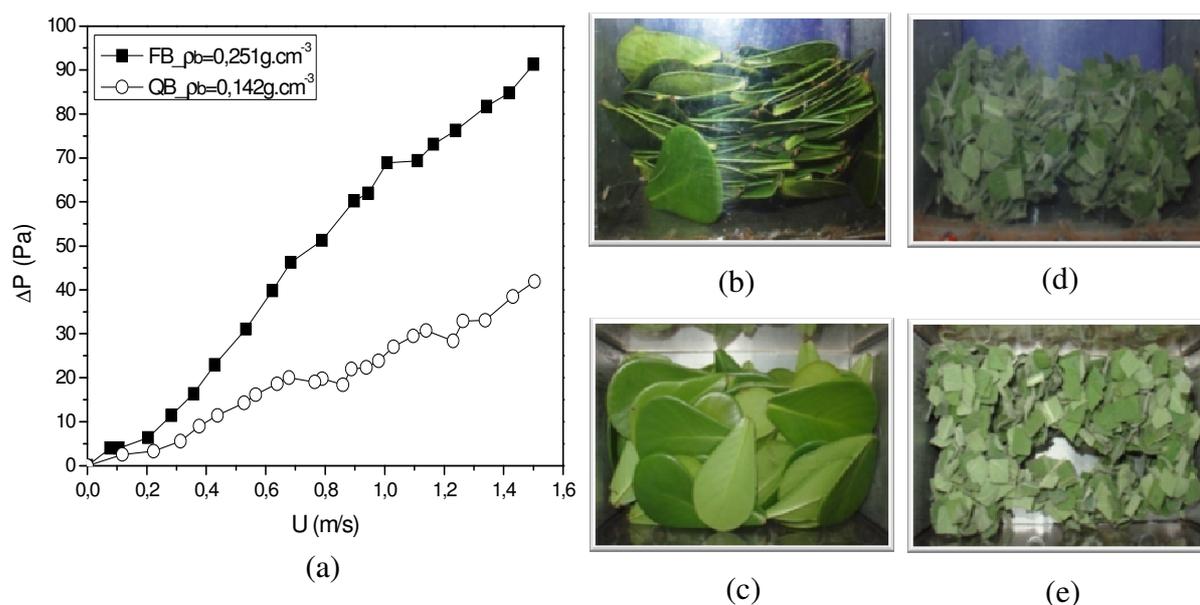
Por meio da Figura 4.15(a) é possível avaliar ainda a influência da densidade bulk dos leitos (obtidas para os leitos empacotados na própria câmara do equipamento, na condição estática com  $H_0=3,5$  cm) na queda de pressão obtida. Verificou-se que para uma altura de leito estático constante, a perda de carga foi maior para leitos com maior densidade bulk, o que se mostra fisicamente consistente, pois, para um mesmo volume de leito, uma massa de partículas mais elevada, exerce maior força de oposição à passagem do fluido, gerando maiores quedas de pressão.



**Figura 4.15:** Leito fluidizado;  $H_0=3,5$ cm: (a) Queda de pressão no leito em função de  $U$  para as partículas do Grupo I; Fotografias: (b) Sementes de girassol; Leito estático (c) Leito fluidizado;  $U=1,5\text{m.s}^{-1}$ ; (d) Aveia; Leito estático (e) Leito fluidizado.

Dentre as partículas do Grupo II, as folhas de boldo (cortadas na forma de quadrados) e buxinho ( $\phi = 0,193$  e  $0,167$ , e  $A_p/V_p = 62$  e  $21\text{ cm}^{-1}$ , respectivamente), foram as que apresentaram pior fluidização. Como pode ser visto na Figura 4.16(a), não é possível identificar o início da fluidização ou uma região de transição entre os regimes de leito fixo e expandido nas curvas de queda de pressão versus velocidade superficial do ar, desde que a queda de pressão tende a aumentar continuamente com o aumento de  $U$ , praticamente a uma taxa constante. Visualmente, observa-se que com o aumento da velocidade do ar, muitos canais preferenciais de escoamento são formados, sobretudo nas paredes do leito (ver Figuras 4.16(c) e 4.16(e)) e, ao invés de um leito de partículas homogeneamente percolado pelo ar, o

que se nota é que as folhas são levantadas em blocos em um padrão instável que dificilmente parece-se com a fluidização. As Figuras 4.16(b) e 4.16(d), que mostram fotografias do leito (visão frontal) para as folhas de buxinho e boldo, respectivamente, evidenciam este comportamento.



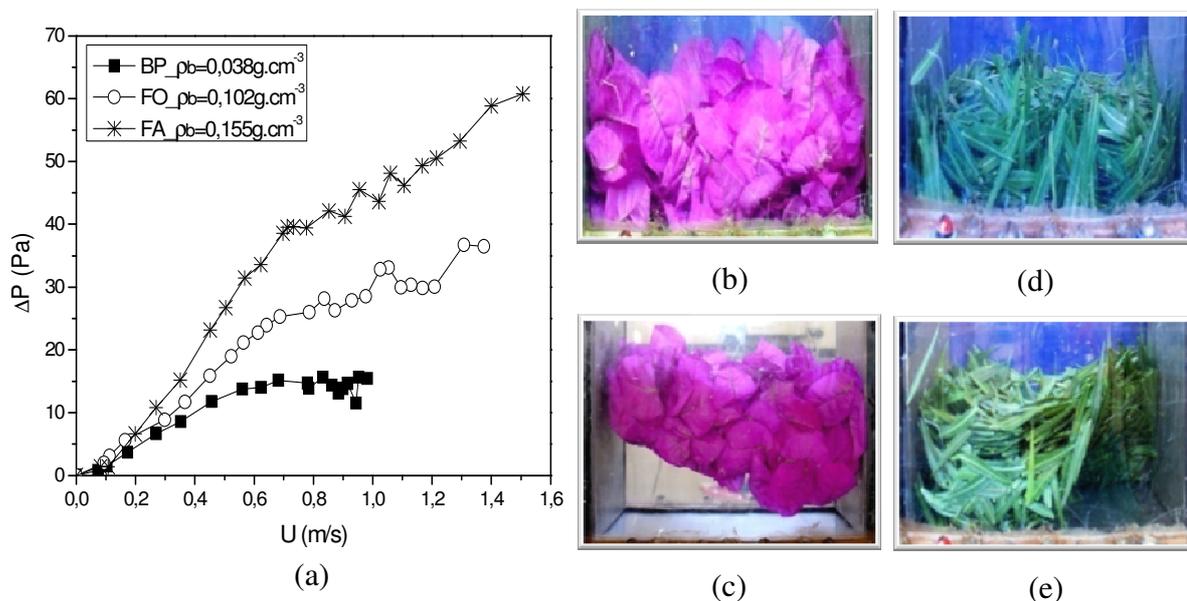
**Figura 4.16:** Leito fluidizado;  $H_0=3,5\text{cm}$ : (a) Queda de pressão no leito em função de  $U$  para as folhas de buxinho (FB) e boldo (QB); Grupo II; Fotografias; Regime expandido: (b) Folhas de buxinho; Visão frontal (c) Visão de topo; (d) Boldo; Visão frontal (e) Visão de topo.

As dificuldades associadas à fluidização destas partículas podem ser justificadas com base em algumas de suas características físicas. As folhas de boldo são caracterizadas por apresentar superfície aveludada e densamente pilosa, o que faz com que estas partículas fiquem fortemente aglomeradas, dificultando a percolação homogênea do ar através do leito. Os ensaios realizados em leito fixo já indicavam o comportamento atípico deste material, onde foi possível notar a deformação do leito de partículas com o aumento da velocidade de escoamento do ar e a formação de canais preferenciais com relativa facilidade. As folhas de buxinho, por outro lado, apesar de apresentarem superfícies lisas, possuem uma elevada área superficial (a maior entre todos os materiais testados,  $A_{\text{proj}} = 25,9 \text{ cm}^2$ ) que se encontra disposta perpendicularmente à direção do escoamento, oferecendo grande resistência à passagem do ar. Além disso, estas folhas apresentam superfícies rígidas, formando leitos

estruturados que não são facilmente rearranjados quando a velocidade do ar é aumentada e resultando, assim, em elevadas quedas de pressão no leito.

As curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para as demais partículas do Grupo II (brácteas de primavera, folhas de pingo de ouro e aroeira com  $0,072 \leq \phi \leq 0,213$  e  $56 \leq A_p/V_p \leq 113 \text{ cm}^{-1}$ ), são apresentadas na Figura 4.17(a). Em todas as curvas é possível notar uma região inicial onde  $\Delta P$  aumenta linearmente com o aumento de  $U$ , característica de leito fixo, seguida por uma região (a partir de  $U \approx 0,70 \text{ m/s}$ , por exemplo, para as folhas de aroeira), em que a inclinação da curva muda. Em um leito convencional, esta região caracteriza a fluidização, em que a queda de pressão permanece constante com o aumento da velocidade do ar. Para as folhas de pingo de ouro e aroeira, contudo, os resultados mostraram que  $\Delta P$  não permaneceu constante com o aumento de  $U$ , mas continuou a aumentar em uma menor taxa. Para as brácteas de primavera, esta região foi caracterizada por elevadas oscilações nos valores de  $\Delta P$ , comportamentos que podem ser atribuídos à má qualidade da fluidização obtida.

A observação visual corrobora esta análise, como pode ser observado nas Figuras 4.17(b) e 4.17(c) para as brácteas de primavera e nas Figuras 4.17(d) e 4.17(e) para a aroeira, que ilustram situações típicas observadas durante os experimentos.



**Figura 4.17:** Leito fluidizado;  $H_0=3,5\text{cm}$ : (a) Queda de pressão no leito em função de  $U$  para a primavera (BP), pingo de ouro (FO) e aroeira (FA), Grupo II; Fotografias: (b) Primavera; Leito estático (c) Leito fluidizado; (d) Aroeira; Leito estático (e) Leito fluidizado.

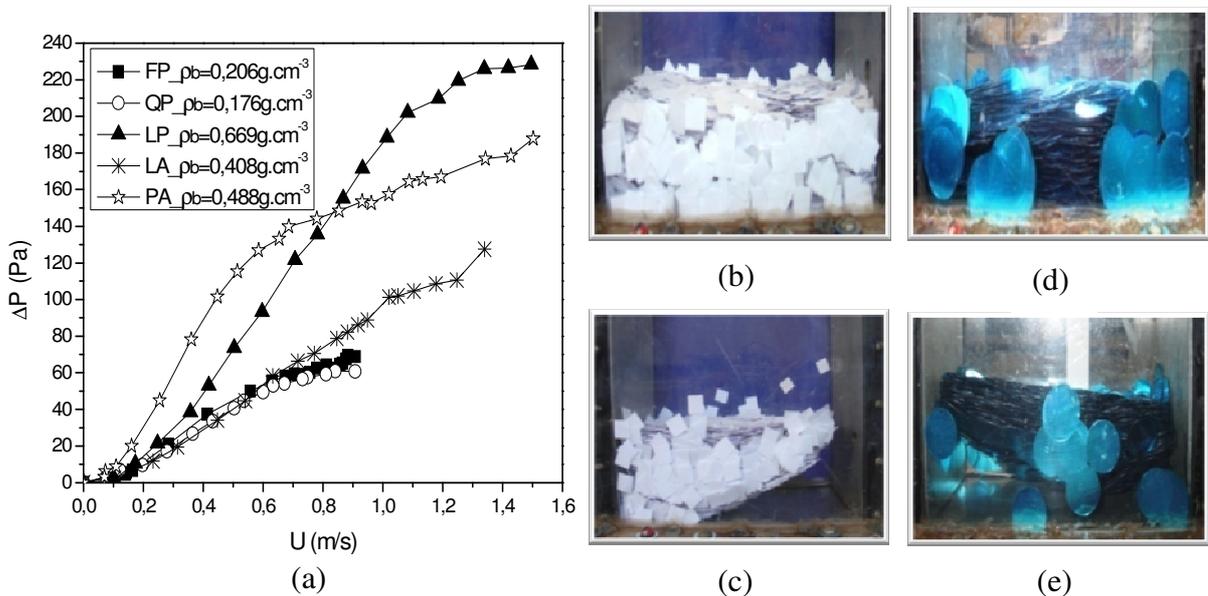
Ao invés de um leito de sólidos percolado pelo ar, o que se observou foi que o escoamento “levantou” as partículas na forma de agregados ou blocos, gerando uma expansão pouco homogênea do leito e regiões de vazios localizadas preferencialmente junto às paredes. Este comportamento pode mais uma vez ser justificado pela forma como o leito de partículas encontra-se estruturado, com as partículas apresentando elevada área na direção perpendicular ao escoamento do fluido e introduzindo, assim, uma resistência significativa, que impede uma boa percolação do ar através do leito. Além disso, estas partículas deformam-se facilmente ao serem submetidas ao escoamento do ar, tendo sua orientação e posição alteradas durante o processo. Adicionalmente, a rugosidade inerente à superfície das folhas naturais pode acentuar esta tendência em formar blocos ou aglomerados, aumentando a dificuldade do ar em escoar através do leito de partículas.

A Figura 4.18(a) exibe as curvas fluidodinâmicas obtidas para o grupo de partículas artificiais (Grupo III). A partir desta figura é possível observar que as curvas obtidas para as partículas de papel, lantejoulas e paetês, apresentaram comportamento similar ao obtido para as folhas de pingo de ouro e aroeira. Para as partículas de papel e paetês é possível notar a ocorrência de grandes canais preferenciais de escoamento de ar e uma expansão pouco homogênea do leito, devido à grande resistência oferecida por estas partículas à passagem do ar. Este comportamento é ilustrado nas Figuras 4.18(b) e 4.18(c) para as partículas de papel na forma de quadrados e nas Figuras 4.18(d) e 4.18(e) para os paetês, que são representativos dos observados para os demais materiais. Para o leito de lantejoulas, observou-se que canais preferenciais eram formados em toda a faixa de velocidades utilizadas.

É importante ressaltar que a formação de canais preferenciais não foi notada durante a realização dos ensaios preliminares com esferas de vidro neste mesmo equipamento, e, portanto, é atribuída às características particulares das partículas utilizadas, que possuem formas planas e  $\phi \leq 0,228$ .

As partículas de papel, lantejoulas e paetês, assim como as folhas de aroeira e pingo de ouro, são partículas que possuem baixas esfericidades ( $0,063 \leq \phi \leq 0,228$ ) e elevados valores  $A_p/V_p$  (entre 56 e 226  $\text{cm}^{-1}$ ). Observa-se que estas características exerceram forte influência na má qualidade da fluidização obtida por estes materiais. Esta constatação é reforçada pelo fato de as lentilhas de plástico ( $\phi = 0,568$  e relação  $A_p/V_p = 15 \text{ cm}^{-1}$ ), ao contrário das demais partículas pertencentes ao Grupo III, apresentarem curvas fluidodinâmicas semelhantes às obtidas para os materiais do Grupo I (ver Figura 4.18(a)), cujas esfericidades são similares e as relações  $A_p/V_p < 41$ . Verifica-se, através da análise desses resultados, que partículas com valores de esfericidade mais elevados e menores

relações  $A_p/V_p$ , tendem a apresentar um comportamento fluidodinâmico estável e curvas características típicas de leitos fluidizados convencionais, com regimes de transição mais facilmente identificáveis.



**Figura 4.18:** Leito fluidizado;  $H_0=3,5\text{cm}$ : (a) Queda de pressão no leito em função de  $U$  para partículas do Grupo III; Fotografias: (b) Quadrados de papel; Leito estático (c) Leito fluidizado; (d) Paetês; Leito estático (e) Leito fluidizado.

A influência da densidade bulk dos leitos de partículas na queda de pressão obtida também foi verificada para os materiais dos Grupos II e III (Figuras 4.17(a) e 4.18(a), respectivamente). Assim como observado para as partículas do Grupo I, leitos de maior densidade bulk geraram maiores quedas de pressão no leito.

A velocidade de transição entre os regimes de leito fixo e ‘fluidizado’ foi obtida fazendo-se a regressão linear dos pontos localizados nas regiões de leito fixo e ‘fluidizado’ e encontrando o ponto de interseção entre as retas (procedimento similar ao utilizado para obter a  $U_{mf}$  em um leito fluidizado clássico). Os valores de  $U_{mf}$ ,  $\Delta P_{mf}$  e  $\epsilon_{mf}$  obtidos das curvas fluidodinâmicas são mostrados na Tabela 4.4, onde estão incluídos os valores de  $\epsilon_b$  e dos números de Arquimedes dos sistemas gás-sólido. Estes valores foram utilizados para a construção das Figuras 4.19(a), 4.19(b) e Figuras 4.20(a), 4.20(b), que trazem os gráficos de  $U_{mf}$ ,  $\Delta P_{mf}$ ,  $\epsilon_b$  e  $\epsilon_{mf}$  em função do número de Arquimedes, respectivamente, assim como os respectivos desvios padrão obtidos da média.

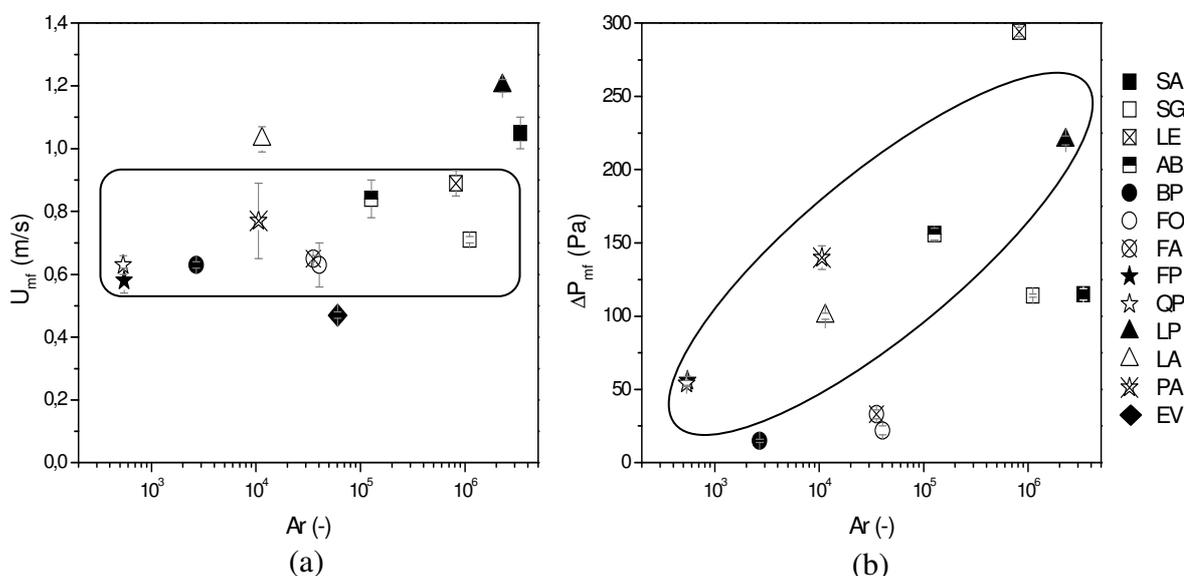
Nota-se que a transição entre os regimes de leito fixo e ‘fluidizado’ foi consistentemente reproduzida para todos os materiais, até mesmo para as partículas dos Grupos II e III, apesar da pouca homogeneidade dos leitos formados por estes materiais.

**Tabela 4.4:** Valores experimentais dos parâmetros  $U_{mf}$ ,  $\Delta P_{mf}$ ,  $\varepsilon_b$  e  $\varepsilon_{mf}$ , e números de Arquimedes dos sistemas gás-sólido.

	Partícula	$U_{mf}$ (m.s <sup>-1</sup> )	$\Delta P_{mf}$ (Pa)	$\varepsilon_b$ (-)	$\varepsilon_{mf}$ (-)	Ar (-)
	Esferas de vidro	0,47±0,01	533±7	0,31	0,38	6,04x10 <sup>4</sup>
Grupo I	Sementes de abóbora	1,05±0,05	115±4	0,47	0,52	3,38x10 <sup>6</sup>
	Sementes de girassol	0,71±0,01	114±1	0,33	0,42	1,11x10 <sup>6</sup>
	Lentilhas	0,89±0,04	294±3	0,30	0,39	8,18x10 <sup>5</sup>
	Flocos de aveia	0,84±0,06	156±4	0,55	0,61	1,27x10 <sup>5</sup>
	Brácteas de primavera	0,63±0,01	15±1	0,93	0,96	2,68x10 <sup>3</sup>
Grupo II	Folhas de pingo de ouro	0,63±0,07	22±3	0,89	0,92	4,03x10 <sup>4</sup>
	Folhas de aroeira	0,65±0,01	33±3	0,84	0,86	3,54x10 <sup>4</sup>
	“Folhas” de papel	0,58±0,04	56±3	0,75	0,84	5,47x10 <sup>2</sup>
Grupo III	Quadrados de papel	0,63±0,03	54±2	0,79	0,85	5,38x10 <sup>2</sup>
	Lentilhas de plástico	1,20±0,02	220±3	0,35	0,44	2,28x10 <sup>6</sup>
	Lantejoulas	1,03±0,04	100±2	0,66	0,76	1,14x10 <sup>4</sup>
	Paetês	0,77±0,12	140±8	0,63	0,74	1,06x10 <sup>4</sup>

Através da Figura 4.19(a) é possível notar que a grande maioria das partículas, apresentou valores de  $U_{mf}$  dentro de uma estreita faixa de velocidades (0,58 a 0,89 m.s<sup>-1</sup>), apesar da acentuada diferença nos valores do número de Arquimedes, que variam de 5,38x10<sup>2</sup> a 3,38x10<sup>6</sup>. As partículas que apresentaram os maiores valores de  $U_{mf}$  foram as sementes de abóbora, lantejoulas e lentilhas de plástico (1,05±0,05, 1,03±0,04 e 1,20±0,02 m.s<sup>-1</sup>, respectivamente), cujos valores de Ar também apresentaram variações superiores a uma ordem de grandeza (1,14x10<sup>4</sup> ≤ Ar ≤ 3,38x10<sup>6</sup>). As esferas de vidro (EV) com Ar da ordem de 10<sup>4</sup> apresentaram o menor valor de  $U_{mf}$ , que foi igual a 0,47±0,01 m.s<sup>-1</sup>. Estes resultados possivelmente indicam que outras características dos materiais, além da esfericidade, diâmetro de volume e massa específica, exerceram influência na velocidade de mínima fluidização obtida para estas partículas.

Na Figura 4.19(b), que apresenta os valores de  $\Delta P_{mf}$  em função de Ar, não se pode notar claramente qual propriedade da partícula exerce maior influência na queda de pressão obtida. Entretanto, podemos observar que há uma tendência de aumento na queda de pressão de mínima fluidização com o aumento do número de Arquimedes. Pode-se constatar esta tendência na região destacada na figura, que inclui as partículas do Grupo III, além dos flocos de aveia, do Grupo I. As folhas (Grupo II), sementes de abóbora e girassol (Grupo I) reproduzem a tendência, porém com valores inferiores de  $\Delta P_{mf}$ .



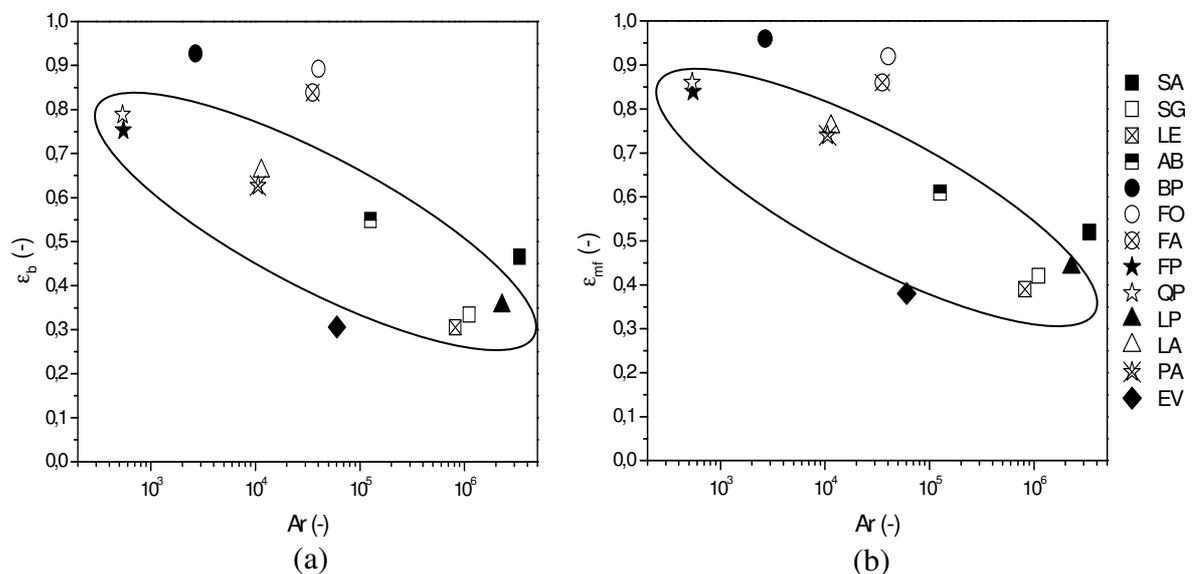
**Figura 4.19:** Leito fluidizado; (a) Velocidade de mínima fluidização em função do número de Arquimedes e (b) Queda de pressão na condição de mínima fluidização em função do número de Arquimedes.

É possível notar também que os paetês e lantejoulas que possuem produtos  $\phi d_v$  similares apresentaram diferentes valores de  $\Delta P_{mf}$ . Estas partículas possuem massas específicas próximas, mas diferentes valores de  $\phi$ . As sementes de abóbora e girassol, ao contrário, apresentam valores praticamente idênticos de esfericidade e  $\rho_p$  diferentes e tiveram valores iguais de  $\Delta P_{mf}$ . Isto provavelmente indica que a  $\Delta P_{mf}$  pode estar sendo mais fortemente influenciada pela forma da partícula do que por sua massa específica.

Contudo, quando realizamos esta comparação entre partículas “naturais” e “artificiais”, este comportamento nem sempre é observado. Se compararmos, por exemplo, as lentilhas e lentilhas de plástico, que possuem esfericidades iguais a 0,574 e 0,568, respectivamente, e massas específicas de 1,33 e 1,04 g.cm<sup>-3</sup>, notamos que as perdas de carga

na mínima fluidização foram divergentes. Este resultado também pode ser observado entre as “folhas” de papel e brácteas de primavera e entre as folhas de aroeira e lantejoulas, o que indica que as partículas naturais apresentam outras características, como a textura superficial, que também podem estar exercendo influência na  $\Delta P_{mf}$ .

Pelas Figuras 4.20(a) e 4.20(b), percebe-se que, em geral, os valores de  $\epsilon_b$  e  $\epsilon_{mf}$  apresentaram uma tendência de diminuição com o aumento do número de Arquimedes. As partículas do Grupo II (folhas) apresentaram porosidades mais elevadas e as expansões observadas para estes leitos em relação aos leitos fixos foram inferiores às dos demais materiais estudados. As sementes de abóbora e girassol, lentilhas e lentilhas plásticas apresentaram porosidades mais próximas à obtida para o leito de esferas, que foi igual a 0,38 para a porosidade de mínima fluidização. Para estas partículas é possível perceber que os gráficos de  $Ar \times \epsilon_b$  e  $Ar \times \epsilon_{mf}$  apresentam um mesmo comportamento, onde se nota uma tendência de crescimento das porosidades com o aumento de  $Ar$ . Este comportamento é atípico e deve ser melhor investigado.



**Figura 4.20:** Leito fluidizado; (a) Porosidade bulk em função do número de Arquimedes e (b) Porosidade de mínima fluidização em função do número de Arquimedes.

A influência de outras características das partículas, além das agrupadas pelo número de Arquimedes, nas propriedades fluidodinâmicas do leito foi, então, verificada para os diferentes grupos de partículas separadamente, pois, como visto anteriormente, alguns

grupos possuem características próprias que podem influir nos valores de  $U_{mf}$ ,  $\Delta P_{mf}$  e  $\varepsilon_{mf}$  obtidos.

Dentre as partículas do Grupo I, as sementes de girassol e as sementes de abóbora apresentaram o menor e maior valor de  $U_{mf}$ , respectivamente. Os valores de  $U_{mf}$  obtidos para as lentilhas e flocos de aveia não apresentaram diferenças significativas e foram ligeiramente superiores ao das sementes de girassol. Não foi possível identificar com clareza qual propriedade física da partícula exerceu maior efeito sobre a  $U_{mf}$  obtida, pois embora os valores de esfericidade não fossem muito diferentes, a massa específica da partícula, a densidade bulk do leito, assim como, a área projetada e as relações  $A_p/V_p$  variaram bastante. Entretanto, observou-se que a massa específica aparente da partícula ( $\rho_p$ ) exerceu um efeito maior na  $U_{mf}$  do que a esfericidade, visto que os valores obtidos para as sementes de abóbora e girassol, com  $\phi$  praticamente idênticas e com  $\rho_p$  iguais a 0,73 e 0,52 g.cm<sup>-3</sup>, respectivamente, foram muito divergentes. No entanto, os valores de  $U_{mf}$  foram próximos para as lentilhas e flocos de aveia que apresentam valores de  $\rho_p$  iguais a 1,33 e 1,20 g.cm<sup>-3</sup>, respectivamente, e diferentes valores de esfericidade (0,574 e 0,431, respectivamente).

Por outro lado, como observado anteriormente por Gupta e Mujumdar (1980a), a queda de pressão no leito foi mais afetada pela forma da partícula do que por  $\rho_p$ . Constata-se que a densidade bulk também afetou os valores de  $\Delta P_{mf}$  obtidos. Assim, como discutido anteriormente, as sementes de abóbora e girassol com esfericidades e  $\rho_b$  similares e diferentes massas específicas, apresentaram valores de  $\Delta P_{mf}$  praticamente iguais. Entretanto, as lentilhas e flocos de aveia, que apresentam  $\phi$  e  $\rho_b$  divergentes, mas valores próximos de  $\rho_p$ , tiveram valores muito diferentes de  $\Delta P_{mf}$ .

Exceto para as sementes de abóbora, em que a porosidade do leito expandido foi 12% maior que a do estático, os demais materiais apresentaram expansões superiores a 24% (valor similar ao encontrado para o leito de esferas de vidro), confirmando, assim, a boa fluidização obtida para estas partículas. Os valores de  $\varepsilon_{mf}$  obtidos para as partículas do Grupo I variaram de 0,39 (lentilhas) a 0,61 (flocos de aveia). Considerando que estas partículas apresentam características geométricas similares, tais como área projetada e perímetro, mas que a relação  $A_p/V_p$  muda de 23 para as lentilhas para 41, para a aveia, acredita-se que este aumento possa estar contribuindo para o aumento da porosidade média.

Como foi visto nos dados apresentados na Figura 4.20(b), a estimativa das porosidades na mínima fluidização dos leitos para as partículas do Grupo II forneceu valores bastante elevados: 0,96, 0,92 e 0,86 para as brácteas de primavera, folhas de pingo de ouro e

aroeira, respectivamente. Estes valores são pouco representativos das porosidades reais, já que grandes volumes de vazios foram observados em decorrência da formação de canais preferenciais. Apesar disso, os valores encontrados concordam bem com os obtidos por Zanoelo (2007) em um leito fluidizado constituído por partículas de folhas de mate, de forma quadrada, que foi de aproximadamente 0,92. Nota-se que estes valores são altos quando comparados com leitos de esferas de vidro; onde  $\varepsilon_{mf} = 0,38$ . Os leitos constituídos por estes materiais apresentaram expansões desprezíveis, inferiores a 3%, o que permite inferir mais uma vez que estes leitos não alcançaram condições reais de fluidização.

Os valores de  $U_{mf}$  obtidos para os materiais do Grupo II foram muito similares entre si ( $0,63 - 0,65 \text{ m.s}^{-1}$ ) apesar das diferentes características apresentadas por estas partículas. Mesmo com variações de uma ordem de grandeza nas densidades bulk e esfericidades, não ocorreram mudanças significativas nas velocidades de transição. Este resultado apesar de ter sido inesperado, pode ser justificado pelo fato de todas as partículas deste grupo terem apresentado um comportamento fluidodinâmico semelhante, caracterizado pela formação de aglomerados de partículas no leito, dificultando uma boa percolação do ar. Acredita-se que esta tendência de formar grumos de partículas possa ter reduzido a influência da forma dos materiais no valor de  $U_{mf}$ .

Para as partículas do Grupo III também não foi possível identificar com clareza qual propriedade física da partícula exerceu maior efeito sobre a  $U_{mf}$  obtida. As partículas de papel, apesar de terem sido utilizadas em formatos diferentes, apresentaram valores de esfericidade próximos (0,063 e 0,090 para as “folhas” e quadrados, respectivamente), assim como massas específicas e densidades bulk semelhantes, entretanto, a área projetada das “folhas” foi superior à dos quadrados. Para estas partículas os valores de  $U_{mf}$  e  $\Delta P_{mf}$  encontrados foram muito semelhantes, indicando que estas propriedades foram menos influenciadas pela área das partículas do que por  $\varphi$ ,  $\rho_p$  e  $\rho_b$ . Para as demais partículas do grupo III, percebe-se que tanto a esfericidade quanto a densidade bulk, exerceram influência nos valores de queda de pressão obtidos no leito, sendo o maior valor de  $\Delta P_{mf}$  obtido para as lentilhas de plástico, que possuem a maior esfericidade ( $\varphi = 0,568$ ) e a maior densidade bulk ( $\rho_b = 0,669 \text{ g.cm}^{-3}$ ). Novamente, foi possível observar que a velocidade de mínima fluidização foi influenciada pela massa específica aparente das partículas ( $\rho_p$ ). Para estas partículas, um aumento na massa específica resultou em menores valores de  $U_{mf}$ .

Exceto para as partículas de papel em que a porosidade do leito expandido foi em torno de 11% maior que a do leito estático, os demais materiais apresentaram expansões

superiores a 15%. Estes valores foram muito maiores do que os encontrados para as partículas do Grupo II, indicando que apesar de a forma plana e as baixas esfericidades apresentadas por estes materiais terem sido as principais responsáveis pela má qualidade da fluidização obtida nos leitos, a textura superficial inerente às partículas naturais também apresentou efeitos negativos na qualidade da fluidização.

As correlações de Lucas *et al.* (1986), para a categoria de partículas com  $0,1 < \phi < 0,5$ , e de Ergun utilizando-se a metodologia experimental proposta por Reina *et al.* (2000) foram testadas para estimar os valores experimentais de  $U_{mf}$  para todas as partículas estudadas. Os resultados obtidos e respectivos erros relativos (ER) encontram-se na Tabela 4.5. Percebe-se que os valores preditos através do uso destas correlações, que consideram o fator de forma da partícula e a porosidade do leito, resultaram em desvios superiores a uma ordem de grandeza para as partículas do Grupo I e em desvios ainda maiores para as partículas dos Grupos II e III. A correlação clássica de Wen e Yu (1966) foi que melhor se ajustou aos dados experimentais, mas os desvios encontrados ainda foram elevados, variando de 12 a 96%. A única exceção são as predições obtidas para os leitos de esferas de vidro, que mostram excelente concordância e corroboram a boa qualidade do equipamento e das técnicas de medida.

As correlações em que a forma da partícula é parametrizada foram também verificadas utilizando-se os valores de  $\phi'$  (ver Tabela 4.1) obtidos através da equação proposta por Mohsenin (1970). Entretanto, os valores de  $U_{mf}$  obtidos resultaram novamente em erros relativos elevados, da mesma ordem de grandeza dos encontrados anteriormente e, assim, não foram incluídos neste trabalho. Este resultado indica que estas correlações não foram apropriadas para prever a  $U_{mf}$  das partículas estudadas, sugerindo que outras propriedades, além do fator de forma, devem ser incluídas para uma completa caracterização da morfologia da partícula.

Os valores de  $\Delta P_{mf}$  experimentais foram comparados aos encontrados pela relação teórica fundamentada no princípio da fluidização (Equação 6). Os resultados obtidos e respectivos erros relativos (ER) estão dispostos na Tabela 4.5, onde é possível observar que os valores preditos através desta relação teórica concordam bem com os obtidos experimentalmente, apresentando desvios iguais ou inferiores a 20% (exceto para as lantejoulas, folhas de pingo de ouro e aroeira, cujos desvios foram iguais a 40%, 60% e 61%, respectivamente).

**Tabela 4.5:** Valores teóricos da velocidade de mínima fluidização e da queda de pressão de mínima fluidização.

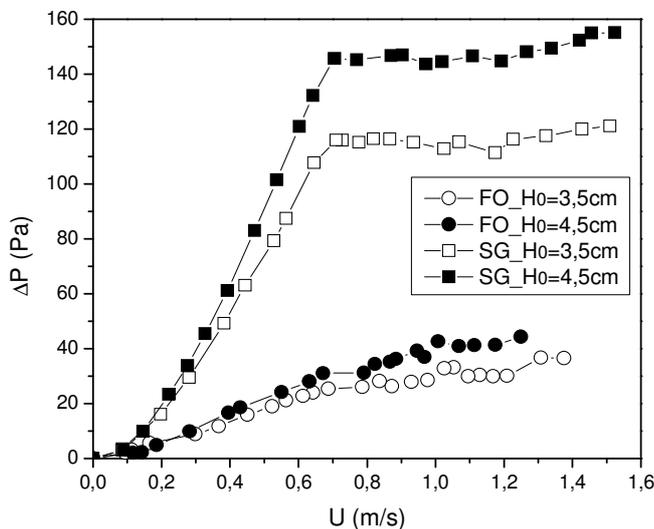
Part.	$U_{mf}$ (m.s <sup>-1</sup> )	ER	$U_{mf}$ (m.s <sup>-1</sup> )	ER	$U_{mf}$ (m.s <sup>-1</sup> )	ER	$\Delta P_{mf}$	ER
	Wen e Yu	(%)	Reina <i>et al.</i>	(%)	Lucas <i>et al.</i>	(%)	(Pa)	(%)
EV	0,46	2	0,32	32	0,45	4	598	12
Grupo I	SA	1,50	43	2,91	177	3,73	255	134
	SG	1,09	54	1,45	104	2,73	285	119
	LE	1,32	48	1,47	65	3,05	243	316
	AB	1,02	21	2,78	231	3,21	282	185
	BP	1,07	70	14,25	2162	19,62	3014	12
Grupo II	FO	1,21	93	9,41	1393	8,02	1173	35
	FA	1,14	76	7,66	1079	7,15	1001	53
	FP	0,97	67	7,70	1228	20,77	3480	57
Grupo III	QP	0,75	19	5,98	849	11,62	1744	57
	LP	1,50	25	2,08	73	3,45	187	229
	LA	0,91	12	4,64	350	5,48	431	140
	PA	1,51	96	9,27	1104	18,54	2306	167

#### 4.3.2.3 Influência da Altura Estática do Leito

A Figura 4.21 mostra as curvas características de queda de pressão versus velocidade superficial do ar obtidas para as folhas de pingo de ouro e sementes de girassol em duas diferentes alturas impostas ao leito,  $H_0 = 3,5$  e  $4,5$  cm. Através desta figura e dos valores apresentados na Tabela 4.6, observa-se que a fluidização do leito ocorre em uma mesma faixa de velocidades do ar para as duas alturas avaliadas. No entanto, a queda de pressão aumenta significativamente com o aumento de  $H_0$ . Isto ocorre devido à maior dificuldade encontrada pelo ar em percolar através de um leito de partículas com maior altura, pois este apresenta um maior peso, exercendo uma maior força de oposição à passagem do ar.

Com exceção das lantejoulas, para a qual não foi possível a obtenção de  $U_{mf}$  na altura de  $H_0 = 4,5$  cm, este comportamento foi verificado para todas as partículas investigadas (ver Tabela 4.6). Para estas partículas, em particular, a curva fluidodinâmica obtida para  $H_0 = 4,5$  cm não apresentou uma região de transição entre os regimes de leito fixo e expandido,

desde que a queda de pressão aumentou continuamente com o aumento de U praticamente a uma taxa constante.



**Figura 4.21:** Leito fluidizado; Curvas características de fluidização parametrizadas em  $H_0$  para folhas de pingo de ouro (FO) e sementes de girassol (SG).

**Tabela 4.6:** Valores de  $U_{mf}$  e  $\Delta P_{mf}$  para diferentes alturas de leito estático,  $H_0=3,5$  e  $4,5$ cm.

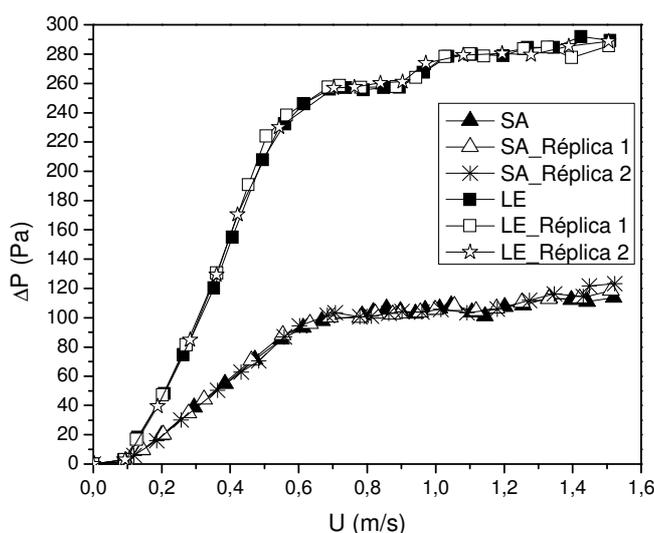
Part.	$U_{mf}$ ( $m.s^{-1}$ )	$U_{mf}$ ( $m.s^{-1}$ )	$\Delta P_{mf}$ (Pa)	$\Delta P_{mf}$ (Pa)
	$H_0=3,5$ cm	$H_0=4,5$ cm	$H_0=3,5$ cm	$H_0=4,5$ cm
SA	1,05±0,05	1,12±0,07	115±4	164±12
SG	0,71±0,01	0,70	114±1	143
LE	0,89±0,04	0,86±0,02	294±3	364±3
AB	0,84±0,06	0,92±0,03	156±4	190±5
BP	0,63±0,01	0,66±0,01	15±1	17±1
FO	0,63±0,07	0,65±0,02	22±3	31±4
FA	0,65±0,01	0,68±0,05	33±3	29±6
LP	1,20±0,02	1,43±0,03	220±3	272±6
LA	1,03±0,04	-	100±2	-
PA	0,77±0,12	0,72±0,09	140±8	196±28

## 4.4 Leito Vibrofluidizado

### 4.4.1 Reprodutibilidade das Curvas Características

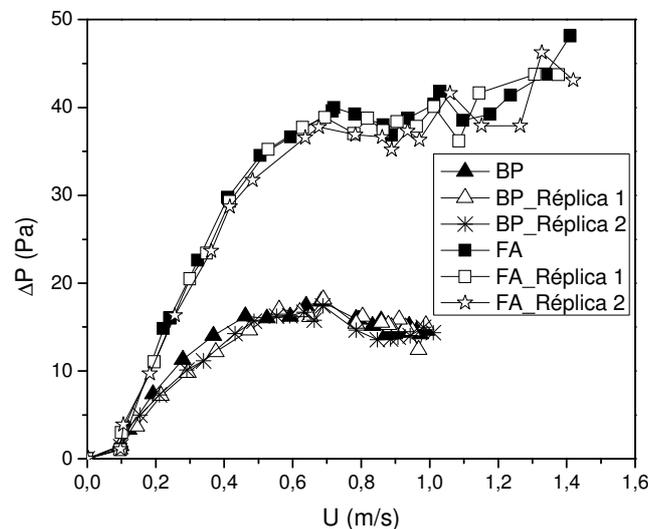
Para avaliar a reprodutibilidade dos ensaios fluidodinâmicos em leito vibrofluidizado, foram obtidas réplicas das curvas características para todas as partículas estudadas (exceto para os quadrados de boldo). Estas curvas foram obtidas partindo do leito na condição fluidizada e, então, após a adição de vibração, os dados de queda de pressão no leito foram obtidos para velocidades decrescentes de ar.

Na Figura 4.22 são mostradas as curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar obtidas para as sementes de abóbora e lentilhas (Grupo I) utilizando  $A = 5,0 \times 10^{-3}$  m e  $\Gamma = 0,5$ . Para estas partículas observa-se que as curvas estão praticamente sobrepostas, mostrando que boa reprodutibilidade foi obtida na presença de vibração. Para os demais materiais do Grupo I, também se observou pequenos desvios entre a medida e as réplicas, confirmando a boa reprodutibilidade dos dados. A Figura C.1 (Apêndice C) mostra as curvas fluidodinâmicas obtidas na vibrofluidização destes materiais para as mesmas condições vibracionais.



**Figura 4.22:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5$ cm;  $A=5,0 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma=0,5$ ; Partículas do Grupo I: Sementes de abóbora (SA);  $A_p=5,78$ cm<sup>2</sup>;  $\phi=0,523$  e Lentilhas (LE);  $A_p=1,14$ cm<sup>2</sup>;  $\phi=0,574$ .

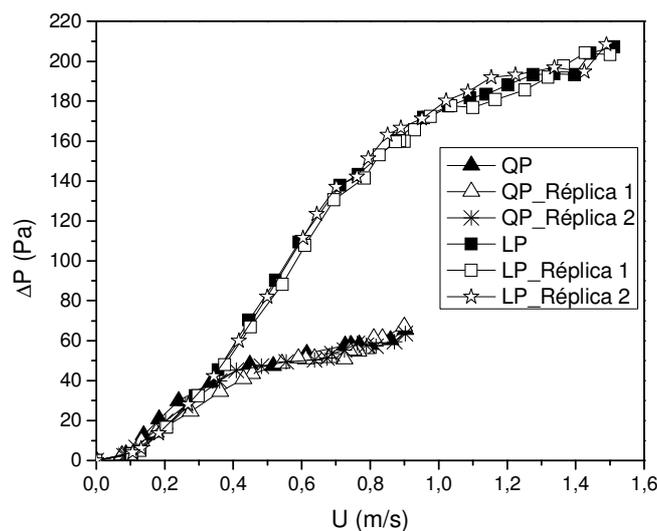
A Figura 4.23 apresenta as curvas fluidodinâmicas obtidas para as brácteas de primavera e folhas de aroeira (Grupo II) utilizando  $A = 5,0 \times 10^{-3}$  m e  $\Gamma = 0,5$ . É possível observar que, assim como para o leito fluidizado, as curvas encontradas para estas partículas apresentaram reprodutibilidade inferior à obtida para as partículas do Grupo I, onde nota-se que uma maior diferença entre a medida e as réplicas foi obtida principalmente na região de leito expandido. Este comportamento pode novamente ser justificado pela maior dificuldade encontrada em reproduzir o empacotamento do leito para estas partículas, visto que estes empacotamentos são extremamente aleatórios. As curvas obtidas para as folhas de pingo de ouro tiveram características semelhantes às curvas mostradas na Figura 4.23. As maiores variações foram obtidas para as folhas de buxinho. Isto pode ser justificado, pois, com o uso de vibração, estas partículas foram rearranjadas no interior do leito, tornando-se gradualmente alinhadas com a superfície de maior área orientada paralelamente à direção de escoamento do ar. Este comportamento será discutido posteriormente com mais detalhes. As curvas de  $\Delta P$  versus  $U$  para as folhas de pingo de ouro e buxinho estão dispostas na Figura C.2 (Apêndice C).



**Figura 4.23:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5$ cm;  $A=5,0 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma=0,5$ ; Partículas do Grupo II: Brácteas de Primavera (BP);  $A_p=24,0$ cm<sup>2</sup>;  $\varphi=0,072$  e Folhas de aroeira (FA);  $A_p=3,40$ cm<sup>2</sup>;  $\varphi=0,213$ .

A Figura 4.24 apresenta as curvas de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar obtidas para os quadrados de papel e lentilhas de plástico (Grupo

III) no leito vibrofluidizado, utilizando  $A = 5,0 \times 10^{-3}$  m e  $\Gamma = 0,5$ . As réplicas obtidas para as lentilhas de plástico mostram que os ensaios fluidodinâmicos foram reproduzíveis para estas partículas. Esta boa reprodutibilidade também foi obtida para as lantejoulas utilizando-se as mesmas condições vibracionais (ver Figura C.3 no Apêndice C). Para os quadrados de papel, entretanto, a reprodutibilidade obtida não foi tão boa quanto à observada para as partículas anteriores, onde é possível notar maiores variações entre a medida e as réplicas em toda a extensão da curva fluidodinâmica. As “folhas” de papel apresentaram reprodutibilidade similar aos quadrados de papel e para os paetês foram obtidos desvios ainda maiores, como pode ser verificado na Figura C.3 (Apêndice C). Estas partículas, assim como as folhas de buxinho, sofreram um alinhamento no interior do leito com a inserção da vibração, o que justifica as maiores variações apresentadas.



**Figura 4.24:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5$ cm;  $A=5,0 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma=0,5$ ; Partículas “artificiais”: Quadrados de papel (QP);  $A_p=3,06$ cm<sup>2</sup>;  $\varphi=0,090$  e Lentilhas de plástico (LP);  $A_p=2,75$ cm<sup>2</sup>;  $\varphi=0,568$ .

#### 4.4.2 Comportamento Fluidodinâmico

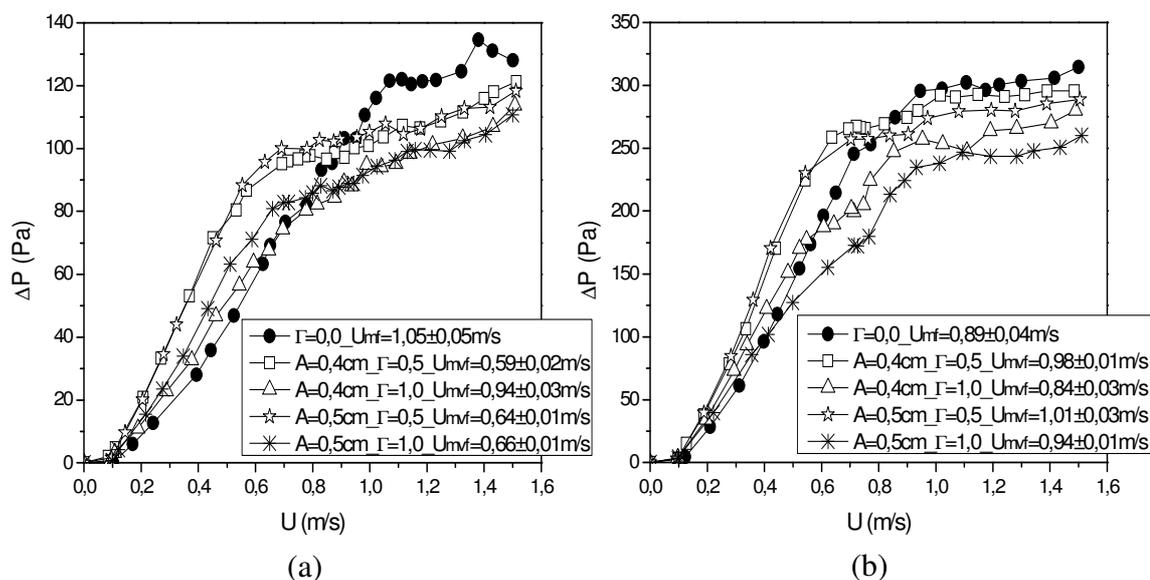
O uso de vibração foi testado como uma alternativa de melhorar os padrões fluidodinâmicos e o contato entre a fase sólida e o ar. Segundo Gupta e Mujumdar (1980a), para um leito de partículas homogêneas, o uso de vibração provoca reduções na velocidade e

na queda de pressão de mínima fluidização e pode melhorar a qualidade da fluidização em leitos de partículas difíceis de serem fluidizadas. Para as diferentes amplitudes e frequências de vibração avaliadas (ver Tabela 3.4) foram construídas curvas de queda de pressão versus velocidade superficial do ar e, então, foram determinadas as velocidades de transição entre os regimes de leito fixo e fluidizado. De acordo com Daleffe *et al.* (2005), a literatura não apresenta uma definição consensual para a determinação desta velocidade em leitos vibrofluidizados. Neste trabalho, a velocidade de transição nos leitos vibrofluidizados foi determinada utilizando metodologia similar à aplicada para os leitos fluidizados e esta velocidade de transição foi denotada por  $U_{mvf}$ .

As Figuras 4.25(a) e 4.25(b) apresentam as curvas características de vibrofluidização obtidas para as sementes de abóbora e lentilhas, respectivamente. Nos gráficos encontrados para as sementes de abóbora (que são representativos dos observados para as demais partículas do Grupo I - ver Figuras C.4 e C.5 no Apêndice C), nota-se, de maneira geral, que a introdução de vibração causou um prolongamento na região de transição entre o leito fixo e o fluidizado, um comportamento típico de leitos vibrofluidizados, que dificulta a identificação da transição (Daleffe *et al.*, 2005). É possível observar que a vibração produziu maiores quedas de pressão na região de leito fixo, o que pode ser justificado pela redução no número de canais preferenciais nesta região. Entretanto, na região de leito fluidizado, um comportamento contrário foi observado (exceto para os flocos de aveia, em que os valores de  $\Delta P$  não diferiram significativamente dos observados para  $\Gamma = 0,0$ ), indicando uma maior facilidade do ar em percolar o leito de partículas. Reduções significativas nas velocidades de transição foram notadas para todas as partículas, sendo estas reduções mais acentuadas para  $\Gamma = 0,5$ . Visualmente, nota-se que a vibração melhorou a qualidade da fluidização obtida para estas partículas por reduzir o número de canais preferenciais na região de leito fixo e aumentar o efeito de mistura entre os materiais e o ar percolante.

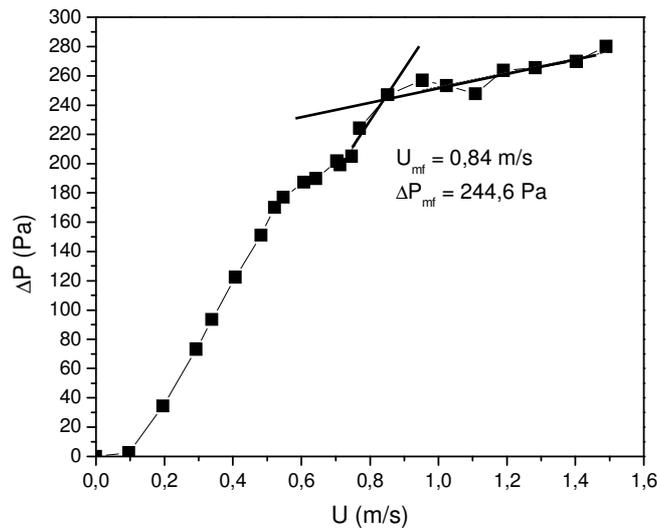
Nas curvas obtidas para o leito de lentilhas submetido à vibração vertical também se observou maiores quedas de pressão na região de leito fixo e menores quedas de pressão na região de leito fluidizado. Entretanto, estas curvas apresentaram comportamento divergente dos obtidos para as demais partículas do Grupo I, onde foi possível notar a presença de dois pontos de inflexão ao invés de apenas um, como é observado em curvas características de leitos vibrofluidizados. Este comportamento, relatado primeiramente por Bratu e Jinescu (1971), é observado em casos típicos nos quais as forças vibracionais dominam a dinâmica do leito e, assim, para baixas velocidades de escoamento do ar, quando este por si só não tem condições de movimentar as partículas no leito, estas podem ser

“fluidizadas” devido ao efeito da vibração. Dessa forma, no primeiro ponto de inflexão da curva, ocorre o início do movimento das partículas devido à vibração imposta ao sistema, sendo este movimento uma função da amplitude e da frequência de vibração. No segundo ponto de inflexão, a velocidade de escoamento do ar se torna suficiente para sustentar as partículas no leito, reduzindo o efeito da vibração no sistema. Neste ponto, a fluidização encontra-se desenvolvida.



**Figura 4.25:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Grupo I: (a) Sementes de abóbora (SA);  $A_p=5,78\text{cm}^2$ ;  $\phi=0,523$ ;  $\rho_p=0,73\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (b) Lentilhas (LE);  $A_p=1,14\text{cm}^2$ ;  $\phi=0,574$ ;  $\rho_p=1,33\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

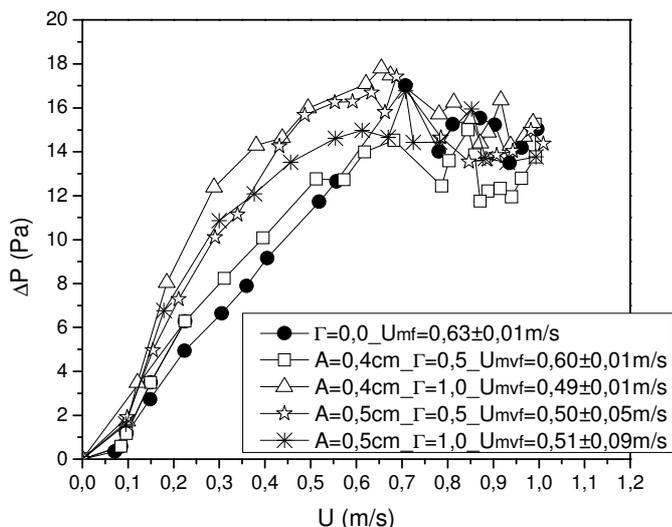
A velocidade mínima de vibrofluidização foi determinada, nestes casos, pela regressão linear dos pontos localizados na região descrita pelo segundo patamar da curva fluidodinâmica, assumindo que a partir deste ponto, o leito encontra-se completamente fluidizado. A Figura 4.26 exemplifica a metodologia utilizada para a determinação de  $U_{mf}$  e  $\Delta P_{mf}$  para as lentilhas usando-se  $A = 4,0 \times 10^{-3}$  m e  $\Gamma = 1,0$ . Para o maior valor de  $\Gamma$  usado, os valores de  $U_{mf}$  não diferiram significativamente dos obtidos para  $\Gamma = 0,0$ . Entretanto, maiores valores foram obtidos utilizando-se  $\Gamma = 0,5$ . Isto ocorre, pois, para menores forças vibracionais impostas ao sistema, este consegue se manter “fluidizado” em uma menor faixa de velocidades de escoamento de ar.



**Figura 4.26:** Metodologia utilizada para a obtenção dos parâmetros  $U_{mf}$  e  $\Delta P_{mf}$  da curva fluidodinâmica obtida para o leito de lentilhas;  $A = 4,0 \times 10^{-3} \text{ m}$  e  $\Gamma = 1,0$ .

Nas Figuras 4.27, 4.28(a) e 4.28(b) são mostradas as curvas de  $\Delta P$  em função da velocidade superficial do ar para as partículas do Grupo II: brácteas de primavera, folhas de pingo de ouro e aroeira, respectivamente. Pode-se notar que o comportamento destas curvas difere bastante do observado para as partículas do Grupo I.

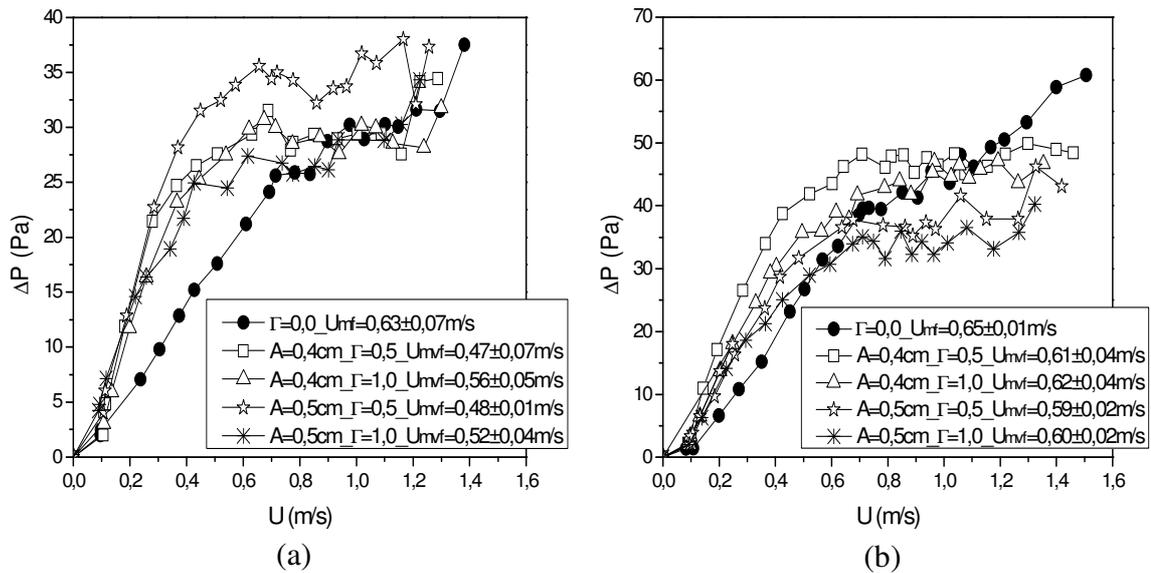
Nas curvas obtidas para as brácteas de primavera (Figura 4.27) é possível observar uma região onde a queda de pressão aumenta com o aumento de  $U$ , seguida por uma região de leito expandido onde muitas oscilações são notadas nos valores de  $\Delta P$ . Nota-se que a introdução de vibração provocou um prolongamento na região de transição entre os regimes de leito fixo e expandido. Além disso, na região de leito fixo, a vibração provocou um aumento na queda de pressão, o que pode ter ocorrido devido à diminuição no número de canais preferenciais. Entretanto, na região de leito expandido não ocorreram mudanças significativas nos valores de  $\Delta P$  em relação à curva obtida para o leito fluidizado (sem vibração). Observa-se que as velocidades de transição foram inferiores ao valor obtido para  $\Gamma = 0,0$ , mas em alguns casos variaram dentro da faixa de incertezas experimentais, não sendo possível identificar um claro efeito do adimensional de vibração nas velocidades de transição obtidas. Estas partículas, além de apresentarem valor de  $\phi < 0,1$  e elevada área, se deformam com extrema facilidade e, assim como observado anteriormente para os ensaios em leito fixo, apresentam comportamento que foge bastante do convencional.



**Figura 4.27:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Grupo II; Brácteas de primavera;  $A_p=24,0\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,072$ ;  $\rho_p=0,52\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Nos gráficos de  $\Delta P$  versus  $U$  obtidos para as folhas de pingo de ouro (Figura 4.28(a)) e aroeira (Figura 4.28(b)) é possível notar que a transição abrupta entre os regimes de leito fixo e expandido observada para  $\Gamma = 0,0$  foi suavizada com a vibração, fazendo com que o limite entre os diferentes regimes fosse estendido para uma ampla faixa de velocidades do fluido. Na região de leito fixo, a vibração novamente provocou um aumento na queda de pressão e na região de leito expandido, o uso de vibração fez com que a tendência de crescimento de  $\Delta P$  com  $U$  observada para  $\Gamma = 0,0$  fosse reduzida, tornando a transição entre os regimes fosse mais aparente. As velocidades de transição obtidas para estas partículas não apresentaram reduções significativas em relação à obtida para  $\Gamma = 0,0$ , variando dentro da faixa de incertezas experimentais.

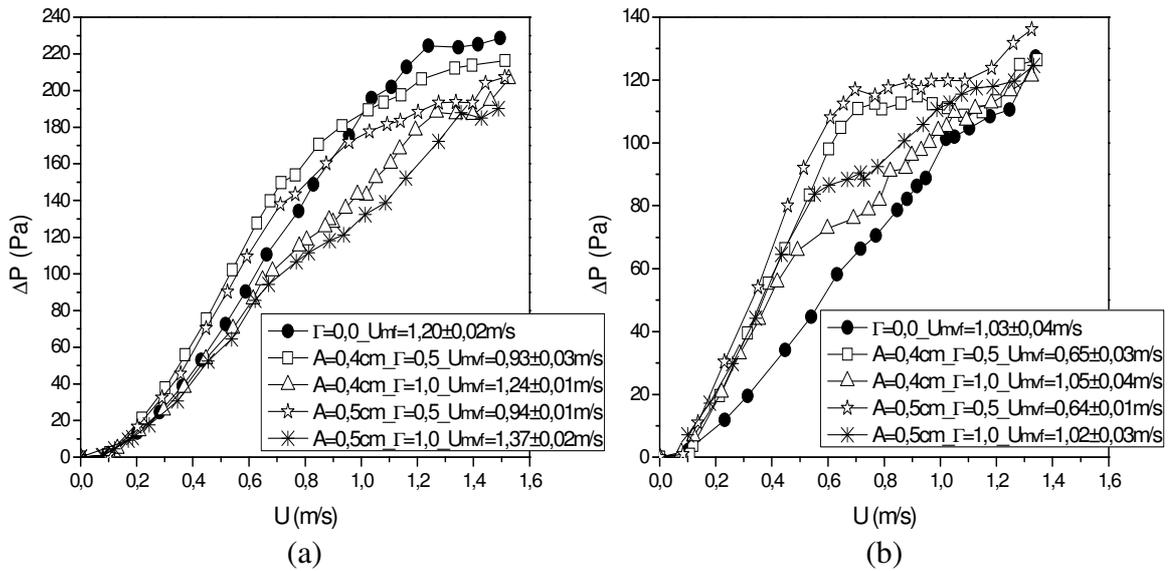
Visualmente, constata-se que a vibração não melhorou de forma significativa a qualidade da fluidização obtida para as partículas do Grupo II e, ao invés de um leito homogeneamente percolado pelo ar, observou-se apenas uma maior movimentação dos blocos ou agregados de partículas. Contudo, nota-se que na região de leito fixo a vibração levou a uma redução no número de canais preferenciais de escoamento de ar. Além disso, as curvas fluidodinâmicas obtidas para a vibrofluidização destas partículas apresentaram regiões de transição mais facilmente identificáveis.



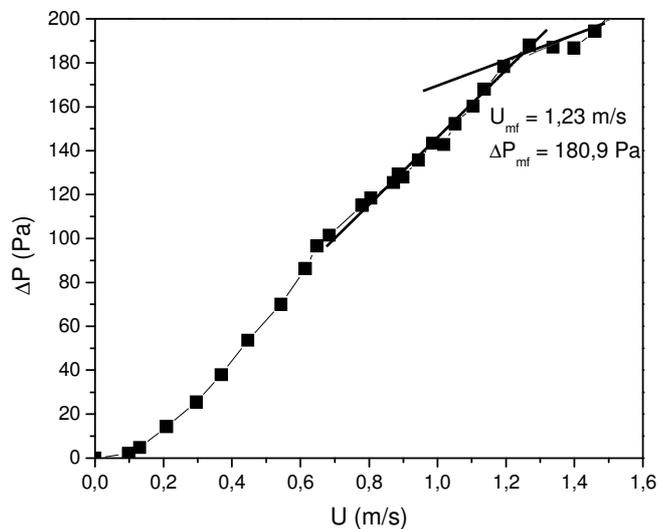
**Figura 4.28:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Grupo II: (a) Folhas de pingo de ouro;  $A_p=4,48\text{cm}^2$ ;  $\phi=0,201$ ;  $\rho_p=0,95\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; (b) Folhas de Aroeira;  $A_p=3,40\text{cm}^2$ ;  $\phi=0,213$ ;  $\rho_p=0,97\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

As Figuras 4.29(a) e 4.29(b) apresentam as curvas características em leito vibrofluidizado obtidas para as lentilhas de plástico e lantejoulas (Grupo III), respectivamente. Assim como demonstrado para as partículas dos Grupos I e II, observa-se nas curvas obtidas para as lentilhas plásticas e lantejoulas que a vibração provocou um prolongamento na região de transição entre os regimes de leito fixo e expandido.

As curvas obtidas para as lentilhas de plástico com  $\Gamma = 1,0$  apresentaram comportamento similar ao obtido anteriormente por Strumillo e Pakowski (1980). Nestas curvas, que também são exemplos típicos de curvas em que a vibração domina a dinâmica do leito, nota-se uma região de transição que se estende em uma ampla faixa de velocidades do fluido e, assim, a curva pode ser subdividida em três distintos segmentos de reta. Para a obtenção da velocidade mínima de vibrofluidização fez-se a regressão linear dos pontos localizados na região de transição entre os regimes e na região onde a fluidização encontra-se desenvolvida, pois, assumiu-se que a partir deste ponto, o leito encontra-se completamente fluidizado. A Figura 4.30 exemplifica a metodologia utilizada para a determinação da velocidade e queda de pressão na condição de mínima fluidização para as lentilhas de plástico usando-se  $A = 4,0 \times 10^{-3}$  m e  $\Gamma = 1,0$ .



**Figura 4.29:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Grupo III: (a) Lentilhas de plástico;  $A_p=2,75$  cm<sup>2</sup>;  $\varphi=0,568$ ;  $\rho_p=1,04$  g.cm<sup>-3</sup>; (b) Lentejoulas;  $A_p=1,12$  cm<sup>2</sup>;  $\varphi=0,228$ ;  $\rho_p=1,20$  g.cm<sup>-3</sup>.



**Figura 4.30:** Metodologia utilizada para a obtenção dos parâmetros  $U_{mf}$  e  $\Delta P_{mf}$  da curva fluidodinâmica obtida para o leito de lentilhas de plástico;  $A = 4,0 \times 10^{-3}$  m e  $\Gamma = 1,0$ .

Para as lentejoulas, o comportamento da curva utilizando  $\Gamma = 1,0$  foi similar ao obtido para as lentilhas (Grupo I), onde se verifica a presença de dois pontos de inflexão ao invés de apenas um. Estes leitos, assim como o de lentilhas, cuja dinâmica foi dominada pelas

forças vibracionais impostas ao sistema apresentam em comum elevadas densidades bulk, as maiores dentre todas as partículas testadas. Provavelmente, isto ocorre, pois para leitos de elevada densidade, maiores velocidades de escoamento se tornam necessárias para sustentar as partículas no leito, tornando-o fluidizado. Assim, para baixas velocidades de escoamento, as forças vibracionais são superiores às fluidodinâmicas, e o efeito da vibração é suficiente para provocar o movimento das partículas no interior do leito.

Para o leito de lentilhas de plástico, menores quedas de pressão foram observadas em toda a extensão da curva com o uso de  $\Gamma = 1,0$ . Entretanto, para  $\Gamma = 0,5$ , maiores perdas de carga foram obtidas na região de leito fixo, indicando uma maior dificuldade do ar em percolar o leito de partículas. Acredita-se que isto possa ter ocorrido, pois, nestas condições, a vibração é suficiente para provocar uma diminuição no número de canais preferenciais de escoamento, mas não para gerar uma movimentação do leito como observado para  $\Gamma = 1,0$ . Para as lantejoulas, nota-se que a vibração levou a maiores quedas de pressão em toda a extensão das curvas. Este comportamento pode ser justificado, pois para  $\Gamma = 0,0$ , foi possível notar a presença de canais preferenciais em toda a faixa de velocidades utilizadas e, com a introdução de vibração, a redução no número desses canais dificultou a passagem do ar levando a maiores perdas de carga no leito. Observa-se que os valores obtidos para as velocidades de transição foram mais afetados pelo uso do adimensional de vibração igual 0,5. Para  $\Gamma = 1,0$ , estes valores permaneceram dentro da faixa de incertezas experimentais (exceto para as lentilhas de plástico utilizando-se  $A = 5,0 \times 10^{-3}$  m e  $\Gamma=1,0$ ).

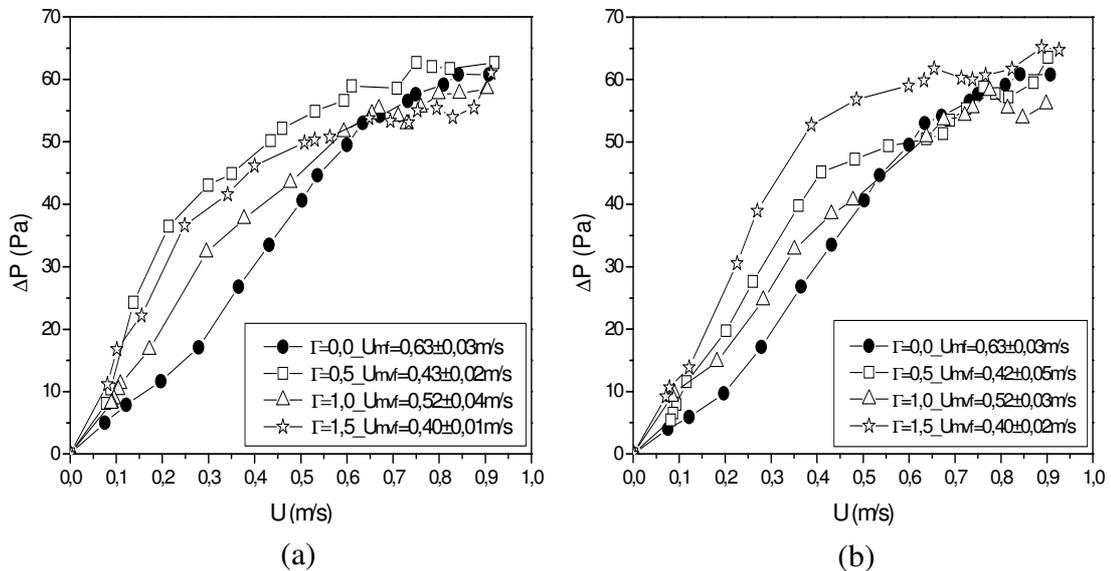
Para completar a análise fluidodinâmica em leito vibrofluidizado, serão discutidos a seguir os resultados obtidos para as partículas que, com a vibração, apresentaram comportamento diferenciado em relação às demais.

As Figuras 4.31(a) e 4.31(b) apresentam as curvas características de vibrofluidização obtidas para os quadrados de papel utilizando-se amplitudes vibracionais iguais a  $4,0 \times 10^{-3}$  e  $5,0 \times 10^{-3}$  m, respectivamente. Para as duas amplitudes testadas, nota-se que maiores valores de  $\Delta P$  foram obtidos na região de leito fixo e na região de leito expandido, as variações observadas oscilaram dentro da faixa de incertezas experimentais.

Para as “folhas” de papel, menores valores de  $\Delta P$  foram conseguidos na região de leito expandido com o uso de  $\Gamma > 0,0$ , entretanto, na região de leito fixo não foi possível perceber uma tendência clara de diminuição ou aumento da queda de pressão com o aumento do adimensional de vibração. Para  $\Gamma = 1,0$ , foram obtidos valores de  $\Delta P$  ligeiramente menores em toda a extensão da curva fluidodinâmica. As Figuras C.6 e C.7 (Apêndice C) trazem os

gráficos obtidos para as “folhas” de papel usando-se  $A = 4,0 \times 10^{-3}$  e  $5,0 \times 10^{-3}$  m, respectivamente.

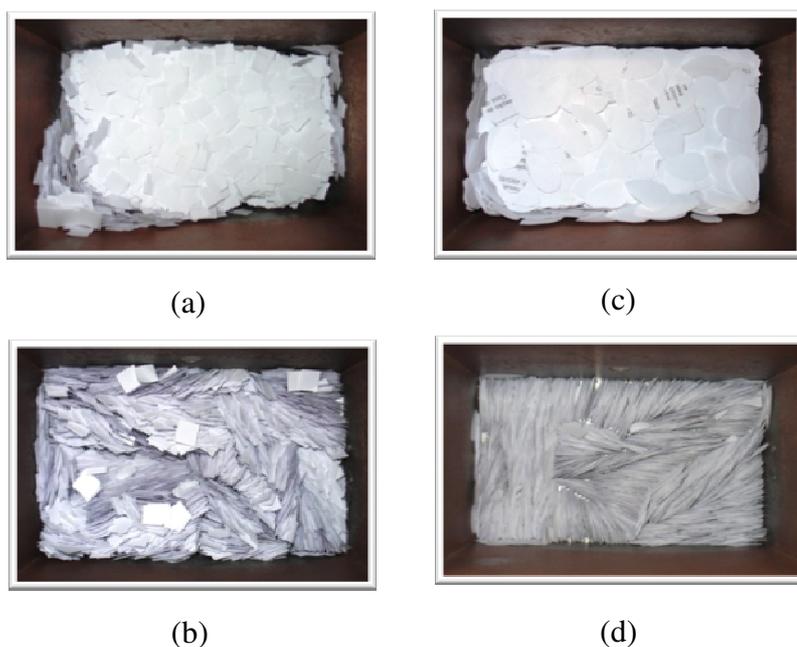
Para as duas partículas de papel é possível observar que os valores de  $U_{mf}$  são afetados pela vibração, mas os efeitos do aumento de  $\Gamma$  nas velocidades de transição não foram claros. Para as “folhas” nota-se que a variação ficou dentro do erro experimental (exceto para  $A = 4,0 \times 10^{-3}$  m e  $\Gamma = 1,5$ ), não apresentando efeito relevante sobre a  $U_{mf}$ . Para os quadrados de papel, observam-se reduções mais significativas nos valores de  $U_{mf}$ , entretanto, essa diminuição mostrou-se menos acentuada para  $\Gamma=1,0$ .



**Figura 4.31:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Quadrados de papel: (a)  $A=4,0 \times 10^{-3}$  m; (b)  $A=5,0 \times 10^{-3}$  m.

Visualmente, foi possível observar que a introdução de vibração reduz a formação de canais preferenciais por provocar um rearranjo das partículas no interior do leito. No decorrer dos ensaios as partículas gradualmente se alinhavam com as faces de maior área ficando paralelas à direção de escoamento do ar, como pode ser observado nas fotos das Figuras 4.32(a) e 4.32(b) para os quadrados de papel e Figuras 4.32(c) e 4.32(d) para as “folhas”, que mostram a vista do topo do leito nas condições estática (inicial) e vibrofluidizada, utilizando-se  $A = 4,0 \times 10^{-3}$  m e  $\Gamma = 1,0$ . As fotos são ilustrativas de determinadas condições de vibração, mas este comportamento foi observado para praticamente todas as condições testadas. O tempo consumido para o alinhamento completo

das partículas, no entanto, foi uma função da amplitude e da frequência de vibração, bem como da velocidade de escoamento do ar. O comportamento do leito e o tempo gasto para que este se alinhasse foi investigado para todas as amplitudes e adimensionais de vibração estudados para as velocidades de  $1,05U_{mf}$  e  $1,15U_{mf}$  ao longo de 30 minutos. Como resultado encontrou-se que amplitudes vibracionais maiores nem sempre levaram à orientação do leito de partículas. Além disso, a utilização de uma maior velocidade do ar de entrada, assim como, de frequências vibracionais mais elevadas, apesar de orientarem o leito mais rapidamente, provocavam um posterior desalinhamento. O uso de menores amplitudes e frequências vibracionais foi considerado mais eficiente, pois o leito manteve-se alinhado durante todo o período estudado. Entretanto, para  $A = 5,0 \times 10^{-3}$  m, o parâmetro vibracional igual a 1,0 também se mostrou eficaz.

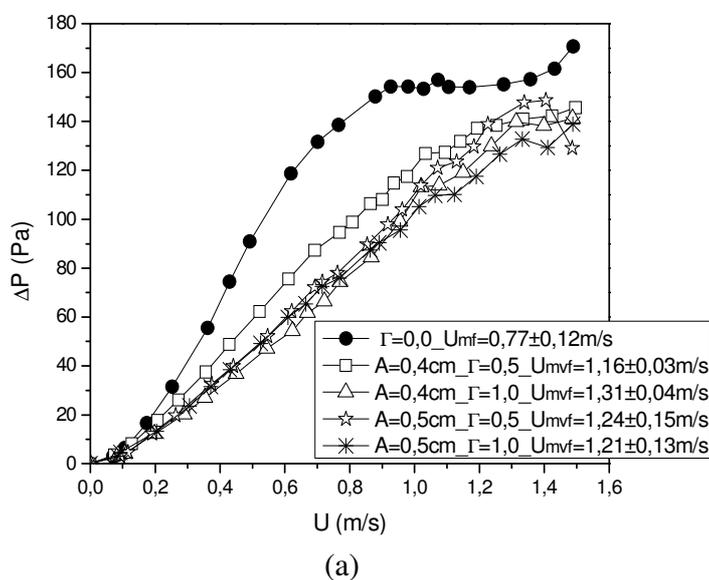


**Figura 4.32:** Fotografias (topo do leito); Leito vibrofluidizado;  $A=4,0 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma=1,0$ ;  $U=1,05U_{mf}$ : (a) Quadrados de papel, tempo=0' e (b) tempo=20'; (c) "Folhas" de papel, tempo=0' e (d) tempo=30'.

Assim como observado para as partículas de papel, os paetês sofreram alteração em sua configuração inicial, se tornando gradualmente alinhados quando o leito foi submetido à vibração vertical. Entretanto, diferentemente das "folhas" e quadrados de papel,

estes leitos se alinharam mais rapidamente e este alinhamento foi observado para todas as condições vibracionais impostas ao sistema.

A Figura 4.33(a) mostra as curvas fluidodinâmicas obtidas para os paetês em leito fluidizado e vibrofluidizado usando-se  $A = 4,0 \times 10^{-3}$  e  $5,0 \times 10^{-3}$  m para  $\Gamma = 0,5$  e  $1,0$ . Observa-se que, com a inserção de vibração, menores quedas de pressão foram obtidas em toda a extensão das curvas. Logo nos primeiros instantes do ensaio (curvas obtidas para velocidades decrescentes do ar), a queda de pressão começa a diminuir de forma quase linear. Isto ocorre, pois o leito se emparelha rapidamente com a introdução da vibração, oferecendo menor resistência à passagem do ar e, assim, resultando em menores valores de  $\Delta P$ . As Figuras 4.33(b) e 4.33(c) ilustram este comportamento, onde são mostradas fotos dos leitos na condição estática e vibrofluidizada ( $A = 4,0 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma = 0,5$ ), respectivamente. As velocidades de transição obtidas para todas as condições avaliadas foram superiores à obtida para  $\Gamma = 0,0$ . Este fato se justifica pelo rápido emparelhamento apresentado pelas partículas, que fez com que a queda de pressão no leito diminuísse significativamente em altas velocidades de escoamento do ar.



(b)

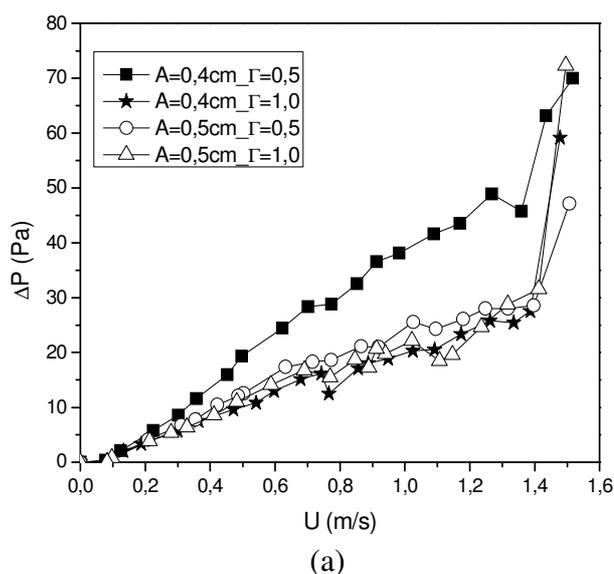


(c)

**Figura 4.33:** Leito vibrofluidizado; Paetês: (a) Queda de pressão no leito em função de U parametrizado no adimensional de vibração; Fotografias (vista do topo): (b) Leito estático e (c) Vibrofluidizado;  $A=4,0 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma=0,5$ .

A importância do alinhamento das partículas no leito encontra-se no fato de que nesta configuração as partículas possuem uma maior área de contato com o ar percolante e, assim, este comportamento pode se mostrar vantajoso para a secagem desses materiais, pois proporciona maiores intensidades nas trocas de calor e massa. Entretanto, dentre as partículas “naturais” cujos comportamentos fluidodinâmicos foram investigados, somente as folhas de buxinho reproduziram o alinhamento observado para as partículas “artificiais” anteriores.

A Figura 4.34(a) mostra as curvas de  $\Delta P$  versus velocidade superficial do ar obtidas na vibrofluidização das folhas de buxinho. Estas curvas, assim como as obtidas para os paetês, não são típicas de um leito vibrofluidizado convencional, onde é possível notar que a queda de pressão aumenta continuamente com a velocidade do ar em um padrão diferente do observado para os demais materiais. Para as curvas obtidas para as folhas de buxinho, entretanto, não é possível identificar uma velocidade de transição, visto que uma brusca diminuição na queda de pressão pode ser notada com a mudança na configuração das partículas no leito. Este alinhamento encontra-se ilustrado nas Figuras 4.34(b) e 4.34(c) e ocorre em um intervalo de tempo inferior ao dos paetês. Diferentes graus de alinhamento foram observados para todas as condições de  $A$  e  $\Gamma$  testadas, entretanto apenas para  $\Gamma = 1,0$  observou-se o completo alinhamento do leito. Nestas condições o leito manteve-se alinhado durante todo o tempo de realização do ensaio.



(b)



(c)

**Figura 4.34:** Leito vibrofluidizado; Folhas de buxinho: (a) Queda de pressão no leito em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Fotografias (vista do topo): (b) Leito estático e (c) Vibrofluidizado;  $A=4,0 \times 10^{-3}$  m;  $\Gamma=1,0$ .

É possível observar que o alinhamento verificado para as partículas é alcançado, provavelmente, como resultado de uma combinação entre a elevada área e a rigidez superficial das partículas, desde que as brácteas de primavera, que possuem área superficial duas vezes maior que as “folhas” de papel, não apresentaram tal comportamento.

#### 4.4.3 Efeito do Adimensional de Vibração

Para todas as partículas testadas, valores constantes dos adimensionais de vibração iguais a 0,5 e 1,0 (e 1,5 para as partículas de papel) foram obtidos de diferentes combinações entre a amplitude ( $A$ ) e a frequência vibracional ( $f$ ). Dentro da faixa de adimensionais utilizados neste trabalho, observou-se que, de maneira geral, valores iguais do adimensional de vibração resultaram em comportamentos fluidodinâmicos distintos para as diferentes partículas, o que corrobora o fato de que este parâmetro sozinho não consegue caracterizar os efeitos da vibração sobre a dinâmica do leito, como observado anteriormente por Daleffe *et al.* (2005).

Em alguns casos, foi possível notar a obtenção de comportamentos similares para um mesmo  $\Gamma$ , como pode ser visto na Figura 4.25(a) para as sementes de abóbora. Contudo, este comportamento não é consistentemente reproduzido para a grande maioria das partículas.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES**

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões encontradas com a realização deste trabalho. Optou-se por apresentar os resultados obtidos em itens, de forma similar ao capítulo anterior.

#### **5.1 Leito Fixo**

De maneira geral, notou-se que as porosidades bulk dos leitos de partículas investigadas, com esfericidades variando entre 0,063 e 0,574, apresentaram uma tendência de diminuir com o aumento do número de Ar e que os dados se dividiram em dois grupos distintos, com as folhas (Grupo II) apresentando as mais altas porosidades, em geral acima de 80%, enquanto para as demais partículas elas ficaram entre 30 e 70%. Nos ensaios para a determinação dos parâmetros de permeabilidade dos leitos, as melhores reprodutibilidades foram obtidas para as sementes de girassol, lentilhas e lantejoulas. Para os leitos constituídos pelos materiais do Grupo II, foram observadas as piores reprodutibilidades. Visualmente, observou-se que o aumento da velocidade do ar desestruturava os leitos, provocando uma elevação do leito de partículas como um todo. Este comportamento atípico decorre do fato das folhas serem leves e maleáveis, deformando-se facilmente com o escoamento do ar. Dentre as partículas empacotadas manualmente no interior do leito, as partículas de papel apresentaram reprodutibilidade muito superior à obtida para as folhas do Grupo II, enquanto nos leitos formados por paetês e folhas de buxinho a reprodutibilidade foi inferior. Quanto à queda de pressão, os leitos empacotados com partículas orientadas perpendicularmente à direção do escoamento de ar (paetês e papel) forneceram os valores mais altos de queda de pressão para velocidades de escoamento similares. Para as folhas de buxinho, o empacotamento com as folhas dispostas paralelamente à direção do escoamento de ar resultou em uma perda de carga no leito significativamente reduzida, tornando a operação de leitos com partículas orientadas desta forma extremamente vantajosa.

Para a maioria das partículas foi possível obter valores experimentais de permeabilidade e fator c através dos ensaios efetuados. De maneira geral, observou-se que os

valores de  $\kappa$  e fator  $c$  variaram entre  $10^{-7}$  e  $10^{-8} \text{ m}^2$  e 0,3 e 1,5, respectivamente, apesar da acentuada diferença entre os números de Arquimedes das partículas. Não foi possível identificar com clareza qual propriedade da partícula exerceu maior efeito nos valores de  $\kappa$  e fator  $c$  obtidos. Constatou-se também que os valores de  $\kappa$  nem sempre aumentaram com o aumento de  $\overline{\varepsilon_b}$  e, assim, as partículas do Grupo II, que apresentaram elevados valores de  $\overline{\varepsilon_b}$ , tiveram permeabilidades parecidas com a de leitos de menor porosidade.

## 5.2 Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado

A observação visual e os resultados obtidos no estudo do comportamento fluidodinâmico realizado para as partículas do Grupo I (sementes de abóbora e girassol, lentilhas e flocos de aveia), que apresentam as maiores esfericidades ( $0,431 \leq \phi \leq 0,574$ ),  $\rho_p$  de 0,348 a 0,923  $\text{g.cm}^{-3}$  e menores relações  $A_p/V_p$  ( $\leq 41 \text{ cm}^{-1}$ ), mostram que os leitos constituídos por estas partículas atingiram condições reais de fluidização. A  $U_{mf}$  para estes materiais parece ter sido mais fortemente influenciada por  $\rho_p$  do que pela  $\phi$  na faixa testada. Entretanto, a esfericidade exerceu efeito superior à massa específica aparente nos valores de  $\Delta P_{mf}$  obtidos. O uso de vibração provocou reduções significativas na  $U_{mf}$ , além de reduzir a formação de canais preferenciais, melhorando qualitativamente a fluidização no leito. Os resultados aqui obtidos sugerem que, para estas partículas, a fluidização pode resultar em um produto seco e homogêneo.

As lentilhas de plástico (Grupo III), com  $\phi = 0,568$  e  $A_p/V_p = 15 \text{ cm}^{-1}$  apresentaram comportamento fluidodinâmico similar ao apresentado pelas sementes e cereais. As curvas fluidodinâmicas obtidas foram similares às de um leito fluidizado convencional, com boa reprodutibilidade dos ensaios fluidodinâmicos.

Os resultados encontrados para as folhas do Grupo II (pingo de ouro, aroeira, buxinho, quadrados de boldo e primavera) mostraram que estas partículas não apresentaram uma fluidização homogênea e que o comportamento fluidodinâmico dos leitos formados difere dos classicamente observados para partículas de esfericidades próximas de 1,0. Entretanto, os valores de  $U_{mf}$  e  $\Delta P_{mf}$  obtidos foram reprodutíveis. Os valores de  $U_{mf}$  não diferiram significativamente para os materiais investigados (entre 0,63 e 0,65  $\text{m.s}^{-1}$ ), apesar das diferenças apresentadas com relação à forma, dimensões e massa específica e não

apresentaram dependência clara em relação à variação do adimensional  $Ar$ . Em geral, foi observada tendência de diminuição de  $\varepsilon_{mf}$  e aumento de  $\Delta P_{mf}$  com o aumento de  $Ar$ .

Os experimentos conduzidos em leito vibrofluidizado com as folhas frescas não permitem concluir que a movimentação mecânica melhorou significativamente a qualidade da fluidização. Entretanto, a vibração proporcionou a redução dos canais preferenciais e tornou mais visível a região de transição entre os regimes de leito fixo e expandido nas curvas fluidodinâmicas. Em alguns casos, reduções nos valores de  $U_{mf}$  foram observadas com a vibração, entretanto, na maioria dos casos os valores não foram significativamente diferentes dos observados na fluidização. Para as folhas de buxinho, a vibração provocou o alinhamento das partículas no interior do leito com as faces de maior área paralelas à direção de escoamento do ar. Nesta configuração, as partículas possuem elevada área de contato com o ar de secagem, proporcionando altas intensidades nas trocas de calor e massa, além de oferecerem menor resistência ao escoamento do ar, gerando baixas perdas de carga no leito.

Para as partículas artificiais do Grupo III (exceto lentilhas de plástico), que possuem  $\phi < 0,228$  e relações  $A_p/V_p$  superiores a  $92\text{cm}^{-1}$ , também não foi possível observar um comportamento fluidodinâmico clássico. Notou-se acentuada formação de canais preferenciais e uma expansão pouco homogênea do leito. Novamente, foi possível constatar que a  $U_{mf}$  sofreu maior influência de  $\rho_p$  e que a  $\Delta P_{mf}$  foi mais influenciada por  $\phi$  e  $\rho_b$ .

Assim como obtido para as partículas do Grupo II, a introdução de vibração no leito minimizou o número de canais preferenciais e provocou reduções nas velocidades de transição, mas não melhorou significativamente a qualidade da fluidização. O efeito do alinhamento das partículas no interior do leito foi observado tanto para as partículas de papel quanto para os paetês. Este efeito decorre, provavelmente, como resultado de uma combinação entre a elevada área e a rigidez superficial das partículas.

O fato de se ter usado partículas artificiais permitiu a obtenção de dados fluidodinâmicos onde os efeitos de distribuição de tamanhos e variações na forma são minimizados. Além disso, com o uso destes materiais foi possível avaliar o efeito da forma das partículas, isento da textura superficial inerente às partículas naturais. Os resultados encontrados indicam que a forma plana e as baixas esfericidades são as principais responsáveis pela má qualidade da fluidização obtida. No caso das folhas, estes efeitos foram intensificados pela textura superficial apresentada por estes materiais.

Os resultados aqui obtidos sugerem que a fluidização de partículas com baixas esfericidades e elevadas relações  $A_p/V_p$  é pouco homogênea e o contato entre as partículas e o fluido percolante é extremamente irregular. Para estas partículas, os conhecimentos e metodologias baseadas na fluidização de partículas convencionais devem ser avaliados e aplicados com cautela. As correlações para partículas de baixa esfericidade encontradas na literatura não se aplicaram para a previsão das velocidades de mínima fluidização das partículas aqui estudadas. Os valores preditos através do uso destas correlações resultaram em desvios superiores a uma ordem de grandeza para as partículas do Grupo I e em desvios ainda maiores para as partículas dos Grupos II e III. A equação clássica de Wen e Yu (1966) foi a que resultou em menores erros relativos, mas os resultados sugerem que outras propriedades além da esfericidade devem ser incluídas para uma completa caracterização da morfologia da partícula.

Os resultados indicam que o uso de leitos fluidizados na secagem de partículas como folhas ( $\varphi < 0,2$ ) pode levar à obtenção de produtos pouco homogêneos, já que o contato entre as partículas e o fluido é pouco homogêneo. Já a vibrofluidização pode ser vantajosa, particularmente para condições em que é observado o alinhamento das partículas (partículas rígidas e com elevada área superficial), que pode favorecer os processos de transferência de calor e massa, por resultar em uma configuração ótima em termos da área das partículas exposta ao contato com o fluido. Para as partículas com esfericidades mais elevadas ( $0,431 \leq \varphi \leq 0,568$ ) e menores relações  $A_p/V_p$  ( $\leq 41$ ), podem ser obtidos comportamentos fluidodinâmicos estáveis e, assim, o processo de fluidização pode resultar em produtos homogeneamente secos.

Para continuidade deste estudo, sugere-se a realização de experimentos adicionais, utilizando partículas de baixas esfericidades, a fim de contribuir para a compreensão do comportamento fluidodinâmico deste tipo de material e, assim, estabelecer metodologias confiáveis para a estimativa dos parâmetros relativos à fluidização. A obtenção de dados para faixas específicas de Arquimedes visando a proposição de correlações adequadas para a estimativa de parâmetros fluidodinâmicos de interesse também é recomendável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C.; ROCHA, S. C. S. Fluidodinâmica de sementes de brócolos em leito fluidizado e leito de jorro. **Scientia Agricola**, Campinas, SP, v. 59, n. 4, p. 645-652, out./dez. 2002.

BRATU, E.; JINESCU, G. I. Effect of vertical vibrations on the pressure drop in a fluidized layer. **British Chemical Engineering**, London, v. 16, n. 8, p. 691-695, 1971.

CAMPOS, T.; CANÉCHIO FILHO, V. **Principais Culturas**. 2. ed. Campinas, SP: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. v. 2. 405 p.

COLTTERS, R.; RIVAS, A. L. Minimum fluidation velocity correlations in particulate systems. **Powder Technology**, Caracas, Venezuela, v. 147, p. 34-48, 2004.

COSTA JÚNIOR, G. N.; LIMA, A. P.; DEVILLA, I. A. Propriedades físicas de grãos de girassol (*Helianthus annuus* L.). In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 4., 2006, Anápolis, GO. **Anais do IV Seminário de Iniciação Científica**, p. 135-140. Disponível em: <[http://www.prp.ueg.br/06v1/ctd/pesq/inic\\_cien/eventos/sic2006/arquivos/agrarias/propriedades\\_fisicas.pdf](http://www.prp.ueg.br/06v1/ctd/pesq/inic_cien/eventos/sic2006/arquivos/agrarias/propriedades_fisicas.pdf)>. Acesso em: out. 2008.

CUI, H.; GRACE, J. R. Fluidization of biomass particles: a review of experimental multiphase flow aspects. **Chemical Engineering Science**, Vancouver, Canada, v. 62, p. 45-55, 2007.

DALEFFE, R. V.; FREIRE, J. T. Analysis of the fluid-dynamic behavior of fluidized and vibrofluidized bed containing glycerol. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Carlos, SP, v. 21, n. 1, p. 35-46, jan./mar. 2004.

DALEFFE, R. V.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Drying of pastes in vibro-fluidized beds: effects of the amplitude and frequency of vibration. **Drying Technology**, São Carlos, SP, v. 23, n. 9-11, p. 1765-1781, 2005.

DELLA TONIA JÚNIOR, V. G. **Desenvolvimento, instrumentação e fluidodinâmica de um leito vibrofluidizado**. 1990. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1990.

ERDÉSZ, K. Hydrodynamic studies on vibrated fluidized beds. **Power Handling & Processing**, Germany, v. 2, n. 4, p. 327-339, 1990.

ERIKSSON, M. *et al.* Comparison between and evaluation of some methods for the assessment of the sphericity of pellets. **International Journal of Pharmaceutics**, Södertälje, Sweden, v. 148, p. 149-154, 1997.

FREITAS, C. O. *et al.* Características físicas da oleaginosa tucumã (*Astrocaryum vulgare*, Mart.). In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DO BIODIESEL, 1., 2006, Brasília, DF. **Artigos técnico-científicos do I Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia do Biodiesel**, p.8-11. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006/agricultura/Caracter%EDsticasFisicasOleaginosa.pdf>>. Acesso em: out. 2008.

GARIM, M. M.; FREIRE, J. T. Leito vibro-fluidizado aerado: estudos relacionados à determinação de  $U_{mvf}$  e  $\Delta P_{mvf}$ . In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 10., 1994, São Paulo, SP. **Anais do X Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, v. 1, p. 295-300.

GOMES, L. G. **Estimativa dos perfis de permeabilidade e de porosidade utilizando rede neural artificial**. 2002. 41 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2002.

GUPTA, R. K.; ARORA, G.; SHARMA, R. Aerodynamic properties of sunflower seed (*Helianthus annuus* L.). **Journal of Food Engineering**, Ludhiana, India, v. 79, p. 899-904, 2007.

GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. Aerodynamics of a vibrated fluid bed. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Ottawa, v. 58, p. 332-338, 1980a.

GUPTA, R.; MUJUMDAR, A. S. Aerodynamic and thermal characteristics of vibrate fluid beds: a review. In: **Drying'80, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Drying Symposium (IDS'80)**, Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v. 1, p. 141-150, 1980b.

GUTKOSKI, L. C.; PEDÓ, I. **Aveia**: composição química, valor nutricional e processamento. São Paulo, SP: Varela, 2000. 191p.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1969. 534 p.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. 2. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991. 491 p. (Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering).

LACERDA JÚNIOR, W. M.; CARVALHO, F. M.; ATAÍDE, C. H. Caracterização de regimes de fluidização através da análise de flutuação de pressão no leito. **Horizonte Científico: Revista Eletrônica da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UFU**, Uberlândia, MG, v. 2, p. 1-24, 2005. Disponível em: <[http://www.propp.ufu.br/revistaeletronica/edicao2005\\_2/c/caracterizacao.pdf](http://www.propp.ufu.br/revistaeletronica/edicao2005_2/c/caracterizacao.pdf)>. Acesso em: set. 2007.

LIPPENS, B. C.; MULDER, J. Prediction of the minimum fluidization velocity. **Powder Technology**, Nijmegen, Netherlands, v. 75, p. 67-78, 1993.

LIU, B. *et al.* Fluidization of non-spherical particles: sphericity, zingg factor and other fluidization parameters. **Particuology**, Beijing, China, v. 6, p. 125-129, 2008.

LONGHI, R. A. **Livro das árvores: árvores e arvoretas do sul**. Porto Alegre, RS: L&PM, 1995. 174p.

LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2002. 512p.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M. **Plantas ornamentais no Brasil: arbustivas, herbáceas e trepadeiras**. 3. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2001. 1088p.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**. 4. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2002. v. 1, 368 p.

LUCAS, A. *et al.* Improved equation for the calculation of minimum fluidization velocity. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development**, Barcelona, Spain, v. 25, n. 2, p. 426-429, 1986.

MASSARANI, G. **Aspectos da fluidodinâmica em meios porosos**. Rio de Janeiro: RBE, 1989. 96 p.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2002. 152 p.

MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M. Porosidade intergranular de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 1, p. 79-93, 2002.

MEDEIROS, U. K. L. **Estudo da secagem do feijão verde (*Vigna unguiculata L. Walp*): análise experimental do processo combinado leito fixo/leito de jorro**. 2004. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2004.

MODESTO, Z. M. M.; SIQUEIRA, N. J. B. **Botânica**. São Paulo, SP: EPU, 1981. 167 p. (Série Currículo de Estudos de Biologia, v. 5).

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1970. 734p.

MONTILLET, A.; LE COQ, L. Characteristics of fixed beds packed with anisotropic particles: use of image analysis. **Powder Technology**, Saint-Nazaire, France, v. 121, p. 138-148, 2001.

MUJUMDAR, A. S. Aerodynamic characteristics of a vibrated bed of particles. In: **Drying'84, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS'84)**, Kyoto, Japan. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v. 1, p. 178-185, 1984.

NEVES, E.; ALBUQUERQUE, M. C. F.; RODRIGUES, L. C. M. Variação da morfologia geométrica em sementes de soja e algodoeiro. **Revista Agricultura Tropical**, Cuiabá, MT, v. 8, p. 139-154, 2004.

OLIVEIRA, I. R. *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo, SP: Fazenda Arte, 2000. 224 p.

PEREZ, E. E.; CRAPISTE, G. H.; CARELLI, A. A. Some physical and morphological properties of wild sunflower seeds. **Biosystems Engineering**, Argentina, v. 96, n. 1, p. 41-45, 2007.

RAZAVI, S. M. A.; MOGHADDAM, T. M.; AMINI, A. M. Physical-mechanical properties and chemical composition of balangu (*Lallemantia royleana* (Benth. In Walla.)) seed. **International Journal of Food Engineering**, Mashhad, Iran, v. 4, n. 5, art. 4, p. 1-12, 2008.

REINA, J.; VELO, E.; PUIGJANER, L. Predicting the minimum fluidization velocity of polydisperse mixtures of scrap-wood particles. **Powder Technology**, Barcelona, Spain, v. 111, p. 245-251, 2000.

SÁ, J. Pesquisa revela um dos alimentos mais ricos em fibras. **Olhar Vital**, Rio de Janeiro, RJ, ed. 091, jul. 2007. Publicação eletrônica da Coordenadoria de Comunicação da UFRJ. Disponível em: < [http://www.olharvital.ufrj.br/2006/index.php?id\\_edicao=091&codigo=2](http://www.olharvital.ufrj.br/2006/index.php?id_edicao=091&codigo=2)>. Acesso em: set. 2008.

SAMOGIN, M. S. **Estudo da fluidodinâmica em leito vibrofluidizado**. São Carlos: Departamento de Engenharia Química, 1997. 118 p. Trabalho de Graduação.

SILVA TELLES, A.; MASSARANI, G. Escoamento de fluidos não-newtonianos em sistemas particulados. **Revista Brasileira de Física**, v. 9, p. 535-550, 1979.

SINGULANI, R. C. **Análise teórico-experimental do escoamento de ar em leito fixo**. 2001. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2001.

SHAH, R. M.; GOYEL, S. K. Drying characteristics of tea fluidized on a vibrating bed (Part I). In: **Drying'80, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Drying Symposium (IDS'80)**, Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v. 2, p. 176-181, 1980.

STANĚK, V. **Fixed bed operations: flow distribution and efficiency**. New York: Ellis Horwood, 1994. 267 p. (Ellis Horwood Series in Chemical Engineering).

STRUMILLO, C.; PAKOWSKI, Z. Drying of granular products in vibrofluidized beds. In: **Drying'80, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Drying Symposium (IDS'80)**, Montreal, Canada. Hemisphere Publishing Corporation, New York, v. 1, p. 211-226, 1980.

TAYLOR, M. A. Quantitative measures for shape and size of particles. **Powder Technology**, California, USA, v. 124, p. 94-100, 2002.

TEIXEIRA, M. M. *et al.* A. R. Propriedades físicas e aerodinâmicas aplicadas ao projeto de máquinas de limpeza para grãos de milho. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 11, n. 1-4, p. 52-57, jan./dez. 2003.

TEMPLE, S. J.; VAN BOXTEL, A. J. B. Fluidization of tea. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Mulanje, Malawi, v. 74, p.5-11, 1999.

VERMA, R. S.; SAXENA, S. C. Hydrodynamic and heat transfer characteristics of large agricultural seeds-air fluidized beds. **Powder Technology**, Chicago, USA, v. 39, p. 245-248, 1984.

---

WEN, C. Y.; YU, Y. H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. **American Institute of Chemical Engineers Journal (AIChE Journal)**, New York, v. 12, n. 3, p. 610-612, 1966.

YU, A. B.; STANDISH, N. Characterisation of non-spherical particles from their packing behaviour. **Powder Technology**, Wollongong, Australia, v. 74, p. 205-213, 1993.

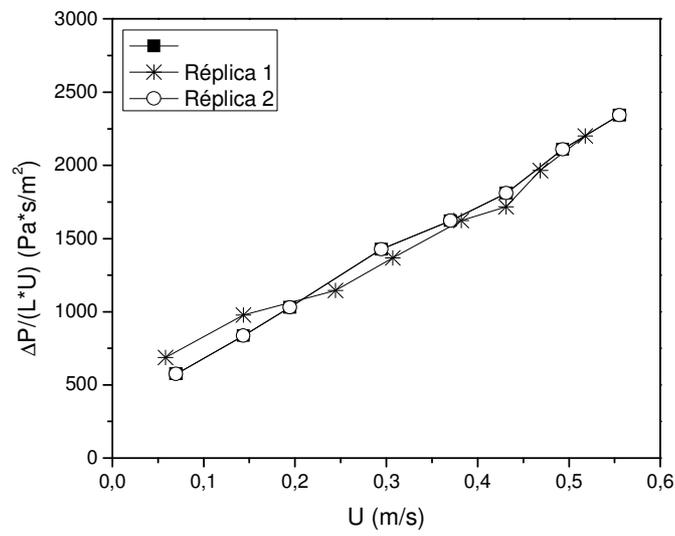
ZAITSEV, E. D.; REDEKOP, V. I.; SHVETSOV, V. V. Hydrodynamics and external heat exchange of a vibrated fluidized layer of pharmaceutical preparations. **Pharmaceutical Chemistry Journal**, v. 10, n. 3, p. 354-358, 1976.

ZANOELO, E. F. A theoretical and experimental study of simultaneous heat and mass transport resistances in a shallow fluidized bed dryer of mate leaves. **Chemical Engineering and Processing**, Curitiba, PR, v. 46, 1365-1375, 2007.

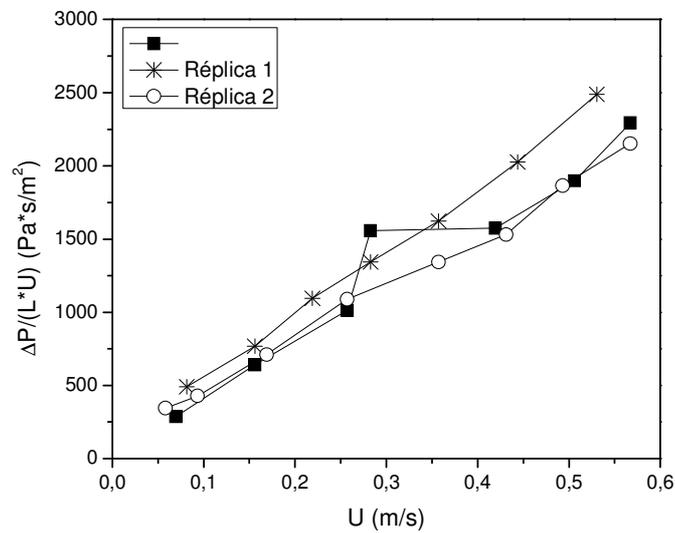
ZOTIN, F. M. Z. **O efeito da parede em colunas de recheio**. 1985. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1985.

## **APÊNDICE A**

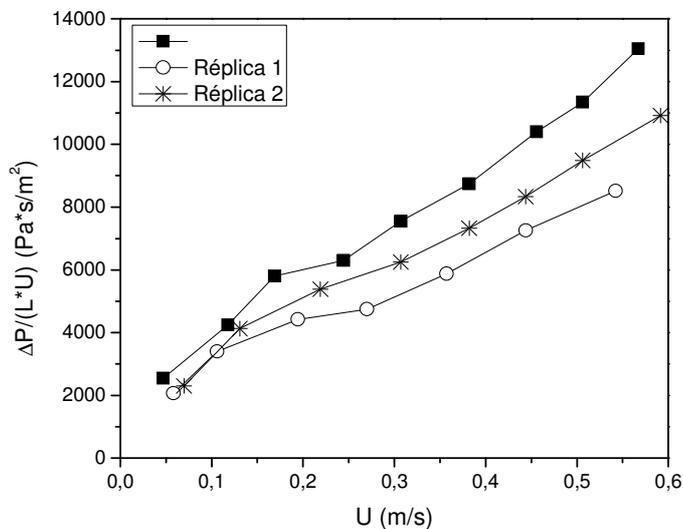
**Representação gráfica das curvas de  $\Delta P/LU$  em função de  $U$  para os ensaios fluidodinâmicos em leito fixo.**



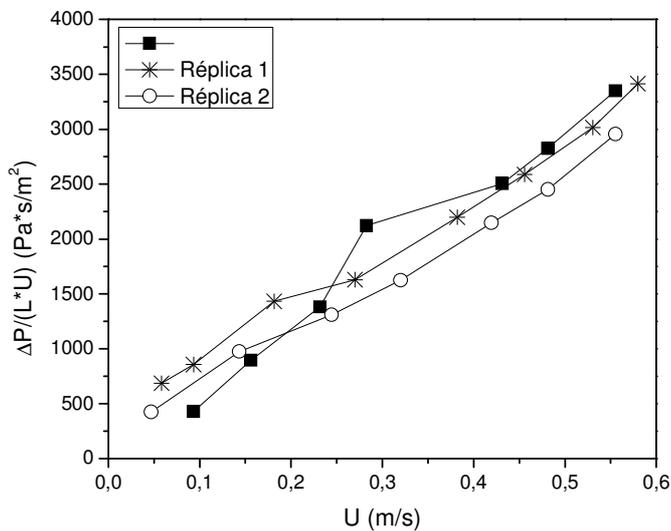
**Figura A.1:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Sementes de girassol;  $\phi=0,524$ ;  $d_v=0,755\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,52\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .



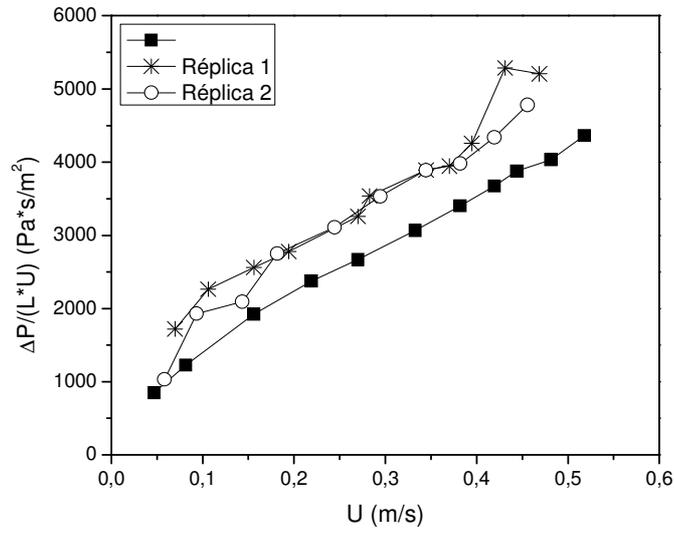
**Figura A.2:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Sementes de abóbora;  $\phi=0,523$ ;  $d_v=0,980\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,73\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .



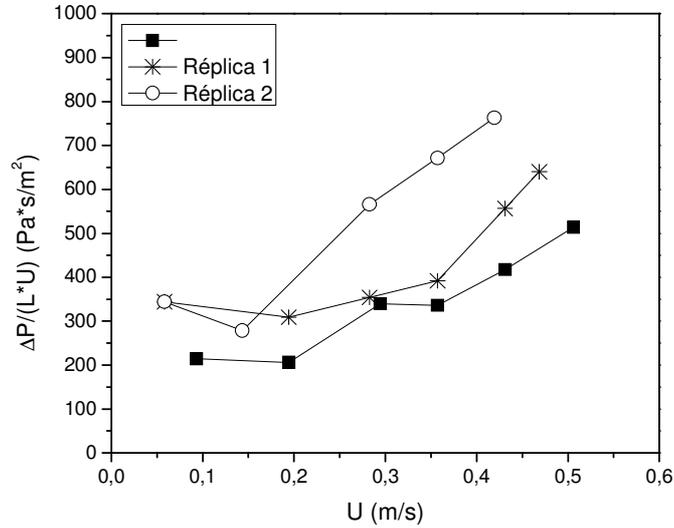
**Figura A.3:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Flocos de aveia;  $\phi=0,431$ ;  $d_v=0,338\text{cm}$ ;  $\rho_p=1,20\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .



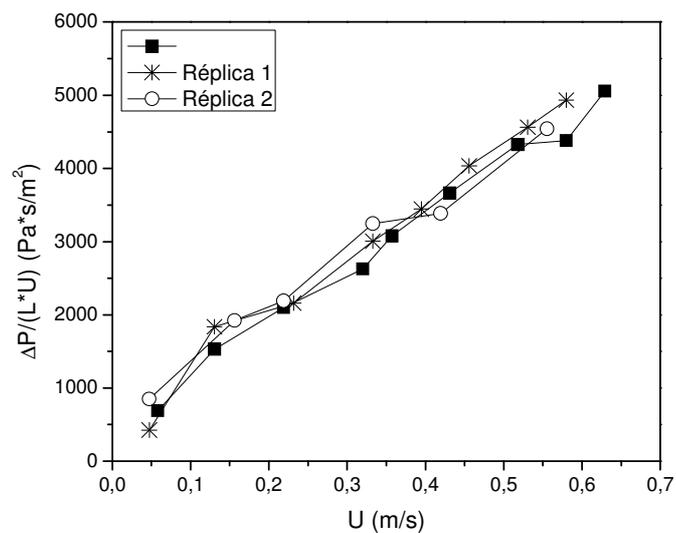
**Figura A.4:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Lentilhas de plástico;  $\phi=0,568$ ;  $d_v=0,705\text{cm}$ ;  $\rho_p=1,04\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .



**Figura A.5:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Folhas de pingo de ouro;  $\phi=0,201$ ;  $d_v=0,535\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,95\text{g.cm}^{-3}$ .



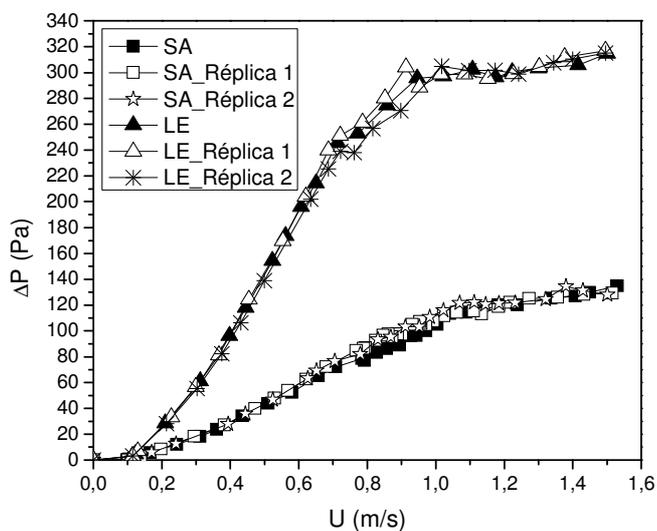
**Figura A.6:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Folhas de boldo cortadas em quadrados;  $\phi=0,193$ ;  $d_v=0,506\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,92\text{g.cm}^{-3}$ .



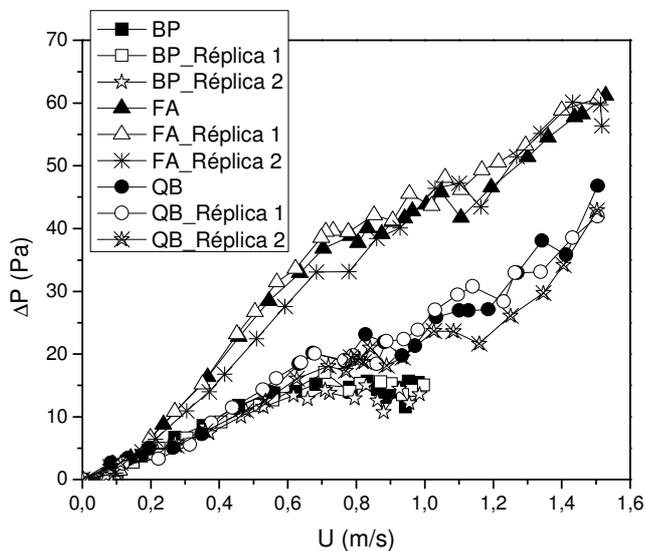
**Figura A.7:** Leito fixo;  $\Delta P/LU$  em função de  $U$ ; Quadrados de papel;  $\phi=0,090$ ;  $d_v=0,296\text{cm}$ ;  $\rho_p=0,83\text{g.cm}^{-3}$ .

## **APÊNDICE B**

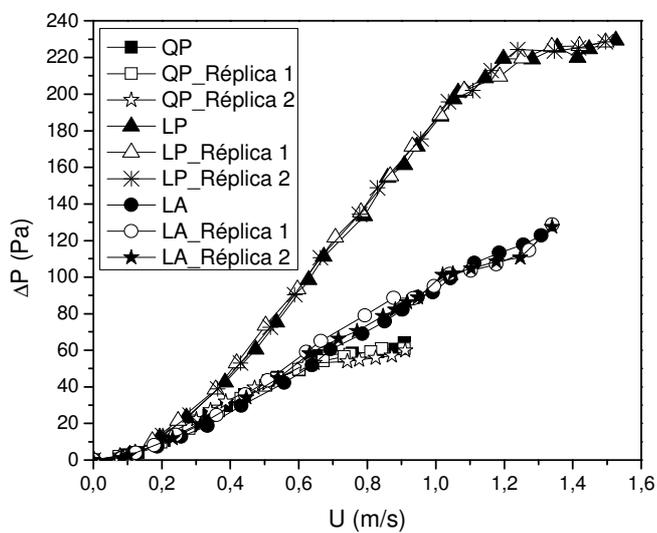
**Representação gráfica das curvas de  $\Delta P$  em função de U para os ensaios fluidodinâmicos em leito fluidizado.**



**Figura B.1:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; Partículas do Grupo I: Sementes de abóbora (SA);  $A_p=5,78\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,523$  e Lentilhas (LE);  $A_p=1,14\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,574$ .



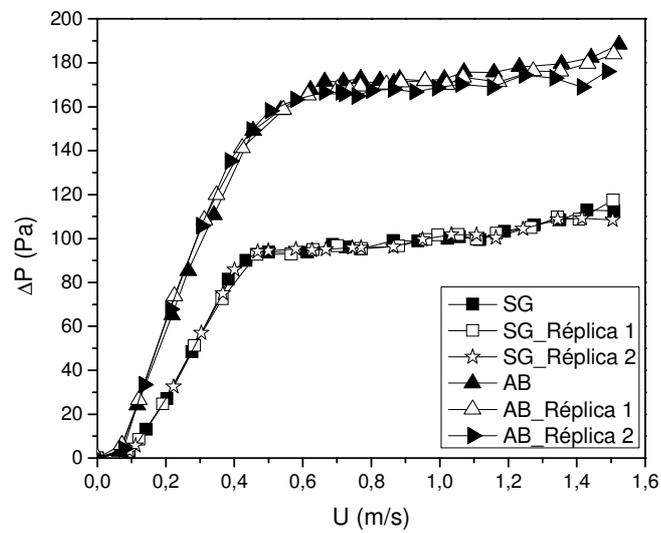
**Figura B.2:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; Partículas do Grupo II: Brácteas de primavera (BP);  $A_p=24,0\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,072$ ; Folhas de aroeira (FA);  $A_p=3,40\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,213$  e Quadrados de boldo (QB);  $A_p=4,18\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,193$ .



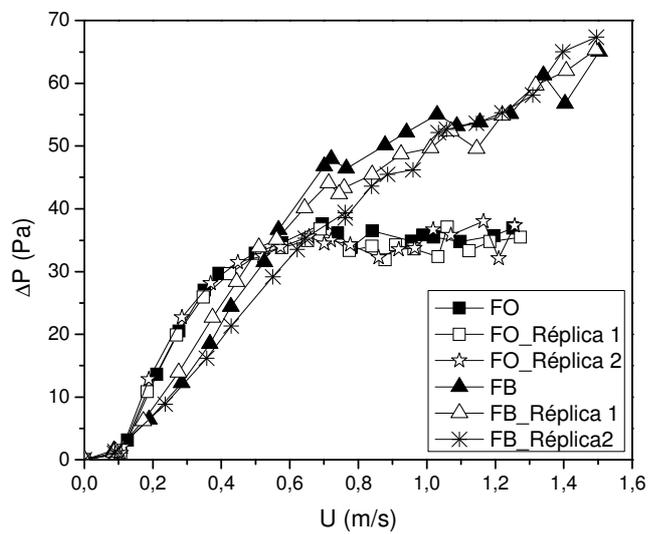
**Figura B.3:** Leito fluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ; Partículas do Grupo III: Quadrados de papel (QP);  $A_p=3,06\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,090$ ; Lentilhas de plástico (LP);  $A_p=2,75\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,568$  e Lantejoulas (LA);  $A_p=1,12\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,228$ .

## **APÊNDICE C**

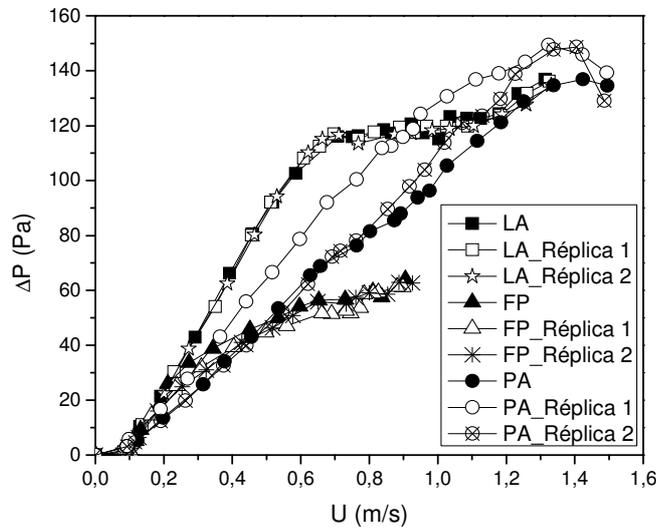
**Representação gráfica das curvas de  $\Delta P$  em função de U para os ensaios fluidodinâmicos em leito vibrofluidizado.**



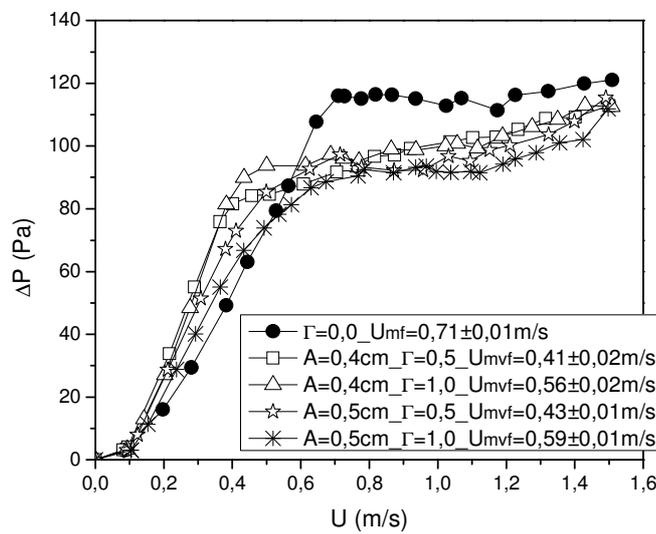
**Figura C.1:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ;  $A=5,0 \times 10^{-3}\text{m}$ ;  $\Gamma=0,5$ ; Partículas do Grupo I: Sementes de girassol (SG);  $A_p=3,42\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,524$  e Flocos de aveia (AB);  $A_p=0,84\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,431$ .



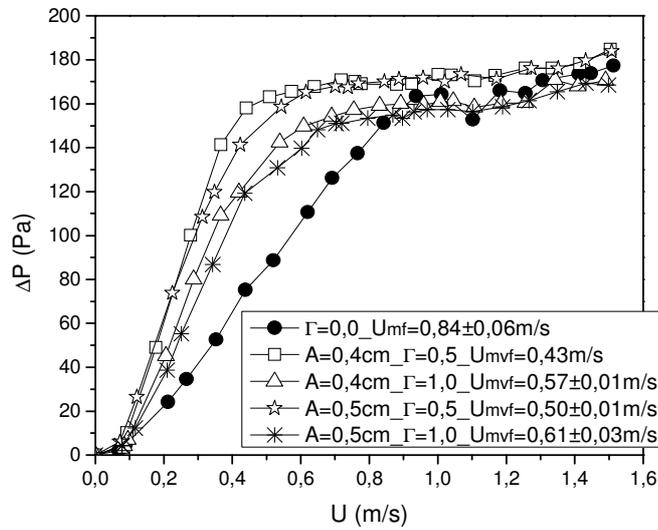
**Figura C.2:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ;  $A=5,0 \times 10^{-3}\text{m}$ ;  $\Gamma=0,5$ ; Partículas do Grupo II: Folhas de pingo de ouro (FO);  $A_p=4,48\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,201$  e Folhas de buxinho (FB);  $A_p=53,9\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,167$ .



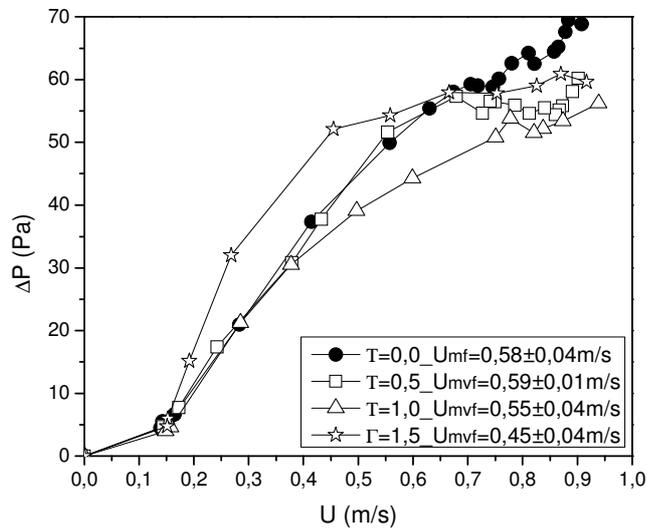
**Figura C.3:** Leito vibrofluidizado; Queda de pressão no leito em função de  $U$ ;  $H_0=3,5\text{cm}$ ;  $A=5,0 \times 10^{-3}\text{m}$ ;  $\Gamma=0,5$ ; Partículas do Grupo III: Lantejoulas (LA);  $A_p=1,12\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,228$ ; “Folhas” de papel (FP);  $A_p=8,98\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,063$  e Paetês (PA);  $A_p=9,80\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,107$ .



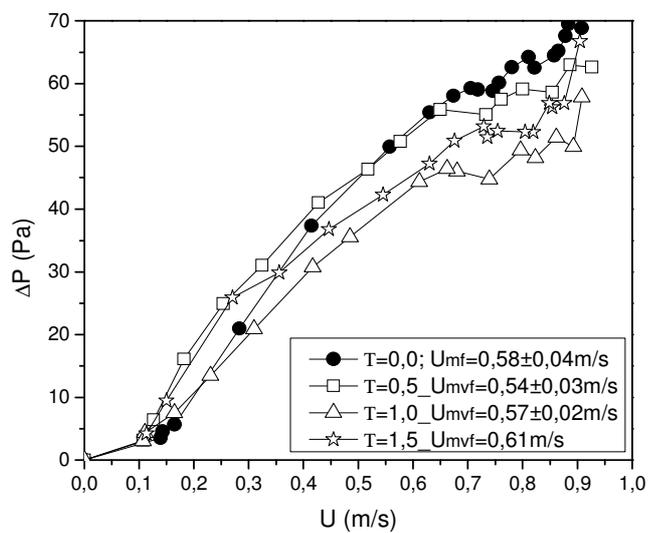
**Figura C.4:**  $\Delta P$  em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Leito vibrofluidizado; Sementes de girassol;  $A_p=3,42\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,524$ ;  $\rho_p=0,52\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .



**Figura C.5:**  $\Delta P$  em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Leito vibrofluidizado; Flocos de aveia;  $A_p=0,84\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,431$ ;  $\rho_p=1,20\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .



**Figura C.6:**  $\Delta P$  em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Leito vibrofluidizado;  $A=4,0 \times 10^{-3}\text{m}$ ; “Folhas” de papel;  $A_p=8,98\text{cm}^2$ ;  $\varphi=0,063$ ;  $\rho_p=0,83\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .



**Figura C.7:**  $\Delta P$  em função de  $U$  parametrizado no adimensional de vibração; Leito vibrofluidizado;  $A=5,0 \times 10^{-3}$  m; “Folhas” de papel;  $A_p=8,98 \text{ cm}^2$ ;  $\varphi=0,063$ ;  $\rho_p=0,83 \text{ g.cm}^{-3}$ .