



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**ESTUDO FLUIDODINÂMICO DE UM LEITO FLUIDIZADO**  
**PULSADO ROTATIVO COM PARTÍCULAS SECAS E ÚMIDAS**

**AUTOR: Marina dos Santos Ribeiro**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto**

Dissertação submetida à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA.

Campinas – SP

Junho / 2005.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

R354e      Ribeiro, Marina dos Santos  
              Estudo fluidodinâmico de um leito fluidizado pulsado  
              rotativo com partículas secas e úmidas / Marina dos Santos  
              Ribeiro.--Campinas, SP: [s.n.], 2005.

              Orientador: Osvaldir Pereira Taranto  
              Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
              Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

              1. Leito fluidizado. 2. Fluidização. 3. Dinâmica dos  
              fluidos. 4. Umidade. 5. Celulose. 6. Acido adipico. 7.  
              Secagem. I. Taranto, Osvaldir Pereira. II. Universidade  
              Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química.  
              III. Título.

RMS-BAE

Titulo em Inglês: Rotating pulsed fluidized bed fluidynamics of dry and moist particles

Palavras-chave em Inglês: Rotating pulse fluidization, moisture, microcrystalline  
cellulose, adipic acid, drying

Área de concentração: Engenharia de Processos

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Florência Cecília Menegalli e Sandra Cristina dos Santos Rocha

Data da defesa: 23/07/2005

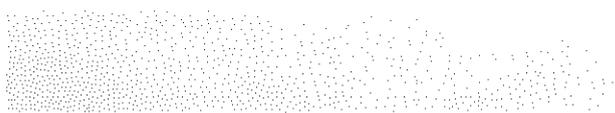
Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado  
em Engenharia Química



---

**Prof . Dr. Osvaldir Pereira Taranto**

22222

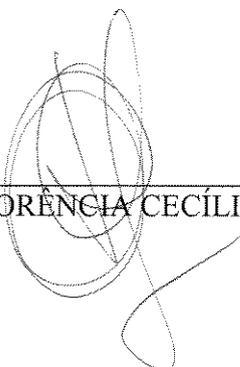


Dissertação de Mestrado defendida por MARINA dos SANTOS RIBEIRO e aprovada em 23 de junho de 2005 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



---

Prof. Dr. OSVALDIR PEREIRA TARANTO



---

Profa. Dra FLORENCIA CECÍLIA MENEGALLI



---

Profa. Dra. SANDRA CRISTINA DOS SANTOS ROCHA



"Uma pessoa é única ao estender a mão, e ao recolhê-la inesperadamente, se torna mais uma. O egoísmo unifica os insignificantes."

“Não é a altura, nem o peso, nem os músculos que tornam uma pessoa grande.... É a sua sensibilidade sem tamanho...”.

Shakespeare

"O essencial é invisível aos olhos..... só se vê bem com o coração !"

Saint Exupéry

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Adativa e Nelson e meu irmão André por todo amor, compreensão e apoio, pois sem eles seria quase impossível alcançar meus objetivos.

Ao Professor Dr. Osvaldir Pereira Taranto que ao longo destes anos de convivência mostrou-se um bom orientador e amigo nos momentos de necessidade, obrigada pelo apoio e pela compreensão.

À Professora Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha pela disponibilidade de ajuda sempre que necessário, e pelo empréstimo de seu laboratório para o desenvolvimento de algumas análises.

A nova família, que ganhei Emília, Daniel, Bianca e Teca por todo carinho e apoio.

Aos amigos do laboratório, e aos amigos que já foram embora da UNICAMP, pois são pessoas que conheci durante esta caminhada e foram muito importantes.

Ao senhor Levi, que foi indispensável durante todo o desenvolvimento experimental. Obrigada pela amizade e dedicação.

À todos os meus amigos da FEQ e também de outras faculdades, que sempre me deram força, seja ajudando no trabalho em si ou através de sua amizade.

Aos amigos que apareceram durante esta caminhada e que são muito importantes, Aline, Manoel, André, José Arthur, Davis, Daniela, Marcel, Marcílio, Mirla, Paulo, Regina, Sebastião, Alexandre, Uiram, Carlo, Eurismar, Jean, João, Vanessa e Marcio.

## RESUMO

O leito fluidizado pulsado rotativo (LFPR) tem sido estudado como uma alternativa para a fluidização de materiais que são difíceis de processar em leito fluidizado convencional (LFC). O LFPR é um leito fluidizado convencional modificado pela adição de um disco rotativo com uma abertura 60° abaixo do distribuidor. O disco rotativo assegura uma alimentação cíclica do gás no leito, fornecendo uma força extra para fluidizar as partículas. Tal característica torna o LFPR atrativo para o uso no processo de secagem, pois realça a transferência de calor e massa. No entanto, a frequência da pulsação do gás no interior do leito depende da frequência de rotação do disco. O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento fluidodinâmico de partículas secas e úmidas em um LFPR e compará-lo com os resultados obtidos em um LFC. As partículas selecionadas para o estudo foram celulose microcristalina e ácido adípico, e os parâmetros estudados foram: a carga da partícula, a frequência de rotação do disco e o teor de umidade inicial. Verificou-se que em frequência da rotação do disco baixa, jorros alternados se formaram, alternado com as regiões de leito fixo. Quando a frequência da rotação do disco era elevada, o sistema todo fluidizou de uma maneira similar a um leito fluidizado convencional. Constatou-se que pode-se empregar o LFPR para processar materiais que apresentam características coesivas em condições inviáveis em LFC. A velocidade mínima de fluidização para o LFPR foi menor do que a obtida para o LFC, o que evidencia as condições mais fáceis de fluidização no primeiro equipamento e sua aplicabilidade ao processo de secagem.

## ABSTRACT

The rotating-pulsed fluidized bed (RPFb) has been studied as an alternative for fluidization of materials that are difficult to operate in the Conventional Fluidized Bed (CFB). The RPFb apparatus is a conventional fluidized bed modified by the addition of a rotating plate with a 60° opening just below the distributor. The rotating plate insures a cyclic feed of the fluidizing gas into the bed, providing an extra force to fluidize the particles. This characteristics becomes the RPFb attractive for use in drying process, enhancing heat and mass transfer. In this way, the frequency of pulsed gas purges in the bottom of the bed depends upon the frequency of the rotating disk. The objective of this present work was to study the fluid dynamic behavior of both dry and moist particulate samples in a RPFb and compare with the results from a CFB. Selected samples were microcrystalline cellulose and adipic acid. The parameters used for the study were: particle load, disc rotation frequency and initial sample moisture content. It was possible to verify that when the disk rotation frequency was low, rotating spouts were formed, alternated with fixed bed regions. When disk rotation frequency was high, the total system was fluidized in a manner similar to a conventional fluidized bed. It was observed the RPFb can be used to material with cohesive characteristics, this conditions is not usual to CFB. The minimum fluidization velocity for the RPFb was lower than that for the CFB, which evidences the easier fluidization conditions in the first apparatus and its applicability to drying process.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b><i>i</i></b>
<b>ABSTRACT</b>	<b><i>iii</i></b>
<b>SUMÁRIO</b>	<b><i>v</i></b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b><i>vii</i></b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b><i>xiii</i></b>
<b>NOMENCLATURA</b>	<b><i>xv</i></b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO</b>	<b><i>1</i></b>
<b>CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b><i>5</i></b>
<b>2.1 - Fluidização</b>	<b><i>5</i></b>
2.1.1 - Regimes de Fluidização	<i>6</i>
2.1.2 - Queda de Pressão em Leito Fluidizado	<i>9</i>
2.1.3 - Velocidade de Mínima Fluidização	<i>11</i>
2.1.4 - Classificação de Geldart	<i>13</i>
<b>2.2 - Leito Fluidizado Pulsado</b>	<b><i>16</i></b>
2.2.1 - Fluidodinâmica do Leito Fluidizado Pulsado	<i>20</i>
2.2.2 - Índice de Fluidização	<i>27</i>
<b>2.3 - Conteúdo de Umidade do Material</b>	<b><i>30</i></b>
2.3.1 - Cinética de Secagem do Leito Fluidizado Pulsado Rotativo	<i>32</i>
<b>CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b><i>35</i></b>
<b>3.1 - Materiais</b>	<b><i>35</i></b>
<b>3.2 - Caracterização das Partículas</b>	<b><i>36</i></b>
3.2.1 - Distribuição Granulométrica	<i>36</i>
3.2.2 - Densidades Real e Aparente	<i>36</i>

<b>3.3 - Procedimento Experimental</b>	<b>37</b>
3.3.1 - Vazão de Ar	41
3.3.2 - Testes Fluidodinâmicos	42
<b><i>CAPÍTULO 4 RESULTADOS</i></b>	<b>45</b>
<b>4.1 - Caracterização das Partículas</b>	<b>45</b>
<b>4.2 - Estudo Fluidodinâmico</b>	<b>48</b>
4.2.1 - Estudo Fluidodinâmico para Partículas de Celulose Microcristalina Secas	48
4.2.2 - Estudo fluidodinâmico para partículas de Celulose Microcristalina úmidas	56
4.2.3 - Estudo fluidodinâmico para partículas de Ácido Adípico secas	60
4.2.4 - Estudo Fluidodinâmico para Partículas de Ácido Adípico Úmido	73
<b>4.3 - Índice de Fluidização</b>	<b>87</b>
4.3.1 - Índice de Fluidização para Processos com Celulose Microcristalina	87
4.3.2 - Índice de Fluidização para Processos com Ácido Adípico	91
<b><i>CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES</i></b>	<b>99</b>
<b><i>CAPÍTULO 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</i></b>	<b>101</b>
<b><i>CAPÍTULO 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i></b>	<b>103</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 - Várias formas de contato de uma batelada de sólidos pelo fluido,</i>	7
<i>Figura 2.2 - Tipos de slugs formados em leitos fluidizados: (a) slugs axiais, (b) slugs de parede e (c) slugs flutuantes</i>	8
<i>Figura 2.3 – Queda de pressão em função da velocidade do ar (COUDERC, 1985)</i>	10
<i>Figura 2.4 - Altura de um leito fluidizado em função da velocidade (COUDERC, 1985).</i>	10
<i>Figura 2.5 - Classificação de Geldart para partículas utilizando ar nas condições ambiente; adaptado de GELDART (1973) (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).</i>	14
<i>Figura 2.6 - Diagrama de um equipamento LFP de quatro câmaras</i>	17
<i>Figura 2.7 - Diagrama de um secador-resfriador LFP (GAWRZYNSKI et al., 1996).</i>	18
<i>Figura 2.8 - Esquema de um secador LFP com pulsação longitudinal</i>	18
<i>Figura 2.9 - Diagrama de um secador LFP com pulsação longitudinal</i>	19
<i>Figura 2.10 - Esquema do leito fluidizado pulsado rotativo</i>	19
<i>Figura 2.11 - Queda de pressão para partículas de polipropileno seco (símbolos fechados), e úmido (símbolos abertos) em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado (GAWRZYNSKI et al., 1999)</i>	21
<i>Figura 2.12 – Queda de pressão em função da velocidade do ar em LFP</i>	22
<i>Figura 2.13 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em LFP (<math>X=70\%b.u.</math>; <math>f=5Hz</math>) “●” <math>H=50mm</math>; “○” <math>H=100mm</math>; “▼” <math>H=150mm</math>; “▽” <math>H=200mm</math></i>	23
<i>Figura 2.14 - Curvas de fluidização para o LFPR, <math>f_{rotação} = 3,33Hz</math>, “●” <math>m/A = 64 kg/m^2</math>;</i>	24
<i>Figura 2.15 - Disco rotativo com duas aberturas.</i>	25
<i>Figura 2.16 - Índice de fluidização de esferas de vidro (ballotini), para velocidade decrescente do ar, <math>f=30Hz</math>, (MARRING et al., 1994).</i>	28
<i>Figura 2.17 - Índice de fluidização para partículas de amido de batata, <math>u</math> decrescente, <math>f=30Hz</math>, (MARRING et al., 1994).</i>	29
<i>Figura 2.18 - Variação do índice de fluidização com a velocidade do gás, ; “○” sem vibração, “ ” com vibração, SANTANA et al. (1999).</i>	29
<i>Figura 2.19 - Estados de umidade não-ligada (STRUMILLO e KUDRA, 1986)</i>	31

<i>Figura 2.20 - Curvas de conteúdo de umidade e de temperatura em função do tempo: (a) <math>X_i \sim 30\%</math>, <math>u = 0,23\text{m/s}</math>, <math>T = 50\text{ }^\circ\text{C}</math>, <math>H_0 = 0,2\text{m}</math>; (b) <math>X_i \sim 35\%</math>, <math>u = 0,21\text{m/s}</math>, <math>T = 70\text{ }^\circ\text{C}</math>, <math>H_0 = 0,1\text{m}</math> (GAWRZYNSKI et al., 1999)</i>	33
<i>Figura 3.1 – (a) Leito Fluidizado Pulsado Rotativo, (b) disco rotativo, (c) sistema experimental.</i>	40
<i>Figura 3.2 - Esquema do sistema experimental do Leito Fluidizado Convencional e Leito Fluidizado Pulsado Rotativo.</i>	40
<i>Figura 4.1 – Distribuição granulométrica das partículas de CMC por análise de peneiras.</i>	46
<i>Figura 4.2 - Distribuição granulométrica das partículas de ácido adípico por análise de peneiras.</i>	47
<i>Figura 4.3 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC seca em leito fluidizado convencional, <math>m=1,2\text{ kg}</math></i>	49
<i>Figura 4.4 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC seca em leito fluidizado pulsado rotativo, <math>f_{\text{rotação}}=5\text{ e }10\text{ Hz}</math>, <math>m=1,2\text{ kg}</math></i>	50
<i>Figura 4.5 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC seca em leito fluidizado convencional, <math>m=0,4\text{ kg}</math>.</i>	51
<i>Figura 4.6 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC seca em leito fluidizado pulsado rotativo, <math>f_{\text{rotação}}=5\text{ e }15\text{ Hz}</math>, <math>m=0,4\text{ kg}</math></i>	52
<i>Figura 4.7 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC seca em leito fluidizado pulsado rotativo, <math>f_{\text{rotação}}=5\text{ e }15\text{ Hz}</math>, <math>m=1,0\text{ kg}</math></i>	52
<i>Figura 4.8 - Queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar para CMC seca em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional</i>	54
<i>Figura 4.9 – Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC em leito fluidizado convencional, <math>m=0,7\text{ kg}</math>, <math>d_p=250\text{-}300\text{ }\mu\text{m}</math> (SILVA, 2003)</i>	54
<i>Figura 4.10 - Curvas de fluidização para o LFPR, <math>f_{rd} = 3,33\text{Hz}</math>, “●” <math>m/A = 64\text{ kg/m}^2</math>;</i>	55
<i>Figura 4.11 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, <math>m=1\text{ kg}</math>, <math>X' = 25\text{ a }26\text{ \% b.u.}</math></i>	57
<i>Figura 4.12 - Queda de pressão em função da velocidade do ar com CMC em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, <math>m=1\text{ kg}</math>, <math>X' = 20\text{ a }22\text{ \% b.u.}</math></i>	58
<i>Figura 4.13 - Queda de pressão em função da velocidade do ar LFPR e LFC</i>	58
<i>Figura 4.14 – Ácido adípico seco, (a) <math>d_p = 75\text{-}250\text{ }\mu\text{m}</math>, (b) <math>d_p = 420\text{-}600\text{ }\mu\text{m}</math>,</i>	61
<i>Figura 4.15 – Queda de pressão em função da velocidade do ar para ácido adípico em leito fluidizado convencional, <math>m=0,6\text{ kg}</math>, <math>d_p=75\text{-}250\text{ }\mu\text{m}</math></i>	62

<i>Figura 4.16 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico, <math>m=0,6</math> kg, <math>d_p=75-250</math> <math>\mu\text{m}</math>, <math>f_{rd}=5</math> Hz.</i>	63
<i>Figura 4.17 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico, <math>m=0,6</math> kg, <math>d_p=75-250</math> <math>\mu\text{m}</math>, <math>f_{rd}=15</math> Hz.</i>	63
<i>Figura 4.18 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado convencional com ácido adípico, <math>m=0,8</math> kg, <math>d_p=420-600</math> <math>\mu\text{m}</math></i>	64
<i>Figura 4.19 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico, <math>m=0,6</math> kg, <math>d_p=420-600</math> <math>\mu\text{m}</math>, <math>f_{rd}=5</math> Hz.</i>	65
<i>Figura 4.20 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico, <math>m=1,0</math> kg, <math>d_p=420-600</math> <math>\mu\text{m}</math>, <math>f_{rd}=15</math>Hz.</i>	65
<i>Figura 4.21 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com ácido adípico, <math>m=0,6</math> kg, <math>d_p=75-250</math> <math>\mu\text{m}</math>.</i>	66
<i>Figura 4.22 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com ácido adípico, <math>m=0,8</math> kg, <math>d_p=75-250</math> <math>\mu\text{m}</math>.</i>	67
<i>Figura 4.23 - Queda de pressão em função da velocidade do ar do ácido 2-hidroxibenzóico seco em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, <math>m=0,4</math> kg, <math>f_{rd}=5</math>Hz (UGRI, 2003)</i>	68
<i>Figura 4.24 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com ácido adípico <math>m=0,6</math> kg, <math>d_p=420-600</math> <math>\mu\text{m}</math></i>	70
<i>Figura 4.25 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com ácido adípico <math>m=0,8</math> kg, <math>d_p=420-600</math> <math>\mu\text{m}</math></i>	70
<i>Figura 4.26 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, com ácido adípico, <math>m=1,0</math> kg, <math>d_p=420-600</math> <math>\mu\text{m}</math></i>	71
<i>Figura 4.27 – Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado convencional com ácido adípico, <math>d_p =75-250</math> <math>\mu\text{m}</math>, <math>m=0,6</math> kg, <math>X' = 2\%</math> b.u.</i>	74
<i>Figura 4.28 – Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado convencional com ácido adípico, <math>d_p =420-600</math> <math>\mu\text{m}</math>, <math>m=0,6</math> kg, <math>X' = 2\%</math> b.u.</i>	74
<i>Figura 4.29 – Ácido adípico úmido, <math>X' = 2\%</math> b.u., <math>f_{rd} = 5</math> Hz, <math>d_p = 75-250</math> <math>\mu\text{m}</math></i>	76
<i>Figura 4.30 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em LFPR com ácido</i>	77
<i>Figura 4.31 - Ácido adípico úmido, <math>X' = 6\%</math> b.u., <math>f_{rd} = 5</math> Hz, <math>d_p = 75-250</math> <math>\mu\text{m}</math></i>	78
<i>Figura 4.32 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico, <math>d_p =75-250</math> <math>\mu\text{m}</math>, <math>X' = 6-7\%</math> b.u.</i>	79

<i>Figura 4.33 – Queda de pressão em função da velocidade do ar para ácido adípico em leito vibrofluidizado, amplitude de 0,01 m, m=0,3 kg, X' = 2,8 % (MORIS, 2002)</i>	80
<i>Figura 4.34 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico, <math>d_p = 420-600 \mu m</math>, X' = 2% b.u.</i>	82
<i>Figura 4.35 - Ácido adípico úmido, X' = 6 % b.u., <math>f_{rd} = 15 \text{ Hz}</math>, <math>d_p = 420-600 \mu m</math></i>	83
<i>Figura 4.36 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico, <math>d_p = 420-600 \mu m</math>, X' = 6-7% b.u.</i>	84
<i>Figura 4.37 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para ácido adípico em leito vibrofluidizado, amplitude de 0,02 m, m=0,3 kg, X' = 2,8 % (MORIS, 2002)</i>	85
<i>Figura 4.38 - Índice de Fluidização em função de <math>u_{ar}</math> decrescente em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com CMC, m=0,4 kg</i>	88
<i>Figura 4.39 - Índice de Fluidização em função de <math>u_{ar}</math> decrescente em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com CMC, m=1,0 kg</i>	89
<i>Figura 4.40 - Índice de Fluidização em função de <math>u_{ar}</math> decrescente em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com CMC, m=1,5 kg</i>	89
<i>Figura 4.41 - Índice de Fluidização em função da <math>u_{ar}</math> decrescente em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, com CMC, X' = 25 a 26 % b.u.</i>	90
<i>Figura 4.42 - Índice de Fluidização em função da <math>u_{ar}</math> decrescente em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, com CMC, X' = 19 % b.u.</i>	91
<i>Figura 4.43 – Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico seco, em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, <math>d_p = 75-250 \mu m</math></i>	92
<i>Figura 4.44 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico seco, em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, <math>d_p = 75-250 \mu m</math></i>	92
<i>Figura 4.45 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico seco, em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, <math>d_p = 420-600 \mu m</math></i>	93
<i>Figura 4.46 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico seco, em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, <math>d_p = 420-600 \mu m</math></i>	94
<i>Figura 4.47 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico seco, em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, <math>d_p = 420-600 \mu m</math></i>	94
<i>Figura 4.48 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico, em leito fluidizado pulsado rotativo, <math>d_p = 75-250 \mu m</math>, X' = 2-6 % b.u.</i>	95
<i>Figura 4.49 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico,</i>	96

*Figura 4.50 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico, \_\_\_\_\_ 97*

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.1 – Parâmetros e respostas utilizados nos testes fluidodinâmicos.</i>	42
<i>Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados para a CMC.</i>	43
<i>Tabela 3.3 - Parâmetros utilizados para o Ácido adípico.</i>	44
<i>Tabela 4.1 - Caracterização física da celulose microcristalina</i>	46
<i>Tabela 4.2 - Caracterização física do ácido adípico</i>	48
<i>Tabela 4.3 – Valores de velocidade de mínima fluidização CMC seca</i>	55
<i>Tabela 4.4 – Valores de velocidade de mínima fluidização celulose microcristalina úmida.</i>	59
<i>Tabela 4.5 - Valores de velocidade de mínima fluidização do ácido adípico, <math>d_p=75-250 \mu m</math></i>	68
<i>Tabela 4.6 - Valores de queda de pressão na condição de mínima fluidização do ácido adípico seco, <math>d_p=75-250 \mu m</math></i>	69
<i>Tabela 4.7 - Valores de velocidade de mínima fluidização do ácido adípico, <math>d_p=420-600 \mu m</math></i>	71
<i>Tabela 4.8 - Valores de queda de pressão na condição de mínima fluidização do ácido adípico seco, <math>d_p=420-600 \mu m</math></i>	72
<i>Tabela 4.9 - Valores de velocidade de mínima fluidização do ácido adípico úmido,</i>	80
<i>Tabela 4.10 - Valores de queda de pressão na condição de mínima fluidização do ácido adípico úmido, <math>d_p=75-250 \mu m</math></i>	81
<i>Tabela 4.11- Valores de velocidade de mínima fluidização do ácido adípico úmido,</i>	86
<i>Tabela 4.12 - Valores de queda de pressão na condição de mínima fluidização do ácido adípico úmido, <math>d_p=420-600 \mu m</math></i>	86

## NOMENCLATURA

### Letras Latinas

$a_1$	área do tubo [ $\text{cm}^2$ ]
$a_2$	área do orifício [ $\text{cm}^2$ ]
$A$	área da seção transversal [ $\text{cm}^2$ ]
$b$	pressão barométrica local [mmHg]
$d$	diâmetro [ $\mu\text{m}$ ]
$f$	frequência [Hz]
$FI$	índice de fluidização [-]
$g$	aceleração da gravidade [ $\text{m/s}^2$ ]
$H$	altura do leito [m]
$\Delta h_p$	queda de pressão na placa de orifício [ $\text{cmH}_2\text{O}$ ]
$k, k_1$	constantes [-]
$m$	massa de sólidos [kg]
$m_A$	massa de água no material [kg]
$m_S$	massa de material seco [kg]
$P$	pressão [Pa]
$P_1$	pressão estática na linha de ar [ $\text{cmH}_2\text{O}$ ]

$\Delta P$	queda de pressão no leito [Pa]
Q	vazão mássica do ar [kg/min]
R	constante dos gases ideais [J/mol.K]
T	temperatura do gás [°C]
u	velocidade do fluido [m/s]
V	volume [cm <sup>3</sup> ]
X	teor de umidade do sólido
X'	teor de umidade em base úmida

### **Letras Gregas**

$\alpha$	coeficiente de descarga [-]
$\epsilon$	porosidade do leito; fator de compressibilidade [-]
$\mu$	viscosidade do fluido [kg/m.s]
$\rho$	densidade do fluido [g/cm <sup>3</sup> ]

### **Subscritos**

bs	base seca
bu	base úmida
cr	crítico
e	equilíbrio
ep	excluindo os poros

mb	mínimo borbulhamento
mf	mínima fluidização
mfp	mínima fluidização pulsada
p	partícula
rd	rotação do disco
s	sólido
T	total

### **Abreviações**

CMC	celulose microcristalina
FI	índice de fluidização
LFC	leito fluidizado convencional
LFP	leito fluidizado pulsado
LFPR	leito fluidizado pulsado rotativo

### **Números Adimensionais**

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

Número de Reynolds na mínima fluidização:  $Re_{mf} = \frac{u_{mf} \rho d_p}{\mu}$

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A fluidização é um processo que consiste na passagem vertical e ascendente de um fluido (gás/líquido) por um leito de partículas provocando a movimentação destas, a partir de um certo nível de velocidade do fluido, quando a fluidização se inicia, a força de atrito entre as partículas e o fluido equivale ao peso das partículas e a queda de pressão permanece aproximadamente constante. Nestas condições o sistema se assemelha a um fluido, por isto o nome fluidizado (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). O processo de fluidização é empregado em tecnologias como adsorção de gases, reações gás-sólido e secagem por favorecer a interação sólido-fluido proporcionando altas taxas de transferências de calor e massa. A fluidização pode ser empregada no processamento de diversos materiais granulares, como por exemplo: areia, açúcares, produtos farmacêuticos, alimentícios e químicos.

A variedade de configurações de leitos e materiais particulados torna necessária a obtenção de informações das características de manuseio e processamento, principalmente de materiais farmacêuticos e alimentícios. Algumas configurações de leito e partículas podem apresentar fluidização agregativa, que implica numa dificuldade para fluidizar partículas finas e úmidas e não homogeneidade do processo e produto. A fluidização se torna difícil quando os materiais apresentam grande força de coesão entre as partículas, como é o caso de materiais pastosos, aglomerantes e friáveis. Tais restrições influenciam na estocagem, manuseio, processamento do material e na qualidade do processo e do produto.

A necessidade de obter fluidização de qualidade e processos que maximizem a transferência de *momentum*, calor e massa e que minimizem o consumo de energia, levou pesquisadores a utilizarem diferentes técnicas que possibilitem o tratamento de materiais aglomerantes, uma distribuição uniforme do material dentro do leito, economia energética e

evite a formação de bolhas e canais preferenciais. Algumas destas técnicas são: fluidização com agitação mecânica, vibração mecânica, pulsação do fluido, etc.

Trabalhos que aplicam a pulsação do fluido no leito de partículas mostram que este equipamento está sendo utilizado como uma alternativa para fluidizar materiais de difícil fluidização em leito convencional. Alguns estudos da literatura mostram que o leito fluidizado pulsado (LFP) reduz em até 50% o consumo de energia (KUDRA e MUJUMDAR 1995; JESOWSKA, 1993), gerando novas perspectivas para a secagem de diversos materiais particulados, tais como materiais com alto teor de umidade (GAWRZYNSKI *et al.*, 1996; DJURKOVK, 1998), particulados finos (GAWRZYNSKI *et al.*, 1999) e particulados que apresentam características coesivas (AMBROSIO-UGRI e TARANTO, 2002).

Como existem poucos trabalhos envolvendo o leito fluidizado pulsado rotativo (LFPR), para análise do comportamento fluidodinâmico e dar continuidade aos estudos já iniciados nesta área junto ao Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos, foi proposto nesta dissertação de mestrado trabalhar com sólidos pertencentes aos grupos A e B da classificação de Geldart (GELDART, 1986), e que apresentam características coesivas quando úmido. Escolheu-se a celulose microcristalina e o ácido adípico para a análise fluidodinâmica proposta.

A celulose microcristalina é um produto cadastrado pelo FDA (Food and Drug Administration – USA), também fabricada no Brasil e muito utilizada na indústria farmacêutica. Sobre suas características físicas, pode-se citar que são sólidos finos, branco e inodoro, insolúvel em água, mas parcialmente solúvel em álcalis.

O ácido adípico também conhecido como ácido hexanodióico ou ácido 1,4-butanodicarboxílico, é muito utilizado nas indústrias química, farmacêutica e alimentícia, possui cristais incolores, é inodoro e solúvel em metanol, etanol e água.

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento fluidodinâmico de um leito fluidizado pulsado rotativo com partículas secas e úmidas, comparando-os com o de um leito fluidizado convencional.

Para a realização deste trabalho foram efetuadas as seguintes etapas:

- Caracterização física das partículas, quanto a distribuição granulométrica, porosidade e densidade;

- Realização de testes preliminares para estabelecer condições operacionais que foram mantidas durante o ensaio, tais como: frequência de rotação do disco, quantidade de material e teor de umidade;

- Realização de ensaios de caracterização fluidodinâmica em um leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, com partículas diferentes (celulose microcristalina e ácido adípico);

- Comparação dos aspectos de fluidização de partículas secas e úmidas para os dois materiais;

- Verificação se o leito fluidizado pulsado rotativo possibilita o processamento adequado de sólidos de difícil fluidização convencional;

- Verificação da influência do disco rotativo e da frequência deste sobre a queda de pressão e velocidade do ar no leito.

Nesta Dissertação de Mestrado, o trabalho realizado está apresentado da seguinte forma:

No Capítulo 2, uma revisão bibliográfica detalhada acerca dos tópicos de interesse desta pesquisa está apresentada, com especial ênfase em leito fluidizado pulsado.

Os materiais e os métodos experimentais utilizados para a obtenção dos resultados experimentais estão descritos no Capítulo 3.

A análise e discussão dos resultados experimentais obtidos para o estudo fluidodinâmico do leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com celulose microcristalina e do ácido adípico, estão apresentados no Capítulo 4.

No Capítulo 5 estão apresentadas as conclusões obtidas com base nos resultados experimentais desta pesquisa.

Em seguida, no Capítulo 6 estão apresentadas as sugestões para trabalhos futuros e a bibliografia consultada no capítulo 7.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 - Fluidização

A fluidização é uma operação unitária que envolve a interação sólido-fluido. Este fenômeno pode ser observado quando um leito de sólidos é submetido a passagem vertical e ascendente de um fluido distribuído uniformemente por uma placa perfurada que sustenta o leito. Assim que se inicia a fluidização a força de atrito entre as partículas e o fluido equivale ao peso das partículas, a queda de pressão no leito torna-se aproximadamente constante e o movimento do sólido dentro do leito é similar a um fluido. Durante o processo de fluidização pode-se observar diferentes regimes, os quais dependem de fatores como: estado físico do fluido, características do sólido, densidade do fluido e da partícula, distribuição granulométrica do sólido e velocidade do fluido.

Os leitos fluidizados são utilizados em processos catalíticos, indústria de petróleo, reações gás-sólido, secagem de sólidos e adsorção de gases. Apresentam como vantagem proporcionar altas transferências de calor, massa e *momentum* entre o fluido e as partículas. Uma desvantagem é a não uniformidade do contato partícula-fluido no sistema gás-sólido, onde a maior parte do gás passa através do leito na forma de bolhas, ocorrendo o contato direto somente em uma pequena quantidade de sólidos.

### 2.1.1 - Regimes de Fluidização

Segundo KUNII e LEVENSPIEL (1991) e MacCABE (1993), pode-se descrever os regimes de fluidização (Figura 2.1), considerando-se inicialmente um leito parcialmente cheio de sólidos finos e escoamento de fluido uniforme. Ao passar um fluido (gás/liquido), pelo leito a baixa velocidade, este permeia os poros do leito das partículas, que não se movem. A queda de pressão aumenta e a altura do leito permanece constante, caracterizando o comportamento de leito fixo (Figura 2.1, a). Havendo um aumento contínuo da velocidade do fluido, a queda de pressão e o arraste individual das partículas aumentam iniciando o movimento destas, caracterizando um fluido em suspensão. O regime passa de leito fixo para leito expandido.

No ponto em que as partículas começam a ser ejetadas na superfície do leito encontra-se a velocidade de mínima fluidização ( $u_{mf}$ ) (Figura 2.1, b). Neste momento o leito é considerado como em fluidização incipiente ou em mínima fluidização. Havendo aumento da velocidade da fluidização a altura do leito cresce de acordo com a velocidade, porém a queda de pressão permanece constante.

Quando o fluido é um líquido (Figura 2.1, c), um aumento na velocidade acima da velocidade de mínima fluidização gera uma fluidização homogênea ou particulada. Caracterizada pela ampla uniformidade da expansão no leito e por possuir altas velocidades. Neste tipo de fluidização o movimento das partículas no fluido é mais distante e independente, tornando-se mais intenso com o aumento da velocidade.

A fluidização de sólidos acima da velocidade de mínima fluidização, tendo um gás como fluido é chamada de agregativa ou fluidização borbulhante (Figura 2.1, d). Isto se caracteriza pela instabilidade do leito, sendo possível observar a formação de bolhas e canais preferenciais.

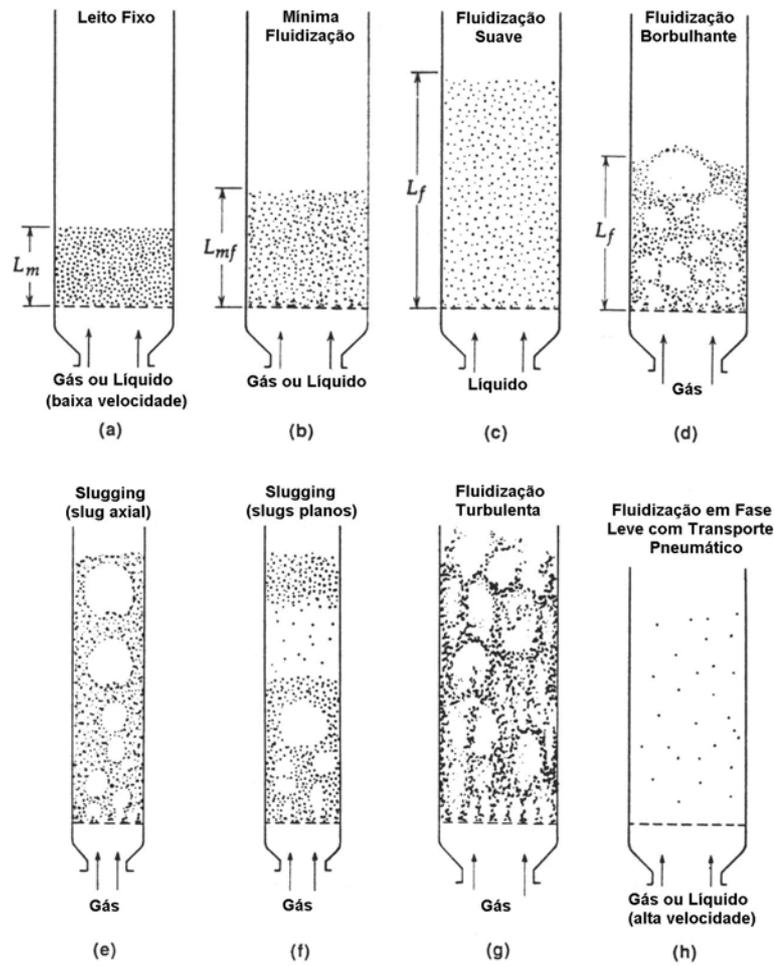


Figura 2.1 - Várias formas de contato de uma batelada de sólidos pelo fluido, (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Dependendo da distribuição de tamanho de partícula, da velocidade superficial e altura do leito, o gás passa quase que totalmente como bolhas. Somente uma pequena fração escoa entre as partículas que se movem e são sustentadas pelo fluido, de modo que divide-se o regime de fluidização em duas fases: a fase bolha compreendida de vazios de gás sem partículas e a fase particulada, ou seja, as partículas fluidizadas pelo gás.

As bolhas apresentam formas irregulares e tendem a crescer e se desenvolver com a ascensão do leito. Podem ocupar toda a seção percorrendo o leito sucessivamente, sendo separadas por *slugs* de sólidos. Este fenômeno é conhecido como *slugging*, sendo geralmente indesejado, devido às flutuações de pressão no leito, aumentando as bolhas.

Os *slugs* (Figura 2.2) são partículas separadas e conduzidas por bolhas de gás de todo o leito de partículas durante a fluidização. Eles podem se apresentar de três formas, como *slugs* axiais (Figura 2.2, a), em que as partículas são finas e deslizam suavemente pelo leito em volta das elevações das bolhas grandes. *Slugs* flutuantes (Figura 2.2, c) nos quais as partículas são maiores e a porção de sólidos acima das bolhas é empurrada para cima como um êmbolo, e as partículas caem para o *slug* de baixo e conforme vão subindo as porções de sólidos desaparecem e novos *slugs* se formam dando origem a um movimento oscilatório contínuo. No caso do *slug* de parede (Figura 2.2, b), o êmbolo adere e desliza ascendentemente pela parede do leito (CLIFT e GRACE, 1985; KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

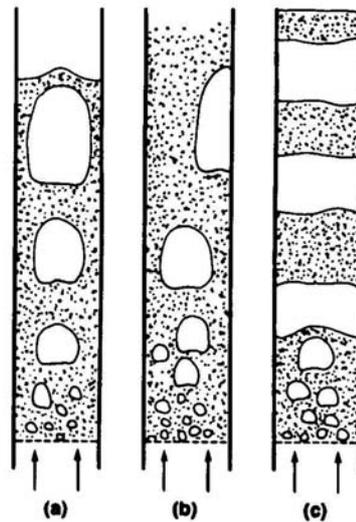


Figura 2.2 - Tipos de *slugs* formados em leitos fluidizados: (a) *slugs* axiais, (b) *slugs* de parede e (c) *slugs* flutuantes

A uma alta velocidade superficial do gás ocorre a fluidização turbulenta (Figura 2.1, g) caracterizada por apresentar uma suspensão firme e pelo movimento turbulento dos sólidos e bolhas de gás com diferentes formas e tamanhos, não sendo possível identificar a superfície do leito.

Continuando o aumento da velocidade do fluido, as partículas alimentadas são arrastadas, obtendo assim um leito diluído, como transporte pneumático (Figura 2.1, h). Quando as partículas são recuperadas por ciclones, retornando ao leito, este sistema é chamado de leito fluidizado circulante.

De acordo com MacCABE (1993) a generalização de que para líquidos a fluidização é particulada e para sólidos ocorre fluidização borbulhante não é completamente válida. A diferença de densidade é um parâmetro importante, pois muitos sólidos podem exibir fluidização borbulhante com água. Gases, a pressões elevadas fornecem uma fluidização particulada de sólidos finos, e sólidos de densidade média exibem fluidização particulada para um limite de velocidade e fluidização borbulhante a elevadas velocidades.

### **2.1.2 - Queda de Pressão em Leito Fluidizado**

A relação entre a queda de pressão no leito e a velocidade do fluido, denominada de curva fluidodinâmica, é o método experimental empregado para obtenção da velocidade de mínima fluidização para qualquer material.

Segundo COUDERC (1985), o comportamento apresentado pelas Figuras 2.3 e 2.4 pode ser descrito por regiões bem definidas. A região AB corresponde a um leito fixo, onde as partículas se encontram no fundo da coluna. A queda de pressão aumenta à medida que aumenta-se a velocidade. No ponto B começa a fluidização, a superfície superior do leito torna-se plana e horizontal e as partículas dentro do leito podem se mover lentamente e se reestruturar. Com o aumento da velocidade, a queda de pressão estabiliza-se e permanece constante, porém a altura do leito aumenta (Figura 2.4). Este é o fenômeno da expansão característico de leitos fluidizados.

Ao diminuir a velocidade a partir do ponto C da Figura 2.4, observa-se uma nova curva CDE. A diferença das curvas resulta das variações da porosidade do leito. As condições de fluidização incipiente, e/ou as condições mínimas de fluidização, são definidas na transição do ponto D entre os estados fixo e fluidizado, observados no decréscimo da velocidade do escoamento.

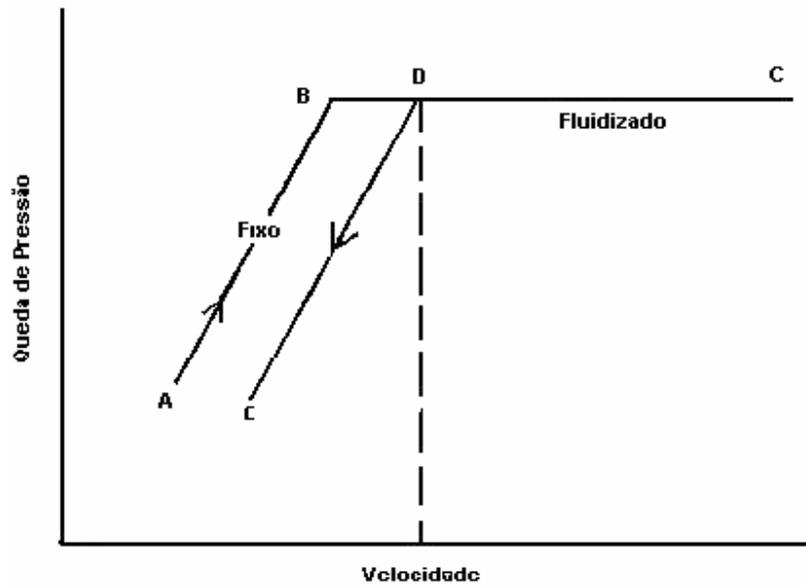


Figura 2.3 – Queda de pressão em função da velocidade do ar (COUDERC, 1985)

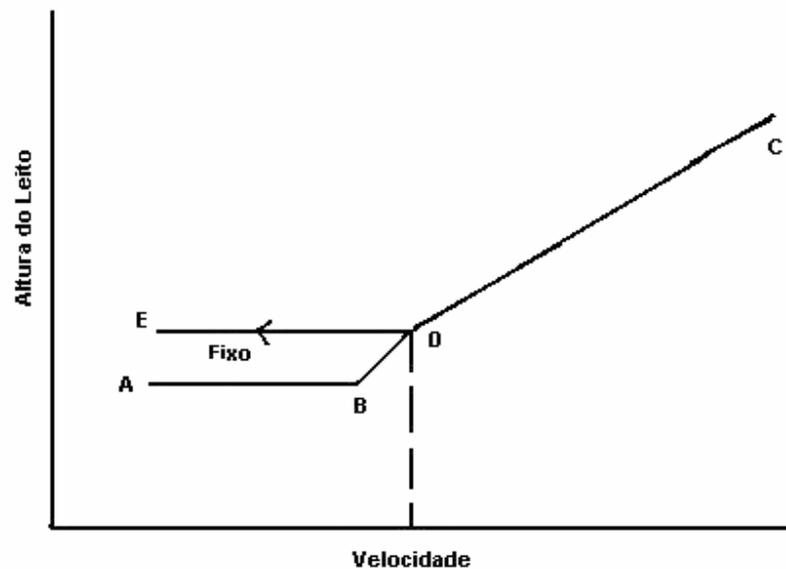


Figura 2.4 - Altura de um leito fluidizado em função da velocidade (COUDERC, 1985).

Segundo RICHARDSON (1971), o comportamento descrito acima é idealizado sendo dificilmente encontrado na prática, e variações a partir do comportamento ideal apresentam boa indicação dos fatores que influenciam o desempenho do leito. As principais variações a partir deste comportamento podem ser devido a:

- expansão do leito quando a velocidade se aproxima da velocidade de mínima fluidização, antes que a queda de pressão se iguale ao peso do leito de partículas;
- tendência das partículas se agregarem;
- formação de canais preferenciais;
- não uniformidade da estrutura do leito resultando em regiões de leito fixo e fluidizado dentro do leito;
- formação de canais preferenciais induzidos pelo distribuidor de fluido.

Raramente o comportamento ideal é obtido e a maioria das variações são atribuídas às forças inter-partículas e à má distribuição do fluido no leito (RICHARDSON, 1971).

### 2.1.3 - Velocidade de Mínima Fluidização

A velocidade de mínima fluidização corresponde ao ponto de interseção entre a velocidade superficial do gás e a queda de pressão, quando esta se iguala ao peso do leito de partículas (RICHARDSON, 1971). Neste momento, registra-se o início da fluidização. Este parâmetro torna-se importante para cálculos de projetos em engenharia, sendo obtido experimentalmente ou por correlações empíricas existentes na literatura.

Segundo KUNII e LEVENSPIEL (1991), um método para se obter a velocidade de mínima fluidização é por meio da composição da queda de pressão do leito ao igualar-se ao peso aparente do leito por unidade de área da seção transversal:

$$\Delta P = g(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho)H \quad (2.1)$$

Na mínima fluidização:  $\varepsilon = \varepsilon_{mf}$

E rearranjando a equação de Ergun (2.2), para queda de pressão em leito empacotado, tem-se:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150u\mu}{\phi_s^2 d_p^2} \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} + \frac{1,75\rho u^2(1-\epsilon)}{\phi_s d_p \epsilon^3} \quad (2.2)$$

Adaptando a equação (2.2) e (2.1) para o ponto de mínima fluidização, tem-se uma equação quadrática para  $u_{mf}$ :

$$\frac{1,75}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} Re_{p,mf}^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi_s} Re_{p,mf} = Ar \quad (2.3)$$

sendo  $Re_{p,mf}$  o número de Reynolds da partícula na mínima fluidização.

Quando as partículas são muito pequenas, a equação (2.3) é simplificada para (KUNII e LEVENSPIEL, 1991):

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho) g}{150\mu} \frac{\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2}{1-\epsilon_{mf}}, \quad Re_{p,mf} < 20 \quad (2.4)$$

Para partículas muito grandes, tem-se

$$u_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho) g}{1,75\rho} \epsilon_{mf}^3 \phi_s, \quad Re_{p,mf} > 1000 \quad (2.5)$$

Outra equação bastante utilizada é a equação de Wen e Yu (KUNII e LEVENSPIEL, 1991), mostrada a seguir:

$$u_{mf} = \left[ (33,7^2 + 0,0408 Ar)^{1/2} - 33,7 \right] \frac{\mu}{\rho d_p} \quad (2.6)$$

$$\text{para } Re < 20: \quad u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho) g}{1650 \mu} \quad (2.7)$$

$$\text{para } Re > 1000: \quad u_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho) g}{24,5 \rho} \quad (2.8)$$

#### 2.1.4 - Classificação de Geldart

O comportamento de sistemas fluidizados com gás depende das propriedades das partículas e do gás, como: densidade, tamanho de partícula, conteúdo de finos, coesão das partículas, etc. Para sólidos secos de densidade e tamanho médio de partícula conhecidos, a classificação de GELDART (1973) permite uma estimativa do tipo de fluidização esperada.

Para que não fosse necessário supor que conclusões de dados extraídos de um pó sejam aplicáveis a outros pós com propriedades diferentes, GELDART (1973) e BAEYENS e GELDART (1973) *apud* CLIFT (1985), sugeriram a classificação de partículas contínuas (ou pós) em quatro grupos diferentes, caracterizados pela diferença da densidade ( $\rho_s - \rho$ ), e pelo tamanho de partícula ( $d_p$ ). As propriedades observadas com um pó podem, então, ser prolongadas sem risco particular a todos os pós no mesmo grupo (CLIFT, 1985).

Para ilustrar esta classificação, a Figura 2.5 apresenta um diagrama válido para a fluidização tendo como fluido ar em condições ambiente. De acordo com KUNII e LEVENSPIEL, (1991) os quatro grupos considerados por Geldart podem ser apresentados como segue:

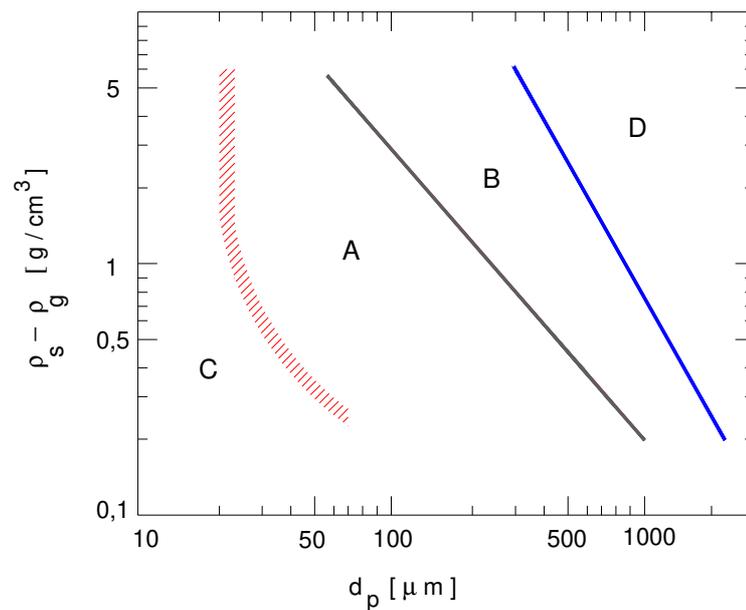


Figura 2.5 - Classificação de Geldart para partículas utilizando ar nas condições ambiente; adaptado de GELDART (1973) (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

**Grupo A** – Materiais que tenham tamanho de partículas entre médio e pequeno, ou baixa densidade de partícula ( $< \cong 1,4 \text{ g/cm}^3$ ). Estes sólidos fluidizam facilmente, com fluidização particulada a velocidades do gás baixas e apresentando pequenas bolhas a altas velocidades do gás.

Quando estes sólidos são fluidizados, o leito expande-se antes do aparecimento de bolhas. Em velocidades do gás maiores que a velocidade de formação de bolhas, o leito muda para o modo borbulhante, apresentando o seguinte comportamento: bolhas de gás elevam-se mais rapidamente que o fluxo de gás, percolando pela emulsão. As bolhas de gás aparecem como brechas e coalescem freqüentemente com a sua elevação através do leito; uma má circulação de sólidos ocorre mesmo quando apenas poucas bolhas estão presentes. Esta circulação é um pouco melhor em leitos grandes; quando as bolhas crescem até o diâmetro do leito. Elas tornam-se *slugs* axiais, embora não seja muito comum este tipo de regime de fluidização. Os finos atuam como lubrificante tornando mais fácil a fluidização do leito.

**Grupo B** – As partículas de tamanho entre  $40 \mu\text{m}$  e  $500 \mu\text{m}$ , e densidade entre  $1,4 \text{ g/cm}^3$  e  $4 \text{ g/cm}^3$ . Fazem parte deste grupo, sólidos que apresentam boa fluidização, com ocorrência de borbulhamento intenso.

Em leitos de sólidos desse tipo, as bolhas formam-se logo que a velocidade do gás excede a velocidade de mínima fluidização. Em altas velocidades de gás o leito comporta-se como:

- bolhas pequenas que ao se formarem no distribuidor, crescem e coalescem conforme vão subindo pelo leito;
- o tamanho das bolhas aumenta de maneira aproximadamente linear com a distância acima do distribuidor e com o excesso de velocidade do gás;
- borbulhamento vigoroso estimula a circulação violenta dos sólidos.

**Grupo C** – Pertence a este grupo partículas coesivas e muito finas. Normalmente a fluidização é extremamente difícil para estes sólidos, devido às forças interpartículas serem maiores que a resultante da ação do gás.

Em leitos de pequeno diâmetro, partículas deste grupo tendem a elevar-se como um bloco de sólidos, enquanto que em leitos de grande diâmetro, canais preferenciais formam-se do distribuidor à superfície do leito, não havendo fluidização dos sólidos.

**Grupo D** – Jorráveis ou partículas grandes e/ou densas. Leitos profundos destes sólidos são difíceis de fluidizar. Eles se comportam de maneira imprevisível, com grandes explosões de bolhas e canais preferenciais ou comportamento de jorro se a distribuição do gás for muito desigual. Fluidização com sólidos D de Geldart apresenta as seguintes características:

- bolhas coalescem rapidamente e crescem de tamanho, subindo mais lentamente que o fluxo de gás;
- fase densa com baixa porosidade;
- quando o tamanho das bolhas aproxima-se do diâmetro do leito, são observados *slugs* flutuantes;
- estes sólidos jorram facilmente, ao passo que sólidos de Geldart B não.

## 2.2 - Leito Fluidizado Pulsado

Embora amplamente utilizado na indústria, leitos fluidizados possuem aplicações limitadas, devido às propriedades da partícula, altura mínima que proporcione fluidização uniforme, ocorrência de fluidização agregativa, dentre outras. Segundo KUDRA (2002), estas limitações podem ser minimizadas e até mesmo eliminadas quando utilizado um leito fluidizado pulsado (LFP), devido ao fluxo periódico do gás no leito fluidizado que este equipamento proporciona.

Por apresentar novas perspectivas a diversos materiais, o secador leito fluidizado pulsado tem sido utilizado para a secagem de grãos, sementes, pós e materiais com alto conteúdo de umidade, tais como: açúcar granulado (GAWRZYNSKI *et al.*, 1996), sal marinho (DJURKOV, 1998 e 2001), produtos farmacêuticos granulares (cálcio glucônico, acenol) (BLACHA-JURKIEWIXZ *et al.*, 1987; GAWRZYNSKI *et al.*, 1989), polipropileno reciclado em pó (GAWRZYNSKI *et al.*, 1999), e materiais biológicos (ELENKOV e DJURKOV, 1992).

O leito fluidizado pulsado é uma modificação do leito fluidizado convencional (LFC), e possui como princípio de funcionamento o deslocamento periódico do fluxo de gás, sendo o distribuidor de gás, parte integrante do leito, (BLACHA-JURKIEWIXZ *et al.*, 1987; GAWRZYNSKI *et al.*, 1989; KUDRA e MUJUMDAR, 1995).

No leito fluidizado pulsado o ar é direcionado a uma vazão constante para o interior do leito por um distribuidor, que assegura o deslocamento cíclico do gás na câmara plena. O gás escoar pelo prato perfurado, localizado acima da câmara suportando o leito de partículas, e entre elas causando sua pulsação (BLACHA-JURKIEWICZ *et al.*, 1987; GAWRZYNSKI *et al.*, 1989). Tratando-se do projeto de um leito fluidizado pulsado, todo o leito ou seções podem ser fluidizados, mas as pulsações são transmitidas somente para o leito e não para a construção do secador (GAWRZYNSKI e GLASER, 1996).

A pulsação da corrente de gás fornece certas vantagens em relação ao leito fluidizado convencional, tais como: economia ( $\approx 50\%$ ) de energia (KUDRA e MUJUMDAR 1995; JESOWSKA, 1993), mistura intensa de materiais com alto teor de umidade (GAWRZYNSKI *et al.*, 1996).

Os LFP podem apresentar-se de diferentes formas e tipos, trabalhando de modo contínuo ou em batelada. Exemplos deste tipo de equipamento são:

a) Secador Leito Fluidizado Pulsado com quatro câmaras (Figura 2.6) - o ar quente escoia por um distribuidor de válvula giratória que interrompe o fluxo de ar e direciona este para as diferentes seções da câmara, abaixo da grade de suporte (prato perfurado). O segmento do leito fluidizado torna-se quase estagnado quando o ar é dirigido à câmara seguinte. Na prática, o leito inteiro é razoavelmente fluidizado, com fluidização vigorosa na zona ativa (KUDRA e MUJUMDAR, 1995).

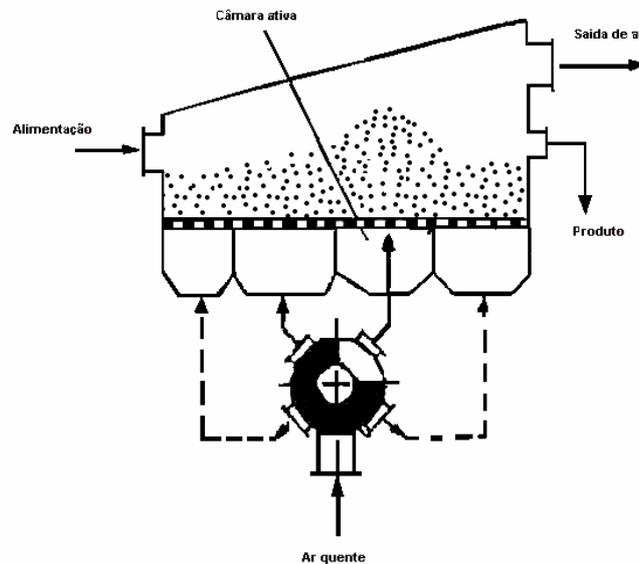


Figura 2.6 - Diagrama de um equipamento LFP de quatro câmaras (KUDRA e MUJUMDAR, 1995).

b) Secador-resfriador Leito Fluidizado Pulsado (Figura 2.7) – pode ser dividido em duas partes: secador (ar quente) e resfriador (ar a temperatura ambiente), ambos com deslocamento periódico do fluxo de ar. O material úmido é inserido no equipamento, passa inicialmente por uma zona de pré-secagem, e continuamente pelo secador e pelo resfriador.

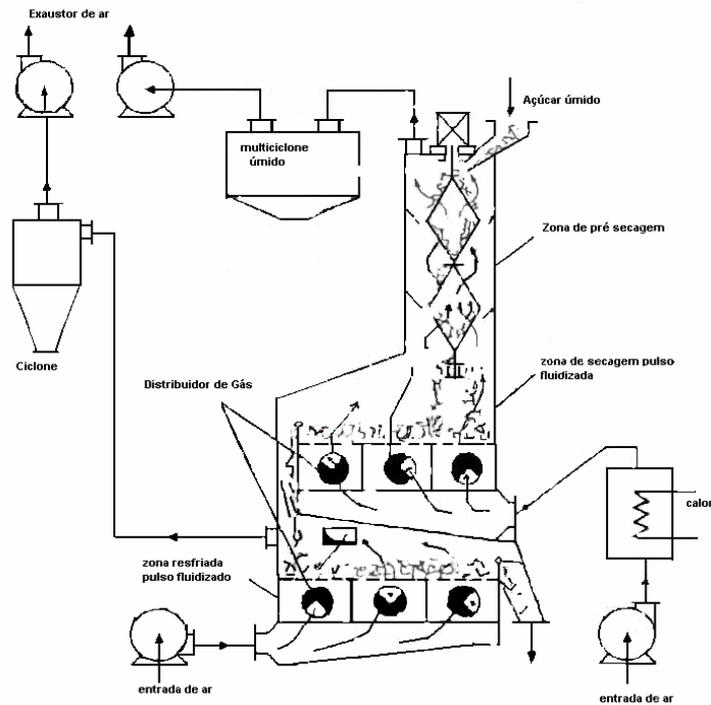


Figura 2.7 - Diagrama de um secador-resfriador LFP (GAWRZYNSKI *et al.*, 1996).

c) Secador Leito Fluidizado Pulsado com pulsação longitudinal (Figuras 2.8 e 2.9) - caracterizado pelo sentido de deslocamento da onda de pulso “D” – perpendicular ao fluxo do leito fluidizado pulsado “C” – ao longo da linha central da câmara de secagem. O ar quente passa pela grade perfurada entrando em contato com o material, dando forma ao sistema leito fluidizado pulsado com pulsação longitudinal (GAWRZYNSKI e PIECZABA, 2000).

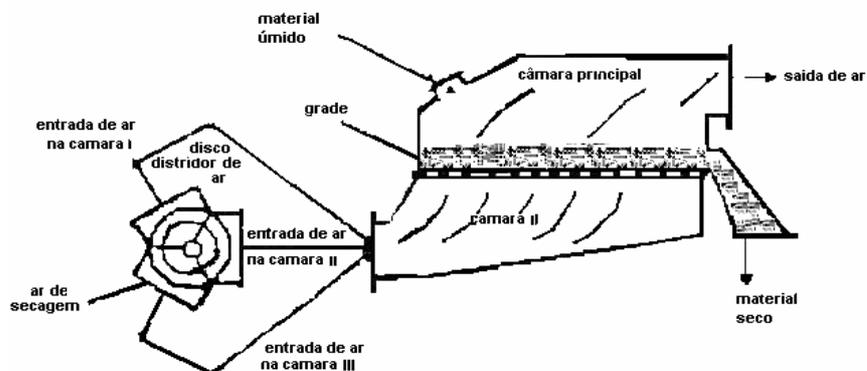


Figura 2.8 - Esquema de um secador LFP com pulsação longitudinal (GAWRZYNSKI e PIECZABA, 2000).

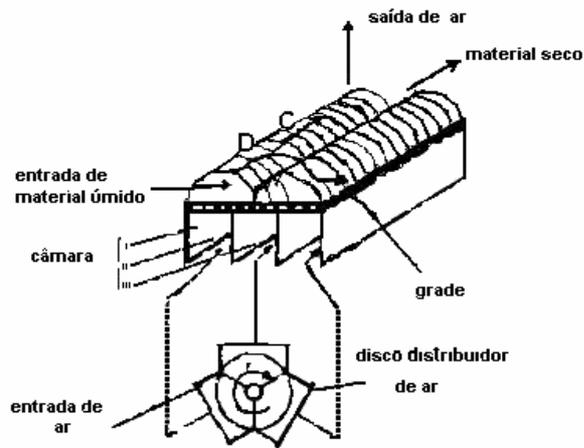


Figura 2.9 - Diagrama de um secador LFP com pulsação longitudinal (GAWRZYNSKI e PIECZABA, 2000).

d) Leito fluidizado pulsado rotativo (Figura 2.10) - as vibrações são fornecidas pela ação do fluxo pulsado da corrente de gás. Neste equipamento, o distribuidor de gás está dividido em dois elementos estruturais: o prato perfurado e o disco rotativo. O prato perfurado serve de suporte para o leito de partículas, e ambos distribuem o gás, sendo que o disco rotativo possibilita a distribuição periódica em toda a área da seção do prato perfurado. A frequência do pulso de gás que age sob o leito, depende do número de orifícios e da rotação do disco (ELENKOV e DJURKOV, 1992).

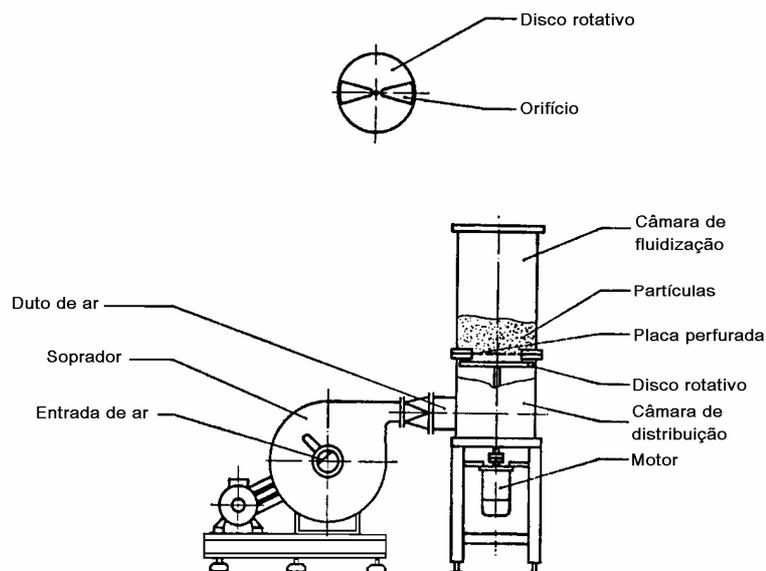


Figura 2.10 - Esquema do leito fluidizado pulsado rotativo (ELENKOV e DJURKOV, 1992).

### 2.2.1 - Fluidodinâmica do Leito Fluidizado Pulsado

Segundo KUDRA e MUJUMDAR (1995) e GAWRZYNSKI e GLASER (1996), os principais parâmetros de operação de um secador leito fluidizado pulsado (LFP) são: altura do leito, velocidade do gás, queda de pressão e frequência de pulso do gás.

Estudos fluidodinâmicos e de secagem revelam que o leito fluidizado pulsado com deslocamento periódico do fluxo de gás oferece:

- boa fluidização de partículas grandes e anisotrópicas uniformes (KUDRA e MUJUMDAR, 1995) e de partículas finas e coesivas (GAWRZYNSKI *et al.*, 1999, UGRI, 2003);
- baixa queda de pressão e velocidade de mínima fluidização, em relação ao leito fluidizado convencional (KUDRA e MUJUMDAR, 1995; BLACHA-JURKIEWICZ *et al.*, 1987; GAWRZYNSKI *et al.*, 1989);
- ausência de canais preferenciais, melhor mistura da partícula (UGRI, 2003).

BLACHA-JURKIEWICZ *et al.* (1987) e GAWRZYNSKI *et al.* (1989) ao estudar a fluidodinâmica de um leito fluidizado pulsado, observaram que os valores da queda de pressão crescem com o aumento da velocidade do gás, ao passo que GAWRZYNSKI *et al.* (1999), constatou em seus estudos que a queda de pressão no leito pulso fluidizado é próxima a de um leito fluidizado convencional e sua ascensão é proporcional a altura do leito estático na região em que a velocidade do ar está entre a velocidade em que inicia o movimento das partículas e a velocidade de mínimo borbulhamento. Entretanto, os autores constataram que a queda de pressão depende principalmente da altura do leito estático, velocidade do gás, diâmetro da partícula, frequência de pulsação do gás e conteúdo de umidade do material.

Segundo KUDRA (2002), a fluidodinâmica do leito fluidizado pulsado é similar a de um leito fluidizado convencional, para a mesma velocidade do gás e área de seção transversal do prato perfurado. A vantagem deste equipamento é possibilitar a fluidização de uma ampla faixa de materiais particulados, principalmente materiais de difícil fluidização. E em relação ao leito vibro-fluidizado, devido ao fato da vibração não ser transmitida para a estrutura do equipamento.

GAWRZYNSKI *et al.* (1999) realizaram experimentos em secador leito fluidizado pulsado de três câmaras, com partículas de polipropileno recicladas (0.08 a 1.1 mm) secas e úmidas com a umidade variando de 26.2 a 37.3 % (b.u.). O fluxo de ar era fornecido ao secador por meio de uma válvula distribuidora rotativa, possuindo um disco com abertura na forma de círculo, com ângulo de  $120^{\circ}$ . A rotação do disco cria a pulsação do fluxo de ar com frequência determinada pela velocidade de rotação do disco, com frequência constante em 5, 10 e 15 Hz. O estudo fluidodinâmico foi realizado com temperatura ambiente para as partículas secas e úmidas. Os autores observaram que a fluidização convencional só foi possível usando-se prato perfurado composto. Por meio da equação (2.9) para leito fluidizado e dos dados experimentais, constataram bom ajuste da equação para leito fluidizado pulsado, e que a queda de pressão no leito fluidizado pulsado depende da capacidade do prato perfurado, mas estabiliza para altas velocidades do ar. A Figura 2.11 apresenta a velocidade de mínima fluidização (linha pontilhada) e a queda de pressão calculada (linha cheia).

$$\Delta P = \rho_m gH(1 - \varepsilon) = \rho_b gH \quad (2.9)$$

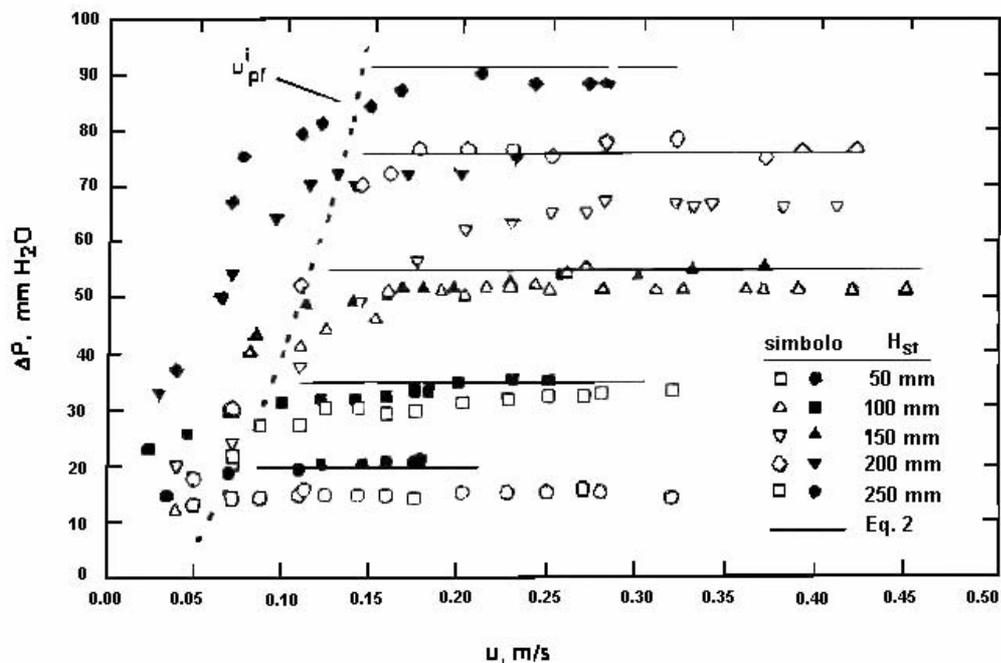


Figura 2.11 - Queda de pressão para partículas de polipropileno seco (símbolos fechados), e úmido (símbolos abertos) em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado (GAWRZYNSKI *et al.*, 1999)

KUDRA *et al.* (2002) efetuaram estudo fluidodinâmico de um secador leito fluidizado pulsado com partículas de polpa de papel (0,08 a 1,1 mm) secas e úmidas a temperatura de 20-30 °C. A altura estática do leito variou de 0,05 a 0,2 m e frequência constante em 5 e 10 Hz. Por meio da curva fluidodinâmica (Figuras 2.12 e 2.13), observaram que a velocidade de mínima fluidização pulsada depende da carga de material sobre o prato perfurado, definida pela altura estática do leito e do teor de umidade do material. Enquanto que para a queda de pressão, o efeito da frequência é insignificante para as partículas secas, mas deve ser considerado para o material úmido.

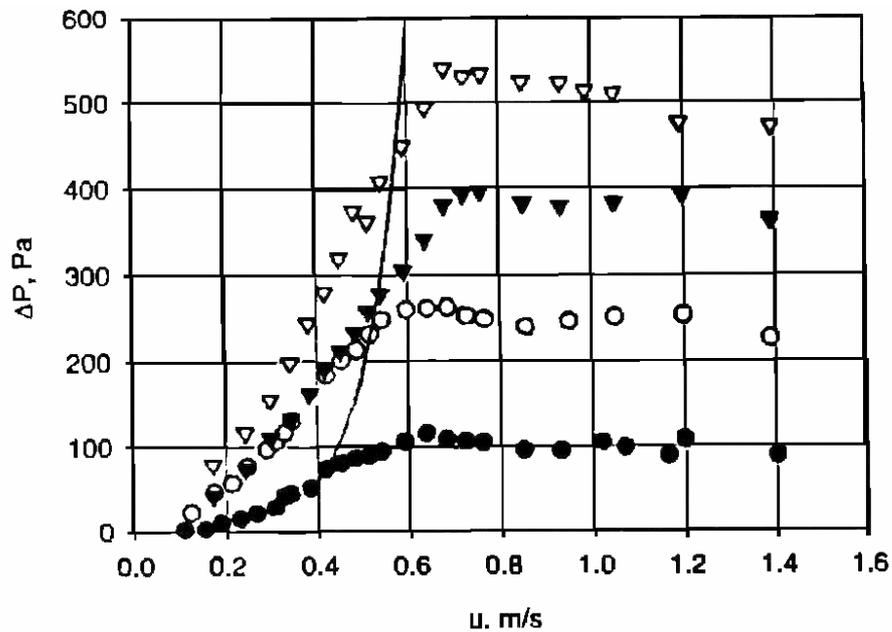


Figura 2.12 – Queda de pressão em função da velocidade do ar em LFP (X=70%b.u.; f=10Hz) “●” H=50mm; “○” H=100mm; “▼” H=150mm; “▽” H=200mm

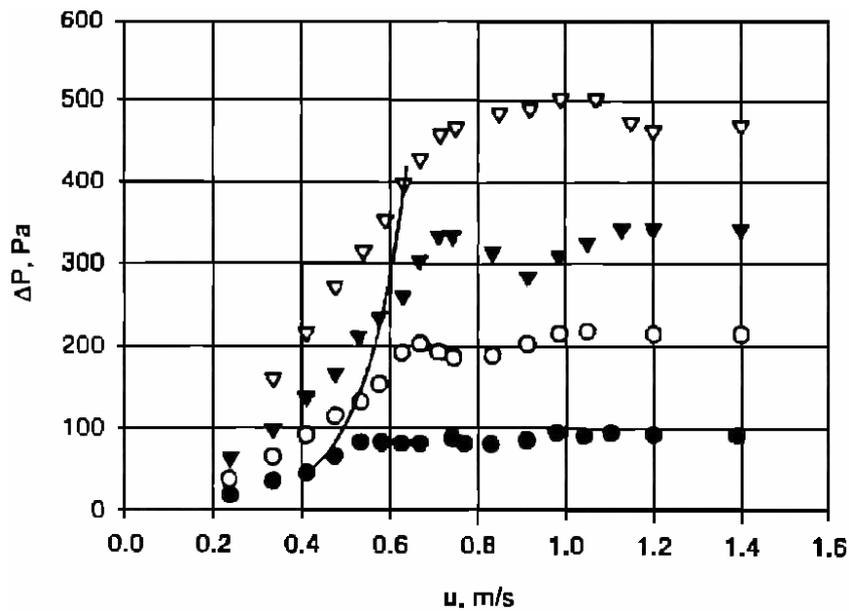


Figura 2.13 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em LFP (X=70%b.u.; f=5Hz) “●” H=50mm; “○” H=100mm; “▼” H=150mm; “▽” H=200mm

Estudos foram realizados em leito fluidizado pulsado rotativo por ELENKOV e DJURKOV (1992) utilizando partículas de teflon (forma cúbica de 4x4x4 mm e cilíndrica com  $d=5$  mm e  $h=5$  mm) e partículas esféricas ( $d=9$  mm), sob frequência aproximadamente fixa e maior que 2 Hz. Estabeleceram que na transição de leito fixo para leito fluidizado a queda de pressão do leito é independente da forma, do tamanho da partícula e da frequência de rotação do disco. Eles observaram que o fator que influencia o processo é a massa de sólidos no leito e para cálculos recomendam a seguinte equação baseada em seus dados experimentais:

$$Re_{mf} = 0.013Ar^{0.63} \tag{2.10}$$

Observaram que neste tipo de equipamento quando o disco está fixo, dependendo do número de orifícios formam-se alguns jorros e o processo se comporta como um leito de jorro. Quando a velocidade de rotação do disco é baixa, os jorros giram (alternam-se) e entre eles existem áreas de leito fixo. Quando a velocidade de rotação do disco é alta, todo o leito de partículas é fluidizado semelhante a um leito fluidizado convencional. A principal vantagem deste método, comparado a um leito convencional e ao de jorro, é que em toda a área do leito formam-se altas velocidades do gás nos orifícios da placa perfurada, e por isso

não existem áreas com baixa percolação do gás através do leito. Uma alta velocidade de rotação do disco leva a um movimento uniforme das partículas dentro do leito. O estabelecimento do movimento das partículas é influenciado pelo diâmetro do leito, pela abertura e configuração da placa perfurada e do disco rotativo, e por sua frequência de rotação.

ELENKOV e DJURKOV (1997) ao estudar o leito fluidizado pulsado rotativo observaram que este apresenta curvas de fluidização similares às curvas do leito fluidizado convencional. Constataram que a quantidade de material exerce forte influência na queda de pressão do leito e a frequência de rotação do disco não influencia. Por meio da Figura 2.14, nota-se que a queda de pressão do leito muda gradualmente com a passagem de leito fixo para leito fluidizado, e que a razão  $m/A$  (massa de material/ área da seção transversal da grade) tem grande influência sobre a queda de pressão do leito.

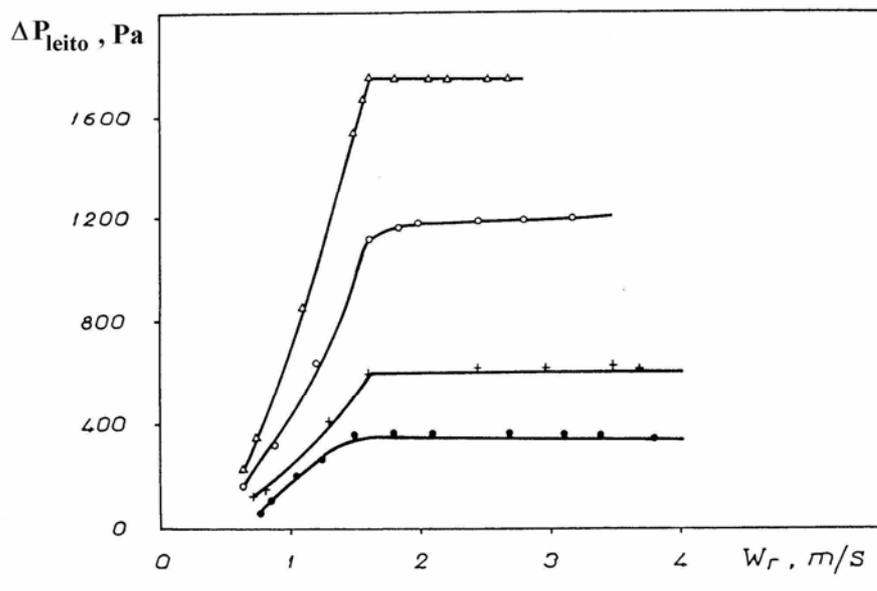


Figura 2.14 - Curvas de fluidização para o LFPR,  $f_{\text{rotação}} = 3,33\text{Hz}$ , “●”  $m/A = 64 \text{ kg/m}^2$ ; “+”  $m/A = 96 \text{ kg/m}^2$ ; “○”  $m/A = 159 \text{ kg/m}^2$ ; “Δ”  $m/A = 222 \text{ kg/m}^2$ , (ELENKOV e DJURKOV, 1997)

DJURKOV (1998) realizou um estudo em um leito fluidizado pulsado rotativo com a finalidade de formular um modelo físico do movimento das fases sólida e gasosa do leito fluidizado pulsado rotativo. Ele propôs um modelo matemático para o cálculo da queda de pressão que considera a influência das forças que agem no leito. Nos experimentos foi utilizado um distribuidor de gás como mostra a Figura 2.15, constituído

por um disco sólido com duas aberturas simétricas. O modelo matemático é construído a partir do equilíbrio de forças da tensão normal acima da grade, que atua sobre a coluna de material, posicionada acima da abertura da grade, e acima da abertura do disco.

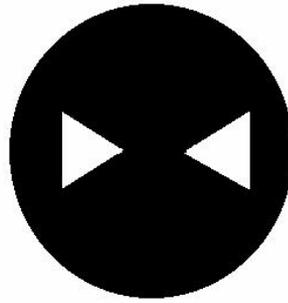


Figura 2.15 - Disco rotativo com duas aberturas.

O modelo gerou a equação (2.11), que descreve a queda de pressão no leito de material composto por esferas de vidro (diâmetro de 4 a 6 mm), cilindros de Teflon (d=5 mm e h=5 mm) e cubos de Teflon (4x4x4 mm):

$$\Delta P = H \left[ 1 - \left( \frac{u}{u_{mf}} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

em que:

$$H = \frac{mg}{A} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad (2.12)$$

$A$  – área da seção transversal (m<sup>2</sup>)

$g$  – aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$m$  – massa de sólido (kg)

$\Delta P$  – queda de pressão (Pa)

$u$  – velocidade do gás (m/s)

$u_{mf}$  – velocidade mínima de fluidização (m/s)

$\rho, \rho_s$  – densidade do gás, densidade do sólido (g/cm<sup>3</sup>)

AMBROSIO-UGRI e TARANTO (2002) estudaram o comportamento fluidodinâmico do ácido 2-hidróxidobenzóico, isento de umidade, em um leito fluidizado pulsado rotativo. Eles compararam os resultados com um leito fluidizado convencional. Os parâmetros utilizados foram: frequência de rotação do disco (5, 10 e 15 Hz) e carga de sólidos (0,40 e 0,65 kg). Eles observaram que independente da frequência de rotação do disco, ocorre ausência do pico de queda de pressão típico de uma fluidização convencional, diminuição da queda de pressão comparada ao leito fluidizado convencional. A maior frequência de pulsação do gás facilita e promove uma melhor circulação das partículas no interior do equipamento. Independente da frequência tem-se uma fluidização de melhor qualidade para a carga de 0,65 kg, e o comportamento fluidodinâmico não se altera. Constataram que o leito fluidizado pulsado rotativo permite economia energética durante o processo.

UGRI (2003) realizou experimentos em um secador leito fluidizado pulsado rotativo com partículas do grupo A de Geldart ( $d=80 \mu\text{m}$ ). A distribuição periódica do gás foi fornecida por disco rotativo com abertura de um ângulo de  $60^\circ$ . O estudo fluidodinâmico foi realizado à temperatura ambiente para as partículas secas e úmidas. As variáveis estudadas foram frequências de rotação (5, 15 Hz) e carga de partículas (400, 900 g). Ao comparar o leito fluidizado convencional com leito fluidizado pulsado rotativo constatou que este apresenta suavização na curva fluidodinâmica, quando imposta a pulsação da corrente de gás. Observou que para a menor carga de partículas, ao mudar a frequência de 5 Hz para 15 Hz, ocorre um decréscimo no valor da velocidade de mínima fluidização pulsada ( $u_{mfp}$ ), sem grandes alterações no valor da queda de pressão na condição de mínima fluidização. Enquanto que para a maior carga de partículas a variação da frequência praticamente não influencia no valor da velocidade de mínima fluidização pulsada, porém a queda de pressão na condição de mínima fluidização sofre um pequeno aumento. Devido aos menores valores de  $u_{mfp}$ , e por apresentar um melhor índice de fluidização, constatou que a melhor condição de fluidização no leito fluidizado pulsado rotativo, para o processo estudado é utilizar a maior carga de partículas (0,90 kg) e maior frequência de rotação (15 Hz).

### 2.2.2 - Índice de Fluidização

Segundo MARRING *et al.* (1994), o contato gás-sólido e a condição em que se encontram as partículas suportadas pelo fluxo de gás são medidas de “qualidade” da fluidização. Se a queda de pressão do leito for aproximadamente igual ao peso do leito por unidade de área da seção transversal do leito tem-se então uma fluidização de boa qualidade, porém quando as forças interpartículas no leito causam formação de canais preferenciais do gás, a queda de pressão poderá ser muito baixa, indicando uma fluidização pobre.

Para esta medida de “qualidade”, adota-se um índice adimensional (índice de fluidização, FI) definido como sendo a razão da queda de pressão no leito pelo peso das partículas por unidade de área da seção transversal (MARRING *et al.* 1994, SANTANA *et al.*, 1999; JONG, 1970 *apud* MORIS, 2002).

$$FI = \frac{\Delta P_{leito} \cdot A}{m \cdot g} \quad (2.13)$$

onde  $m$  é a massa de partículas no leito (kg),  $\Delta P_{leito}$  é a queda de pressão no leito (Pa),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ) e  $A$  é a área da seção transversal do leito ( $m^2$ ).

Segundo SANTANA *et al.* (1999), valores de índice de fluidização abaixo da unidade indicam que nem todas as partículas estão suspensas pelo fluxo ascendente do gás, resultando em fluidização de má qualidade. Este comportamento é válido tanto para leitos fluidizados convencionais como para leitos fluidizados modificados.

MARRING *et al.* (1994) ao estudar o efeito da vibração no comportamento de um leito fluidizado de materiais coesivos observaram que foi possível fluidizar esferas de vidro com e sem vibração, porém, para o material coesivo em estudo (amido de batata úmido) somente quando imposta a vibração. Para as partículas de vidro observaram um aumento no índice de fluidização resultando em aumento da queda de pressão do leito e um decréscimo na velocidade de mínima fluidização quando imposta a vibração no leito. De acordo com os autores, os resultados obtidos (Figura 2.16) são similares aos encontrados por YOSHIDA *et al.* (1966), ERDÉZ e ORMÓS (1983), e GUPTA e MUJUMDAR (1980) todos citados por

MARRING *et al.* (1994) em seu trabalho. No entanto, ERDÉZ e ORMÓS (1983) e GUPTA e MUJUMDAR (1980) observaram decréscimo na queda de pressão com o aumento da intensidade da vibração. Para as partículas de amido de batata, os autores constataram que a vibração no leito minimiza a formação de canais preferenciais, fornecendo um índice de fluidização próximo da unidade. Observaram que a velocidade de mínima fluidização aumenta com o aumento da coesividade das partículas como se observa na Figura 2.17.

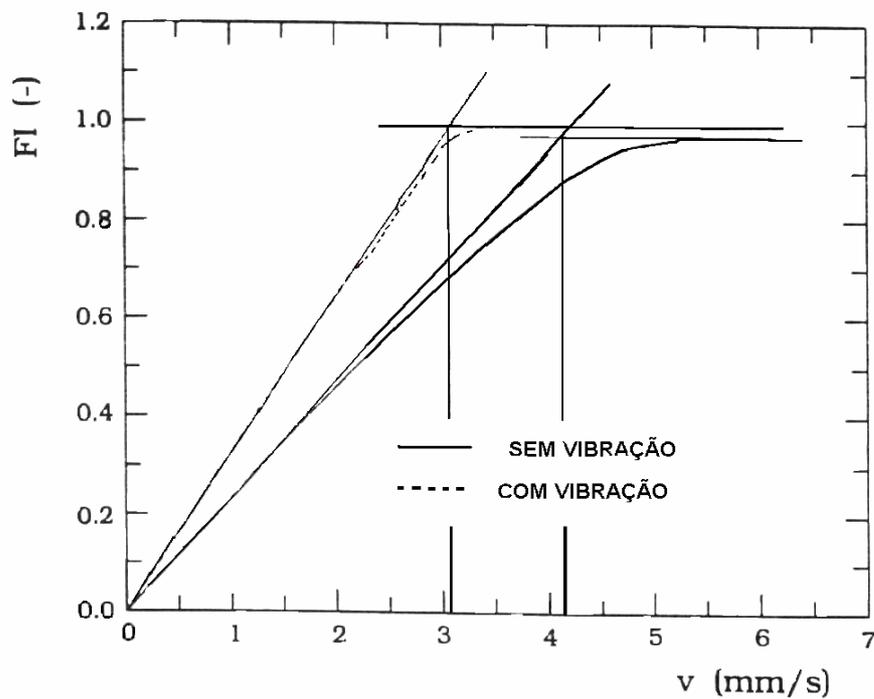


Figura 2.16 - Índice de fluidização de esferas de vidro (ballotini), para velocidade decrescente do ar,  $f=30\text{Hz}$ , (MARRING *et al.*, 1994).

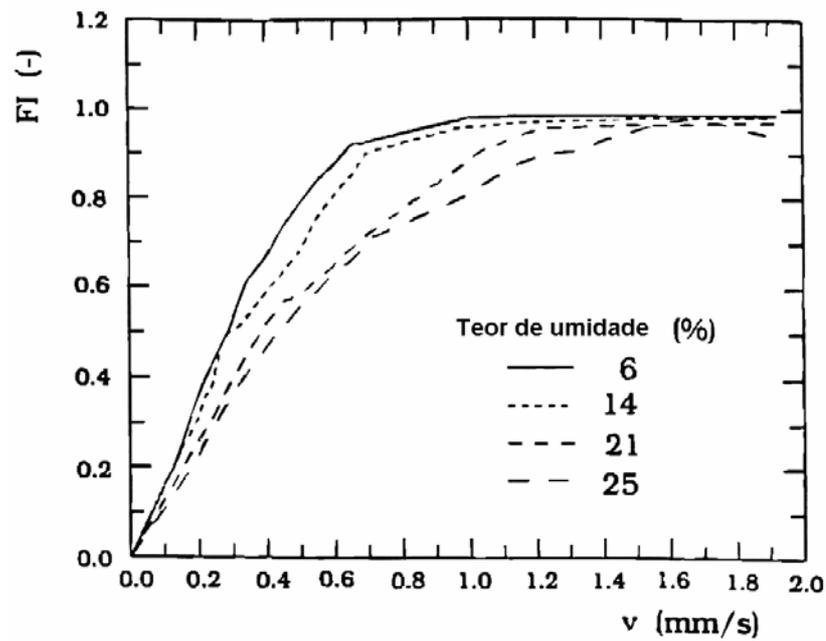


Figura 2.17 - Índice de fluidização para partículas de amido de batata, u decrescente,  $f=30\text{Hz}$ , (MARRING *et al.*, 1994).

SANTANA *et al.* (1999) ao estudar um leito vibro-fluidizado com partículas dos grupos A e C de Geldart e compará-lo com um leito fluidizado convencional (Figura 2.18), observaram que a velocidade de mínima fluidização é menor para o leito vibro-fluidizado em relação ao leito fluidizado convencional. O índice de fluidização é levemente maior quando imposta a vibração, indicando um melhor contato gás-sólido no leito e uma minimização ou desaparecimento de canais preferenciais.

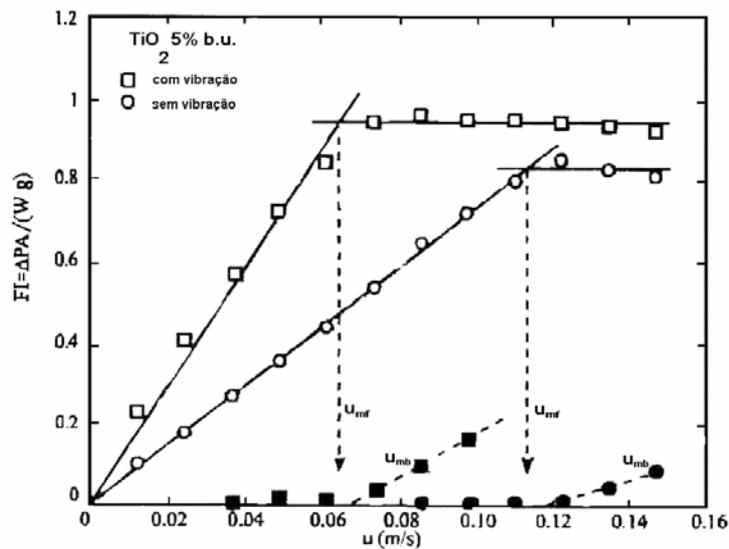


Figura 2.18 - Variação do índice de fluidização com a velocidade do gás, ; “o” sem vibração, “ ” com vibração, SANTANA *et al.* (1999).

GINZBURG e RIECZIKOW (1969) *apud* GAWRZYNSKI e PIECZABA (2000), constataram que o índice de fluidização pode ser utilizado para a determinação da qualidade da fluidização de um sistema gás-sólidos finos em leitos fluidizados pulsados. ELENKOV e DJURKOV (1992) observaram que secadores leito fluidizado pulsado rotativo proporcionam uma fluidização com altas taxas locais de índice de fluidização.

### 2.3 - Conteúdo de Umidade do Material

Em geral, os materiais submetidos ao processo de secagem, ou seja, “material úmido”, consiste em um “esqueleto” de material seco com uma certa quantidade de umidade. Os materiais úmidos possuem diferentes propriedades física, química, mecânica e estrutural. E esses parâmetros podem influenciar significativamente o processo de secagem. Porém, na prática o mais importante são as propriedades mecânica estrutural e o tipo de umidade no sólido (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

A umidade encontrada nos sólidos pode ser classificada em:

- Umidade superficial – a umidade existente recobre o material como se fosse um filme, devido ao efeito da tensão superficial (STRUMILLO e KUDRA, 1986);
- Umidade livre – trata-se da umidade que está em excesso em relação à umidade de equilíbrio, correspondente ao ar saturado (OKADA *et al.*, 1995).

Segundo STRUMILLO e KUDRA (1986), a umidade não-ligada pode se apresentar de duas formas (Figura 2.19):

- Estado funicular – existe um líquido em estado contínuo no interior do poro do material;
- Estado pendular - o líquido ao redor e entre partículas é descontínuo, de modo que a umidade está intercalada por bolhas de ar.

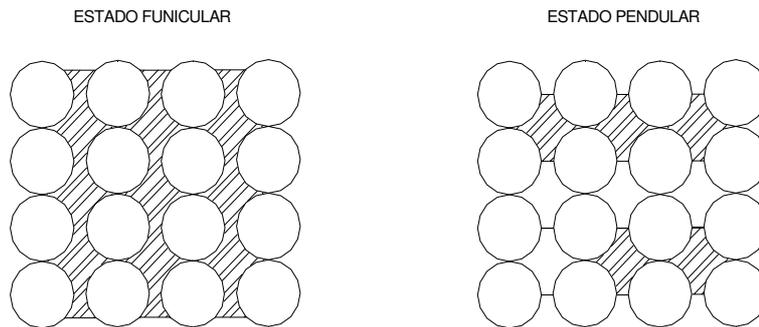


Figura 2.19 - Estados de umidade não-ligada (STRUMILLO e KUDRA, 1986)

- Umidade ligada – quando um líquido exerce uma pressão de vapor menor que a do líquido puro, numa dada temperatura (STRUMILLO e KUDRA 1986, OKADA *et al.*, 1995). Isso pode ser devido ao fato da umidade estar retida em poros capilares finos ou por apresentar sais dissolvidos (OKADA *et al.* 1995).

Um parâmetro importante do material a ser seco é o teor de umidade, ou seja, a proporção direta entre a massa de água presente no material e a massa de sólido. O teor de umidade do material pode ser definido por (STRUMILLO e KUDRA, 1986):

a) Base seca (em relação à massa seca do material):

$$X = \frac{m_A}{m_s} \frac{(\text{kg de umidade})}{(\text{kg de material seco})} \quad (2.14)$$

b) Base úmida ( em relação à massa total do material):

$$X' = \frac{m_A}{m_A + m_s} \frac{(\text{kg de umidade})}{(\text{kg de material úmido})} \quad (2.15)$$

### 2.3.1 - Cinética de Secagem do Leito Fluidizado Pulsado Rotativo

Segundo BLACHA-JURKIEWICZ *et al.* (1987) e GAWRZYNSKI *et al.* (1989), a secagem em um secador de leito fluidizado pulsado pode ser caracterizada pela uniformidade da distribuição de umidade do material seco. Comparado a um leito fluidizado convencional o processo ocorre com alta intensidade e apresenta uma considerável redução no consumo de gás. Em seus estudos com um secador leito fluidizado pulsado em batelada, os autores observaram que no segundo período, a taxa de secagem e o conteúdo de umidade instantâneo no material são limitados pelo transporte interno da umidade.

GAWRZYNSKI *et al.* (1999) realizaram experimentos com partículas de polipropileno em um secador leito fluidizado pulsado de três câmaras, fixaram para cada experimento a temperatura do ar de entrada (50, 70, 90 °C), e a altura do leito estático (100, 200, 300 mm), e a velocidade do gás em três níveis (na faixa de 0,178-0,25 m/s). A frequência de rotação foi fixada em 10 Hz, devido ao fato de ter sido estabelecido que esta não influencia no processo de secagem. Os dados da cinética de secagem (Figura 2.20) foram interpretados em função das curvas de secagem e das curvas de temperatura. Nota-se o decréscimo do teor de umidade no material ao longo da secagem, o qual coincide com a temperatura constante do material, igual a temperatura de bulbo úmido.

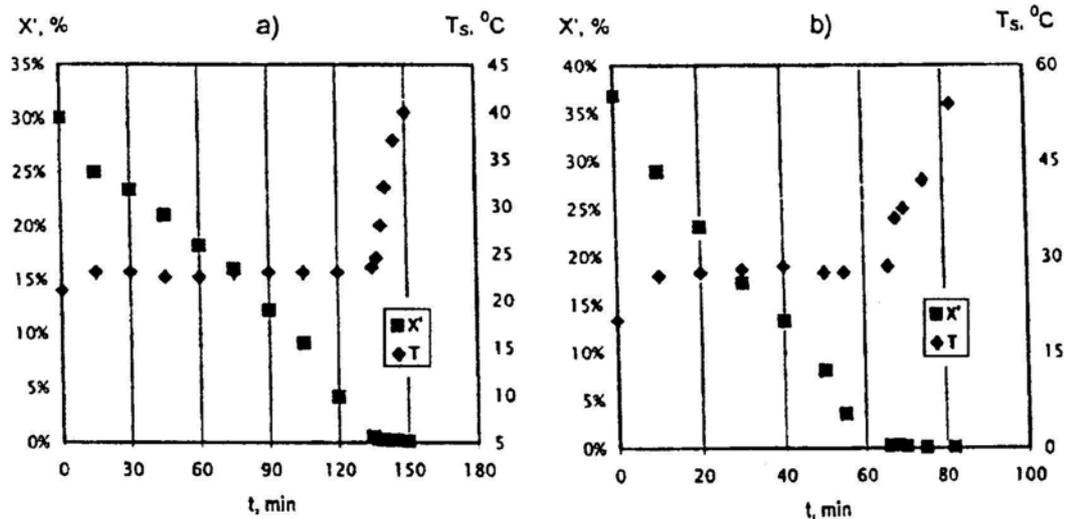


Figura 2.20 - Curvas de conteúdo de umidade e de temperatura em função do tempo: (a)  $X_i \sim 30\%$ ,  $u = 0,23\text{m/s}$ ,  $T = 50^\circ\text{C}$ ,  $H_0 = 0,2\text{m}$ ; (b)  $X_i \sim 35\%$ ,  $u = 0,21\text{m/s}$ ,  $T = 70^\circ\text{C}$ ,  $H_0 = 0,1\text{m}$  (GAWRZYNSKI *et al.*, 1999)

KUDRA *et al.* (2002) estudaram a cinética de secagem de polpa de papel em um secador leito fluidizado pulsado. Os experimentos foram realizados em batelada, fixaram para cada experimento a temperatura do ar de entrada ( $50, 70, 90$  e  $105^\circ\text{C}$ ), e a altura do leito estático (de  $0,05$  a  $0,2$  m com intervalos de  $0,05$  m), a velocidade superficial do gás em quatro níveis ( $0,8; 1,0; 1,2$  e  $1,4$  m/s), e a frequência de rotação foi fixada em  $5$  e  $10$  Hz. Constataram que para os parâmetros estudados a frequência não influencia no processo de secagem.

Ao secar partículas do grupo A de Geldart em um secador leito fluidizado pulsado rotativo, tendo como parâmetros: teor de umidade inicial ( $3,5$  a  $5,5$  % e  $6,5$  a  $10$  % b.s.), temperatura ( $65$  e  $85^\circ\text{C}$ ), frequência de rotação ( $5$  e  $15$  Hz), e velocidade do gás, sendo três vezes a velocidade de mínima fluidização pulsada, UGRI (2003) obteve curvas experimentais de  $(X/X_0)$  em função do tempo. O material estudado apresentou dois períodos de secagem (constante e decrescente), sendo o período constante predominante no processo. Observou que a maior frequência de rotação facilita o movimento das partículas e melhora a troca de calor e massa durante a secagem, influenciando no decréscimo do tempo de secagem durante o período de taxa constante para as condições do processo estudado.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 - Materiais

Os materiais escolhidos para serem utilizados neste trabalho foram: celulose microcristalina, ou seja, a forma não fibrosa da celulose  $[(C_6H_{10}O_5)_n]$  e ácido adípico, por pertencer a diferentes grupos da classificação de Geldart (1973) e serem materiais muito utilizados na indústria.

A celulose é um polissacarídeo formado por cadeias de glicose. É o maior constituinte das fibras das plantas e sua forma natural mais pura é o algodão. A forma fibrosa é matéria-prima básica para as indústrias de papel e têxtil. A celulose microcristalina é um produto fabricado também no Brasil, cadastrado pelo FDA (Food and Drug Administration – USA), para uso em cápsulas orais, suspensões, xaropes e comprimidos (SILVA, 2000).

O ácido adípico é muito utilizado nas indústrias química, farmacêutica e de alimentos, sendo sua principal aplicação na produção do Nylon 66. Conhecido como ácido hexanodióico ou ácido 1,4-butanodicarboxílico, possui cristais incolores, é inodoro e tem sabor ácido, solúvel em água, sendo crescente sua solubilidade com a temperatura. Cristaliza-se em forma de prismas monoclinicos a partir da água e a presença de umidade pode gerar dificuldade no processo de secagem (MORIS, 2002).

## **3.2 - Caracterização das Partículas**

Com a finalidade de se conhecer a estrutura e o comportamento do material a ser estudado, foram realizadas análises para a caracterização física dos materiais durante o desenvolvimento do trabalho. Para a caracterização física dos materiais determinou-se a densidade real e aparente das partículas por meio de Picnometria a gás Hélio e Porosimetria por intrusão de Mercúrio respectivamente. A distribuição de tamanho das partículas foi obtida por meio da técnica de peneiramento.

### **3.2.1 - Distribuição Granulométrica**

A distribuição granulométrica foi determinada pela técnica de análise de peneiras utilizada para separação de partículas de acordo com os tamanhos. A análise consiste em colocar uma determinada quantidade de material em um conjunto de peneiras padronizadas da série Tyler (International Standard Organization), com aberturas na faixa granulométrica do material. Para as partículas de celulose microcristalina, foram utilizadas as peneiras Tyler 32, 35, 48 e 60, correspondendo às aberturas de 500, 420, 300 e 250  $\mu\text{m}$  respectivamente e para o ácido adípico, Tyler 28, 35, 60 e 200, correspondendo a 600, 420, 250 e 75  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

### **3.2.2 - Densidades Real e Aparente**

As densidades real e aparente das partículas foram determinadas em picnômetro a gás Hélio e porosímetro por intrusão de Mercúrio, respectivamente.

A picnometria a gás é um método de caracterização morfológica para a determinação da densidade real de sólidos. Nesta análise o gás é capaz de penetrar todos os poros abertos maiores que o diâmetro de sua molécula. No caso da amostra possuir poros inacessíveis (poros fechados) à penetração do gás, este volume é contado como parte do volume do sólido. O equipamento utilizado para esta análise foi o Picnômetro a Gás Hélio modelo AccuPyc 1330, da Micromeritics.

A porosimetria por intrusão de mercúrio é uma técnica que descreve quantitativamente a estrutura porosa de um sólido, sendo utilizada neste trabalho para a determinação da densidade aparente. O equipamento utilizado para esta análise foi o Porosímetro por Intrusão de Mercúrio, Modelo AutoPore III (Micromeritics).

Segundo KEEY, (1992) as densidades dos materiais sólidos são definidas, como:

$$\rho_{real} = \frac{m}{V_{ep}} \quad (3.1)$$

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_T} \quad (3.2)$$

Antes de serem analisadas as amostras permaneceram na estufa durante 24 h, a temperatura de 105 °C (CMC) e 75 °C (ácido adípico), para eliminação da umidade do produto. A partir das densidades real e aparente, foi calculada a porosidade do material, utilizando a seguinte equação:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}} \quad (3.3)$$

### 3.3 - Procedimento Experimental

A Figura 3.1 apresenta o sistema experimental como se encontra no Laboratório e em destaque o leito fluidizado pulsado rotativo e o disco rotativo e a Figura 3.2 apresenta um esquema do sistema experimental do leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo. O sistema experimental utilizado foi o mesmo para ambos equipamentos estudados neste trabalho. A única diferença entre o leito fluidizado pulsado rotativo em relação ao leito convencional é pela adição do disco rotativo logo abaixo da placa perfurada para o leito fluidizado pulsado rotativo.

O ar foi fornecido por um compressor com 7,5 cv (1). A tubulação utilizada para a alimentação do leito é de aço galvanizado com diâmetro interno de 2 in. A vazão do gás foi controlada por uma válvula tipo globo (12) e, em seguida, para se trabalhar com temperatura ambiente, o gás passava por um resfriador (2) existente na linha, em que o fluido refrigerante foi a água. Em (13) e (14) encontram-se tomadas de pressão na placa de orifício e na linha.

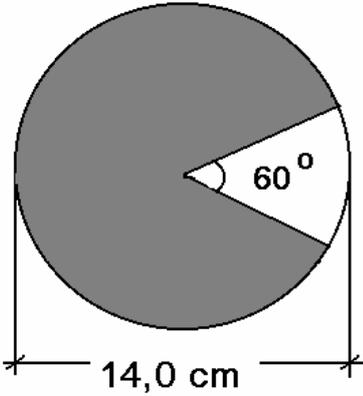
Através do painel de manômetros de tubo em “U” (9) pode-se acompanhar a perda de carga no leito de partículas, na placa de orifício e na linha. O manômetro em “U” está ligado em paralelo a um manômetro inclinado para o leito de partículas e placa de orifício. Em seguida, o gás passa através de um leito de sílica gel (3) e após no aquecedor. O leito de sílica é constituído de uma coluna em acrílico cilíndrica de 4 mm de espessura, com 41 cm de comprimento e com diâmetro interno de 7,1 cm. O cilindro possuía nas partes inferior e superior, telas para possibilitar a passagem do ar e evitar que a sílica seja arrastada na linha de alimentação de gás. O aquecedor elétrico (4), com quatro resistências, se encontrava logo após o leito de sílica.

O ar entra no leito de acrílico (7) ( $d=14,3$  cm e  $H=70$  cm) através da parte inferior passa através do conjunto de distribuição de gás pelo prato perfurado que serve de suporte para o leito de partículas e pelo disco rotativo com abertura de um ângulo de  $60^\circ$  (Figura 3.1 ,b), ambos distribuem o gás e foram construídos em aço inox. No motor elétrico (5) está acoplado o eixo do disco rotativo (6), no qual está fixo o conjunto de distribuição do gás que proporciona a pulsação do gás no interior do leito. O controle da velocidade de rotação do disco rotativo é feito por um inversor de frequência WEG modelo ML – 40/1AC.200 – 240 R 02, série  $\mu$ line. Próximo à base do leito localiza-se o sistema de amostragem dos sólidos (10) e o ciclone (11) para a retenção de finos.

Efetuu-se testes preliminares para a determinação da massa de sólidos e da frequência de rotação do disco a serem utilizadas. Os testes fluidodinâmicos foram realizados variando a massa de sólidos e a frequência de rotação do disco, com o objetivo de avaliar o comportamento fluidodinâmico do sólido seco e úmido no Leito Fluidizado Pulsado Rotativo (LFPR).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1 – (a) Leito Fluidizado Pulsado Rotativo, (b) disco rotativo, (c) sistema experimental.

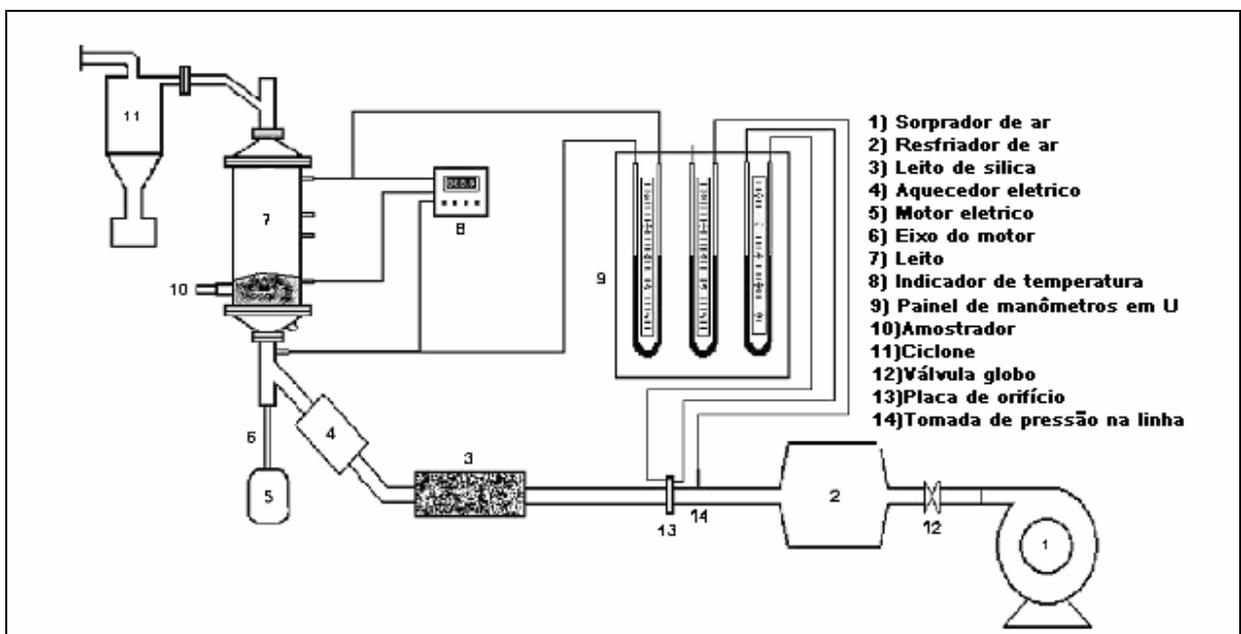


Figura 3.2 - Esquema do sistema experimental do Leito Fluidizado Convencional e Leito Fluidizado Pulsado Rotativo.

### 3.3.1 - Vazão de Ar

As medidas de vazão foram obtidas através de um medidor de placa de orifício, que consiste em uma fina placa presa entre dois flanges na tubulação de ar com um orifício coaxial ao tubo. Duas tomadas de pressão diferencial estão instaladas, uma antes e a outra imediatamente depois da placa. O diâmetro do orifício da placa a ser utilizada nos ensaios fluidodinâmicos foi estabelecido por testes preliminares, sendo que a leitura foi feita por um manômetro de tubo em U e inclinado (queda de pressão na placa de orifício) dependendo do material. A vazão de ar será obtida por meio da seguinte equação (OWER e PANKHURST, 1977):

$$Q = k\varepsilon \cdot \alpha \cdot a_2 \sqrt{\frac{1}{1-m^2} (\Delta h_p) \frac{b}{k_1 + T}} \quad (3.4)$$

em que:

$Q$  – vazão mássica (kg/min)

$$\varepsilon = 1 - \beta \frac{\Delta h_p}{P_1 + b} \quad (\text{fator de compressibilidade})$$

$P_1$  – pressão estática na linha de ar (cm H<sub>2</sub>O)

$b$  - pressão barométrica local (mmHg)

$$\beta = 0,3041 + 0,0876 \cdot m - 0,1166 \cdot m^2 + 0,4089 \cdot m^3$$

$$\alpha = 0,5959 + 0,0312 \cdot m^{1,05} - 0,184 \cdot m^4 \quad (\text{coeficiente de descarga})$$

$$m = \frac{a_2}{a_1}$$

$$a_1 = \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{área do tubo, em cm}^2)$$

$$a_2 = \frac{\pi d^2}{4} \text{ (área do orifício, em cm}^2\text{)}$$

$\Delta h_p$  – queda de pressão na placa de orifício (cmH<sub>2</sub>O)

$T$  – temperatura do ar na entrada do leito (°C)

Se a temperatura e a altura barométrica forem dados em °C e em mmHg, os valores de  $k$  e  $k_1$  são, 0,0573 e 273, respectivamente.

Para os testes experimentais realizados com as partículas de CMC e ácido adípico foram utilizadas as placas de orifício com os seguintes diâmetros de orifício: 6 mm para as partículas de CMC secas e úmidas e para as partículas de ácido adípico secas (75-250  $\mu\text{m}$ ), diâmetro de 10 mm para o ácido adípico seco (420-600  $\mu\text{m}$ ), e para partículas úmidas de ácido adípico (75-250 e 420-600  $\mu\text{m}$ ), a placa de orifício com diâmetro de 18 mm.

### 3.3.2 - Testes Fluidodinâmicos

Os testes fluidodinâmicos com o material seco e úmido foram realizados variando-se a carga, a velocidade de rotação do disco e teor de umidade, com o objetivo de comparar a queda de pressão e velocidade na condição de mínima fluidização e avaliar o comportamento fluidodinâmico do material seco e úmido no equipamento estudado.

Na Tabela 3.1 estão apresentados os parâmetros e as respostas que foram utilizados para o estudo fluidodinâmico dos materiais.

Tabela 3.1 – Parâmetros e respostas utilizados nos testes fluidodinâmicos.

Parâmetros	Respostas
Carga de sólidos	Queda de pressão
Teor de umidade	
Frequência de rotação do disco	Velocidade de mínima fluidização

### **Celulose Microcristalina**

Os testes fluidodinâmicos efetuados com as partículas de celulose microcristalina foram realizados em duplicata variando-se a carga de partículas para o material seco e o teor de umidade para o material úmido, sendo a frequência de rotação do disco um parâmetro variável em ambos os casos.

Os valores dos parâmetros (Tabela 3.2) utilizados para os testes fluidodinâmicos das partículas de CMC foram determinados por testes preliminares. Inicialmente os testes fluidodinâmicos preliminares foram realizados com as partículas de celulose microcristalina seca, variando carga de material e frequência de rotação do disco. Para a frequência de 2 Hz, verificou-se instabilidade na leitura manométrica, comprometendo a precisão dos dados. Ao aumentar da frequência de 5 para 10 Hz verificou-se que não houve alteração no comportamento do leito de partículas, com isso optou-se por trabalhar com a frequência máxima permitida pela construção do equipamento (15 Hz). Os testes preliminares com o material úmido foram efetuados variando-se o teor de umidade do material.

Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados para a CMC.

<b>Teor de umidade (% b.u)</b>	<b>Massa (kg)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>
5	0,4; 1,0; 1,2; 1,5	5 e 15
19 a 26	0,1	5, 10 e 15

Para a realização dos testes fluidodinâmicos com o material úmido foi necessário umidificá-lo. Para tanto, o material foi pesado e colocado em um recipiente metálico, com uma grade no fundo, e tela para evitar perda das partículas. O recipiente metálico foi colocado sobre um banho de água a 95 °C. As partículas foram periodicamente revolvidas no recipiente até atingirem a umidade desejada. O teor de umidade foi determinado por uma termobalança OHAUS® modelo MB200, a temperatura de 105 °C. Cada amostra recolhida foi submetida a medidas em triplicata, apresentando valores próximos, sendo considerada a média entre os valores obtidos.

### **Ácido Adípico**

O estudo fluidodinâmico do ácido adípico assim como o da celulose microcristalina foi realizado em duplicata variando-se a carga de partículas para o material seco e o teor de umidade para o material úmido, sendo a frequência de rotação do disco um parâmetro variável em ambos os casos.

Os valores dos parâmetros que foram utilizados para os testes fluidodinâmicos preliminares das partículas de ácido adípico estão apresentados na Tabela 3.3. Os testes fluidodinâmicos preliminares foram realizados com as partículas de ácido adípico seco variando-se carga de material e frequência de rotação do disco. Ao aumentar da frequência de 10 para 15 Hz verificou-se que não houve alteração no comportamento do leito de partículas, com isso optou-se por trabalhar com a frequência máxima permitida pela construção do equipamento (15 Hz). Os testes preliminares do material úmido foram efetuados variando-se o teor de umidade do material.

Tabela 3.3 - Parâmetros utilizados para o Ácido adípico.

<b>Teor de umidade (% b.u.)</b>	<b>Massa (kg)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>
0,2	0,6, 0,8 e 1,0	5 e 15
2 e 7,0	0,6	5 e 15

Para a realização dos testes fluidodinâmicos com o material úmido foi necessário umidificá-lo. O processo de umidificação adotado foi o mesmo utilizado para as partículas de CMC. O recipiente metálico foi colocado sobre um banho de água a temperatura entre 80 e 100 °C. As partículas foram periodicamente revolvidas no recipiente até atingirem a umidade desejada. O teor de umidade foi determinado no equipamento “Karl Fischer”. Cada amostra recolhida foi submetida a medidas no “Karl Fischer” em triplicata, apresentando valores próximos, sendo considerada a média entre os valores obtidos.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

#### 4.1 - Caracterização das Partículas

As partículas de celulose microcristalina e ácido adípico foram caracterizadas segundo a metodologia descrita no Capítulo 3.

A distribuição granulométrica da celulose microcristalina obtida pela técnica de análise de peneiras, pode ser observada pela Figura 4.1. Nota-se que a amostra de celulose microcristalina apresentou uma distribuição com predominância na faixa de 300 a 420  $\mu\text{m}$ .

Estudos realizados com celulose microcristalina (SILVA, 2000 e 2003) mostram que este material é um sólido que apresenta boa fluidização convencional quando seco. Sabe-se que as partículas menores possuem forças interpartículas maiores, influenciando no processo de fluidização de modo a dificultá-lo. Com isso, neste trabalho optou-se por trabalhar com partículas de celulose microcristalina entre 250-300  $\mu\text{m}$ , sendo o diâmetro médio de 275  $\mu\text{m}$ , obtido por média aritmética.

A Tabela 4.1 fornece resultados obtidos para a caracterização física da celulose microcristalina (250 a 300  $\mu\text{m}$ ), por meio da análise de picnometria utilizando o picnômetro a gás hélio e porosimetria por intrusão de mercúrio.

Com base nos resultados apresentados pela Figura 4.1 e pela Tabela 4.1 constata-se que a celulose microcristalina utilizada pertence ao grupo B segundo a classificação de Geldart (1986), mas está próxima do grupo A. Os resultados da caracterização da celulose microcristalina foram próximos aos dados obtidos por SILVA (2003).

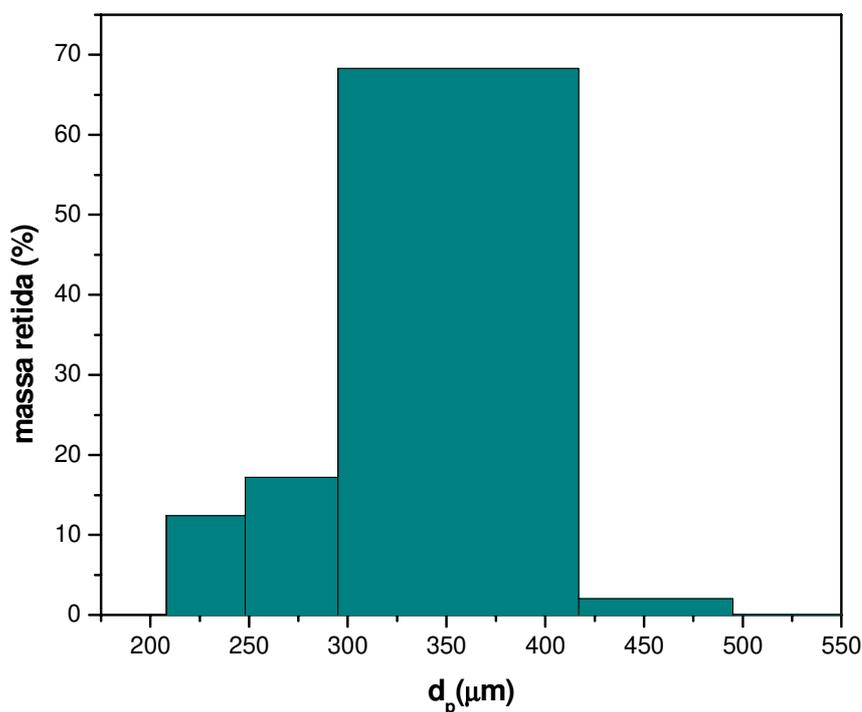


Figura 4.1 – Distribuição granulométrica das partículas de CMC por análise de peneiras.

Tabela 4.1 - Caracterização física da celulose microcristalina

<b>Técnica de medida</b>	<b>Propriedade</b>	<b>CMC</b>
Picnômetro He	$\rho_{\text{real}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,5562
Porosímetro Hg	$\rho_{\text{ap}}$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0,8488
Porosidade da partícula (Eq. 3. 3)	$\varepsilon$	0,5456

A Figura 4.2 mostra a distribuição granulométrica do ácido adípico. Pode-se observar que a amostra de ácido adípico apresentou uma distribuição com predominância na faixa granulométrica de 250 a 420  $\mu\text{m}$ , porém as faixas granulométricas utilizadas nos ensaios fluidodinâmicos foram de 75-250 e 420-600  $\mu\text{m}$ , sendo o diâmetro médio de 162,5 e 510  $\mu\text{m}$ , respectivamente, ambos obtidos por média aritmética.

A escolha dos diâmetros utilizados no estudo fluidodinâmico com ácido adípico foi efetuada com base no trabalho desenvolvido por MORIS (2002), e por pertencerem a

grupos diferentes da classificação de Geldart apresentando deste modo, comportamento diferentes no processo de fluidização.

A Tabela 4.2 fornece os resultados da caracterização física do ácido adípico, nas faixas de diâmetro de 75-250  $\mu\text{m}$  e de 420-600  $\mu\text{m}$ , obtidos por picnometria a gás hélio e porosimetria por intrusão de mercúrio. A densidade real do material nas duas faixas granulométricas avaliadas apresentou valores próximos, sendo então considerada uma média desses valores.

Com base nos resultados apresentados pela Figura 4.2 e pela Tabela 4.2 constata-se que o ácido adípico com diâmetro médio de 162,5  $\mu\text{m}$  pertence ao grupo A segundo a classificação de Geldart (1986) e o ácido adípico de diâmetro médio de 510  $\mu\text{m}$  ao grupo B, mas está próximo do grupo A. Maiores informações sobre a caracterização física do ácido adípico podem ser encontradas no trabalho de MORIS (2002).

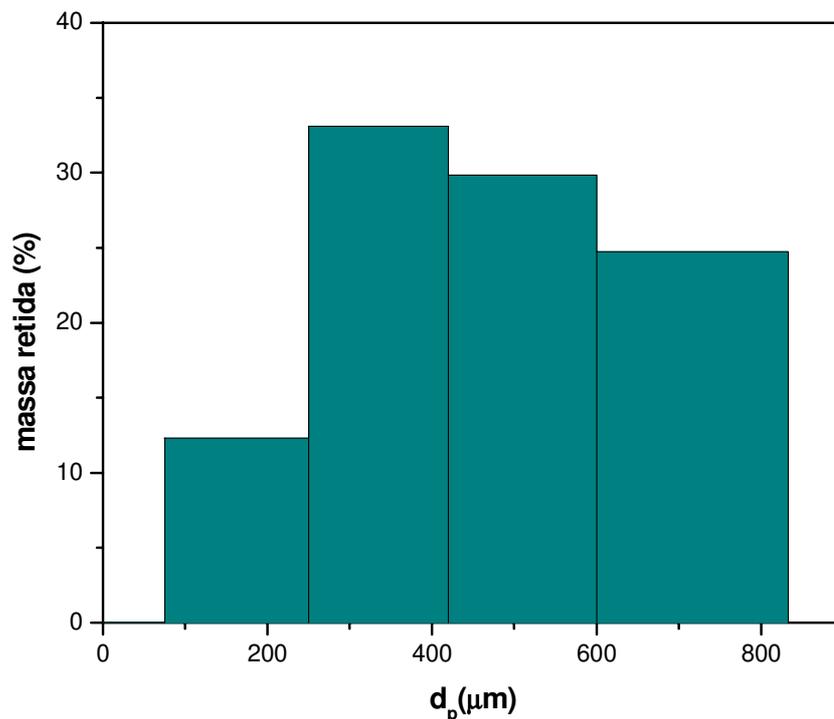


Figura 4.2 - Distribuição granulométrica das partículas de ácido adípico por análise de peneiras.

Tabela 4.2 - Caracterização física do ácido adípico

<b>Técnica de medida</b>	<b>Propriedade</b>	<b>Ácido adípico</b> $d_p=75-250 \mu\text{m}$	<b>Ácido adípico</b> $d_p=420-600 \mu\text{m}$
Picnometro He	$\rho_{\text{real}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1,3555	1,3555
Porosímetro Hg	$\rho_{\text{ap}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	1,2502	1,1997
Porosidade da partícula (Eq. 3. 3)	$\varepsilon$	0,0777	0,1149

## 4.2 - Estudo Fluidodinâmico

### 4.2.1 - Estudo Fluidodinâmico para Partículas de Celulose Microcristalina Secas

Na realização dos experimentos com partículas de celulose microcristalina secas em leito fluidizado convencional observou-se que a fluidização não ocorre em todo o leito no ponto de mínima fluidização. Inicialmente algumas partículas deslizam pela parede do leito de modo ascendente e descendente. Posteriormente surgem pequenas bolhas no fundo do leito. Parte do movimento dos sólidos deve-se a estas bolhas que crescem e coalescem conforme sua ascensão no leito, rompendo na superfície. A quantidade destas bolhas e a velocidade com que atravessam o leito estão intimamente ligadas à velocidade do ar de fluidização.

Os ensaios realizados no leito fluidizado pulsado rotativo apresentaram o mesmo comportamento obtido por ELENKOV e DJURKOV (1992), ou seja, a baixas velocidades de rotação do disco há formação de pequenos jatos alternados e entre eles existem áreas de leito fixo; conforme se aumenta a vazão de gás, cresce o número e a intensidade destes. Para uma alta velocidade de rotação do disco, a fluidização é semelhante à de um leito fluidizado convencional, porém o leito fluidizado pulsado rotativo apresenta movimento mais uniforme das partículas.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os gráficos de queda de pressão em função da velocidade crescente e decrescente do ar obtidos para as partículas de celulose

microcristalina em ensaios preliminares com a carga de 1,2 kg no leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo. Na Figura 4.3 observa-se o comportamento típico de leitos fluidizados. Verifica-se que o comportamento para a velocidade crescente foi idêntico ao obtido para a velocidade decrescente.

Verifica-se na Figura 4.4 que os gráficos de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar obtidos para a carga de 1,2 kg em leito fluidizado pulsado rotativo apresentaram comportamento similar ao obtido para o leito fluidizado convencional (Figura 4.3). Nota-se na Figura 4.4 que o aumento da frequência de 5 Hz para 10 Hz não influenciou no comportamento fluidodinâmico para a velocidade crescente e decrescente, sendo estes muito próximos independente da frequência utilizada. Como a variação do valor da frequência de 5 para 10 Hz não provocou nenhuma alteração no comportamento fluidodinâmico das partículas de celulose microcristalina secas, escolheu-se por trabalhar com a frequência máxima permitida pela construção do equipamento, ou seja, 15 Hz.

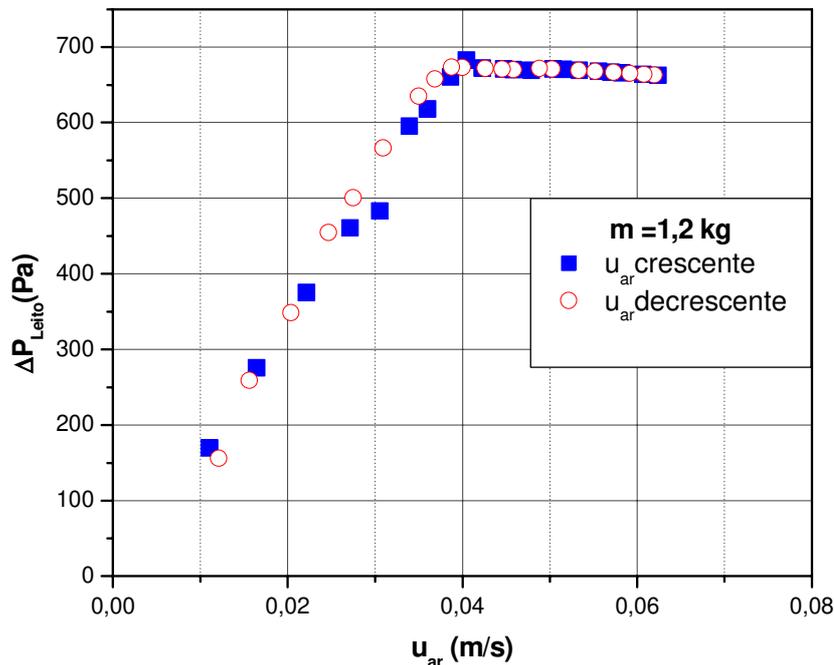


Figura 4.3 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC seca em leito fluidizado convencional,  $m=1,2$  kg

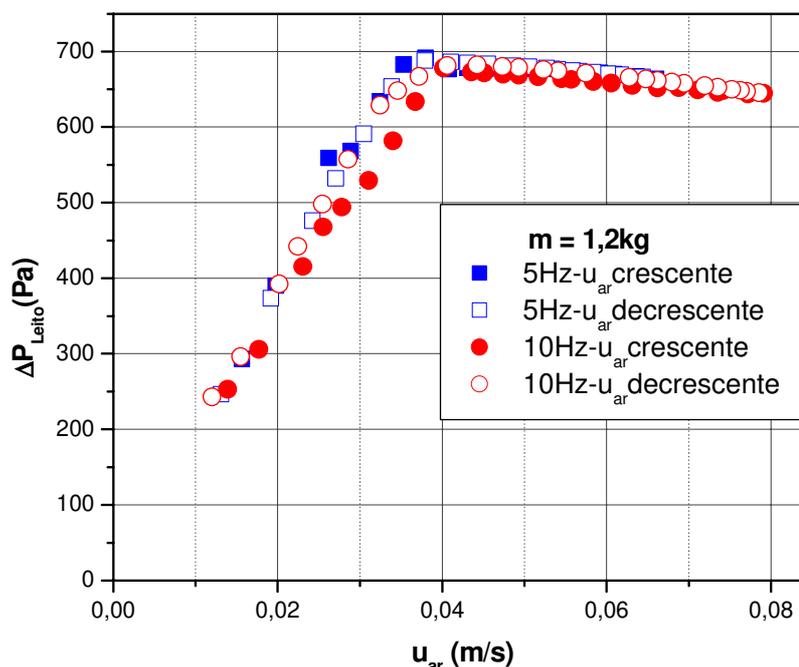


Figura 4.4 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC seca em leito fluidizado pulsado rotativo,  $f_{rotação}=5$  e  $10$  Hz,  $m=1,2$  kg

As Figuras 4.5 a 4.7 apresentam os gráficos de queda de pressão em função da velocidade crescente e decrescente do ar obtidas para a carga de  $0,4$  kg em leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo, e para a carga de  $1,0$  kg em leito fluidizado pulsado rotativo.

Na Figura 4.5 observa-se comportamento semelhante ao obtido e apresentado na Figura 4.3, com pico de queda de pressão máxima pouco acentuado. Ao comparar a Figura 4.3 com a Figura 4.5, constata-se que o aumento da quantidade de material no leito não influenciou na velocidade de mínima fluidização, mas influencia na queda de pressão do leito, como esperado.

Ao comparar as Figuras 4.6 e 4.7 com a Figura 4.4, nota-se que os valores de velocidade de mínima fluidização são próximos, ou seja, não foram influenciados pelo aumento da quantidade de massa no leito e pela frequência de rotação do disco. A queda de pressão do leito não sofre influencia com a variação da frequência de rotação do disco, mas é influenciada pelo, aumento da carga do leito. Observa-se que ocorre suavização da curva, ou seja, ausência do pico de queda de pressão máxima típico de uma fluidização

convencional. Este comportamento também foi observado por ELENKOV e DJURKOV (1992, 1997) e UGRI (2003), e está presente em todo o intervalo de frequência e carga de partículas estudados.

Observa-se na Figura 4.6 que acima de certa velocidade, a queda de pressão torna-se decrescente. Tal comportamento pode ser devido a canais preferenciais e as bolhas, que ao atingirem a superfície do leito ejetam as partículas para o alto da coluna. Deste modo, o leito se divide em duas fases: uma fase densa que constitui o leito de partículas e uma fase diluída compreendida pelas partículas ejetadas da explosão das bolhas. Na fase diluída as partículas menores são elutriadas, enquanto que as maiores são carregadas até uma certa altura, e em seguida caem de volta para a fase densa. Durante os ensaios foi possível observar que uma fração das partículas ejetadas adere a parede do leito, e somente uma pequena porção de celulose microcristalina é recolhida pelo ciclone.

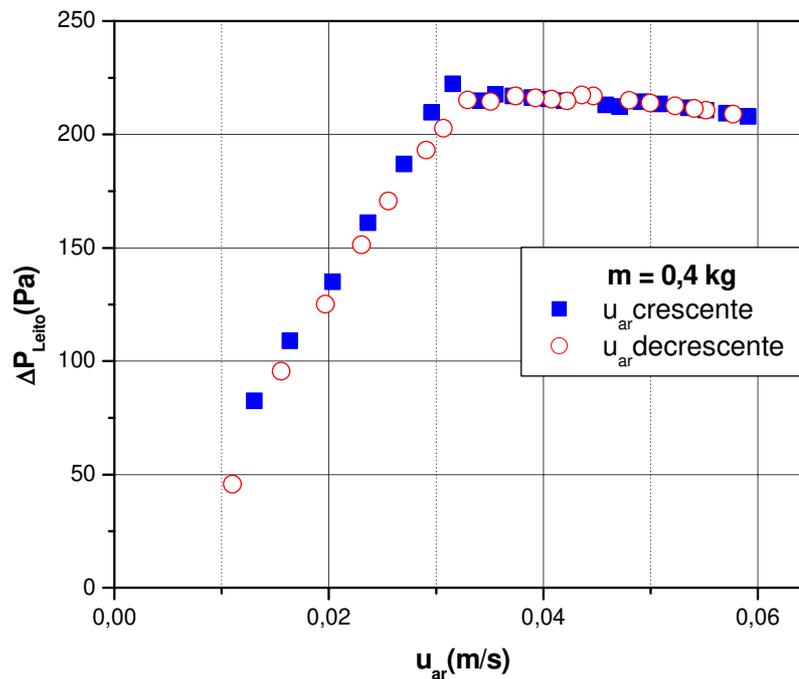


Figura 4.5 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC seca em leito fluidizado convencional,  $m=0,4$  kg.

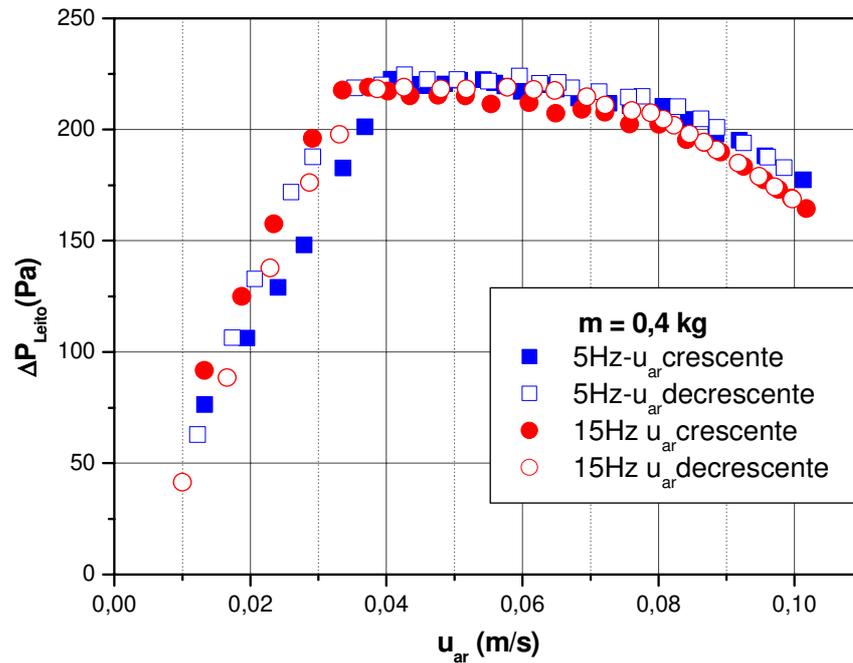


Figura 4.6 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC seca em leito fluidizado pulsado rotativo,  $f_{\text{rotação}}=5$  e 15 Hz,  $m=0,4$  kg

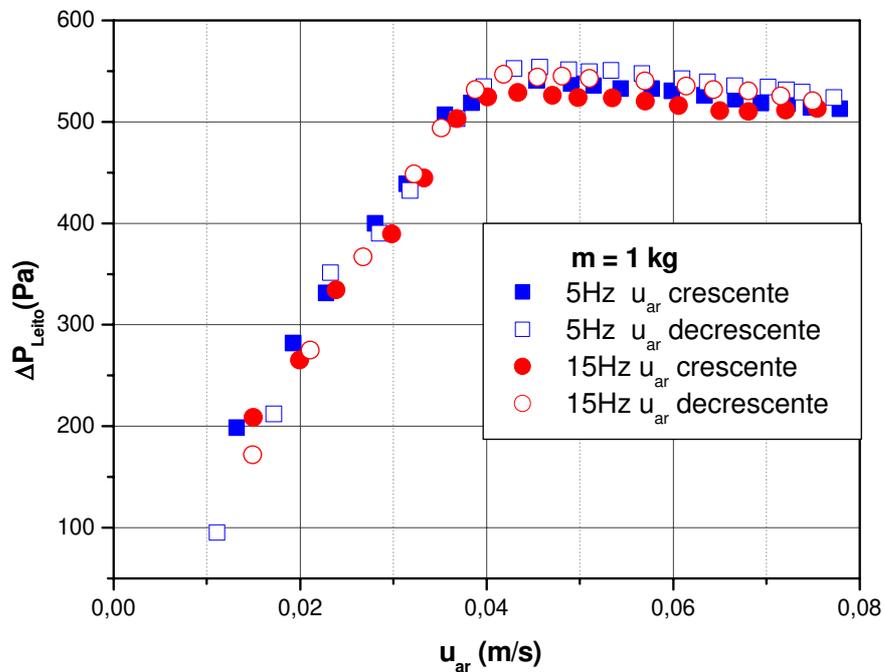


Figura 4.7 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC seca em leito fluidizado pulsado rotativo,  $f_{\text{rotação}}=5$  e 15 Hz,  $m=1,0$  kg

Na Figura 4.8 pode-se acompanhar a queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar para o leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional. Observa-se que a região de mínima fluidização está bem definida, sendo facilmente determinada pelo método clássico proposto por RICHARDSON (1971). A velocidade de mínima fluidização foi obtida para a velocidade decrescente do ar e corresponde à interseção da linha linear da curva para leito fixo com a linha horizontal da curva referente a perda de carga constante. A partir desse resultado, verifica-se que a velocidade de mínima fluidização apresenta um valor médio de  $0,037 \pm 0,003$  m/s, indicando que o valor da velocidade de mínima fluidização não sofre influência com o aumento da carga. Os valores de velocidade obtidos estão próximos aos obtidos por SILVA (2003) (Figura 4.9), ao trabalhar com celulose microcristalina em leito fluidizado convencional e mesma faixa granulométrica.

Observa-se ainda o comportamento descrito na literatura (COUDERC, 1985, KUNNI e LEVENSPIEL, 1991), no qual a queda de pressão no leito aumenta com a velocidade do gás estabilizando-se após o início da fluidização. Em seguida torna-se constante mesmo com o aumento da velocidade. Nota-se que para as partículas de celulose microcristalina a partir de um determinado ponto a queda de pressão torna-se levemente decrescente com o aumento da velocidade do ar. Para o material utilizado verifica-se que somente a quantidade de material influencia na queda de pressão, e que independente da quantidade de partículas e de frequência de rotação do disco todas as curvas do leito fluidizado pulsado rotativo são semelhantes ao do leito fluidizado convencional, ou seja, a frequência de rotação não tem nenhum efeito no comportamento fluidodinâmico para as partículas de celulose microcristalina secas (5 % b.u.). ELENKOV e DJURKOV (1997) ao trabalharem com um leito fluidizado pulsado rotativo também observaram (Figura 4.10) que a frequência não influencia no comportamento fluidodinâmico e somente a carga de material influencia na queda de pressão.

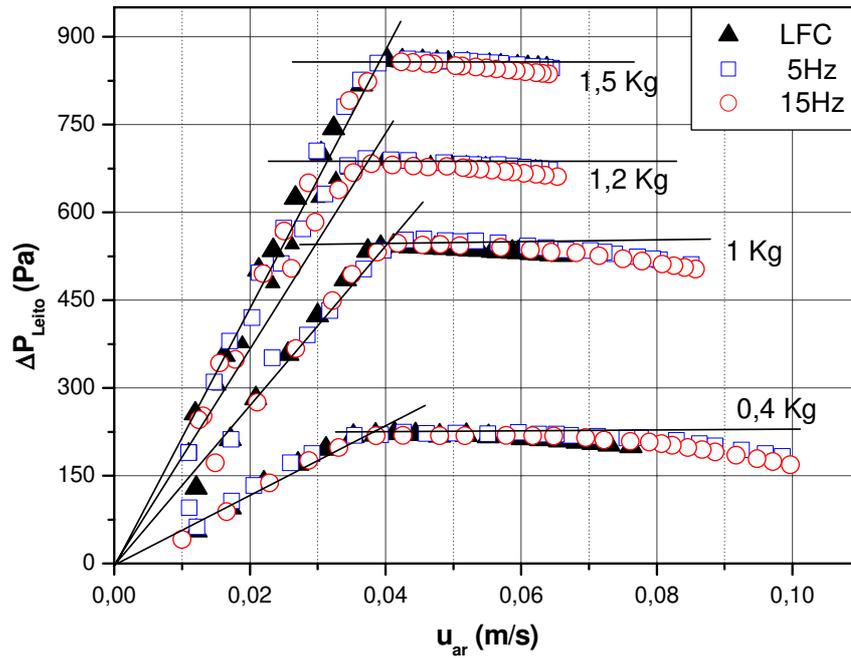


Figura 4.8 - Queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar para CMC seca em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional

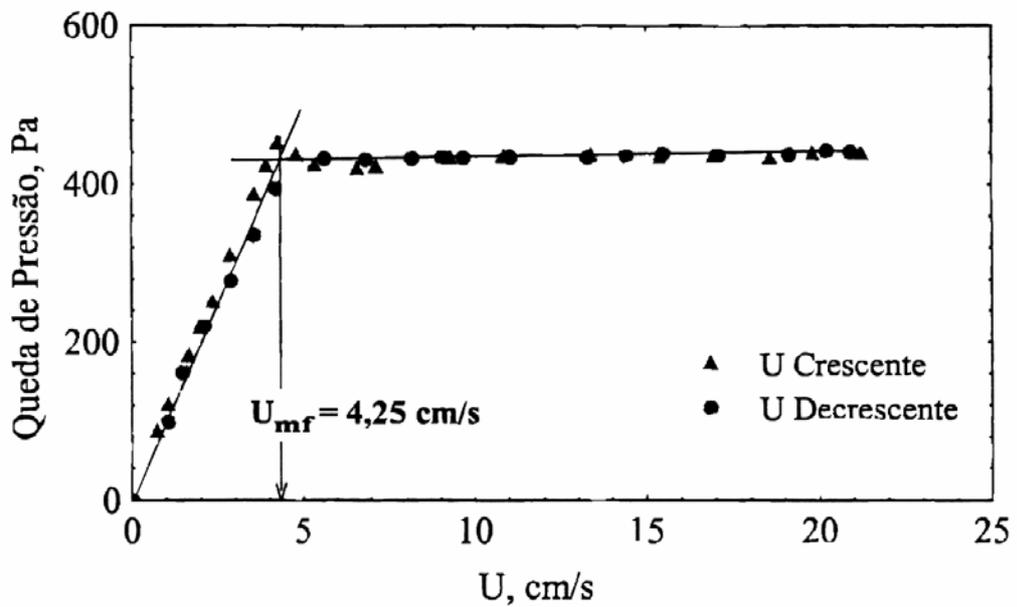


Figura 4.9 – Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC em leito fluidizado convencional,  $m=0,7$  kg,  $d_p=250-300$   $\mu\text{m}$  (SILVA, 2003)

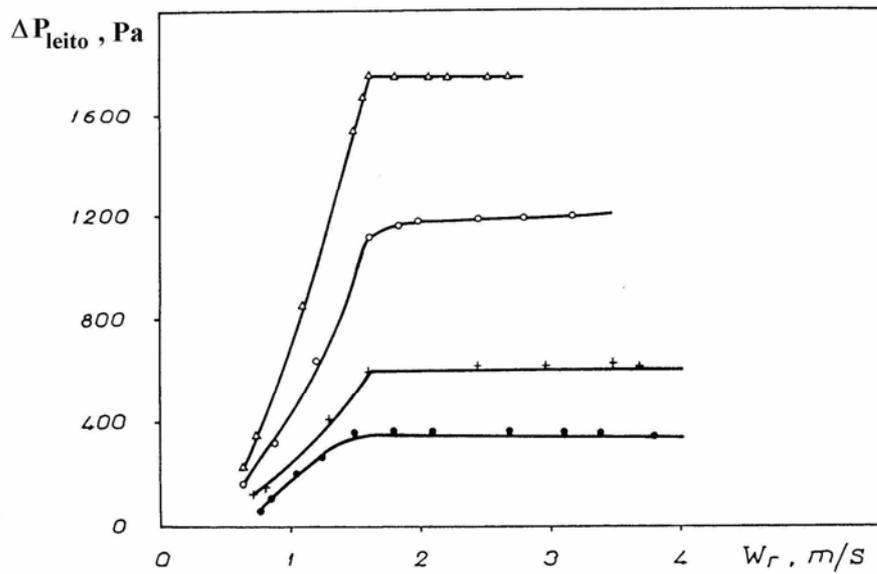


Figura 4.10 - Curvas de fluidização para o LFPR,  $f_{rd} = 3,33\text{Hz}$ , “●”  $m/A = 64 \text{ kg/m}^2$ ; “+”  $m/A = 96 \text{ kg/m}^2$ ; “○”  $m/A = 159 \text{ kg/m}^2$ ; “Δ”  $m/A = 222 \text{ kg/m}^2$ , (ELENKOV e DJURKOV, 1997)

Na Tabela 4.3 encontram-se os valores de velocidade de mínima fluidização obtidos pelo método proposto por RICHARDSON (1971) para os ensaios fluidodinâmicos realizados em leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo. Verifica-se que a imposição e variação da frequência de rotação do disco não influenciaram na velocidade de mínima fluidização. O aumento da carga de partículas também não influenciou na velocidade de mínima fluidização.

Tabela 4.3 – Valores de velocidade de mínima fluidização CMC seca

Massa (kg)	$u_{mf}$ (m/s)	$u_{mf}$ (m/s)	$u_{mf}$ (m/s)
	LFC	LFPR (5Hz)	LFPR (15Hz)
0,4	0,035	0,035	0,037
1,0	0,038	0,040	0,040
1,2	0,035	0,036	0,037
1,5	0,038	0,038	0,040

#### 4.2.2 - Estudo fluidodinâmico para partículas de Celulose Microcristalina úmidas

Na realização dos experimentos com as partículas de celulose microcristalina (CMC) úmidas, observou-se a formação de canais preferenciais e alguns *slugs* antes da fluidização. Verificou-se que independente da frequência de rotação do disco, a fluidização apresenta formação de canais preferenciais, bolhas e *slugs* no leito. A quantidade e intensidade destes diminuem com o decréscimo do teor de umidade do material, porém independente da frequência e do teor de umidade, a quantidade de canais preferenciais, *slugs* e bolhas é bem menor no leito fluidizado pulsado rotativo que no leito fluidizado convencional.

As Figuras 4.11 a 4.13 apresentam os gráficos de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar, obtidos para as partículas de celulose microcristalina úmidas em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional.

A Figura 4.11 mostra o gráfico de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar para a carga de 1 kg de celulose microcristalina com teor de umidade de 25-26 % b.u. em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional. Observa-se que o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado pulsado rotativo é semelhante independente da frequência de rotação do disco utilizada. Ao comparar o leito fluidizado pulsado rotativo com o leito fluidizado convencional, nota-se que os valores de queda de pressão são próximos, porém o valor da velocidade de mínima fluidização é diferente. Constata-se que a imposição da frequência de rotação do disco implica em um menor valor de velocidade de mínima fluidização para o leito fluidizado pulsado rotativo comparado ao leito fluidizado convencional.

Na Figura 4.12 observa-se o gráfico de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar para o ensaio realizado com a carga de 1 kg de celulose microcristalina com teor de umidade de 20-22 % b.u. em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional. Observa-se que, como para o maior teor de umidade utilizado (Figura 4.11), o comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado pulsado rotativo é semelhante, ou seja, a variação da frequência não influencia no comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado pulsado rotativo. Entretanto, ao comparar os equipamentos leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo, nota-se que como para o maior teor de

umidade utilizado (25-26 % b.u.), a velocidade de mínima fluidização é menor para o leito fluidizado pulsado rotativo.

Na Figura 4.13 pode-se observar o gráfico de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar para 1 kg de celulose microcristalina com o menor teor de umidade utilizado, ou seja, 19 % b.u. em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional. Nota-se que para este teor de umidade o comportamento fluidodinâmico e a velocidade de mínima fluidização do leito fluidizado pulsado rotativo são praticamente idênticos ao do leito fluidizado convencional.

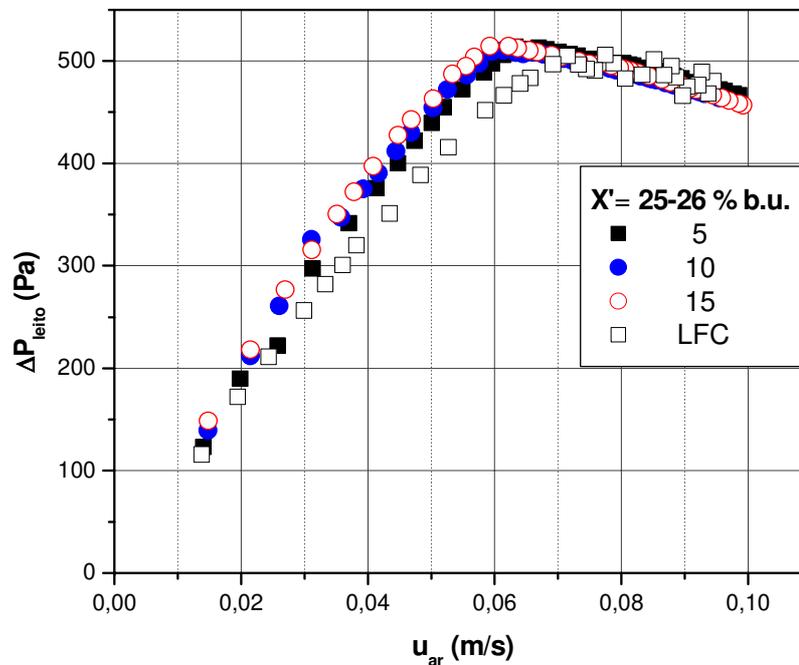


Figura 4.11 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para CMC em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, m=1 kg, X'= 25 a 26 % b.u.

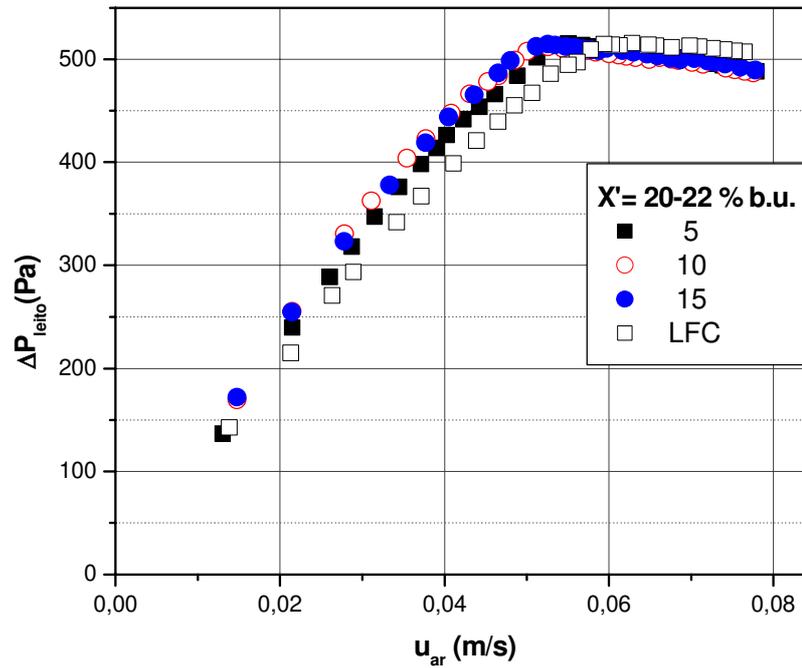


Figura 4.12 - Queda de pressão em função da velocidade do ar com CMC em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional,  $m=1 \text{ kg}$ ,  $X' = 20 \text{ a } 22\% \text{ b.u.}$

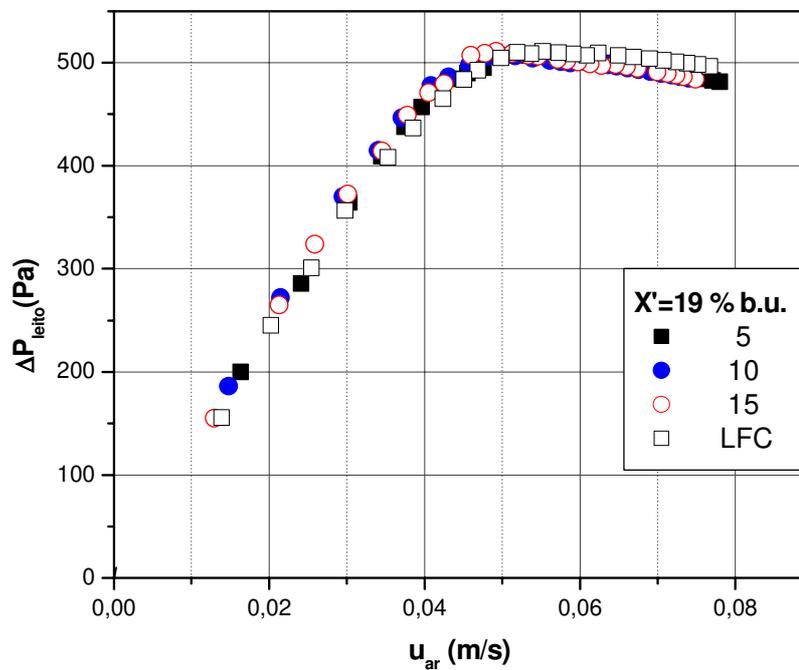


Figura 4.13 - Queda de pressão em função da velocidade do ar LFPR e LFC com CMC,  $m=1 \text{ kg}$ ,  $X' = 19\% \text{ b.u.}$

Por meio das Figuras 4.11 a 4.13 verifica-se que para a celulose microcristalina, os teores de umidade e a frequência de rotação do disco não influenciam na queda de pressão do leito de partículas. Entretanto, a velocidade de mínima fluidização varia com o teor de umidade. Para as partículas de celulose microcristalina no leito fluidizado pulsado rotativo, que se encontram sob a mesma condição, independente da frequência, o comportamento fluidodinâmico não se altera, ou seja, o efeito da variação da frequência de pulsação do disco pode ser desprezado.

Na Tabela 4.4 encontram-se os valores de velocidade de mínima fluidização obtidos pelo método proposto por RICHARDSON (1971) para os ensaios fluidodinâmicos realizados com partículas de celulose microcristalina úmidas em leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo.

Tabela 4.4 – Valores de velocidade de mínima fluidização celulose microcristalina úmida.

Teor de umidade (% b.u.)	$u_{mf}$ (m/s)	$u_{mf}$ (m/s)
	LFC	LFPR
25 a 26	0,062	0,056
20 a 22	0,053	0,048
19	0,044	0,044

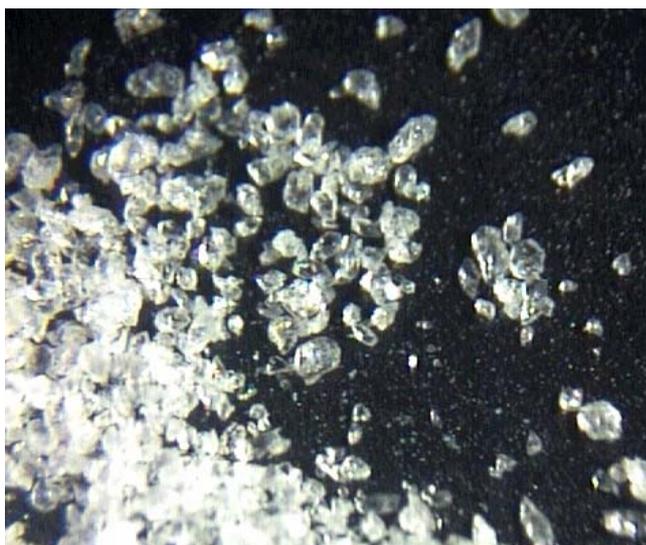
Pela Tabela 4.4 e pelas Figuras 4.11 a 4.13 observa-se a variação da velocidade de mínima fluidização com o teor de umidade para as partículas de celulose microcristalina em leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo. Pode-se observar que para o teor de umidade na faixa de 25 a 26 % b.u., a diferença do valor da velocidade de mínima fluidização é de  $\pm 0,006$  m/s e para o teor de umidade na faixa de 20 a 22 % b.u. é de  $\pm 0,005$  m/s. Para o menor teor de umidade utilizado não houve variação entre o valor da velocidade de mínima fluidização obtido no leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo, sendo o mesmo encontrado para as partículas de celulose microcristalina secas.

Ao comparar as Figuras 4.11 a 4.13 com a Figura 4.8, verifica-se que a frequência de rotação do disco não influencia na velocidade de mínima fluidização das partículas secas e úmidas para o leito fluidizado pulsado rotativo. Porém, o teor de umidade influencia, como esperado. Constata-se que para as condições estudadas não há vantagem em utilizar o leito fluidizado pulsado rotativo para partículas de celulose microcristalina secas, devido ao fato do comportamento fluidodinâmico ser igual ao obtido para o leito fluidizado convencional. Entretanto, para partículas úmidas o leito fluidizado pulsado rotativo proporciona uma fluidização similar ao leito fluidizado convencional, mas ao adicionar a pulsação da corrente de gás, ocorre uma leve redução na velocidade de mínima fluidização e uma menor formação de canais preferenciais, bolhas e *slugs* no leito.

#### 4.2.3 - Estudo fluidodinâmico para partículas de Ácido Adípico secas

O estudo fluidodinâmico do ácido adípico em leito fluidizado pulsado rotativo foi realizado com a finalidade de verificar se o equipamento possibilita o processamento de sólidos de difícil fluidização convencional.

A Figura 4.14 ilustra o material estudado nas diferentes faixas de tamanho analisadas. Observa-se que as partículas com menor diâmetro apresentam formato alongado, enquanto que as de maior diâmetro possuem forma mais regular.



(a)



(b)

Figura 4.14 – Ácido adípico seco, (a)  $d_p = 75-250 \mu\text{m}$ , (b)  $d_p = 420-600 \mu\text{m}$ , Microscopia Óptica, aumento de 20x.

Na realização dos experimentos com o ácido adípico no leito fluidizado pulsado rotativo observou-se que a fluidização não ocorre em todo o leito no ponto de mínima fluidização. Inicialmente ocorre o rompimento de um ou mais canais preferenciais e posteriormente as partículas deslizam pela parede do leito de modo ascendente e descendente. Surgem pequenas bolhas no fundo do leito, com o aumento da velocidade cresce o número de bolhas e o movimento destas torna-se mais rápido. Para as partículas com diâmetro de  $75-250 \mu\text{m}$ , durante os ensaios observou-se uma maior formação de bolhas e canais preferenciais no leito, e uma faixa de fluidização menor entre a velocidade de mínima fluidização e a velocidade para iniciar as bolhas, em relação a observada para o diâmetro de  $420-600 \mu\text{m}$ .

No leito fluidizado convencional observou-se o mesmo comportamento apresentado pelo leito fluidizado pulsado rotativo no ponto de mínima fluidização, em seqüência as partículas deslizam pela parede do leito de modo ascendente e descendente. Posteriormente surgem pequenas bolhas no fundo do leito, com o aumento da velocidade cresce o número de bolhas. Para as partículas menores o leito fluidizado pulsado rotativo apresenta ausência ou uma pequena formação de canais preferenciais e uma quantidade menor de bolhas comparado ao leito fluidizado convencional.

Os gráficos de queda de pressão em função da velocidade do ar (crescente e decrescente) para o estudo fluidodinâmico do ácido adípico seco foram obtidos em função da frequência de rotação do disco, carga e diâmetro de partícula.

As Figuras 4.15 a 4.17 apresentam os gráficos de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar obtidas para algumas das condições estudadas no leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo para as partículas de ácido adípico com diâmetro de 75-250  $\mu\text{m}$ . Para os ensaios realizados em leito fluidizado convencional com o ácido adípico (75-250  $\mu\text{m}$ ) não foi possível medir o ponto referente a queda de pressão máxima. Observa-se que o comportamento obtido para a velocidade crescente é similar ao obtido para a velocidade decrescente.

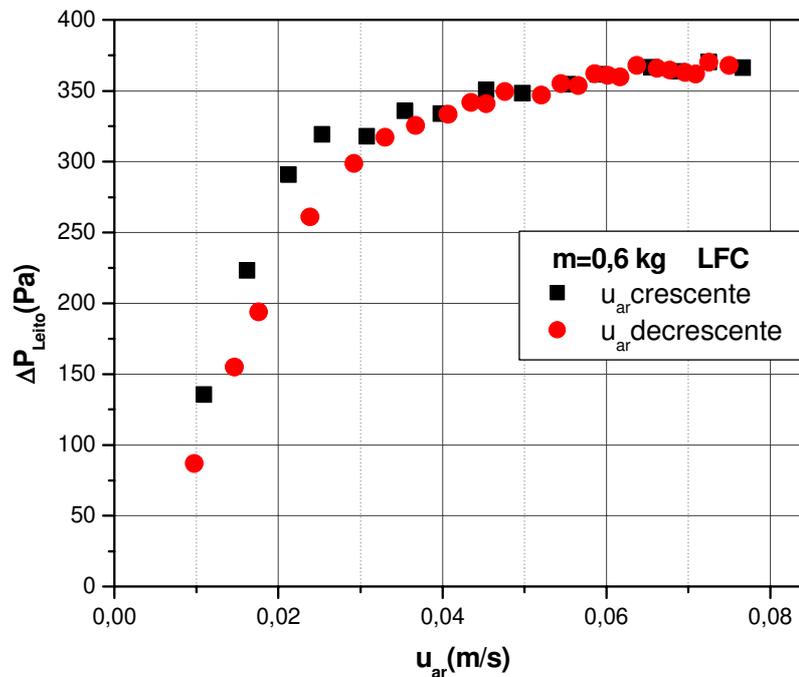


Figura 4.15 – Queda de pressão em função da velocidade do ar para ácido adípico em leito fluidizado convencional,  $m=0,6$  kg,  $d_p=75-250$   $\mu\text{m}$

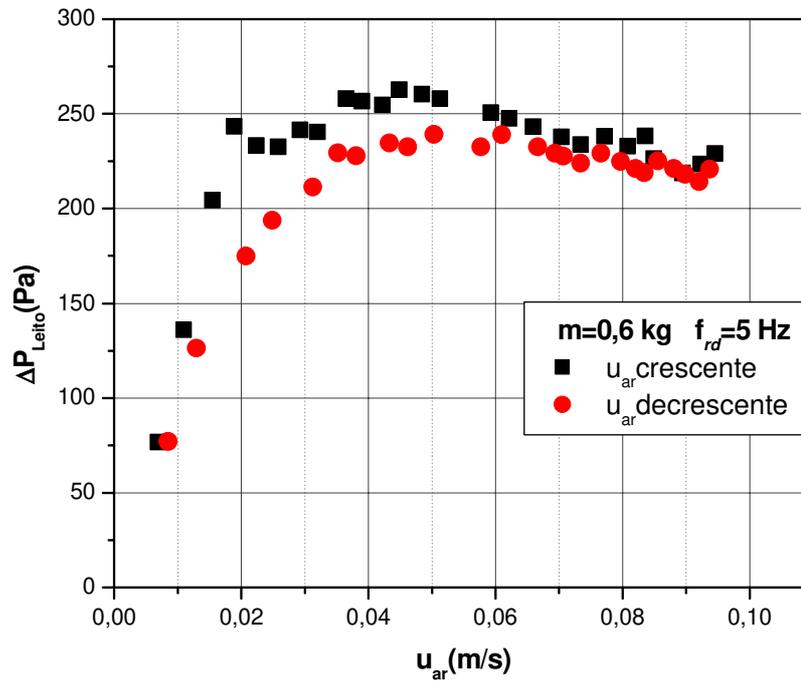


Figura 4.16 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico,  $m=0,6$  kg,  $d_p=75-250$   $\mu\text{m}$ ,  $f_{rd}=5$  Hz

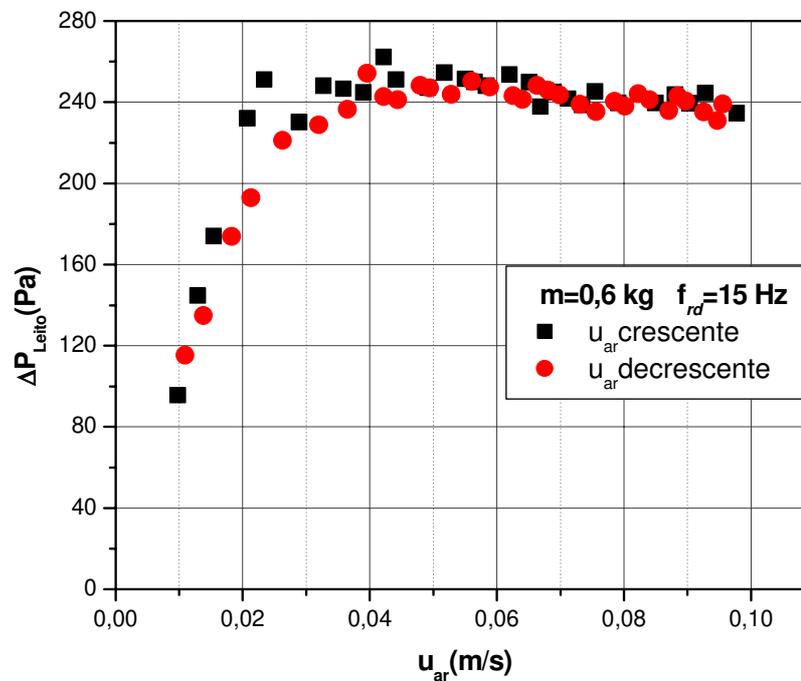


Figura 4.17 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico,  $m=0,6$  kg,  $d_p=75-250$   $\mu\text{m}$ ,  $f_{rd}=15$  Hz

As Figuras 4.18 a 4.20 apresentam os gráficos de queda de pressão em função da velocidade superficial do ar obtidas para algumas das condições estudadas no leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo para as partículas de ácido adípico com diâmetro de 420-600  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Para todo o intervalo de frequência e carga de partículas estudados em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional obteve-se comportamento similar ao apresentado.

Por meio das Figuras 4.19 e 4.20 observa-se que o comportamento fluidodinâmico do ácido adípico (420-600  $\mu\text{m}$ ) é semelhante, independente da frequência e quantidade de material no leito. A fluidização em leito fluidizado pulsado rotativo para o ácido adípico (420-600  $\mu\text{m}$ ) também apresentou flutuações de pressão principalmente para a menor frequência utilizada, mas menos acentuada em relação ao leito fluidizado convencional. O comportamento apresentado para ácido adípico (420-600  $\mu\text{m}$ ) em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional foi obtido para todo o intervalo de frequência e carga de partículas estudados.

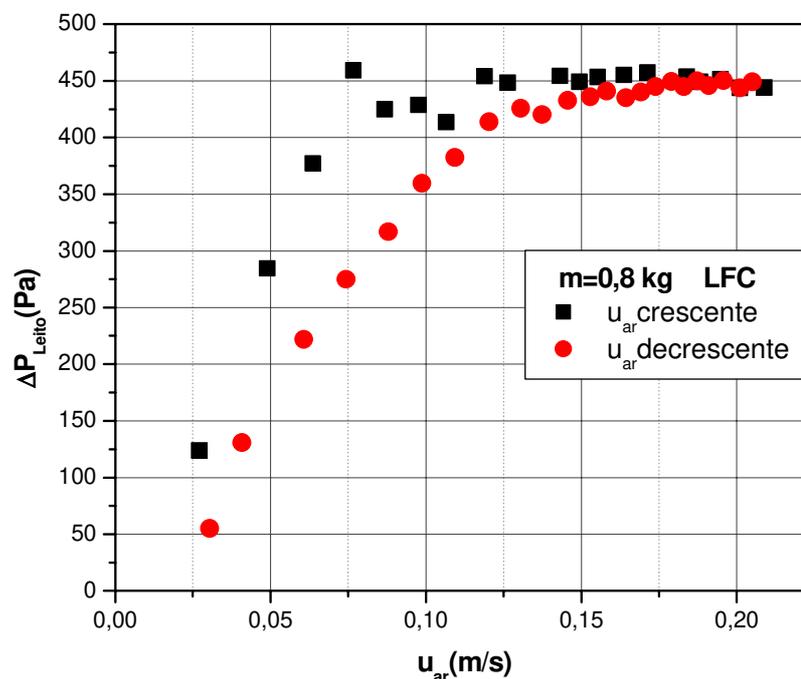


Figura 4.18 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado convencional com ácido adípico,  $m=0,8$  kg,  $d_p=420-600$   $\mu\text{m}$

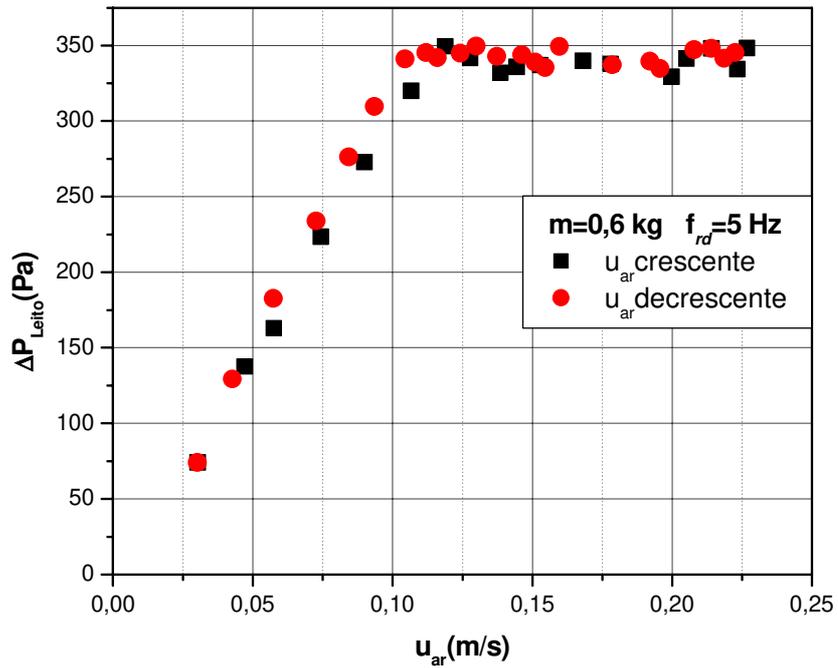


Figura 4.19 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico,  $m=0,6 \text{ kg}$ ,  $d_p=420-600 \mu\text{m}$ ,  $f_{rd}=5 \text{ Hz}$

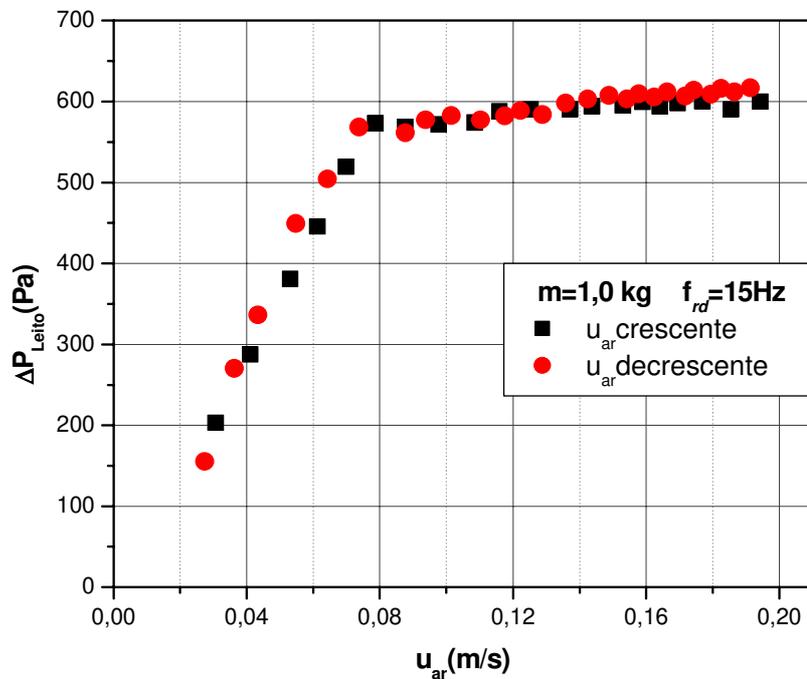


Figura 4.20 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico,  $m=1,0 \text{ kg}$ ,  $d_p=420-600 \mu\text{m}$ ,  $f_{rd}=15 \text{ Hz}$

Nas Figuras 4.21 e 4.22 pode-se acompanhar a queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar para o ácido adípico (75-250  $\mu\text{m}$ ) no leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, para as cargas de partículas de 0,6 e 0,8 kg, respectivamente.

Observa-se nas Figuras 4.21 e 4.22 que, independentemente da quantidade de material no leito, ao passar de 5 para 15 Hz não ocorre alteração no comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado pulsado rotativo, ou seja a queda de pressão e a velocidade na condição de mínima fluidização não sofrem influência do aumento da frequência de rotação do disco. No trabalho de KUDRA *et. al* (2002) também foi observado que a frequência não influencia no comportamento fluidodinâmico de partículas secas.

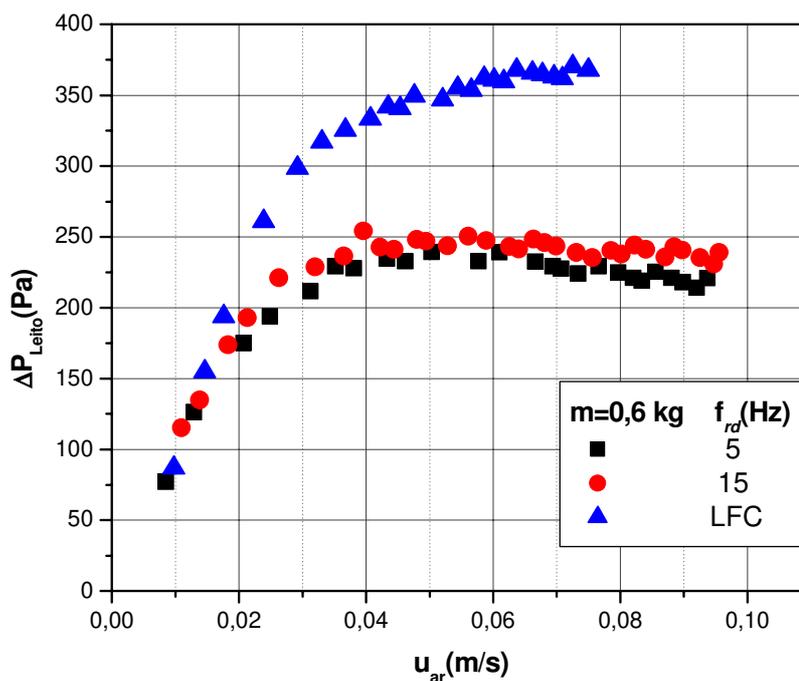


Figura 4.21 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com ácido adípico,  $m=0,6$  kg,  $d_p=75-250$   $\mu\text{m}$

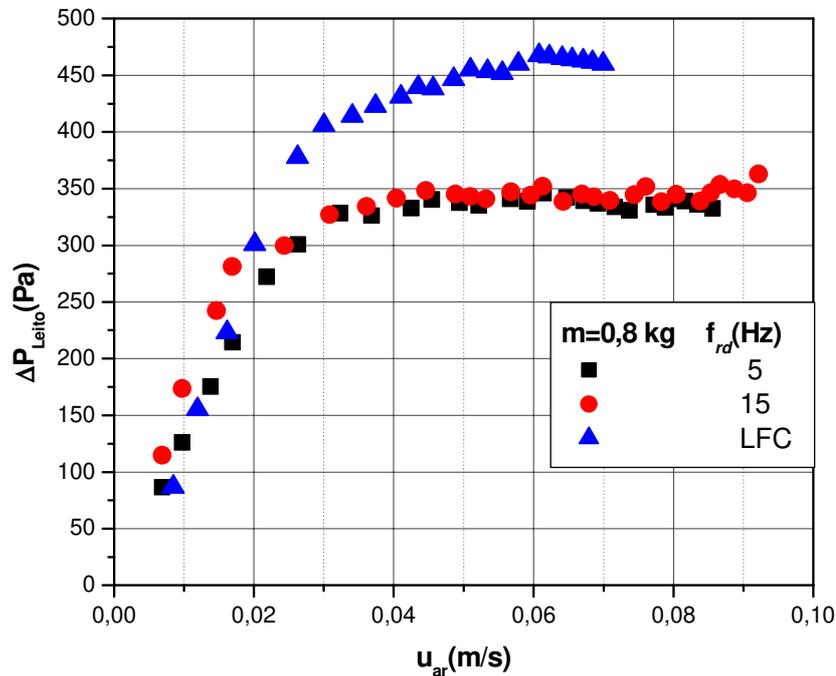


Figura 4.22 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com ácido adípico,  $m=0,8$  kg,  $d_p=75-250$   $\mu\text{m}$

Contudo, ao se comparar o comportamento do leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional das Figuras 4.21 e 4.22 nota-se que independente da frequência de rotação do disco e quantidade de material, ocorre redução na queda de pressão do leito fluidizado pulsado rotativo em relação ao leito fluidizado convencional. Este comportamento também foi observado por UGRI (2003) (Figura 4.23), ao trabalhar com partículas do grupo A da classificação de Geldart e diâmetro médio de Sauter de 148,2  $\mu\text{m}$  em leito fluidizado pulsado rotativo, e por MORIS (2002) ao trabalhar com ácido adípico em leito fluidizado vibrado. Isto pode ser devido as partículas menores possuírem forças interpartículas maiores, acarretando em maior formação de canais preferenciais e uma queda de pressão menor.

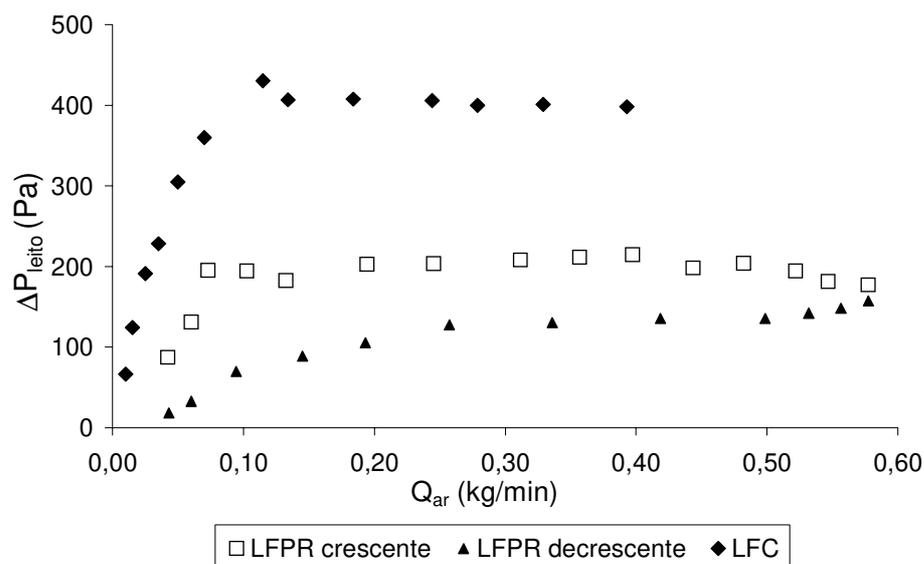


Figura 4.23 - Queda de pressão em função da velocidade do ar do ácido 2-hidroxibenzóico seco em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional,  $m=0,4$  kg,  $f_{rd}=5\text{Hz}$  (UGRI, 2003)

Na Tabela 4.5 encontram-se os valores de velocidade de mínima fluidização obtidos pelo método proposto por RICHARDSON (1971) para os ensaios fluidodinâmicos do ácido adípico seco ( $75\text{-}250\ \mu\text{m}$ ) realizados em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional. A partir desse resultado e pelas Figura 4.21 e 4.19, verifica-se que a velocidade de mínima fluidização apresenta um valor médio de  $0,031 \pm 0,002$  m/s, indicando que o valor da velocidade de mínima fluidização não sofre influência com o aumento da carga e da frequência de rotação do disco.

Tabela 4.5 - Valores de velocidade de mínima fluidização do ácido adípico,  $d_p=75\text{-}250\ \mu\text{m}$

Massa (kg)	$u_{mf}$ (m/s)		
	LFC	LFPR (5Hz)	LFPR (15Hz)
0,6	0,032	0,033	0,032
0,8	0,032	0,029	0,027

Na Tabela 4.6 encontram-se os valores de queda de pressão na condição de mínima fluidização obtidos experimentalmente para os ensaios fluidodinâmicos do ácido adípico seco (75-250  $\mu\text{m}$ ) realizados em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional. A partir desse resultado e pelas Figuras 4.21 e 4.22 verifica-se que a queda de pressão na condição de mínima fluidização cresce com o aumento da carga de partículas independente do equipamento utilizado. Ao se comparar os equipamentos, observa-se que o valor da queda de pressão diminui com a imposição da frequência de rotação do disco. Esta observação também foi feita por AMBROSIO-UGRI e TARANTO (2002).

Tabela 4.6 - Valores de queda de pressão na condição de mínima fluidização do ácido adípico seco,  $d_p=75-250 \mu\text{m}$

<b>Massa (kg)</b>	<b><math>\Delta P_{mf}</math> (Pa) LFC</b>	<b><math>\Delta P_{mf}</math> (Pa) LFPR (5Hz)</b>	<b><math>\Delta P_{mf}</math> (Pa) LFPR (15Hz)</b>
0,6	328,2	239,2	250,3
0,8	424,1	335,7	334,6

As Figuras 4.24 a 4.26 apresentam os gráficos de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar para o ácido adípico (420-600  $\mu\text{m}$ ) em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional e carga de partículas de 0,6, 0,8 e 1,0 kg. Observa-se que assim como para o menor diâmetro utilizado, ao passar de 5 para 15 Hz não ocorre alteração no comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado pulsado rotativo.

Ao comparar-se as Figuras 4.24 a 4.26 observa-se que, ao contrário do obtido para as Figuras 4.21 e 4.22, independente da frequência de rotação do disco e quantidade de material, ocorrem redução na queda de pressão para os ensaios realizados no leito fluidizado convencional em relação ao leito fluidizado pulsado rotativo. Moris, (2002) ao trabalhar com ácido adípico em leito vibrofluidizado também observou redução na queda de pressão do leito vibrofluidizado em relação ao leito fluidizado convencional para esta faixa de diâmetro de partícula estudado.

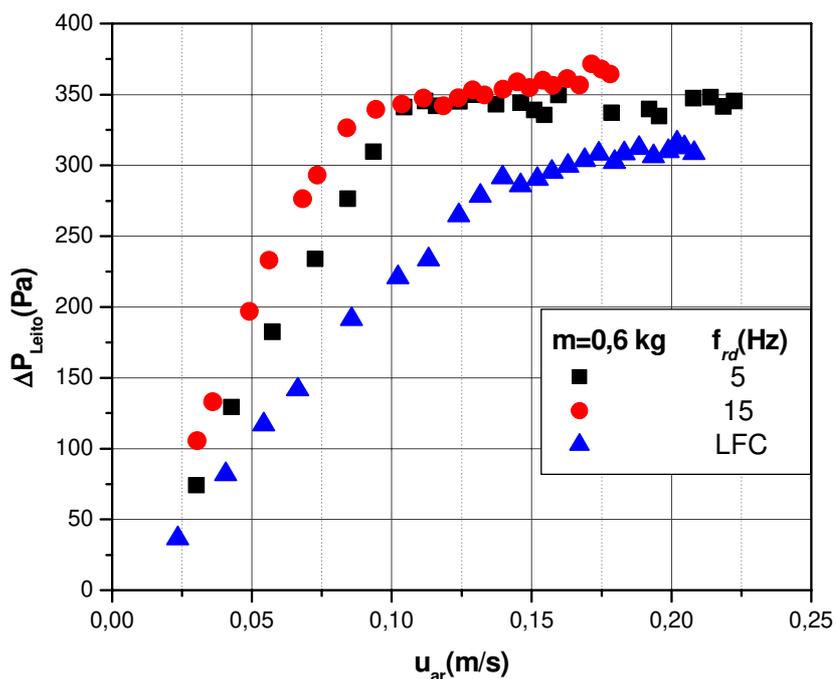


Figura 4.24 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com ácido adípico  $m=0,6$  kg,  $d_p=420-600$   $\mu\text{m}$

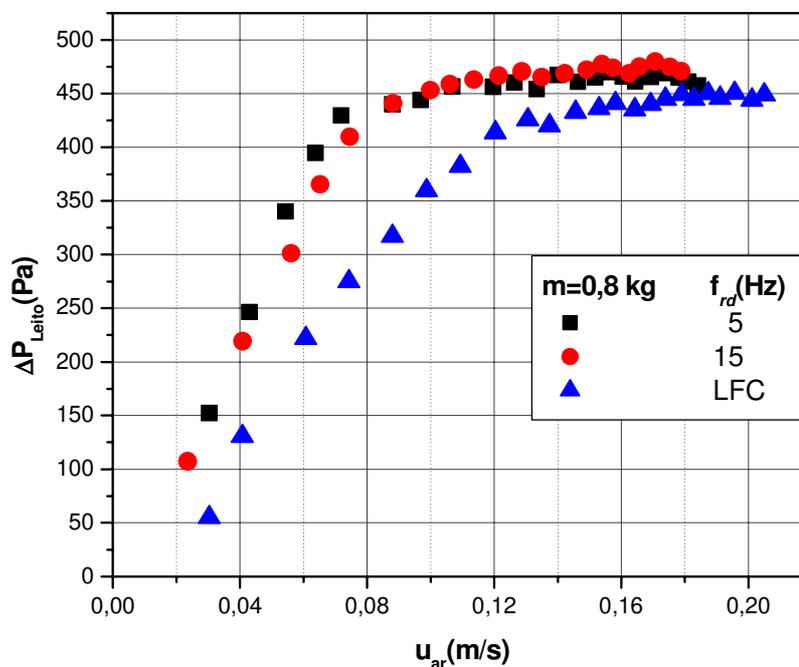


Figura 4.25 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com ácido adípico  $m=0,8$  kg,  $d_p=420-600$   $\mu\text{m}$

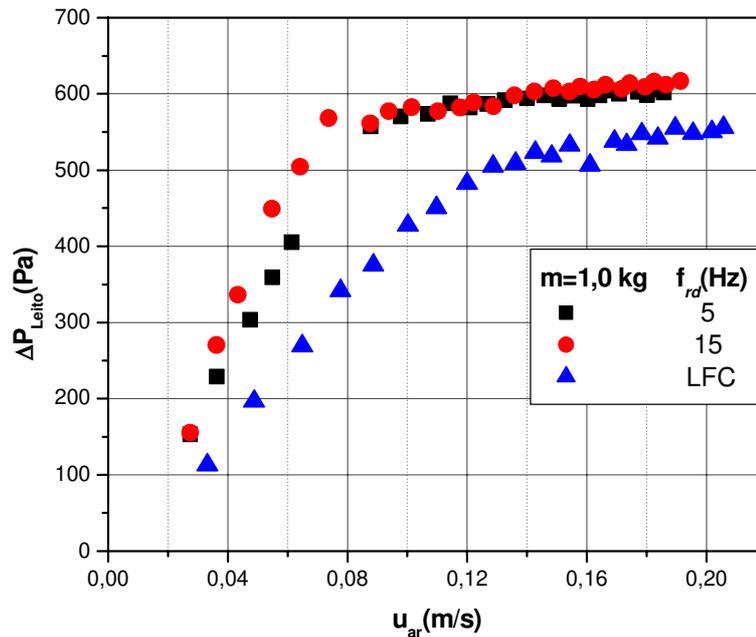


Figura 4.26 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, com ácido adípico,  $m=1,0$  kg,  $d_p=420-600$   $\mu\text{m}$

Na Tabela 4.7 encontra-se os valores de velocidade de mínima fluidização obtidos pelo método proposto por RICHARDSON (1971) para os ensaios fluidodinâmicos do ácido adípico seco (420-600  $\mu\text{m}$ ) realizados em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional. A partir desse resultado, verifica-se que a velocidade de mínima fluidização apresenta um valor médio de  $0,128 \pm 0,007$  m/s para o leito fluidizado convencional e  $0,089 \pm 0,007$  m/s para o leito fluidizado pulsado rotativo. Observa-se que o valor da velocidade de mínima fluidização não sofre influência com o aumento da carga, mas ocorre redução no seu valor ao se impor a pulsação da corrente de gás.

Tabela 4.7 - Valores de velocidade de mínima fluidização do ácido adípico,  $d_p=420-600$   $\mu\text{m}$

Massa (kg)	$u_{\text{mf}}$ (m/s)	$u_{\text{mf}}$ (m/s)	$u_{\text{mf}}$ (m/s)
	LFC	LFPR (5Hz)	LFPR (15Hz)
0,6	0,135	0,106	0,085
0,8	0,120	0,084	0,091
1,0	0,123	0,089	0,078

Na Tabela 4.8 encontram-se os valores de queda de pressão na condição de mínima fluidização obtidos experimentalmente para os ensaios fluidodinâmicos do ácido adípico seco (420-600  $\mu\text{m}$ ) realizados em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional. A partir desse resultado e pelas Figura 4.24 a 4.26, verifica-se que a queda de pressão na condição de mínima fluidização é influenciada pela quantidade de material dentro do leito, independente do equipamento utilizado. Ao comparar se os equipamentos, observa-se que o valor da queda de pressão aumenta com a imposição da frequência de rotação do disco.

Tabela 4.8 - Valores de queda de pressão na condição de mínima fluidização do ácido adípico seco,  $d_p=420-600 \mu\text{m}$

<b>Massa (kg)</b>	<b><math>\Delta P_{mf}</math> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_{mf}</math> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_{mf}</math> (Pa)</b>
	<b>LFC</b>	<b>LFPR (5Hz)</b>	<b>LFPR (15Hz)</b>
0,6	287,2	343,6	335,9
0,8	422,5	440,6	458,9
1,0	503,5	573,3	569,5

Ao comparar se as Figuras 4.21 a 4.26 e as Tabelas 4.5 a 4.8 observa-se que a carga, o diâmetro de partícula e a imposição da frequência influenciam na queda de pressão. Enquanto que para a velocidade de mínima fluidização os fatores que influenciaram foram somente o diâmetro e a imposição da frequência.

Ao comparar o estudo fluidodinâmico realizado com as partículas secas de celulose micricristalina e ácido adípico em leito fluidizado pulsado rotativo, constata-se que independente da carga e do material a variação da frequência de rotação do disco não influenciou no comportamento fluidodinâmico de ambas partículas secas.

Ao comparar os equipamentos observa-se que o comportamento fluidodinâmico obtido para a celulose microcristalina seca foi similar em ambos os leitos, não apresentando alterações na velocidade de mínima fluidização e queda de pressão com a mudança de equipamento. Já a fluidodinâmica do ácido adípico foi influenciada pela mudança de

equipamento, isso pode ser devido as propriedades físico-químicas, as forças interpartículas e ao fato do ácido adípico apresentar características coesivas.

#### 4.2.4 - Estudo Fluidodinâmico para Partículas de Ácido Adípico Úmido

Foram realizados ensaios fluidodinâmicos em leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo, para uma carga de partículas de ácido adípico fixa (0,6 kg), variando-se o diâmetro e o teor de umidade inicial do material seguindo a metodologia descrita no capítulo 3.

As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam os gráficos de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar para os ensaios realizados em leito fluidizado convencional para o ácido adípico com diâmetro de partícula de 75-250 e 420-600  $\mu\text{m}$  e teor de umidade 2 % b.u..

Na realização dos experimentos com partículas de ácido adípico em leito fluidizado convencional, observou-se inicialmente formação de canais preferenciais, bolhas e aglomeração das partículas. A uma certa velocidade do ar as partículas superiores movimentam-se e as partículas próximas ao prato perfurado em grande parte aglomeradas, permanecem imóveis. Deste modo, o leito se divide em uma região de leito fixo e uma região de leito fluidizado. Este comportamento obtido e apresentado nas Figuras 4.27 e 4.28 são semelhantes ao descrito por GELDART (1986) como segregação. Este comportamento foi observado para as duas faixas de diâmetro utilizadas. No entanto, para o maior diâmetro observou-se que ao aumentar se a velocidade, o movimento das partículas torna-se mais intenso dificultando a visualização da região de leito fixo e dos aglomerados, conseqüentemente.

As Figuras 4.27 apresenta o gráfico de queda de pressão em função da velocidade do ar para os ensaios realizados em leito fluidizado convencional com ácido adípico com diâmetro de partícula de 75-250  $\mu\text{m}$  e teor de umidade 2 % b.u.. A Figura 4.28 mostra o gráfico de queda de pressão em função da velocidade do ar para os ensaios realizados em leito fluidizado convencional com ácido adípico com diâmetro de partícula de 420-600  $\mu\text{m}$  e teor de umidade 2 % b.u..

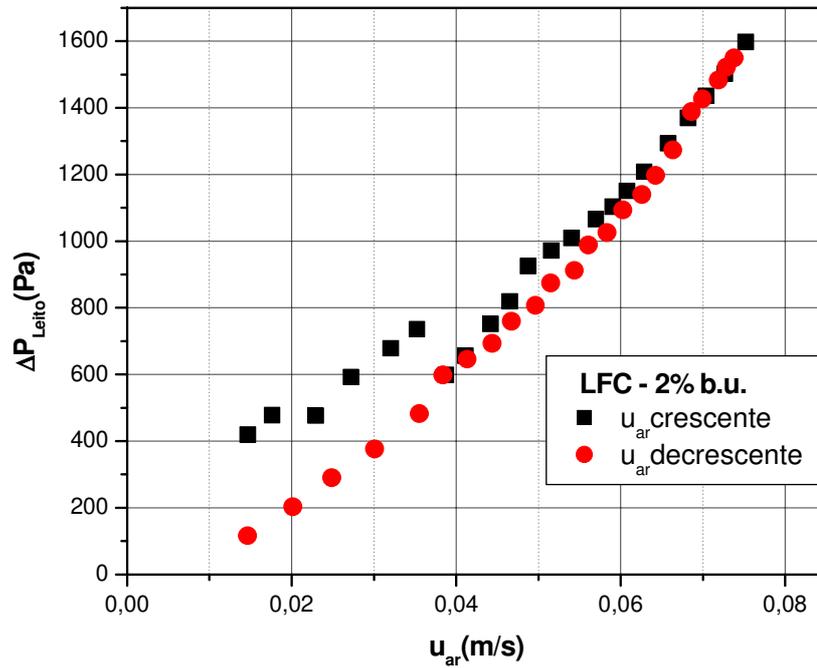


Figura 4.27 – Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado convencional com ácido adípico,  $d_p = 75-250 \mu\text{m}$ ,  $m=0,6 \text{ kg}$ ,  $X' = 2\% \text{ b.u.}$

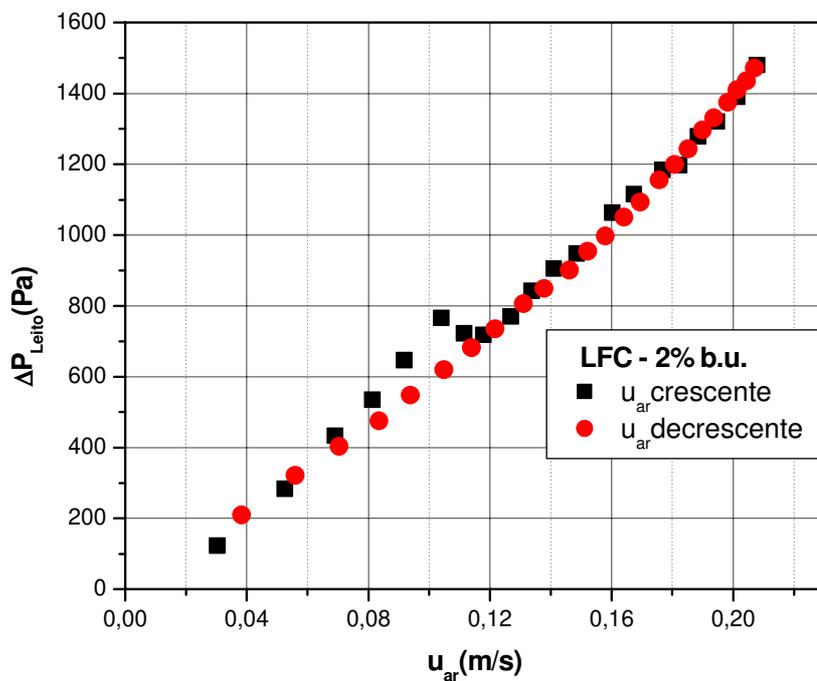


Figura 4.28 – Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado convencional com ácido adípico,  $d_p = 420-600 \mu\text{m}$ ,  $m=0,6 \text{ kg}$ ,  $X' = 2\% \text{ b.u.}$

Analisando-se as Figuras 4.27 e 4.28, observa-se que o regime de fluidização não foi atingido nestas condições. Ao trabalhar com leito vibrofluidizado e leito fluidizado convencional, MARRING *et al* (1994) e MORIS (2002) também não conseguiram atingir o regime de fluidização no leito fluidizado convencional com amido de batata e ácido adípico úmido, respectivamente.

A Figura 4.29 mostra a imagem de uma amostra de ácido adípico (75-250  $\mu\text{m}$ ) obtida antes e depois do ensaio fluidodinâmico ( Figura 4.30), realizado no leito fluidizado pulsado rotativo. Observa-se pela Figura 4.29, que devido a mudança provocada pela água na superfície do material, as partículas se aderem formando aglomerados.

Ao realizar se o ensaio (Figura 4.30), com ácido adípico 75-250  $\mu\text{m}$  com teor de umidade 2 % b.u. e frequência de rotação do disco de 5 Hz, observou-se a formação de um *slug* pistonado, o qual manteve suspenso todo o leito de partículas. Posteriormente, as partículas caem no prato perfurado e surgem canais preferenciais. Algumas partículas que estão próximas ao prato perfurado aglomeram-se logo após o início da fluidização. Na superfície ocorre movimento intenso das partículas, devido as bolhas, *slugs* e canais preferenciais, dificultando a identificação da superfície do leito. Com o aumento da velocidade, os aglomerados se movimentam e os menores por vezes são arrastados para cima. Devido à intensidade da fluidização não é possível afirmar que ocorre quebra dos aglomerados ou se eles apenas se movem no leito. Para a frequência de 15 Hz o comportamento foi semelhante ao observado para a frequência de 5 Hz, porém não ocorreu *slug* pistonado e a formação de aglomerados e canais preferenciais foi menor.



(a)



(b)

Figura 4.29 – Ácido adípico úmido,  $X' = 2\%$  b.u.,  $f_{rd} = 5$  Hz,  $d_p = 75-250\ \mu\text{m}$   
(a) antes do ensaio, (b) depois do ensaio, Microscopia Óptica, aumento de 20x

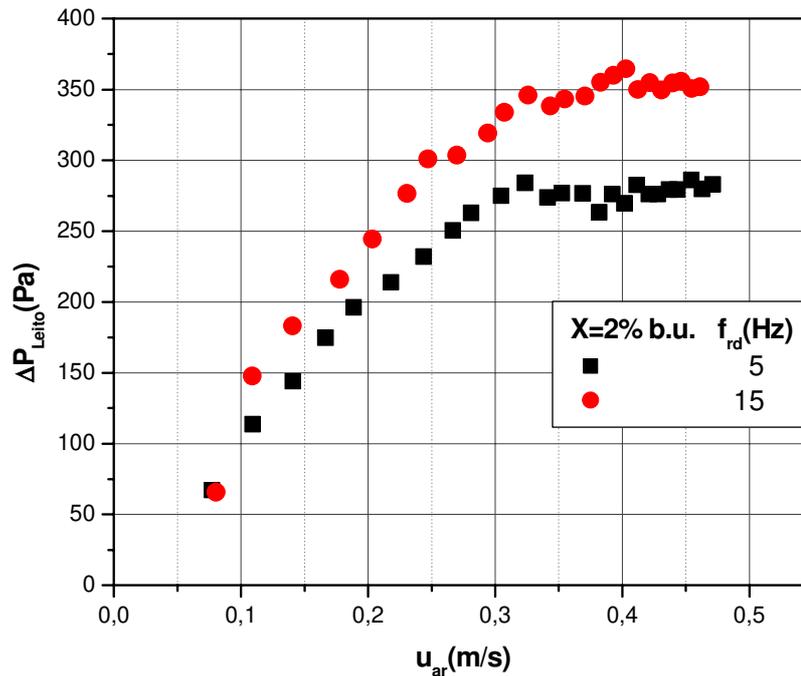


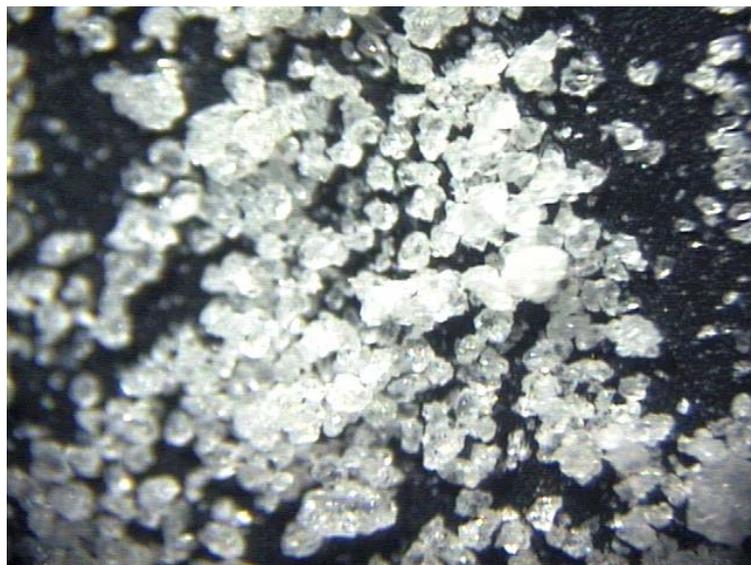
Figura 4.30 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em LFPR com ácido adípico  $d_p = 75-250 \mu\text{m}$ ,  $m=0,6 \text{ kg}$ ,  $X' = 2 \%$  b.u.

A Figura 4.31 mostra a imagem de uma amostra de ácido adípico ( $75-250 \mu\text{m}$ ) obtida antes e depois do ensaio fluidodinâmico (Figura 4.32) em leito fluidizado pulsado rotativo. Observa-se que como para o menor teor de umidade utilizado, as partículas se aderem formando aglomerados.

Ao realizar se o ensaio (Figura 4.32), com ácido adípico ( $d_p=75-250 \mu\text{m}$ ) com teor de umidade 6-7 % b.u. e frequência de 5 Hz, inicialmente observou-se a formação canais preferenciais no leito de partículas. Algumas partículas que estão próximas ao prato perfurado aglomeram-se formando blocos de partículas semelhantes a torrões de açúcar. Com o aumento da velocidade formam-se canais preferenciais e bolhas, mas é possível observar ainda que algumas regiões do leito permanecem imóveis. A certa velocidade do gás ocorre movimento intenso, devido as bolhas, *slugs* e canais preferenciais dificultando a identificação da superfície do leito. Com o aumento da velocidade, os aglomerados se movimentam, mas novamente não é possível afirmar se ocorre quebra destes. Para a frequência de 15 Hz o comportamento foi semelhante ao observado para o leito fluidizado convencional.



(a)



(b)

Figura 4.31 - Ácido adípico úmido,  $X'=6$  % b.u.,  $f_{rd}=5$  Hz,  $d_p=75-250$   $\mu\text{m}$   
(a) antes do ensaio, (b) depois do ensaio, Microscopia Óptica, aumento de 20x

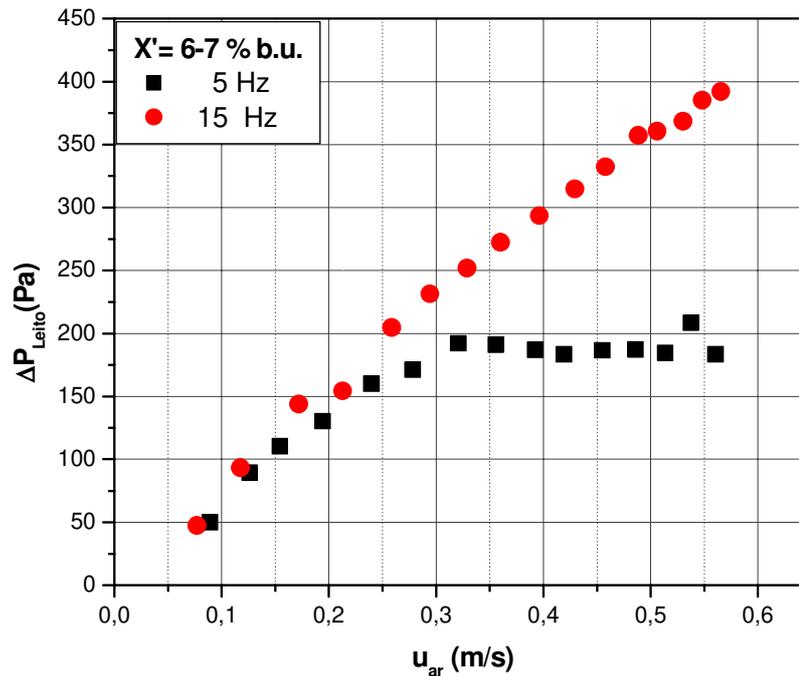


Figura 4.32 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico,  $d_p = 75-250 \mu\text{m}$ ,  $X' = 6-7 \%$  b.u.

Na Figura 4.33 estão apresentados alguns dados obtidos por MORIS (2002) ao trabalhar com ácido adípico úmido (2,8 % b.u.) em leito fluidizado convencional e leito vibrofluidizado.

Ao comparar se as Figuras 4.27, 4.30 e 4.32 com a Figura 4.33, observa-se que em ambos os casos não foi possível a fluidização convencional para o material úmido. Comparando se o leito fluidizado pulsado rotativo com o vibrofluidizado nota-se que para o teor de umidade de 2,8 % o aumento da frequência influencia no processo impedindo a fluidização do material em leito vibrofluidizado, o mesmo ocorre para o leito fluidizado pulsado rotativo, porém somente para o teor de umidade de 6 % b.u.

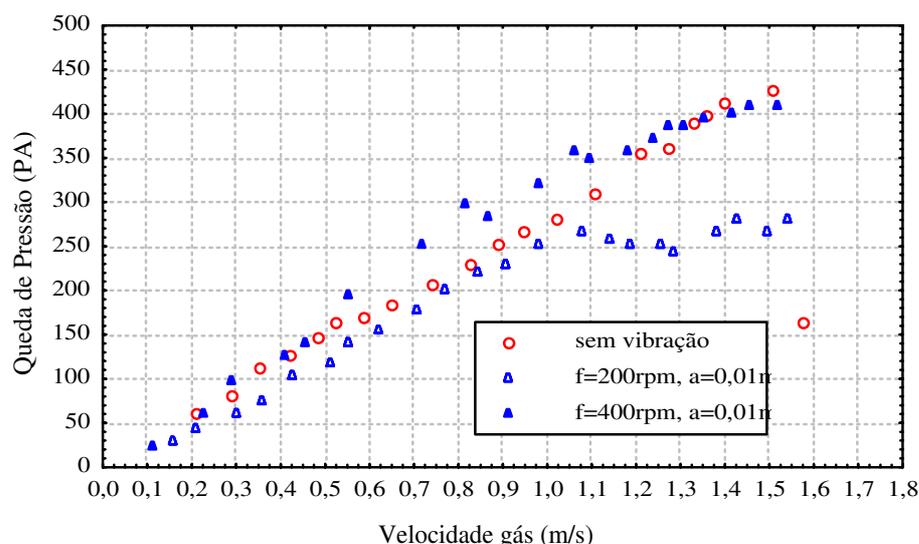


Figura 4.33 – Queda de pressão em função da velocidade do ar para ácido adípico em leito vibrofluidizado, amplitude de 0,01 m,  $m=0,3$  kg,  $X' = 2,8$  % (MORIS, 2002)

Na Tabela 4.9 encontram-se os valores de velocidade de mínima fluidização obtidos pelo método proposto por RICHARDSON (1971) para os ensaios fluidodinâmicos do ácido adípico úmido (75-250  $\mu\text{m}$ ) realizados em leito fluidizado pulsado rotativo. A partir desse resultado, verifica-se que a velocidade de mínima fluidização apresenta um valor médio de  $0,287 \pm 0,021$  m/s para o leito fluidizado pulsado rotativo. Observa-se que o valor da velocidade de mínima fluidização sofre uma leve influência com o aumento do teor de umidade para a frequência de 5 Hz.

Tabela 4.9 - Valores de velocidade de mínima fluidização do ácido adípico úmido,  $d_p=75-250 \mu\text{m}$

$X'$ (% b.u.)	$u_{mf}$ (m/s)	
	LFPR (5Hz)	LFPR (15Hz)
2	0,285	0,307
6	0,305	—

Na Tabela 4.10 encontram-se os valores de queda de pressão na condição de mínima fluidização obtidos experimentalmente para os ensaios fluidodinâmicos do ácido adípico úmido (75-250  $\mu\text{m}$ ) realizados em leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo. A partir desse resultado e pelas Figuras 4.30 e 4.32, verifica-se que a queda de pressão na condição de mínima fluidização sofre influencia da frequência de rotação do disco e do teor de umidade. Para o teor de umidade de 2 % b.u. o aumento da frequência de rotação do disco gera um aumento na queda de pressão. Enquanto que para o maior teor de umidade o aumento da frequência de rotação do disco impossibilita a fluidização.

Tabela 4.10 - Valores de queda de pressão na condição de mínima fluidização do ácido adípico úmido,  $d_p=75-250 \mu\text{m}$

<b>X'</b> (% b.u.)	<b><math>\Delta P_{mf}</math> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_{mf}</math> (Pa)</b>
	<b>LFPR (5Hz)</b>	<b>LFPR (15Hz)</b>
2	272,5	348,6
6	199,4	—

A Figura 4.34 apresenta o gráfico de queda de pressão em função da velocidade decrescente do ar obtidas em leito fluidizado pulsado rotativo para o ácido adípico com diâmetro de 420-600  $\mu\text{m}$  e teor de umidade 2% b.u..

Nos ensaios realizados com ácido adípico 420-600  $\mu\text{m}$  (Figura 4.34), teor de umidade 2 % b.u. e frequência de 5 e 15 Hz não foi observada a formação de aglomerados e *slug* pistonado. Observou-se a formação de canais preferenciais e fluidização borbulhante bastante intensa. Não foi possível identificar a superfície do leito devido a intensidade da fluidização. O comportamento observado para as frequências de 5 e 15 Hz foi semelhante, diferindo somente no decréscimo da intensidade e na formação de bolhas e canais preferenciais ao aumentar se a frequência.

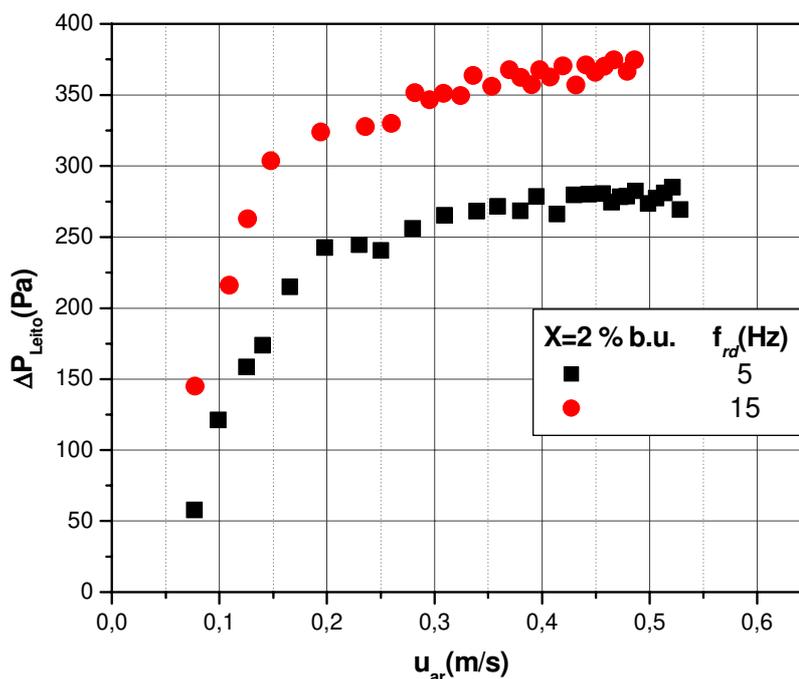


Figura 4.34 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico,  $d_p = 420-600 \mu\text{m}$ ,  $X' = 2\% \text{ b.u.}$

A Figura 4.35 mostra a imagem de uma amostra de ácido adípico ( $420-600 \mu\text{m}$ ) obtida antes e depois do ensaio fluidodinâmico da Figura 4.36 em leito fluidizado pulsado rotativo. Na Figura 4.35 pode-se observar melhor a aglomeração das partículas de ácido adípico e constatar que após o ensaio ainda existe aderência entre elas.

Ao realizar-se o ensaio com ácido adípico  $420-600 \mu\text{m}$  (Figura 4.36), com teor de umidade  $6\% \text{ b.u.}$  e frequência de  $15 \text{ Hz}$ , observou-se a formação de canais preferenciais no leito e com o aumento da velocidade *slug* pistonado, o qual manteve suspenso todo o leito de partículas durante pouco tempo. Posteriormente, as partículas caem no prato perfurado e surgem novos canais preferenciais. Algumas partículas que estão próximas ao prato perfurado aglomeram-se logo após o início da fluidização. Com o aumento da velocidade ocorre formação de bolhas, *slugs* e mais canais preferenciais, dificultando a identificação da superfície do leito devido a forte movimentação das partículas dentro do leito. A uma certa velocidade, os aglomerados se movimentam e parte se rompe. Para a frequência de  $5 \text{ Hz}$ , o comportamento foi semelhante ao observado para a frequência de  $15 \text{ Hz}$ , porém não

ocorreu *slug* pistonado e a formação de aglomerados, bolhas e canais preferenciais foi maior.



(a)



(b)

Figura 4.35 - Ácido adípico úmido,  $X'=6\%$  b.u.,  $f_{rd}=15$  Hz,  $d_p=420-600\ \mu\text{m}$   
(a) antes do ensaio, (b) depois do ensaio, Microscopia Óptica, aumento de 20x

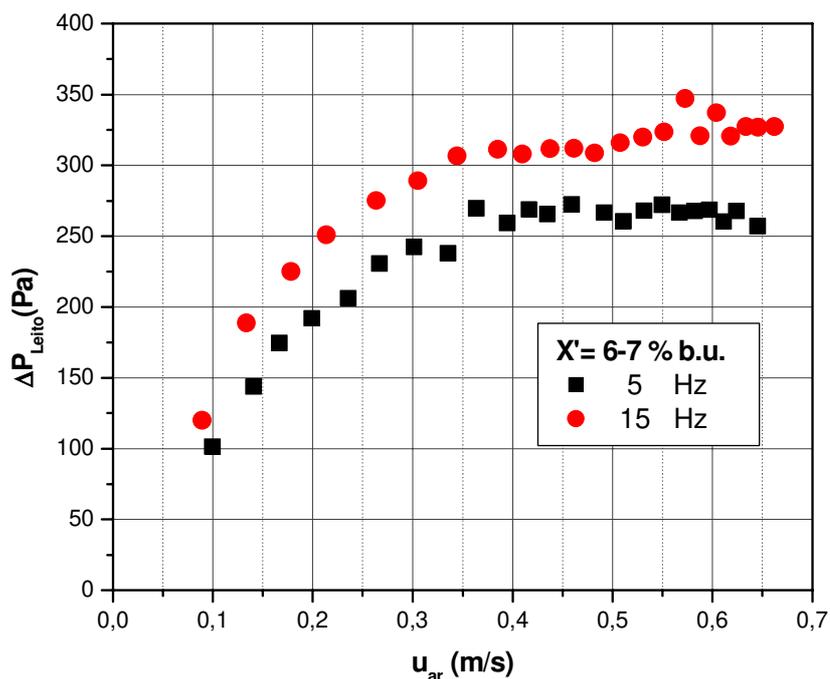


Figura 4.36 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado rotativo com ácido adípico,  $d_p = 420-600 \mu\text{m}$ ,  $X' = 6-7\% \text{ b.u.}$

Ao comparar se as Figuras 4.30 a 4.36 observa-se que a frequência de rotação do disco, o diâmetro de partícula e o teor de umidade inicial do ácido adípico influenciam no comportamento fluidodinâmico. O leito fluidizado pulsado rotativo possibilita o processamento de materiais úmidos, coesivos e de difícil fluidização convencional. Além disso, constata-se que para as condições estudadas os resultados obtidos corroboram com os estudos da literatura, demonstrando que o leito fluidizado pulsado rotativo permite o processamento de uma ampla faixa de materiais particulados, principalmente os que são dificilmente fluidizados em leito fluidizado convencional, como aqueles que apresentam características coesivas quando úmido (AMBROSIO-UGRI e TARANTO, 2002) e com alto teor de umidade (ELENVOK e DJURKOV, 1992). Tais observações indicam que esta tecnologia é de grande importância para o desenvolvimento de processos de secagem mais eficientes.

Na Figura 4.37 estão apresentados alguns dados obtidos por MORIS (2002) ao trabalhar com ácido adípico úmido (2,8 % b.u.), amplitude de 0,02 m em leito fluidizado convencional e leito vibrofluidizado.

Observa-se que no leito vibrofluidizado (Figura 4.37) como no leito fluidizado pulsado rotativo (Fig. 4.30, 4.34 e 4.36) a frequência influencia na queda de pressão, ou seja, ao aumentar a frequência ocorre aumento na queda de pressão do leito.

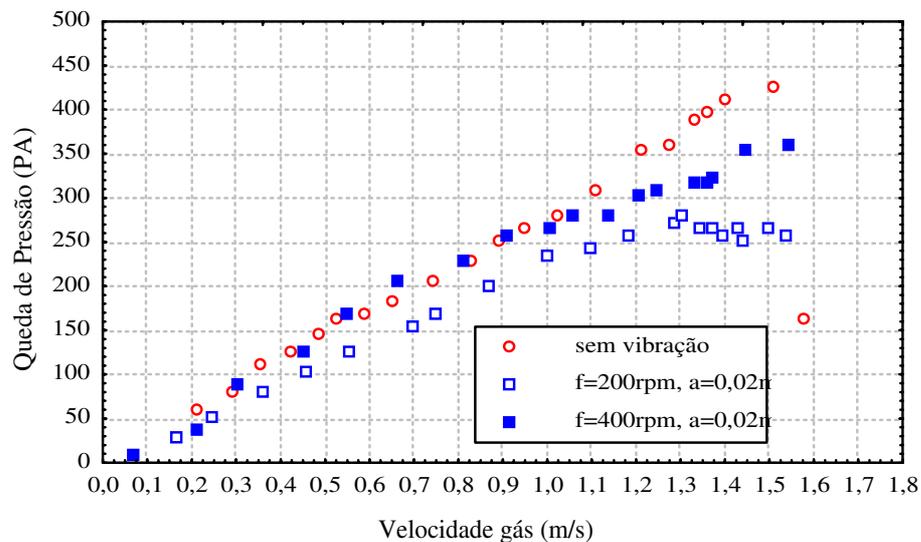


Figura 4.37 - Queda de pressão em função da velocidade do ar para ácido adípico em leito vibrofluidizado, amplitude de 0,02 m,  $m=0,3$  kg,  $X'=2,8$  % (MORIS, 2002)

Na Tabela 4.11 encontram-se os valores de velocidade de mínima fluidização obtidos pelo método proposto por RICHARDSON (1971) para os ensaios fluidodinâmicos do ácido adípico úmido (420-600  $\mu\text{m}$ ) realizados em leito fluidizado pulsado rotativo. A partir desse resultado, verifica-se que a velocidade de mínima fluidização apresenta um valor médio de  $0,188 \pm 0,014$  m/s para as partículas de ácido adípico com 2 % b.u. de umidade e  $0,277 \pm 0,007$  m/s para as com teor de umidade de 6-7 % b.u. Observa-se que o valor da velocidade de mínima fluidização sofre influência do aumento do teor de umidade.

Tabela 4.11 - Valores de velocidade de mínima fluidização do ácido adípico úmido,  $d_p=420-600 \mu\text{m}$

<b>X'</b> (% b.u.)	<b><math>u_{mf}</math> (m/s)</b>	<b><math>u_{mf}</math> (m/s)</b>
	<b>LFPR (5Hz)</b>	<b>LFPR (15Hz)</b>
2	0,202	0,174
6-7	0,284	0,269

Na Tabela 4.12 encontram-se os valores de queda de pressão na condição de mínima fluidização obtidos experimentalmente para os ensaios fluidodinâmicos do ácido adípico úmido (420-600  $\mu\text{m}$ ) realizados em leito fluidizado pulsado rotativo. A partir desse resultado e pelas Figuras 4.34 e 4.35, verifica-se que, como para as partículas menores, a queda de pressão na condição de mínima fluidização sofre influência da frequência de rotação do disco e do teor de umidade.

Tabela 4.12 - Valores de queda de pressão na condição de mínima fluidização do ácido adípico úmido,  $d_p=420-600 \mu\text{m}$

<b>X'</b> (% b.u.)	<b><math>\Delta P_{mf}</math> (Pa)</b>	<b><math>\Delta P_{mf}</math> (Pa)</b>
	<b>LFPR (5Hz)</b>	<b>LFPR (15Hz)</b>
2	247,8	327,7
6-7	253,3	277,2

Ao comparar o estudo fluidodinâmico da celulose microcristalina e do ácido adípico úmidos, constata-se que estes materiais apresentaram comportamento fluidodinâmico diferentes, isso provavelmente pode ser devido a forma de ligação da umidade nas partículas e as propriedades físicas serem diferentes nestes materiais.

No estudo fluidodinâmico da celulose microcristalina úmida observa-se que o comportamento fluidodinâmico sofreu alterações somente com teor de umidade acima de 19 % b.u., isso provavelmente ocorre devido as partículas de celulose microcristalina possuírem maior porosidade em relação as partículas de ácido adípico, deste modo somente

acima de 19 % b.u. é que as partículas de celulose microcristalina começam a apresentar água superficial, influenciando na fluidodinâmica do leito.

A umidade superficial nas partículas de ácido adípico gera aglomeração destas, dificultando o movimento do material dentro do leito. A ligação externa gerada pela umidade superficial faz com que o material não fluidize de forma adequada, havendo formação de canais preferenciais, bolhas e slugs. A diferença de diâmetros utilizadas no estudo fluidodinâmico do ácido adípico também influencia no comportamento fluidodinâmico, provavelmente porque as partículas com menor diâmetro (75-250  $\mu\text{m}$ ) possuem uma área de superfície de contato maior em relação as partículas com maior diâmetro (420-600 $\mu\text{m}$ ). Além da porosidade do leito de partículas ser maior para o maior diâmetro de partícula utilizado, facilitando a percolação do gás dentro do leito e entre as partículas.

### **4.3 - Índice de Fluidização**

#### **4.3.1 - Índice de Fluidização para Processos com Celulose Microcristalina**

Para a medida de “qualidade” da fluidização dos materiais utilizados em leito fluidizado pulsado rotativo (LFPR) e leito fluidizado convencional (LFC) adotou-se o índice adimensional para a fluidização, definido por MARRING *et. al* (1994) como sendo a razão da queda de pressão no leito pelo peso das partículas por unidade de área da seção transversal do leito.

As Figuras 4.38 a 4.42 apresentam o índice de fluidização (FI) em função da velocidade decrescente do ar em leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo, para algumas das condições estudadas para as partículas de celulose microcristalina secas e úmidas.

Nas Figuras 4.38 a 4.40 pode-se acompanhar os gráficos de índice de fluidização em função da velocidade decrescente do ar para a celulose microcristalina seca.

Ao comparar se as Figuras 4.38 a 4.40 observa-se que a variação da frequência de rotação do disco não influenciou na qualidade da fluidização. Nota-se também que, independente da quantidade de material no leito os valores do índice de fluidização obtidos para o leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo foram similares, indicando que para as partículas de celulose microcristalina secas a qualidade da fluidização é a mesma independente do equipamento utilizado.

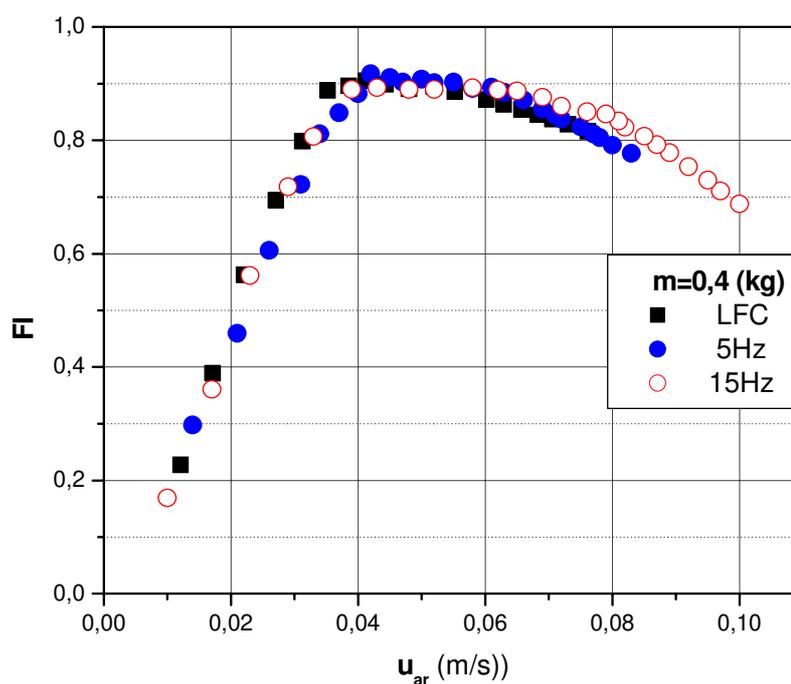


Figura 4.38 - Índice de Fluidização em função de  $u_{ar}$  decrescente em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com CMC,  $m=0,4$  kg

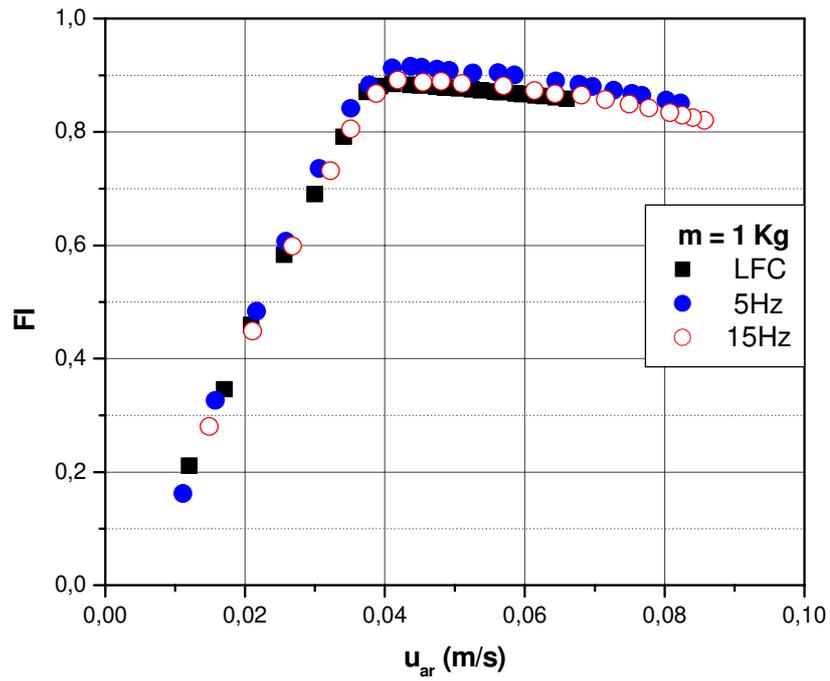


Figura 4.39 - Índice de Fluidização em função de  $u_{ar}$  decrescente em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com CMC,  $m=1,0 \text{ kg}$

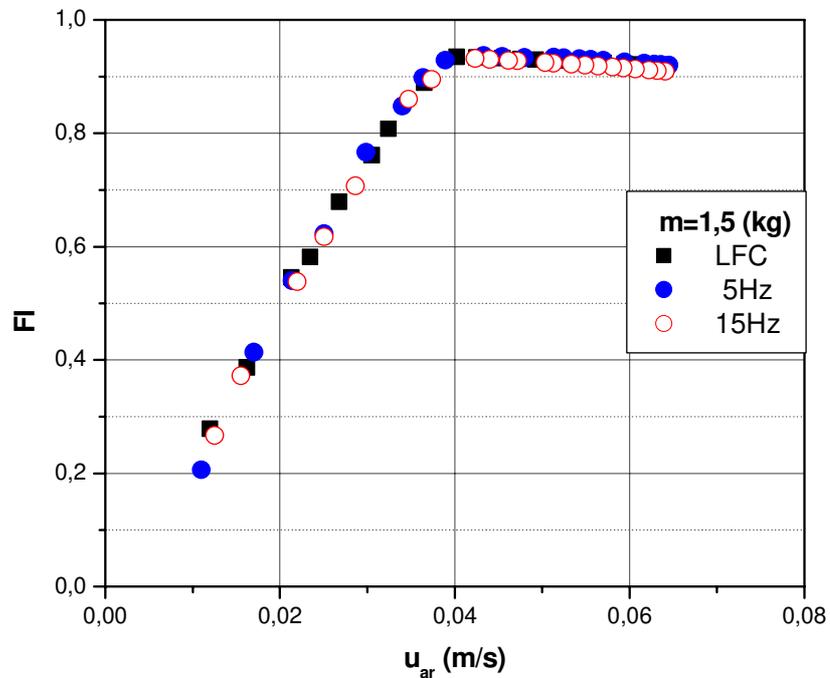


Figura 4.40 - Índice de Fluidização em função de  $u_{ar}$  decrescente em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional com CMC,  $m=1,5 \text{ kg}$

As Figuras 4.41 e 4.42 apresentam os gráficos de índice de fluidização em função da velocidade decrescente do ar para as partículas de celulose microcristalina úmidas.

Observa-se que como para as partículas de celulose microcristalina secas o aumento da frequência de rotação do disco não influenciou na qualidade da fluidização. Os valores obtidos de índice de fluidização também foram similares para ambos equipamentos utilizados independente do teor de umidade da partícula. Ao comparar as Figuras 4.41 e 4.42 com as Figuras 4.38 a 4.40 observa-se que não houve grande diferença na qualidade da fluidização entre as partículas de celulose microcristalina secas e úmidas.

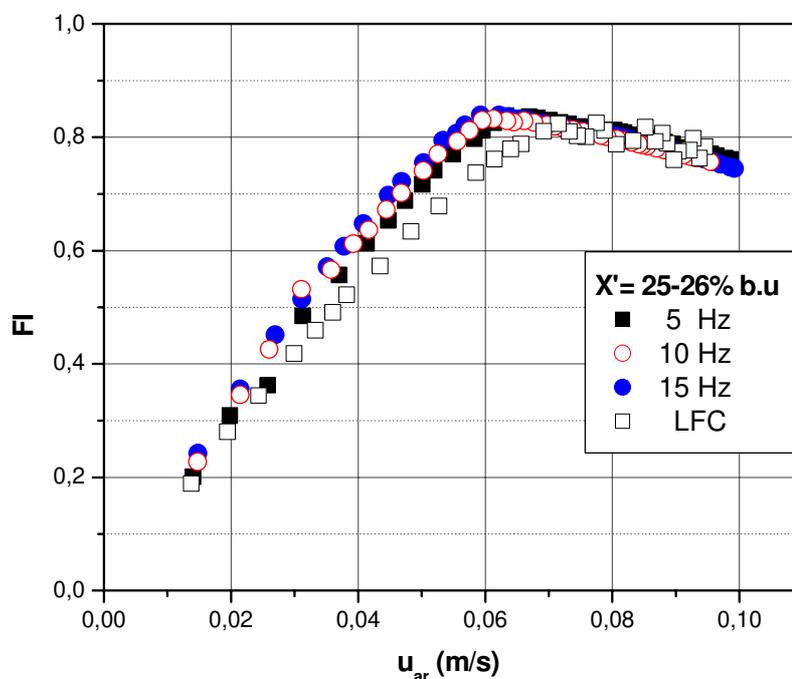


Figura 4.41 - Índice de Fluidização em função da  $u_{ar}$  decrescente em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, com CMC,  $X' = 25$  a  $26\%$  b.u.

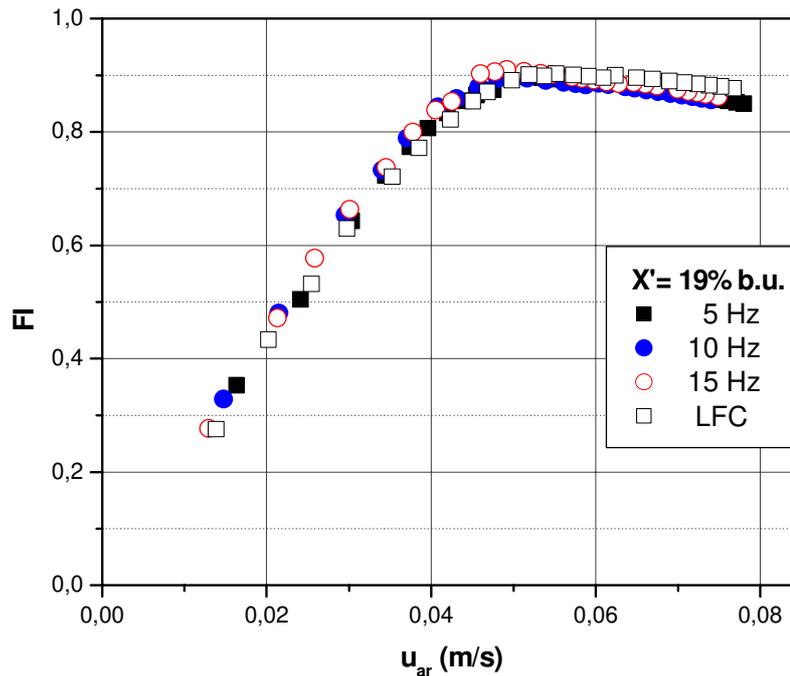


Figura 4.42 - Índice de Fluidização em função da  $u_{ar}$  decrescente em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, com CMC,  $X' = 19\%$  b.u.

#### 4.3.2 - Índice de Fluidização para Processos com Ácido Adípico

As Figuras 4.43 e 4.44 apresentam o índice de fluidização (FI) em função da velocidade decrescente do ar em leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo, para as partículas de ácido adípico seco (75-250  $\mu\text{m}$ ).

As partículas de ácido adípico seco (75-250  $\mu\text{m}$ ) apresentaram um índice de fluidização menor no leito fluidizado pulsado rotativo em relação ao leito fluidizado convencional independente da frequência e quantidade de material.

Observa-se que independente da quantidade de material no leito a variação da frequência de rotação do disco de 5 para 15 Hz não influencia na qualidade da fluidização. Mas ao impor a frequência, nota-se que esta influencia de modo a diminuir os valores do índice de fluidização do leito fluidizado pulsado rotativo em relação ao leito fluidizado convencional para as partículas de ácido adípico seco (75-250  $\mu\text{m}$ ).

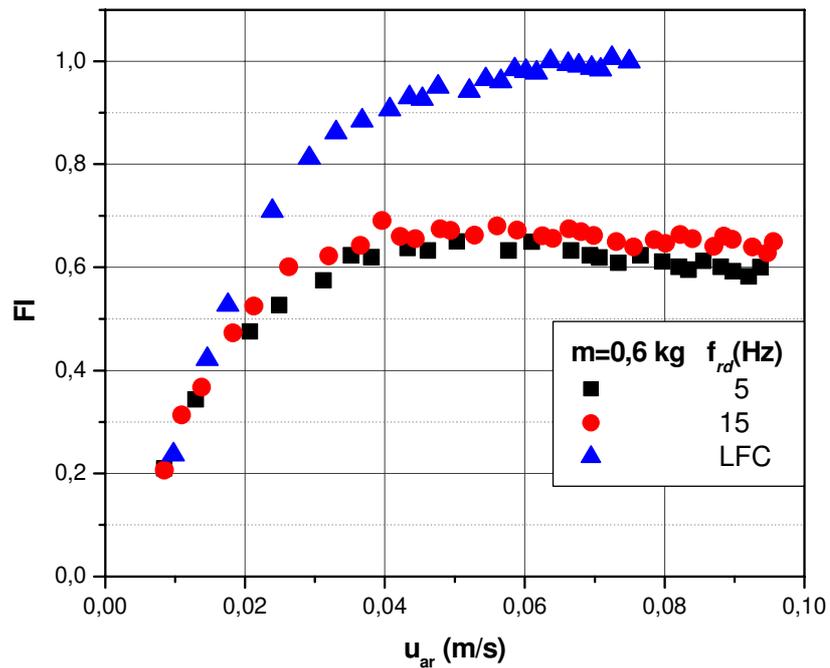


Figura 4.43 – Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico seco, em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional,  $d_p=75-250 \mu\text{m}$

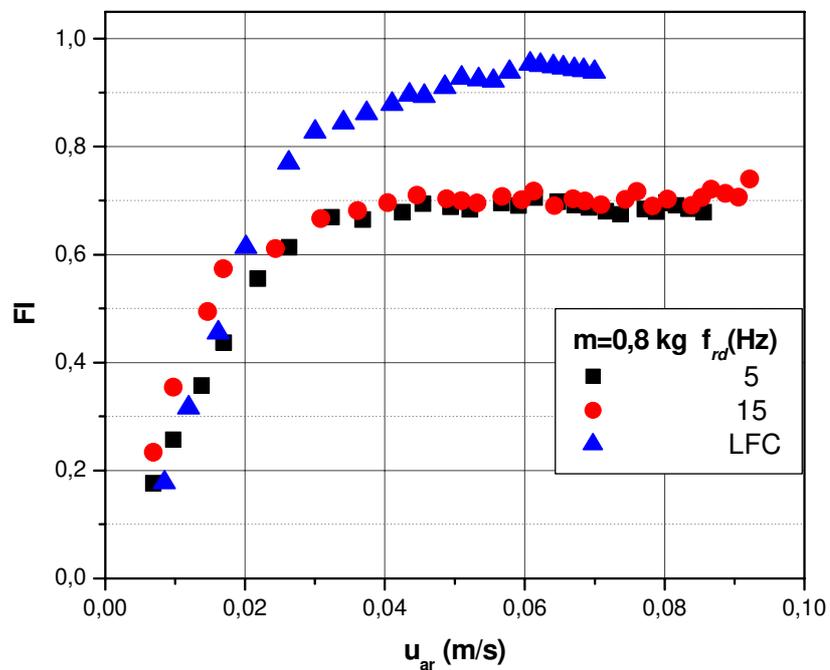


Figura 4.44 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico seco, em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional,  $d_p=75-250 \mu\text{m}$

As Figuras 4.45 a 4.47 apresentam o índice de fluidização em função da velocidade decrescente do ar em leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo, para as partículas de ácido adípico seco (420-600  $\mu\text{m}$ ).

As Figuras 4.45 a 4.47 mostram que para o ácido adípico seco (420-600  $\mu\text{m}$ ) ocorre comportamento contrário ao obtido para o menor diâmetro, ou seja, apresenta valores maiores de índice de fluidização no leito fluidizado pulsado rotativo em relação ao leito fluidizado convencional. Comportamento similar foi observado por MARRING *et. al* (1994) e SANTANA *et. al* (1999) ao trabalharem com leito fluidizado vibrado e leito fluidizado convencional.

Observa-se que assim como para o menor diâmetro, independente da carga a variação da frequência de rotação do disco de 5 para 15 Hz não influencia na qualidade da fluidização. Mas, ao impor se a frequência nota-se que esta proporciona valores maiores de índice de fluidização das partículas do ácido adípico seco (420-600  $\mu\text{m}$ ) comparado ao leito fluidizado convencional.

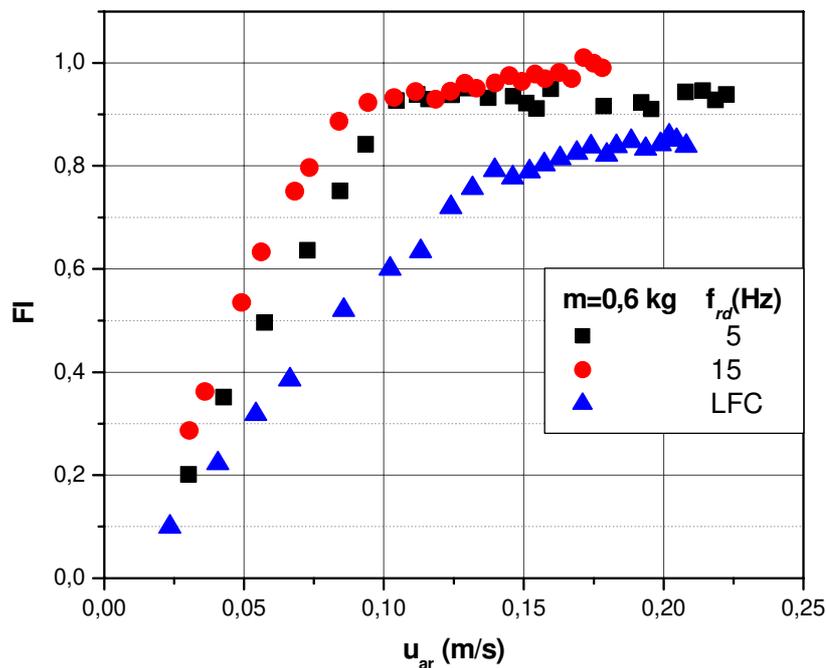


Figura 4.45 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico seco, em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional,  $d_p=420-600 \mu\text{m}$

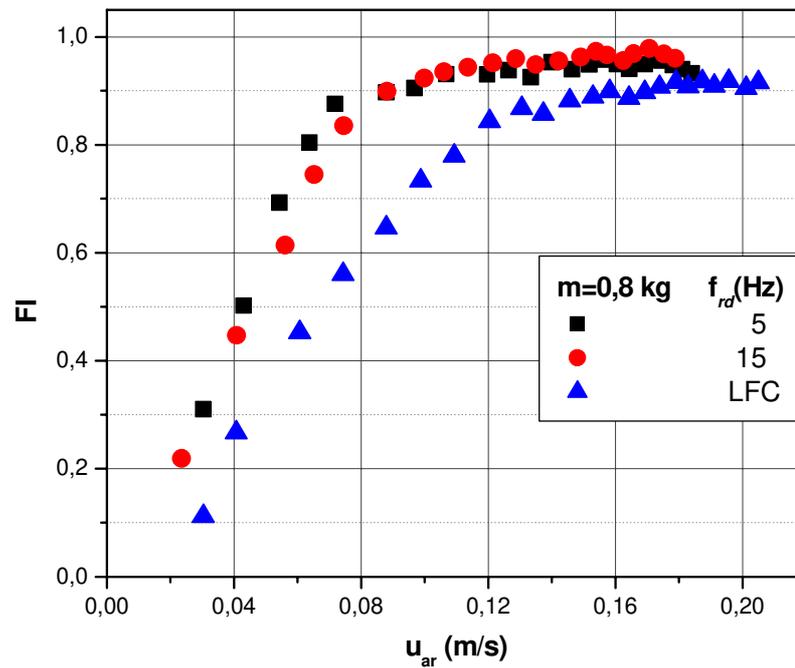


Figura 4.46 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico seco, em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional,  $d_p=420-600 \mu\text{m}$

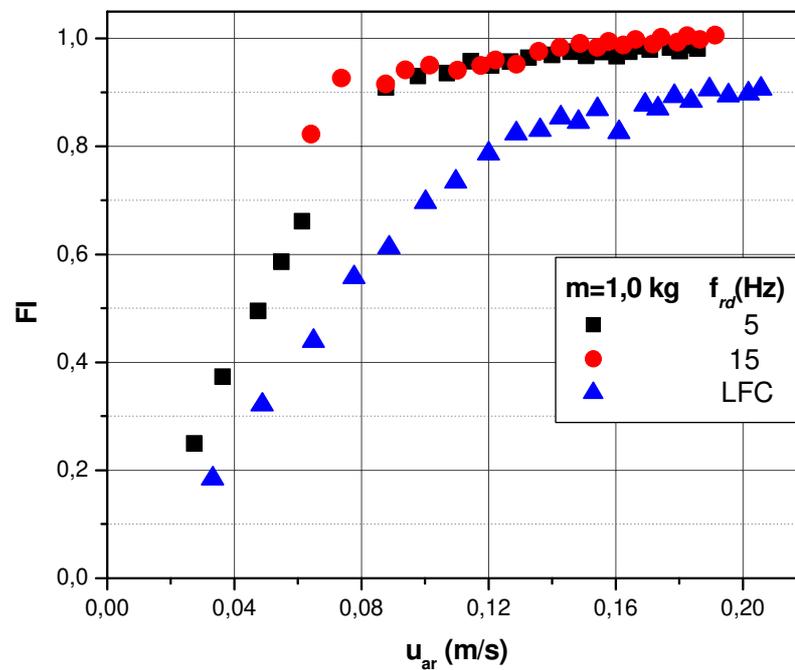


Figura 4.47 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico seco, em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional,  $d_p=420-600 \mu\text{m}$

A Figura 4.48 apresenta o índice de fluidização em função da velocidade decrescente do ar em leito fluidizado pulsado rotativo para as partículas de ácido adípico úmido (75-250  $\mu\text{m}$ ) com teor de umidade de 2 e 6 % b.u.. Nota-se que para as partículas de ácido adípico úmido (75-250  $\mu\text{m}$ ) o valor do índice de fluidização foi influenciado pela variação da frequência de rotação do disco e pelo teor de umidade.

Observa-se que a variação da frequência de rotação do disco de 5 para 15 Hz melhora a qualidade de fluidização minimizando a formação de canais preferenciais, e fornece um índice de fluidização próximo da unidade para o teor de umidade de 2 % b.u.. Verifica-se que para uma frequência fixa de 5 Hz, ao aumentar o teor de umidade da partícula ocorre um decréscimo na qualidade da fluidização, isto pode ser devido a coesão da partícula, dificultar a fluidização e aumentar os canais preferenciais.

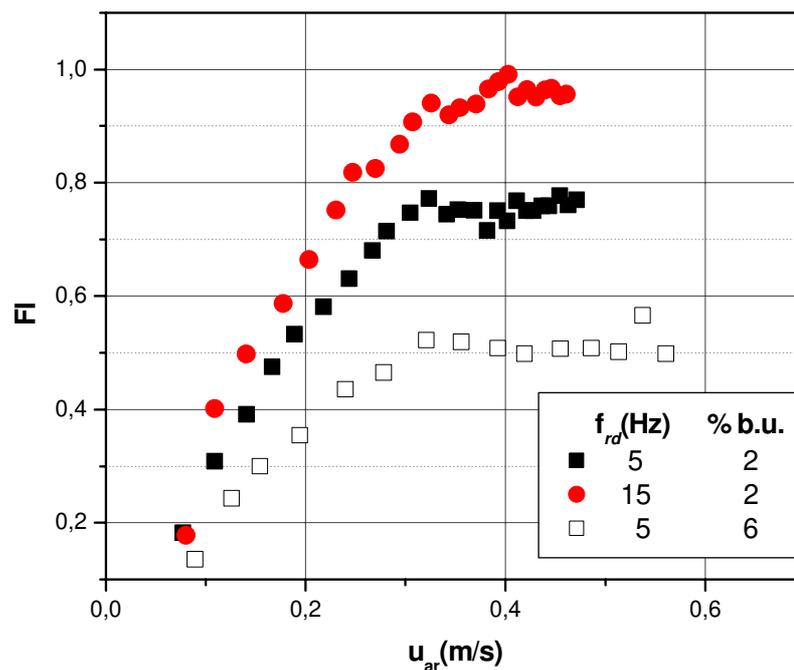


Figura 4.48 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico, em leito fluidizado pulsado rotativo,  $d_p=75-250 \mu\text{m}$ ,  $X' = 2-6 \%$  b.u.

A Figura 4.49 apresenta o índice de fluidização em função da velocidade decrescente do ar em leito fluidizado pulsado rotativo, para as partículas de ácido adípico (420-600  $\mu\text{m}$ ) com teor de umidade de 2 % b.u. e a Figura 4.50 para o ácido adípico com teor de umidade de 6 % b.u.. Verifica-se que para as partículas de ácido adípico úmido de maior diâmetro (420-600  $\mu\text{m}$ ) como para as de menor diâmetro (250-300  $\mu\text{m}$ ) utilizadas, o valor do índice de fluidização sofre influencia com o aumento da frequência de rotação do disco. Ao aumentar a frequência de rotação do disco o índice de fluidização aumenta, independente do teor de umidade. Ao comparar se as Figura 4.49 e 4.50 observa-se que o valor da queda de pressão decresce com o aumento da coesividade das partículas. Este comportamento também foi observado por MARRING *et. al* (1994).

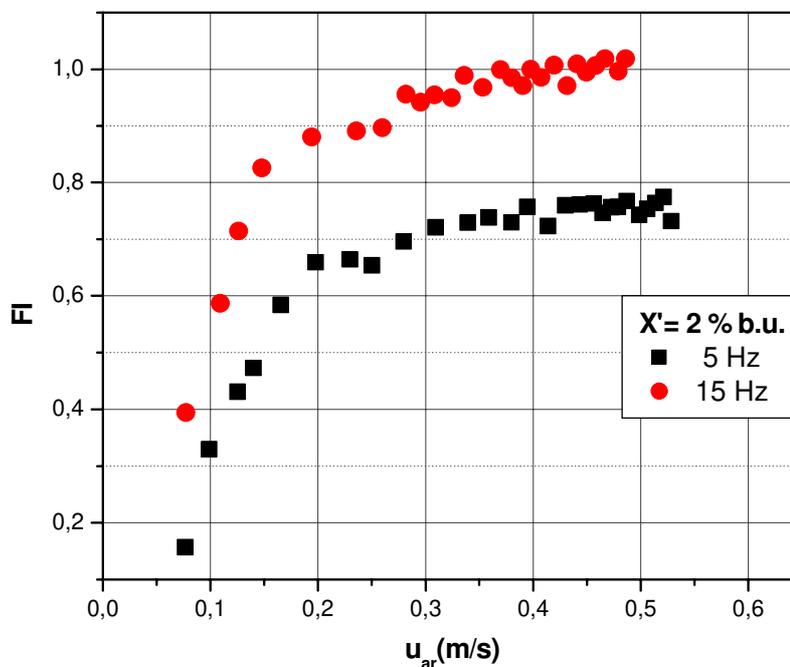


Figura 4.49 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico, em leito fluidizado pulsado rotativo,  $d_p=420-600 \mu\text{m}$ ,  $X'=2 \%$  b.u.

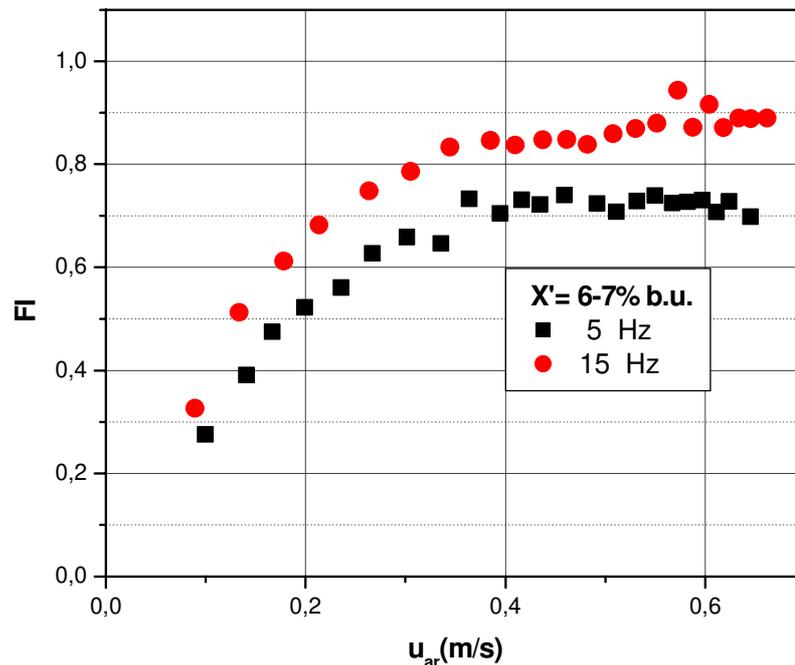


Figura 4.50 - Índice de fluidização em função da velocidade do ar do ácido adípico, em leito fluidizado pulsado rotativo,  $d_p=420-600 \mu\text{m}$ ,  $X' = 6-7 \% \text{ b.u.}$

Ao efetuar uma análise do índice de fluidização para os dois materiais, ou seja, celulose microcristalina e ácido adípico, observa-se que para a celulose microcristalina a adição da pulsação da corrente de gás não influenciou na qualidade da fluidização, independente do teor de umidade e equipamento utilizado.

Para o ácido adípico a adição do disco rotativo implica em comportamentos diferentes ao comparar os equipamentos e opostos ao comparar os diâmetros de partícula. Para o ácido adípico seco a variação da frequência não influenciou para os dois diâmetros. No entanto, para as partículas úmidas o contrário ocorre, ou seja, a frequência influencia no comportamento do índice de fluidização, seguindo o mesmo padrão em ambos diâmetros.

Neste trabalho o índice de fluidização foi utilizado como uma ferramenta para obtenção da qualidade da fluidização dos materiais estudados em diferentes equipamentos com a finalidade de verificar se a qualidade da fluidização no leito fluidizado pulsado rotativo é similar ou melhor que a do leito fluidizado convencional. Com base nos resultados obtidos e por não ter sido encontrado na literatura nenhum trabalho envolvendo o estudo do índice de fluidização aplicado a leitos fluidizados pulsados rotativo, não se

pode afirmar que um decréscimo nos valores do índice de fluidização em relação ao leito fluidizado convencional indique fluidização de má qualidade. Neste caso sugere-se que seja efetuado um estudo analisando se o índice de fluidização é realmente válido para o leito fluidizado pulsado rotativo e sobre a influência da abertura do disco rotativo na fluidização.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES**

Neste capítulo são descritas as principais conclusões obtidas neste projeto de pesquisa. Através dos dados obtidos para a celulose microcristalina e ácido adípico em leito fluidizado pulsado rotativo e leito fluidizado convencional, observa-se que:

As curvas características de queda de pressão em função da velocidade do gás obtidas para ambas as amostras apresentaram reprodutibilidade das curvas apresentadas por KUNNI e LEVENSPIEL (1991), RICHARDSON (1971), ELENKOV e DJURKOV (1997) e KUDRA (2002).

As partículas de celulose microcristalina apresentaram comportamento semelhante ao obtido por ELENKOV e DJURKOV (1992 e 1997) e UGRI (2003), ou seja, a baixa velocidade de rotação do disco ocorre a formação de jatos alternados e entre eles existem áreas de leito fluidizado. A uma alta velocidade de rotação do disco, a fluidização é similar a de um leito fluidizado convencional.

No estudo fluidodinâmico do leito com partículas de celulose microcristalina, a queda de pressão no leito só foi influenciada pela massa de partículas no leito, mas a velocidade de mínima fluidização foi influenciada pelo teor de umidade da partícula. A frequência de rotação do disco influenciou somente na velocidade de mínima fluidização do material úmido.

Ao comparar se os equipamentos, leito fluidizado convencional e leito fluidizado pulsado rotativo, constata-se que para a celulose microcristalina seca não há vantagem em utilizar se o leito fluidizado pulsado rotativo, pois o comportamento fluidodinâmico e a qualidade de fluidização são similares em ambos os equipamentos. Para a celulose microcristalina úmida, a qualidade da fluidização é similar em ambos os equipamentos,

contudo o leito fluidizado pulsado rotativo proporciona fluidização com menor velocidade de mínima fluidização, implicando na redução do consumo de gás.

Para o ácido adípico, obteve-se uma boa fluidização ao aplicar-se o fluxo periódico do gás. Em contraste com o comportamento fluidodinâmico obtido para a celulose microcristalina, para o ácido adípico, a queda de pressão no leito foi influenciada por todos os parâmetros estudados, ou seja, a quantidade de material no leito, o diâmetro e o teor de umidade da partícula. Mas a velocidade de mínima fluidização do ácido adípico só foi dependente da frequência de rotação do disco, do mesmo modo que para as partículas de celulose microcristalina.

Ao comparar-se os equipamentos constata-se que para o ácido adípico seco, a imposição da frequência de rotação do disco provoca redução na queda de pressão para a faixa de 75-250  $\mu\text{m}$  e aumento na queda de pressão na condição de mínima fluidização e um decréscimo na velocidade de mínima fluidização para a faixa de 420-600  $\mu\text{m}$ .

A coesividade das partículas de ácido adípico influencia na formação de aglomerados e canais preferenciais, de modo a contribuir para a segregação e defluidização do material, impedindo o processamento do material em leito fluidizado convencional.

O leito fluidizado pulsado rotativo apresenta melhor movimentação dos sólidos no interior do leito comparado ao leito convencional, minimizando a formação de canais preferenciais e possibilitando o processamento do ácido adípico em condições inviáveis em leito fluidizado convencional. Isto evidencia as condições mais fáceis de fluidização do leito fluidizado pulsado rotativo e sua aplicabilidade ao processo de secagem.

O leito fluidizado pulsado rotativo proporciona fluidização de melhor qualidade em relação ao leito fluidizado convencional para as partículas de ácido adípico secas na faixa de 420-600  $\mu\text{m}$ , enquanto que para a faixa de 75-250  $\mu\text{m}$  ocorre o contrário. Para o material úmido, verifica-se que o aumento da frequência de rotação do disco melhora a qualidade da fluidização para a maior faixa de diâmetro utilizada, enquanto que para a menor faixa de diâmetro utilizada, o aumento da frequência impossibilita o processamento do material.

## CAPÍTULO 6

### SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se citar:

- A quantificação das partículas elutriadas com a variação dos parâmetros de fluidização pulsada rotativa;
- Estudo de discos rotativos com aberturas diferentes e analisar sua influência no comportamento fluidodinâmico do leito fluidizado pulsado rotativo;
- Estudo das alterações causadas pelo efeito das forças interpartículas para diferentes materiais, com a imposição da pulsação da corrente de gás;
- Análise da viabilidade econômica do equipamento estudado;
- Ampliação do estudo para o processo de secagem e recobrimento;
- Quantificação da eficiência energética no leito fluidizado pulsado rotativo;
- Verificação da validade do índice de fluidização para leito fluidizado pulsado rotativo;
- Análise da influencia da abertura do disco rotativo na qualidade da fluidização.

## CAPÍTULO 7

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBROSIO-UGRI, M.C.B.; TARANTO, O.P. Estudo das características fluidodinâmicas do leito fluidizado pulsado rotativo. Anais do XXX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (Enemp), CD-ROM, 2002, São Carlos, SP.
- BLACHA-JURKIEWICZ, J.; GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R. Drying of granular material in pulsofluidized bed *Drying'87*, 1987. p.109-114.
- CLIFT, R.; GRACE, J.R. *Continuous bubbling and slugging*. In DAVIDSON, J. F., CLIFT, R., HARRISON, D. *Fluidization*. 2ed. London: Academic Press, 1985, cap.3, p. 73-128.
- COUDERC, J.-P. *Incipient fluidization and particulate systems*. In: DAVIDSON, J. F., CLIFT, R., HARRISON, D. *Fluidization*. 2ed. London: Academic Press, 1985, cap.1, p. 1-41.
- DAVIDSON, J. F., CLIFT, R., HARRISON, D. *Fluidization*. 2<sup>ed</sup>. London: Academic Press, 1985. Cap.16, p. 723.
- DAVIDSON, J. F.; R., HARRISON, D. *Fluidization*. 2<sup>ed</sup>. London: Academic Press, 1977. Cap.1, p. 26-61, 73-128.
- DJURKOV, T.G. Modeling of bed pressure drops in rotation-pulsed fluidized bed dryer. In *Drying'98 – Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Drying Symposium* vol. A, 1998. p.160-167.
- DJURKOV, T.G. Rotation-pulsed fluid bed salt dryer. In *The 3<sup>rd</sup> International Symposium for South-east European Countries (SEEC) on Fluidized Beds in Energy Production*,

- Chemical and Process Engineering and Ecology Sinaia, Romania; Proceedings, 2001. p. 153-157
- ELENKOV, V.R., DJURKOV, T.G. Rotating-pulsed fluidized bed dryer for high-moisture content bioproducts *Drying '92*, 1992. p.1636-1641.
- ELENKOV, V.R., DJURKOV, T.G. A fluidized bed with a jet-pulsed agitation of fluidization In *1<sup>st</sup> South East European Symposium - Fluidized Bed in Energy Production, Chemical and Process Engineering and Ecology* , 1997. p.105-116.
- GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R. Drying in a pulsed-fluid bed with relocated gas stream *Drying Technology* v.14, n. 5, p.1121-1172, 1996.
- GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R; KUDRA T. Drying of powdery materials in a pulsed fluid bed dryer *Drying Technology* v.17, n. 7-8, p.1523-1532, 1999.
- GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R.; ZGORZALEWICZ, J.; PELECH, Z.; STANISLAWSKI, J.; ROGULA, G.; PIECZABA, B. Operational tests of a pulsed fluid bed dryer / cooler for granulated sugar In *Drying'96 – Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Drying Symposium* v.B, 1996. p.771-777.
- GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R.; ZGORZALEWICZ, J. Drying of granular material in pulsofluidized bed *Hungarian Journal of Industrial Chemistry* v.17, p.245-255, 1989.
- GAWRZYNSKI, Z., PIECZABA, B. Pulsed-fluid bed dryer with zoned lengthwise pulsation In *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS 2000* Paper no. 353, 2000.
- GELDART, D. *Characterization of fluidized powders.* In: GELDART, D. *Gas Fluidization Technology* Chinchester: John Wiley & Sons, 1986.p.33-51.
- GINZBURG, A.S., RIEZCZIKOW, W.A. *Drying of food products in fluid bed* (in Polish) 1969 *apud* GAWRZYNSKI, Z., PIECZABA, B. Pulsed-fluid bed dryer with zoned lengthwise pulsation In *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Drying Symposium IDS 2000* Paper no. 353, 2000.

- JEZOWSKA, A. Kinetics of drying in cyclically shifted spouted bed *Drying Technology* v.11, n.2, p.319-337, 1993.
- KEEY, R.B. *Drying of Loose and Particulate Materials*. Hemisphere Publishing Corporation: New York, 1992 , 504p.
- KUDRA, T. 2002 Current issues on drying of particulate materials – A canadian prospective. Disponível em <http://cetc.varenes.nrcan.gc.ca>, 2002-023(OP-J). Acesso em nov. 2003.
- KUDRA, T., GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R, STANISLAWSKI, J., POIRIER, M. Drying of pulp and paper sludge in a pulsed fluid bed dryer *Drying Technology* v.20, p.917-933, 2002.
- KUDRA, T., MUJUMDAR, A.S. *Special Drying Techniques and Novel Dryers*. Hand book of industrial drying 2<sup>nd</sup> Edition, v.2, 1995. p.1087-1149.
- KUNII, D., LEVENSPIEL, O. *Fluidization Engineering*. Butterworth - Heinemann, 1991. 2<sup>nd</sup> Ed, USA 491p.
- MACCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOTT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*, 5<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1993. p.1130.
- MARRING, E.; HOFFMANN, A.C.; JANSSEN, L.P.B.M. The effect of vibration on the fluidization behavior of some cohesive powders. *Powder Technology* v.79, p. 1-10, 1994.
- MORIS, V.A.S. Fluidodinâmica e secagem do ácido adípico em leito vibrofluidizado Campinas: FEQ, UNICAMP– Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2002. Tese (Doutorado)
- OKADA, M.; VITALI, A.A.; TEIXEIRA NETO, O.R.; CARVALHO, R.; GONÇALVES, R.J. *Secagem de sólidos* – apostila, ITAL, Campinas, 1979.
- OWER, E., PANKHURST, R.C. The measurement of air flow. 5<sup>th</sup> Edition, New York, NY, Pergamon Press, 1977, 362p.

- RICHARDSON, J. F. 1971 *Incipient fluidization and particulate systems*. In: DAVIDSON, J. F., HARRISON, D. *Fluidization*. 2<sup>nd</sup>. London: Academic Press, 1977, cap.2, p. 26-61.
- SANTANA, D.; RODRÍGUEZ, J.M.; MACÍAS-MACHÍN, A. Modelling fluidized bed elutriation of fine particles. *Powder Technology*. v.106, p. 110-118, 1999.
- SILVA, D.P. Estudo do comportamento fluidodinâmico da celulose microcristalina em leito fluidizado Campinas: FEQ, UNICAMP– Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2000. Dissertação de Mestrado.
- SILVA, O.S. Desenvolvimento do processo de recobrimento e secagem de microgrânulos em leito fluidizado Campinas: FEQ, UNICAMP– Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2003. Tese (Doutorado).
- STRUMILLO, C., KUDRA, T. *Drying: Principles, Applications and Design*. London: Gordon and Breach Science Publ., 1986. p.448.
- UGRI, M.C.B.A. Caracterização física e secagem do ácido 2-hidrocibenzóico em leito fluidizado agitado mecanicamente e em leito fluidizado pulsado rotativo Campinas: FEQ, UNICAMP– Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2003. Tese (Doutorado).