



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
ENGENHARIA DE PROCESSOS

**“FLUIDODINÂMICA E SECAGEM DE CLORETO DE
POTÁSSIO E ACETATO DE SÓDIO EM LEITO PULSO
FLUIDIZADO”**

Autor: Luciane Franquelin Gomes de Souza

Orientador: Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto

Co Orientador: Prof. Dr. Marcello Nitz

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas – São Paulo

Outubro / 2008

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

So89f Souza, Luciane Franquelin Gomes de
Fluidodinâmica e secagem de cloreto de potássio e acetato de sódio em leito pulso-fluidizado / Luciane Franquelin Gomes de Souza. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientadores: Osvaldir Pereira Taranto, Marcello Nitz da Costa.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Leito fluidizado. 2. Secagem. 3. Fluidodinâmica. 4. Acetatos. 5. Cloreto de potássio. I. Taranto, Osvaldir Pereira. II. Costa, Marcello Nitz da. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.

Título em Inglês: Fluid-dynamics and drying of potassium chloride and sodium acetate in a pulsed-fluid bed

Palavras-chave em Inglês: Pulsed-fluid bed, Drying, Fluid-dynamic, Sodium acetate, Potassium chloride

Área de concentração: Engenharia de Processos

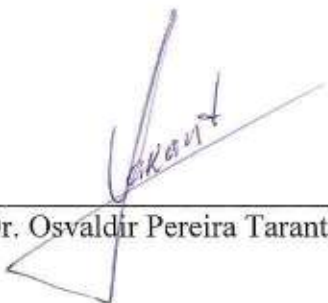
Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Tah Wun Song, Virginia Aparecida Silva Moris

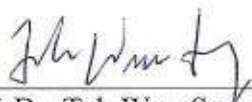
Data da defesa: 22/10/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

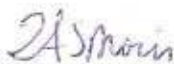
Dissertação de Mestrado ou Tese de Doutorado defendida por Luciane Franquelin Gomes de Souza e aprovada em 22 de outubro de 2008 pela banca examinadora constituída pelos doutores:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'O. Pereira Taranto', is written over a horizontal line.

Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Tah Wun Song', is written over a horizontal line.

Prof. Dr. Tah Wun Song

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'V. Silva Moris', is written over a horizontal line.

Drª Virginia Aparecida Silva Moris

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado ou Tese de
Doutorado em Engenharia Química.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Osvaldir', is written over a horizontal line.

Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto

Dedico aos meus melhores amigos, meu pai Armando e minha mãe Elisabete, que sempre me apoiaram e vibraram com minhas conquistas. Dedico ao meu marido Luis Felipe, meu companheiro de todos os momentos. Dedico aos meus amados filhos Isabela e Gabriel, que embora ainda muito pequenos, foram fundamentais para esta conquista. Dedico aos meus avós e irmãs, que sempre torceram muito por mim.

Agradecimentos

À Reitoria e Direção da **Escola de Engenharia Mauá**, que sempre apoiaram o desenvolvimento deste trabalho.

À **FAPESP** pelo suporte financeiro concedido para a realização deste projeto.

Ao **Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto**, que ao longo desses anos acreditou e vibrou com cada resultado. É um grande professor e amigo.

Ao **Prof. Dr. Marcello Nitz**, que me ofereceu a oportunidade de desenvolver esse trabalho e em todos os momentos incentivou e confiou no seu sucesso. É um grande professor, amigo e colega de trabalho.

Ao técnico de laboratório **Sidnei Moraes**, da Escola de Engenharia Mauá, que em todo esse período auxiliou na operação e manutenção do equipamento.

Aos estagiários que trabalharam nesse projeto: **Priscila Anuciada Lima**, **Luis Gustavo Morelli dos Santos** e **Paula Steffen Cancelli**, da Escola de Engenharia Mauá.

Ao Sr. **Mário Antonio da Silva Gomes**, diretor da empresa **LabSynth** fornecedora dos sais estudados neste trabalho.

Resumo

Acetato de sódio é um sal orgânico produzido pela reação do ácido acético com hidróxido de sódio. Depois da cristalização e separação os cristais úmidos são secos. Já o cloreto de potássio é um sal inorgânico extraído de rochas e águas salinas muito utilizado na indústria química como fertilizante. Esses sais são higroscópicos, coesivos quando úmidos, e geralmente são secos em secadores de leitos fluidizados. No presente trabalho foi utilizado um secador de leito pulso-fluidizado (PFB) que é uma modificação do secador de leito fluidizado convencional. Neste equipamento uma taxa constante de ar é suprido para o secador. Um distribuidor de gás instalado sob a câmara de secagem promove a pulsação pela corrente de gás alternada. A principal vantagem desta técnica é o uso de uma vazão de ar menor quando comparada com outras. O PFB utilizado neste trabalho possui uma área de secção transversal de 0,18 metros quadrados e é constituído de quatro seções. Inicialmente foi realizado o estudo fluidodinâmico dos sais secos e úmidos. Posteriormente as curvas de secagem do acetato de sódio e cloreto de potássio foram determinadas para diferentes condições de secagem (temperatura do ar e frequência de pulsação). A secagem e fluidodinâmica em leito fluidizado convencional foram feitas para que a comparação com o leito pulsado fosse possível. Resultados mostraram que as taxas de secagem foram maiores na fluidização pulsante devido ao melhor comportamento fluidodinâmico: o fluxo intermitente ajuda a romper partículas aglomeradas e conseqüentemente prover melhor contato entre gás - partícula.

Palavras-chave: leito pulso-fluidizado, secagem, fluidodinâmica, acetato de sódio, cloreto de potássio.

Abstract

Sodium acetate is a salt produced by the reaction of acetic acid with sodium hydroxide. After crystallization and separation, the wet crystals are dried. Potassium chloride is an inorganic salt extracted from rocks and saline water. It is mainly used in the chemical industry as a fertilizer. These salts are hygroscopic particulate materials, which are dried in fluidized beds or rotary dryers. In this work a pulsed-fluid bed (PFB) dryer was used, which is a variation of the conventional fluidized bed dryer. In this equipment, a constant airflow rate is supplied to the dryer. A gas distributor installed upstream of the drying chamber provides the pulsed-flow by alternating the gas stream. The main advantage of this technique is the lower airflow rate supplied when compared with competitive techniques. The PFB used in this work has a cross section area of 0.18 m^2 and it has four sections. Initially, the fluid-dynamic study of dry and wet salts was performed. Subsequently the drying curves of sodium acetate and potassium chloride were determined for different drying conditions (inlet air temperature and pulsation frequency). Drying and Fluid-dynamic was performed in conventional fluidized bed drying, so that results could be compared. Results showed that the drying rates were higher under pulsed fluidization due to the better fluid-dynamic behavior: the intermittent flow can help to break particle agglomerates and therefore provide better contact between particles and the gas.

Keywords: *pulsed-fluid bed; drying; fluid-dynamic; sodium acetate; potassium chloride.*

Sumário

1	Introdução e Objetivos	1
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	A operação de secagem	4
2.1.1	Conteúdo de umidade do material	4
2.1.2	Classificação dos materiais.....	6
2.1.3	Cinética de secagem	7
2.2	Fluidização	12
2.2.1	Regimes de Fluidização.....	12
2.2.2	Secagem de sólidos em leitos fluidizados	14
2.2.3	Características das partículas.....	16
2.2.4	Velocidade de mínima fluidização	18
2.2.5	Queda de pressão em leito fluidizado.....	20
2.2.6	Distribuição de gás para leito fluidizado	22
2.3	Leitos Pulso-Fluidizados	23
2.3.1	Fluidodinâmica da pulso-fluidização.....	25
2.3.2	Velocidade de pulso-fluidização	26
2.3.3	Queda de pressão em leito pulso-fluidizado.....	30
2.3.4	Aplicações do leito pulso-fluidizado	33
2.3.5	Índice de fluidização.....	34
2.4	Estruturas Cristalinas.....	37
2.4.1	Cloreto de Potássio	39
2.4.2	Acetato de Sódio.....	39
3	Materiais e Métodos	41
3.1	Materiais utilizados	41
3.2	Caracterização física dos sais	41
3.2.1	Determinação da massa específica através de picnometria a Gás Hélio	42
3.2.2	Determinação da Porosidade e do tamanho dos poros	43
3.2.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	44
3.2.4	Distribuição Granulométrica	45

3.3	Sistema experimental de secagem	46
3.3.1	Descrição do equipamento de leito pulso-fluidizado	47
3.3.2	Sistema de pulsação do leito pulso-fluidizado	51
3.3.3	Sistema supervisor e de aquisição de dados	53
3.3.4	Determinação da vazão de ar	55
3.4	Fluidodinâmica dos sais secos e úmidos	58
3.4.1	Fluidodinâmica em leito pulso-fluidizado	58
3.4.2	Fluidodinâmica em leito fluidizado convencional	60
3.5	Estudo da secagem dos sais	61
3.5.1	Amostragem para curva de secagem	61
3.5.2	Delineamento experimental	63
3.5.3	Umificação do cloreto de potássio	65
3.5.4	Determinação da umidade no equipamento titulador “Karl Fischer”	65
4	Resultados e Discussão	67
4.1	Caracterização dos sólidos	67
4.1.1	Massa específica do cloreto de potássio	67
4.1.2	Massa específica do acetato de sódio anidro	68
4.1.3	Porosidade e distribuição dos tamanhos de poros do cloreto de potássio	68
4.1.4	Porosidade e distribuição dos tamanhos de poros do acetato de sódio anidro	69
4.1.5	Análise morfológica por MEV – cloreto de potássio	70
4.1.6	Análise morfológica por MEV – acetato de sódio anidro	72
4.1.7	Distribuição granulométrica do cloreto de potássio	73
4.1.8	Distribuição granulométrica do acetato de sódio	75
4.2	Análise fluidodinâmica	76
4.2.1	Cloreto de potássio seco	76
4.2.2	Cloreto de potássio úmido	85
4.2.3	Acetato de sódio anidro	91
4.2.4	Acetato de sódio trihidratado	99
4.3	Análise de secagem	111
4.3.1	Acetato de sódio	111
4.3.2	Cloreto de Potássio	123
5	Conclusões	131

5.1	Fluidodinâmica	131
5.2	Secagem.....	131
6	Sugestões para trabalhos futuros	133
7	Referências Bibliográficas	134

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Estados de umidade não-ligada (STRUMILLO & KUDRA, 1986).....	5
Figura 2.2 - Termograma para a argila (STRUMILLO & KUDRA, 1986)	7
Figura 2.3 - Curva de secagem (STRUMILLO & KUDRA, 1986).	8
Figura 2.4 - Curva de taxa de secagem (STRUMILLO & KUDRA, 1986).....	9
Figura 2.5 - Curvas de taxa de secagem (STRUMILLO & KUDRA, 1986).	10
Figura 2.6 - Curvas de temperatura de materiais úmidos na superfície e no centro do material. (STRUMILLO & KUDRA, 1986).	11
Figura 2.7 - Zonas de secagem em um material secando (STRUMILLO & KUDRA, 1986).	11
Figura 2.8 - Regime de fluidização em função da velocidade específica do gás. (GRACE, 1984).	13
Figura 2.9 - Vários projetos de secadores (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).....	15
Figura 2.10 - Diagrama simplificado de classificação de partículas para fluidização através de ar em condições normais (GELDART, 1986).	16
Figura 2.11 – Diagrama de ΔP versus u para partículas com faixa de tamanho amplo (KUNII & LEVENSPIEL 1991).	20
Figura 2.12 - Queda de pressão em função da velocidade do ar (COUDERC, 1985).	21
Figura 2.13 - Altura de um leito fluidizado em função da velocidade (COUDERC, 1985).	21
Figura 2.14 - Representação esquemática de um secador de leito pulso-fluidizado contínuo com quatro seções.....	24
Figura 2.15 - Velocidade em função do tempo numa determinada seção de um leito pulso-fluidizado de quatro seções (GAWRZYNSKI <i>et al</i> , 1996).	27
Figura 2.16 - Queda de pressão para partículas de prolipropileno seco (símbolos fechados), e úmido (símbolos abertos) em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado (GAWRZYNSKI <i>et al.</i> , 1998).....	32
Figura 2.17 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em PFB ($X = 70\%b.u$; $f = 10Hz$) “●” $H = 50$ mm; “○” $H = 100$ mm; “▼” $H = 150$ mm; “∇” $H = 200$ mm (KUDRA <i>et al.</i> , 2002).....	32

Figura 2.18 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em PFB ($X = 70\%b.u.$; $f = 5\text{ Hz}$) “●” $H = 50\text{ mm}$; “○” $H = 100\text{ mm}$; “▼” $H = 150\text{ mm}$; “▽” $H = 200\text{ mm}$ (KUDRA <i>et al.</i> , 2002).....	33
Figura 2.19 - Secador industrial de arroz - PHACHAYAWARAKORN <i>et al.</i> , 2005.	34
Figura 2.20 - Índice de fluidização de esferas de vidro (ballotini), para velocidade decrecente do ar, $f = 30\text{ Hz}$, (MARRING <i>et al.</i> , 1994).....	36
Figura 2.21 - Índice de fluidização para partículas de amido de batata, u decrescente, $f = 30\text{ Hz}$, (MARRING <i>et al.</i> , 1994).	36
Figura 2.22 – Unidade celular com os eixos coordenados x , y e z , mostrando as arestas axiais (a , b e c) e os ângulos interaxial (α , β e γ) (CALLISTER, 1994).....	37
Figura 2.23- Geometrias de unidade celular para os sete sistemas cristalinos (CALLISTER, 1994).	38
Figura 3.1 – Fotografia do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo 440i.....	45
Figura 3.2 – Mastersizer Modelo S MAM 5005.	45
Figura 3.3 - Fotografia do Leito Pulso-Fluidizado (à direita) e periféricos.	47
Figura 3.4 - Soprador de ar.....	47
Figura 3.5 – Válvula borboleta.....	48
Figura 3.6 – Caixa de inox com isolamento de lã de vidro, onde estão instaladas as resistências elétricas.	48
Figura 3.7 - Vista do conjunto de resistências elétricas.	48
Figura 3.8 – primeiro plano: leito de seção retangular e visores de vidro temperado.....	49
Figura 3.9 - Vista do quadro elétrico com o secador em segundo plano.....	50
Figura 3.10 - Representação esquemática do leito pulso-fluidizado e periféricos.	50
Figura 3.11. Câmara de distribuição de ar com 4 seções.	51
Figura 3.12 - Disco rotativo, peça responsável pelo redirecionamento da corrente gasosa.	51
Figura 3.13 - Polias e correia, partes do sistema de pulsação da corrente gasosa.	52
Figura 3.14 - Sensor indutivo.	52
Figura 3.15 - Vista interna da câmara de distribuição do ar. No centro da figura, é visível a abertura do disco rotativo.	53
Figura 3.16 - Vista interna da câmara de secagem — material (feijão) movimentado pelo fluxo de ar pulsante (Nitz, 2006).	53
Figura 3.17 - Tela gerada pelo aplicativo de supervisão e aquisição de dados da operação.....	55

Figura 3.18 - Flange em que se instalou a placa de orifício.	55
Figura 3.19 – Procedimento de amostragem durante o processo de secagem.....	62
Figura 3.20 - Karl-Fischer: equipamento para determinação do conteúdo de umidade.....	66
Figura 4.1 - Gráfico de Porosimetria de Mercúrio para o Cloreto de Potássio. Tempo de equilíbrio 30s.	69
Figura 4.2 - Gráfico de Porosimetria de Mercúrio para o Acetato de sódio anidro. Tempo de equilíbrio 30s.	70
Figura 4.3 – Cloreto de potássio, ampliação 50×	71
Figura 4.4 – Cloreto de potássio, ampliação 100 ×	71
Figura 4.5 – Cloreto de potássio, ampliação 300 ×	71
Figura 4.6 – Cloreto de potássio, ampliação 300 ×	71
Figura 4.7 – Acetato de Sódio, ampliação 100×	72
Figura 4.8 – Acetato de Sódio, ampliação 200 ×	72
Figura 4.9 – Acetato de Sódio, ampliação 500×	72
Figura 4.10 – Acetato de Sódio, ampliação 500 ×	72
Figura 4.11 – Distribuição granulométrica das partículas de cloreto de potássio	74
Figura 4.12 – Distribuição granulométrica das partículas de acetato de sódio	75
Figura 4.13 – Curva de fluidização, KCl seco, 5 kg.....	77
Figura 4.14 – Curva de fluidização, KCl seco, 9 kg.....	78
Figura 4.15 – Curva de fluidização, KCl seco, 13 kg.....	78
Figura 4.16 – Curva de fluidização, KCl Seco, 200 rpm.....	79
Figura 4.17 – Curva de fluidização, KCl Seco, 500 rpm.....	79
Figura 4.18 – Curva de fluidização, KCl Seco, 700 rpm.....	80
Figura 4.19 – Comparação entre fluidização convencional e pulso fluidização, KCl Seco, 5 kg	80
Figura 4.20 – Comparação entre fluidização convencional e pulso fluidização, KCl Seco, 9 kg	81
Figura 4.21 – Comparação entre fluidização convencional e pulso fluidização, KCl Seco, 13 kg	81
Figura 4.22 – Índice de fluidização do KCl seco, 5 kg	84
Figura 4.23 – Índice de fluidização do KCl seco, 9 kg	84
Figura 4.24 – Índice de fluidização do KCl seco, 13 kg	85

Figura 4.25 - Curvas fluidodinâmicas do KCl úmido ($U=6\%$) em leito pulso-fluidizado, 13 kg de carga inicial, 200 rpm, 500 rpm e 700 rpm.....	86
Figura 4.26 – Curva fluidodinâmica, KCl úmido ($U=6\%$), Leito Convencional	86
Figura 4.27 – Curvas fluidodinâmicas do KCl úmido ($U=6\%$) em leito pulso-fluidizado e leito convencional, 13kg de carga inicial	87
Figura 4.28 – Curvas fluidodinâmicas do KCl seco e úmido em leito convencional para 5 kg de material	88
Figura 4.29 - Curvas fluidodinâmicas do KCl seco e úmido em leito convencional para 9 kg de material	89
Figura 4.30 - Curvas fluidodinâmicas do KCl seco e úmido em leito convencional para 13 kg de material	89
Figura 4.31 – Curvas de fluidização, KCl, 13 kg massa inicial, 700 rpm	90
Figura 4.32 - Curvas de fluidização, KCl, 13 kg massa inicial, 500 rpm.....	90
Figura 4.33 - Curvas de fluidização, KCl, 13 kg massa inicial, 200 rpm.....	90
Figura 4.34 – Curva de fluidização, Acetato de sódio anidro, Convencional	91
Figura 4.35 - Curva de fluidização, Acetato de sódio anidro, 500 rpm.....	92
Figura 4.36 - Curva de fluidização, Acetato de sódio anidro, 900 rpm.....	92
Figura 4.37 – Curva de fluidização, Acetato de sódio anidro, 9 kg	93
Figura 4.38 - Curva de fluidização, Acetato de sódio anidro, 12 kg.....	93
Figura 4.39 – Comparação entre fluidização convencional e pulso-fluidização, Acetato de sódio anidro – 9 kg	94
Figura 4.40 - Comparação entre fluidização convencional e pulso-fluidização, Acetato de sódio anidro – 12 kg	94
Figura 4.41 – Fluidodinâmica do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente em leito convencional, 9 kg	96
Figura 4.42 – Fluidodinâmica do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente em leito convencional, 12 kg	97
Figura 4.43 – Fluidodinâmica do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente em leito pulsante, 9 kg, 500 rpm.....	97
Figura 4.44 – Fluidodinâmica do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente em leito pulsante, 12 kg, 500 rpm.....	98
Figura 4.45 – Fluidodinâmica do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente em leito pulsante, 9 kg, 900 rpm.....	98

Figura 4.46 – Fluidodinâmica do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente em leito pulsante, 12 kg, 900 rpm.....	99
Figura 4.47 – Fluidodinâmica do acetato de sódio trihidratado com fluxo de gás crescente e decrescente em leito convencional	100
Figura 4.48 – Fluidodinâmica do acetato de sódio trihidratado com fluxo de gás crescente e decrescente em leito pulso-fluidizado, 900 rpm.....	100
Figura 4.49 – Fluidodinâmica do acetato de sódio trihidratado com fluxo de gás crescente e decrescente em leito pulso-fluidizado, 500 rpm.....	101
Figura 4.50 – Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito pulso-fluidizado com fluxo crescente de gás e 9 kg de material.	102
Figura 4.51 – Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito pulso-fluidizado com fluxo crescente de gás e 12 kg de material.	102
Figura 4.52 – Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito pulso-fluidizado e convencional com fluxo crescente de gás e 9 kg de material.	104
Figura 4.53 – Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito pulso-fluidizado e convencional com fluxo crescente de gás e 12 kg de material.	104
Figura 4.54 - Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito fluidizado convencional com fluxo crescente de gás para 9 e 12 kg de material.	105
Figura 4.55 - Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito pulso-fluidizado com fluxo crescente de gás para 9 e 12 kg de material, 900 rpm.....	105
Figura 4.56 - Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito pulso-fluidizado com fluxo crescente de gás para 9 e 12 kg de material, 500 rpm.....	106
Figura 4.57 – Curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito convencional para 9 kg de material	107
Figura 4.58 - Curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito convencional para 12 kg de material	107
Figura 4.59 - Curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito pulso-fluidizado para 9 kg de material e 500 rpm	109
Figura 4.60 - Curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito pulso-fluidizado para 9 kg de material e 900 rpm	109
Figura 4.61 - Curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito pulso-fluidizado para 12 kg de material e 500 rpm	110

Figura 4.62 - Curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito pulso-fluidizado para 12 kg de material e 900 rpm	110
Figura 4.63 – Curvas de secagem do acetato de sódio trihidratado em leito pulsante a 65°C; 500 rpm e 900 rpm com $V=420 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $X_0 = 0,69$ e 12 kg (inicial).	111
Figura 4.64 - Curvas de secagem do acetato de sódio trihidratado em leito pulsante a 80°C, 500 rpm e 900 rpm com $V=420 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $X_0 = 0,69$ e 12 kg (inicial).	112
Figura 4.65 – Curva de secagem do acetato de sódio, 12 kg (inicial), 420 Nm^3/h , 500 e 900 rpm.....	113
Figura 4.66 – Curvas de secagem do acetato de sódio a 65°C e 80°C , 12 kg (inicial), 420 Nm^3/h	113
Figura 4.67 – Curvas de secagem do acetato de sódio, 12 kg (inicial), 420 Nm^3/h , 65°C, réplicas a 500 rpm e 900 rpm.	114
Figura 4.68 – Curvas de secagem do acetato de sódio, 12 kg (inicial), 420 Nm^3/h , 80°C, réplicas a 500 rpm e 900 rpm.	114
Figura 4.69 – Curvas de secagem do acetato de sódio em leito fluidizado convencional a 65°C, 12 kg (inicial), 280 Nm^3/h	115
Figura 4.70 – Curvas de secagem do acetato de sódio em leito fluidizado convencional a 80°C, 12 kg (inicial), 280 Nm^3/h	116
Figura 4.71 – Curvas de secagem do acetato de sódio em leito convencional a 65°C e 80°C, 12 kg (inicial), 280 Nm^3/h e suas réplicas	116
Figura 4.72 – Curvas comparativas de secagem do acetato de sódio a 80°C em leito pulsante (500 rpm e 900 rpm) e leito convencional	117
Figura 4.73 – Curvas comparativas de secagem do acetato de sódio a 65°C em leito pulsante (500 rpm e 900 rpm) e leito convencional	118
Figura 4.74 – Curvas comparativas de secagem em leito convencional a 65°C e 80°C	118
Figura 4.75 – Curvas de taxa de secagem em leito pulso-fluidizado, 500 rpm e 65°C.....	119
Figura 4.76 - Curvas de taxa de secagem em leito pulso-fluidizado, 500 rpm e 80°C	119
Figura 4.77 - Curvas de taxa de secagem em leito pulso-fluidizado, 900 rpm e 65°C	120
Figura 4.78 - Curvas de taxa de secagem em leito pulso-fluidizado, 900 rpm e 80°C	120
Figura 4.79 – Gráfico de Pareto.....	122
Figura 4.80 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulso-fluidizado a 60°C, 13 kg (inicial), 500 Nm^3/h , 500 rpm, $U=6\%$ (b.u).....	123

Figura 4.81 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulso-fluidizado a 80°C, 13 kg (inicial), 500Nm ³ /h, 500 rpm, U=6% (b.u).....	124
Figura 4.82 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulso-fluidizado a 60°C e 80°C, 13 kg (inicial), 500Nm ³ /h, 500 rpm, U=6% (b.u)	124
Figura 4.83 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulso-fluidizado a 80°C, 13 kg (inicial), 500Nm ³ /h, 200 rpm, U=6% (b.u).....	125
Figura 4.84 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulso-fluidizado a 60°C, 13 kg (inicial), 500Nm ³ /h, 200 rpm, U=6% (b.u).....	126
Figura 4.85 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulso-fluidizado a 60°C e 80°C, 13 kg (inicial), 500Nm ³ /h, 200 rpm, U=6% (b.u)	127
Figura 4.86 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito fluidizado convencional a 60°C, 13 kg (inicial), 400 Nm ³ /h, U=6% (b.u).....	128
Figura 4.87 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito fluidizado convencional a 80°C, 13 kg (inicial), 400 Nm ³ /h, U=6% (b.u).....	128
Figura 4.88 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito fluidizado convencional a 60°C e 80°C, 13 kg (inicial), 400 Nm ³ /h, U=6% (b.u).....	129
Figura 4.89 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulsante e convencional a 80°C, 13 kg (inicial), U=6% (b.u)	130

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Velocidades de mínima e máxima pulso-fluidização e velocidade de mínima fluidização.	30
Tabela 2.2 - Propriedades físicas do Cloreto de Potássio (PERRY & GREEN, 1997).....	39
Tabela 2.3 - Propriedades físicas do Acetato de Sódio Trihidratado (PERRY & GREEN, 1997).....	40
Tabela 2.4 - Propriedades físicas do Acetato de Sódio Anidro (PERRY & GREEN, 1997).	40
Tabela 3.1 – Tabela do planejamento fatorial completo da secagem do cloreto de potássio	64
Tabela 3.2 - Codificação das variáveis no planejamento experimental da secagem do cloreto de potássio	64
Tabela 3.3 – Tabela do planejamento fatorial completo da secagem do acetato de sódio ...	65
Tabela 3.4 - Codificação das variáveis no planejamento experimental da secagem do acetato de sódio	65
Tabela 4.1 – Resultados experimentais obtidos na análise de Picnometria a gás Hélio para o Cloreto de Potássio.	67
Tabela 4.2 – Média dos Resultados experimentais obtidos na análise de Picnometria a gás Hélio para o Acetato de Sódio.....	68
Tabela 4.3 – Resultados das análises de cloreto de potássio no Mastersizer.	74
Tabela 4.4 – Resultados das análises de acetato de sódio no Mastersizer.....	76
Tabela 4.5. Velocidades de mínima pulso-fluidização, velocidade de mínima fluidização e índice de fluidização para o cloreto de potássio seco.....	83
Tabela 4.6. Velocidades de mínima pulso-fluidização, velocidades de mínima fluidização para o KCl úmido (U=6%)	87
Tabela 4.7. Velocidades de mínima pulso-fluidização, velocidade de mínima fluidização e índice de fluidização para o acetato de sódio anidro.....	95
Tabela 4.8. Velocidades de mínima pulso-fluidização, velocidade de mínima fluidização e índice de fluidização para o acetato de sódio trihidratado.....	106
Tabela 4.9. Taxas de secagem obtidas nos ensaios com réplicas em leito pulso-fluidizado e convencional	121

Lista de Símbolos

A -	Área (m^2)
a -	Adimensional empírica
AF -	Área do Furo da placa (m^2)
Ar -	Número de Arquimedes
B -	Adimensional empírica
C -	Adimensional empírica
CD -	Coefficiente de Descarga
d -	Diâmetro (m)
f -	Frequência (rpm)
FI -	Índice de Fluidização
g -	Aceleração da gravidade (m^2/s)
H -	Altura estática da carga inicial do leito
M -	Massa (kg)
n -	Número de zonas de pulso fluidização
NF -	Números de furos da placa
P -	Pressão (Pa)
Re -	Número de Reynolds
T -	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
t -	Tempo (s)
u,v -	Velocidade (m/s)
U -	Umidade em base úmida (kg/kg)
V -	Vazão de ar (Nm^3/h)
w_D -	Taxa de Secagem ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
X -	Umidade em base seca (kg/kg)

Símbolos Gregos

ΔP - Queda de Pressão, Perda de Carga (Pa)

ε - Porosidade

ϕ - Esfericidade

μ - Viscosidade (Pa.s)

ρ - Massa específica (kg/m³)

Subscritos

A - Água

cr - Crítico

eq - Equilíbrio

g - gás

mb - Início das bolhas

mf - Mínima fluidização

0 - inicial

p - Partícula

pf - Pulso fluidização

S - Material seco

Sobrescritos

max - máximo

mín - mínimo

1 Introdução e Objetivos

A secagem em leito fluidizado é amplamente empregada para remoção de umidade de materiais particulados. Com a técnica de fluidização, são alcançadas altas velocidades de transferência de calor e massa, tornando essa operação bastante eficaz na secagem desses materiais.

A qualidade da fluidização depende, além de outros fatores, do material a ser fluidizado, pois partículas coesivas e finas, em geral, não alcançam boa fluidização em leito fluidizado convencional.

A necessidade de se obter fluidização de qualidade com materiais de difícil fluidização e processos que maximizem a transferência de calor e massa e que minimizem o consumo de energia levou pesquisadores a estudarem leitos fluidizados modificados, tais como: fluidização com agitação mecânica, vibração mecânica, pulsação do fluido, entre outros, possibilitando assim, o tratamento de materiais aglomerantes, uma distribuição uniforme do material dentro do leito, economia energética e evitando a formação de canais preferenciais.

Trabalhos que aplicam a pulsação do fluido no leito de partículas mostram que esse 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 reduz em até 50% o consumo de energia, gerando novas perspectivas para a secagem de diversos materiais particulados, tais como materiais com alto teor de umidade, particulados finos e coesivos.

Os sais acetato de sódio e cloreto de potássio, objetos de estudo do presente trabalho, são materiais particulados finos e muito coesivos quando úmidos. Apresentam muitas aplicações industriais tanto na indústria química quanto na alimentícia. O cloreto de potássio é muito utilizado como fertilizante e o acetato de sódio no controle de glicemia.

A empresa LabSynth localizada em Diadema – São Paulo - industrializa, entre outros, os sais acetato de sódio anidro e cloreto de potássio. Nessa empresa, o processo de secagem para ambos os sais é realizado em leito fluidizado convencional nas seguintes condições:

- Acetato de Sódio Trihidratado: A massa a ser seca é de 500 kg, com umidade em base úmida de 38 a 41%, a uma temperatura inicial de 60°C que é elevada até 90°C durante o período de 10 a 12 horas de secagem. A umidade final do produto seco é menor que 0,10% em base úmida;
- Cloreto de Potássio: A massa a ser seca é de 500 kg, com umidade em base úmida de 4 a 5% , a uma temperatura de 80°C durante um período de secagem de aproximadamente 1 hora. A umidade final do produto seco é menor que 0,10% em base úmida;

Realizando testes preliminares de secagem em leito pulso-fluidizado com ambos os sais, suspeitou-se que o tempo de secagem utilizado na empresa LabSynth era alto. Como esses sais são partículas finas e coesivas quando úmidas, uma explicação possível para essa suspeita é a formação de canais preferenciais durante o processo, comprometendo assim, a qualidade da fluidização.

Neste trabalho, optou-se por estudar a secagem e fluidodinâmica especificamente dos sais acetato de sódio e cloreto de potássio, que apesar de serem ambos classificados como partículas do grupo B de Geldart, apresentam tempos de secagem industriais distintos.

Os objetivos deste trabalho são:

- estudar o comportamento fluidodinâmico do cloreto de potássio úmido e seco e do acetato de sódio trihidratado e anidro em leito pulso-fluidizado em escala piloto e em leito fluidizado convencional;
- comparar os estudos fluidinâmicos realizados para ambos os sais nos dois tipos de leitos: convencional e pulso-fluidizado, pois a pulsação tem o objetivo principal de melhorar a qualidade dos sais secos, resultando em partículas mais uniformes;

- estudar a secagem do cloreto de potássio e acetato de sódio em leito pulso-fluidizado em escala piloto e em leito fluidizado convencional;
- comparar os estudos de secagem realizados de ambos os sais nos dois tipos de leitos: convencional e pulso-fluidizado, pois a pulsação tem o objetivo de melhorar o processo de secagem;
- estudar as características físicas dos sais secos em leito pulso-fluidizado com o objetivo principal de conhecer as estruturas e o comportamento desses sais;
- contribuir agregando conceitos nos escassos estudos encontrados atualmente sobre fluidização pulsante, pois como os equipamentos industriais ainda são poucos, as vantagens da técnica em leito pulso fluidizado com relação à fluidização convencional precisam ser mais bem justificadas e difundidas.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 A operação de secagem

Secagem é um processo que envolve transferência de massa e calor, resultando na remoção de substâncias voláteis, geralmente água. Para que a umidade seja retirada, é necessária, em geral, a existência de uma fonte fornecedora de calor. Esta operação unitária é comumente usada nas indústrias química, alimentícia e farmacêutica e é uma das que mais consome energia (MUJUMDAR, 1995).

Os parâmetros do processo de secagem, tais como, temperatura, umidade, velocidade relativa do ar e pressão total influenciam na intensidade da secagem (STRUMILLO & KUDRA, 1986), ou seja, na velocidade com que a água é removida do material.

2.1.1 Conteúdo de umidade do material

Em geral, o material submetido ao processo de secagem, ou seja, “material úmido”, consiste em um “esqueleto” de material seco com certa quantidade de umidade. Os materiais úmidos possuem diferentes propriedades física, química, mecânica e estrutural, as quais, 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 & KUDRA, 1986).

A umidade encontrada nos sólidos pode ser classificada como:

- Umidade superficial: a umidade existente recobre o material como se fosse um filme, devido aos efeitos da tensão superficial (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

- Umidade livre ou não ligada: trata-se da umidade que está em excesso em relação à umidade de equilíbrio, correspondente ao ar saturado (STRUMILLO & KUDRA, 1986). A umidade não-ligada pode se apresentar de duas formas (Figura 2.1):
 - ✓ Estado funicular: existe um líquido em estado contínuo no interior dos poros do material;
 - ✓ Estado pendular: o líquido ao redor e entre partículas é descontínuo, de modo que a umidade está intercalada por bolhas de ar.

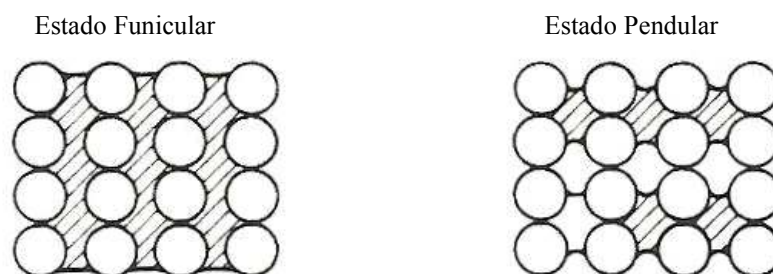


Figura 2.1 - Estados de umidade não-ligada (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

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

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 & KUDRA, 1986):

- ✓ Base seca (em relação à massa seca do material):

$$X = \frac{M_A}{M_s} \cdot 100 \frac{(\text{kg de água})}{(\text{kg de material seco})} \quad (2.1)$$

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

$$U = \frac{M_A}{M_A + M_s} \cdot 100 \frac{(\text{kg de água})}{(\text{kg de material úmido})} \quad (2.2)$$

2.1.2 Classificação dos materiais

Baseado no comportamento durante o processo de secagem, os materiais úmidos podem ser classificados, segundo *Luikov*, em (LUIKOV, 1968):

Corpos tipicamente coloidais (géis elásticos): os quais mudam de tamanho, porém, conservam suas propriedades elásticas durante a secagem. Exemplo: gelatina.

Corpos de poros capilares (géis frágeis): tornam-se menores, quebradiços e podem ser moídos depois de secos. Exemplos: areia e carvão vegetal.

Corpos de poros capilares coloidais: possuem as propriedades dos dois corpos anteriores. As paredes capilares são elásticas e dilatam durante a umidificação. Exemplos: madeira, papelão e couro.

Muitos autores, como Ashworth, Keey, Perkin, classificam materiais secos com base nas condições da umidade dos sólidos (KEEY, 1972; ASHWORTH, 1980; PERKIN, 1972). Eles dividem os materiais em não higroscópicos, parcialmente higroscópicos e higroscópicos.

Os materiais não higroscópicos com umidade não ligada incluem os corpos porosos ou não porosos ($raio > 10^{-7} m$). Os materiais higroscópicos com umidade ligada abrangem principalmente corpos microporosos ($raio < 10^{-7} m$) nos quais o líquido exerce uma pressão de vapor menor que a do líquido puro numa dada temperatura. Os materiais parcialmente higroscópicos incluem corpos macroporosos ($raio > 10^{-7} m$) que, embora também tenham umidade ligada, exercem uma pressão de vapor levemente menor que a exercida pela água livre na superfície.

Se a umidade do corpo higroscópico excede a umidade higroscópica, por exemplo, contém água não ligada, comporta-se como material não higroscópico até o momento em que esta água não ligada é removida (Figura 2.2) (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

Existem dois métodos para remoção de umidade não ligada: evaporação e vaporização. Evaporação ocorre quando a pressão de vapor de água na superfície do sólido é igual à pressão atmosférica. Isto acontece com o aumento da temperatura da água até o ponto de ebulição. Na vaporização, a secagem ocorre por convecção, isto é, pela passagem do ar aquecido sob o produto (MUJUMDAR, 1995).

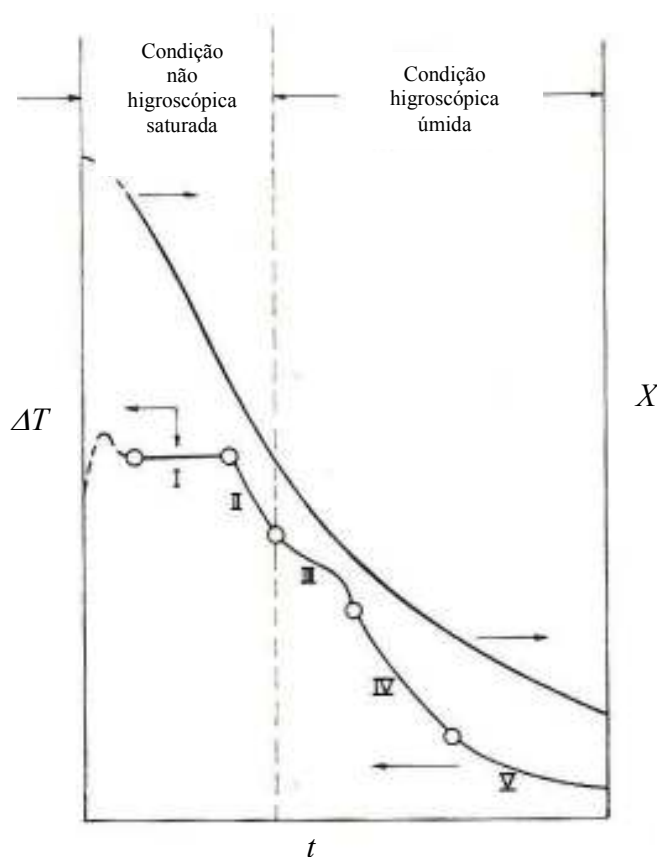


Figura 2.2 - Termograma para a argila (STRUMILLO & KUDRA, 1986)

2.1.3 Cinética de secagem

A curva de secagem é descrita pela umidade contida no material em função do tempo de secagem conforme a curva apresentada na Figura 2.3. No início do período de secagem, a mudança da umidade contida no material com o tempo é ilustrada pela curva AB. Geralmente, esse período inicial é muito curto, e na prática, pode ser omitido. No

primeiro período de secagem, representado pela curva BC (Figura 2.3), a taxa de secagem é constante. Já o segundo período de secagem, representado pela curva CD (Figura 2.3), tem início no ponto crítico C e é caracterizado pela queda da taxa de secagem até o ponto D. A partir daí, a curva aproxima-se assintoticamente da umidade de equilíbrio do material (curva DE – Figura 2.3) (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

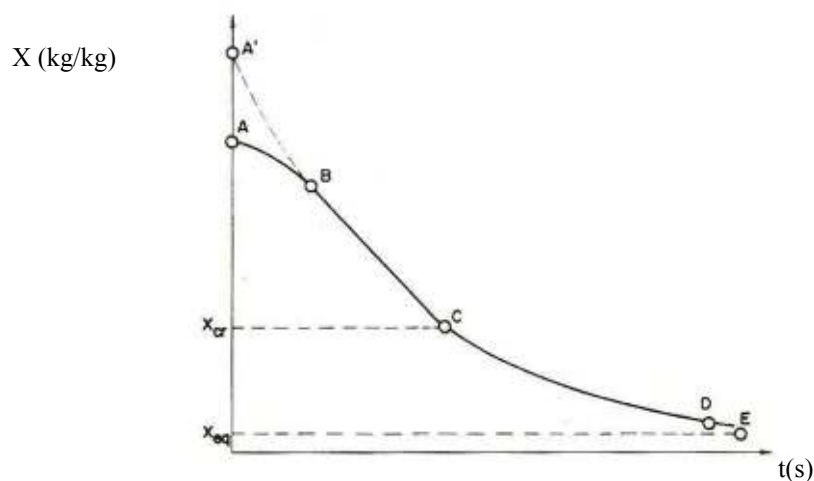


Figura 2.3 - Curva de secagem (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

A taxa de secagem, representada na Figura 2.4 e calculada mediante a equação 2.3, é definida como a quantidade de água removida do material na unidade de tempo por unidade da superfície de secagem.

$$w_D = -\frac{M}{A} \frac{dX}{dt} \quad (2.3)$$

No período inicial de secagem, o corpo de secagem e sua superfície cobertos com a camada de líquido possuem uma temperatura menor que a de equilíbrio e, como resultado, a taxa de secagem no raio de ação entre os pontos AB aumentará até que a temperatura da superfície alcance o valor correspondente da curva BC. Raramente o secador é alimentado com material úmido a uma temperatura maior que a do sólido seco, tal situação é

representada pela curva A'B nas Figura 2.3 e Figura 2.4 (STRUMILLO & KUDRA, 1986; MUJUMDAR, 1995).

No segundo período da taxa de secagem, a umidade contida no material é menor que a umidade crítica e a quantidade de água na superfície do material começa a diminuir gradativamente, resultando na diminuição da pressão de vapor da superfície do material, causando a queda da taxa de secagem (curva CD – Figura 2.4). Nesse período, a taxa de secagem é controlada pelo transporte de água do material (condições internas) que depende do gradiente interno de concentração de água.

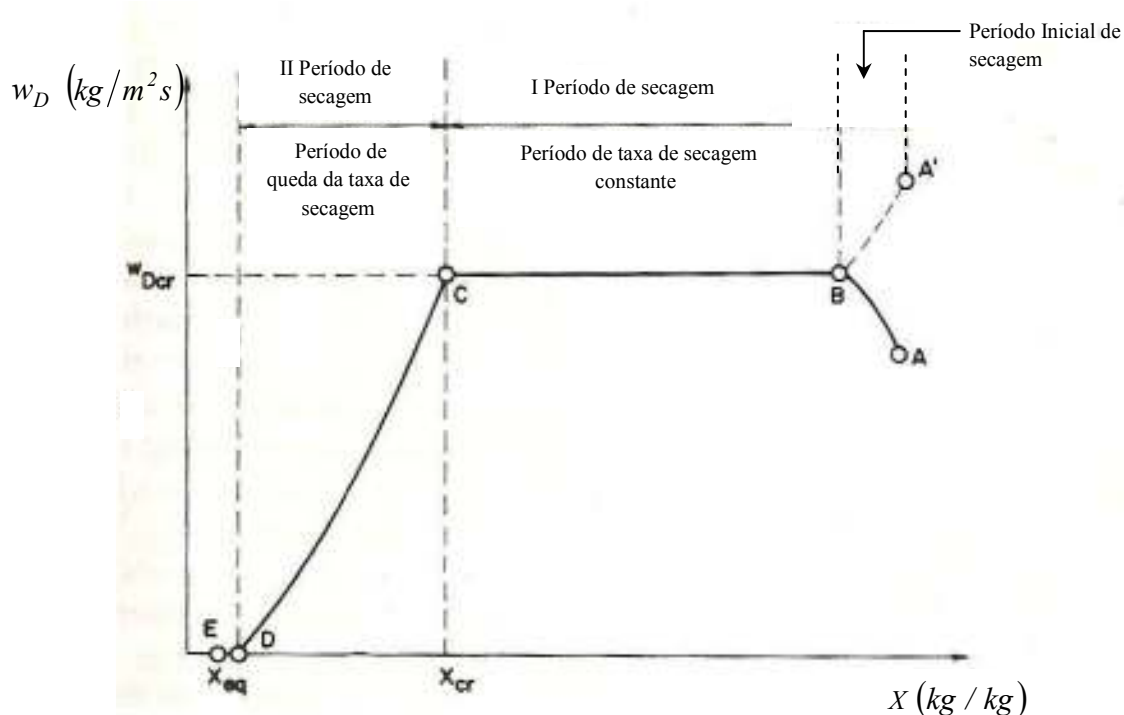


Figura 2.4 - Curva de taxa de secagem (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

O formato da curva do período de queda da taxa de secagem depende, entre outros, do tipo de material a ser seco. São seis os tipos de curvas de secagem no segundo período. As duas primeiras curvas são típicas de corpos de poros capilares com superfícies extensas de evaporação, como papel ou papelão (curva 1 – Figura 2.5), tecidos e couros finos (curva 2 – Figura 2.5). As outras curvas são típicas de corpos capilares com superfície específica pequena de evaporação como cerâmicas e argilas representadas pelas curvas 3 e 4 da Figura

2.5 respectivamente. As curvas 4, 5 e 6 representam corpos de poros capilares coloidais como cereais e pães (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

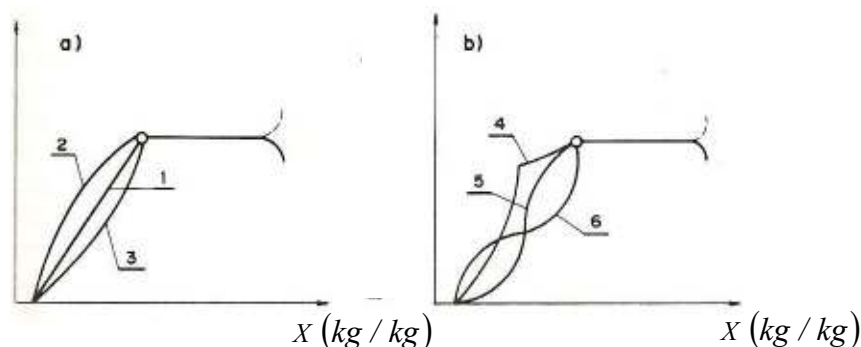


Figura 2.5 - Curvas de taxa de secagem (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

O período de queda da taxa de secagem pode ser obtido, também, pela curva de temperatura a qual descreve a temperatura do material em função da umidade nele contida. As duas curvas (Figura 2.6), a de temperatura da superfície do material e a de seu centro, são importantes na evolução das técnicas de secagem porque a qualidade do material seco depende consideravelmente da temperatura do processo de secagem. No período de secagem constante, a temperatura do material é geralmente igual à temperatura de bulbo úmido, com isso, neste período podem ser utilizadas temperaturas altas para o agente de secagem. Sendo assim, materiais termo sensíveis podem ser secos no primeiro período (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

A distribuição de umidade em um material submetido ao processo de secagem pode ser dividida em três diferentes zonas: seca, de evaporação e úmida; que podem ser observadas na Figura 2.7. Durante o período de taxa de secagem constante, a zona úmida ocupa todo o material e o processo de evaporação ocorre na superfície do sólido. As outras zonas aparecem subsequente durante o período de taxa decrescente. Na zona seca, a umidade é transferida somente na forma de vapor; enquanto que na zona úmida, a umidade líquida é transferida. Estes dois mecanismos de transferência ocorrem na zona de evaporação. A existência da zona de evaporação foi comprovada experimentalmente, através de análises de distribuição de temperatura ou medidas de fluxo de calor dentro do sólido (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

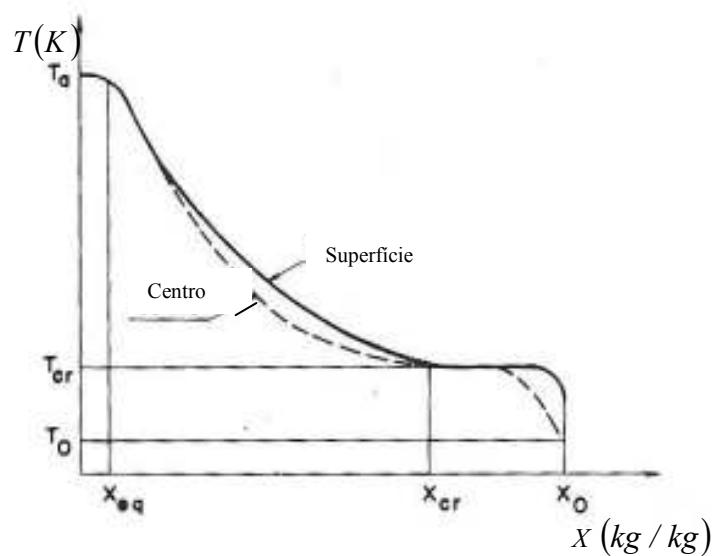


Figura 2.6 - Curvas de temperatura de materiais úmidos na superfície e no centro do material. (STRUMILLO & KUDRA, 1986).



Figura 2.7 - Zonas de secagem em um material secando (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

2.2 Fluidização

Fluidização é o mecanismo em que um leito de recheio é suspenso por uma corrente de fluido (gás/líquido) ascendente, fazendo com que as partículas se movimentem ascendentemente e descendentemente. A partir de um determinado nível de velocidade do fluido, quando a fluidização inicia, a diferença de pressão no leito permanece aproximadamente constante. O sistema nessas condições se assemelha a um fluido, por isto, o nome fluidizado. (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

A fluidização é uma operação unitária que envolve a interação sólido-fluido. A facilidade com que partículas fluidizam e as condições da escala de operação que sustentam a fluidização variam muito entre sistemas gás-sólido, e conseqüentemente, numerosos fatores o afetam.

Em geral, partículas finas tendem a acumular-se e aglomerar-se se estiverem úmidas ou grudadas; assim, o leito deve ser agitado para manter condições satisfatórias de fluidização. Isto pode ser feito com agitador mecânico, ou por operações com velocidades de gás relativamente altas e usando energia cinética de gás injetado para agitar o sólido. Partículas finas com ampla distribuição granulométrica podem ser fluidizadas com grande escala de taxas de fluxo de gás, permitindo flexibilidade de operação em leitos grandes e profundos.

Do contrário, leitos de sólidos uniformemente grandes freqüentemente fluidizam mal, com colisões, jorros e lentidão, o que pode causar sérios danos estruturais nos leitos maiores. Partículas grandes fluidizam em uma escala muito mais estreita de taxas de fluxo de gás, por isso, leitos rasos devem ser usados (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

Outros numerosos fatores podem afetar a qualidade da fluidização, tais como: geometria da tela, altura do leito fixo, umidade do sólido, velocidade de entrada do gás, entre outros.

2.2.1 Regimes de Fluidização

A fluidização pode ser dividida em vários regimes, verificados por GRACE (1984), como mostra a Figura 2.8.

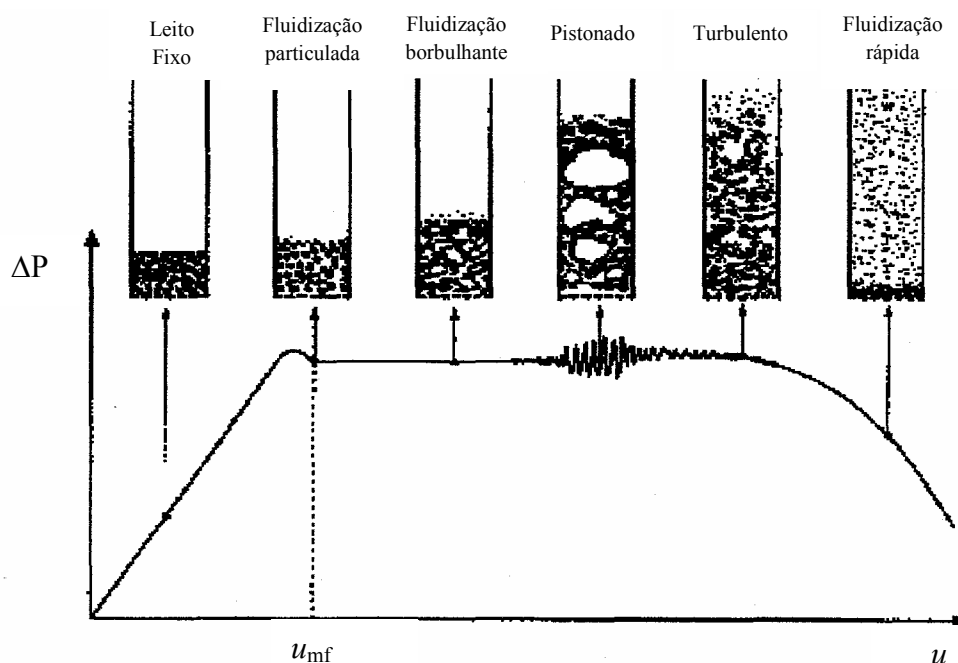


Figura 2.8 - Regime de fluidização em função da velocidade específica do gás. (GRACE, 1984).

Leito fixo: Com velocidade do gás zero até a mínima de fluidização. Nesta fase, as partículas estão imóveis e o fluido escoa entre os interstícios.

Fluidização particulada: Com a velocidade do gás entre a mínima de fluidização e a mínima para iniciar o regime de bolhas. O leito se expande de maneira progressiva, a superfície superior é bem definida, pouca agregação de partículas e flutuação de pressão pequena.

Fluidização borbulhante: Com a velocidade do gás acima da velocidade de mínima fluidização, várias bolhas são formadas próximas ao distribuidor e sobem para a superfície do leito.

Fluidização pistonada: Com velocidade do gás entre a mínima para fluidização pistonada e a mínima para o regime turbulento. As bolhas formadas ocupam grande parte da coluna e a superfície superior sofre colapsos com frequência, flutuações de pressão são observadas.

Fluidização turbulenta: Com velocidade do gás entre a mínima para a fluidização turbulenta e a velocidade terminal das partículas. São observadas pequenas regiões de vazios e movimentos desordenados de partículas com formação de bolhas instáveis, a superfície superior é indefinida e pequenas flutuações de pressão são observadas.

Fluidização rápida: Com velocidade do gás acima da velocidade terminal das partículas. A superfície não é definida, as partículas são transportadas para fora pelo topo e podem ser capturadas por um ciclone e recirculadas próximo ao fundo da coluna.

Transporte pneumático: A velocidade do gás é superior à da fluidização. Não há praticamente partículas descendentes próximas à superfície do distribuidor de ar. As partículas são arrastadas do leito (GRACE, 1984).

2.2.2 Secagem de sólidos em leitos fluidizados

O secador de leito fluidizado é utilizado extensivamente em uma ampla variedade de indústrias por apresentar grande capacidade, baixo custo de construção, fácil operabilidade e alta eficiência térmica. É compatível com qualquer tipo de sólido úmido tanto quanto este possa ser fluidizado pelo gás aquecido. Companhias de ferro e aço estão usando grandes secadores para secar carvão antes de alimentar seus fornos de *coke*. Mesmo que pequenos, mas eficientes, eles servem as indústrias farmacêuticas e outras refinadas indústrias químicas. A Figura 2.9 ilustra alguns secadores de leitos fluidizados convencionais (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

Determinados materiais, como por exemplo, sólidos coesivos e pegajosos que aglomeram não estão adaptados para o secador de leito fluidizado convencional e precisam de tratamento especial. Para esses tipos de materiais, o leito vibro-fluidizado pode funcionar bem, pois, o ar quente distribuído vibra de tal modo que conduz partículas da entrada até a saída da superfície de um lugar raso do leito sem que estas se aglomerem. Grânulos de pesticidas, brometo de amônia, fármacos, gêneros alimentícios como trigo e grãos de soja, plásticos como PVC e nylon, são todos secos nessas condições (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

Partículas de tamanhos maiores, tais como feijão e ervilhas, são frequentemente difíceis de fluidizar. Para esses sólidos, secadores de leito de jorro são algumas vezes utilizados.

Comparativamente, partículas pequenas de minerais ou sais que são apenas úmidas superficialmente requerem pouco tempo de secagem. Tais materiais podem ser eficientemente secos em leitos fluidizados finos ou em linhas de transporte pneumático. Estas operações são denominadas de secagem rápida.

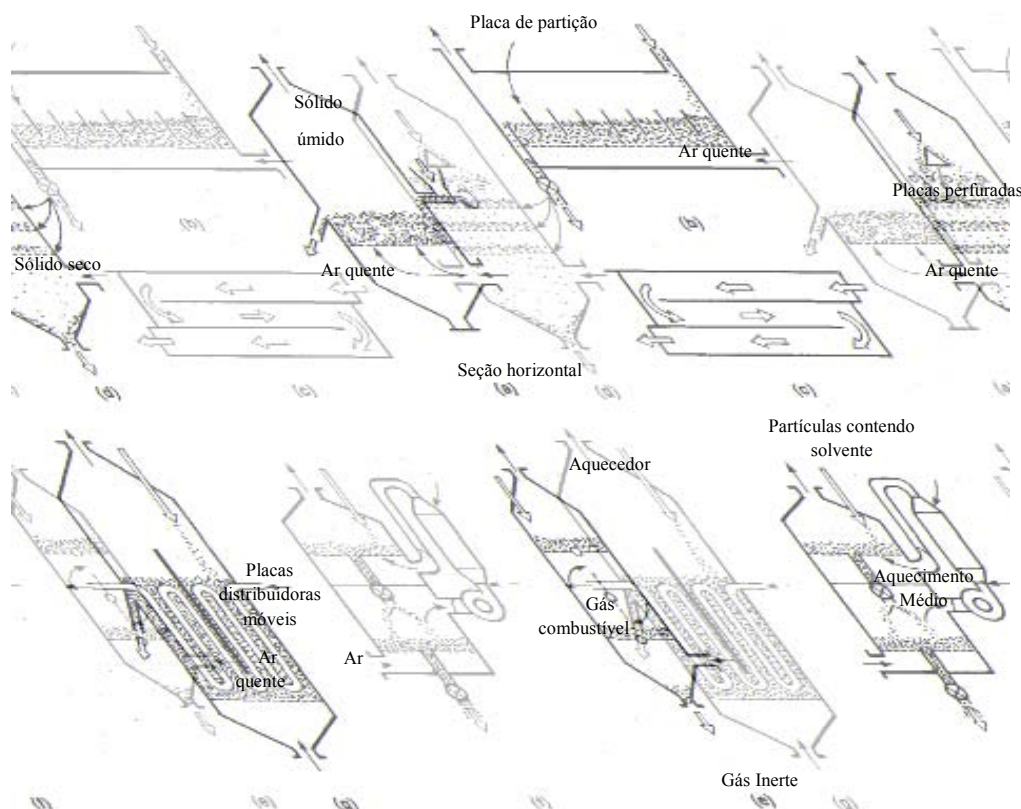


Figura 2.9 - Vários projetos de secadores (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

Em algumas indústrias, tratamento químico de sólidos a baixa temperatura, tal como calcinação ou torrefação, requerem secagem posterior. Estas situações são denominadas de operações de múltiplos estágios, quando o último estágio ou os estágios finais podem ser usados para tais tratamentos térmicos (KUNII & LEVENSPIEL, 1991).

2.2.3 Características das partículas

Com relação ao comportamento quando colocadas em um leito percolado por um fluido, as partículas podem ser divididas em quatro categorias, de acordo com GELDART (1986), e são classificadas em C, A, B e D, como mostra a Figura 2.10:

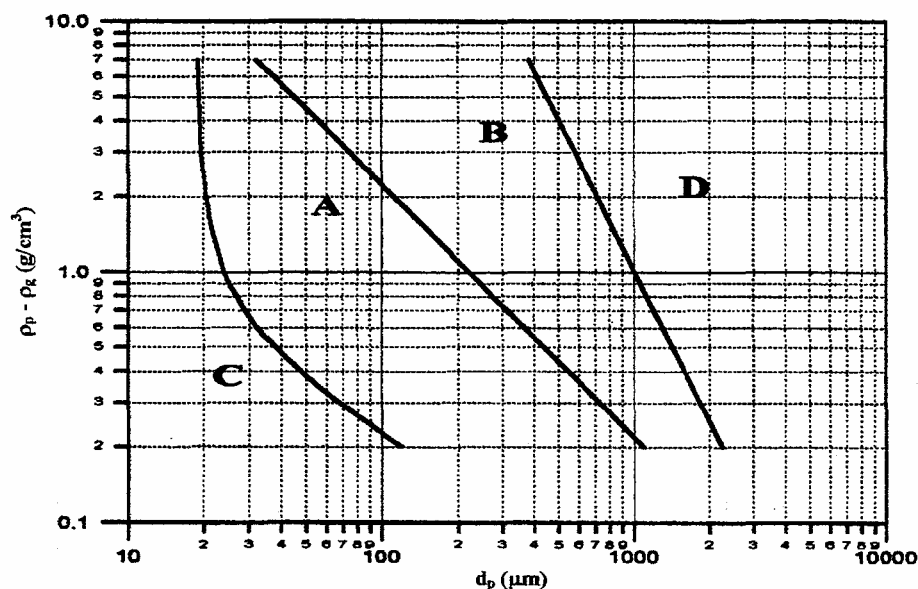


Figura 2.10 - Diagrama simplificado de classificação de partículas para fluidização através de ar em condições normais (GELDART, 1986).

Grupo C: Partículas coesivas e muito finas. Normalmente, a fluidização é extremamente difícil, devido às forças interpartículas serem maiores que a resultante da ação do gás. Em leitos de pequeno diâmetro, estas partículas tendem a elevar-se como um bloco de sólidos, ao passo que em leitos de grande diâmetro, canais preferenciais formam-se do distribuidor à superfície do leito, não havendo fluidização dos sólidos (GELDART, 1986).

Grupo A: Corresponde a partícula relativamente fina ($20 < d_p < 100 \mu m$) e relativamente leve ($\rho_p < 1400 kg/m^3$). Possui uma grande faixa de fluidização entre a velocidade de mínima fluidização, u_{mf} , e a velocidade para iniciar as bolhas, u_{mb} , proporcionando alta expansão do leito e alta mistura do gás e do sólido. As partículas desta categoria apresentam uma fluidização particulada antes da aparição das bolhas; a

velocidade mínima de borbulhamento é superior à velocidade de mínima fluidização. Quando a velocidade do gás aumenta acima de u_{mb} , a fluidização é borbulhante e é caracterizada por (GELDART, 1986):

- ✓ as bolhas têm movimentos ascendentes mais rápidos que o gás;
- ✓ as bolhas surgem após o distribuidor, dividem-se e coalescem quando sobem em direção à superfície do leito;
- ✓ em leito raso, só há uma boa mistura das partículas, quando poucas bolhas estão presentes;
- ✓ quando estas bolhas atingem o diâmetro do leito, o regime muda para pistão.

Grupo B: Para estas partículas, as forças interpartículas são desprezíveis e o fenômeno de bolhas começa no início da fluidização. Não há evidência do tamanho máximo de bolhas, de modo que a coalescência é o fenômeno predominante. O diâmetro das bolhas aumenta com a altura do leito e a velocidade do gás em excesso ($u - u_{mf}$). A expansão do leito é pequena e uniforme (GELDART, 1986).

Grupo D: Refere-se aos materiais densos e de diâmetros maiores ($d_p > 600 \mu m$). Requer alta velocidade para fluidizar e proporciona baixa expansão do leito e baixa mistura de sólidos. Para fluidizar estas partículas, utiliza-se distribuidor particular, favorecendo a fluidização do tipo leito de jorro. As bolhas têm movimentos ascendentes mais lentos que o gás e quando atingem o diâmetro do leito, observa-se o “*slugging*” ou pistão (GELDART, 1986).

Outras áreas de estudo procuram localizar mais claramente os limites (fronteiras) entre as regiões que delimitam o tipo de sólido. Estes não dependeriam somente da densidade e do tamanho médio de partícula, mas também da relação u/u_{mf} , das propriedades do gás e da distribuição de tamanho do sólido (GRACE, 1984).

2.2.4 Velocidade de mínima fluidização

A velocidade de mínima fluidização corresponde ao ponto de intersecção entre a velocidade superficial do gás e a queda de pressão, quando esta se iguala ao peso do leito de partículas (RICHARDSON, 1977). 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 & 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:

$$\Delta P = g(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho)H \quad (2.4)$$

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

E rearranjando a equação (2.4) de Ergun, para queda de pressão em leito empacotado, tem-se:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150u\mu}{\phi_s^2 d_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1,75\rho u^2(1 - \varepsilon)}{\phi_s d_p \varepsilon^3} \quad (2.5)$$

Adaptando a equação (2.4) e (2.5) para o ponto de mínima fluidização, tem-se uma equação quadrática para u_{mf} :

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} Re_{p,mf}^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} Re_{p,mf} = Ar \quad (2.6)$$

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

Quando as partículas são muito pequenas, a equação (2.6) é simplificada para (KUNII & LEVENSPIEL 1991):

$$u_{mf} = \frac{d_p^2(\rho_s - \rho)g}{150\mu} \frac{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}{1 - \varepsilon_{mf}}, \quad Re_{p,mf} < 20 \quad (2.7)$$

Para partículas muito grandes, tem-se:

$$u_{mf}^2 = \frac{d_p(\rho_s - \rho)g}{1,75\rho} \varepsilon_{mf}^3 \phi_s, \quad Re_{p,mf} > 1000 \quad (2.8)$$

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

$$u_{mf} = \left[(33,7^2 + 0,0408 Ar)^{1/2} - 33,7 \right] \frac{\mu}{\rho d_p} \quad (2.9)$$

$$u_{mf} = \frac{d_p^2(\rho_s - \rho)g}{1650\mu}, \quad Re < 20 \quad (2.10)$$

$$u_{mf}^2 = \frac{d_p(\rho_s - \rho)g}{24,5\rho}, \quad Re > 1000 \quad (2.11)$$

A partir da velocidade de mínima fluidização, pode-se estimar a velocidade de operação (velocidade superficial) do leito fluidizado. A velocidade de operação é um parâmetro muito importante para o dimensionamento de uma câmara em leito fluidizado, já que vai garantir o regime de fluidização.

O diagrama de queda de pressão versus velocidade superficial do gás é particularmente utilizado como um índice aproximado da qualidade de fluidização, especialmente quando observações visuais não são possíveis. Quando a velocidade superficial do gás aumenta sem interrupção, nos leitos de partículas com faixa de tamanho amplo, as partículas menores tendem a escorregar para espaços vazios entre as partículas maiores e fluidizam, enquanto as partículas maiores permanecem estacionárias. Ocorre então fluidização parcial, resultando numa queda de pressão intermediária no leito (KUNII & LEVENSPIEL 1991).

Com o aumento da velocidade superficial do gás, ΔP se aproxima de $(m \cdot g)/A$ mostrando que todos os sólidos conseqüentemente fluidizam. A Figura 2.11 ilustra o diagrama ΔP versus u , com velocidade superficial do gás crescente e decrescente. Em sistemas particulados finos, a velocidade de mínima fluidização é definida, por convenção, na literatura, como sendo a intersecção da linha de ΔP versus u de leito fixo com a linha $(m \cdot g)/A$ (ponto B da Figura 2.11) (KUNII & LEVENSPIEL 1991).

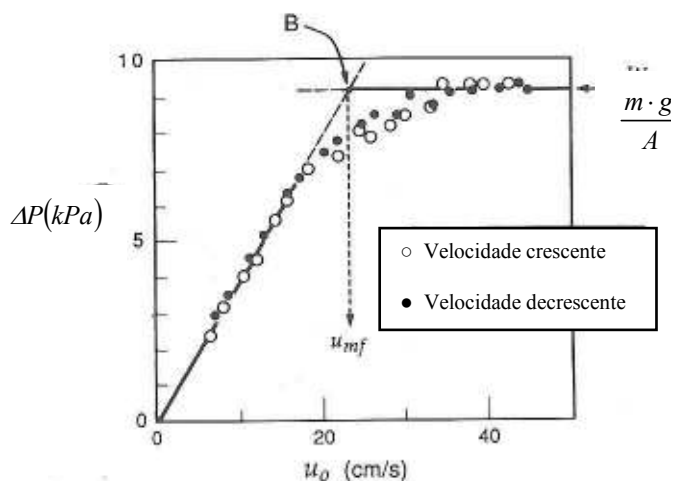


Figura 2.11 – Diagrama de ΔP versus u para partículas com faixa de tamanho amplo (KUNII & LEVENSPIEL 1991).

2.2.5 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 Figura 2.12 e Figura 2.13 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 se aumenta 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 2.13). Este é o fenômeno da expansão característico de leitos fluidizados.

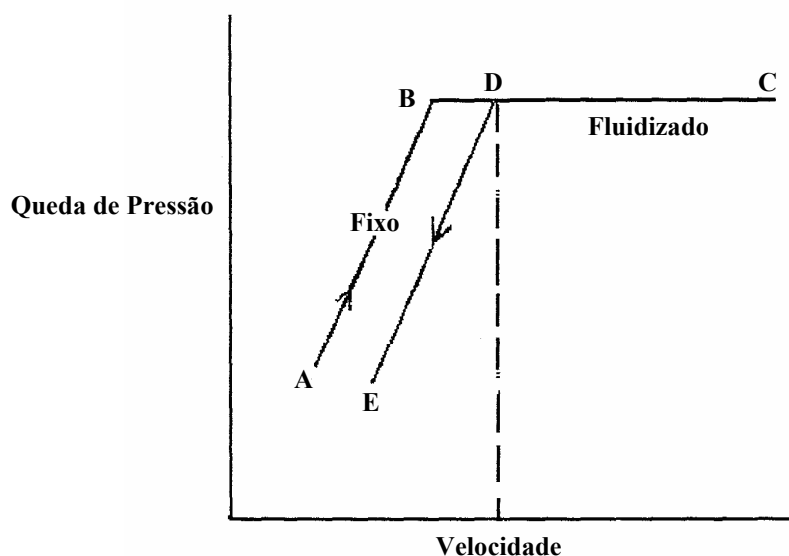


Figura 2.12 - Queda de pressão em função da velocidade do ar (COUDERC, 1985).

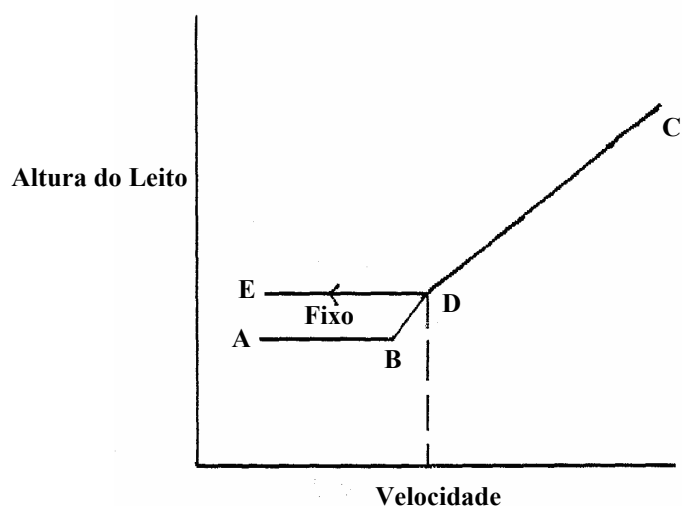


Figura 2.13 - Altura de um leito fluidizado em função da velocidade (COUDERC, 1985).

Ao diminuir a velocidade a partir do ponto C da Figura 2.13, 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.

Segundo RICHARDSON (1977), 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 de as 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 a má distribuição do fluido no leito (RICHARDSON, 1977).

2.2.6 Distribuição de gás para leito fluidizado

Há bastante tempo é comum o uso de placas porosas de bronze sinterizado, plástico sinterizado ou aço inox como distribuidores de leito fluidizado em escala de laboratório.

Esta prática tem diminuído recentemente, pelas seguintes razões:

- ✓ as placas sinterizadas podem sofrer variações na espessura ou permeabilidade, provocando regiões mortas e regiões de alto escoamento;
- ✓ as placas destes materiais são caras, frágeis e de difícil operação;
- ✓ os resultados não são muito utilizados para aumento de escala, já que a placa porosa sinterizada proporciona a formação de bolhas pequenas, nem sempre conveniente em operações industriais.

As placas perfuradas são as mais utilizadas em leitos fluidizados, tanto em escala de laboratório como industrial. A perda de carga através da placa perfurada, ΔP_D , pode ser calculada pela Equação (2.12), (GELDART, 1986):

$$u \cdot A = CD \cdot NF \cdot AF \sqrt{\frac{2\Delta P_D}{\rho_g}} \quad (2.12)$$

em que: CD - coeficiente de descarga;

ΔP_D - perda de carga na placa distribuidora;

NF - números de furos da placa;

AF - área do furo.

A razão entre ΔP_D e a perda de carga no leito deve estar na faixa de 0,1 a 0,5 com valores mais altos para materiais difíceis de fluidizar, para leitos rasos ($H/D > 0,5$) e aplicações sensíveis ao tamanho de bolhas.

2.3 Leitos Pulso-Fluidizados

A pulso-fluidização é uma variação da técnica de fluidização convencional onde o gás é introduzido no leito de maneira periódica.

Para causar esta pulsação da corrente gasosa, é possível a utilização de uma válvula borboleta (KUDRA & MUJUMDAR, 2002) ou de uma válvula distribuidora rotativa que interrompe periodicamente a corrente de ar e a direciona para diferentes seções do leito na câmara inferior à tela de suporte do secador (KUDRA & MUJUMDAR, 2007). O ar ao chegar à câmara ativa do secador fluidiza o segmento do leito localizado logo acima, que se torna praticamente estagnado quando o ar é direcionado à próxima câmara. Na prática, em função da compressibilidade do gás e da inércia do leito, a fluidização é vigorosa por todo o leito.

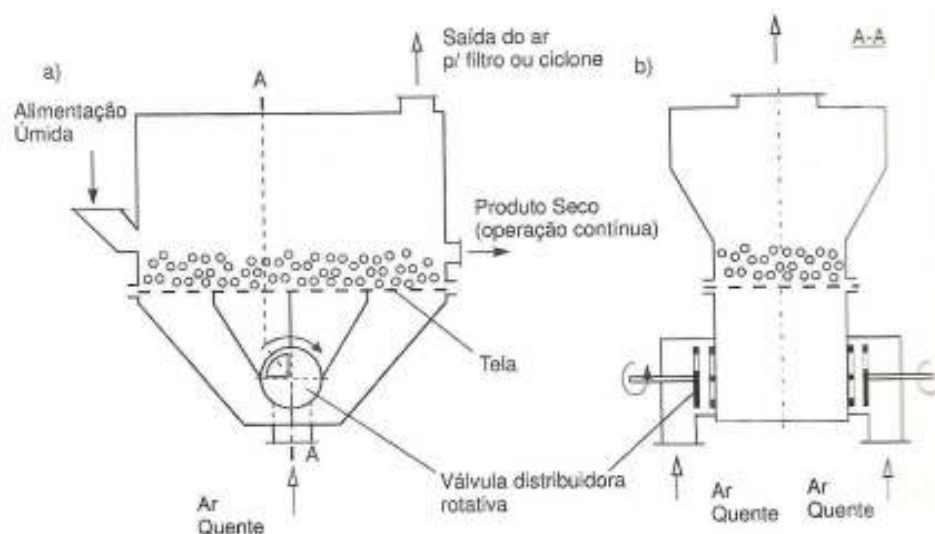


Figura 2.14 - Representação esquemática de um secador de leito pulso-fluidizado contínuo com quatro seções.

Distribuição seqüencial da corrente gasosa também é uma forma de promover a pulso-fluidização. Nessa técnica, o fluxo gasoso é periodicamente redirecionado para diferentes seções do leito. O secador utilizado no presente estudo utiliza essa técnica.

O secador de leito pulso-fluidizado oferece as seguintes vantagens quando comparado com o secador de leito fluidizado convencional (KUDRA & MUJUMDAR, 2002):

- ✓ Boa fluidização de partículas grandes e com alto teor de umidade como vegetais picados;
- ✓ Perda de carga do leito reduzida em 7-12% em função de uma velocidade mínima de fluidização;
- ✓ Melhoria da estrutura do leito, ausência de formação de canais preferenciais e melhor uniformidade das partículas;
- ✓ Operação com leitos mais rasos;
- ✓ Economia de energia em até 50%.

São encontrados poucos estudos sobre fluidização intermitente ou pulsante. Equipamentos industriais são poucos e isso pode significar que ainda devem ser melhor

justificadas e difundidas as vantagens dessa técnica com relação à fluidização convencional.

A forma mais simples de se obter a intermitência do fluxo é por meio de sucessivas aberturas e fechamentos de uma válvula solenóide, por exemplo, (WONG & BAIRD, 1970; WANG & RHODES, 2005a e 2005b). Uma grande inconveniência dessa técnica é o fato de a interrupção do fluxo provocar um efeito tipo golpe de aríete, submetendo a tubulação a sensíveis variações de pressão a cada ciclo.

WANG & RHODES (2005a e 2005b) realizaram um estudo simulado do efeito da pulso-fluidização como técnica para evitar o colapso de leitos fluidizados. Concluíram que a oscilação da velocidade superficial do gás é eficiente para inibir o colapso de leitos cujas partículas tendem a se aglomerar.

2.3.1 Fluidodinâmica da pulso-fluidização

O que diferencia o leito pulso fluidizado de outros leitos móveis são os aspectos fluidodinâmicos.

Segundo KUDRA & MUJUMDAR (1995) e GAWRZYNSKI *et al* (1996), os principais parâmetros de operação de um secador leito fluidizado pulsado 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 & MUJUMDAR, 1995) e de partículas finas e coesivas (GAWRZYNSKI *et al*, 1998 e AMBROSIO, 2003);
- ✓ baixa queda de pressão e velocidade de mínima fluidização, em relação ao leito fluidizado convencional (JURKIEWICZ *et al.*, 1987; GAWRZYNSKI *et al.*, 1989; KUDRA & MUJUMDAR, 1995).
- ✓ ausência de canais preferenciais, melhor mistura da partícula (AMBROSIO, 2003).

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.* (1996) constataram, 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 à 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 *et al* (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.

2.3.2 Velocidade de pulso-fluidização

Pelo fato de existir a distribuição alternada da corrente gasosa, a velocidade de fluidização numa determinada seção é transiente. Isso torna difícil a comparação da pulso-fluidização com leitos fluidizados convencionais, em que a velocidade é constante. Todavia, o parâmetro que de fato deve ser analisado para verificar vantagem ou não da técnica de pulso-fluidização é o consumo de ar, ou seja, a vazão total. Por essa razão, as velocidades costumam ser definidas com base na área transversal total de escoamento, independentemente do número de subdivisões. Essas velocidades também podem ser calculadas, dividindo-se a vazão total do gás pela área de uma seção de pulso-fluidização. Seja qual for a definição aplicada, ela deve ser sempre explicitada.

São necessárias, para melhor compreensão dos estudos realizados em secadores de leito pulso-fluidizado, algumas definições que são apresentadas a seguir, com base na revisão de GAWRZYNSKI *et al* (1996).

- ✓ Velocidade de mínima pulso-fluidização (u_{pf}^{min}): é a velocidade a partir da qual o leito passa a pulsar regularmente.
- ✓ Velocidade de máxima pulso-fluidização (u_{pf}^{max}): é a máxima velocidade com que o leito pulsa regularmente, sendo que valores acima dela implicam em aparecimento de bolhas e jorro localizado.

A literatura recomenda que o secador de leito pulso-fluidizado deva operar entre as duas velocidades supracitadas, pois velocidades acima da de máxima pulso-fluidização não trazem benefícios adicionais ao processo (KUDRA & MUJUMDAR, 2002).

O estudo fluidodinâmico do leito consiste em determinar as velocidades de mínima e máxima pulso-fluidização, além da perda de carga no leito, relacionando essas grandezas com as variáveis do processo: carga de material no leito, propriedades da partícula, do agente de secagem e a frequência de operação.

Na Figura 2.15 apresenta-se, como exemplo, o comportamento da velocidade do gás em cada uma das seções de um leito pulso-fluidizado de quatro zonas (JURKIEWICZ *et al* 1987; GAWRZYNSKI *et al*, 1996). A distribuição do gás segue uma frequência de pulsação à qual corresponde um determinado período τ .

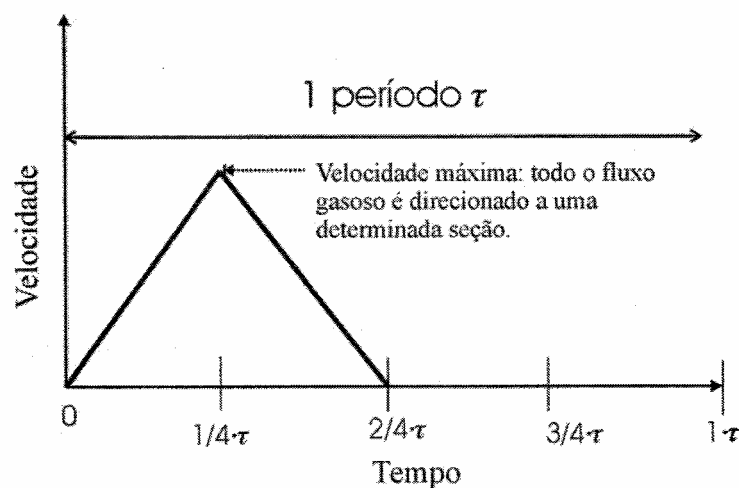


Figura 2.15 - Velocidade em função do tempo numa determinada seção de um leito pulso-fluidizado de quatro seções (GAWRZYNSKI *et al*, 1996).

A Figura 2.15 é apenas ilustrativa, pois sugere a ocorrência de um perfil linear para a velocidade da corrente gasosa, o que não se verifica de fato.

Uma fórmula geral para modelar a dependência da velocidade com o tempo – válida para os instantes de velocidade não nula – foi apresentada por JURKIEWICZ, *et al* (1987) e GAWRZYNSKI *et al* (1996). Nesta fórmula – Equação (2.13) – a velocidade encontra-se adimensionalizada, pois apresenta-se uma relação entre a velocidade superficial instantânea numa determinada zona (u_x) e a velocidade máxima ($u_{máx}$), que é aquela obtida quando o fluxo gasoso está sendo totalmente dirigido para ela:

$$\frac{u_x}{u_{máx}} = e^{\left[C \cdot (1-n \cdot f \cdot t)^2 \right]} \quad (2.13)$$

Na expressão (2.13), n é o número de zonas de pulso-fluidização; f é a frequência de pulsação do leito; t é o tempo e C é uma constante empírica que depende do aparato, a ser determinada experimentalmente, sendo $C < 0$.

A velocidade mostrou-se também dependente da carga de material no leito, representada pela variável H_0 - altura inicial ou estática do leito.

Como exemplo, pode-se apresentar os resultados obtidos na investigação realizada num secador de três zonas de fluidização, em que o modelo da Equação (2.13) foi ligeiramente modificado para a seguinte forma:

$$\frac{u_{pf}^{min}}{u_{mf}} = e^{\left[C \cdot (1-n \cdot f \cdot t_d)^2 \right]} \quad (2.14)$$

Em que:

$$t_d = \frac{I}{n \cdot f \cdot \left[1 + A \left(\frac{H_0}{d_{eq}} \right)^a \right]} \quad (2.15)$$

Nas equações (2.14) e (2.15), apresentadas no estudo de GAWRZYNSKI *et al* (1989) e posteriormente citadas na revisão de GAWRZYNSKI & GLASER (1996), a

velocidade de mínima pulso-fluidização, já anteriormente definida, aparece num quociente com a velocidade de mínima fluidização num leito convencional. Ela também se mostra dependente de um parâmetro empírico t_d , definido pelos autores como tempo de início da expansão do leito, do número de zonas de fluidização pulsante n , da frequência de pulsação f , da altura inicial de material estático no leito H_0 e do diâmetro equivalente da partícula d_{eq} . Observa-se que na situação em que $u_{pf} = u_{mf}$, $t = t_d = \frac{H_0}{n \cdot f \cdot d_{eq}}$.

Com essa abordagem, os autores puderam relacionar a velocidade de mínima pulso-fluidização com a altura estática do leito e as dimensões da partícula por meio da equação (2.14), sendo que a velocidade de mínima fluidização havia sido determinada previamente: $u_{mf} = 0,86 \text{ m/s}$. As frequências de pulsação empregadas foram entre 4 e 15 s^{-1} .

Em alguns resultados obtidos por JURKIEWICZ *et al* (1987), comprova-se a afirmação de que o consumo de ar é inferior nos secadores de leito pulso-fluidizado quando em comparação aos de fluidização convencional. O estudo foi realizado em equipamento com três zonas de pulso-fluidização.

Na Tabela 2.1, as velocidades de mínima e máxima pulso-fluidização foram calculadas, tomando-se como referência a área total da seção transversal do leito. Portanto, para cálculo do consumo de gás, expresso com vazão volumétrica, a velocidade deve ser multiplicada pela área total da seção transversal do equipamento.

Uma outra característica importante dos secadores de leito pulso-fluidizado é o fato de as velocidades de mínima e máxima pulso-fluidização dependerem da carga do material, ou seja, da altura do leito estático H_0 . No caso dos leitos fluidizados convencionais, a velocidade de mínima fluidização não depende da referida carga (GAWRZYNSKI *et al*, 1989; GAWRZYNSKI & GLASER, 1996).

Tabela 2.1. Velocidades de mínima e máxima pulso-fluidização e velocidade de mínima fluidização.

Material	$u_{pf}^{min} \text{ (m/s)}$	$u_{pf}^{max} \text{ (m/s)}$	$u_{mf} \text{ (m/s)}$
Pentaeritrol	0,28	0,42	0,97
Gluconato de Cálcio	0,55	0,85	2,29
Acenol	0,12	0,35	0,69
Thiohexame	0,31	0,54	0,62
Sacarose	0,50	0,65	0,86
Sementes de ervilha	0,66	1,08	1,22

2.3.3 Queda de pressão em leito pulso-fluidizado

Experimentos com relação à perda de carga nos secadores PFB mostraram que esta depende dos seguintes parâmetros: altura estática do leito H_0 , velocidade superficial do gás u_g , e num nível menor e somente em alguns casos, do diâmetro da partícula d_p , da frequência de pulsação do leito f e da umidade do material X (GAWRZYNSKI & GLASER, 1996).

Nas investigações citadas por GAWRZYNSKI & GLASER (1996), foi demonstrado que a queda de pressão depende das propriedades físicas do material, caracterizadas pelo número de Arquimedes (Ar) - Equação (2.16).

$$Ar = \frac{g \cdot d_p^3 \cdot \rho_g (\rho_p - \rho_g)}{\mu_g^2} \quad (2.16)$$

Nos equipamentos de leito fluidizado convencional, nas condições normais de operação, não se verifica aumento da perda de carga com a velocidade – evidentemente, para velocidades acima de mínima fluidização (u_{mf}) (STRUMILLO & KUDRA, 1986). Nos equipamentos PFB, como a faixa da velocidade de operação situa-se abaixo da já citada u_{mf} , verifica-se um pequeno aumento da perda de carga com o incremento da

velocidade do gás. Esta pequena elevação da perda de carga se deve ao fato de o leito passar da condição de leito expandido para leito fluidizado em cada ciclo subsequente, em que a velocidade varia de zero até um valor máximo, quando todo o fluxo gasoso é dirigido para uma determinada seção.

GAWRZYNSKI *et al* (1998) realizaram experimentos em secador de 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 ajustado ao secador por meio de uma válvula distribuidora rotativa, possuindo um disco com abertura na forma de círculo, com ângulo de 120°. A rotação do disco cria a pulsação do fluxo de ar com frequência determinada pela velocidade de rotação do disco, com frequência constante de 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 composto. Por meio da equação (2.17) 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 se estabiliza para altas velocidades do ar. A Figura 2.16 apresenta a velocidade de mínima fluidização (linha pontilhada) e a queda de pressão calculada (linha cheia).

$$\Delta P = \rho_p g H_0 (1 - \varepsilon) = \rho g H_0 \quad (2.17)$$

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 de 5 e 10 Hz. Por meio da curva fluidodinâmica (Figura 2.17 e Figura 2.18), observaram que a velocidade de mínima fluidização pulsada depende da carga do 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.

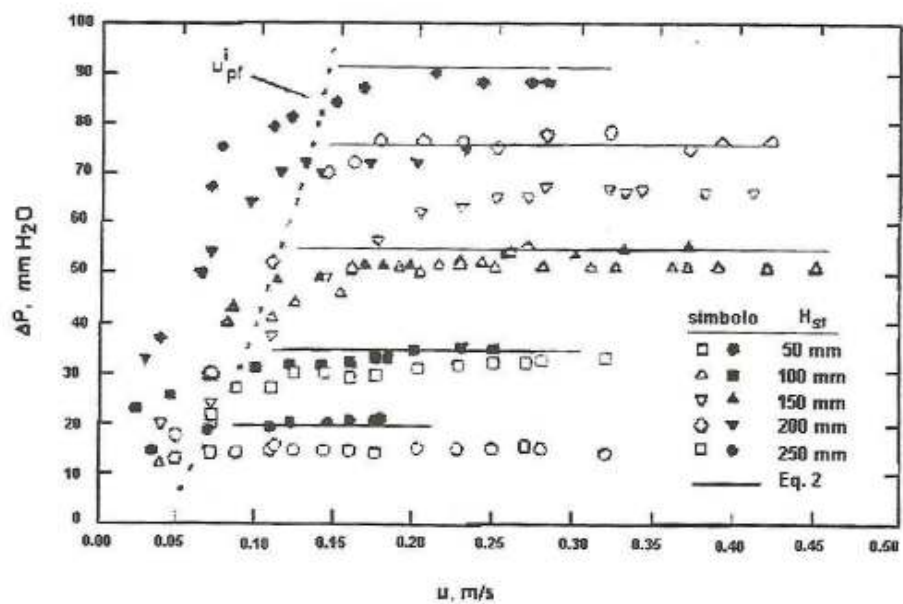


Figura 2.16 - Queda de pressão para partículas de prolipropileno seco (símbolos fechados), e úmido (símbolos abertos) em função da velocidade do ar em leito fluidizado pulsado (GAWRZYNSKI *et al.*, 1998).

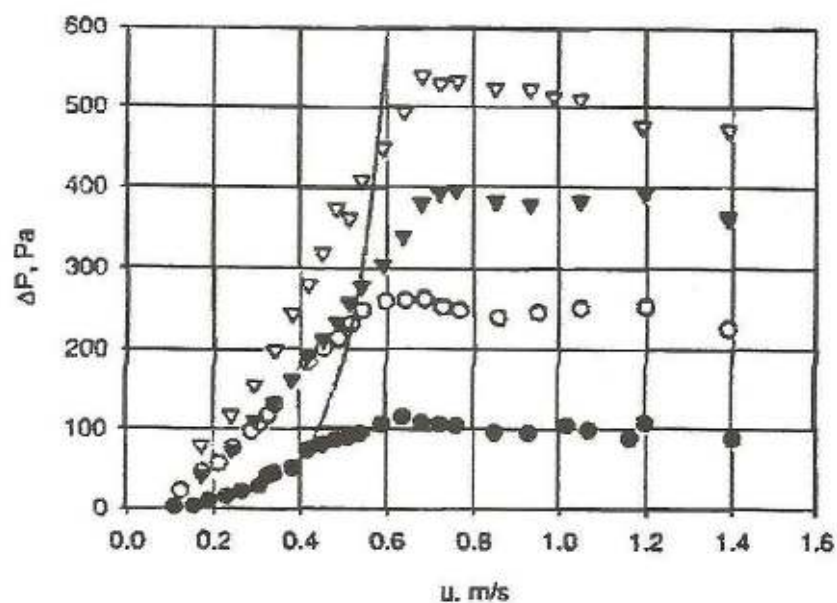


Figura 2.17 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em PFB ($X = 70\%b.u$; $f = 10\text{Hz}$) “●” $H = 50$ mm; “○” $H = 100$ mm; “▼” $H = 150$ mm; “▽” $H = 200$ mm (KUDRA *et al.*, 2002).

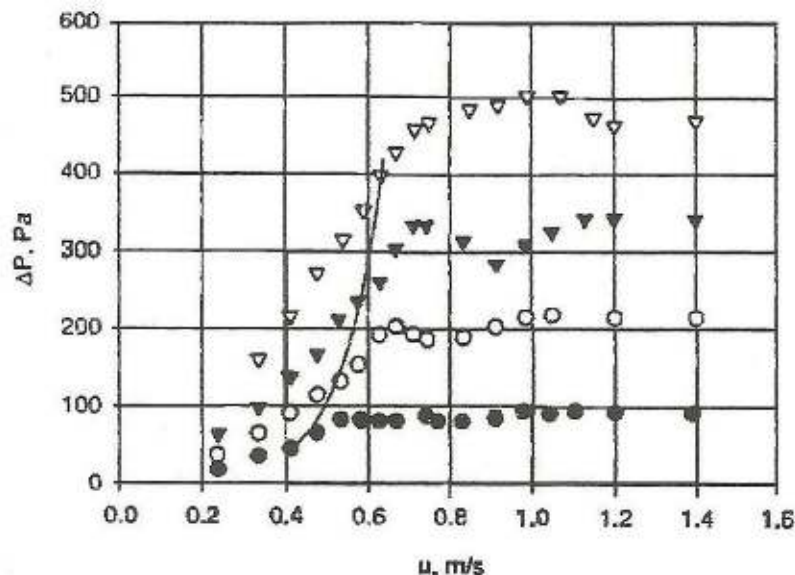


Figura 2.18 - Queda de pressão em função da velocidade do ar em PFB ($X = 70\%b.u$; $f = 5\text{ Hz}$) “●” $H = 50\text{ mm}$; “○” $H = 100\text{ mm}$; “▼” $H = 150\text{ mm}$; “▽” $H = 200\text{ mm}$ (KUDRA *et al.*, 2002).

2.3.4 Aplicações do leito pulso-fluidizado

Já existem, em operação industrial, secadores de leito pulso-fluidizado. Um exemplo bem sucedido é descrito por GAWRZYNSKI *et al* (1996). Trata-se de secagem seguida do resfriamento de açúcar granulado, existente na Polônia, para aproximadamente 14.000 kg/h. Ambas as etapas – secagem e resfriamento – são conduzidas em fluidização pulsante. O trabalho apresenta uma comparação entre a técnica PFB e outras, como secador rotativo e leitos vibrados. Os consumos específicos de energia e de agente de secagem nos testes em leito pulso-fluidizado mostraram-se muito inferiores.

Outro exemplo de equipamento industrial é o mostrado na Figura 2.19 (PHACHAYAWARAKORN *et al*, 2005), com capacidade para secar 20 toneladas por hora de arroz.

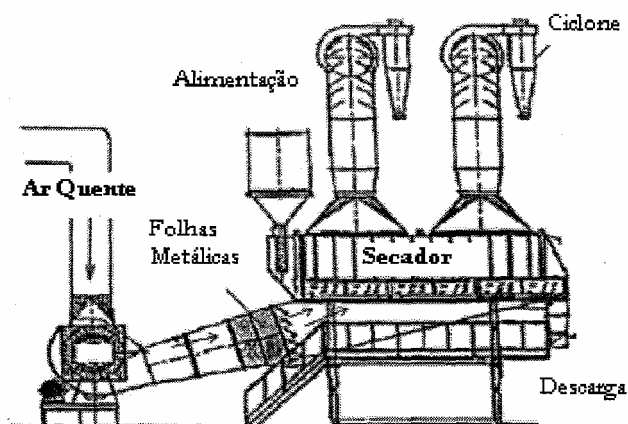


Figura 2.19 - Secador industrial de arroz - PHACHAYAWARAKORN *et al*, 2005.

2.3.5 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).

$$F I = \frac{\Delta P_{leito}}{\frac{m \cdot g}{A}} \quad (2.18)$$

Em que m é a massa de partículas no leito (kg), ΔP_{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 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 e batata úmido), somente quando imposta a vibração. Para 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 esses autores, os resultados obtidos (Figura 2.20) são similares aos encontrados por YOSHIDA *et al.* (1966), ERDÉZ & ORMÓS (1983), e GUPTA & MUJUMDAR (1980) todos citados por MARRING *et al.* (1994) em seu trabalho. No entanto, ERDÉZ & ORMÓS (1983) e GUPTA & MUJUMDAR (1980) observaram decréscimo na queda de pressão com o aumento da intensidade da vibração. Para as partículas de amido e 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 2.21.

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, observaram que a velocidade de mínima fluidização é menor para o leito vibro-fluidizado em relação à do 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.

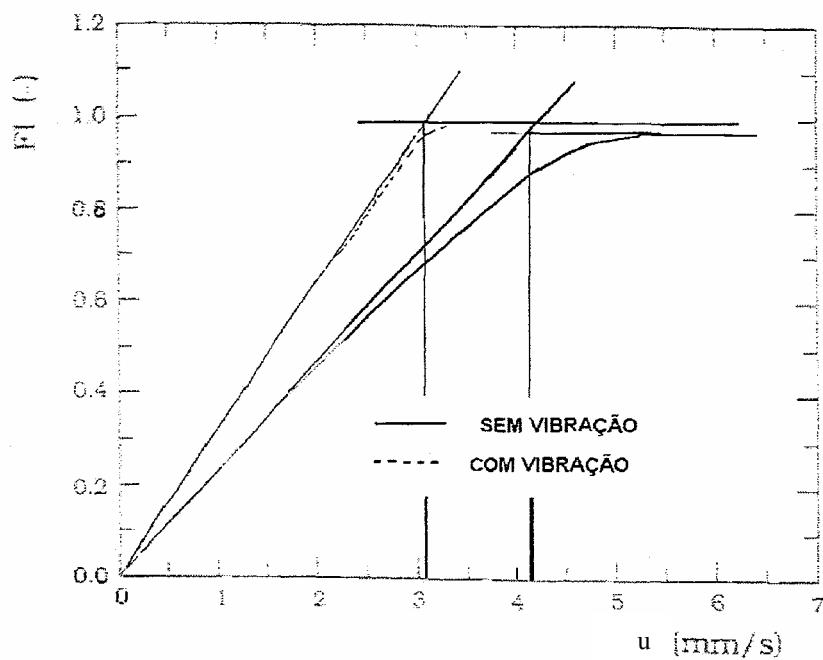


Figura 2.20 - Índice de fluidização de esferas de vidro (ballotini), para velocidade decrescente do ar, $f = 30 \text{ Hz}$, (MARRING *et al.*, 1994).

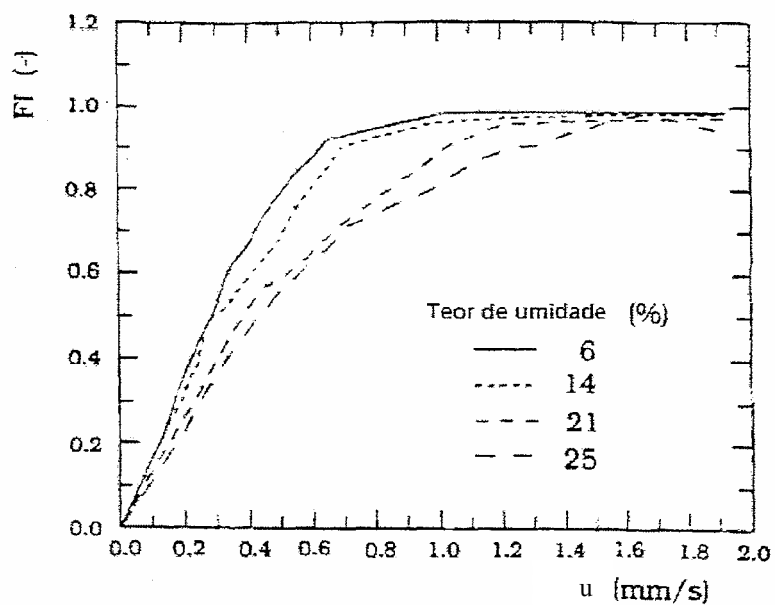


Figura 2.21 - Índice de fluidização para partículas de amido de batata, u decrescente, $f = 30 \text{ Hz}$, (MARRING *et al.*, 1994).

NITZ & TARANTO (2007) estudaram a qualidade de fluidização do trigo e do feijão em leito pulso-fluidizado. Segundo eles, o índice de fluidização apresenta proporcionalidade direta com a frequência de pulsação, ou seja, uma maior frequência favorece a fluidização na medida em que contribui para desmanchar grandes bolhas e impedir o aparecimento de canais preferenciais. Além disso, embora, durante a pulso-fluidização, haja interrupção temporária do fluxo gasoso, o leito permanece tanto mais expandido quanto maior a frequência. Por outro lado, essa influência da frequência sobre o valor do índice de fluidização mostrou-se tão menor quanto maior a carga de material.

2.4 Estruturas Cristalinas

Há diferentes tipos de estruturas cristalinas e são divididos em grupos de acordo com as configurações da unidade celular e/ou arranjos atômicos. Tal método é baseado na geometria da unidade celular, isto é, a forma de um paralelepípedo apropriado da unidade celular sem considerar a posição atômica da célula. Com esta estrutura em um sistema de coordenadas x, y, z , é estabelecido na origem da unidade celular; cada um dos eixos x, y e z coincidem com uma das três arestas do paralelepípedo como, ilustrado na Figura 2.22. A geometria da unidade celular é completamente definida em termos de seis parâmetros: as três arestas a, b e c e os três ângulos interaxiais α, β e γ (CALLISTER, 1994).

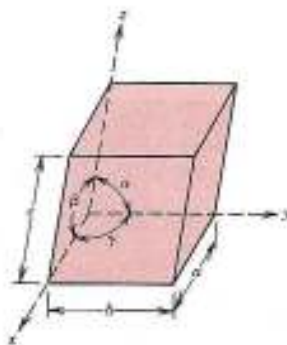


Figura 2.22 – Unidade celular com os eixos coordenados x, y e z , mostrando as arestas axiais (a, b e c) e os ângulos interaxial (α, β e γ) (CALLISTER, 1994).

Encontram-se cristais com sete possíveis combinações de a , b e c e α , β e γ as quais representam um sistema cristalino distinto. Os sete sistemas cristalinos são: cúbico, tetragonal, hexagonal, ortorrômbico, romboédrico, monoclinico e triclínico (Figura 2.23). (CALLISTER, 1994).

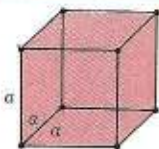
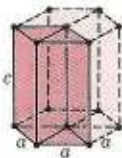
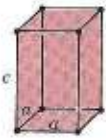
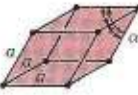
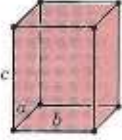
Sistema Cristalino	Relações axiais	Ângulos Interaxiais	Geometria da unidade celular
Cúbico	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Romboédrico	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Ortorrômbico	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Monoclinico	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Triclínico	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

Figura 2.23- Geometrias de unidade celular para os sete sistemas cristalinos (CALLISTER, 1994).

2.4.1 Cloreto de Potássio

O cloreto de potássio (KCl) é um sal inorgânico inodoro cristalino branco de forma cúbica, usado na medicina (injeções letais), em fertilizantes, como substituto do sal de cozinha e no processamento de alimentos. É geralmente comercializado com 0,2% b.u.

Na natureza, pode ser extraído de rochas que constituem numa mistura de cloreto de sódio e cloreto de potássio em estado mineral. Pode, também, ser extraído da água salina, obtido pela cristalização da solução, flotação e separação eletrostática.

Algumas propriedades físicas do KCl podem ser observadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Propriedades físicas do Cloreto de Potássio (PERRY & GREEN, 1997).

Propriedade	
Peso molecular	74,56
Massa específica (g/cm^3)	1,988
Ponto de fusão ($^{\circ}C$)	77,2 a 79,0

2.4.2 Acetato de Sódio

O acetato de sódio é um sal orgânico cristalino, branco com formato monoclinico, de fórmula ($NaC_2H_3CO_2$). A cristalização do acetato de sódio é um processo altamente exotérmico e pode ser produzido, reagindo-se o ácido acético com carbonato de sódio. É utilizado na indústria alimentícia para a determinação da hidroxiprolina nas carnes e produtos cárneos, incluindo aves. É utilizado também na composição de insulina mista purificada para o controle da glicemia.

Neste trabalho, utilizou-se o acetato de sódio trihidratado fornecido pela LabSynth. Algumas propriedades físicas do acetato de sódio trihidratado e anidro podem ser observadas nas Tabela 2.3 e Tabela 2.4.

Tabela 2.3 - Propriedades físicas do Acetato de Sódio Trihidratado (PERRY & GREEN, 1997).

<i>Propriedade</i>	
Peso molecular	136,09
Massa específica (g/cm^3)	1,45
Ponto de fusão ($^{\circ}C$)	58

Tabela 2.4 - Propriedades físicas do Acetato de Sódio Anidro (PERRY & GREEN, 1997).

<i>Propriedade</i>	
Peso molecular	82,04
Massa específica (g/cm^3)	1,528
Ponto de fusão ($^{\circ}C$)	324

3 Materiais e Métodos

3.1 Materiais utilizados

Os sais utilizados neste trabalho foram o Cloreto de Potássio (KCl) e o Acetato de Sódio Trihidratado ($\text{NaC}_2\text{H}_3\text{CO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Esses sais são produzidos pela empresa Labsynth, localizada em Diadema – SP. Em seus processamentos, um leito fluidizado convencional é utilizado na operação de secagem, realizada da seguinte maneira:

- Acetato de Sódio Trihidratado: A massa a ser seca é de 500 kg, com umidade em base úmida de 38 a 41%, a uma temperatura inicial de 60°C que é elevada até 90°C, durante o período de 10 a 12 horas de secagem e umidade final menor que 0,10% b.u.;
- Cloreto de Potássio: A massa a ser seca é de 500 kg, com umidade em base úmida de 4 a 5%, a uma temperatura de 80°C, durante um período de secagem de aproximadamente 1 hora e umidade final menor que 0,10% b.u.

São materiais higroscópicos e de difícil fluidização em leito convencional, pois são coesivos quando úmidos.

3.2 Caracterização física dos sais

A caracterização física de uma partícula é uma etapa muito importante para conhecer a estrutura e o comportamento do material em diversas etapas do processo de secagem. Por esta razão, neste trabalho, foram feitas análises de caracterização do cloreto de potássio e acetato de sódio secos no equipamento de leito pulso-fluidizado.

3.2.1 Determinação da massa específica através de picnometria a Gás Hélio

O equipamento utilizado nesta etapa do trabalho foi o Picnômetro a Gás Hélio, Modelo AccuPyc 1330, instalado no Laboratório de Caracterização do Departamento de Termofluidodinâmica, da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP.

As amostras utilizadas foram secas em leito pulso-fluidizado e mantidas em dessecador até o momento das análises para que os sais não adquirissem umidade, pois esta é uma condição necessária para a utilização de tal aparelho.

Os ensaios foram realizados em duplicata para ambos os sais. Para a realização desses ensaios, levaram-se em consideração os seguintes parâmetros:

- ✓ Número de purgas: a purga limpa as câmaras de amostra e de expansão antes do início da análise. Quanto maior o número de purgas, mais limpa a amostra estará quando for analisada. Utilizou-se um número igual a 20 purgas como sendo a quantidade necessária para limpar as amostras e obter resultados satisfatórios.
- ✓ Massa da amostra: para uma maior precisão da análise, segundo o manual do usuário do aparelho (AccuPyc 1330 USER'S MANUAL, 1997), a amostra deve ocupar pelo menos $2/3$ do volume do porta-amostra.
- ✓ Taxa de equilíbrio: taxas altas produzem resultados mais rapidamente, porém menos precisos. Taxas muito baixas podem causar erros quando materiais orgânicos são analisados. Nos ensaios realizados, adotou-se uma taxa de equilíbrio de $0,0010 \text{ psig/min}$, obtendo-se bons resultados em um tempo de análise relativamente rápido.

Para a exclusão dos resultados, observa-se se o sistema atingiu ou não o equilíbrio térmico. A observação de pequenos valores do desvio padrão, tanto do volume como da densidade, apresentados no Relatório de Análise fornecido pelo equipamento é que determina se o equilíbrio térmico foi ou não atingido.

3.2.2 Determinação da Porosidade e do tamanho dos poros

Para determinação da porosidade e distribuição dos tamanhos dos poros, o equipamento utilizado foi o Porosímetro por Intrusão de Mercúrio, Modelo AutoPore III, instalado no Laboratório de Caracterização do Departamento de Termofluidodinâmica, da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP.

Como nos ensaios anteriores, as amostras utilizadas foram secas em leito pulso-fluidizado e mantidas em dessecador até o momento das análises para que as amostras não adquirissem umidade, pois esta é uma condição necessária para a utilização de tal aparelho.

O penetrômetro utilizado, para ambos os sais, foi o de tamanho 8, específico para materiais particulados, e variou-se o tempo de equilíbrio, que corresponde ao tempo durante o qual o sistema gerador de pressão é mantido constante por alguns segundos.

As informações resultantes da análise de porosimetria por intrusão de mercúrio são as seguintes:

- ✓ volume total de intrusão: é o volume de poros por grama de material;
- ✓ área total de poros: é a área superficial dos poros por grama de material, considerando todos os poros como cilindros retos nos quais a área superficial é igual a quatro vezes seu volume dividido por seu diâmetro;
- ✓ diâmetro mediano de poros por volume: é o diâmetro de poro correspondente a 50% do volume total de intrusão;
- ✓ diâmetro mediano de poros por área: é o diâmetro de poro correspondente a 50% da área total de intrusão;
- ✓ diâmetro médio de poros: é determinado segundo a seguinte equação:

$$d_{\text{médio}} = 4 \cdot \frac{\text{Volume total de intrusão}}{\text{Área de poro}} \quad (3.1)$$

- ✓ densidade efetiva: o volume medido inclui o volume de poros abertos;
- ✓ densidade aparente: o volume medido inclui apenas os poros fechados;

- ✓ porosidade: é a razão entre o volume de poros abertos e o volume real da amostra;
- ✓ gráfico do volume incremental de intrusão em função do diâmetro de poro: indica a quantidade de mercúrio intrudido a cada aumento de pressão. Os picos desta curva representam a porosidade da amostra;
- ✓ gráfico da distribuição volumétrica dos poros em função do raio do poro: apresenta a distribuição volumétrica dos poros, que é calculada por:

$$D_V(r) = \frac{P}{r} \left(\frac{dV}{dP} \right) \quad (3.2)$$

A equação 3.2 representa a mudança da curva de volume incremental de intrusão para uma curva de distribuição que fornece o volume de poro por unidade de raio.

3.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para a análise morfológica do cloreto de potássio e acetato de sódio, utilizou-se o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo 440i (Figura 3.1), pertencente ao Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP. É um equipamento versátil, que permite a obtenção de informações estruturais e químicas de amostras diversas.

As amostras dos sais utilizadas foram secas em leito pulso-fluidizado e mantidas em dessecador até o momento de preparação das amostras para análise.

A metalização das amostras foi feita com ouro e espessura de 10 a 15 μm . O material foi ancorado em fita de carbono dupla-face e disposto em “*stub*” de alumínio.



Figura 3.1 – Fotografia do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo 440i.

3.2.4 Distribuição Granulométrica

O equipamento utilizado para a análise de distribuição granulométrica foi o Mastersizer Modelo S MAM 5005 (Figura 3.2), pertencente ao Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP. O aparelho utiliza o princípio da difração da luz para determinar a distribuição do tamanho das partículas.



Figura 3.2 – Mastersizer Modelo S MAM 5005.

No Mastersizer, há dois procedimentos distintos envolvidos na medida de uma amostra. Primeiramente, há a captura do modelo de distribuição da amostra, conhecido como “medição”. Em seguida, os dados contidos na medição são analisados pelo software Malvern.

Os dados podem ser exibidos de diversas maneiras. Para ambos os sais, foram exibidos de duas maneiras distintas:

- ✓ Representação gráfica “tamanho inferior”: exibe o resultado em porcentagem de amostra inferior a um certo tamanho de partícula.
- ✓ Curva de frequência: é obtida pela diferenciação da curva “tamanho inferior” e útil para exibir os resultados das formas e picos dos gráficos.

As duas representações gráficas citadas anteriormente são acompanhadas de uma Tabela de Análise de Resultado, possibilitando, assim, que os resultados lidos nos gráficos sejam nela conferidos.

Como tanto o acetato de sódio quanto o cloreto de potássio são sais solúveis em água e de difícil dispersão em qualquer outro solvente, optou-se por utilizar a apresentação *Standard –Dry (3RHA)* do Mastersizer, a qual toma o valor da metade do percurso para o índice de refração e adsorção da amostra e assume que a partícula é suspensa em ar.

Para ambos os sais, os ensaios foram realizados em número de seis repetições e as amostras dos sais neles utilizadas foram secas anteriormente em leito pulso-fluidizado e mantidas em dessecador até o momento das análises.

3.3 Sistema experimental de secagem

O equipamento utilizado para os estudos de fluidodinâmica e secagem do acetato de sódio e cloreto de potássio foi um secador de Leito Pulso-Fluidizado, em escala piloto, projetado e construído na Instalação Piloto do Laboratório de Engenharia Química da Escola de Engenharia Mauá, já estudado na tese de Doutorado de NITZ (2006). Tal equipamento é ilustrado na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Fotografia do Leito Pulso-Fluidizado (à direita) e periféricos.

3.3.1 Descrição do equipamento de leito pulso-fluidizado

O conjunto formado pelo secador e periféricos consiste nos seguintes elementos principais:

- ✓ Soprador de ar: Trata-se de um ventilador centrífugo com motor de 5 cv (Figura 3.4);



Figura 3.4 - Soprador de ar.

- ✓ Válvula borboleta para regulação da vazão de ar à jusante do soprador (Figura 3.5);



Figura 3.5 – Válvula borboleta.

- ✓ Sistema de aquecimento do ar com resistências elétricas; potência total instalada: 10 kW (Figura 3.6 e Figura 3.7);



Figura 3.6 – Caixa de inox com isolamento de lã de vidro, onde estão instaladas as resistências elétricas.



Figura 3.7 - Vista do conjunto de resistências elétricas.

- ✓ Dispositivo de medida de vazão do ar – placa de orifício;
- ✓ Leito de seção retangular, de paredes de aço inoxidável e visores de vidro temperado (Figura 3.8);



Figura 3.8 – primeiro plano: leito de seção retangular e visores de vidro temperado.

- ✓ Tela de aço inoxidável para distribuição do ar e suporte do material – fabricada e fornecida pela empresa Steelmesh;
- ✓ Sistema de distribuição do ar nas distintas seções do leito, detalhado no item 3.3.2;
- ✓ Filtro;
- ✓ Quadro elétrico (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Vista do quadro elétrico com o secador em segundo plano.

A Figura 3.10 representa todo o conjunto.

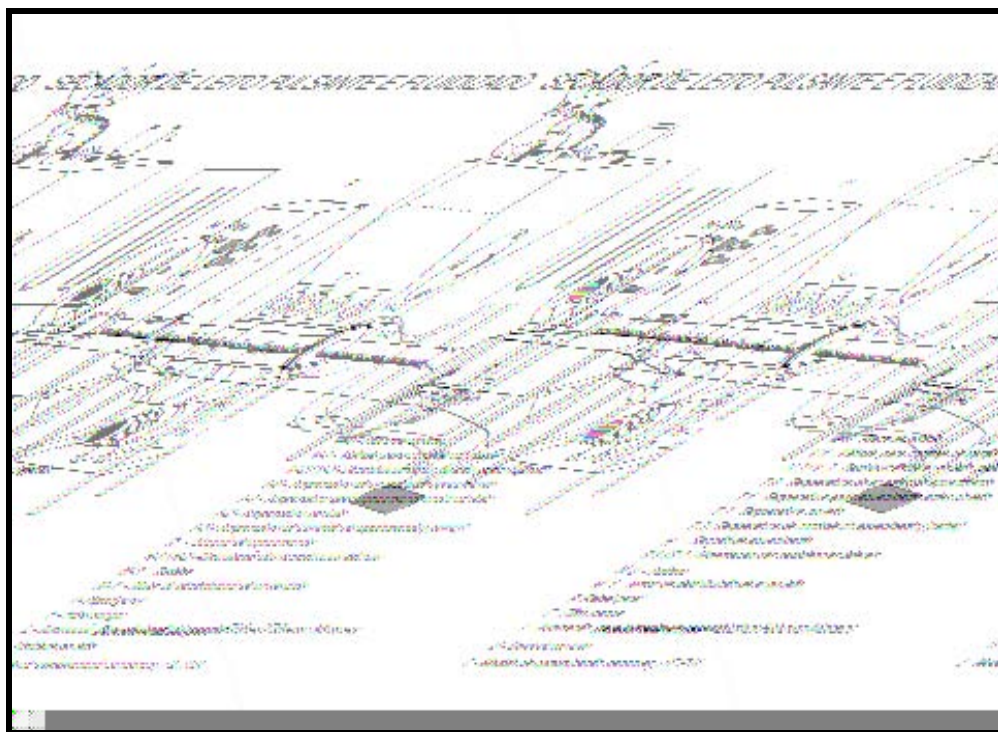


Figura 3.10 - Representação esquemática do leito pulso-fluidizado e periféricos.

3.3.2 Sistema de pulsação do leito pulso-fluidizado

O sistema de pulsação é justamente o que diferencia o leito pulso-fluidizado dos demais equipamentos de fluidização convencional.

Inicialmente, deve-se ressaltar que o ventilador introduz uma vazão constante do agente de secagem. O que gera a pulsação na alimentação é um sistema de distribuição do ar que é estruturado como explicado a seguir.

Sob a tela que suporta o material no leito, existe uma câmara distribuidora do ar dividida em quatro seções – conforme a Figura 3.11. A dimensão de cada uma das quatro seções é de 0,15 m por 0,30 m, com 0,045 m².



Figura 3.11. Câmara de distribuição de ar com 4 seções.

O ar é admitido pelas laterais da câmara, passando antes pelo disco apresentado na Figura 3.12. Existem dois discos instalados em posições opostas e que compartilham o mesmo eixo rotativo, impulsionado por um motor elétrico de 1 cv, em um sistema também composto por polias e correia – Figura 3.13.



Figura 3.12 - Disco rotativo, peça responsável pelo redirecionamento da corrente gasosa.



Figura 3.13 - Polias e correia, partes do sistema de pulsação da corrente gasosa.

A velocidade de rotação é regulada por um inversor de frequência ao qual está ligado o motor de 1 cv. A medida da rotação é feita por intermédio de um sensor indutivo, marca BALLUFF, código BES516-325-BO-C (Figura 3.14). O sensor envia sinal para um indicador, digital de frequência instalado no quadro de comando do sistema. Esse indicador é de fabricação da empresa DLG Automação e seu modelo é o NC-400 F.



Figura 3.14 - Sensor indutivo.

A abertura do disco rotativo é responsável pelo direcionamento do ar às distintas seções do leito como se pode notar da Figura 3.15.



Figura 3.15 - Vista interna da câmara de distribuição do ar. No centro da figura, é visível a abertura do disco rotativo.

O sistema foi projetado para produzir um padrão de alimentação do ar conforme o descrito na Figura 3.15, em que a frequência de pulsação é de até 15 Hz aproximadamente. Na Figura 3.16, observa-se o material “pulsando” graças ao padrão de alimentação do ar.

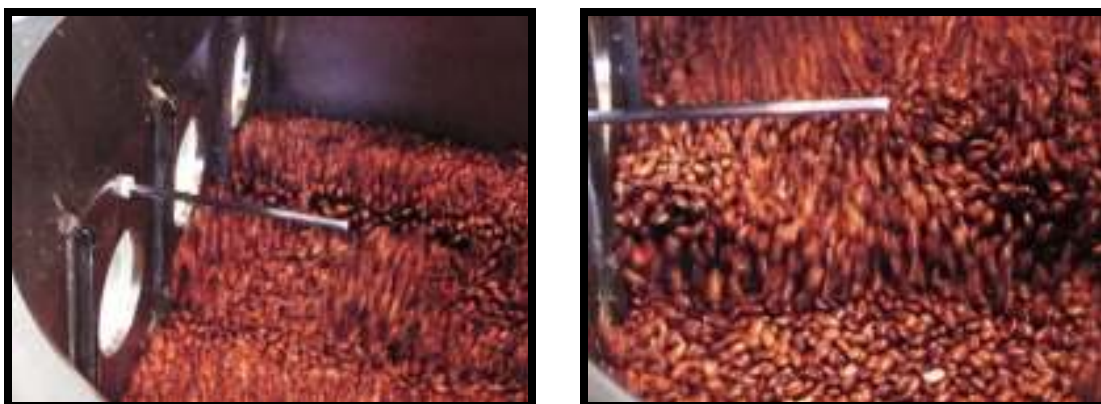


Figura 3.16 - Vista interna da câmara de secagem — material (feijão) movimentado pelo fluxo de ar pulsante (Nitz, 2006).

3.3.3 Sistema supervisor e de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados e supervisão do processo é composto por:

- ✓ **Microcomputador:** tipo PC com processador AMD Duron de 1,3 GHz e 1 Gb de memória RAM;

- ✓ **Medidores de temperatura:** ambiente, à jusante do soprador – entrada da placa de orifício, sob a tela que suporta o material e na câmara de secagem (acima do leito de partículas).
- ✓ **Medidores de pressão:** são medidas a pressão na entrada da placa de orifício e a queda de pressão ao escoar através do orifício. Os pontos de tomada de pressão são justamente nos flanges onde estão instalados os dispositivos. Existem pontos para tomada de pressão estática do ar nos flanges da placa de orifício para cálculo da vazão de ar (NITZ, 2006) e no próprio secador, sob a tela que suporta o material e acima do leito de partículas, visando à determinação da queda de pressão no leito. Os sinais de pressão são enviados tanto para um manômetro de tubo em U¹, tendo a água destilada como fluido enchimento manométrico, como para transmissores de pressão diferencial.
- ✓ **Dispositivos tipo “field-point”:** são responsáveis pela aquisição de sinais e transmissão via rede. Esse sistema de aquisição de dados faz uso de uma arquitetura distribuída, em que o “hardware” responsável pela coleta eletrônica dos sinais trabalha de forma independente do microcomputador utilizado para realizar a supervisão do processo.
- ✓ **Aplicativo computacional supervisorio:** aplicativo desenvolvido para supervisão da operação do secador PFB, empregando-se o programa LABVIEW, versão 7, da NATIONAL INSTRUMENTS. A tela de supervisão é apresentada na Figura 3.17. As leituras dos instrumentos são registradas em arquivo de texto, extensão “txt”, com o acionamento do botão GRAVAR.

¹ A ligação em paralelo tem como objetivo confrontar os valores medidos pelos transmissores visando à calibração para a faixa de operação desejada.



Figura 3.17 - Tela gerada pelo aplicativo de supervisão e aquisição de dados da operação.

3.3.4 Determinação da vazão de ar

A vazão é medida por meio de uma placa de orifício instalada no flange conforme Figura 3.18 e calculada por intermédio da expressão (3.4) (NITZ, 2006).



Figura 3.18 - Flange em que se instalou a placa de orifício.

$$\dot{V}_g = \frac{C \cdot \sigma \cdot \pi/4 \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (3.4)$$

sendo:

σ : o fator de expansão do ar, dado pela expressão (3.5).

$$\sigma = 1 - \left(0,41 + 0,35 \cdot \beta^4\right) \cdot \frac{\Delta P}{\frac{C_p}{C_v} \cdot P_l} \quad (3.5)$$

em que:

- ✓ ΔP é a queda de pressão provocada pela placa, medida a partir dos pontos de tomada de pressão da flange;
- ✓ P_l é a pressão absoluta do ar na entrada da placa, obtida a partir do ponto de tomada de pressão da flange, à montante do dispositivo;
- ✓ C_p e C_v são os calores específicos do ar a pressão e volume constantes, respectivamente. Para a determinação dessas propriedades foram empregadas expressões em função da temperatura para o ar seco publicadas por PERRY & GREEN (1997).
- ✓ C : coeficiente de descarga do medidor de orifício, dado pela expressão (3.6).

$$\begin{aligned} C = & 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^8 + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{Re_D}\right)^{0,7} + \\ & (0,0188 + 0,0063 \cdot A) \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,3} + \\ & \left(0,043 + 0,080 \cdot e^{-10 \cdot L} - 0,123 \cdot e^{-7 \cdot L}\right) \cdot (1 - 0,11 \cdot A) \cdot \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - \\ & 0,031 \cdot (M - 0,8 \cdot M^{1,1}) \cdot \beta^{1,3} \end{aligned} \quad (3.6)$$

em que:

- ✓ β é a relação entre os diâmetros do orifício (d) e o interno da tubulação (D).
- ✓ Re_D é o número de Reynolds relativo ao diâmetro interno da tubulação (D), calculado pela expressão (3.7).

$$Re_D = \frac{\rho \cdot v_D \cdot D}{\mu} \quad (3.7)$$

sendo:

- ✓ ρ é a densidade do gás. Sua dependência com pressão e temperatura foi considerada, empregando-se a equação dos gases ideais.
- ✓ v_D é a velocidade média do gás escoando na tubulação de diâmetro interno D , à montante da placa de orifício.
- ✓ μ é a viscosidade do ar. Sua dependência com a temperatura T foi considerada, empregando-se a expressão (3.8), extraída de SPITZER (1996):

$$\mu[cP] = 0,194 \cdot \left(\frac{T[K]}{10^4} \right)^{0,674} \quad (3.8)$$

Os parâmetros A , L e M da equação (3.6) são calculados pelas seguintes equações de 3.9 a 3.11, válidas para o caso de tomada de pressão em flanges.

$$A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D} \right)^{0,8} \quad (3.9)$$

$$L = \frac{25,4}{D} \quad (3.10)$$

$$M = \frac{2 \cdot L}{1 - \beta} \quad (3.11)$$

Portanto, os cálculos necessários à obtenção da vazão volumétrica de ar são realizados a partir da temperatura e pressão na entrada da placa de orifício e da queda de

pressão no dispositivo. O processo é iterativo, pois o Número de Reynolds (equação 3.7) e o coeficiente de descarga da placa (equação 3.6) dependem da vazão que se deseja calcular (equação 3.4).

3.4 Fluidodinâmica dos sais secos e úmidos

O estudo fluidodinâmico consiste em analisar as variáveis que influenciam a queda de pressão no leito. É sabido que, em leitos fluidizados convencionais, a queda de pressão depende: da natureza do material, densidade, geometria, altura do leito ou carga de material e da vazão de ar. No caso de leitos pulsantes, existe também a influência da frequência de pulsação.

Para a determinação da curva de fluidização, a velocidade do ar e a queda de pressão são registradas pelo sistema de aquisição de dados conforme descrito no item 3.3.3.

Uma vazão de ar é regulada por meio da válvula borboleta. A gravação dos dados é acionada para intervalos de 1,00 s. São registradas aproximadamente 30 medidas de queda de pressão no leito. Para plotar a curva de fluidização, foi considerada a média aritmética das 30 medidas (aproximadamente) realizadas. A observação visual foi realizada para a percepção da formação de canais preferenciais, aglomerados e eventuais aparecimentos de jorro localizado.

3.4.1 Fluidodinâmica em leito pulso-fluidizado

A fim de se aprofundar o entendimento da influência das variáveis de processo na qualidade da fluidização, o estudo fluidodinâmico foi realizado com os sais secos e úmidos. Para estudar a influência das variáveis no processo nas curvas de pulso-fluidização, foram realizados testes fluidodinâmicos experimentais e constatou-se que, quando se trabalha com uma carga de material acima de 13 kg e com frequências de rotação acima de 500 rpm, para vazões de ar superiores a 600 Nm³/h, observa-se a elutriação do leito. Portanto, as seguintes condições operacionais foram estudadas:

Cloreto de potássio seco:

$$M \text{ (kg)} = 5, 9, 13.$$

$$f \text{ (rpm)} = 200, 500, 700.$$

Cloreto de potássio úmido:

$$M \text{ (kg)} = 13.$$

$$f \text{ (rpm)} = 200, 500, 700.$$

$$U \text{ (\%)} = 6.$$

Acetato de sódio seco:

$$M \text{ (kg)} = 9, 12$$

$$f \text{ (rpm)} = 500, 900.$$

Acetato de sódio úmido:

$$M \text{ (kg)} = 9, 12.$$

$$f \text{ (rpm)} = 500, 900.$$

$$U \text{ (\%)} = 40.$$

No estudo fluidodinâmico do cloreto de potássio em leito pulsante, a combinação das variáveis resultou em 9 condições experimentais distintas para o material seco e 9 condições para o material úmido.

Já no estudo fluidodinâmico em leito pulsante do acetato de sódio, a combinação das variáveis resultou em 4 condições experimentais distintas para o material seco e 4 condições para o material úmido.

Em todos os ensaios mencionados, utilizaram-se as quatro seções do leito sem canaletas separadoras, ou seja, como um leito único de 0,18 m². O índice de fluidização também foi calculado com o objetivo de medir a qualidade da fluidização em cada ensaio como descrito na equação 2.18.

3.4.2 Fluidodinâmica em leito fluidizado convencional

A fim de comparar a pulso-fluidização com a fluidização convencional, foram realizados ensaios em leito convencional. Para a realização desses ensaios, foram colocadas duas canaletas separadoras no interior do leito, produzindo internamente, um leito retangular de 0,045 m² (0,15 m X 0,30 m). O sistema de rotação foi desligado e o disco rotatório posicionado de modo que todo o fluxo gasoso fosse direcionado à seção. As condições operacionais estudadas no leito convencional retangular foram:

Cloreto de potássio seco:

$$M \text{ (kg)} = 1,25; 2,25; 3,25.$$

Cloreto de potássio úmido:

$$M \text{ (kg)} = 1,25; 2,25; 3,25.$$

$$U \text{ (\%)} = 6.$$

Acetato de sódio seco:

$$M \text{ (kg)} = 2,25; 3,00.$$

Acetato de sódio úmido:

$$M \text{ (kg)} = 2,25; 3,00.$$

$$U \text{ (\%)} = 40.$$

No estudo fluidodinâmico em leito convencional do cloreto de potássio, a combinação das variáveis resultou em 3 condições experimentais distintas para o material seco e 3 condições para o material úmido.

No estudo fluidodinâmico em leito convencional do acetato de sódio, a combinação das variáveis resultou em 2 condições experimentais distintas para o material seco e 2 condições para o material úmido.

As cargas de materiais utilizadas na fluidodinâmica do leito convencional são equivalentes às utilizadas no leito pulsante, uma vez que, a área superficial desse último é 4 vezes maior que a do leito convencional.

A cristalização do acetato de sódio é um processo altamente exotérmico, como já foi mencionado no item 2.4.2, prejudicando a umidificação do material seco, motivo pelo qual se trabalhou apenas com o sal úmido a 40% em base úmida, fornecido pela LabSynth.

Durante todo o estudo fluidodinâmico, tanto em leito pulsante quanto em leito convencional, pelo fato de os sais estudados serem higroscópicos, foi realizado o controle de umidade destes materiais durante todos os ensaios com a finalidade de estudar se há alteração de umidade, com que velocidade ela pode ocorrer e como essa alteração afeta a curva fluidodinâmica. É importante ressaltar que o índice de fluidização também foi calculado com o objetivo de avaliar a qualidade da fluidização em cada ensaio.

Os resultados obtidos nos estudos fluidodinâmicos mencionados anteriormente para ambos os sais estão discutidos na seção 4.2.

3.5 Estudo da secagem dos sais

As curvas de secagem do cloreto de potássio e acetato de sódio foram determinadas em diferentes condições experimentais, a fim de se estudar a influência das variáveis envolvidas no processo, tais como, massa inicial da amostra, temperatura do ar de secagem e frequência de pulsação do leito. A vazão volumétrica do ar de secagem foi mantida constante, devido aos resultados obtidos em ensaios exploratórios de secagem e fluidodinâmicos, pois, com vazões menores o leito não fluidiza e com vazões maiores o arraste de partículas é intenso. Os resultados devem servir como parâmetros para otimizar o processo.

3.5.1 Amostragem para curva de secagem

Para determinar as curvas de secagem, as quais descrevem a umidade contida no material em função do tempo de secagem, adotou-se o seguinte procedimento para ambos os sais.

Primeiramente, ajustou-se a vazão de ar, temperatura do ar e a frequência de rotação a serem trabalhadas, ligando-se o equipamento cerca de 30 minutos antes de introduzir o material no leito para que a vazão e a temperatura ajustadas fossem atingidas.

A colocação do material é feita rapidamente pela abertura frontal do equipamento, pois, nesse momento, o equipamento é desligado. É importante ressaltar que, após a colocação do material, a vazão é reajustada, pois sofre pequena queda em virtude da perda de carga provocada pelo material inserido. A queda de temperatura não é significativa, pois o controlador de temperatura foi ajustado de modo que o restabelecimento da condição operacional seja muito rápido.

As amostras foram retiradas ao longo do tempo por uma pequena abertura localizada na parte superior do equipamento conforme mostra a Figura 3.19. Nota-se que o aparato² para retirada das amostras foi especialmente desenvolvido de modo a permitir que a amostragem seja feita sem a interrupção da secagem.

Em seguida, as amostras foram colocadas em dessecador até o momento de determinação de umidade no equipamento Karl Fischer descrito no item 3.5.4.



Figura 3.19 – Procedimento de amostragem durante o processo de secagem

² Aparato desenvolvido pelo técnico Sidnei Moraes da Escola de Engenharia Mauá.

Os intervalos de tempo em que as amostras foram retiradas variaram para cada sal. Para o acetato de sódio ($U = 40\%$), as amostras foram retiradas com intervalos de 10 minutos na primeira hora e intervalos de 20 minutos na segunda hora, seguido de trinta minutos no tempo restante, totalizando duas horas e meia de ensaio.

Já para o cloreto de potássio com $U = 3\%$ b.u, as amostras foram retiradas com intervalos de trinta segundos até os três primeiros minutos, com intervalos de dois minutos até completar quinze minutos de ensaio, seguidos de intervalos de quinze minutos até completar uma hora de ensaio.

Realizando ensaios de secagem exploratórios para o cloreto de potássio, verificou-se que uma amostra inicial de 13 kg com $U = 3\%$ (umidade contida na amostra originalmente fornecida pela empresa LabSynth) atingia em apenas aproximadamente dois minutos de secagem uma umidade de $U = 0,2\%$. Portanto, para melhor estudar a influência das variáveis envolvidas no processo, optou-se por umidificar (veja item 3.5.3) a amostra inicial de forma que fosse alcançada $U = 6\%$.

3.5.2 Delineamento experimental

A fim de se verificar o efeito das variáveis operacionais escolhidas sobre os resultados obtidos, foram elaborados planejamentos experimentais fatoriais completos com réplicas mostrados na Tabela 3.1 para o cloreto de potássio e na Tabela 3.3 para o acetato de sódio. As variáveis estudadas na secagem estão descritas na Tabela 3.2 e na Tabela 3.4, para o cloreto de potássio e acetato de sódio respectivamente.

Tabela 3.1 – Tabela do planejamento fatorial completo da secagem do cloreto de potássio

T_{ar}	f
(°C)	(rpm)
-1	-1
+1	-1
-1	+1
+1	+1
-1	-1
+1	-1
-1	+1
+1	+1

Tabela 3.2 - Codificação das variáveis no planejamento experimental da secagem do cloreto de potássio

	(-1)	(+1)
T_{ar} (°C)	60	80
f (rpm)	200	500

É importante ressaltar que, nos ensaios de secagem do cloreto de potássio, as variáveis massa e umidade inicial de amostra foram fixadas em 13 kg e 6% (b.u) respectivamente. A vazão de ar foi fixada em 500Nm³/h, devido a estudos fluidodinâmicos realizados como descrito no item 4.2.

Já nos ensaios do acetato de sódio, as variáveis fixadas foram a umidade inicial do sal $U = 40\%$ (umidade contida na amostra originalmente fornecida pela empresa LabSynth), a massa inicial da amostra em 12 kg e a vazão de ar em 420 Nm³/h.

Tabela 3.3 – Tabela do planejamento fatorial completo da secagem do acetato de sódio

T_{ar} (°C)	f (rpm)
+1	+1
-1	+1
+1	-1
-1	-1

Tabela 3.4 - Codificação das variáveis no planejamento experimental da secagem do acetato de sódio

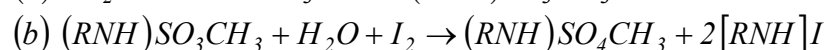
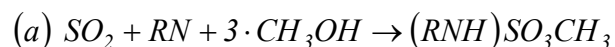
	(-1)	(+1)
T_{ar} (°C)	65	80
f (rpm)	500	900

3.5.3 Umidificação do cloreto de potássio

Pelo fato do cloreto de potássio ser um sal muito higroscópico, a umidificação foi realizada por aspersão de água destilada com agitação manual constante em amostras iniciais de 3 kg de sal. Dessa maneira, foi possível alcançar a homogeneidade do material no que diz respeito à homogeneização da umidade.

3.5.4 Determinação da umidade no equipamento titulador “Karl Fischer”

O conteúdo de umidade pode ser determinado diretamente por titulação de Karl-Fischer, que é um método baseado na reação da água com iodo e o dióxido de enxofre na presença de metanol anidro (em excesso) e piridina. O ponto final da titulação corresponde ao aparecimento do primeiro excesso de iodo, que pode ser detectado visualmente ou por meio elétrico. A reação que ocorre em duas etapas é:



Com o objetivo de impedir a reabsorção de umidade proveniente do ambiente, as amostras recolhidas eram imediatamente colocadas em pesa-filtro e em dessecador até a análise de umidade. Cada amostra foi submetida a medidas no equipamento Karl-Fischer Modelo DL18 (Figura 3.20) em triplicata nos ensaios de secagem e em duplicata nos ensaios fluidodinâmicos, sendo considerada a média aritmética dos valores.

O equipamento Karl-Fischer utilizado no presente trabalho pertence ao Laboratório de Pesquisa localizado na Planta Piloto da Escola de Engenharia Mauá.



Figura 3.20 - Karl-Fischer: equipamento para determinação do conteúdo de umidade.

4 Resultados e Discussão

4.1 Caracterização dos sólidos

Neste item, apresentam-se os resultados de caracterização dos sólidos, obtidos segundo os métodos descritos na seção 3.2.

4.1.1 Massa específica do cloreto de potássio

Como descrito na seção 3.2.1, a massa específica do cloreto de potássio foi obtida, utilizando-se o Picnômetro a Gás Hélio e os ensaios foram feitos em duplicata. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados experimentais obtidos na análise de Picnometria a gás Hélio para o Cloreto de Potássio.

	<i>Ensaio 1</i>	<i>Ensaio 2</i>
Massa (g)	4,0605	4,1268
Purgas	20	20
Taxa de equilíbrio (psig/min)	0,0010	0,0010
Massa específica (g/cm ³)	1,9905	1,9900
Desvio Padrão	0,0004	0,0003

Os valores obtidos de massa específica em ambos os ensaios são muito próximos da massa específica encontrada na literatura, que corresponde a 1,988 g/cm³ (PERRY & GREEN, 1997), ou seja, uma diferença de 0,12%.

4.1.2 Massa específica do acetato de sódio anidro

A massa específica do acetato de sódio anidro também foi obtida utilizando-se o Picnômetro a Gás Hélio e os ensaios foram feitos em duplicata. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Média dos Resultados experimentais obtidos na análise de Picnometria a gás Hélio para o Acetato de Sódio.

	<i>Ensaio 1</i>	<i>Ensaio 2</i>
Massa (g)	4,6933	4,5369
Purgas	20	20
Taxa de equilíbrio (psig/min)	0,0010	0,0010
Massa específica (g/cm ³)	1,5252	1,5254
Desvio Padrão	0,0013	0,0016

Os valores obtidos de massa específica nos ensaios 1 e 2 são muito próximos ao da massa específica encontrada na literatura, que corresponde a 1,528 g/cm³ (PERRY & GREEN, 1997), ou seja, uma diferença de 0,18%.

4.1.3 Porosidade e distribuição dos tamanhos de poros do cloreto de potássio

A Figura 4.1 apresenta o resultado obtido, utilizando-se a técnica de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio para o cloreto de potássio.

Em relação à curva de intrusão de mercúrio, observa-se que o sal analisado apresenta grande parte de seus poros na região de macroporos, que tem amplitude maior que 50 nm segundo Allen (1997), com a distribuição de poros na faixa de 10 a 80 µm.

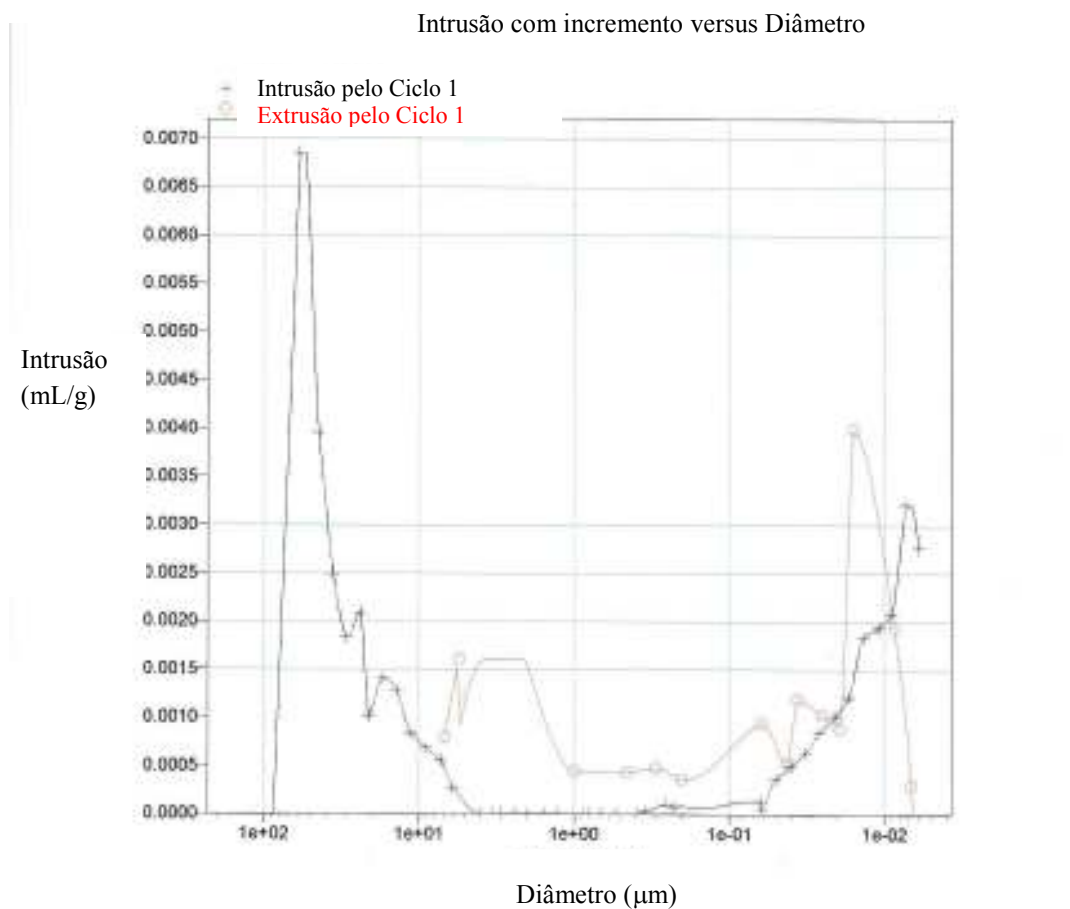


Figura 4.1 - Gráfico de Porosimetria de Mercúrio para o Cloreto de Potássio. Tempo de equilíbrio 30s.

4.1.4 Porosidade e distribuição dos tamanhos de poros do acetato de sódio anidro

Assim como o cloreto de potássio, o acetato de sódio apresenta grande parte de seus poros na região de macroporos, com distribuição na faixa de 10 a 90 μm . A Figura 4.2 apresenta esses resultados.

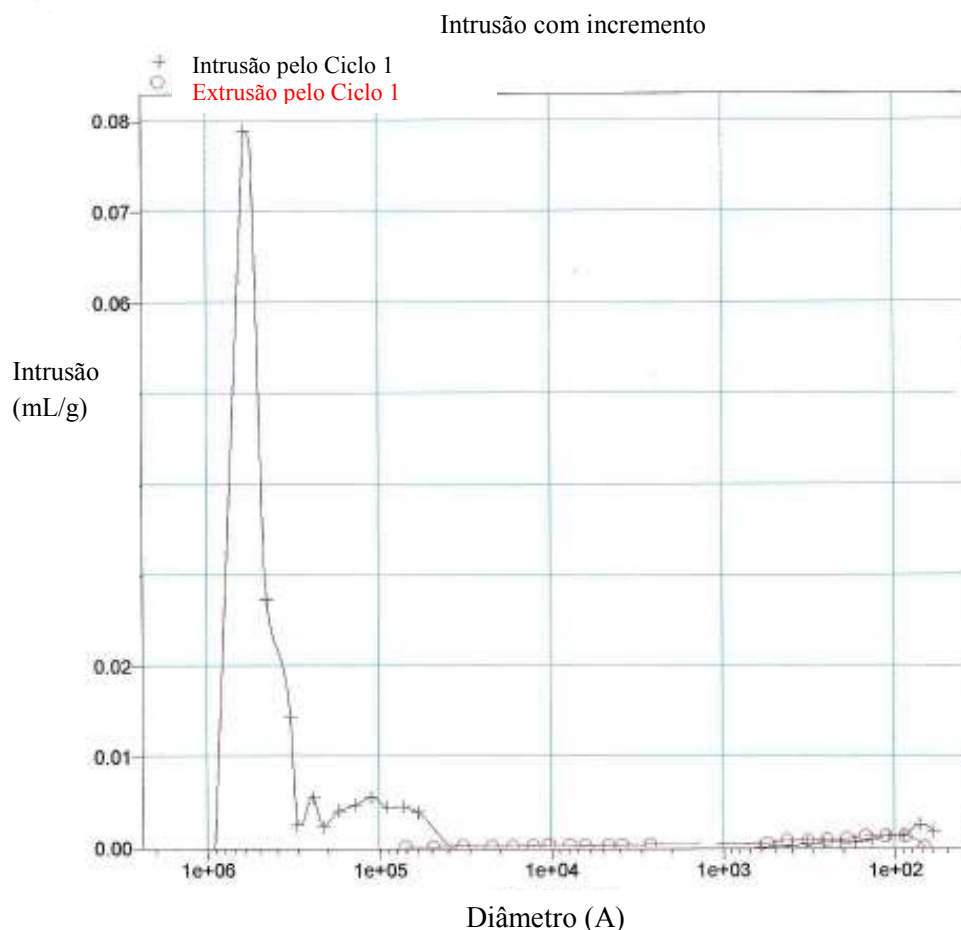


Figura 4.2 - Gráfico de Porosimetria de Mercúrio para o Acetato de sódio anidro. Tempo de equilíbrio 30s.

4.1.5 Análise morfológica por MEV – cloreto de potássio

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é utilizado com o objetivo de se fazer uma análise morfológica dos cristais. Para tanto, utilizou-se uma amostra seca em leito pulso-fluidizado.

Da Figura 4.3 à Figura 4.6, apresentam-se as micrografias obtidas no MEV para o cloreto de potássio. Estas foram ampliadas 50x, 100x e 300x e as amostras tiveram tratamento de superfície com ouro.

Analisando essas figuras, nota-se que a forma da maioria das partículas de cloreto de potássio é cúbica, conforme descrito na seção 2.4.1. Nota-se também que o sal seco analisado apresenta-se em diversos grupos aglomerados.

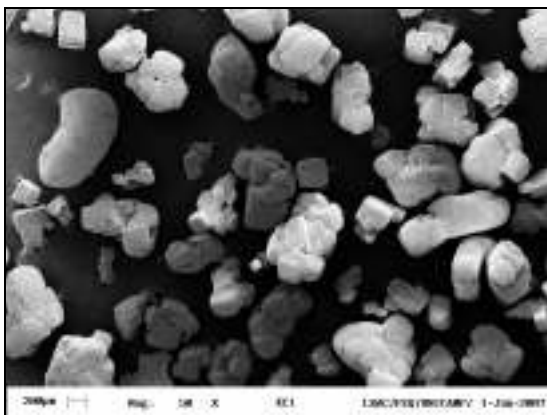


Figura 4.3 – Cloreto de potássio, ampliação 50×

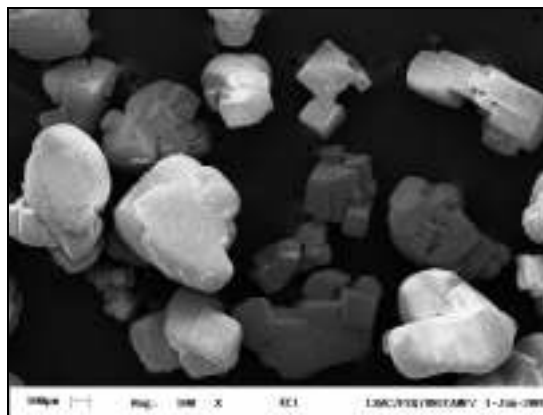


Figura 4.4 – Cloreto de potássio, ampliação 100 ×



Figura 4.5 – Cloreto de potássio, ampliação 300 ×

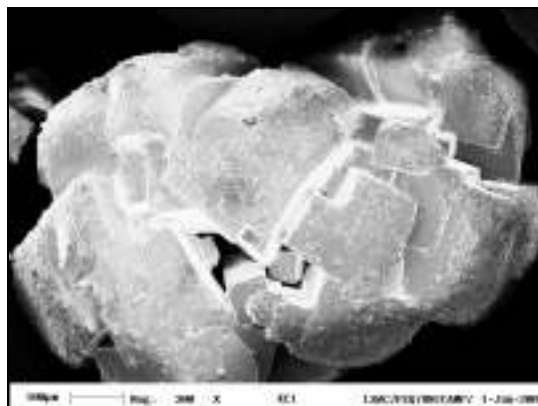


Figura 4.6 – Cloreto de potássio, ampliação 300 ×

A análise das imagens não permite que se estabeleçam medidas geométricas estatisticamente significativas. Porém, pela escala presente nas figuras, pode-se afirmar que a ordem de grandeza do tamanho das partículas está de acordo com as medidas de distribuição granulométrica apresentadas na seção 4.1.7. Essa observação também vale para o acetato de sódio, cujos resultados são mostrados a seguir.

4.1.6 Análise morfológica por MEV – acetato de sódio anidro

Da Figura 4.7 à Figura 4.10, apresentam-se as micrografias obtidas no MEV para o acetato de sódio anidro. Estas foram ampliadas 100x, 200x e 500x e as amostras tiveram tratamento de superfície com ouro.

Analisando as figuras, nota-se que a forma da maioria das partículas de acetato de sódio é monoclinica conforme descrito na seção 2.4.2. Nota-se também que o sal analisado apresenta-se em grupos aglomerados.

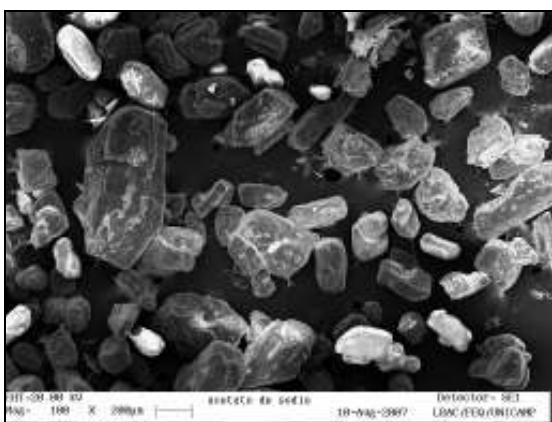


Figura 4.7 – Acetato de Sódio, ampliação 100×

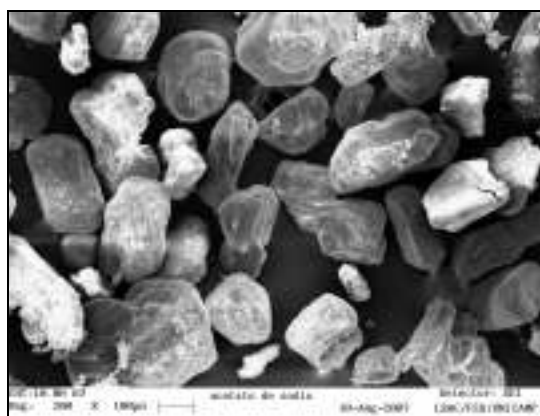


Figura 4.8 – Acetato de Sódio, ampliação 200 ×

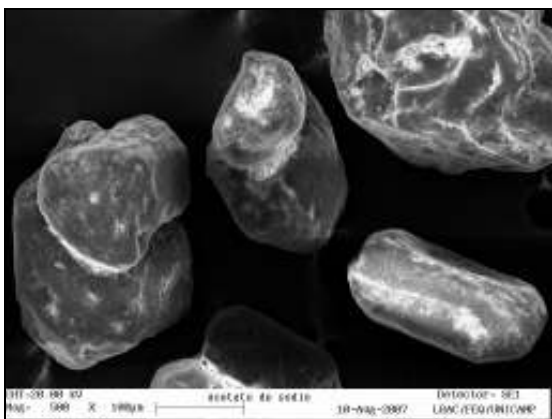


Figura 4.9 – Acetato de Sódio, ampliação 500×

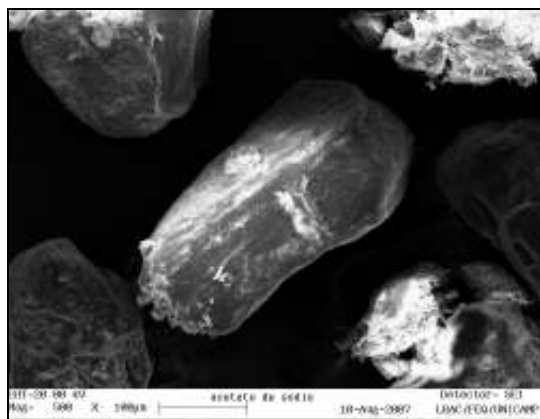
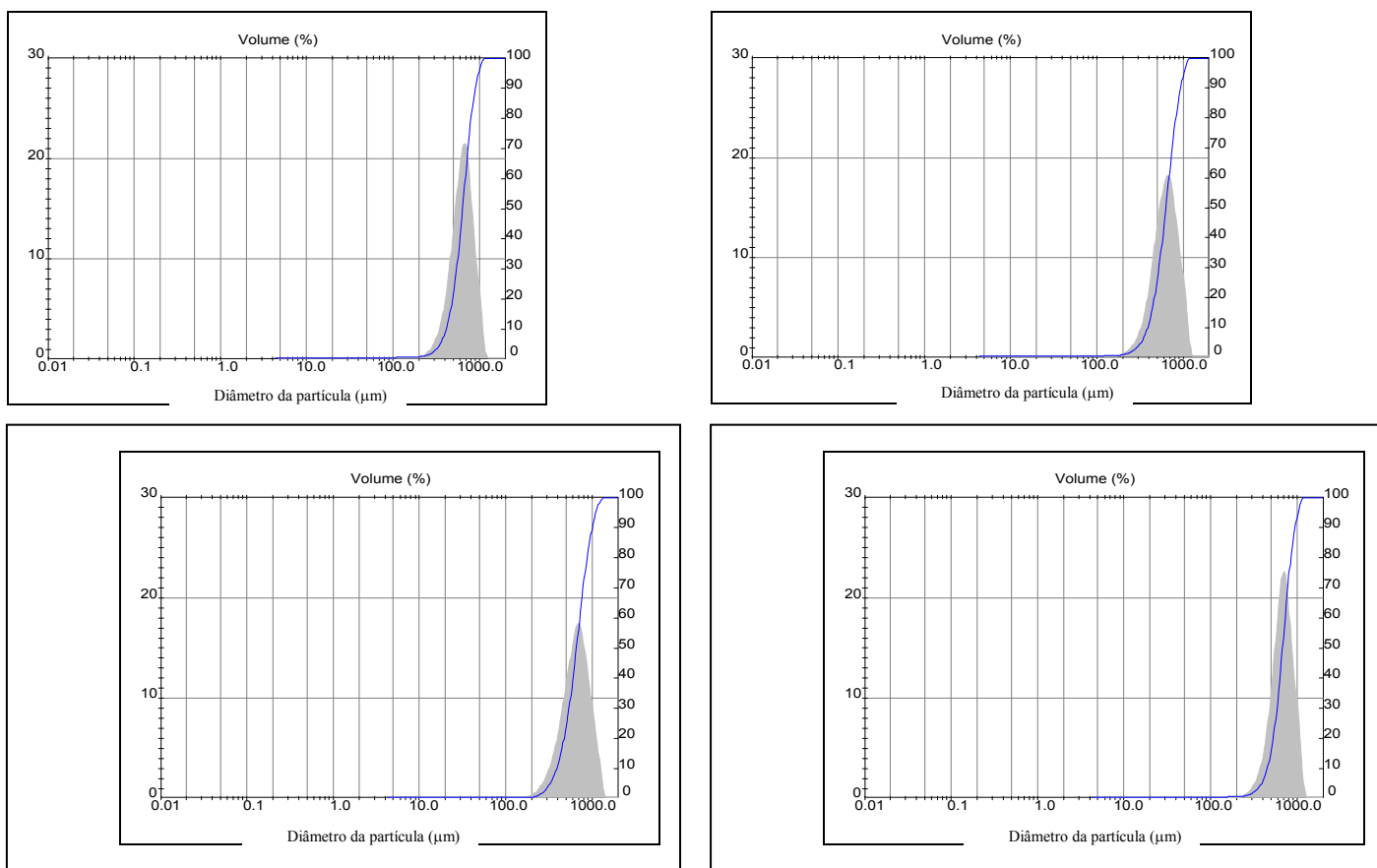


Figura 4.10 – Acetato de Sódio, ampliação 500 ×

4.1.7 Distribuição granulométrica do cloreto de potássio

Os resultados das análises de distribuição granulométrica das partículas de cloreto de potássio, utilizando o Mastersizer, estão apresentados na Figura 4.11. Nessa Figura, são representados os resultados de 6 repetições.

Em todos os gráficos, as representações gráficas “curvas cumulativas de tamanho inferior” são as crescentes e as demais são as curvas de frequência, as quais são obtidas por diferenciação das primeiras. Nota-se também a semelhança entre as curvas de representação gráfica “tamanho inferior” e a semelhança nas curvas de frequência de todas as figuras.



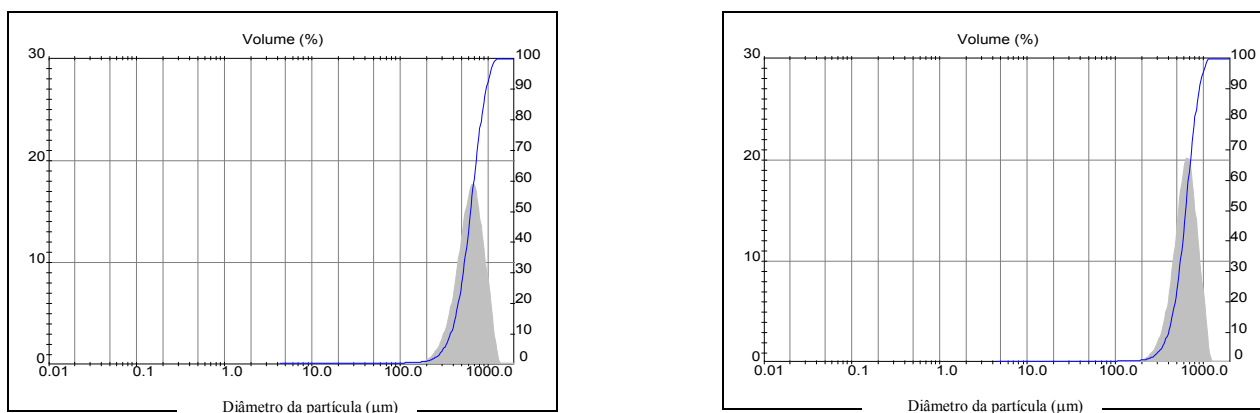


Figura 4.11 – Distribuição granulométrica das partículas de cloreto de potássio

A Tabela 4.3 apresenta os resultados numéricos do diâmetro médio da partícula obtidos nessas análises, podendo evidenciar tais fatos.

Tabela 4.3 – Resultados das análises de cloreto de potássio no Mastersizer.

	Diâmetro médio (μm)
Ensaio 1	651,35
Ensaio 2	647,09
Ensaio 3	683,15
Ensaio 4	692,17
Ensaio 5	652,80
Ensaio 6	644,51

Neste trabalho, admitiu-se que o diâmetro médio das partículas de cloreto de potássio como sendo 661,84 μm . De posse do diâmetro médio da partícula e de sua massa específica e analisando a Figura 2.10, conclui-se que o cloreto de potássio seco é classificado como partícula do grupo B de Geldart — partícula tipo areia e com regime de fluidização borbulhante segundo KUNII e LEVENSPIEL (1991).

4.1.8 Distribuição granulométrica do acetato de sódio

Os resultados das análises de distribuição granulométrica das partículas de acetato de sódio, utilizando o Mastersizer, estão apresentados na Figura 4.12.

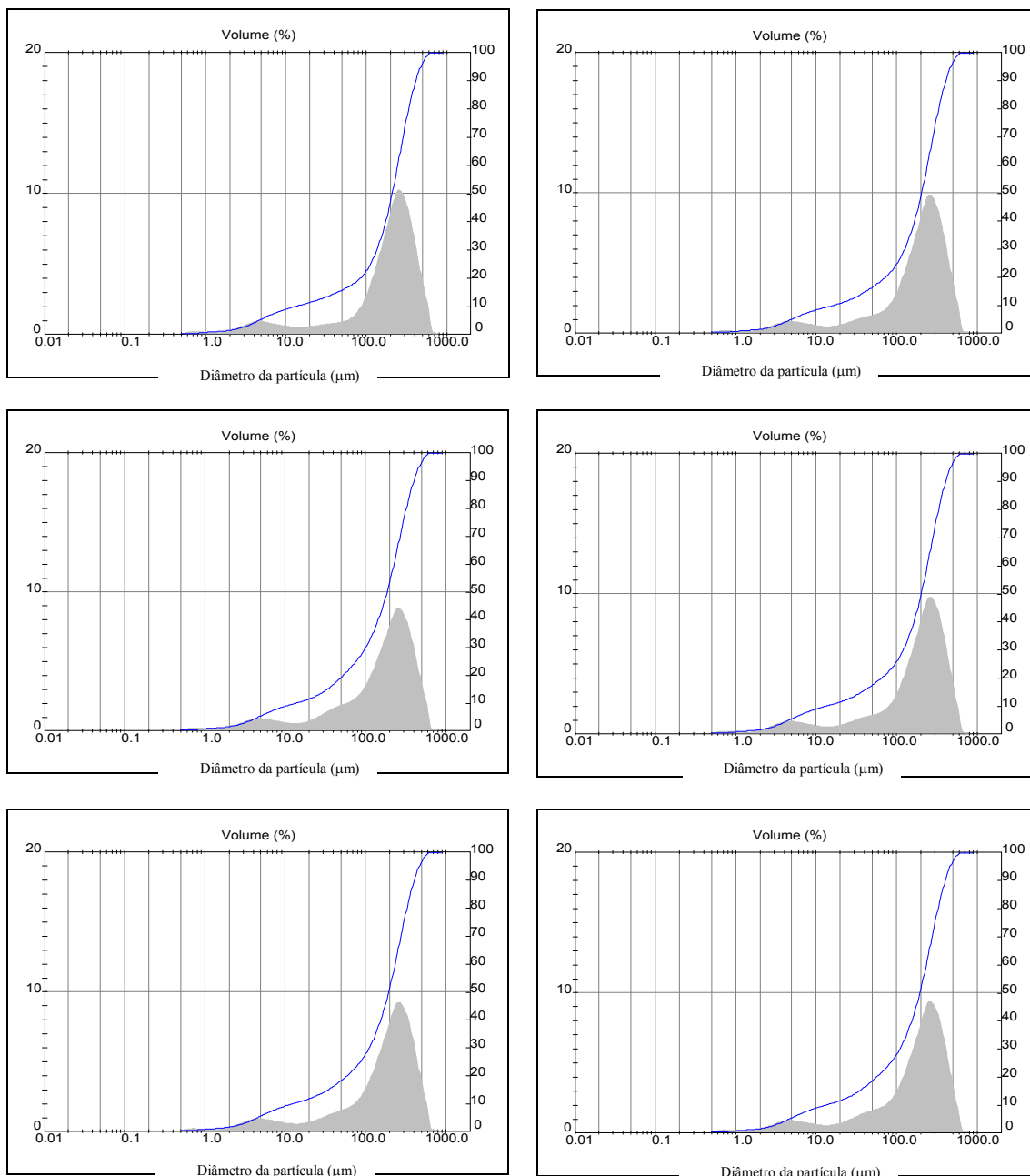


Figura 4.12 – Distribuição granulométrica das partículas de acetato de sódio

Em todos os gráficos dessa figura, as representações gráficas “curvas cumulativas de tamanho inferior” são as crescentes e as demais são as curvas de frequência, as quais são

obtidas por diferenciação das primeiras. Nota-se também, a semelhança entre as curvas de representação gráfica “tamanho inferior” e a semelhança nas curvas de frequência de todas as figuras. A Tabela 4.4 apresenta os resultados numéricos do diâmetro médio da partícula obtidos nessas análises, podendo evidenciar tais fatos.

Neste trabalho, admitiu-se que o diâmetro médio das partículas de acetato de sódio como sendo 208,87 μm (média aritmética simples). De posse do diâmetro médio da partícula e de sua massa específica e analisando a Figura 2.10, conclui-se que o acetato de sódio anidro também é classificado como partícula do grupo B de Geldart — partícula tipo areia e com regime de fluidização borbulhante segundo KUNII e LEVENSPIEL (1991).

Tabela 4.4 – Resultados das análises de acetato de sódio no Mastersizer.

	Diâmetro médio (μm)
Ensaio 1	217,98
Ensaio 2	213,56
Ensaio 3	200,06
Ensaio 4	206,11
Ensaio 5	204,57
Ensaio 6	210,91

4.2 Análise fluidodinâmica

As análises fluidodinâmicas seguiram a metodologia descrita na seção 3.4.

4.2.1 Cloreto de potássio seco

Da Figura 4.13 à Figura 4.15 apresentam-se as curvas de pulso-fluidização do KCl seco com diferentes frequências de pulsação no leito enquanto que, da Figura 4.16 à Figura 4.18, apresentam-se as curvas de pulso-fluidização do KCl seco com diferentes massas de material.

Observa-se que, para uma mesma velocidade superficial do gás, os valores de queda de pressão no leito são tão maiores quanto maior a massa de material. Essa constatação concorda com a teoria que prevê uma maior necessidade de energia para a fluidização de uma maior massa de material.

Numa curva clássica de fluidização convencional, a queda de pressão é crescente à medida que se aumenta a vazão através de um leito fixo. Isso também se verificou em todos os casos analisados de pulso fluidização conforme ilustrado da Figura 4.13 à Figura 4.18.

Quando o leito convencional se encontra totalmente expandido, a queda de pressão permanece constante com a velocidade. No caso da pulso-fluidização, o que se percebe é que, na condição de leito totalmente expandido, a queda de pressão atinge um patamar em que ainda se percebe uma pequena variação crescente da queda de pressão com a velocidade (Figura 4.13 à Figura 4.21). Pode-se atribuir essa variação ao fato de a alimentação gasosa ser intermitente.

Quando o fluxo gasoso é interrompido numa determinada seção do leito, a queda de pressão é zero. A expansão do leito é, então, reduzida. Na retomada do fluxo gasoso, o gás deve fornecer energia suficiente para novamente expandir o leito. Essa quantidade de energia é tão maior quanto mais alta a velocidade do gás.

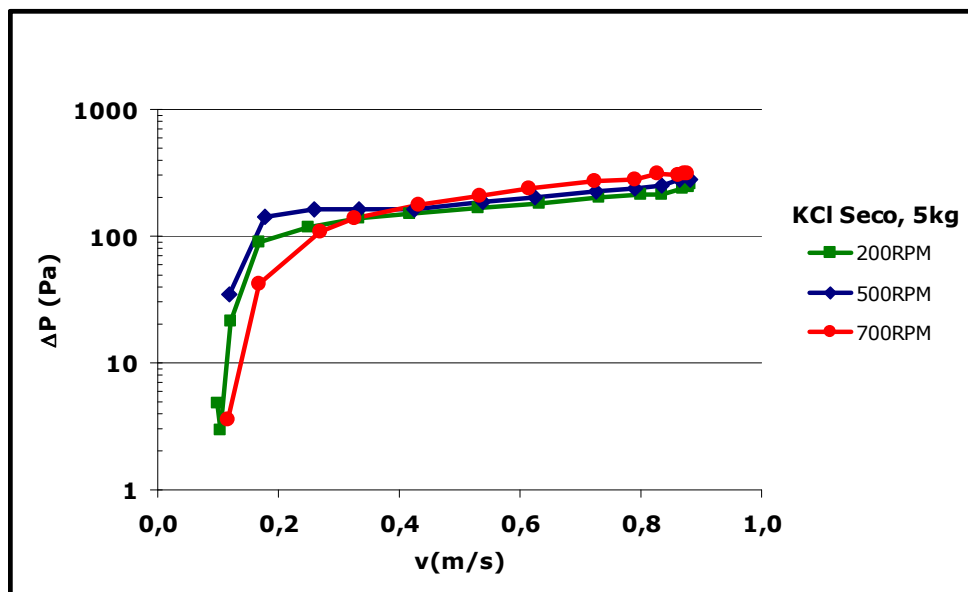


Figura 4.13 – Curva de fluidização, KCl seco, 5 kg

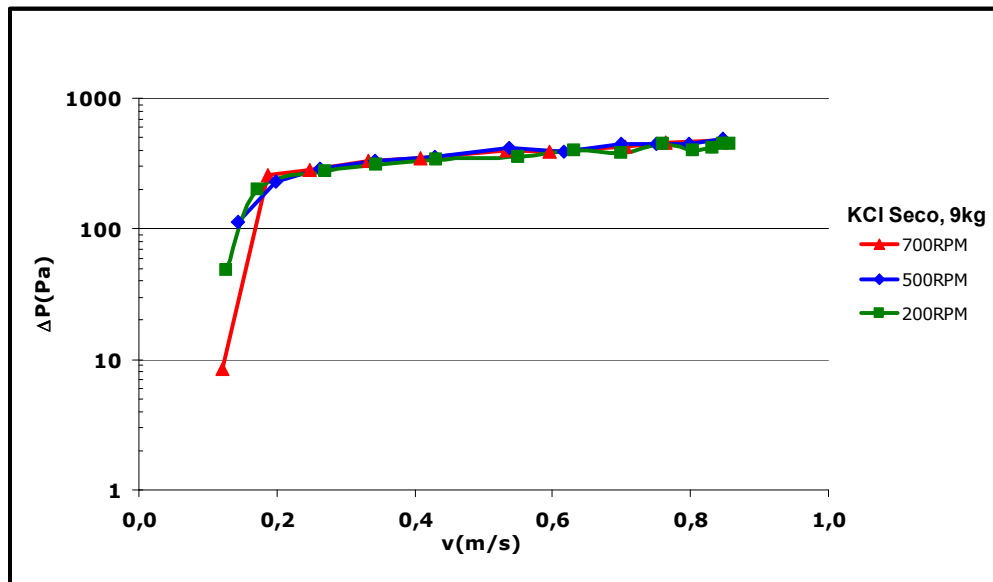


Figura 4.14 – Curva de fluidização, KCl seco, 9 kg

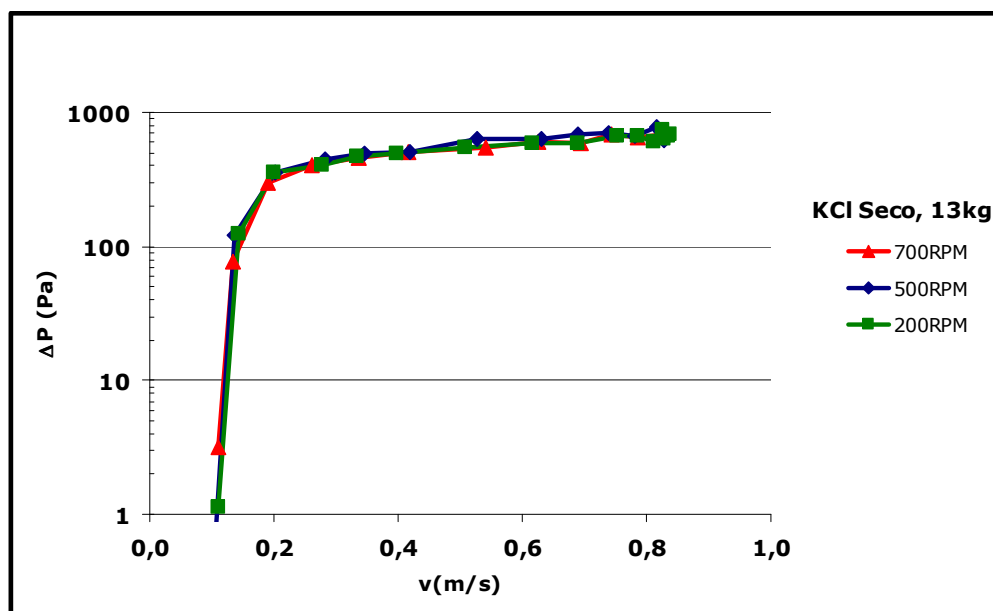


Figura 4.15 – Curva de fluidização, KCl seco, 13 kg

Outra observação interessante é quanto à influência da frequência de pulsação. Observa-se que na condição de leito expandido, ou seja, velocidades acima de 0,3 m/s aproximadamente, a queda de pressão é diretamente proporcional à frequência numa mesma velocidade e com a mesma massa de material. No entanto, essa influência aparece

apenas para a massa de 5 kg de material. Para as massas de 9 kg e 13 kg, as curvas estão praticamente sobrepostas. Essa constatação também aparece no trabalho de NITZ & TARANTO (2007). Segundo eles, quanto maior a frequência, menor o tempo que uma seção do leito permanece sem receber a corrente gasosa. Assim, é de se esperar que, quanto maior a frequência, menor o tempo para que o leito se acomode. Assim, uma maior frequência implica num maior contato gás partícula, o que aumenta a queda de pressão do leito.

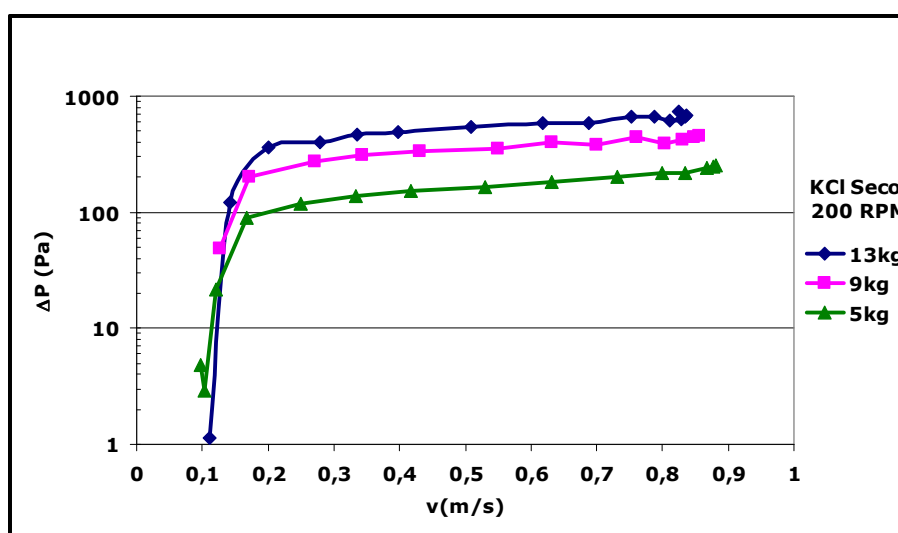


Figura 4.16 – Curva de fluidização, KCl Seco, 200 rpm

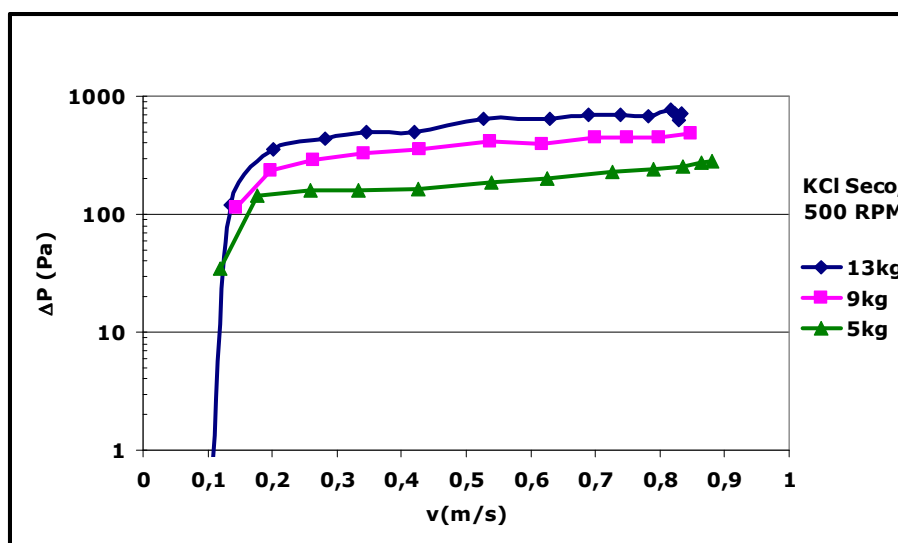


Figura 4.17 – Curva de fluidização, KCl Seco, 500 rpm

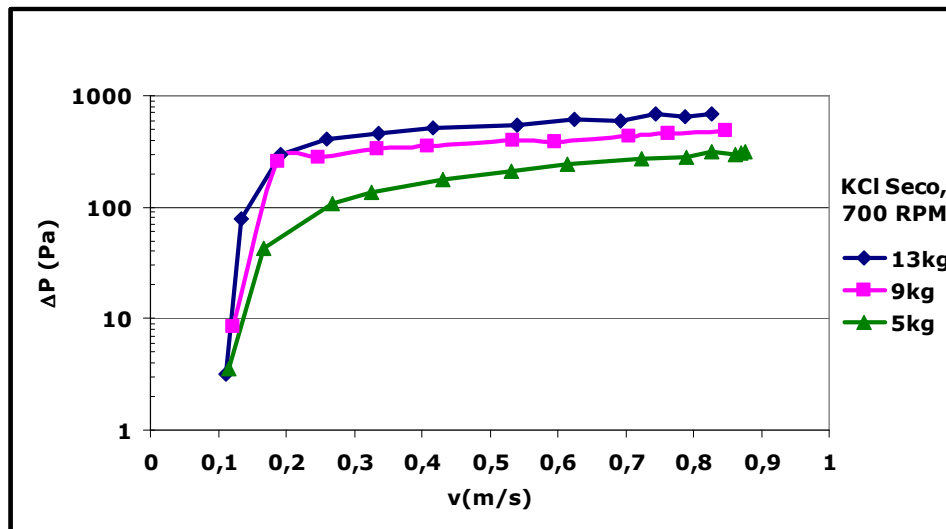


Figura 4.18 – Curva de fluidização, KCl Seco, 700 rpm

As curvas de pulso fluidização e fluidização convencional do KCl seco foram sobrepostas e estão ilustradas da Figura 4.19 à Figura 4.21.

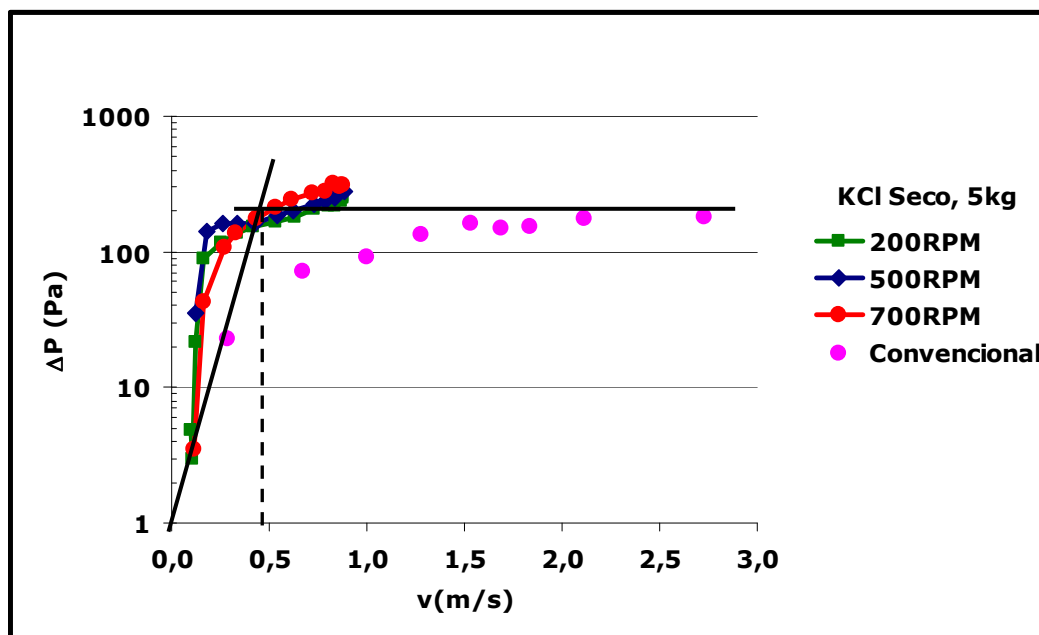


Figura 4.19 – Comparação entre fluidização convencional e pulso fluidização, KCl Seco, 5 kg

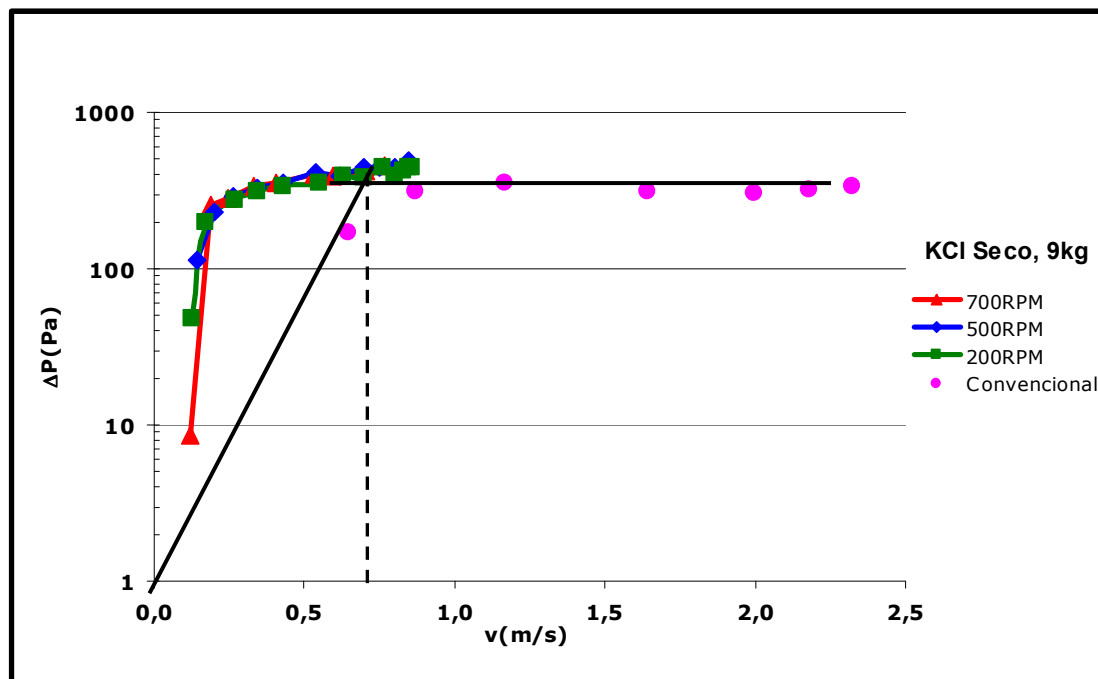


Figura 4.20 – Comparação entre fluidização convencional e pulso fluidização, KCl Seco, 9 kg

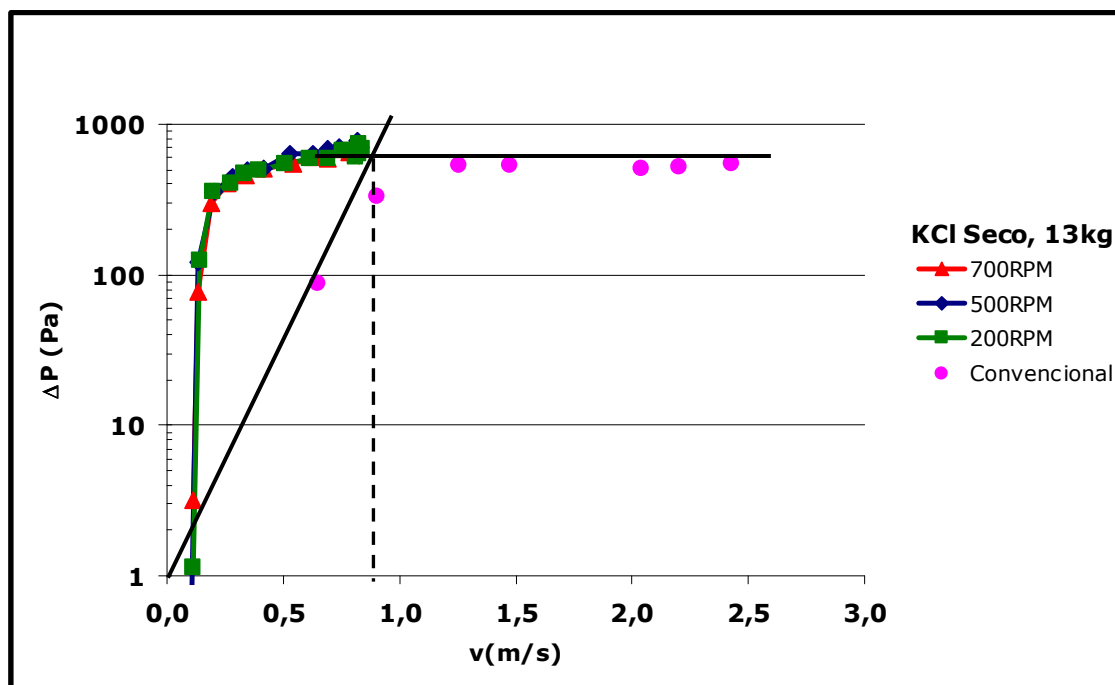


Figura 4.21 – Comparação entre fluidização convencional e pulso fluidização, KCl Seco, 13 kg

Conforme descrito em 3.4, as curvas de fluidização convencional foram obtidas para 1,25 kg; 2,25 kg e 3,25 kg de material confinado em uma só seção do leito. De modo a ser possível a comparação dos resultados, fez-se uma correção. A massa de material e a vazão de gás foram multiplicadas por 4 para que os resultados sejam referenciados às 4 seções do leito. Por esse motivo, as velocidades superficiais do ar de secagem necessárias em leito fluidizado convencional expandido são muito maiores que as alcançadas em leito pulsante.

O que se observou é que a queda de pressão máxima obtida nos dois regimes é praticamente a mesma quando as massas de material são de 9 kg e 13 kg enquanto que a queda de pressão máxima obtida para 5 kg de material em leito convencional é ligeiramente menor quando comparada à obtida em leito pulsante.

As velocidades de mínima pulso fluidização em todas as frequências de pulsação estudadas com as diferentes cargas de material foram obtidas graficamente (Figura 4.19 à Figura 4.21) pela intersecção das retas traçadas no período em que a perda de carga é crescente (leito fixo) e no período em que a perda de carga é constante (leito expandido). As velocidades de mínima fluidização em leito convencional foram obtidas da mesma maneira. A Tabela 4.5 apresenta tais velocidades e o índice de fluidização máximo obtido em cada ensaio.

As velocidades de mínima pulso-fluidização obtidas nas diferentes condições experimentais são muito próximas a 0,2 m/s. As velocidades de mínima fluidização em leito convencional são significativamente maiores (na faixa de 50% a 300%) quando comparadas com as obtidas no leito pulsante, concordando com a teoria de KUDRA & MUJUMDAR (2002) no que diz respeito à economia de energia, pois a energia fornecida pelo soprador de ar para a alimentação do gás é menor devido à pulsação intermitente.

O índice de fluidização apresentado na Tabela 4.5 e ilustrado da Figura 4.22 à Figura 4.24 de cada ensaio foi calculado, segundo MARRING *et al* (1994) e SANTANA *et al* (1999), pela equação 2.18, que relaciona a queda de pressão no leito com o peso das partículas por unidade de área da seção transversal.

Tabela 4.5. Velocidades de mínima pulso-fluidização, velocidade de mínima fluidização e índice de fluidização para o cloreto de potássio seco.

KCl Seco	v_{pf}^{min} (m/s)	v_{mf} (m/s)	FI
5 kg – 200 rpm	0,16	-----	0,94
5 kg – 500 rpm	0,18	-----	1,03
5 kg – 700 rpm	0,23	-----	1,14
5 kg – Convencional	-----	0,49	0,67
9 kg – 200 rpm	0,20	-----	0,92
9 kg – 500 rpm	0,19	-----	0,99
9 kg – 700 rpm	0,20	-----	0,98
9 kg – Convencional	-----	0,71	0,71
13 kg – 200 rpm	0,20	-----	1,03
13 kg – 500 rpm	0,20	-----	1,01
13 kg – 700 RPM	0,20	-----	0,96
13 kg – Convencional	-----	0,82	0,76

Observou-se que o índice de fluidização em leito pulsante, nas diferentes condições experimentais estudadas, é próximo da unidade, indicando assim, uma boa qualidade de fluidização, ou seja, praticamente todas as partículas foram suspensas pelo fluxo ascendente do gás e visualmente canais preferenciais não foram notados. Para 5 kg de material a 700 rpm, o valor do índice de fluidização é maior que a unidade, indicando que a queda de pressão no leito é ligeiramente superior à razão do peso das partículas pela unidade de área transversal do leito.

Já em leito convencional os índices de fluidização obtidos são menores que a unidade em todas as condições experimentais analisadas e apresentam-se maiores quanto maior a carga de material utilizado. Tal fato evidencia que nem todas as partículas foram

suspensas pelo fluxo ascendente do gás e concorda com o relatado por SANTANA *et. al* (1999) quanto à formação de canais preferenciais, fato observado visualmente durante os ensaios em leito convencional.

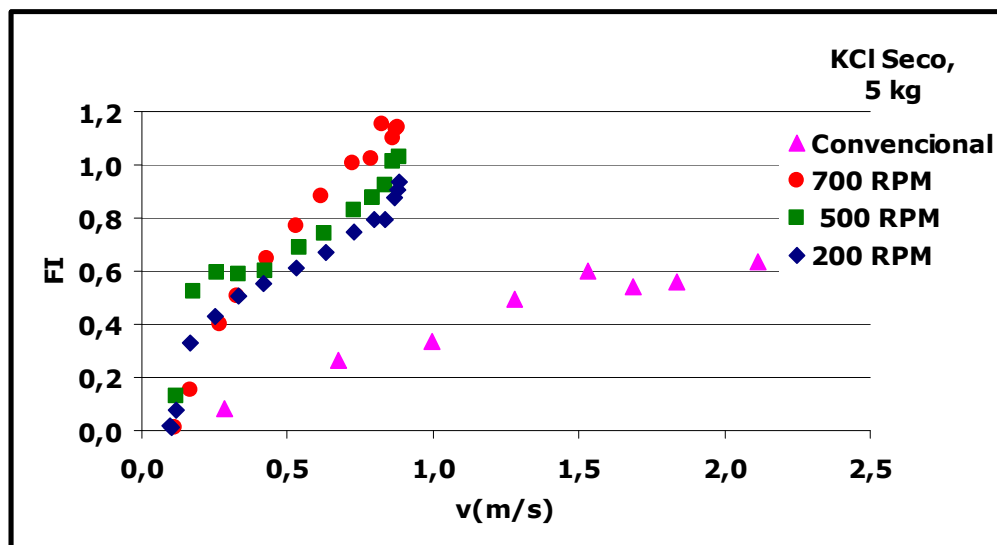


Figura 4.22 – Índice de fluidização do KCl seco, 5 kg

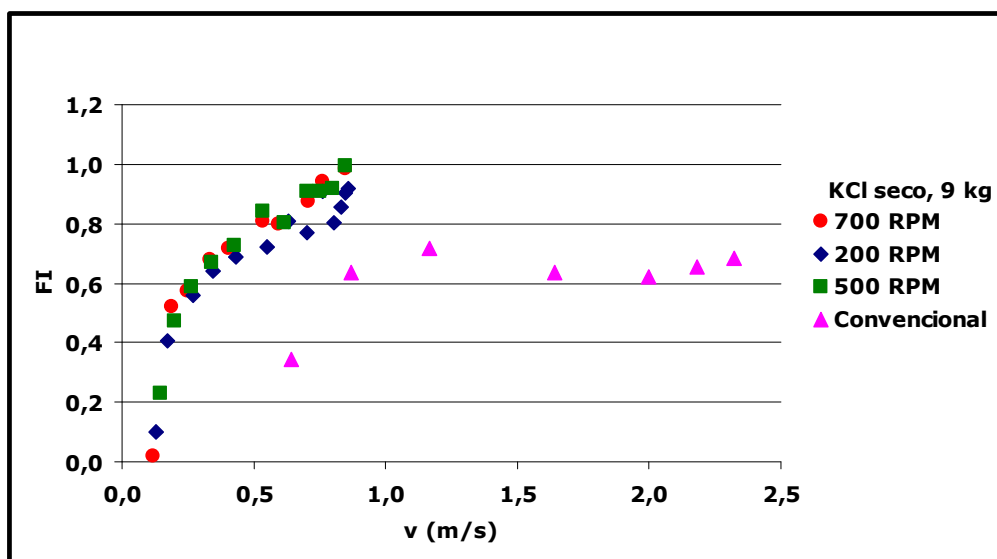


Figura 4.23 – Índice de fluidização do KCl seco, 9 kg

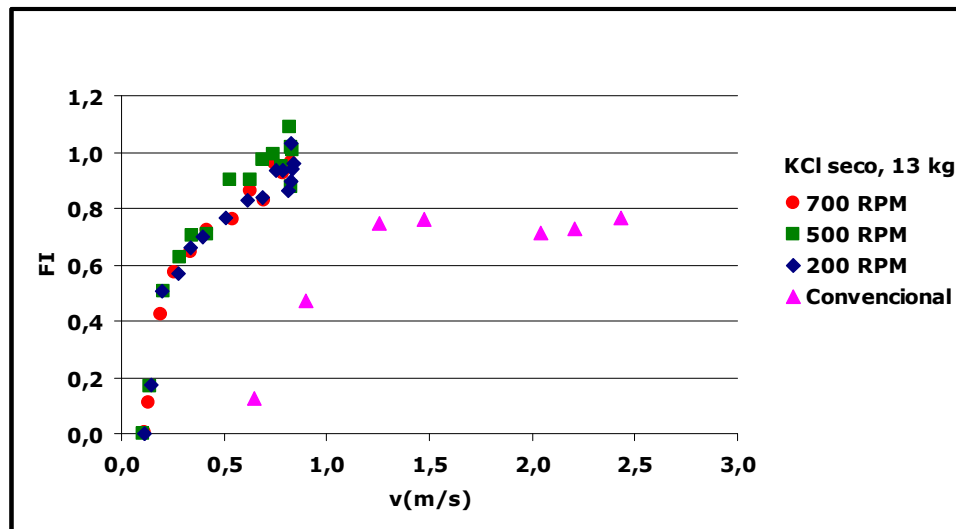


Figura 4.24 – Índice de fluidização do KCl seco, 13 kg

4.2.2 Cloreto de potássio úmido

As curvas fluidodinâmicas em leito pulso-fluidizado para 13 kg de KCl úmido estão ilustradas na Figura 4.25. Para as três diferentes frequências de pulsação estudadas verificou-se que as curvas mantiveram-se próximas. Em condição de leito fixo, a queda de pressão aumentou e canais preferenciais foram observados visualmente. Quando o leito começou a expandir, a queda de pressão diminuiu devido à aglomeração das partículas e formação de canais preferenciais, prejudicando assim a qualidade da fluidização. Esta constatação foi feita em todas as condições experimentais analisadas em leito pulso-fluidizado, como pode ser observado na Figura 4.25.

O estudo fluidodinâmico do KCl úmido em leito convencional foi realizado com diferentes cargas iniciais: 1,25 kg, 2,25 kg e 3,25 kg. Uma única seção foi utilizada e para ser possível a comparação com o leito pulsante as cargas iniciais foram multiplicadas por quatro. Em todos os ensaios, verificou-se a formação de canais preferenciais ainda em leito fixo. Para 1,25 kg de material úmido (equivalente a 5 kg), verificou-se que para velocidades de ar acima de 1,3 m/s, ocorre a elutriação do leito, tal fato é ilustrado na Figura 4.26. Já com 13 kg de material, observa-se uma ligeira diminuição da queda de pressão quando os leitos estão expandidos.

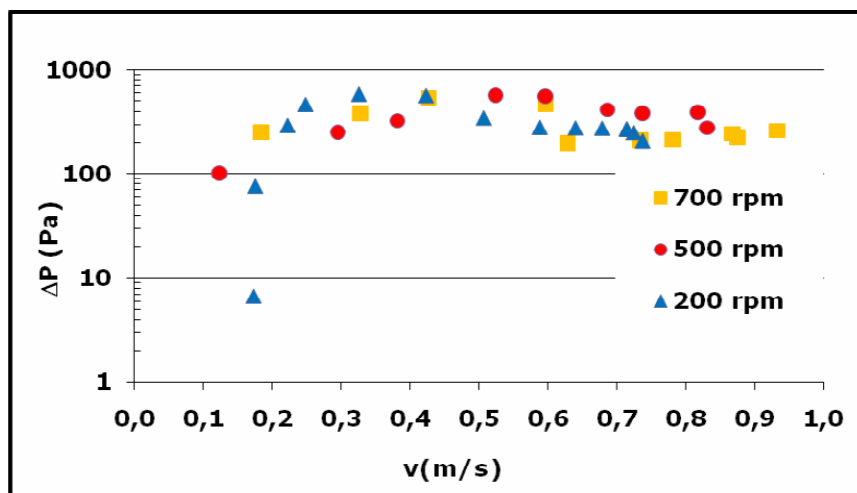


Figura 4.25 - Curvas fluidodinâmicas do KCl úmido ($U=6\%$) em leito pulso-fluidizado, 13 kg de carga inicial, 200 rpm, 500 rpm e 700 rpm

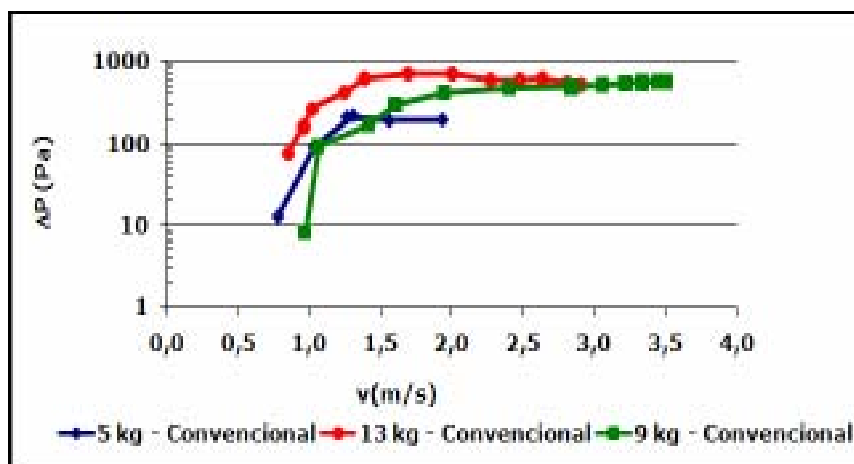


Figura 4.26 – Curva fluidodinâmica, KCl úmido ($U=6\%$), Leito Convencional

A Figura 4.27 ilustra as curvas fluidodinâmicas obtidas nos dois tipos de leitos estudados: pulsante e convencional. A queda de pressão obtida em leito convencional, na condição de leito expandido, é ligeiramente maior que a obtida em leito pulsante.

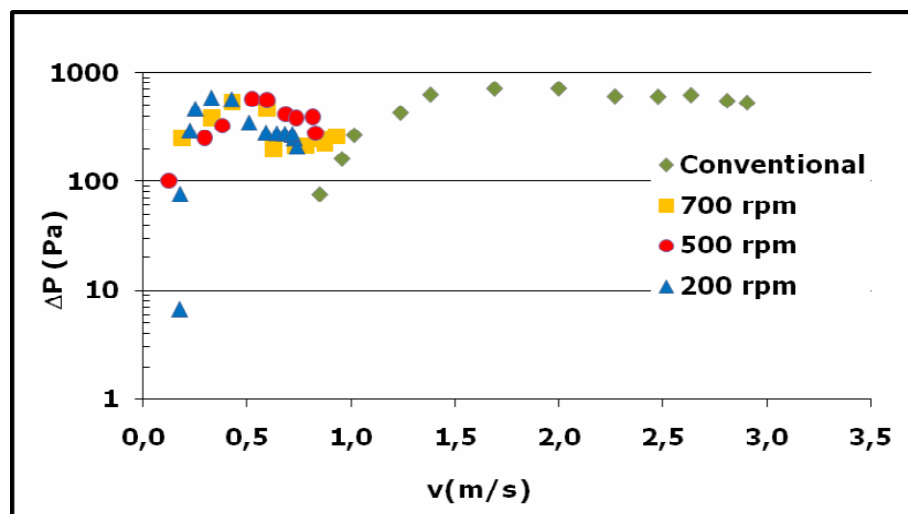


Figura 4.27 – Curvas fluidodinâmicas do KCl úmido ($U=6\%$) em leito pulso-fluidizado e leito convencional, 13kg de carga inicial

Tabela 4.6. Velocidades de mínima pulso-fluidização, velocidades de mínima fluidização para o KCl úmido ($U=6\%$)

KCl - $U=6\%$	v_{pf}^{min} (m/s)	v_{mf} (m/s)	FI
5 kg – Convencional	-----	1,2	0,82
9 kg – Convencional	-----	1,4	1,0
13 kg – Convencional	-----	1,3	1,0
13 kg – 200 rpm	=====	-----	=====
13 kg – 500 rpm	=====	-----	=====
13 kg – 700 rpm	=====	-----	=====

Embora as velocidades de mínima pulso-fluidização não tenham sido obtidas graficamente devido à diminuição da queda de pressão na condição de leito expandido, é possível afirmar que são menores que as velocidades de mínima fluidização obtidas em leito convencional, como pode ser observado na Figura 4.27.

As Figura 4.28 à Figura 4.30 ilustram as curvas fluidodinâmicas do KCl seco e úmido com a mesma carga de material em leito convencional. Em todas essas figuras, observa-se que as curvas com o sal seco apresentam-se deslocadas à esquerda em relação às curvas obtidas com o sal úmido. Tal fato confirmam as velocidades de mínima fluidização obtidas nos estudos do sal seco e úmido, pois as velocidades obtidas para o sal seco são menores que as obtidas para o sal úmido.

Os valores de queda de pressão, em condição de leito expandido, são maiores para o material úmido nas diferentes massas iniciais de material analisadas, pois o sal úmido é mais denso, as partículas são coesivas e aglomeradas. Já em condição de leito fixo, os valores de queda de pressão para o sal úmido são menores que os obtidos para o sal seco, contrariando o esperado. A explicação para tal fato é a aglomeração do sal úmido favorecendo a formação de canais preferenciais.

Na medida em que o gás “encontra” passagens preferenciais pelo leito sólido, uma menor queda de pressão se verifica. O aparecimento de canais preferenciais pode prejudicar a uniformidade e a taxa de secagem, pois implica num menor contato gás-partícula.

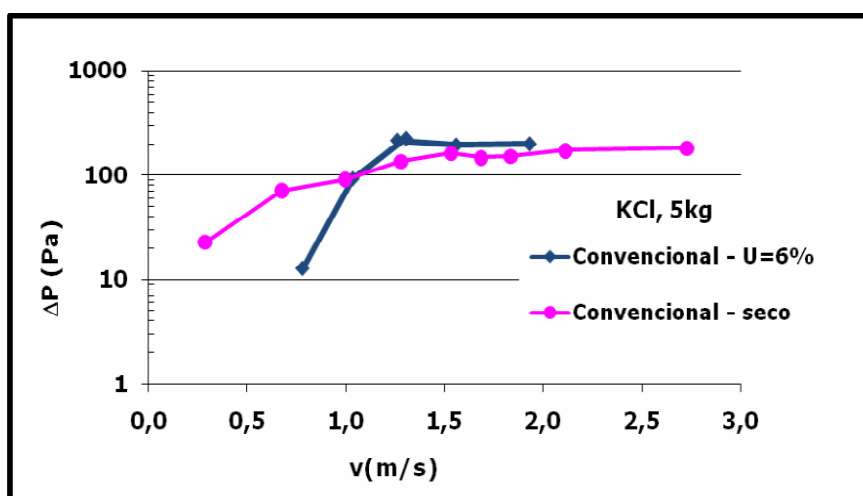


Figura 4.28 – Curvas fluidodinâmicas do KCl seco e úmido em leito convencional para 5 kg de material

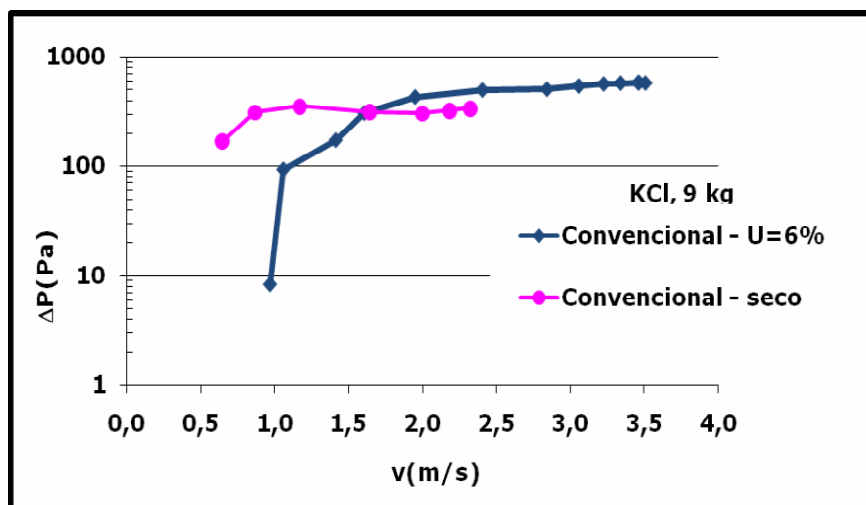


Figura 4.29 - Curvas fluidodinâmicas do KCl seco e úmido em leito convencional para 9 kg de material

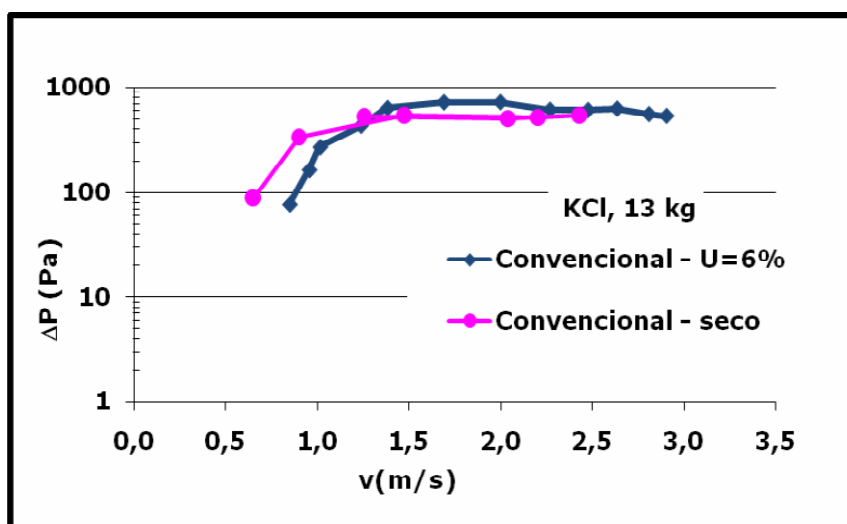


Figura 4.30 - Curvas fluidodinâmicas do KCl seco e úmido em leito convencional para 13 kg de material

As Figura 4.31 à Figura 4.33 ilustram as curvas fluidodinâmicas em leito pulsante. Para o sal úmido, observa-se uma diminuição nos valores de queda de pressão no leito em condição de leito expandido. Tal fato deve-se à formação de canais preferenciais que puderam ser observados visualmente. Para o sal seco, a queda de pressão no leito mantém-se constante, pois canais preferenciais são pouco notados.

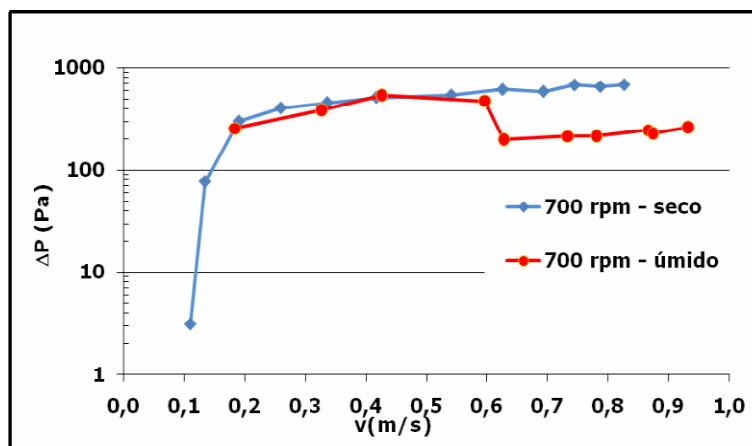


Figura 4.31 – Curvas de fluidização, KCl, 13 kg massa inicial, 700 rpm

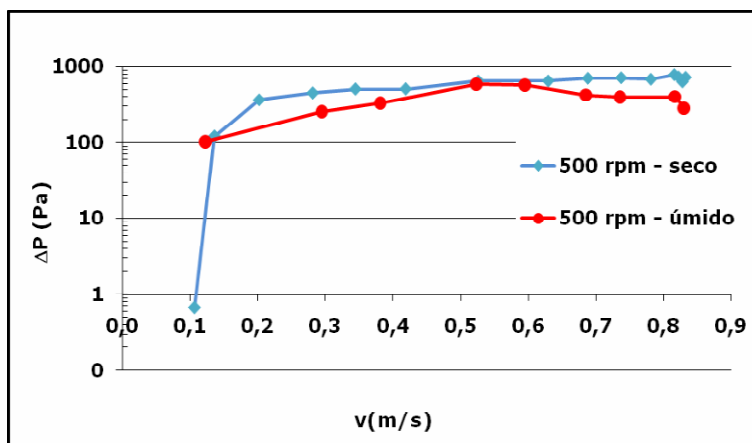


Figura 4.32 - Curvas de fluidização, KCl, 13 kg massa inicial, 500 rpm

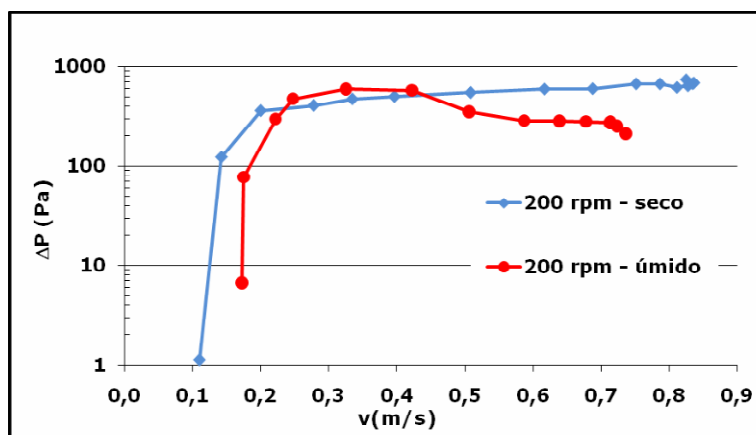


Figura 4.33 - Curvas de fluidização, KCl, 13 kg massa inicial, 200 rpm

4.2.3 Acetato de sódio anidro

As curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro em leito convencional e pulso-fluidizado com diferentes massas de material e frequências de pulsação estão apresentadas na Figura 4.34 à Figura 4.36.

Assim como observado nas curvas fluidodinâmicas do cloreto de potássio seco e úmido nos itens 4.2.1 e 4.2.2, a queda de pressão é crescente à medida que se aumenta a vazão de ar através de um leito fixo e, em condição de leito expandido, a queda de pressão permanece constante. Poucos e pequenos canais preferenciais foram observados no início dos ensaios.

Observou-se também, tanto em leito convencional quanto em leito pulsante, que, para uma mesma velocidade superficial do gás, os valores de queda de pressão são tão maiores quanto maior for a carga de material utilizada.

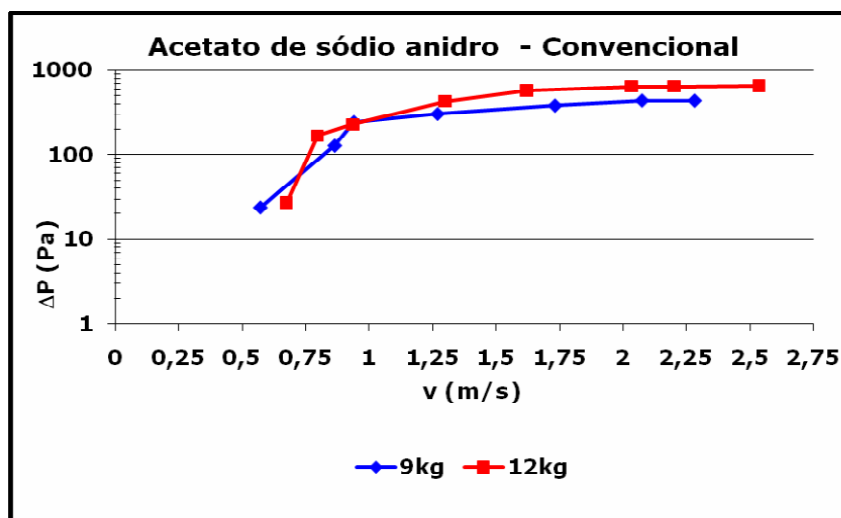


Figura 4.34 – Curva de fluidização, Acetato de sódio anidro, Convencional

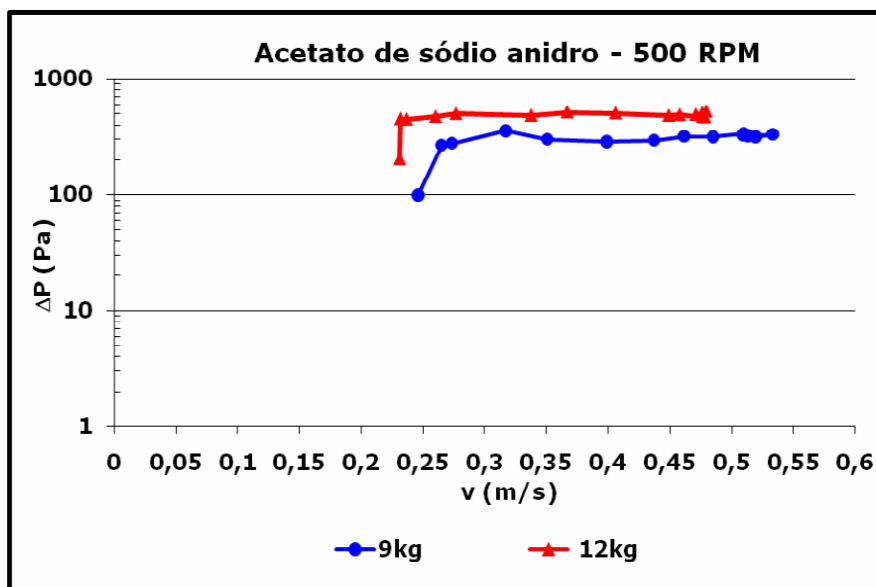


Figura 4.35 - Curva de fluidização, Acetato de sódio anidro, 500 rpm

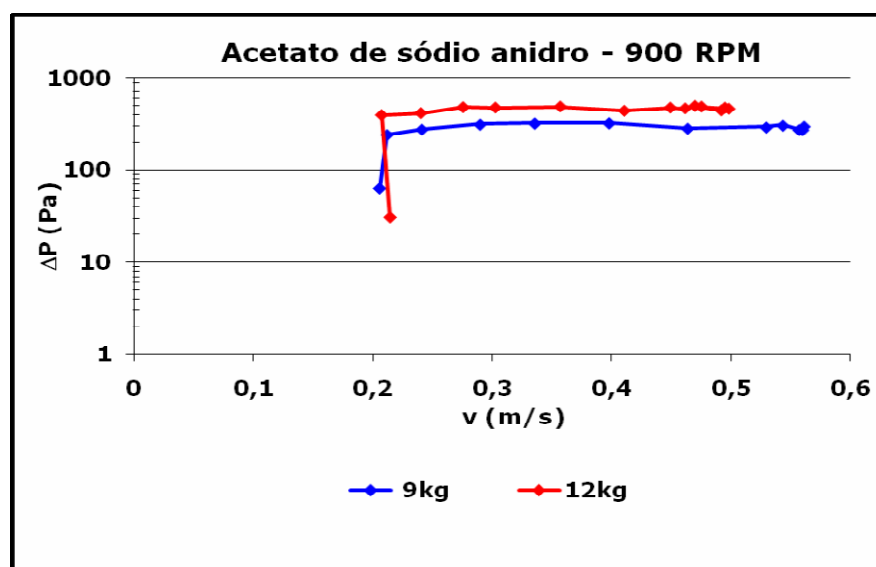


Figura 4.36 - Curva de fluidização, Acetato de sódio anidro, 900 rpm

Quanto às frequências de pulsação estudadas, observou-se que estas não influenciaram significativamente os resultados, pois, para uma mesma massa de material, os comportamentos fluidodinâmicos obtidos com diferentes frequências de pulsação foram muito semelhantes, como ilustram a Figura 4.37 e a Figura 4.38.

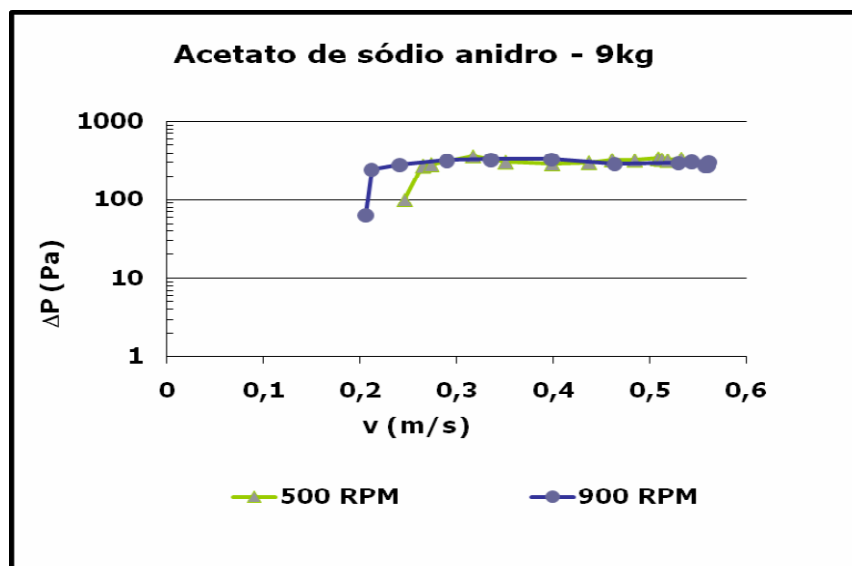


Figura 4.37 – Curva de fluidização, Acetato de sódio anidro, 9 kg

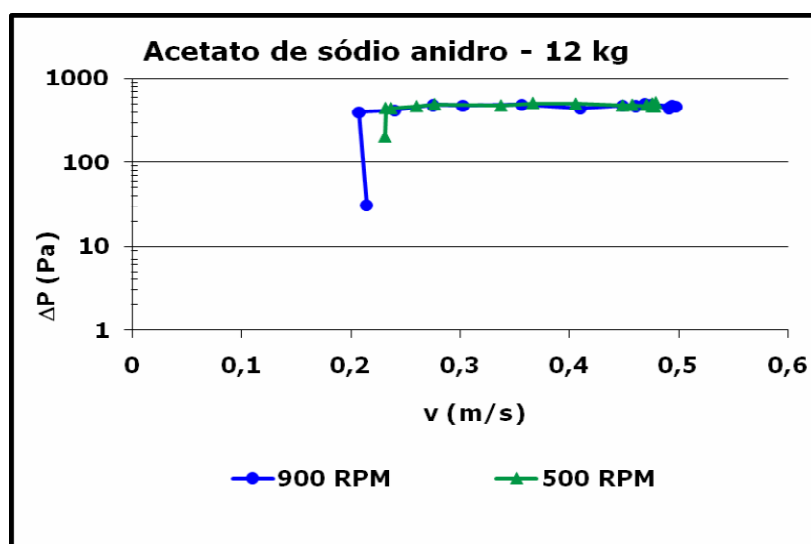


Figura 4.38 - Curva de fluidização, Acetato de sódio anidro, 12 kg

As curvas de pulso-fluidização e fluidização convencional do acetato de sódio anidro foram sobrepostas e estão ilustradas na Figura 4.39 e na Figura 4.40.

As curvas de fluidização convencional foram obtidas para 2,25 kg e 3 kg de material, confinado em uma só seção do leito, como descrito no item 3.4. Para ser possível a comparação com o leito pulsante, fez-se a mesma correção explicitada anteriormente para

o cloreto de potássio, multiplicou-se a massa de material e a vazão de gás por 4 para que os resultados fossem referenciados às 4 seções do leito.

Observou-se que a queda de pressão máxima atingida para velocidades em que o leito encontra-se expandido e com queda de pressão constante é levemente maior no leito convencional em relação ao pulsante, para as duas massas distintas analisadas.

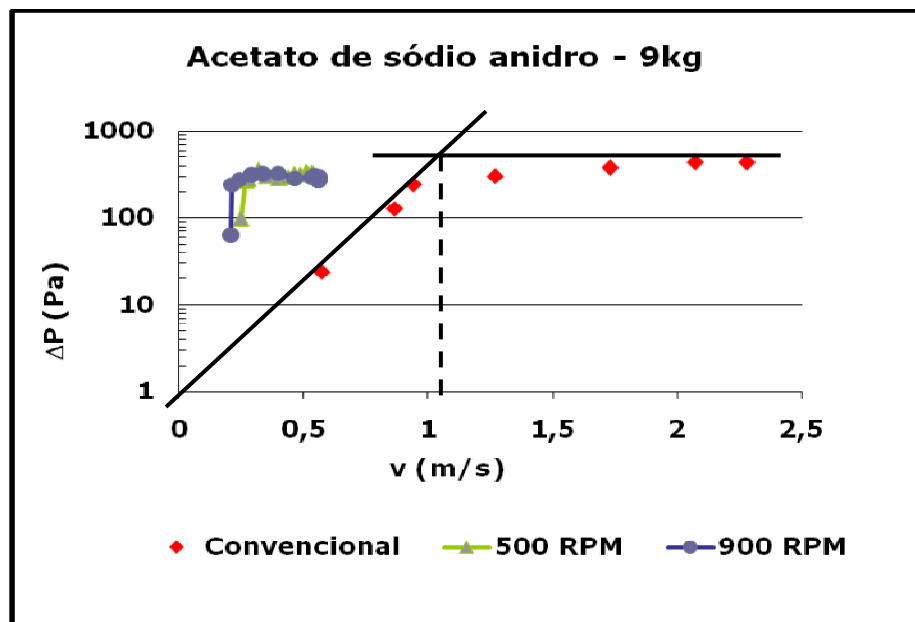


Figura 4.39 – Comparação entre fluidização convencional e pulso-fluidização, Acetato de sódio anidro – 9 kg

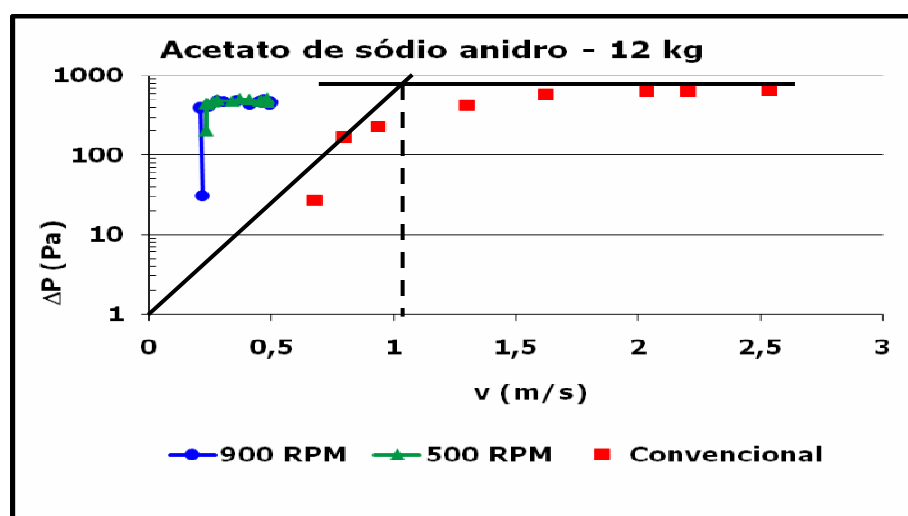


Figura 4.40 - Comparação entre fluidização convencional e pulso-fluidização, Acetato de sódio anidro – 12 kg

As velocidades de mínima fluidização e mínima pulso-fluidização foram obtidas graficamente, utilizando o mesmo procedimento realizado no item 4.2.1 para o cloreto de potássio. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.7, assim como o índice de fluidização máximo, calculado em cada ensaio segundo MARRING et. al. (1994) e SANTANA et. al. (1999).

Tabela 4.7. Velocidades de mínima pulso-fluidização, velocidade de mínima fluidização e índice de fluidização para o acetato de sódio anidro.

Acetato de sódio anidro	v_{pf}^{min} (m/s)	v_{mf} (m/s)	FI
9 kg – 500 rpm	0,27	-----	0,70
9 kg – 900 rpm	0,22	-----	0,64
9 kg – Convencional	-----	1,06	0,88
12 kg – 500 rpm	0,23	-----	0,79
12 kg – 900 rpm	0,22	-----	0,74
12 kg - Convencional	-----	1,06	0,90

As velocidades de mínima pulso-fluidização obtidas nas diferentes condições experimentais são próximas de 0,22 m/s, o que confirma a pouca influência da variação da frequência de pulsação, enquanto que as velocidades de mínima fluidização resultantes são semelhantes para cargas distintas de material utilizadas e são cerca de 350% superiores às obtidas em leito pulsante, concordando assim, com a teoria de KUDRA & MUJUMDAR (2002) no que diz respeito à economia de energia, pois a energia cinética fornecida pelo soprador de ar para a alimentação do gás é menor devido à pulsação.

Analisando os índices de fluidização, observou-se que, em leito convencional, eles estão mais próximos da unidade em relação aos obtidos no leito pulsante. Tal fato evidencia que nem todas as partículas são suspensas pelo fluxo ascendente do gás. É importante citar que, em todas as condições experimentais estudadas, para o acetato de sódio anidro, tanto

em leito pulsante quanto em leito convencional, observaram-se pequenos canais preferenciais que, com o aumento da vazão de ar, foram desaparecendo.

Os gráficos de dispersão ilustrados nas Figura 4.41 e Figura 4.42 referem-se ao estudo fluidodinâmico do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente para diferentes massas de material em leito convencional. Os dados obtidos para ambos os fluxos de gás nas diferentes massas são próximos, ou seja, a queda de pressão é muito parecida tanto para fluxos com velocidade crescente quanto para decrescente, confirmando a existência de pequenos canais preferenciais e a não aglomeração do material durante os ensaios com velocidade crescente.

O referido estudo foi realizado também em leito pulsante e os resultados obtidos foram ainda mais parecidos em ambas as direções do fluxo de gás. As curvas fluidodinâmicas estão apresentadas nas Figura 4.43 à Figura 4.46. A perda de carga é menor em leito pulsante quando comparada com o leito convencional.

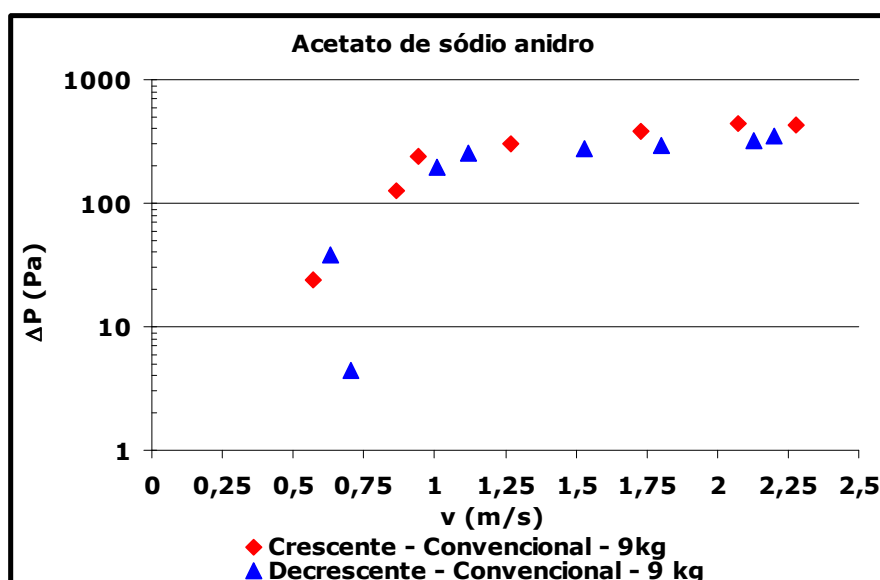


Figura 4.41 – Fluidodinâmica do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente em leito convencional, 9 kg

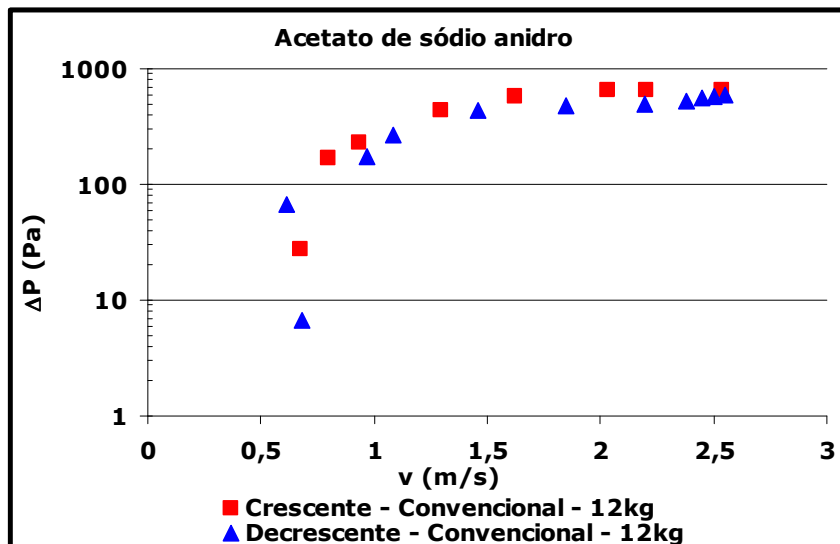


Figura 4.42 – Fluidodinâmica do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente em leito convencional, 12 kg

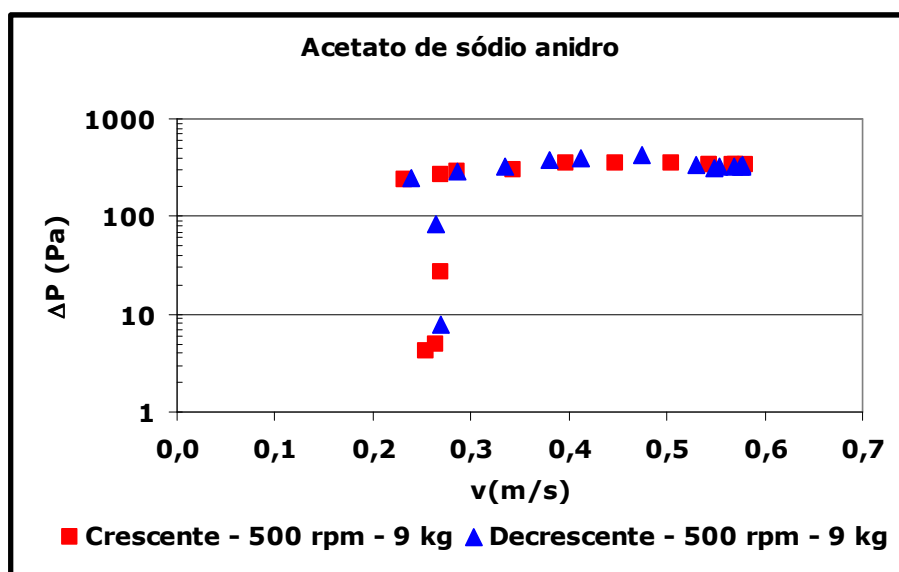


Figura 4.43 – Fluidodinâmica do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente em leito pulsante, 9 kg, 500 rpm

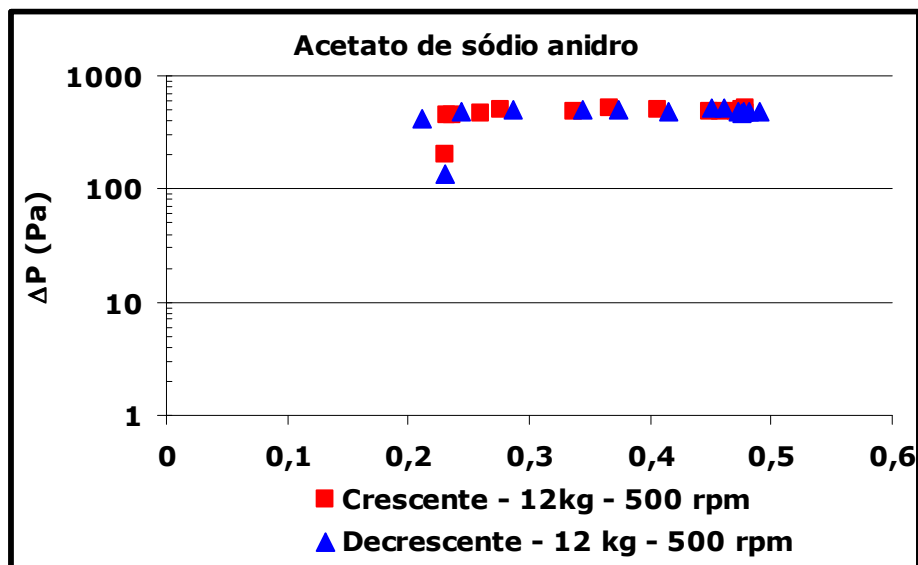


Figura 4.44 – Fluidodinâmica do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente em leito pulsante, 12 kg, 500 rpm

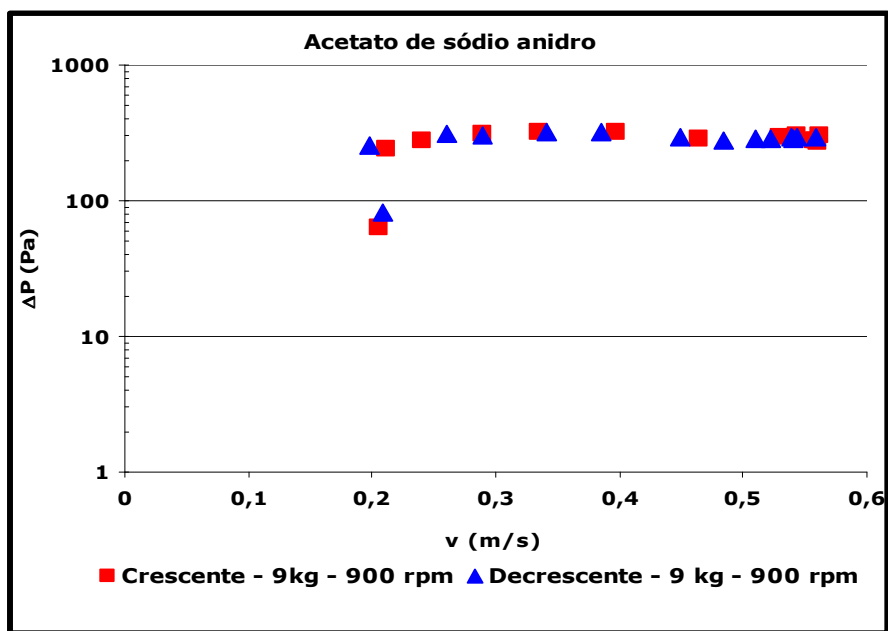


Figura 4.45 – Fluidodinâmica do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente em leito pulsante, 9 kg, 900 rpm

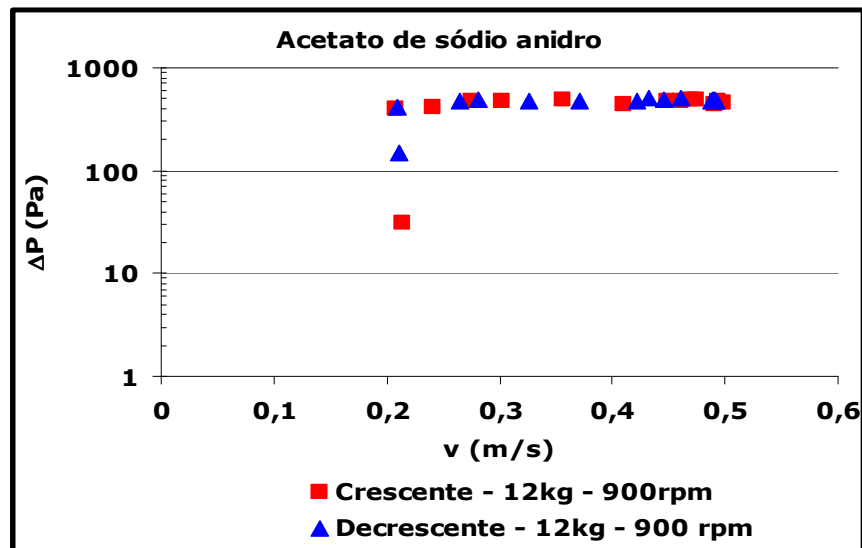


Figura 4.46 – Fluidodinâmica do acetato de sódio anidro com fluxo de gás crescente e decrescente em leito pulsante, 12 kg, 900 rpm

4.2.4 Acetato de sódio trihidratado

O estudo fluidodinâmico do acetato de sódio trihidratado foi realizado com fluxo de gás crescente e decrescente em leito convencional e pulsante como ilustrado na Figura 4.47 à Figura 4.49. Em todas as condições experimentais estudadas com fluxo de gás crescente, tanto no leito pulsante quanto no convencional, observou-se a formação de canais preferenciais muito maiores do que os notados no estudo fluidodinâmico do acetato de sódio anidro. As partículas úmidas possuem fortes ligações íon-dipolo, favorecendo sua aglomeração e conseqüente formação de canais preferenciais. No início dos experimentos, ainda em condição de leito fixo, o material úmido aglomerou-se, fazendo com que fossem registrados valores de quedas de pressão cada vez maiores até que o leito expandido fosse atingido.

Nota-se também que, ao utilizar o fluxo de gás decrescente em todas as condições estudadas com 9 kg de material úmido, a queda de pressão manteve-se menor que a obtida com fluxo de gás crescente. Tal fato pode ser explicado devido ao experimento com fluxo decrescente ser iniciado já com o leito expandido, evitando assim a formação de canais preferenciais, aglomeração do material e promovendo um maior contato entre gás-partícula.

Quando se trabalhou com 12 kg de material úmido, apesar da formação de grandes canais preferenciais em fluxo de ar crescente, verificou-se que a queda de pressão em leito pulsante obtida foi parecida para as diferentes correntes gasosas, já em leito convencional a corrente de gás crescente apresentou valores de queda de pressão ligeiramente maiores que na decrescente.

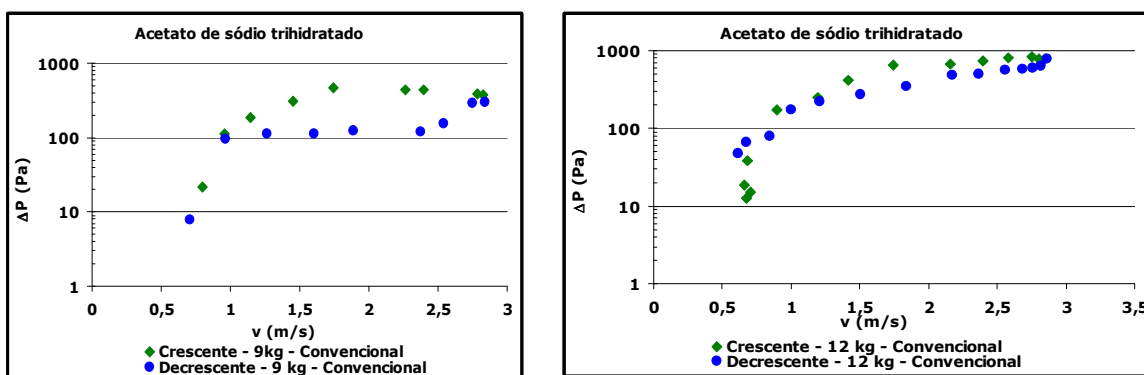


Figura 4.47 – Fluidodinâmica do acetato de sódio trihidratado com fluxo de gás crescente e decrescente em leito convencional

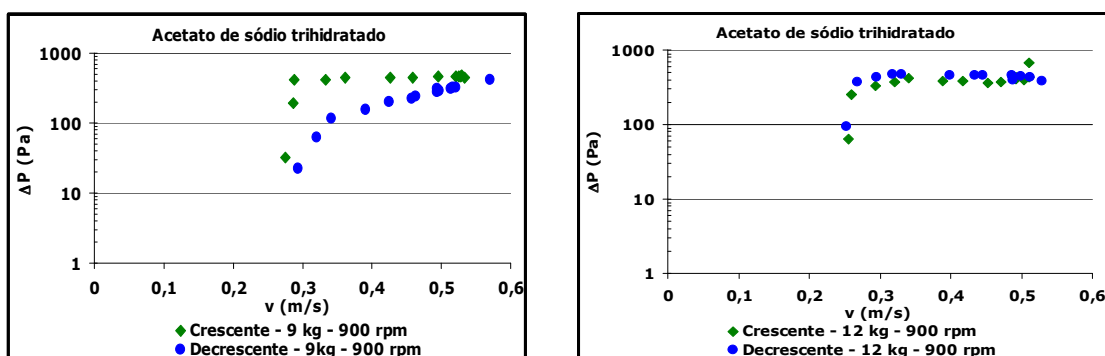


Figura 4.48 – Fluidodinâmica do acetato de sódio trihidratado com fluxo de gás crescente e decrescente em leito pulso-fluidizado, 900 rpm

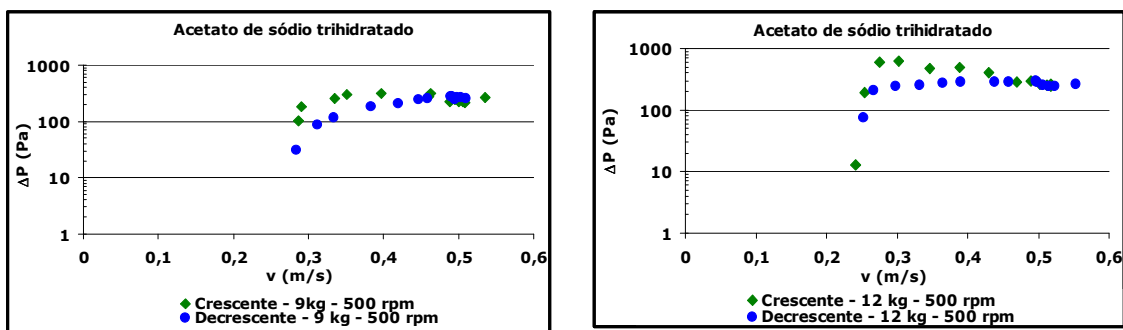


Figura 4.49 – Fluidodinâmica do acetato de sódio trihidratado com fluxo de gás crescente e decrescente em leito pulso-fluidizado, 500 rpm

Analisando as curvas fluidodinâmicas em leito pulso-fluidizado das Figura 4.50 e Figura 4.51, nota-se que, para 9 kg de material, os valores atingidos de queda de pressão no período de leito expandido são tão maiores quanto às frequências de pulsação utilizadas. Já para 12 kg de material e 500 rpm de frequência de pulsação, verificou-se que, quando a velocidade crescente do gás atingiu cerca de 0,35 m/s, formou-se um grande canal preferencial de um lado do leito, o qual se manteve até o final do experimento. Tal fato explica a diminuição da queda de pressão no leito observada nitidamente na Figura 4.51 para velocidades do gás superiores a 0,35 m/s.

Quando se trabalhou com 12 kg de material e uma frequência de pulsação de 900 rpm, verificou-se, ainda em leito fixo, a formação de três canais preferenciais. Com a pulsação, o material que se apresentava aglomerado começou a fluidizar e, com o aumento da vazão de ar, o leito expandiu-se até atingir queda de pressão constante.

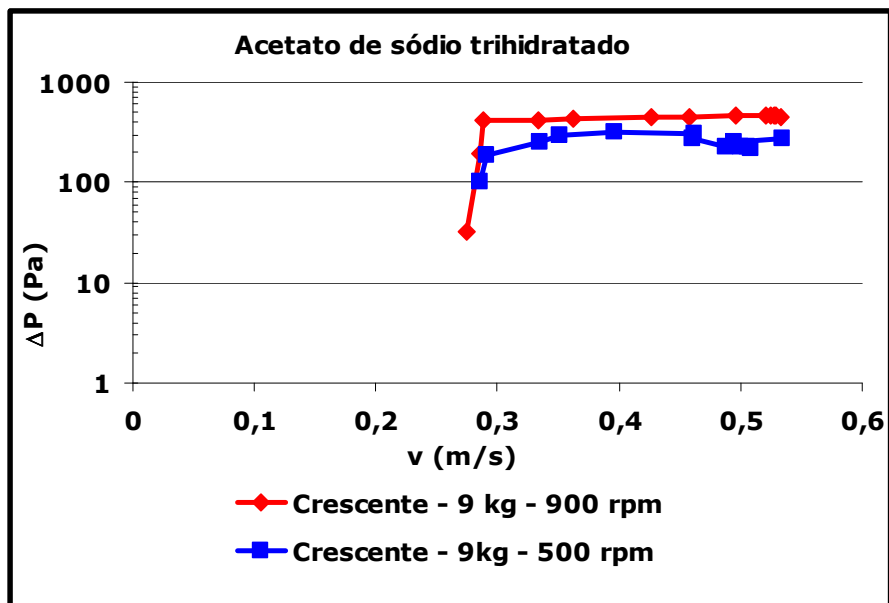


Figura 4.50 – Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito pulso-fluidizado com fluxo crescente de gás e 9 kg de material.

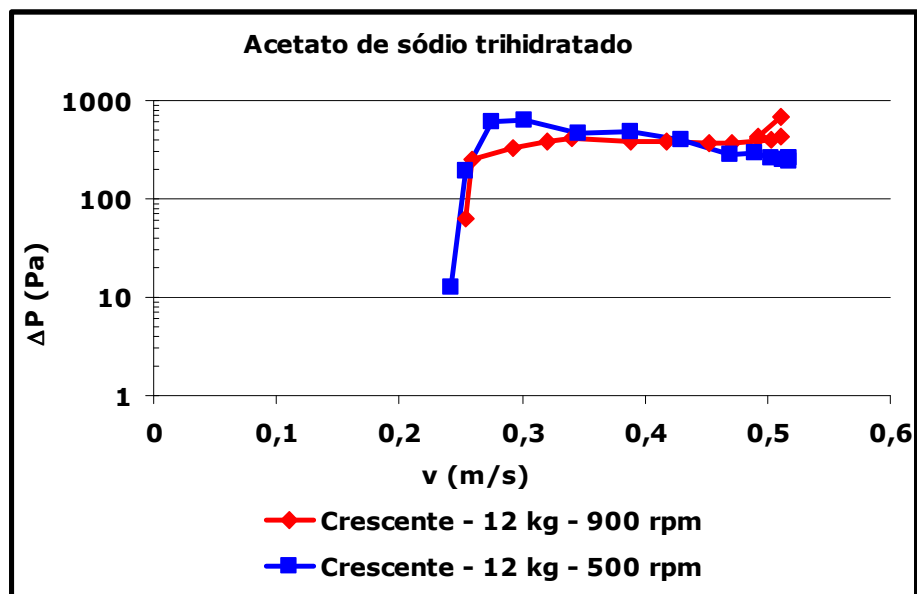


Figura 4.51 – Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito pulso-fluidizado com fluxo crescente de gás e 12 kg de material.

As Figura 4.52 e Figura 4.53 ilustram os experimentos recém discutidos acrescidos dos realizados em leito convencional. Assim como nos anteriores, para 9 kg de material, canais preferenciais foram observados no leito convencional, fazendo com que a queda de pressão diminuísse quando velocidades altas de gás fossem atingidas. Tal fato também foi observado para 12 kg de material, mas a queda de pressão para velocidades elevadas de gás manteve-se praticamente constante.

Além disso, nota-se que os valores de queda de pressão atingidos em condição de leito expandido para uma carga de 9 kg de material úmido em leito convencional mantiveram-se entre os valores de queda de pressão obtidos em leito pulsante para as diferentes frequências de pulsação estudadas. Já para uma carga de material de 12 kg, pode-se afirmar que os valores de queda de pressão obtidos em leito convencional são levemente superiores aos obtidos em leito pulsante, apesar da presença de grandes canais preferenciais observados na condição de leito fixo.

As Figura 4.54 à Figura 4.56 ilustram o comportamento das curvas fluidodinâmicas para as diferentes massas estudadas em leito convencional e pulsante.

Nota-se que os valores de queda de pressão medidos em leito convencional e pulso-fluidizado com frequência de pulsação de 500 rpm são tão maiores quanto maiores as massas de material utilizadas. Este fato é observado para leito pulsante com frequência de 900 rpm apenas para baixos valores de velocidade do gás, já para valores elevados de velocidade do gás, as curvas fluidodinâmicas nas diferentes cargas de material estudadas apresentaram-se próximas.

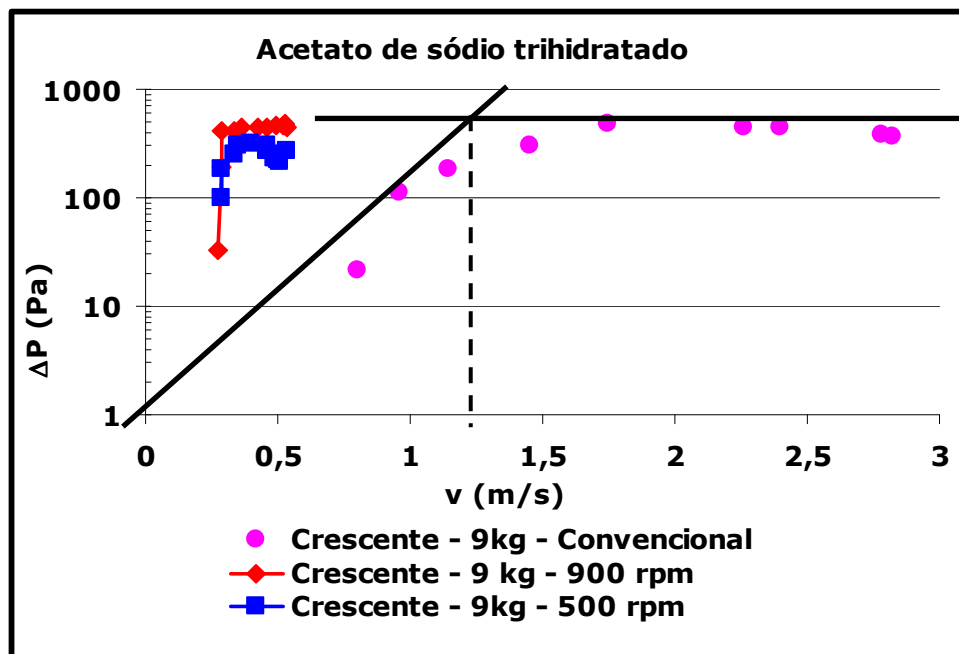


Figura 4.52 – Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito pulso-fluidizado e convencional com fluxo crescente de gás e 9 kg de material.

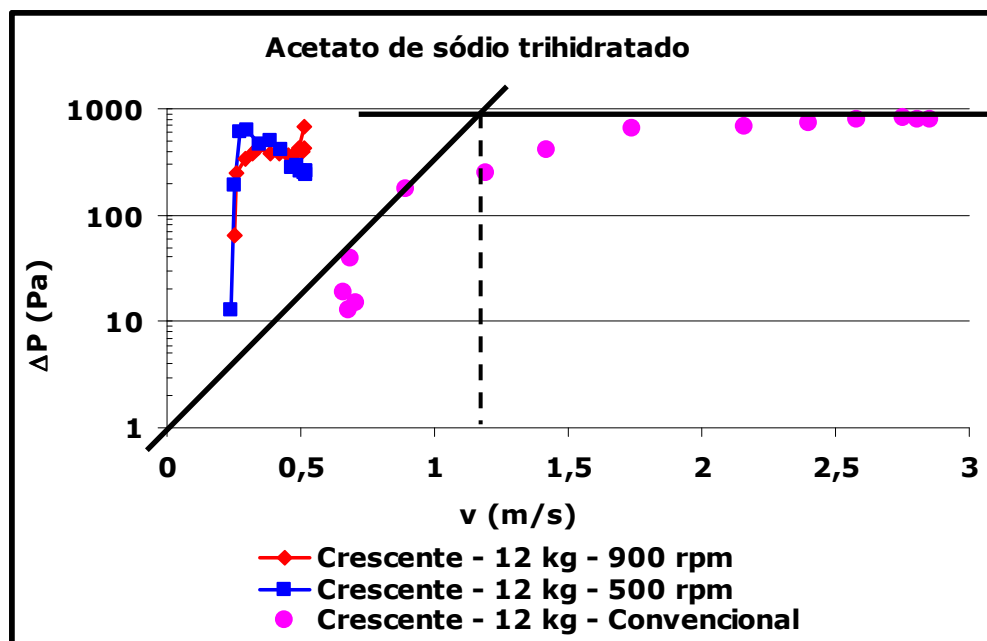


Figura 4.53 – Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito pulso-fluidizado e convencional com fluxo crescente de gás e 12 kg de material.

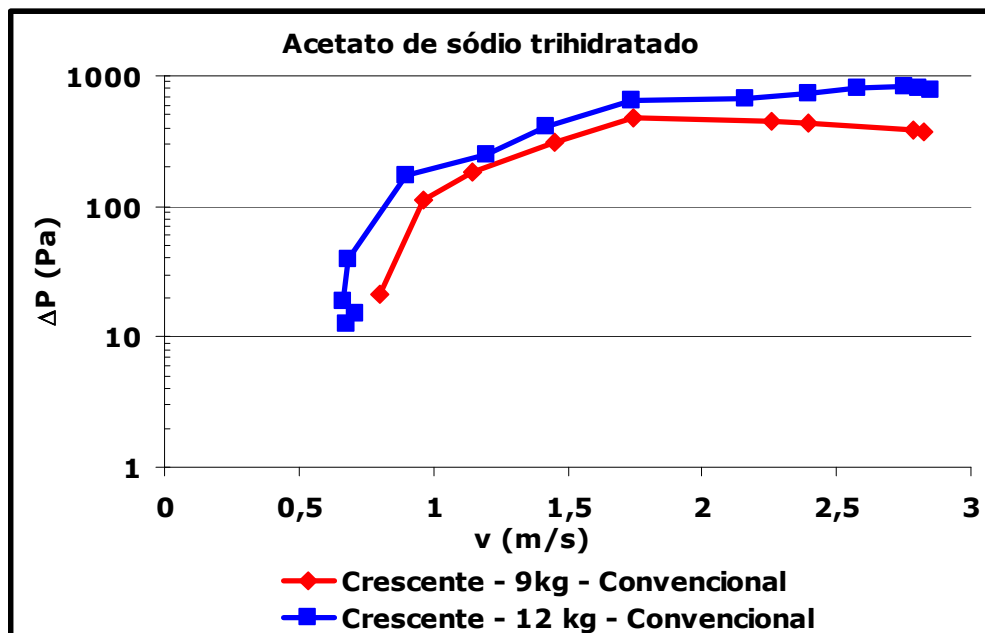


Figura 4.54 - Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito fluidizado convencional com fluxo crescente de gás para 9 e 12 kg de material.

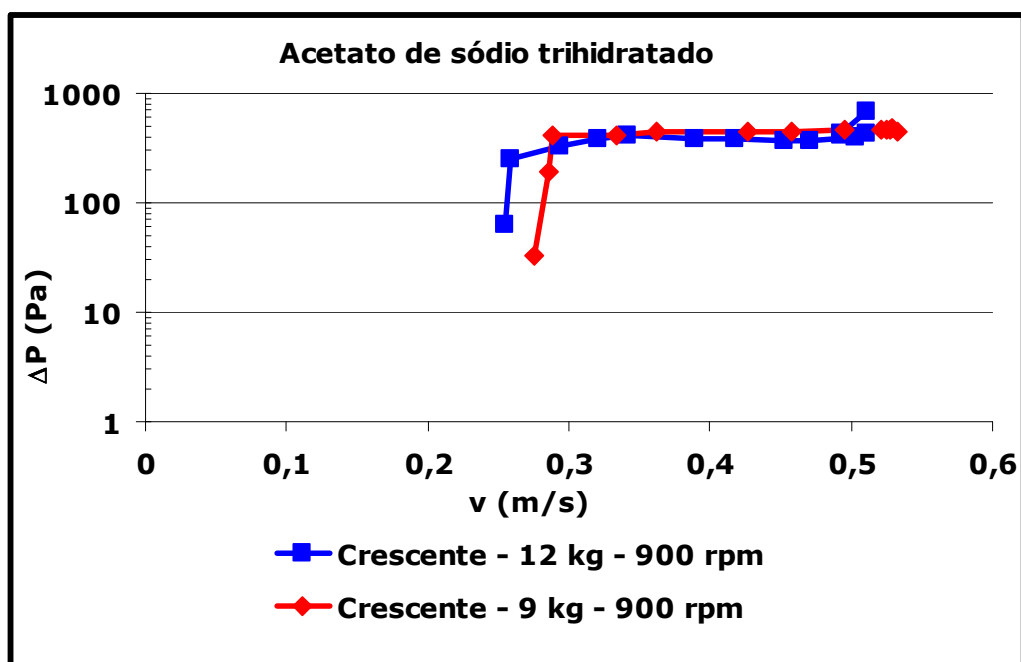


Figura 4.55 - Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito pulso-fluidizado com fluxo crescente de gás para 9 e 12 kg de material, 900 rpm.

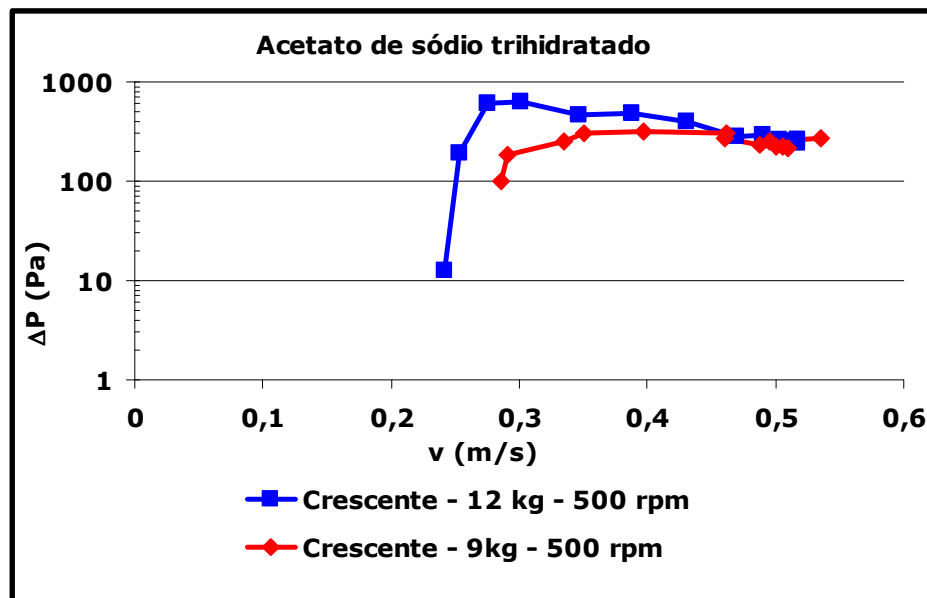


Figura 4.56 - Curva de fluidização do acetato de sódio trihidratado em leito pulso-fluidizado com fluxo crescente de gás para 9 e 12 kg de material, 500 rpm.

As velocidades de mínima fluidização e mínima pulso-fluidização, obtidas graficamente, assim como os índices de fluidização calculados em cada ensaio segundo MARRING et. al. (1994) e SANTANA et. al. (1999), estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Velocidades de mínima pulso-fluidização, velocidade de mínima fluidização e índice de fluidização para o acetato de sódio trihidratado.

Acetato de sódio trihidratado	v_{pf}^{min} (m/s)	v_{mf} (m/s)	FI
9 kg – 500 rpm	0,32	-----	0,62
9 kg – 900 rpm	0,29	-----	0,96
9 kg – Convencional	-----	1,3	0,85
12 kg – 500 rpm	0,30	-----	0,61
12 kg – 900 rpm	0,29	-----	0,65
12 kg - Convencional	-----	1,2	0,99

Os valores de velocidade de mínima fluidização, obtidos em leito convencional nas diferentes condições experimentais analisadas para o acetato de sódio trihidratado, são próximos entre si e visualmente maiores que os valores obtidos em leito convencional para o acetato de sódio anidro com as diferentes massas de material utilizadas. Esta constatação pode ser verificada, também, nas Figura 4.57 e Figura 4.58.

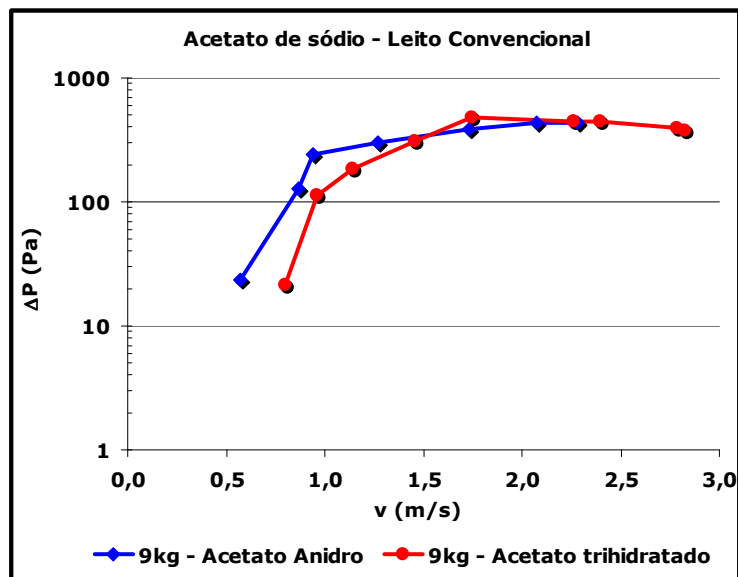


Figura 4.57 – Curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito convencional para 9 kg de material

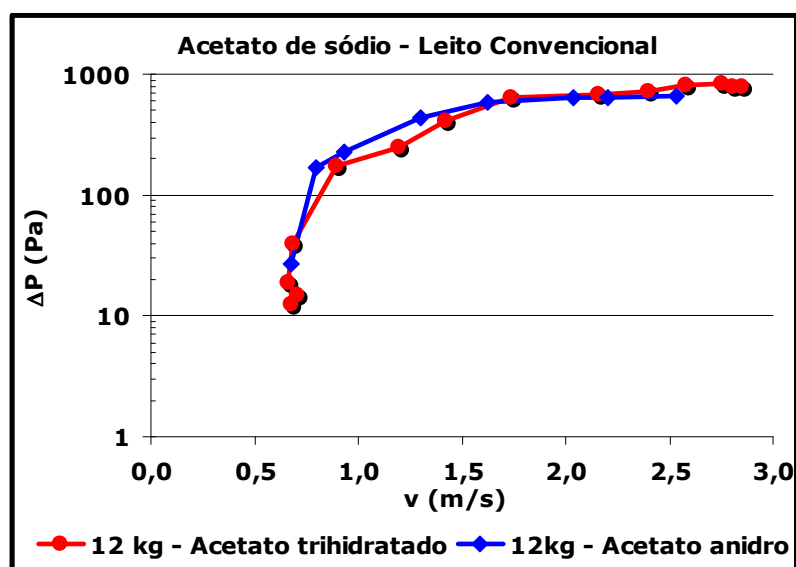


Figura 4.58 - Curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito convencional para 12 kg de material

Os valores das velocidades de mínima fluidização em leito convencional nas diferentes condições experimentais estudadas são semelhantes entre si e são cerca de 300% maiores que as velocidades de mínima pulso-fluidização obtidas em leito pulsante. Esse fato também foi constatado nos estudos fluidodinâmicos apresentados anteriormente do cloreto de potássio seco e acetato de sódio anidro. Essas evidências concordam com a teoria de KUDRA & MUJUMDAR (2002) no que diz respeito à economia de energia possível de ser alcançada com a pulso-fluidização.

Quanto à qualidade da fluidização, notou-se, pelo cálculo do índice de fluidização e por observação visual, que para 12 kg de material úmido, o leito convencional apresentou uma fluidização melhor que o leito pulsante nas diferentes frequências de pulsação estudadas, pois, o valor calculado do índice de fluidização é próximo da unidade. Já para 9 kg de material úmido, o leito pulsante a 900 rpm apresentou fluidização melhor que o leito convencional, o qual apresentou melhor fluidização que o leito pulsante a 500 rpm.

Os gráficos comparativos das curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito pulsante estão ilustrados na Figura 4.59 à Figura 4.62. Em todos eles, nota-se que a curva de fluidização do acetato trihidratado apresenta-se deslocada à direita em relação à curva do acetato anidro, fato esse que confirma que os valores de velocidade de mínima pulso-fluidização para os ensaios com acetato trihidratado são superiores aos obtidos nos ensaios com o acetato anidro. Este fato pode ser observado também na Figura 4.61, pelo comportamento das curvas fluidodinâmicas, embora a velocidade de mínima pulso-fluidização para 12 kg de acetato trihidratado a 500 rpm não tenha sido determinada.

Os valores de queda de pressão obtidos em leito pulsante são menores em relação aos obtidos em leito convencional, concordando com a teoria de KUDRA & MUJUMDAR (2002) no que diz respeito à redução da perda de carga no leito.

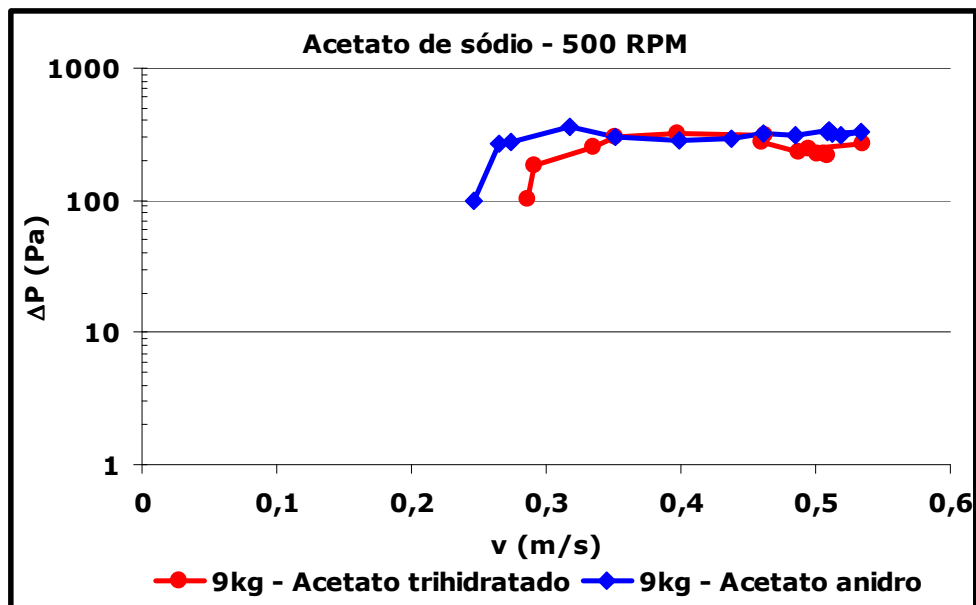


Figura 4.59 - Curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito pulso-fluidizado para 9 kg de material e 500 rpm

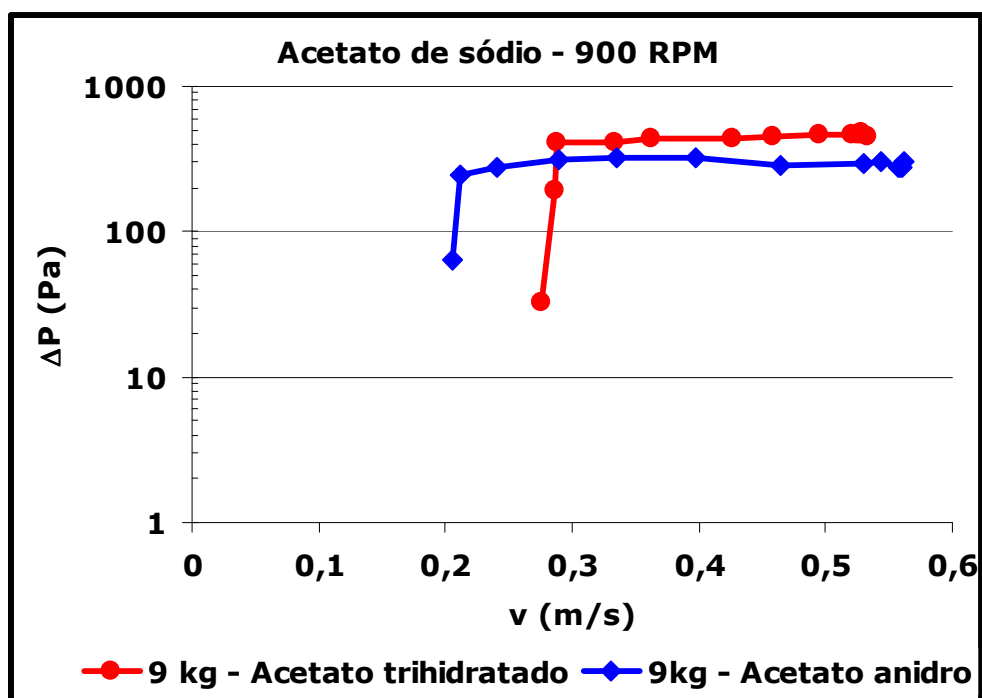


Figura 4.60 - Curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito pulso-fluidizado para 9 kg de material e 900 rpm

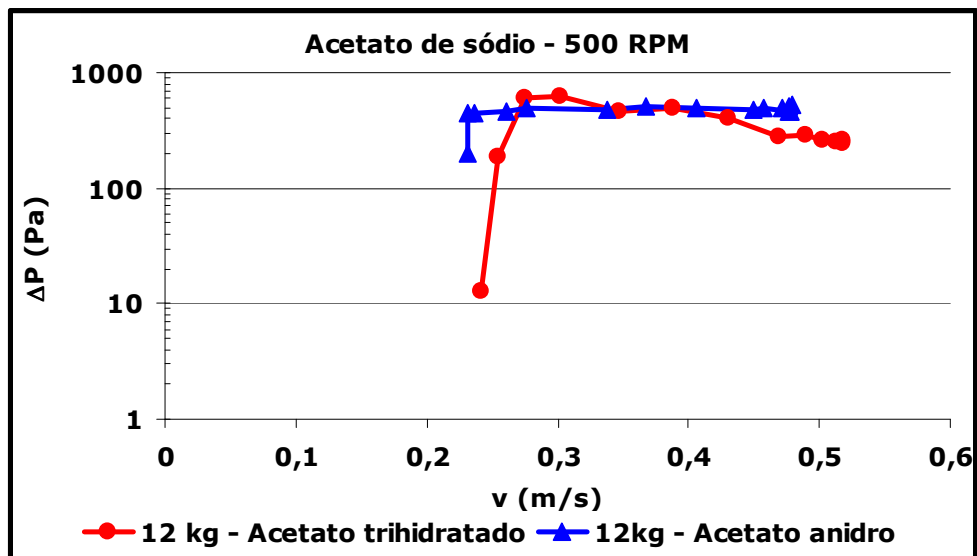


Figura 4.61 - Curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito pulso-fluidizado para 12 kg de material e 500 rpm

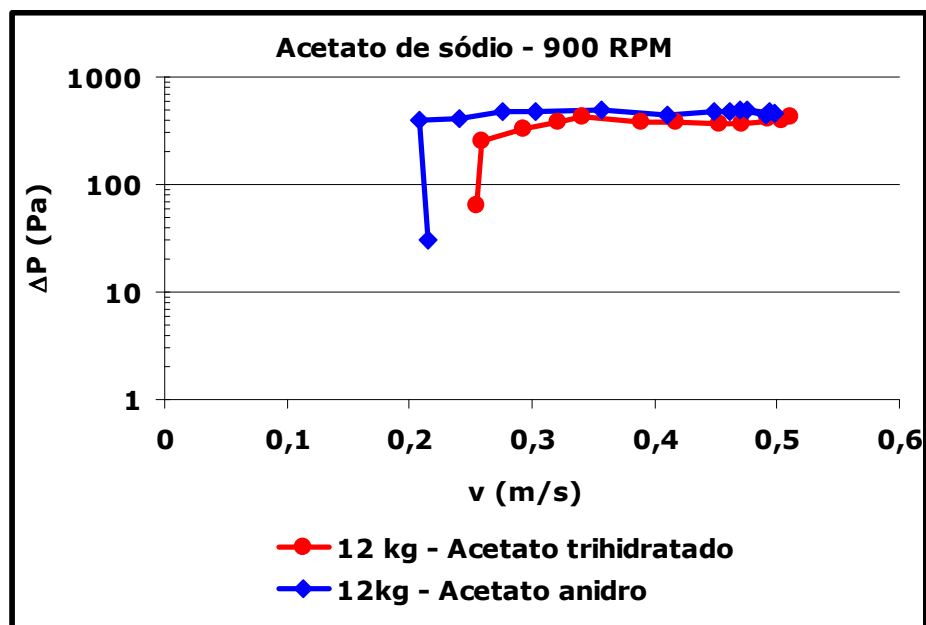


Figura 4.62 - Curvas fluidodinâmicas do acetato de sódio anidro e trihidratado em leito pulso-fluidizado para 12 kg de material e 900 rpm

4.3 Análise de secagem

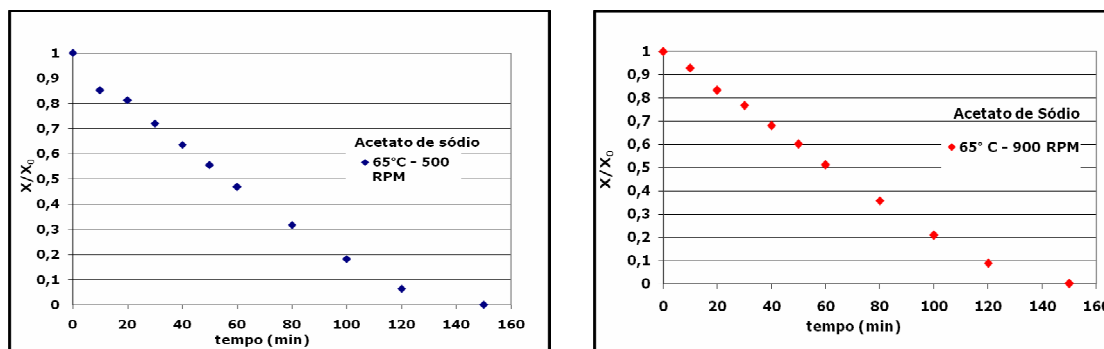
Os estudos de secagem do cloreto de potássio e acetato de sódio trihidratado seguiram a metodologia descrita na seção 3.5.

4.3.1 Acetato de sódio

Uma das variáveis fixadas para o estudo da secagem do acetato de sódio trihidratado foi a vazão de ar. Esse valor foi determinado a partir do estudo fluidodinâmico do referido sal descrito no item 4.2.4, no qual concluiu-se que as velocidades de mínima pulso-fluidização em leito pulsante são cerca de 0,3 m/s, correspondendo a vazões de ar de secagem de 200 Nm³/h. Por essa razão, fixou-se a vazão de ar de 420 Nm³/h que é superior às correspondentes velocidades de mínima pulso-fluidização.

Para a determinação das curvas de secagem em leito pulsante em todas as condições experimentais realizadas, tiraram-se amostras de dez em dez minutos na primeira hora e de vinte em vinte minutos na segunda hora, conforme descrito no item 3.5.1.

As Figura 4.63 e Figura 4.64 ilustram as curvas de secagem obtidas em leito pulsante a 65°C e 80°C respectivamente, nas diferentes frequências de pulsação estudadas. Sendo a curva de secagem modelada por uma reta decrescente, conclui-se que a taxa de secagem é constante, portanto o processo de secagem é controlado pelas condições externas. Era esperada uma taxa de secagem constante, pois, como verificado no item 4.1.4, o acetato de sódio anidro apresenta a maioria de seus poros na região de macroporos.



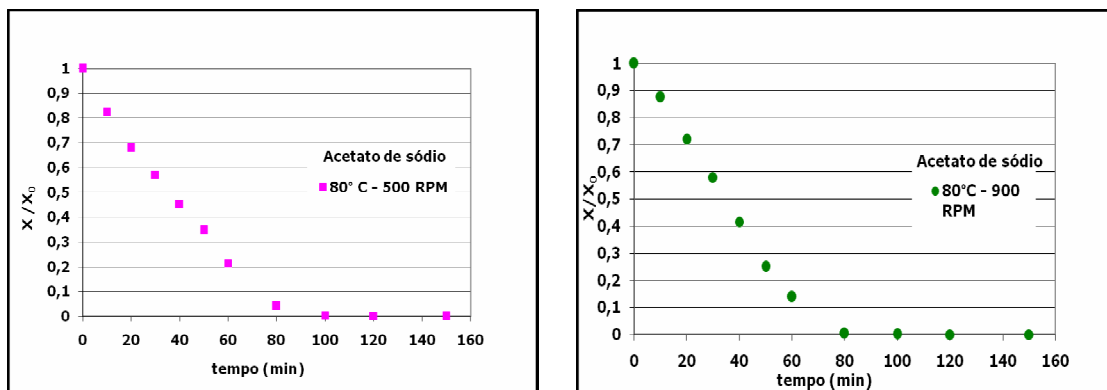


Figura 4.64 - Curvas de secagem do acetato de sódio trihidratado em leito pulsante a 80°C, 500 rpm e 900 rpm com $V=420 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $X_0 = 0,69$ e 12 kg (inicial).

A Figura 4.65 mostra a influência da temperatura sobre a velocidade de secagem do acetato de sódio. Observa-se claramente que a secagem a 80°C é significativamente mais rápida nas diferentes frequências de pulsação analisadas. Para todas as curvas mostradas, a massa inicial de material utilizada foi de 12 kg, com umidades iniciais de 69% em base seca.

As umidades em base seca do acetato no final da secagem (após 150 minutos) em leito pulsante foram de:

- ✓ 0,12 % para 65°C e 900 rpm;
- ✓ 0,10 % para 65°C e 500 rpm;
- ✓ 0,06 % para 80°C e 900 rpm;
- ✓ 0,05 % para 80°C e 500 rpm.

A Figura 4.66 mostra a influência da frequência de pulsação sobre a velocidade de secagem do acetato de sódio nas diferentes temperaturas estabelecidas.

As curvas de secagem nas diferentes frequências de pulsação, tanto a 65°C quanto a 80°C, mostram-se semelhantes, evidenciando assim que a frequência de pulsação utilizada não é uma variável que influencia significativamente o processo de secagem.

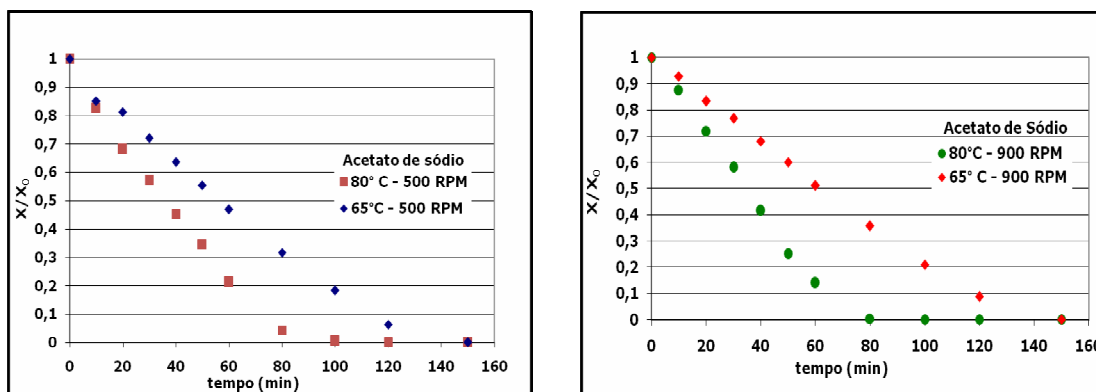


Figura 4.65 – Curva de secagem do acetato de sódio, 12 kg (inicial), 420 Nm³/h, 500 e 900 rpm

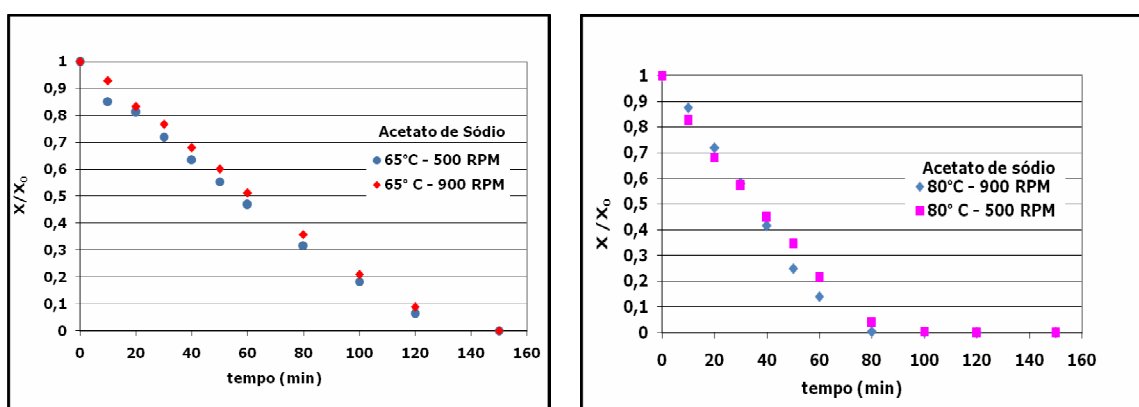


Figura 4.66 – Curvas de secagem do acetato de sódio a 65°C e 80°C , 12 kg (inicial), 420 Nm³/h.

Para verificar a reprodutibilidade de todos os resultados ilustrados anteriormente, apresentam-se os resultados das duplicatas realizadas para todas as condições experimentais estudadas nas Figura 4.67 e Figura 4.68. Verificou-se que as curvas são muito próximas principalmente no que diz respeito à temperatura de 80°C.

No início de todos os ensaios realizados em leito pulso-fluidizado, observaram-se a formação de aglomerados e pequenos canais preferenciais que, com o tempo, se desfaziam fazendo com que o leito fosse se expandindo. Este fato foi observado, em todos os ensaios, em aproximadamente 3 minutos de secagem. O leito expandido obtido em todas as condições experimentais analisadas em secagem pulsante apresentou-se homogêneo,

fazendo com que todo o material fluidizasse muito bem durante o processo, concordando com a análise fluidodinâmica descrita no item 4.2.4.

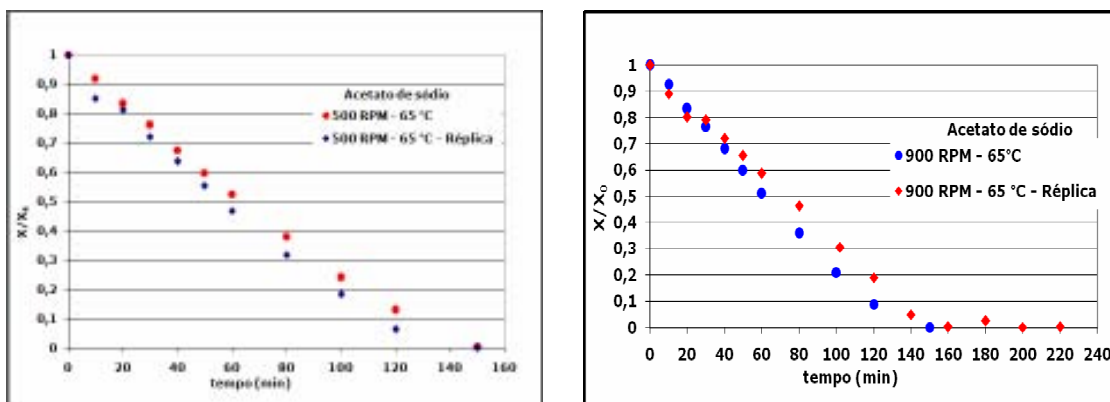


Figura 4.67 – Curvas de secagem do acetato de sódio, 12 kg (inicial), 420 Nm³/h, 65°C, réplicas a 500 rpm e 900 rpm.

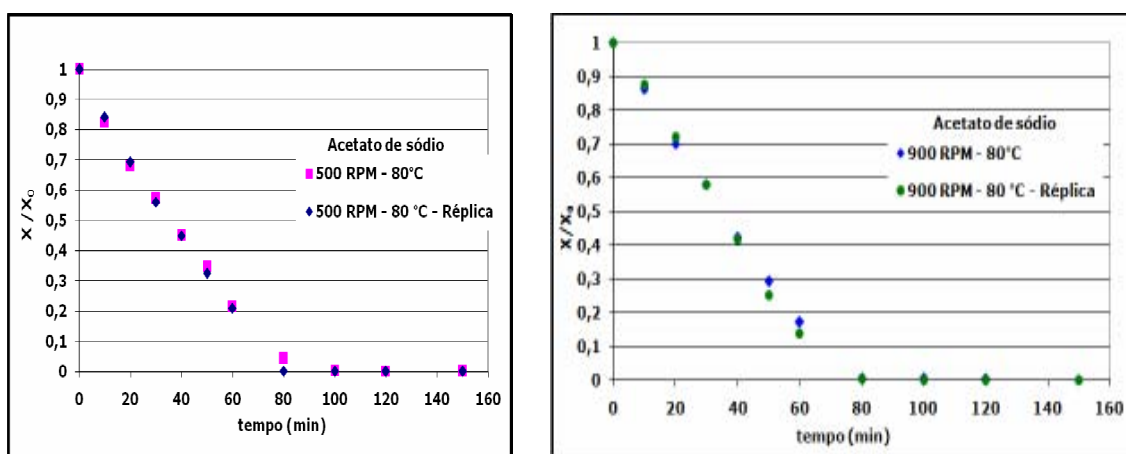


Figura 4.68 – Curvas de secagem do acetato de sódio, 12 kg (inicial), 420 Nm³/h, 80°C, réplicas a 500 rpm e 900 rpm.

A secagem em leito fluidizado convencional, em todas as condições experimentais, foi realizada em uma só seção do equipamento. Portanto, a massa inicial de material úmido utilizada foi de 3 kg, a qual corresponde a 12 kg em leito pulsante, permitindo assim que as comparações nos diferentes tipos de leito fossem realizadas.

Nos ensaios de secagem em leito convencional, não foi possível utilizar a mesma vazão de ar (420 Nm³/h) administrada na secagem em leito pulsante, pois, com essa vazão,

praticamente metade da carga do material foi arrastada para o filtro manga durante o processo e a que permaneceu no leito apresentou-se aglomerada e muito rígida. Portanto, optou-se em trabalhar com uma vazão de ar que fosse superior à vazão que proporciona a velocidade de mínima fluidização ($200 \text{ Nm}^3/\text{h}$) obtida no item 4.2.4, garantindo assim que o leito atingisse, durante o processo de secagem, a condição de leito expandido e os ensaios em leito convencional pudessem ser comparados com os realizados em leito pulsante. Portanto, a vazão de ar utilizada no processo de secagem com leito fluidizado convencional foi de $280 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

As curvas de secagem obtidas em leito convencional, a 65°C , apresentaram um comportamento que descreve uma secagem não uniforme como ilustra a Figura 4.69. As curvas obtidas a 80°C , por outro lado, apresentaram um comportamento que descreve uma secagem mais uniforme que a 65°C . Um fator que pode ter contribuído para esse fato é o processo da retirada das amostras durante os ensaios, descrito no item 3.5.1, que, em secagem convencional, provoca ainda mais a formação de canais preferenciais no leito.

As curvas de secagem em leito convencional e suas respectivas réplicas, nas diferentes temperaturas estudadas, estão ilustradas na Figura 4.71. O material úmido utilizado nesses ensaios apresentou umidade inicial de 69% em base seca.

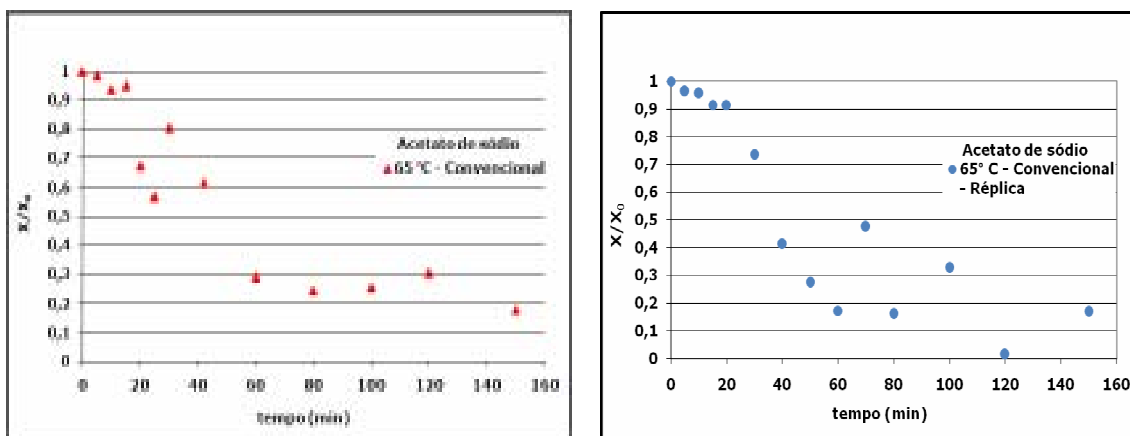


Figura 4.69 – Curvas de secagem do acetato de sódio em leito fluidizado convencional a 65°C , 12 kg (inicial), $280 \text{ Nm}^3/\text{h}$

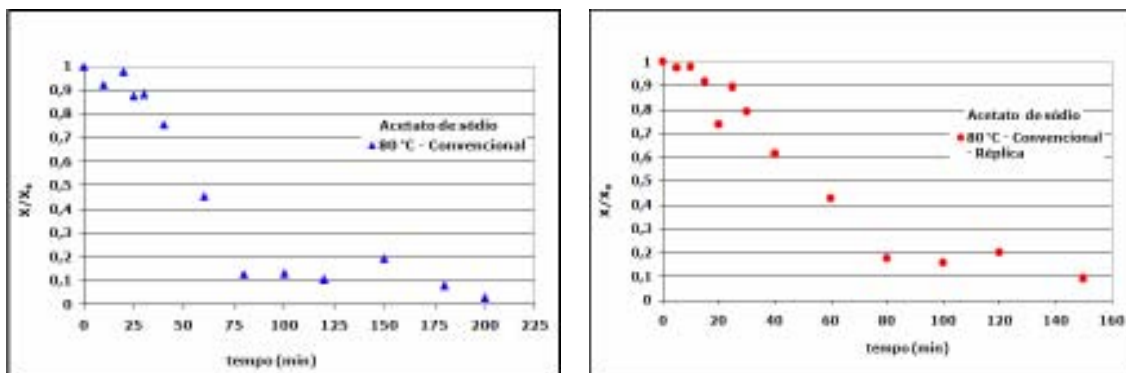


Figura 4.70 – Curvas de secagem do acetato de sódio em leito fluidizado convencional a 80°C, 12 kg (inicial), 280 Nm³/h

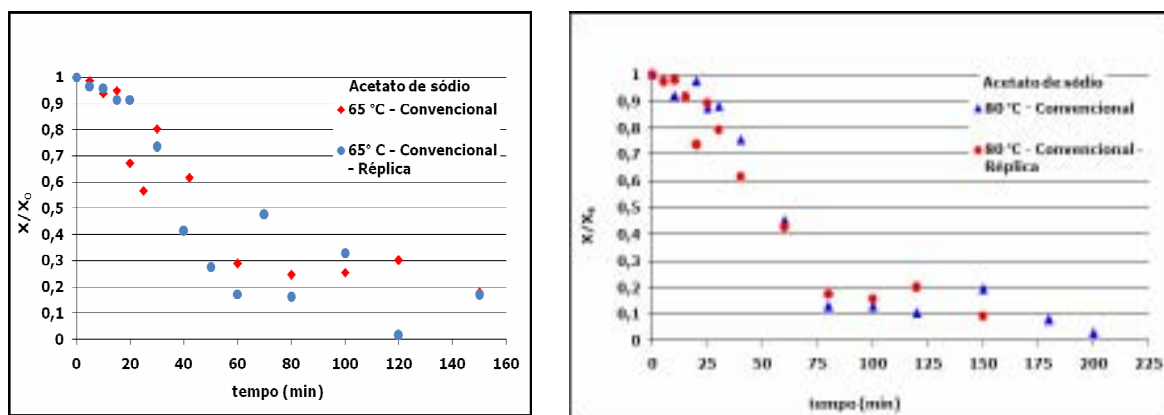


Figura 4.71 – Curvas de secagem do acetato de sódio em leito convencional a 65°C e 80°C, 12 kg (inicial), 280 Nm³/h e suas réplicas

A curva de secagem a 80°C e sua réplica são próximas e evidenciam uma taxa constante de secagem. Já as curvas obtidas a 65°C aproximam-se apenas no início do processo de secagem.

As umidades em base seca do acetato no final da secagem em leito convencional (após 150 minutos) foram de:

- ✓ 12 % para 65°C;
- ✓ 6 % para 80°C.

As curvas comparativas de secagem do acetato de sódio em leito pulsante e convencional, nas diferentes temperaturas estudadas, estão apresentadas nas Figura 4.72 e

Figura 4.73. A secagem em leito pulsante é mais rápida e mais uniforme quando comparada ao leito convencional.

A Figura 4.74 ilustra as curvas de secagem em leito convencional a 65°C e 80°C. Embora as curvas apresentem comportamento típico de uma secagem heterogênea, pode-se verificar que, até os primeiros 60 minutos de secagem, o sal submetido ao processo a 65°C apresenta umidade menor que o submetido a 80°C, diferentemente do ocorrido em leito pulsante. Após a primeira hora de ensaio, a situação inverte-se e o sal submetido ao ensaio a 80°C seca mais rapidamente, apresentando a metade da umidade em base seca em relação ao submetido a 65°C, após 150 minutos de secagem. Esta constatação pôde ser verificada também nas réplicas realizadas.

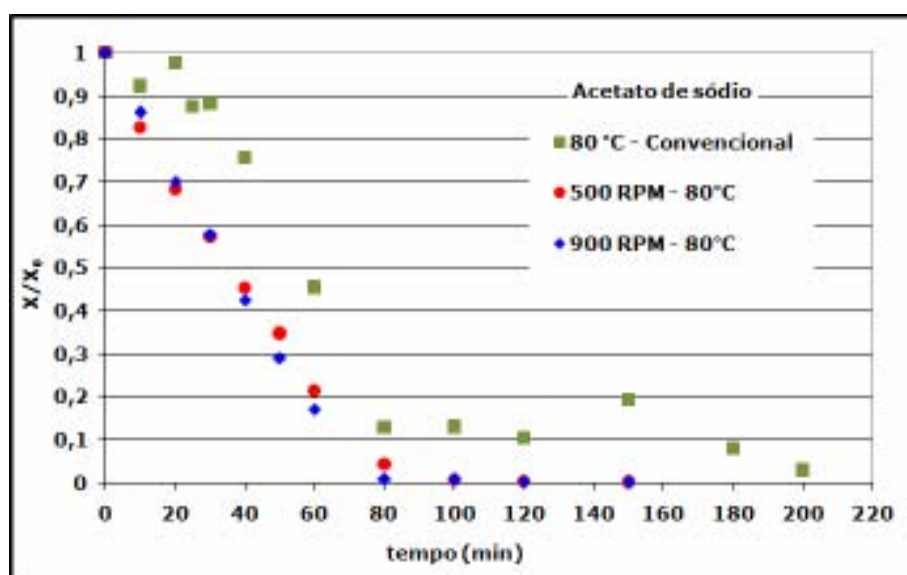


Figura 4.72 – Curvas comparativas de secagem do acetato de sódio a 80°C em leito pulsante (500 rpm e 900 rpm) e leito convencional

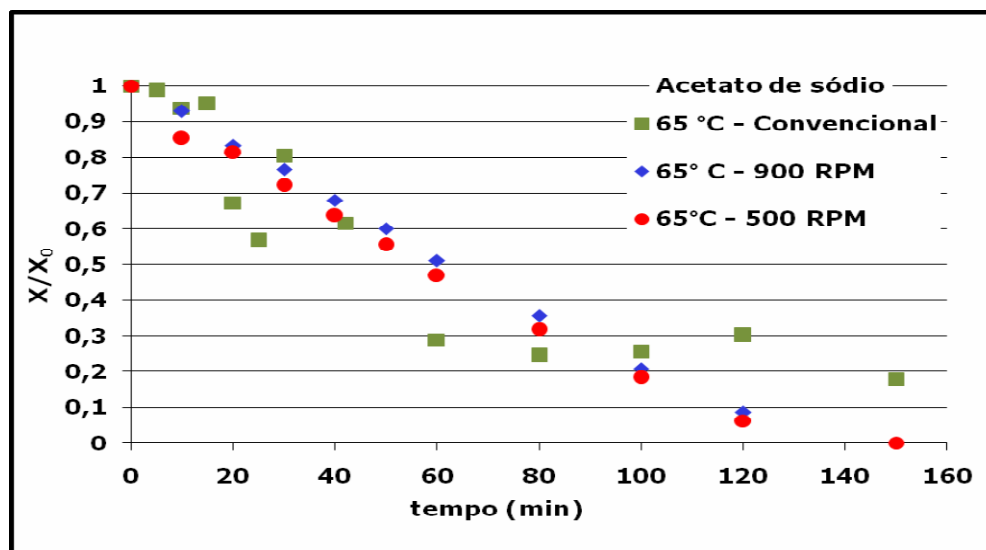


Figura 4.73 – Curvas comparativas de secagem do acetato de sódio a 65°C em leito pulsante (500 rpm e 900 rpm) e leito convencional

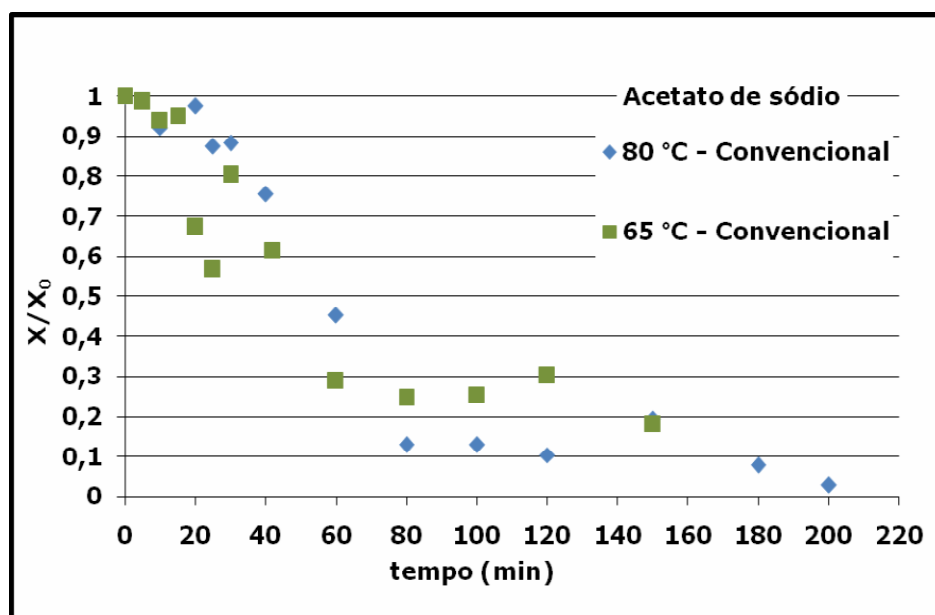


Figura 4.74 – Curvas comparativas de secagem em leito convencional a 65°C e 80°C

A taxa de secagem (w_D), definida segundo STRUMILLO & KUDRA (1986) como sendo a quantidade de água removida do material na unidade de tempo por unidade da superfície de secagem, foi calculada, em todas as condições experimentais estudadas, pelo produto entre a inclinação da reta melhor ajustada (obtida por ajuste linear) a cada três

pontos seguidos da curva de secagem e a razão entre a quantidade de água removida do material pela superfície de secagem. Esse procedimento foi realizado para o período de secagem em que a taxa de secagem apresentou-se constante. As curvas de taxas de secagem, nas diferentes frequências de pulsação e temperaturas estabelecidas em leito pulsante, estão ilustradas na Figura 4.75 à Figura 4.78.

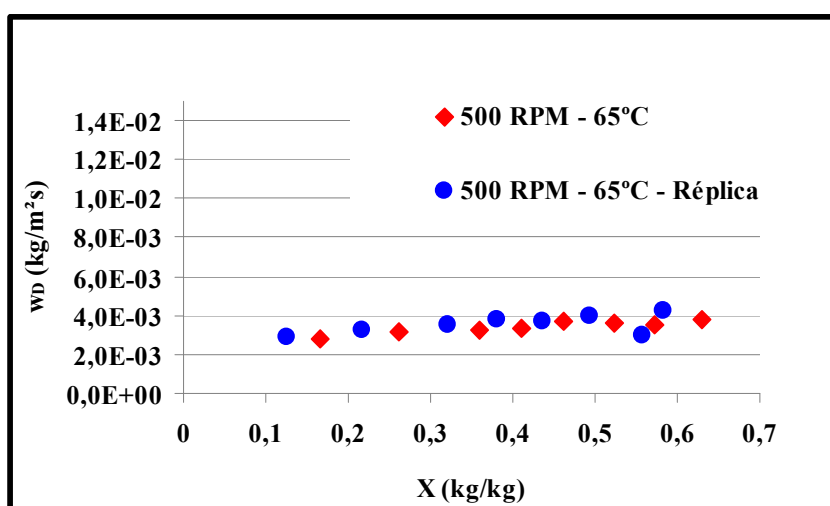


Figura 4.75 – Curvas de taxa de secagem em leito pulso-fluidizado, 500 rpm e 65°C

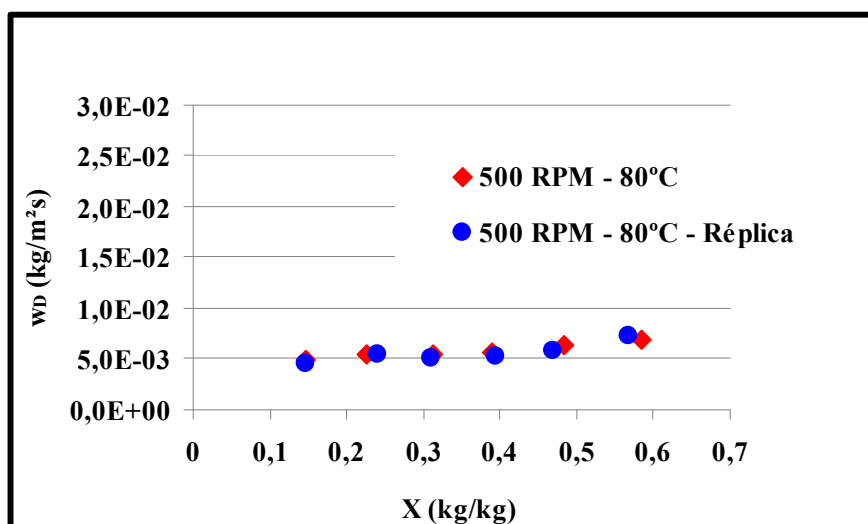


Figura 4.76 - Curvas de taxa de secagem em leito pulso-fluidizado, 500 rpm e 80°C

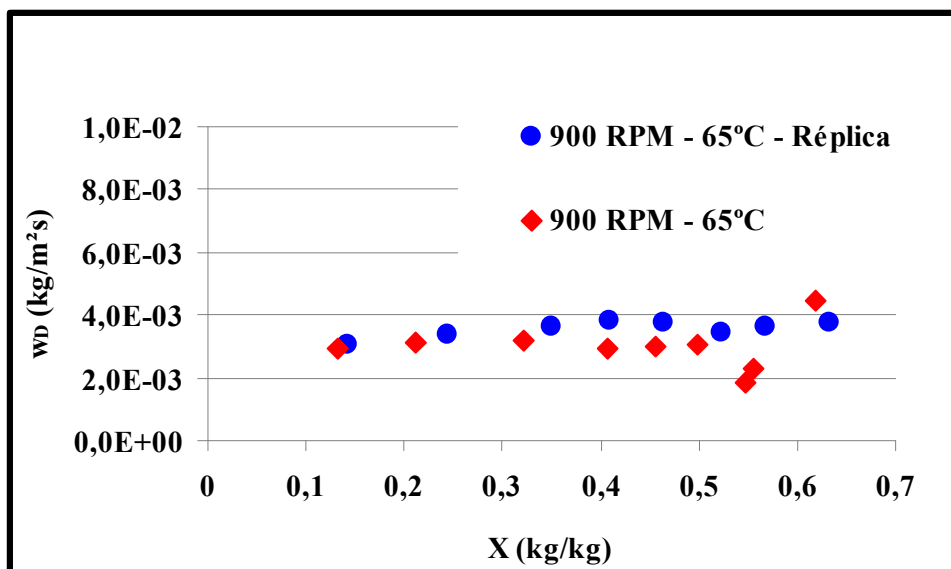


Figura 4.77 - Curvas de taxa de secagem em leito pulso-fluidizado, 900 rpm e 65°C

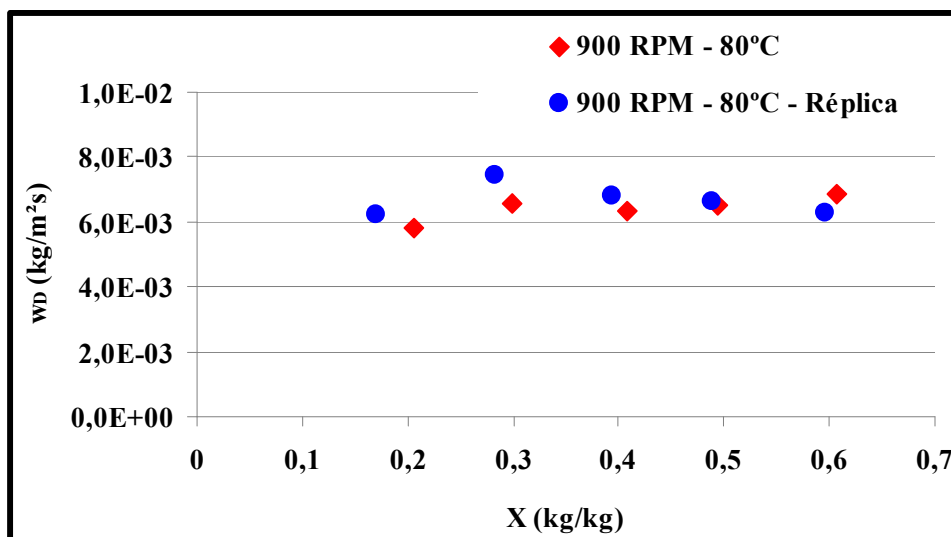


Figura 4.78 - Curvas de taxa de secagem em leito pulso-fluidizado, 900 rpm e 80°C

Como observado nas curvas de secagem, as curvas de taxas de secagem obtidas mostraram-se constantes. A Tabela 4.9 apresenta os valores de taxa de secagem de todas as condições experimentais estudadas, em leito pulsante e convencional, com suas réplicas.

Tabela 4.9. Taxas de secagem obtidas nos ensaios com réplicas em leito pulso-fluidizado e convencional

Condição Experimental	w_D	Média w_D
	(kg/m²s)	(kg/m²s)
500 rpm – 80°C	5,64E-03 / 5,41E-03	5,53E-03
900 rpm – 80°C	6,64E-03 / 6,39E-03	6,52E-03
500 rpm – 65°C	3,29E-03 / 3,50E-03	3,40E-03
900 rpm – 65°C	2,29E-03 / 3,50E-03	2,90E-03
Convencional – 80°C	4,76E-03 / 4,97E-03	4,87E-03
Convencional – 65°C	-----	-----

A frequência de pulsação influenciou muito pouco na velocidade de secagem em leito pulso-fluidizado, já a temperatura é uma variável que influenciou a taxa de secagem, pois quando se trabalhou em temperatura mais elevada, obteve-se um aumento de praticamente 100% na velocidade de secagem nesse tipo de leito.

As réplicas (Tabela 4.9) foram utilizadas para estimar o erro experimental de forma que a importância estatística dos efeitos fosse verificada. De acordo com o diagrama de Pareto, na Figura 4.79, a temperatura é o efeito mais significativo enquanto que a frequência exerce pouca influência na taxa de secagem quando combinada com a temperatura. Essas conclusões são válidas para um intervalo de confiança de 95%.

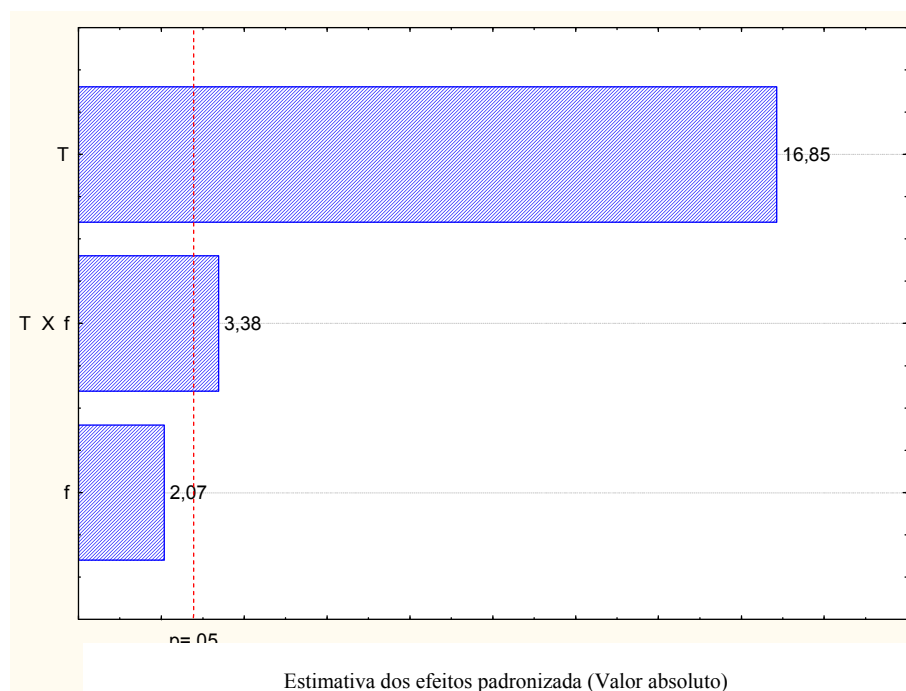


Figura 4.79 – Gráfico de Pareto

Foi possível calcular a taxa de secagem, em leito convencional, apenas nos ensaios a 80°C, pois pelo fato de as curvas de secagem obtidas a 65°C apresentarem um comportamento atípico (secagem não uniforme) para uma secagem controlada pelas condições externas, não foi possível determinar suas taxas de secagem, como pode ser observado na Tabela 4.9.

Embora a fluidodinâmica do acetato trihidratado em leito pulsante com 12 kg de carga inicial não tenha apresentado valores de índices de fluidização muito próximos da unidade, indicando que o contato gás-partícula não tenha sido muito bom, a secagem a 80°C nesse tipo de leito mostrou ser mais eficiente que no leito convencional e houve uma maior interação gás-partícula, talvez pelo fato de o material úmido, altamente higroscópico, ter sido submetido à temperatura elevada, a qual, juntamente com a pulsação, promoveu um melhor contato gás-partícula com conseqüente uniforme expansão do leito quando em condição de perda de carga constante.

4.3.2 Cloreto de Potássio

No estudo da secagem do cloreto de potássio, fixou-se a vazão de ar, pois, embora não tenha sido possível quantificar a velocidade de mínima pulso-fluidização no estudo fluidodinâmico descrito no item 4.2.2, pode-se verificar em ensaios exploratórios e confirmar nas curvas fluidodinâmicas que a vazão do ar de $500\text{Nm}^3/\text{h}$ está acima da velocidade de mínima pulso-fluidização, permitindo que o leito fluidize.

Como o cloreto de potássio seca rapidamente, para a determinação das curvas de secagem em leito pulsante e convencional, as amostras foram retiradas em intervalos de 1 min até os primeiros 10 minutos e, de cinco em cinco minutos até completar os trinta minutos restantes de secagem.

As curvas de secagem dos ensaios realizados a 60°C e 80°C a 500 rpm estão apresentados na Figura 4.80 à Figura 4.82.

Analisando a Figura 4.80, observa-se que o sal seca nos primeiros cinco minutos. Como o tempo de secagem é muito pequeno, as amostras retiradas em 4 minutos na réplica e em 10 minutos no primeiro ensaio apresentam umidade maior que as imediatamente anteriores a ela. Com exceção desses pontos, a curva de secagem e sua réplica são próximas, apresentando perfil linear, evidenciando uma taxa constante de secagem.

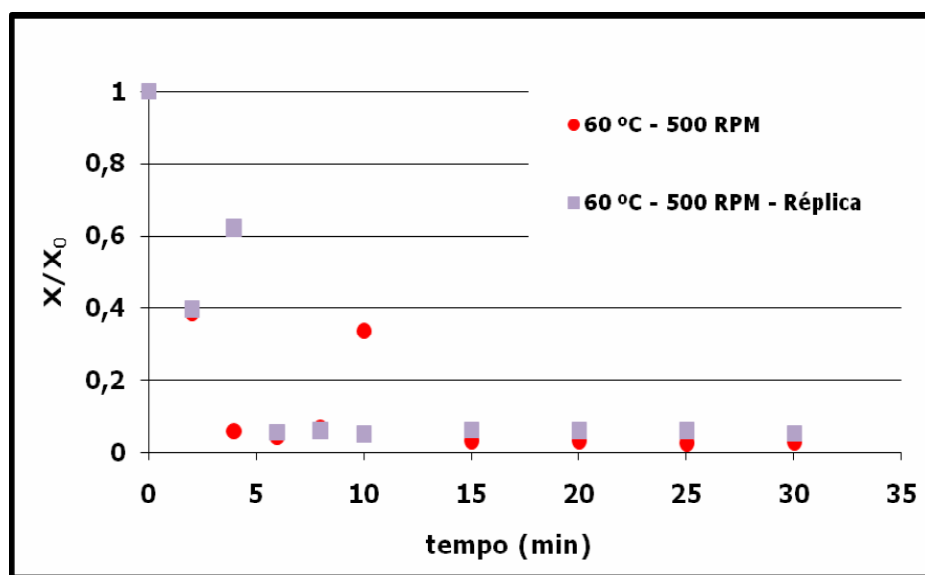


Figura 4.80 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulso-fluidizado a 60°C , 13 kg (inicial), $500\text{Nm}^3/\text{h}$, 500 rpm, $U=6\%$ (b.u)

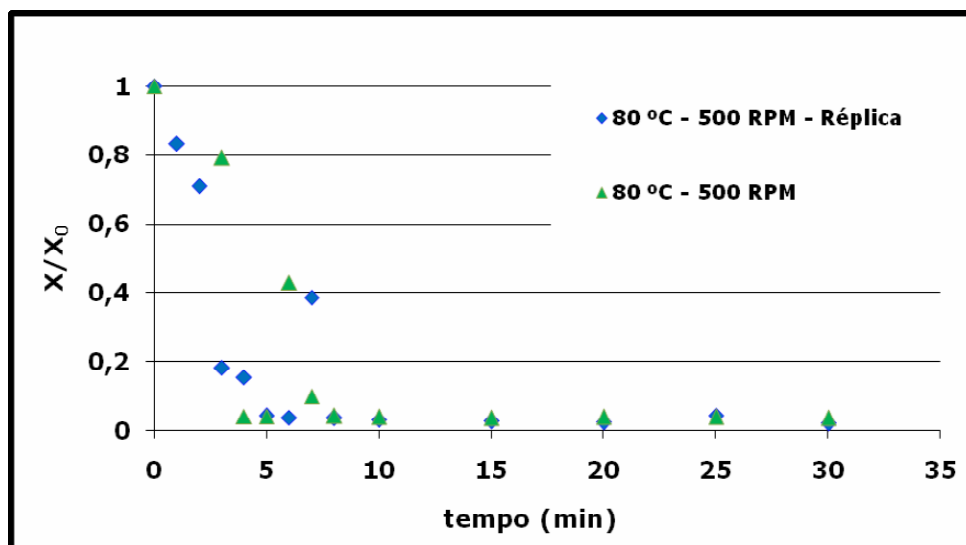


Figura 4.81 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulso-fluidizado a 80°C, 13 kg (inicial), 500Nm³/h, 500 rpm, U=6% (b.u)

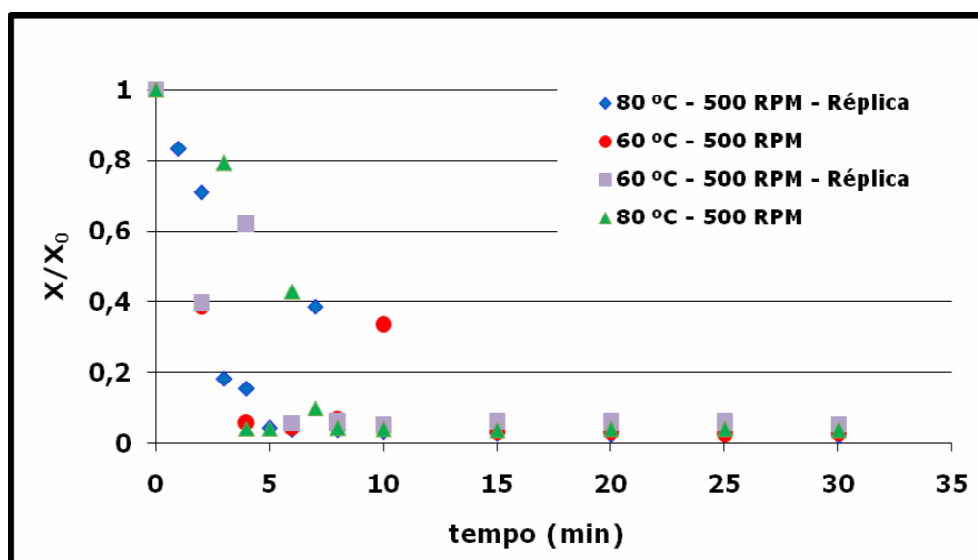


Figura 4.82 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulso-fluidizado a 60°C e 80°C, 13 kg (inicial), 500Nm³/h, 500 rpm, U=6% (b.u)

A fim de estudar a influência da temperatura na cinética de secagem, a Figura 4.81 ilustra as mesmas condições de secagem anterior descrita, mas a 80°C. Os pontos experimentais não estão muito alinhados, provavelmente devido a dois fatores: o sal secar muito rapidamente e de forma heterogênea nesta temperatura e possíveis problemas de amostragem.

A Figura 4.82 mostra as curvas de secagem a 60°C e 80°C e com uma frequência de pulsação de 500 rpm. Embora os pontos não estejam alinhados, principalmente no que diz respeito aos da curva de 80°C, visualmente constatou-se que o leito fluidizou e apresentou a formação de pequenos canais preferenciais. Depois de trinta minutos de secagem, o material apresentou-se totalmente seco, homogêneo e não aglomerado, com aspecto de sal de cozinha.

Como a secagem é rápida e heterogênea nas duas temperaturas analisadas, não foi possível observar a influência significativa da temperatura no processo de secagem do cloreto de potássio nas condições experimentais estudadas.

Para estudar a influência da frequência de pulsação na secagem do cloreto de potássio, os ensaios foram realizados também a 200 rpm. As Figura 4.83 e Figura 4.84 mostram tais resultados.

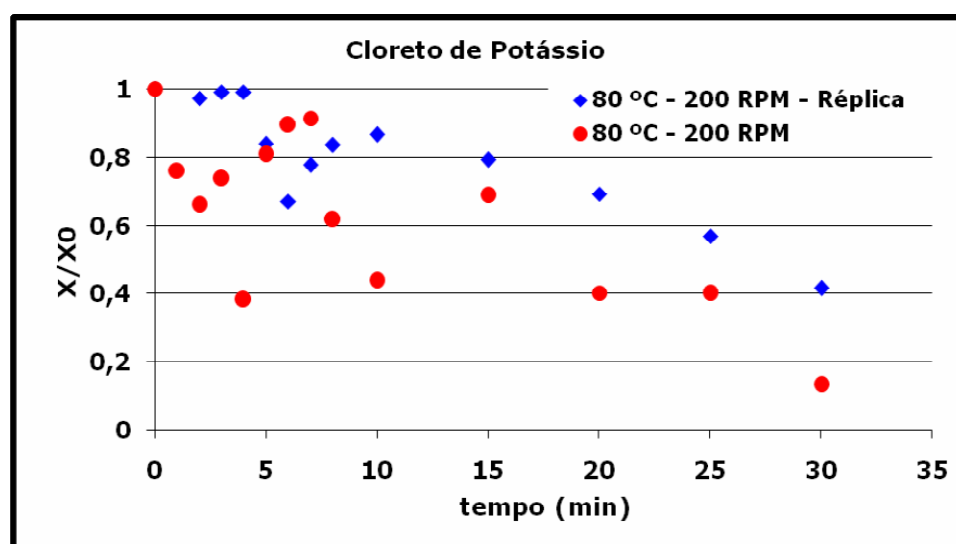


Figura 4.83 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulso-fluidizado a 80°C, 13 kg (inicial), 500Nm³/h, 200 rpm, U=6% (b.u)

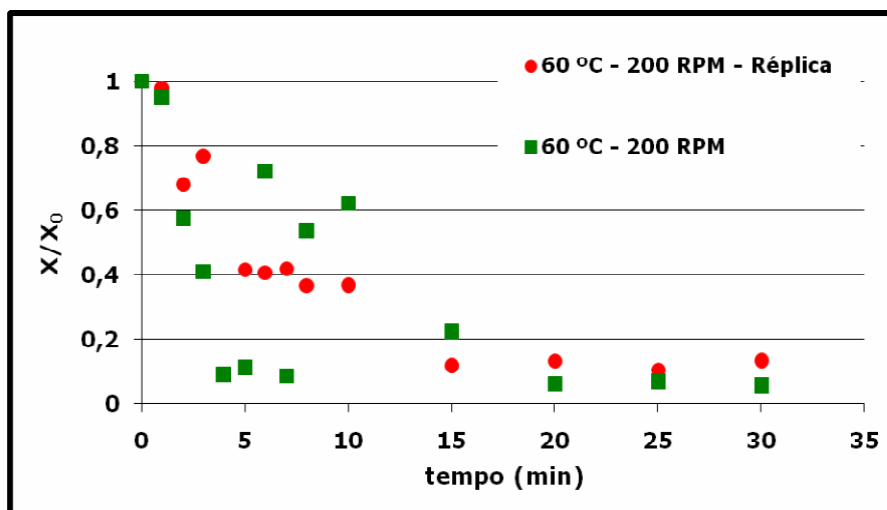


Figura 4.84 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulso-fluidizado a 60°C, 13 kg (inicial), 500Nm³/h, 200 rpm, U=6% (b.u)

É notória a diferença no comportamento das curvas de secagem ao variar a frequência de pulsação. No final do processo, depois de 30 minutos de ensaio, o material não apresenta umidade uniforme, ou seja, o material não seca uniformemente neste período e condições. A formação de canais preferenciais foi notada visualmente.

A Figura 4.85 mostra a influência de temperatura para a frequência de pulsação de 200 rpm. A falta de uniformidade não permitiu observar adequadamente a influência da temperatura no processo de secagem do sal, pois os pontos dos gráficos não estabelecem um perfil definido de secagem.

Quanto à secagem em leito pulsante, é possível concluir que, embora a secagem não seja completamente uniforme em todas as condições experimentais estudadas, a frequência de pulsação foi uma variável que influenciou significativamente os processos, uma vez que a falta de homogeneidade no processo foi reduzida, em parte, com a pulsação do leito. Quando se trabalhou com 500 rpm, as curvas de secagem apresentaram-se com perfis mais definidos e a observação visual permitiu verificar a fluidização do leito logo no início dos processos, o que não se verificou a 200 rpm.

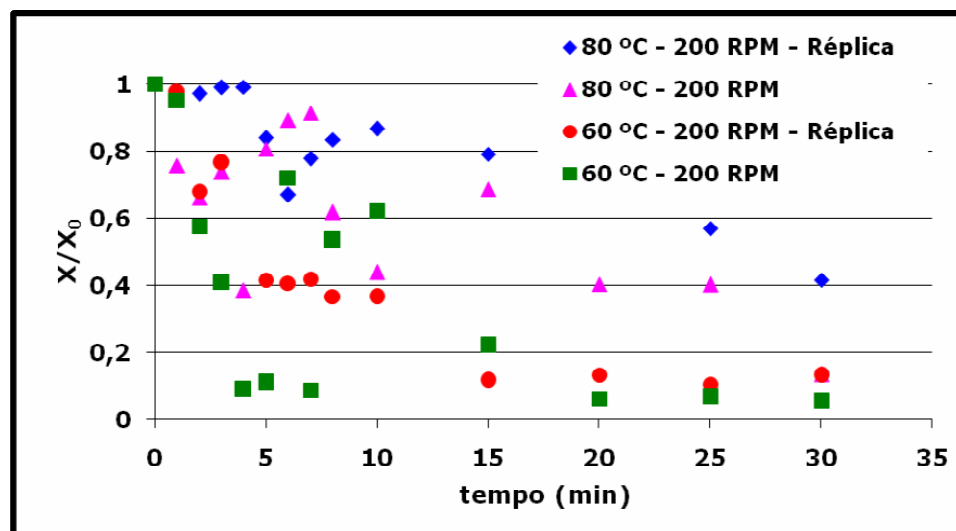


Figura 4.85 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulso-fluidizado a 60°C e 80°C, 13 kg (inicial), 500Nm³/h, 200 rpm, U=6% (b.u)

A secagem em leito fluidizado convencional foi realizada com uma vazão de ar de 400 Nm³/h, pois, para valores maiores, ocorre a elutriação do leito. Essa vazão foi escolhida, analisando-se as curvas fluidodinâmicas apresentadas no item 4.2.2, pois é maior que a de mínima fluidização, correspondente a aproximadamente 210Nm³/h.

As Figura 4.86 e Figura 4.87 mostram as curvas de secagem obtidas nas diferentes temperaturas analisadas. Assim como em leito pulsante, os pontos não estão perfeitamente alinhados, pois a secagem, embora não aconteça tão rapidamente, não é totalmente uniforme e visualmente observou-se a formação de canais preferencias maiores aos observados em leito pulsante.

A Figura 4.88 mostra a influência da temperatura na secagem em leito fluidizado convencional. Nos primeiros cinco minutos de secagem, as curvas mantiveram-se muito próximas, e a partir daí, o material a 80°C secou mais rapidamente.

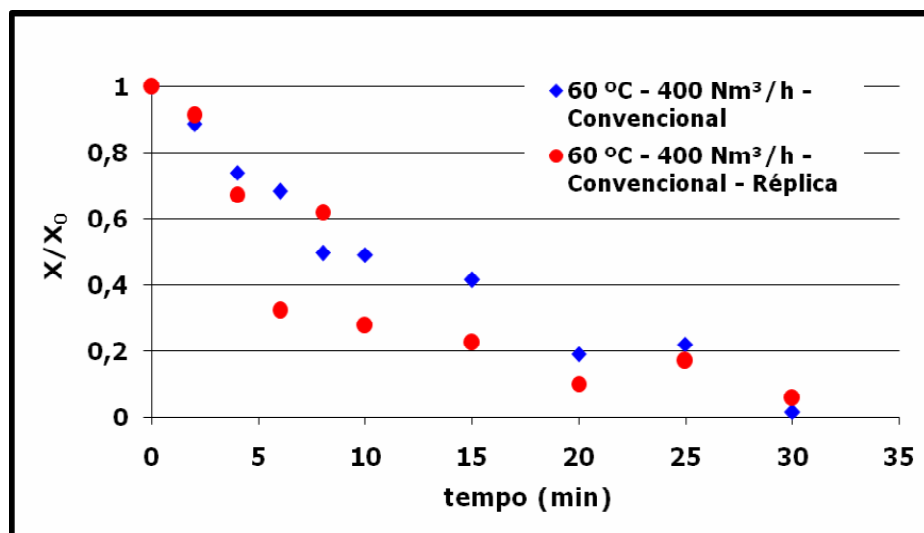


Figura 4.86 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito fluidizado convencional a 60°C, 13 kg (inicial), 400 Nm³/h, U=6% (b.u)

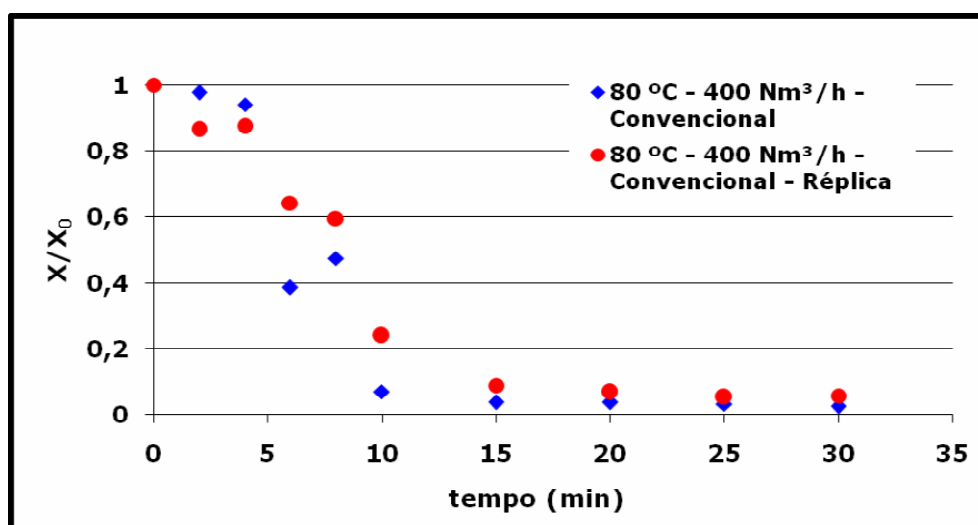


Figura 4.87 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito fluidizado convencional a 80°C, 13 kg (inicial), 400 Nm³/h, U=6% (b.u)

A umidades em base seca do cloreto de potássio no final do processo de secagem (após 30 minutos) foram de:

- ✓ leito convencional:
 - 1,15% para 60°C;
 - 0,36% para 80°C.

✓ leito pulsante:

- 0,18% para 80°C e 500 rpm;
- 0,25% para 60°C e 500 rpm;
- 2,41% para 80°C e 200 rpm;
- 0,80% para 60°C e 200 rpm.

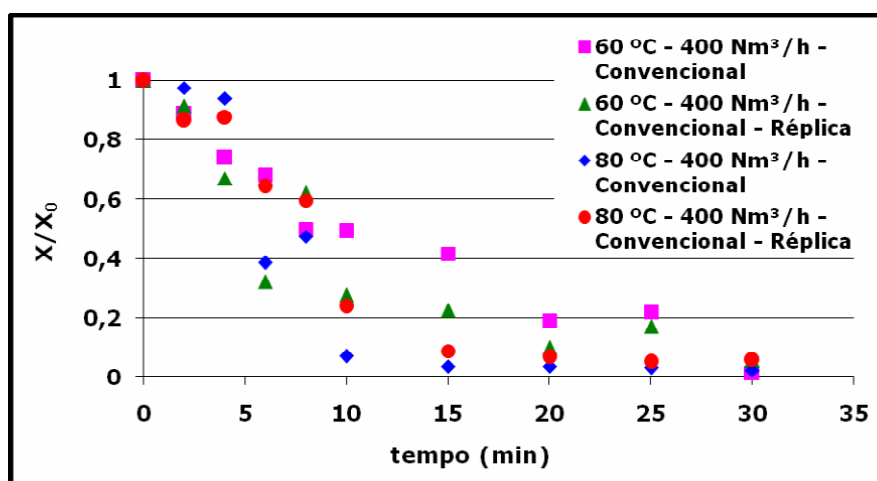


Figura 4.88 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito fluidizado convencional a 60°C e 80°C, 13 kg (inicial), 400 Nm³/h, U=6% (b.u)

Embora não seja possível determinar quantitativamente a taxa de secagem tanto em leito pulsante quanto em leito convencional, é possível concluir que a secagem a 80°C é aproximadamente duas vezes mais rápida em leito pulsante a 500 rpm do que em leito convencional, devido ao melhor comportamento fluidodinâmico das partículas em leito pulsante. Tal fato está ilustrado na Figura 4.89 e concorda com a teoria de KUDRA & MUJUMDAR (2002) no que diz respeito à economia de energia.

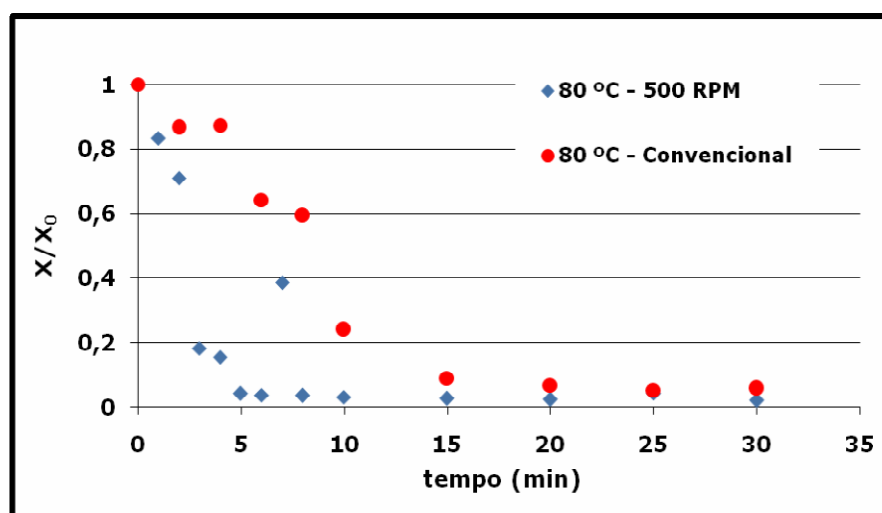


Figura 4.89 – Curvas de secagem do cloreto de potássio em leito pulsante e convencional a 80°C, 13 kg (inicial), $U=6\%$ (b.u)

5 Conclusões

5.1 Fluidodinâmica

Os estudos fluidodinâmicos do cloreto de potássio e acetato de sódio mostraram que, no regime de pulso-fluidização, o traçado da curva de queda de pressão em função da velocidade superficial do gás é semelhante ao que se verifica no regime convencional. Isto significa que, à medida que a velocidade superficial aumenta, o valor de queda de pressão também aumenta, até atingir um patamar máximo.

Os resultados de fluidodinâmica confirmam a influência da frequência de pulsação na queda de pressão. Trata-se de uma característica do leito pulso-fluidizado já observada em trabalhos anteriores. Quanto maior a frequência, maior o valor da queda de pressão, para uma mesma velocidade superficial do gás. Porém, o efeito da frequência é menos pronunciado, chega a não ser observado, quanto maior a carga de material.

Quando se comparam os sais secos e úmidos, percebe-se um maior contato gás-partícula com o sal seco. Tal fato é evidenciado pela maior queda de pressão. Isso é uma evidência da aglomeração existente com os materiais úmidos.

O estudo fluidodinâmico apresentado para o acetato de sódio mostra a existência de influência significativa da frequência de pulsação no processo, melhorando a qualidade da fluidização e reduzindo o tempo de secagem quando comparado com o leito fluidizado convencional.

5.2 Secagem

O cloreto de potássio e o acetato de sódio secos são classificados como partículas do grupo B de Geldart e possuem a maioria de seus poros na região de macroporos. Esta constatação concorda com a taxa constante de secagem obtida, evidenciando a umidade superficial presente nos sais.

Tanto o cloreto de potássio quanto o acetato de sódio apresentam curvas de secagem típicas de materiais com umidade superficial, ou seja, com taxas de secagem constantes e conseqüentemente processos limitados pela evaporação superficial da umidade.

Comparando as curvas de secagem e fluidodinâmica do cloreto de potássio com as do acetato de sódio, é possível observar diferentes regimes de fluidização. A secagem do acetato de sódio acontece uniformemente em regime pulsante, e, em condição de leito expandido, não há diferença nos valores de queda de pressão do leito, poucos e pequenos canais preferenciais são observados, portanto o regime de fluidização é borbulhante segundo GRACE, 1984. Já a secagem do cloreto de potássio não é uniforme em leito pulsante. Em condição de leito expandido, ocorrem pequenas quedas de pressão no leito e a formação de grandes canais preferenciais, evidenciando um regime de fluidização turbulento segundo GRACE, 1984.

Comparando-se os processos estudados com aqueles desenvolvidos atualmente na empresa Labsynth, fornecedora dos sais, observa-se uma oportunidade de aumento de produtividade e conseqüente economia de energia. No processo industrial atual, a secagem do acetato de sódio ocorre em 10 a 12 horas e a do cloreto de potássio em 1 hora para 500 kg de massa inicial. Os tempos de secagem observados neste trabalho foram significativamente inferiores.

Embora a análise de distribuição granulométrica não tenha sido feita com os sais secos em leito convencional, visualmente é possível afirmar que os sais secos nesse tipo de leito, em sua maioria, possuem aspecto aglomerado, e como acontece na indústria, antes de serem embalados para comercialização, têm que ser peneirados. Já os sais secos em leito pulsante, em quase sua totalidade, mostram-se soltos, não aglomerados e mais uniformes, minimizando assim a necessidade da peneira.

O leito pulso-fluidizado é economicamente mais atrativo, uma vez que a secagem ocorre mais rapidamente e a economia de energia no soprador de ar e no aquecimento do gás é evidente e significativa.

6 Sugestões para trabalhos futuros

Quantificar a economia de energia que o leito pulsante proporciona na secagem do cloreto de potássio e acetato de sódio em relação ao leito convencional;

Realizar um estudo econômico para a empresa LabSynth, mostrando as vantagens e eventuais desvantagens na adaptação de seu leito convencional em pulsante;

Estudar a possibilidade de fazer a caracterização física dos sais úmidos e classificá-los de acordo com Geldart, pois muito provavelmente não pertencem ao grupo B;

Estudar as características físicas dos sais secos em leito convencional e compará-las com as obtidas em leito pulsante;

Realizar a secagem tanto do cloreto de potássio quanto do acetato de sódio, estudando, como variável do processo, a massa inicial de sal úmido, possibilitando a análise da influência da altura do leito no processo;

Analisar a secagem e fluidodinâmica do cloreto de sódio com diferentes umidades, possibilitando verificar sua influência no processo.

Estudar a vazão do ar como uma variável do processo em leito fluidizado convencional e pulsante, pois, nesse trabalho não foi possível devido à limitação da válvula borboleta responsável pelo controle da vazão.

7 Referências Bibliográficas

- ACCUPYC 1330 USER'S MANUAL Micromeritics Instrument Corporation, USA:
Micromeritics Instrument Co., 1997.
- ALLEN, T. **Particle Size Measurement – Surface Area and Pore Determination – vol.2**
5ª Edição, 1997, Chapman&Hall Ltd., pp140 – 151.
- AMBROSIO, M. C. B. Caracterização Física e Secagem do Ácido 2-Hidóxi-Benzóico em
leito Fluidizado Agitado Mecanicamente e em Leito Fluidizado Pulsado Rotativo.
**Tese de Doutorado: Faculdade de Engenharia Química da Universidade
Estadual de Campinas**, Campinas, 2003.
- ASHWORTH, J.C. Moisture in Solids. In: **Handbook of Industrial Solids Drying**.
Institution of Chemical Engineers, A Continuing Education Course, Birmingham,
1980.
- CALLISTER, W. **Materials science and engineering an introduction**. Third Edition,
1994, p. 36-39.
- COUDERC, J.-P. Incipient fluidization and particulate systems. In: DAVISON, J. F.,
CLIFT, R., HARRISON, D. **Fluidization**. 2ed. London: Academic Press, 1985,
cap.1,p. 1-41.
- GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R. Drying in a Pulsed-Fluid Bed with Relocated Gas
Stream. **Drying Technology**, v.14, n.5, pp.1121-1172, 1996.
- GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R.; KUDRA, T. Drying of Powdery Material in a Pulsed
Fluid Bed Dryer. **Proceedings of the 11th International Drying Symposium**,
Greece, 1998.
- 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. **Proceedings of the 10th
International Drying Symposium**, Poland, 1996.

GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R; ZGORZALEWICZ. Drying of Granular Material in Pulsofluidized Bed. **Hungarian Journal of Industrial Chemistry Veszprém**, v.17, pp.245-255, 1989.

GELDART, D. **Gas fluidization technology**, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1986.

GRACE, J.R., **Hydrodynamics of gas fluidized beds, fluidized bolilers: design and application**, p. 13-30, Pergamon Press, Cananda, 1984.

JURKIEWICZ, J.;GAWRZYNSKY, Z.;GLASER, R. Drying of Granular Material in Pulsofluidized Bed. In: MUJUMDAR, Arun, **Drying '87**. Hemisphere Publishing Corporation, pp.109-114, 1987.

KEEY, R. B. **Drying Principles and Practice**. Pergamon Press, 358p., 1972.

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. **Advanced Drying Technologies**, 459p., Marcel Dekker Inc., New York, 2002.

KUDRA, T.; MUJUMDAR. A. S. Special Drying Tehniques and Novel Dryers, in: Mujumdar, A. S. **Handbook of Industrial Drying**, vol II, pp.1087-1150, 1995.

KUDRA, Tadeusz, MUJUMDAR, Arun S. Special Drying techniques and Novel Dryers in: MUJUMDAR, Arun S. **Handbook of Industrial Drying**. CRC Press, 3rd ed., 2007

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Butterworth-Heinemann, 2ed., 491p., USA, 1991.

LUIKOV, A. V. **Drying Theory**, **Energia**, Moscow, 1968.

MARRING, E., HOFFMANN, A.C., JANSSEN, L.P.B.M. The effect of vibration on the fluidization behavior of same cohesive powders; **Powder Technology**; v.79, 1994.

- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. Marcel Dekker, Inc., 2ed., 742p., 1995.
- NITZ, M. Fluidodinâmica, secagem e recobrimento em leito pulso-fluidizado. **Tese de Doutorado: Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, 2006.
- NITZ, M.; TARANTO, O. P. Drying of beans in a pulsed fluid bed dryer: Drying kinetics, fluid-dynamic study and comparisons with conventional fluidization. **Journal of Food Engineering**, 80, pp. 249-256, 2007.
- PERKIN, R. B. **Drying. Principles and Practice**, Pergamon, New York, 1972.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, 7th ed., McGraw-Hill, 1997.
- PRACHAYAWARAKORN, S.; TIA, W.; POOPAIBOON, K.; SOPONRONNARIT, S. Comparison of performances of pulsed and conventional fluidized-bed dryers. **Journal of Stored Products Research**, v.41, pp.479-497, 2005.
- RICHARDSON, J. F. 1971 Incipient fluidization and particulate systems. In: DAVIDSON, J.F., HARRISON, D. **Fluidization**. 2nd. 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, 1999.
- SPITZER, D. W. **Flow measurement; practical guides for measurement and control**. Research Triangle Park, 646p. Practical Guides Series, 1996.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T.. Drying: Principles, Applications and Design. In: **Topics in Chemical Engineering**, v. 3. Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- WANG, X. S.; RHODES, M. J. Using pulsed flow to overcome defluidization. **Chemical Engineering Science**, v.60, pp.5177-5181, 2005a.
- WANG, X. S.; RHODES, M. J. Pulsed fluidization — a DEM study of a fascinating phenomenon. **Powder Technology**, v.159, pp.142-149, 2005b.
- WONG, H. W.; BAIRD, M. H. I. Fluidisation in a Pulsed Gas Flow. **The Chemical Engineering Journal**, v.2, pp.104-113, 1970.