



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José do Rio Preto

Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos – DETA
Programa de Pós-graduação: Engenharia e Ciência de Alimentos

Leandro Martinelli

*"Construção e desenvolvimento de um secador de leito
pulso-fluidizado para secagem de pastas e polpas"*

São José do Rio Preto - 2008

Leandro Martinelli

"Construção e desenvolvimento de um secador de leite pulso-fluidizado para secagem de pastas e polpas"

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos, área de Engenharia de Alimentos junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de São José do Rio Preto.

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero
Co-orientador: Prof. Dr. João Cláudio Thoméo
Co-orientadora: Prof^a Dr^a. Ana Lúcia Gabas

São José do Rio Preto - 2008

Martinelli, Leandro.

Construção e desenvolvimento de um secador de leite pulso-fluidizado para secagem de pastas e polpas / Leandro Martinelli. - São José do Rio Preto : [s.n.], 2008.

148 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Javier Telis Romero

Co-orientador: João Cláudio Thoméo

Co-orientadora: Ana Lúcia Gabas

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de

Biociências, Letras e Ciências Exatas

1. Secagem. 2. Polpa de frutas – Secagem. 3. Pastas alimentícias. 4. Leite pulso-fluidizado. I. Telis Romero, Javier. II. Thoméo, João Cláudio. III. Gabas, Ana Lúcia. IV. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. V. Título.

CDU – 531.364.7

Leandro Martinelli

Construção e desenvolvimento de um secador de leite pulso-fluidizado para secagem de pastas e polpas

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos, área de Engenharia de Alimentos junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Cláudio Thoméo
Professor Adjunto
UNESP – São José do Rio Preto
Co-orientador

Prof. Dr. Luis Alexandre Pedro de Freitas
Professor Associado
Faculdade de Ciências Farmacêuticas de
Ribeirão Preto
USP-Ribeirão Preto

Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Mauro
Professor Assistente Doutor
UNESP – São José do Rio Preto

São José do Rio Preto, 8 de julho de 2008.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus pela vida e oportunidade de estudar em uma conceituada Universidade como a UNESP.

A meus pais, Antônio e Conceição, que sempre me apoiaram de todas as formas possíveis, por todo amor, incentivo e benção.

A meus irmãos, Juliana e Elvis, por todo amor e incentivo sempre.

A minha namorada Paula, por todo carinho, amor, compreensão e apoio sempre. Agradeço também a toda sua família, pelo apoio e incentivo em todos os momentos.

A todos os meus colegas e amigos, os quais tive a oportunidade de conhecer durante a graduação e também na pós-graduação, muito obrigado pelo companheirismo.

A todos os meus companheiros de república, que foram vários durante esta longa caminhada, muito obrigado.

À Maria Angélica, por toda ajuda no decorrer do trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, por sempre se mostrarem amigos e estarem dispostos a ajudar em qualquer situação, especialmente ao João Jesuíno Demilio, pela grande ajuda na construção e montagem do equipamento.

Aos professores Maria Aparecida Mauro, Joel Fernando Nicoleti e Luis Alexandre Pedro de Freitas, por toda colaboração e sugestões.

Ao professor Javier Telis Romero, pela amizade, ajuda e apoio em todos os momentos e etapas do trabalho.

À professora Ana Lúcia Gabas, por toda ajuda e apoio para a realização deste trabalho.

Ao professor João Cláudio Thoméo, pela grande ajuda na realização do trabalho, por toda paciência, atenção e amizade, principalmente na etapa final do trabalho por todas as idéias e correções finais. Muito obrigado.

Ao CNPq e à FAPESP (processo nº 06/53945-9), pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

Enfim, a todos que participaram e ajudaram de alguma forma na conclusão de mais esta etapa em minha vida, muito obrigado.

RESUMO

Neste trabalho foi construído e desenvolvido um secador de leite pulso-fluidizado que utilizou partículas inertes para a secagem de pastas e polpas de frutas. O sistema permitia o controle da vazão do ar de fluidização e de sua temperatura, da pulsação do ar e da vazão de injeção de pasta. Foram determinadas as curvas de fluidização de partículas de vidro e teflon no leite pulso-fluidizado sob diferentes configurações, bem como suas velocidades de mínima fluidização, as quais demonstraram-se próximas às curvas de um secador fluidizado convencional. Experimentos para a avaliação da agitação das partículas foram realizados para que fossem encontradas as melhores condições, determinando-se a existência ou não de pontos mortos no leite. Foi visto que as partículas pertenciam ao grupo D, segundo a classificação de Geldart (1973). Pasta de gesso foi seca no secador pulso-fluidizado para avaliação da produção de pó e do hold-up das esferas nas diferentes condições de operação, as quais tiveram como variáveis os períodos de injeção (fase ativa e inativa), ângulo da válvula borboleta que dava acesso do ar ao leite, temperatura do ar de secagem, velocidade do ar e vazão de pasta no leite. Foi observado que todas as variáveis testadas apresentaram influência na produção de pó e na quantidade de material aderido às partículas inertes. O secador pulso-fluidizado foi testado também na secagem de suco e pastas de limão, maltodextrina e tomate, mostrando problemas de adesividade e, no caso de derivados de limão, aglomeração das partículas e colapso do leite. O secador foi utilizado ainda como vibro-fluidizado, quando o sistema de pulsação foi desligado e um sistema de vibração por eixos excêntricos foi acionado, constatando-se que o mesmo apresentou rendimento inferior ao pulso-fluidizado. Um secador do tipo *spray dryer* foi usado para a secagem de suco de limão com maltodextrina e constatou-se a necessidade de adição de, no mínimo, 65% de maltodextrina para que houvesse produção de pó. Testes físico-químicos foram feitos com os pós obtidos na secagem em *spray dryer*, os quais foram umidade, molhabilidade, grau de aglomeração, higroscopicidade, dispersibilidade, determinação da cor e atividade de água. Foram determinadas as isotermas de sorção de umidade para o limão em pó, obtido através da secagem em estufa a vácuo, com e sem adição de agentes encapsulantes (maltodextrina e goma arábica). Os aditivos foram adicionados na relação de 18% sobre os sólidos do suco. As isotermas mostraram ser do tipo II, segundo a classificação de Brunauer et al. (1940).

Palavras chave: leite pulso-fluidizado, secagem, pastas e polpas.

ABSTRACT

For this work, a pulse fluidized bed drier that used inert particles for drying pastes and fruit pulps was constructed and developed. The system allowed for the control of fluidized air flow and its temperature, the air pulses and the paste injection flow. The fluidization curves and minimum velocity of fluidization of glass and Teflon particles were determined in the pulse fluidized bed. Experiments to evaluate the agitation of particles were done to find the best agitation conditions, determining the existence or not of dead spots in the bed. It was seen that the particles belonged to D group, as per Geldart (1973) classification. Plaster paste was dried in the pulse fluidized dryer to evaluate the production of powder and hold-up of the spheres under different operational conditions which were variations of the periods of paste injection (active and inactive phase), angle of the butterfly valve which gave air access to the bed, air drying temperature, air speed and paste flow. All tested variables influenced the powder production and the amount of material adhered to inert particles. The pulse fluidized bed drier was also tested for drying lemon juice and paste, maltodextrina and tomato, showing adhesive problems and, with the lemons, an agglomeration of particles and a collapsed bed. The dryer was also used as a vibro fluidized bed when the pulsation system was turned off and a vibration system with eccentric axles was set in motion, it was seen that the vibro fluidized bed had a lower yield than the pulse fluidized bed. A spray drier was used to dry lemon juice with maltodextrina, and it was found that a minimum of 65% of additional maltodextrina was needed. Physic-chemical testes were done from the powders obtained from the spray drying. These testes were for humidity, flowability, degree of agglomeration, higroscopicity, dispersibility, color determination and water activity. Sorption isotherms were determined for the lemon powder, obtained by the drying of lemon juice in a vacuum chamber, with and without addition of encapsulating agents (maltodextrina and Arabian gum). The added additives were 18% of the solids of the juice. The isotherms showed to be of type II, according to Brunauer et al. (1940) classification.

Key Words: pulse fluidized bed, drying, pastes and pulps.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Etapas da secagem de pastas em leito fluidizado com inertes.....	22
Figura 2.2 - Várias formas de contato de uma batelada de sólidos pelo fluido	24
Figura 2.3: A porosidade de um leito fixo empacotado aleatoriamente com partículas uniformes aumenta conforme as partículas se tornam menos esféricas	27
Figura 2.4: Queda de Pressão versus velocidade para areia	29
Figura 2.5 - Classificação de Geldart para partículas utilizando ar nas condições ambiente.....	30
Figura 2.6: Fatores que afetam a secagem em <i>spray</i>	36
Figura 2.7: Diagrama esquemático do sistema pulsante com onda quadrada.....	38
Figura 2.8: Tipos de isotermas de adsorção de Van der Waals	45
Figura 3.1: Limões in natura para obtenção do suco.....	47
Figura 3.2: Secador de leito pulso fluidizado.....	49
Figura 3.3: Tubo injetor de suco.....	50
Figura 3.4: Solenóide responsável pelo efeito de pulsação.....	51
Figura 3.5: Disco responsável pela pulsação de ar, abaixo do leito de inertes.....	52
Figura 3.6: Relê de tempo utilizado para controlar os intervalos de pulsação.....	53
Figura 3.7: Curva de conexão entre a câmara de aquecimento e o leito de inertes.....	53
Figura 3.8: Câmara de distribuição de ar.....	53
Figura 3.9: Sistema de aletas utilizado para homogeneização da velocidade do ar no leito com aletas em diferentes posições.....	54
Figura 3.10: Copo distribuidor de fluxo de ar.....	55
Figura 3.11: Placa de orifícios responsável pela homogeneização da velocidade do ar.....	55
Figura 3.12: Base onde o leito de inertes é fixado por presilhas.....	56
Figura 3.13: Sistema excêntrico e motor elétrico responsáveis pela vibração do leito de inertes.....	56
Figura 3.14: <i>Spray Dryer</i> e seus principais componentes.....	57
Figura 3.15: Painel de controle do <i>spray dryer</i>	58
Figura 4.1: Perfil heterogêneo de velocidade do ar abaixo do leito de inertes.....	69

Figura 4.2: Distribuição granulométrica das partículas de vidro.	71
Figura 4.3: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, leito com 4cm de altura, velocidade do ar crescente e decrescente e borboleta a 90°.....	74
Figura 4.4: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, leito com 4cm de altura, velocidade do ar crescente e decrescente e borboleta a 90°.....	74
Figura 4.5: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, leito com 4cm de altura, velocidade do ar crescente e decrescente e borboleta a 30°.....	75
Figura 4.6: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, leito com 4cm de altura, velocidade do ar crescente e decrescente e borboleta a 30°.....	76
Figura 4.7: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, leito com 4cm de altura, velocidade do ar crescente e borboleta a 30°, 60° e 90°.....	76
Figura 4.8: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, leito de 4cm de altura, velocidade do ar crescente e decrescente, borboleta a 90° e placa distribuidora.....	78
Figura 4.9: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, leito de 4cm de altura, velocidade crescente e decrescente, com borboleta a 90° e placa distribuidora.....	79
Figura 4.10: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro e teflon, altura do leito de 4cm, velocidade crescente, borboleta a 60° e placa distribuidora.....	79
Figura 4.11: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado partículas de vidro e teflon, altura do leito de 4cm, velocidade crescente, borboleta a 30° e placa distribuidora.....	80
Figura 4.12: Queda de pressão no leito pulso fluidizado com partículas de teflon, altura de 4cm, nos diferentes tempos de pulsação, velocidade crescente, com ciclone, sem placa distribuidora e borboleta a 90°.....	81
Figura 4.13: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon 4cm, velocidade crescente, com ciclone, com placa distribuidora, borboleta a 90° e tempo de pulsação de 2s (ativa e inativa).	82
Figura 4.14: : Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, altura	

de 4cm, diferentes tempos de pulsação, velocidade crescente, com ciclone, sem placa distribuidora e borboleta a 90°.....	83
Figura 4.15: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, altura de 4cm, velocidade crescente, com ciclone , com placa distribuidora, borboleta a 90° e tempo de pulsação de 2s (ativa e inativa).....	83
Figura 4.16: Queda de pressão no pulso fluidizado partículas de vidro classificado, altura do leito de 4cm, velocidade crescente e decrescente, borboleta a 90° e placa distribuidora.....	85
Figura 4.17: Queda de pressão no pulso fluidizado partículas de vidro classificado, altura do leito de 4cm, velocidade crescente e decrescente, borboleta a 60° e placa distribuidora.....	85
Figura 4.18 Queda de pressão no pulso-fluidizado com partículas de vidro classificado, altura do leito de 4cm, velocidade crescente e decrescente, borboleta a 30° e placa distribuidora.....	86
Figura 4.19: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro classificado e não classificado , altura de leito de 4cm, velocidade crescente, borboleta a 60° e placa distribuidora.	86
Figura 4.20: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, alturas do leito de 2 e 4 cm, velocidade crescente ,borboleta a 90° e placa distribuidora.....	87
Figura 4.21: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, alturas do leito de 2 e 4 cm, velocidade crescente ,borboleta a 30° e placa distribuidora.....	88
Figura 4.22: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, alturas do leito de 2 e 4 cm, velocidade crescente ,borboleta a 90° e placa distribuidora.....	88
Figura 4.23: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, alturas do leito de 2 e 4 cm, velocidade crescente ,borboleta a 30° e placa distribuidora.....	89
Figura 4.24: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro e teflon, alturas do leito de 2 e 4 cm, velocidade crescente ,borboleta a 90° e placa distribuidora.....	90
Figura 4.25: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro e	

teflon, alturas do leito de 2 e 4 cm, velocidade crescente ,borboleta a 30° e placa distribuidora.....	90
Figura 4.26: Agitação das partículas com borboleta no ângulo de 60°, velocidade de 4,5 m/s, sem placa distribuidora.....	92
Figura 4.27: Agitação das partículas para o ângulo de 30, com velocidade de 6,5 m/s utilizando-se placa distribuidora.....	93
Figura 4.28: Agitação das partículas para a válvula na posição de 90°, sem placa distribuidora e com velocidade do ar de 6,5 m/s.....	94
Figura 4.29: Agitação das partículas para a válvula na posição de 90°, com placa distribuidora e com velocidade do ar de 6,5 m/s.....	95
Figura 4.30: Pó de gesso produzido nas velocidades de 6 e 8 m/s, temperatura de 60° e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso.....	99
Figura 4.31: Taxa de produção de pó de gesso nas velocidades de 6 e 8 m/s, temperatura de 60° C e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso.....	99
Figura 4.32: Hold-up das esferas nas velocidades de 6 e 8 m/s, temperatura de 60° C e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso.....	100
Figura 4.33: Pó de gesso produzido nas temperaturas de 60 e 70° C, velocidade do ar de 6 m/s e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso.....	100
Figura 4.34: Hold-up das esferas nas temperaturas de 60 e 70° C, velocidade do ar de 6m/s e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso.....	101
Figura 4.35: Hold-up das esferas nas temperaturas de 60 e 70° C, velocidade do ar de 6 m/s e vazão de 600 mL/h de pasta de gesso.....	101
Figura 4.36: Hold-up das esferas nas temperaturas de 60 e 70° C, velocidade do ar de 8 m/s e vazão de 600 mL/h de pasta de gesso.....	102
Figura 4.37: Hold-up das esferas na temperatura de 60° C, velocidade do ar de 6 e 8 m/s e vazão de 600 mL/h de pasta de gesso.....	103
Figura 4.38: Pó de gesso produzido nas temperaturas de 60 e 70° C, velocidade do ar de 8 m/s e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso.....	103
Figura 4.39: Hold-up das esferas nas vazões de pasta de gesso de 300 e 600 mL/h, temperatura de 70° C e velocidade do ar de 8 m/s.....	104
Figura 4.40: Pó de gesso produzido nas vazões de pasta de gesso de 300 e 600 mL/h, temperatura de 70° C e velocidade do ar de 8 m/s.....	105
Figura 4.41: Eficiência no período na secagem de gesso com vazões de 300 e 600 mL/h,	

temperatura de 60° C e velocidade do ar de 6 m/s.....	105
Figura 4.42: Pó de gesso produzido nos secadores de leito pulso-fluidizado e vibro-fluidizado, temperatura de 60° C, velocidade do ar de 8 m/s e vazão de 600 mL/h de pasta de gesso.....	107
Figura 4.43: Hold-up das esferas nos secadores de leito pulso-fluidizado e vibro-fluidizado, temperatura de 60° C, velocidade do ar de 8 m/s e vazão de 600 mL/h.de pasta de gesso.....	107
Figura 4.44: Eficiência do período na secagem em secadores pulso e vibro-fluidizado, temperatura de 60° C, velocidade do ar de 8 m/s e vazão de 600 mL/h de pasta de gesso.....	108
Figura 4.45: Hold-up das esferas na secagem de gesso e maltodextrina com vazão de 300 mL/h, temperatura de 60° C e velocidade do ar de 8 m/s.....	111
Figura 4.46: Quantidade de sólidos injetados e sólidos aderidos na secagem de pasta de maltodextrina, vazão de 300 mL/h, temperatura de 60° C e velocidade do ar de 8 m/s.....	112
Figura 4.47: Hold-up das esferas na secagem de extrato de tomate e maltodextrina com vazão de 300 mL/h, temperatura de 60° C e velocidade do ar de 8 m/s.....	112
Figura 4.48: Isotermas de adsorção do limão em pó a diferentes temperaturas.....	119
Figura 4.49: Influência dos aditivos nas isotermas de adsorção do suco de limão a 20°C.....	121
Figura 4.50: Influência de aditivos no calor de sorção de água para o suco de limão em pó.....	123
Figura B.1: Ciclone para separação do pó e ar provenientes da secagem.....	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição de maltodextrinas em função dos valores de DE.....	43
Tabela 3.1: Características dos materiais inertes utilizados.....	46
Tabela 3.2: Modelos matemáticos utilizados para os ajustes das isotermas.....	65
Tabela 4.1: Velocidades de mínima fluidização para vidro, vidro classificado e teflon...	73
Tabela 4.2: Tempos de pulsação utilizados nos experimentos de perda de carga.....	81
Tabela 4.3: Parâmetros utilizados para o cálculo da velocidade de mínima fluidização das partículas de teflon e vidro.....	91
Tabela 4.4: Resultados obtidos na avaliação de diferentes ângulos da borboleta e variação do período de injeção de pasta.....	98
Tabela 4.5: Relação entre sólidos solúveis do suco de limão e sua umidade.....	114
Tabela 4.6: Influência da concentração de maltodextrina e da temperatura do ar de secagem no tempo de colapso e hold-up das esferas na secagem de suco de limão em secador de leito pulso-fluidizado.....	114
Tabela 4.7: Condições operacionais utilizadas na secagem de suco de limão em <i>spray dryer</i>	116
Tabela 4.8: Análises físico-químicas de suco de limão em pó com 65% de maltodextrina secos em <i>spray dryer</i> a 140° C e vazão de 1000 mL/h.....	117
Tabela 4.9: Parâmetros estimados para as constantes da equação de GAB nas isotermas de limão, limão com maltodextrina e limão com goma arábica.....	118
Tabela 4.10: Parâmetros da equação (3.10) para as amostras de limão.....	123
Tabela 4.11: Qualidade do suco de limão em pó.....	124

NOMENCLATURA

A = amplitude de vibração (m);

a = peso da amostra utilizada (g);

a_w = atividade de água (-);

A_t = Área seccional do leito (m^2);

b = aumento de massa dos pós (g);

d_p = Diâmetro da Partícula (m)

f = frequência vibracional (s^{-1});

g = Aceleração da gravidade (m/s^2)

H_u = Hold-up (%);

L_{mf} = Altura do leito na mínima fluidização (m);

L_m = Altura do leito fixo (m);

M_F = massa de amostra fina que atravessa a peneira (g);

M_T = massa total de amostra (g);

m_m = Massa do material aderido (g);

m_p = Massa das partículas inertes ou tubo (g);

N : número de pontos amostrados;

P_{vm} = pressão de vapor da água no material alimentício (Pa);

P_{vo} = pressão de vapor da água na saturação (Pa);

Q_{st} = calor total de sorção (KJ/Mol);

q_0 = calor de sorção da primeira camada de água (KJ/Mol);

q_{st} = calor isostérico de sorção (KJ/Mol);

R = constante universal dos gases (8.314 J/Mol K);

S_j = porcentagem de matéria seca presente no suco reconstituído (%);

S_p = porcentagem de sólidos totais presentes no pó (%);

T = temperatura absoluta (K);

u_0 = Velocidade superficial do gás (m/s);

u_{mf} = Velocidade mínima de fluidização (m/s);

W = frequência angular vibracional ($rad s^{-1}$);

W_i = umidade presente no pó antes da realização do experimento (% b.u.);

w = peso da água utilizada no experimento (g);

X_{eq} = conteúdo de umidade de equilíbrio (Kg água/Kg sólido seco);

X_0 = conteúdo de umidade inicial do material (Kg água/Kg sólido seco);

X_{eq} = valores obtidos experimentalmente;

\hat{X}_{eq} = valores da umidade de equilíbrio fornecidos pelo modelo;

Letras gregas

Γ = adimensional de vibração (-);

Δp_b = Queda de pressão do leito (Pa);

Δp_{fr} = Queda de pressão por fricção (Pa);

ε_m = Porosidade do leito fixo (-);

ε_{mf} = Porosidade de mínima fluidização (-);

λ = calor de vaporização da água pura (J/Kg);

μ = Viscosidade do gás (Pa.s);

ρ_g = Densidade do gás (Kg/m³);

ρ_s = Densidade do sólido (Kg/m³);

ϕ = soma quadrática residual;

ϕ_s = Esfericidade da partícula (-);

φ = umidade relativa na qual o alimento nem ganha e nem perde umidade para a atmosfera (%);

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 O PROCESSO DE SECAGEM	20
2.1.1 SECAGEM DE PASTAS	20
2.2 - FLUIDIZAÇÃO	23
2.2.1- Regimes de fluidização	23
2.2.2 – Queda de pressão no leito fluidizado.....	26
2.2.3 - Velocidade mínima de fluidização.....	26
2.2.4 - Classificação de Geldart.....	29
2.3 TIPOS DE SECADORES	31
2.4 Leito pulso-fluidizado	37
2.5 QUALIDADE DO PRODUTO	40
2.6 O USO DE SUPORTES NA SECAGEM.....	41
2.7 ISOTERMAS DE SORÇÃO DE UMIDADE.....	44
3.1 MATERIAIS	46
3.1.1 Partículas e polpas	46
3.1.2 Secador de leito Pulso-fluidizado.....	48
3.1.3 Secador de leito vibro-fluidizado	55
3.1.4 Secador por Atomização (“ <i>Spray Dryer</i> ”)).....	57
3.2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS	59
3.2.1 Experimentos de perda de carga no secador de leito pulso-fluidizado	59
3.2.2 Avaliação das melhores condições de agitação das partículas inertes	59
3.2.3 Secagem no leito pulso-fluidizado e avaliação do Hold-up	60
3.2.4 Experimentos de secagem no <i>spray dryer</i>	62
3.2.5 Isotermas de sorção	63
3.2.6 Procedimento de cálculo para as isotermas de sorção.....	64
3.2.7 Propriedades termodinâmicas	64
3.2.8 Determinação das propriedades físico-químicas dos pós obtidos.....	66
3.2.8.1 Sólidos totais	66
3.2.8.2 Molhabilidade	66
3.2.8.3 Dispersibilidade.....	67
3.2.8.4 Higroscopicidade.....	67
3.2.8.5 Grau de aglomeração	68
3.2.8.6 Determinação da cor.....	68
3.2.8.7 Determinação da atividade de água	68
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69

4.1 EXPERIMENTOS PRELIMINARES DE FLUIDIZAÇÃO.....	69
4.1.1 Classificação das partículas de vidro.....	70
4.2 EXPERIMENTOS DE PERDA DE CARGA	71
4.2.1- Queda de pressão no leito, submetido a diferentes ângulos da válvula borboleta.....	72
4.2.2- Queda de pressão no leito sob diferentes ângulos, utilizando-se placa distribuidora.....	77
4.2.3- Experimentos com o ciclone acoplado ao equipamento	80
4.2.4- Efeito da classificação das partículas de vidro	83
4.2.5 – Efeito da variação na altura do leito	87
4.4 EXPERIMENTOS DE AGITAÇÃO DE PARTÍCULAS.....	91
4.5 SECAGEM DE PASTAS.....	96
4.5.1 Avaliação da injeção na fase ativa e inativa e influência do ângulo da válvula borboleta.....	96
4.5.2 Avaliação da velocidade do ar, temperatura do ar e vazão de pasta	97
4.5.3 Comparação entre pulso-fluidizado e vibro-fluidizado.....	106
4.5.4 Experimentos de secagem com pasta de limão, maltodextrina e tomate no leito pulso-fluidizado.....	109
4.5.6 Experimentos de secagem de suco de limão no leito pulso-fluidizado.....	113
4.6 SECAGEM DE SUCO DE LIMÃO EM <i>SPRAY DRYER</i>.....	115
4.6.1 Análises físico-químicos dos pós	116
4.7 ISOTERMAS DO SUCO DE LIMÃO EM PÓ.....	117
5 CONCLUSÕES.....	125
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
7 BIBLIOGRAFIA	1278
8 APÊNDICES.....	141

1 INTRODUÇÃO

A secagem é um dos métodos mais antigos de conservação de alimentos utilizados pelo homem, que envolve a aplicação simultânea de calor e a remoção física de umidade, com conseqüente redução da atividade de água do alimento. A secagem de alimentos e de produtos biológicos é aplicada, não apenas com o propósito do aumento da vida útil do produto, mas também com a finalidade de reduzir custos de embalagem e transporte, melhorar atributos sensoriais e encapsular aromas (ACHANTA; OKOS, 1996).

Para a secagem de alimentos existem vários tipos de secadores. Estes são escolhidos de acordo com as características do alimento, a facilidade do processamento, o volume processado, o estado e as condições da matéria-prima, fatores de origem econômica e, principalmente, a forma que se deseja dar ao produto final. Particularmente para a secagem de pastas, a diversidade de características físicas dos materiais leva à inexistência de um padrão de secador recomendado (FREIRE, 1992).

Devido às dificuldades de manuseio, a secagem de pastas normalmente compreende três etapas (MROWIEC; CIESIELCZYK, 1977). Primeiro o material é depositado na forma de uma camada fina sobre a superfície sólida de um material inerte, em seguida promove-se a redução de umidade e, finalmente, remove-se mecanicamente a película seca aderida ao sólido. No caso de pastas alimentícias, tais como extratos vegetais, purê de batata, polpa de tomate, polpa de umbu, polpa de urucum, levedura, melaço de cana-de-açúcar e amido, os sistemas de secagem mais investigados são o secador vibro-rotacional e leito vibro-fluidizado com partículas inertes, leito de jorro bidimensional e leito de jorro com turbilhamento com partículas inertes, secador rotatório de contato direto de particulados, leito fluidizado ativo e *spray dryer* com sorção por contato e secador rotatório com recheio de inertes (FREIRE, 1992). A fluidização e o jorro são técnicas amplamente aceitas para promover o contato entre um fluido e um material granular, pois suas características fornecem sistemas onde há uniformidade de condições ao longo do leito, como temperatura e concentração, além de possuírem altos coeficientes de transferência de calor e massa.

Dentre vários trabalhos conhecidos que utilizam inertes para a secagem de pastas, pode-se citar a secagem de sangue animal em secador de leito de jorro tronco-cônico-cilindro, com partículas inertes de polipropileno (PHAM, 1983) e a secagem do mesmo material em secador de leito de jorro cônico diluído com partículas de inertes de teflon em forma de cubos (MARKOWSKI, 1992), secagem da levedura *Saccharomyces cerevisiae* em secador de

tambor (VASSEUR; LONCIN, 1985), secagem de extratos vegetais em leito de jorro tronco cone-cilindro (RÉ; FREIRE, 1988), utilização de leito de jorro tronco cone-cilindro com partículas esféricas de vidro como inertes para a secagem de polpa de banana (HUFENÜSSLER, 1985) e de polpa de tomate (KACHAN, 1988) e com partículas de poliestireno para a secagem de polpa de umbu (LIMA, 1992), secagem de ovo de galinha homogeneizado em leito de jorro tronco cone-cilindro com recheio de partículas inertes constituído de esferas de vidro (CUNHA; SPITZNER NETO; FREIRE, 1998), secagem de leite de soja em secador vibro-fluidizado utilizando cilindros de teflon e esferas de vidro como partículas inertes (PAN et al., 2001).

Geralmente, o secador de leito fluidizado é considerado superior a outros secadores convencionais de leito fixo para a secagem de partículas distribuídas e não pegajosas, com tamanho médio na faixa de 50 μm a 2 mm. Para o processamento de partículas grandes, é essencial aumentar a velocidade superficial do gás, mas isso pode acarretar efeitos negativos na operação do leito, como *slugging* ou canalização (especialmente para partículas com formatos irregulares). Conseqüentemente, várias modificações no leito fluidizado têm sido desenvolvidas, como por exemplo, leito de jorro, leito vibro-fluidizado (PAN et al., 1997) e leito pulso fluidizado.

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de frutas, com cerca de 33 milhões de toneladas/ano, ocupando uma área de 2,2 milhões de hectares. Paralelamente ao segmento de frutas frescas, a produção de sucos naturais vem se notabilizando pelo forte crescimento do consumo, inserindo-se os sucos de frutas tropicais e os sucos cítricos onde, o Brasil se destaca no cenário internacional. A produção brasileira de sucos e polpas de frutas tropicais hoje estimadas em cerca de 230 mil toneladas, apresenta uma produção bastante diversificada onde o consumidor tem a oportunidade de saborear frutas consideradas exóticas, típicas da região amazônica como o açaí, cajá, taperebá, murici, cupuaçu e ainda as mais conhecidas como maracujá, acerola, graviola, abacaxi, carambola, caju e a goiaba, dentre outras (FRACARO, 2004).

O surgimento das unidades industriais produtoras de polpa pelo início da década de 80 provocou algumas alterações importantes nesse mercado. As unidades de pequeno porte, pela baixa exigibilidade de capital, foram implantadas próximas às regiões produtoras de frutas e passaram a exercer concorrência com as médias e grandes empresas na compra de matéria prima e na fabricação de sucos, pois a polpa passou a competir em um mercado antes atendido 100% pelo suco integral. Além disso, produtores de médio e grande porte visualizaram na industrialização a possibilidade de minimizar os riscos do pós-colheita quando o mercado

sazonalmente apresenta características de oferta excessiva, extraíndo a polpa e comercializando-a de forma racional. Outro forte atrativo era o valor agregado obtido a partir do processamento da extração da polpa. Desta forma, a perspectiva de crescimento da demanda de sucos e polpa no mercado interno fica evidenciada pelas altas taxas de incremento observadas nos últimos anos (FRACARO, 2004).

Uma alternativa à comercialização desta polpa seria a produção de pós através da secagem das polpas em *spray dryer* ou outros tipos de secadores ainda em estudo. Esta alternativa reduz seu custo de transporte, aumenta a vida de prateleira e torna os pós disponíveis a um maior número de consumidores.

O objetivo deste trabalho foi construir e desenvolver um secador de leito pulso-fluidizado com inertes, para a secagem de pastas e polpas de frutas. Foi construído um sistema de pulsação que permitiu a alternância de fases ativas e inativas no leito de inertes para a realização das secagens. Foram determinadas as curvas de fluidização das partículas inertes e suas velocidades de mínima fluidização em diferentes configurações do equipamento. Testes de agitação das partículas através da filmagem do leito em diferentes configurações foram feitos para que fossem encontradas as melhores condições de agitação dos inertes.

Na secagem foram considerados como variáveis no processo a vazão de ar, a temperatura de secagem e a vazão de alimentação. Foram utilizados nas secagens suco de limão, suco de limão com maltodextrina, pasta de limão, pasta de gesso e pasta de tomate.

O secador pulso-fluidizado pôde ser utilizado ainda como secador vibro-fluidizado, quando o sistema de pulsação de ar foi desligado e um sistema de vibração com eixo excêntrico acoplado ao leito foi acionado.

Foi realizada a secagem de suco de limão com maltodextrina em um secador *spray drier* e os pós obtidos foram submetidos a testes físico-químicos de umidade, molhabilidade, dispersibilidade, higroscopicidade, grau de aglomeração, cor e atividade de água.

Por fim, para caracterização do material, isotermas de sorção de umidade foram construídas com o limão em pó e com limão adicionado de agentes encapsulantes (maltodextrina e goma arábica).

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O processo de secagem

A desidratação é uma técnica de preservação, na qual o teor de umidade é reduzido até um nível em que o produto atinge estabilidade química e biológica. Vida de prateleira mais longa, diversidade de produto e redução de volume são razões para a popularidade de frutas e vegetais secos, e isto pode ser expandido com melhoramentos na qualidade do produto e aplicações do processo (PRAKASH; JHA; DATTA, 2004).

Este processo estende a vida útil de alguns produtos de alguns dias e semanas para meses e anos. O menor custo de transporte e estocagem associados com a redução de peso e volume devido à água removida têm trazido incentivos econômicos que colaboram para a utilização do processo de desidratação. A grande variedade de alimentos desidratados disponíveis hoje tem estimulado a competição para a maximização da qualidade de seus atributos, para melhores técnicas de mecanização, automação, embalagem e distribuição (RIZVI, 1995).

A maioria das indústrias de alimentos emprega equipamentos de secagem tais como liofilizadores, *spray dryers*, secadores de tambor rotativo e secadores a vapor. Os preços destes secadores são significativamente altos e apenas grandes indústrias geram recursos para custeá-los. Devido ao alto custo inicial, as indústrias de pequeno porte e produtores não têm como pagar pela tecnologia de alta qualidade de secagem. Ao lado da procura por tecnologias mais baratas, as pequenas indústrias e produtores buscam pela facilidade de uso e sistemas práticos de secagem (CHUA; CHOU, 2003).

2.1.1- Secagem de pastas

As pastas alimentícias podem ser consideradas, do ponto de vista reológico, como um sistema coloidal, ou seja, um sistema sólido-líquido constituído de partículas microscópicas ou de partículas coloidais dispersas em um líquido (FREIRE, 1992). São difíceis de definir pois compreendem um grupo de materiais úmidos em variadas formas físicas: pastas duras (tortas de filtração e precipitados), pastas moles e lamas (pastas de amido e polpas em geral),

suspensões (soro de leite), emulsões (leite natural e maionese) e soluções (açúcar em água) (STRUMILLO; MARKOWSKI; KAMINSKI, 1983).

Quando estes sistemas são submetidos a processamento térmico, o material pode sofrer modificações em suas propriedades físicas, como por exemplo suspensões líquidas mudarem seu comportamento de alta viscosidade para um comportamento de sólidos. Estas mudanças podem resultar em considerável adesividade do material, proporcionando a formação de partículas aglomeradas que requerem maiores tempos de secagem ou mesmo inviabilizam o processo (STRUMILLO; MARKOWSKI; KAMINSKI, 1983; FREIRE, 1992).

Secadores de leite fluidizado e de jorro estão entre os sistemas mais utilizados para a secagem de sólidos, suspensões, polpas e pastas, principalmente devido às vantagens de altas taxas de transferência de calor e de massa entre os sólidos e o ar, resultando em baixos tempos de secagem (CABRAL et al., 2007).

A técnica de secagem de pastas e suspensões em leite de jorro vem sendo utilizada na secagem de diversos tipos de materiais, tais como sangue animal (PHAM, 1983), leveduras e polpa de frutas (ALSINA et al., 1996; MEDEIROS, 2001).

No secador de leite de jorro, a atomização da pasta ou suspensão sobre o leite reveste as partículas com uma fina camada de material. À medida em que seca, a película se torna frágil, fragmentando-se devido aos efeitos de colisões interpartículas. O material na forma de pó é então arrastado para fora do secador pela corrente de ar. Um ciclone conectado ao secador promove a separação e recolhimento do pó; entretanto, muitas vezes as taxas de remoção da película são muito baixas, promovendo acumulação do material no leite, sendo este um dos graves problemas deste secador, chegando até mesmo a inviabilizar sua utilização na secagem de diversos materiais.

A secagem de líquidos dispersos na superfície de partículas inertes em secadores fluidizados e jorros oferece as vantagens de produzir pós em secadores com menor volume e área requerida, quando comparados ao *spray dryer*, resultando em menores investimentos e custos operacionais (KUDRA; MUJUMDAR, 1995). Entretanto, a operação de secadores de leite fluidizado e leitões de jorro com partículas inertes é limitada devido à alta velocidade de gás que é necessária para fluidizar ou jorrar as partículas, que são relativamente grandes e pesadas (PAN et al., 2001), o que resulta em altos consumos de energia e utilização de ventiladores de alta pressão.

Grbavcic; Arsenijevic e Garic-Grulovic (2000) relataram que a secagem de pastas em leitões fluidizados utilizando inertes compreende três etapas, conforme mostra a Figura 2.1.

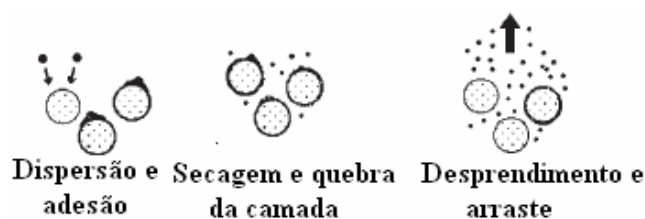


Figura 2.1: Etapas da secagem de pastas em leito fluidizado com inertes (GRBAVCIC; ARSENIJEVIC;GARIC-GRULOVIC, 2000).

A suspensão carregada dá forma às películas que aderem à superfície das partículas inertes. Por causa da área de superfície muito grande das partículas inertes e da fluidificação intensiva a umidade é removida em um curto período de tempo. Os sólidos que permanecem na superfície das partículas inertes se soltam pela fricção e colisão das partículas inertes. Finalmente, o pó do produto é carregado do leito com o ar de exaustão. Se a alimentação é uma pasta densa (pasta) então os agregados molhados da pasta fluidificam junto com as partículas inertes (GRBAVCIC; ARSENIJEVIC;GARIC-GRULOVIC, 2000).

Cabral et al. (2007) e Telis-Romero et al. (2007) secaram polpa de goiaba e graviola, respectivamente, em secador vibro-fluidizado utilizando como inertes partículas esféricas de vidro e cilíndricas de teflon. Em ambos os trabalhos concluíram que o aumento da viscosidade da polpa resultou em uma maior perda de carga no leito vibro-fluidizado e maiores velocidades mínimas de vibro-fluidização.

Martinez; Brennam e Nirajam (1995) apresentaram uma discussão detalhada sobre o comportamento do leito de jorro na secagem de produtos vegetais, relacionando os problemas de aderência das partículas e interrupção do jorro com as características aderentes do suco de frutas e vegetais, provocadas pelos elevados conteúdos de açúcar. Na conclusão do trabalho enfatizaram a necessidade de se aprofundar os estudos sobre os processos físico-químicos que ocorrem durante o processamento no secador de leito de jorro, com a finalidade de esclarecer as razões pelas quais ocorre a adesão do produto sobre as partículas inertes.

Lima (1992) estudou a secagem da polpa de umbu em leito de jorro, encontrando resultados bastante satisfatórios. Os estudos foram ampliados para a secagem em leito de jorro de polpa de cajá, manga, pinha, cajá-manga, serigüela e acerola (RAMOS; LIMA; MARIA,1997; LIMA et al., 2000). Nestes trabalhos os autores relatam problemas de acúmulo de material, com comprometimento das condições fluidodinâmicas e estabilidade do leito.

Lima et al. (2000) correlacionaram a composição de uma série de frutas tropicais com a eficiência de produção do pó, cujos resultados mostraram que havia influências isoladas dos

teores de gordura, fibras e açúcares redutores. Observaram, ainda, o efeito combinado desses constituintes, no desempenho da secagem em leito de jorro.

Além da composição, outros fatores, como características da superfície e propriedades das partículas inertes (massa específica, esfericidade, ângulo de repouso) também interferem diretamente na remoção da película e, conseqüentemente, na acumulação de material no leito (MEDEIROS et al., 2001).

2.2 - Fluidização

2.2.1- Regimes de fluidização

Segundo Kunii e Levenspiel (1991), pode-se descrever os regimes de fluidização (Figura 2.2), considerando-se inicialmente um leito parcialmente cheio de sólidos finos. Ao passar um fluido (gás ou líquido), pelo leito a baixa velocidade, este permeia os poros do leito das partículas que não se movem. A queda de pressão aumenta e a altura do leito permanece constante, caracterizando o comportamento de leito fixo (Figura 2.2, a). Havendo um aumento contínuo da velocidade do fluido, a queda de pressão e o arraste individual das partículas aumentam iniciando o movimento destas. As partículas começam a se mover e vibrar em certas regiões. O regime passa de leito fixo para leito expandido. No ponto em que as partículas começam a ser ejetadas na superfície do leito encontra-se a velocidade de mínima fluidização (u_{mf}) (Figura 2.2, b). Neste momento o leito é considerado como em fluidização incipiente ou em mínima fluidização. Havendo aumento da velocidade da fluidização a altura do leito cresce de acordo com a velocidade, porém a queda de pressão permanece constante.

Em sistemas líquidos, um aumento na velocidade acima da velocidade de mínima fluidização geralmente resulta na expansão progressiva do leito. Estas condições vão gerar a fluidização homogênea ou particulada (Figura 2.2, c).

Geralmente, os sistemas que envolvem sólidos e um gás comportam-se de maneira totalmente diferente. Com o aumento da velocidade acima da velocidade de mínima fluidização, uma instabilidade no leito com a formação de bolhas e canais preferenciais é observada. Em velocidades maiores, a agitação das partículas torna-se mais vigorosa. Esse comportamento é chamado de fluidização agregativa ou fluidização borbulhante (Figura 2.2,

d). Em alguns casos raros, sistemas sólido-líquido podem se comportar como leitos borbulhantes. Isto pode ocorrer quando sólidos muito densos são fluidizados por líquidos com baixa densidade. Em sistemas gás-sólido, bolhas de gás coalescem e crescem à medida que sobem, em um leito suficientemente profundo e com partículas de pequeno diâmetro. Essas bolhas eventualmente podem tornar-se grandes o suficiente a ocupar toda a seção transversal do leito.

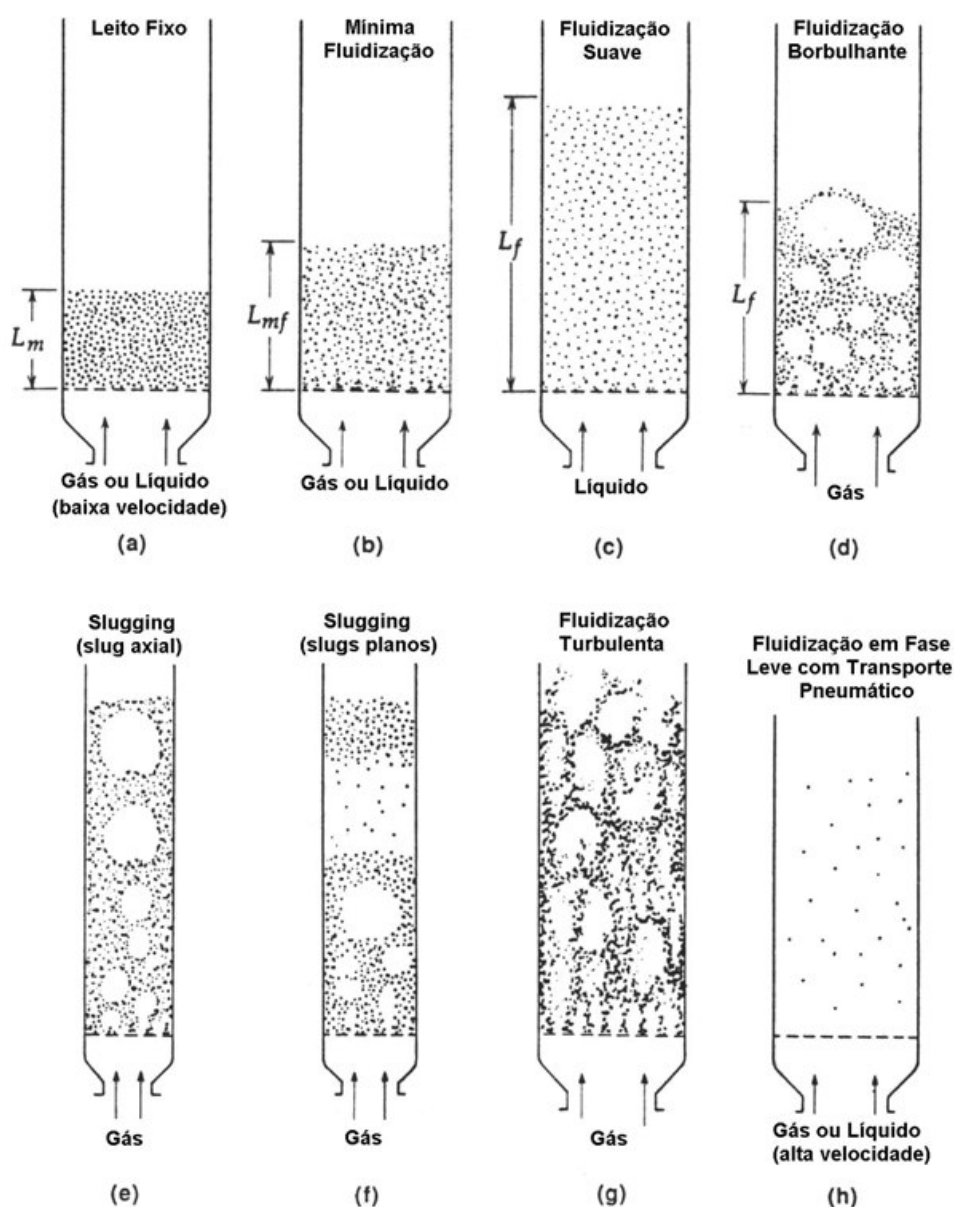


Figura 2.2 - Várias formas de contato de uma batelada de sólidos pelo fluido, (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

No caso de partículas finas, estas descem suavemente pelas laterais do leito ao redor das bolhas de gás. Este fenômeno é chamado de *slugging* ou *axial slugging* (Figura 2.2, e). Para partículas grossas, a porção de partículas do leito acima das bolhas é empurrada para cima, como por um pistão. Partículas caem da parte superior do *slug* que finalmente desaparece. Neste momento, outros *slugs* são formados e este movimento oscilatório instável é repetido. Estes são os chamados *slugs* planos (Figura 2.2, f).

Quando partículas finas são fluidizadas a velocidades de gás suficientemente altas, a velocidade terminal dos sólidos é excedida, a superfície do leito desaparece e ao invés das bolhas um movimento turbulento dos sólidos é observado, com a formação de espaços vazios no leito de diversos formatos e tamanhos. Esta é a fluidização turbulenta (Figura 2.2, g). Continuando o aumento da velocidade do fluido, as partículas alimentadas são arrastadas, obtendo assim um leito diluído ou disperso, com o transporte pneumático das partículas (Figura 2.2, h). Quando as partículas são recuperadas por ciclones, retornando ao leito, este sistema é chamado de leito fluidizado circulante.

Partículas finas de ampla distribuição de tamanho podem ser fluidizadas em uma grande faixa de vazão de gás, permitindo flexibilizar as condições de operações podendo inclusive trabalhar com leitos profundos e de grandes diâmetros. Ao contrário, leitos de grande uniformidade de tamanho de sólidos, freqüentemente fluidizam mal, com trepidações e formação de jorros e *sluggings*, os quais podem causar sérios danos estruturais em leitos grandes. A qualidade de fluidização desses leitos pode muitas vezes ser melhorada pela adição de pequena quantidade de finos para atuarem como “lubrificante”. Além disso, grandes partículas fluidizam em uma estreita faixa de vazão de gás e para estas partículas leitos rasos devem ser usados (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Outro fator que interfere na qualidade de fluidização é a razão de densidade fluido/sólido. Normalmente, sistemas sólido-líquidos fluidizam homoganeamente, ao passo que sistemas gás-sólido apresentam heterogeneidade. No entanto, como mencionado anteriormente, podem se comportar fora do padrão do regime em situações extremas, tais como nos contatos de partículas de baixa densidade em gás denso ou partículas de alta densidade em gases com densidade baixa.

Inúmeros outros fatores podem afetar a qualidade da fluidização, tais como a geometria do leito, sistema de distribuição do gás à entrada do leito, tipo de sólido usado, como, por exemplo se as partículas apresentam características de permanecerem livremente suspensas no gás ou se são capazes de formar aglomerados (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

2.2.2 – Queda de pressão no leito fluidizado

De acordo com Brown et al. (1950), a porosidade média (ϵ_m) em leitos fixos é relacionada com a esfericidade das partículas, como pode ser visto na Figura 2.3. Além disso, em tubos com pequenos diâmetros o efeito das paredes torna-se considerável e influencia a porosidade do leito.

A queda de pressão do leito de partículas, em um leito de altura L e com tamanho de partículas homogêneo d_p foi correlacionado por Ergun (1952), pela equação 2.1:

$$\frac{\Delta p_{fr}}{L_m} = 150 \frac{(1 - \epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu u_0}{(\phi_s d_p)^2} + 1,75 \frac{1 - \epsilon_m}{\epsilon_m^3} \frac{\rho_g u_0^2}{\phi_s d_p} \quad (2.1)$$

onde:

Δp_{fr} = Queda de pressão por fricção (Pa)

L_m = Altura do leito fixo (m)

ϵ_m = Porosidade do leito fixo (-)

μ = Viscosidade do gás (Pa.s)

u_0 = Velocidade superficial do gás (m/s)

ϕ_s = Esfericidade da partícula (-)

ρ_g = Densidade do gás (Kg/m³)

d_p = Diâmetro da Partícula (m)

2.2.3 - Velocidade mínima de fluidização

Conforme anteriormente mencionado, o leito será considerado fluidizado quando houver equilíbrio entre as forças de arraste, peso e de empuxo, o que pode ser representado conforme a equação 2.2, de acordo com Kunii e Levenspiel (1991):

$$\Delta p_b A_t = A_t L_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) [(\rho_s - \rho_g)g] \quad (2.2)$$

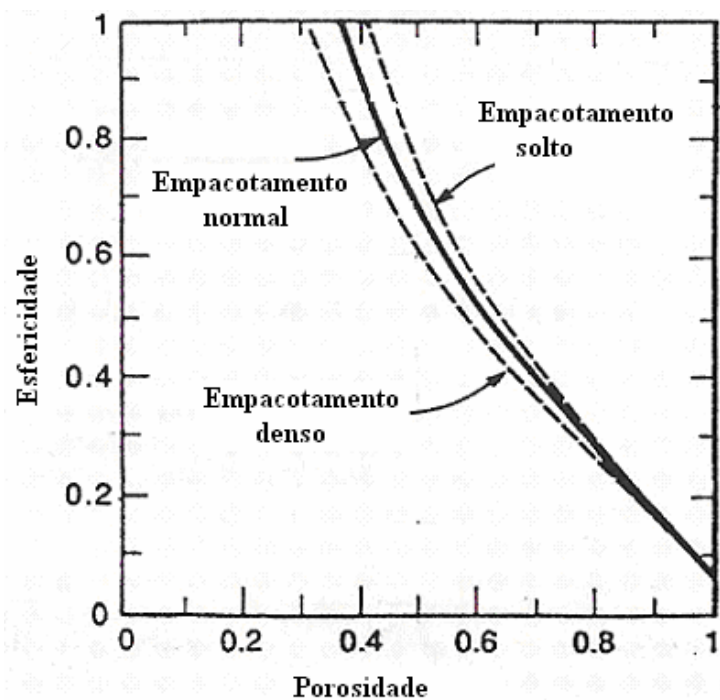


Figura 2.3: A porosidade de um leito fixo empacotado aleatoriamente com partículas uniformes aumenta conforme as partículas se tornam menos esféricas (BROWN et al., 1950).

onde:

Δp_b = Queda de pressão do leito (Pa)

A_t = Área seccional do leito (m²)

L_{mf} = Altura do leito na mínima fluidização (m)

ε_{mf} = Porosidade de mínima fluidização (-)

ρ_s = Densidade do sólido (Kg/m³)

g = Aceleração da gravidade (m/s²)

Para a condição de mínima fluidização, a equação 2.2 pode ser reescrita:

$$\frac{\Delta p_b}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g \quad (2.3)$$

A velocidade superficial nas condições de mínima fluidização é determinada através da combinação das equações 2.1 e 2.3:

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu} \quad (2.4)$$

onde:

d_p = Diâmetro da Partícula (m)

u_{mf} = Velocidade de mínima fluidização (m/s)

ρ_g = Densidade do gás (Kg/m³)

μ = Viscosidade do gás (Pa.s)

ε_{mf} = Porosidade de mínima fluidização (-)

ϕ_s = Esfericidade da partícula (-)

ρ_s = Densidade do sólido (Kg/m³)

g = Aceleração da gravidade (m/s²)

O diagrama de queda de pressão versus velocidade é particularmente utilizado como um indicador da qualidade de fluidização, especialmente quando a avaliação visual não é possível (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

Para velocidades relativamente baixas no leito fixo, a queda de pressão é proporcional à velocidade do gás e geralmente chega até uma queda de pressão máxima (Δp_{max}), ligeiramente superior à queda de pressão do leito estático. Com um pequeno aumento na velocidade do gás, o leito fixo tem sua porosidade aumentada de ε_m para ε_{mf} , resultando em uma queda na pressão para a pressão do leito estático. Com velocidades superiores à de mínima fluidização, o leito expande e bolhas de gás podem ser encontradas, resultando em heterogeneidade no leito no caso de fluidos gasosos. Apesar desse aumento na velocidade do gás, a queda de pressão permanece praticamente constante no leito. A Figura 2.4 mostra a variação da queda de pressão no leito com a velocidade do fluido.

Quando a velocidade do gás decresce, as partículas fluidizadas voltam a formar um leito fixo de partículas, com porosidade ε_{mf} . Se o fluxo de gás é cessado, uma vibração do leito reduzirá sua porosidade para a inicial (ε_m).

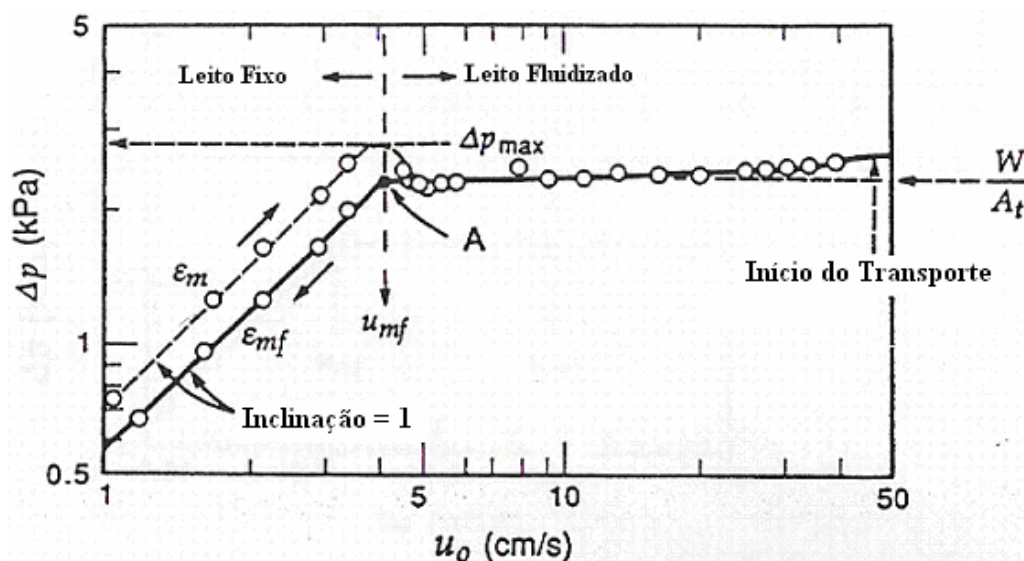


Figura 2.4: Queda de Pressão versus velocidade para areia (SHIRAI, 1958)

2.2.4 - Classificação de Geldart

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

A Figura 2.5 apresenta um diagrama válido para a fluidização tendo como fluido ar em condições ambiente. De acordo com Kunii e Levenspiel (1991) os quatro grupos considerados por Geldart podem ser apresentados como segue:

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

Quando estes sólidos são fluidizados, o leito expande-se antes do aparecimento de bolhas. Em velocidades do gás maiores que a velocidade de formação de bolhas, o leito muda para o modo borbulhante, apresentando o seguinte comportamento: bolhas de gás elevam-se mais rapidamente que o fluxo de gás, percolando pela emulsão. As bolhas de gás aparecem como brechas e coalescem frequentemente com a sua elevação através do leito; uma má circu-

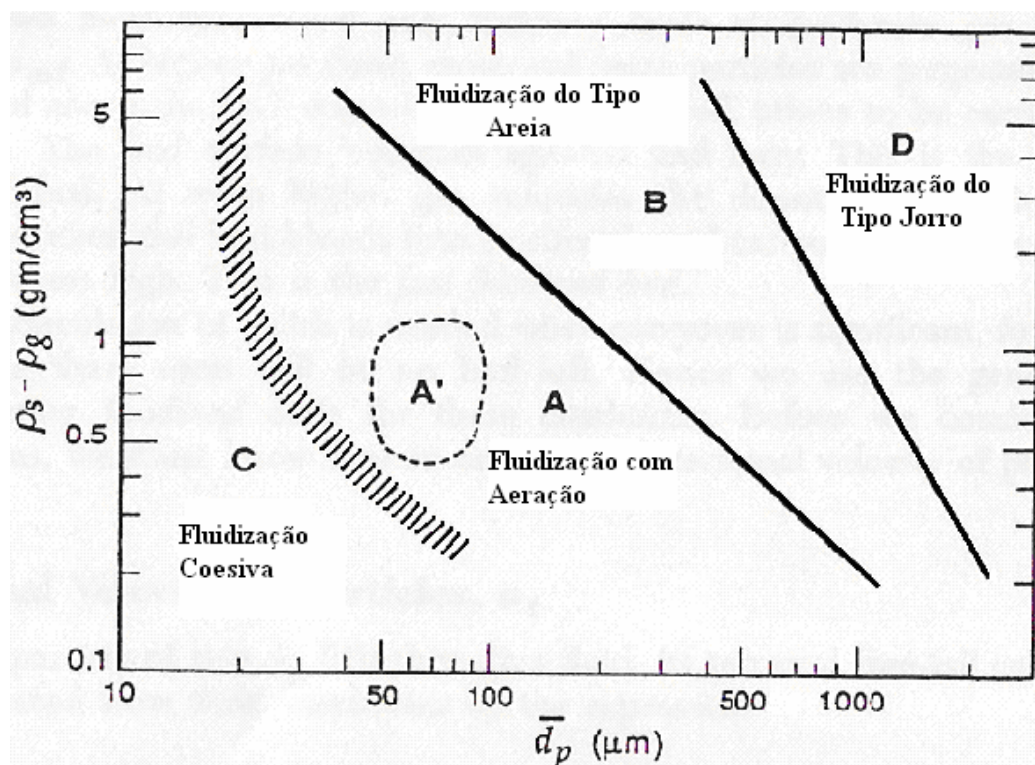


Figura 2.5 - Classificação de Geldart para partículas utilizando ar nas condições ambiente; adaptado de GELDART (1973) (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

-lação de sólidos ocorre mesmo quando apenas poucas bolhas estão presentes.

Esta circulação é um pouco melhor em leitos de grande diâmetro, quando as bolhas crescem até o diâmetro do leito. Elas tornam-se *slugs* axiais, embora não seja muito comum este tipo de regime de fluidização. Os finos atuam como lubrificante tornando mais fácil a fluidização do leito.

Grupo B – As partículas de tamanho entre 40 μm e 500 μm , e densidade entre 1,4 g/cm^3 e 4 g/cm^3 . Fazem parte deste grupo, sólidos que apresentam boa fluidização, com ocorrência de borbulhamento intenso.

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

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

- borbulhamento vigoroso estimula a circulação violenta dos sólidos.

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

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

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

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

2.3 Tipos de secadores

Chua e Chou (2003) fizeram um estudo de diferentes tipos de secadores para produtos agrícolas alimentícios e propuseram diversos secadores de baixo custo para aplicação em áreas produtivas, onde matéria-prima e mão-de-obra são disponíveis. Os secadores propostos possuíam as seguintes características:

- Baixo custo de capital inicial;
- Facilidade em fabricar com materiais disponíveis;
- Facilidade de operação (sem complicação eletrônica ou mecânica);
- Promover efetivamente melhor cinética de secagem e qualidade do produto que o método de secagem direta ao sol;
- Facilidade em manutenção de todas as partes e componentes;
- Simples substituição das partes durante pane.

Os secadores de baixo custo encontrados por Chua e Chou (2003) foram secador de leito fluidizado, secador do leito tipo jorro, secagem por infravermelho, secadores convectivos de baixo custo e secador solar.

A secagem em leito fluidizado é amplamente utilizada para alimentos, pois oferece a vantagem de alto grau de mistura que pode resultar em menores tempos de secagem (TARUNA; JINDAL, 2002). Comparado com outros métodos de contato fluido-sólido, o leito fluidizado apresenta altas taxas de transferência de calor e massa, característica que é importante nos processos de secagem, uma vez que envolve menor tempo de residência do produto em condições de temperatura que possam alterar a sua qualidade.

Segundo Shilton e Niranjan (1993), a fluidização é um método eficiente de contato fluido-sólido porém suas aplicações ficam limitadas a partículas relativamente pequenas e uniformes. Quando se trabalha com partículas maiores, a fluidização raramente é uma boa escolha. Neste caso, a técnica mais recomendada pelos autores para promover um contato fluido-sólido eficiente é a do leito de jorro.

O uso da vibração em aplicações na engenharia é um tema de amplo interesse no comportamento dinâmico de materiais granulares em processos de aglomeração de partículas, carga e descarga de silos, classificação com peneiras vibratórias, filtração, fluidização, granulação, transporte em dutos, extração, adsorção e revestimento e sobretudo na secagem, onde se concentra o maior número de aplicações (FINZER; KIECKBUSCH, 1992).

O interesse na aplicação de vários tipos de vibração para intensificar a transferência de quantidade de movimento, de transferência de calor e massa tem sido observado em várias áreas, principalmente na secagem de materiais granulares (STRUMILLO; KUDRA, 1986). Esta intensificação é baseada no aumento dos valores dos coeficientes de transferência, devido ao aumento da turbulência na camada limite e no aumento da área interfacial como resultado da reação da vibração na estrutura do leito.

Os diversos geradores da ação vibratória são responsáveis pela agitação das partículas e são denominados vibradores. Estes podem ser classificados como se segue:

- vibrador mecânico de inércia: a força de vibração é promovida pela rotação de massas desequilibradas;
- vibrador excêntrico: produz forças de vibração intensas e de baixa frequência, A vibração é devida ao uso de excêntricas em seus eixos;
- vibrador pneumático ou hidráulico: promove alta frequência de vibração, a vibração é ocasionada pelo movimento de um pistão que é acionado por um fluido;

- vibrador eletromagnético: possui frequências altas possui uma precisa regulação de frequência;
- vibrador sonoro: produz ondas sonoras quando o ar escoar num gerador de som.

Desta maneira, a secagem em vibro-fluidizados é utilizada para materiais termolábeis, que requerem tempos curtos de residência, altas taxas de secagem e baixas temperaturas de secagem, tais como materiais granulares, pastas e pós, tanto para materiais farmacêuticos, biológicos e alimentares (BORDE et al., 1996).

O início da circulação dos sólidos, que caracteriza o leito de jorro, acontece quando a vazão de ar torna-se suficiente para arrastar pneumáticamente as partículas para cima do nível do leito. Estas partículas passam por uma região central, de alta porosidade, denominada jorro, e ao atingir o ponto em que sua velocidade se iguala a zero, passam a ter movimento descendente através de uma região de menor porosidade. Esta região está localizada entre as paredes da coluna e o jorro e é denominada região anular ou ânulo. As partículas podem retornar ao jorro ao longo de toda interface entre o jorro e a região anular, entretanto, a maior parte dos sólidos desloca-se para baixo e só na região da base invertem seu sentido de movimento retornando ao deslocamento ascendente. Desta maneira é estabelecido um movimento cíclico dos sólidos.

No caso do leito de jorro, a mistura local não é tão alta como em um leito fluidizado, porque a maioria das partículas move-se como um leito empacotado no ânulo e apenas 15% das partículas estão no jorro a cada momento. Porém, a vantagem distinta que o leito de jorro promove é que a taxa de circulação de sólidos é alta, crescendo com o aumento da vazão. Em um jorro cerca de 60 a 70% do fluido se move através do ânulo (THORELY et al., 1959) e como o fluido não está na forma de bolhas, o contato entre o fluido e o sólido é intenso. A vazão requerida para atingir o jorro é sempre alta e por isso o tempo de contato é baixo exigindo altas taxas de reciclo. O jorro aparece não apenas como uma forma especial de fluidização, podendo ser aplicado a partículas grandes, que não produzem boa fluidização. O tipo de movimentação de partículas em um leito de jorro impede o “*back-mixing*” e devido ao movimento muito rápido das partículas existe a tendência de eliminar o gradiente de temperatura no leito, que usualmente ocorre em leitos empacotados.

Algumas limitações na utilização da técnica do leito de jorro foram relacionadas por Mujumdar (1982): a perda de carga é elevada antes de se atingir o jorro estável, o fluxo de ar é governado mais pelas necessidades do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa, a capacidade é limitada (devido aos limites no diâmetro do cilindro e na altura máxima do leito) e há dificuldades no aumento de escala. A ordem de magnitude de um jorro

parece estar em 3 m (LIM; GRACE, 1987) e, finalmente, a grande faixa de tempos de residência das partículas.

É importante registrar a existência de uma altura máxima do leito, onde é possível obter um jorro estável sem que ocorra uma fluidização heterogênea, um movimento empistonado ou o estrangulamento do jorro. Essa altura é função da geometria do sistema e das propriedades e dimensões das partículas envolvidas. Define-se como altura máxima do leito a altura na qual o jato não pode penetrar até a superfície do leito e a velocidade no topo do leito é menor que a velocidade mínima de fluidização (GRBAVCIC et al., 1991). Inicialmente, com pequenas vazões, o gás apenas percola entre as partículas e o sistema comporta-se como um leito fixo. Com o aumento do fluxo, surge nas proximidades do orifício de entrada do gás uma cavidade devido à ação do jato que já é suficiente para deslocar algumas partículas. Esta cavidade vai se alongando dando origem ao jorro interno, sempre com um aumento de perda de pressão até um pico. Um incremento na vazão após este estágio ocasiona uma queda brusca de pressão e neste instante o jorro aflora na superfície. Neste ponto a perda de pressão torna-se constante e um aumento no fluxo do gás acarreta somente elevação da fonte.

Uma modificação no leito de jorro é o leito de jorro fluidizado, que foi descrito pela primeira vez por Chatterjee (1970). Nele o fluido é também fornecido à região anular promovendo a sua fluidização e atenuando alguma tendência na formação de zonas estagnadas ao longo da base da coluna. Como resultado obtém-se melhor mistura de sólidos e o contato do fluido com o sólido na região anular é melhor que nos jorros convencionais (CHATTERJEE, 1970; MADONNA et al., 1980). Estes leitões apresentam também menor tendência das partículas se aglomerarem (KONO, 1981; YE, 1988). A utilização de uma aeração adicional diminui a tendência na formação de zonas estagnadas ao longo da base da coluna e tem como resultado uma melhor mistura e distribuição dos sólidos no leito, o que melhora o contato do fluido com o sólido na região anular (MADONNA et al., 1980).

Secadores *spray dryer* ou secadores por atomização são utilizados na secagem de soluções, suspensões, emulsões, polpas e pastas no processamento de alimentos (MASTERS, 1996). Os produtos secos em spray podem variar entre *baby food*, queijos e alguns derivados, leite de coco, café, ovos, condimentos, maltodextrina, leite, caldos preparados (sopas), alimentos à base de soja, extratos de plantas, alimentos à base de açúcar, chás, tomate, proteínas vegetais, polpas de frutas (ROSA; TSUKADA; FREITAS 2007).

A secagem em *spray dryer* envolve o bombeamento de um líquido concentrado através bicos atomizadores ou aspersores que formam pequenas gotas. Estas, por sua vez são

injetadas contra um fluxo de ar quente que força a rápida secagem e produz um fino produto na forma de pó.

Existem vários componentes específicos em um spray, entre eles estão o sistema de atomização, o sistema de aquecimento e circulação de ar e o sistema de separação do pó após a secagem. Entre algumas vantagens apresentadas por este método de secagem está a possibilidade de se operar continuamente e a obtenção de um produto com padrão de qualidade constante.

A fim de se conseguir uma rápida secagem com o sistema de pulverização, pequenas gotas de líquido devem ser formadas. Isto produz uma nuvem de partículas com uma grande área superficial na qual vai ocorrer a secagem, o que pode ser conseguido na indústria através de duas maneiras. A primeira é a utilização de um bocal de alta pressão, no qual o líquido alimentício é bombeado a alta pressão (700 a 1000 kPa) através de um pequeno orifício no interior da câmara do equipamento. As gotas produzidas têm seu tamanho variando entre 100 e 300 μm , o qual é controlado através da pressão do fluido contra o bocal. A segunda forma de se produzir as gotículas é a atomização centrífuga. Nesta o líquido é bombeado para um disco girando, onde é acelerado pela força centrífuga e expelido pelas extremidades do atomizador. O tamanho das gotículas resulta de uma complexa relação entre a rotação do disco, a vazão do líquido e o diâmetro dos furos do atomizador (HELDMAN; HARTEL, 1998).

O ar de secagem é captado da atmosfera e é aquecido antes de ser injetado na câmara de secagem. A escolha do método de aquecimento e da temperatura do ar de secagem é feita de acordo com a avaliação econômica e com o produto que está sendo seco, respectivamente. O aquecimento pode se dar por resistências elétricas, por queima de gás combustível ou por trocador de calor. Produtos como ovo e leite não devem ultrapassar a temperatura de 100°C, o que provocaria a desnaturação de proteínas. Por outro lado, produtos como café podem suportar temperaturas maiores, como 250°C sem que ocorra sua degradação (HELDMAN; HARTEL, 1998).

O tempo de residência do produto no interior da câmara de secagem, que pode variar de alguns metros a 30 metros de altura, é tipicamente entre 5 e 100 segundos. Neste tempo, as gotículas vão de uma umidade inicial de 60% para até 5%.

Geralmente o alimento é injetado no topo da câmara e cai para o fundo por gravidade. Em geral para alimentos o ar de secagem é injetado no mesmo sentido do produto, de modo que o ar e o produto entram no topo da câmara e vão para o fundo, onde o ar é separado do pó seco e o produto é removido do secador. Nesta operação concorrente, o produto com umidade

inicial alta entra em contato com o ar na temperatura mais alta de tal forma que enquanto a água é removida do produto este permanece na sua temperatura de bulbo úmido, a qual geralmente não ultrapassa 50°C. Quando o produto chega ao seu estado seco, o ar já se resfriou, o que diminui o risco de degradação pela temperatura.

Uma vez que o pó seco atinge o fundo do secador, ele é separado do ar e o produto é removido para um processo adicional de secagem ou para o empacotamento. A separação primária é feita através da força gravitacional e a separação entre o pó fino e o ar é realizada através de um ciclone

Um dos problemas presentes na secagem por *spray* é a formação de crostas no equipamento. Durante a aspersão, o produto é pulverizado para as paredes do equipamento. Se estas gotículas não estiverem suficientemente secas quando entrarem em contato com as paredes da câmara, elas aderem à mesma e formam um aglomerado de partículas. A Figura 2.6 mostra de forma resumida os fatores que afetam a secagem em *spray*, alterando assim a eficiência do processo e a qualidade do pó obtido.

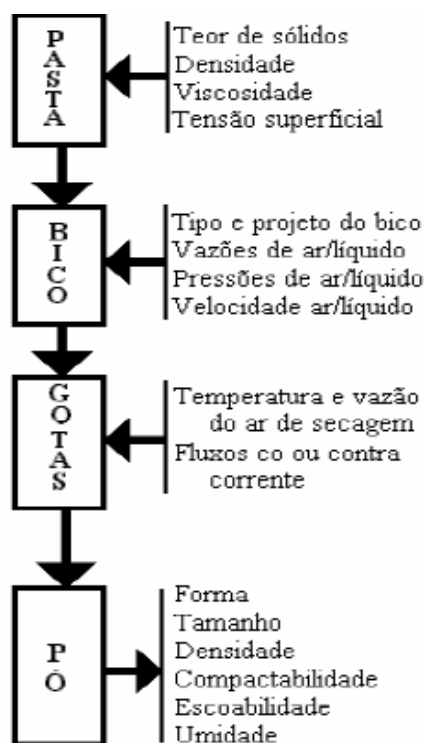


Figura 2.6: Fatores que afetam a secagem em *spray* (LABMAQ, 2003).

2.4 Leito pulso-fluidizado

Embora amplamente utilizado na indústria, leitos fluidizados possuem aplicações limitadas, devido às propriedades das partículas, altura mínima que proporcione fluidização uniforme, ocorrência de fluidização agregativa, dentre outras (RIBEIRO, 2005). Segundo Kudra (2002), estas limitações podem ser minimizadas e até mesmo eliminadas quando utilizado um leito pulso-fluidizado, devido ao fluxo periódico do gás no leito fluidizado que este equipamento proporciona.

Tratando-se do projeto de um leito pulso-fluidizado, todo o leito ou seções podem ser fluidizados, mas as pulsações são transmitidas somente para o leito e não para a estrutura do secador (GAWRZYNSKI; GLASER, 1996).

Os leitos pulso-fluidizados têm sido destacados por suas vantagens, dentre as quais: melhor qualidade de fluidização, efeito de contato entre o sólido e o gás, melhoria na transferência de calor, possibilidade do processamento de partículas dispersas (LI et al., 2004), economia de até 50 % de energia (KUDRA; MUJUMDAR, 1995; JESOWSKA, 1993), mistura intensa de materiais com alto teor de umidade (GAWRZYNSKI et al., 1996).

Os secadores de leito pulso-fluidizados podem trabalhar com partículas que apresentem maior distribuição granulométrica e irregularidade geométrica, quando em comparação aos leitos fluidizados convencionais. Nos leitos de fluidização contínua esta flexibilidade não existe. Desta forma, o estudo de uma gama de materiais inadequados para a fluidização convencional pode ser feito em leitos movimentados por pulso-fluidização (NITZ, 2006).

Li et al. (2004) observaram que somente o pulso de gás não é suficiente para fluidizar partículas grandes e alguns métodos de pulso-fluidização como os mencionados se apresentam limitados na fluidização destas, entretanto, eles se apresentam muito eficientes para a fluidização de pós finos e partículas pequenas. Estes autores combinaram a utilização de um fluxo de gás contínuo somado a um fluxo pulsante. Neste método, a tarefa de pulsação pode ser aliviada para o dispositivo responsável pelo efeito pulsante.

De um ponto de vista prático, Li et al. (2004) acreditam que o fluxo pulsante de baixa frequência e alta amplitude pode promover a mistura dos sólidos e eliminar pontos quentes no leito, o que é extremamente importante na secagem de materiais biológicos.

No leito pulso-fluidizado, o fluxo de gás é liberado em uma modalidade selecionada de onda (ex: onda quadrada ou senoidal), que causa a vibração do leito, substituindo assim a

vibração mecânica pela vibração fluidizada (fluxo de gás alternado) (LI et al., 2004). Na pulso-fluidização ocorre a variação periódica da vazão de gás, na qual o fluxo é mantido constante num determinado nível (fase ativa), e outra, onde o fluxo de gás é fechado (fase inativa). Esse tipo de fluidização pode ser visto na Figura 2.7.

Na literatura, existem vários modos de se realizar a pulso-fluidização, entre eles: (1) regulagem do fluxo de gás através de uma válvula solenóide (JIN; NIE; LIU, 2001) ou uma válvula borboleta girando a uma velocidade angular específica (GAWRZYNSKI; GLASER, 1996); (2) projetando distribuidores específicos de gás (KÖKSAL; VURAL, 1998); (3) utilizando gás de combustão como o gás fluidizador (MANSOUR, 1993). Outra maneira de se obter a fluidização é a distribuição sequencial da corrente gasosa, nesta técnica, o fluxo gasoso é periodicamente redirecionado para diferentes seções do leito (NITZ, 2006). No Leito fluidizado pulsado rotativo, o distribuidor de ar multi-orifícios é dividido em duas partes: o prato perfurado que suporta as partículas do leito fixo e distribui o gás uniformemente e o disco rotativo que, periodicamente, distribui o gás em toda a área da seção do prato perfurado (AMBROSIO-UGRI; TARANTO, 2004).

De acordo com Strumillo e Kudra (1986), os secadores pulso-fluidizados podem ser utilizados para a secagem de materiais com alto teor de umidade livre e também para alimentos que não contém este tipo de umidade.

São encontrados poucos trabalhos sobre a pulso-fluidização e os equipamentos industriais são poucos e por isso deve-se considerar que as vantagens desta técnica em relação à convencional devem ainda ser bastante estudadas e difundidas (NITZ, 2006).

Poirier; Kudra e Platon, (2001) estudaram a possibilidade de secar no leito pulso-fluidizado materiais de difícil tratamento em fluidização convencional, como cubos de cenou-

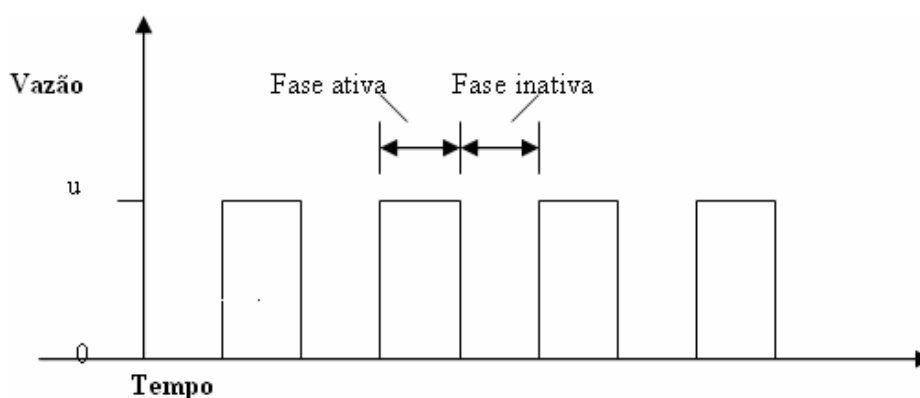


Figura 2.7: Diagrama esquemático do sistema pulsante com onda quadrada.

-ra, casca de camarão e sub-produto de cevada pós-fermentação, destinado a produção de ração animal em cervejarias.

Em estudos realizados por Wang e Rhodes (2005a e 2005b), utilizando a pulso-fluidização como técnica para evitar o colapso de leitos fluidizados, a conclusão foi de que a oscilação da velocidade superficial do gás ajuda a evitar a formação de colapso de partículas que têm a tendência de se aglomerar.

A secagem de arroz em secador pulso-fluidizado foi feita por Prachayawrakorn et al. (2005), onde a pulso-fluidização foi obtida através do giro alternado de duas folhas metálicas, já que o arroz tende a formar aglomerados.

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

Ambrosio-Ugri e Taranto (2007) estudaram a secagem de ácido 2-hidróxidobenzóico em secador pulso-fluidizado rotativo e concluíram que pode ser realizada a secagem de materiais particulados coesivos neste tipo de secador, tendo como resultado a distribuição uniforme do gás dentro do leito e uma secagem uniforme do sólido.

JINESCU et al. (2000) estudaram o processo de secagem de biomateriais em pó através da intensificação do processo de fluidização. Tal intensificação da fluidização foi feita de três maneiras: pela adição de partículas inertes, através de fluidização com um agitador mecânico e com a fluidização pulsada. Em relação à adição de inertes, foram estabelecidos o diâmetro e a porcentagem ótima de adição do inerte para garantir uma menor velocidade de mínima fluidização. Em relação à fluidização com agitador mecânico, verificou-se que a velocidade de mínima fluidização diminui com o aumento da frequência do agitador. Para a fluidização pulsada, foi observada uma diminuição da queda de pressão mínima e da velocidade mínima de fluidização com o aumento da frequência de pulsação.

O leito pulso-fluidizado rotativo tem sido muito bem aplicado na secagem de produtos cristalinos que tem a capacidade de se agregar ou grudar, como o açúcar cristal, o sal marinho, etc., bem como na secagem de produtos biológicos que possuem alto conteúdo de umidade, como sementes de girassol, entre outras (DJURKOV, 1998; GAWRZYNSKI; GLASER, 1996; ELENKOV; DJURKOV, 1992).

Em escala industrial, pode-se apresentar o exemplo citado por Gawrzinski et al. (1996), que apresenta secagem seguida de 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 relação entre a técnica de secagem em secador do tipo pulso-fluidizado e outras, como secador rotativo e leitos vibrados. Os consumos de energia e de agentes de secagem nos testes em leito pulso-fluidizado mostraram-se muito inferiores.

Tantas características e resultados positivos, determinados em secadores piloto e também de porte industrial, mostram que a pulso-fluidização é muito promissora. Estes fatos constituem a justificativa para que os estudos nessa área sejam incentivados.

2.5 Qualidade do produto

Certas características são desejáveis nos produtos em pó como habilidade de se unir à água durante a sua reconstituição, dispersibilidade do pó em água e solubilidade. Mudanças nos atributos dos produtos, particularmente na superfície das partículas podem diminuir sua habilidade de se dispersar em água. A aglomeração das partículas pode também influenciar na superfície disponível para a dissolução, isto é, a superfície que vai entrar em contato com a água. A taxa de dissolução e a solubilidade final do produto também dependem da natureza da superfície das partículas.

Os alimentos em pó apresentam diferentes propriedades físicas (tamanho e distribuição das partículas, densidade aparente e de partículas, porosidade, solubilidade, molhabilidade, dispersibilidade, entre outras), sendo que a medida e a caracterização destas propriedades ajuda a definir o produto, os parâmetros do processo de produção e os fenômenos que influenciam no seu comportamento (TEUNOU; FITZPATRICK; SYNOTT, 1999).

Segundo Peña (2003), quando um pó é disperso sobre a superfície de um líquido, as etapas que ocorrem são: *molhabilidade*, que consiste na penetração do líquido para o interior da estrutura do pó devido à capilaridade; *imersibilidade*, que é a imersão das partículas ou de porções do pó no líquido; *dispersibilidade*, ou seja, a dispersão do pó no líquido; e *solubilidade* que é a dissolução das partículas pelo líquido, desde que estas sejam solúveis.

As propriedades físicas do suco relacionado à facilidade de reconstituição, incluem o índice de umidade, densidade aparente, densidade verdadeira e porosidade respectiva da partícula, as propriedades instantâneas (penetração, molhabilidade, dispersibilidade, e solubilidade), tamanho de partícula e distribuição. Estas propriedades são influenciadas pela natureza da alimentação (índice, viscosidade e temperatura de sólidos), tipo de secador, do pulverizador, velocidade na alimentação e pressão, temperaturas de entrada e saída do ar (HALL; IGLESIAS, 1997; NATH; SATPATHY, 1998).

2.6 O uso de suportes na secagem

Segundo Brennan; Herrera; Jowitt (1971), a desidratação é considerada como uma das mais difíceis entre todas as técnicas disponíveis a serem aplicadas a sucos de frutas. Os sucos são altamente sensíveis ao calor e possuem altas proporções de substâncias higroscópicas tais como açúcares, que podem trazer problemas quando se trata de controlar o tempo de secagem, remoção do produto da zona de secagem e manipulação do produto final.

Na desidratação de sucos, é provável que apenas o suco de tomate possa ser atomizado sem o uso de aditivos, mas usando baixa temperatura e atomizadores especiais. Para a maioria dos outros sucos, a desidratação por *spray dryer* sem aditivos exige a instalação de dispositivos especiais na câmara de secagem, tais como: paredes resfriadas, resfriadores e dispersores de ar secundários, reciclagem de produto seco, indução de cristalização no alimentador. Para evitar a instalação de tais dispositivos é possível a adição de coadjuvantes (suportes) no líquido de alimentação, algumas vezes em quantidades superiores a 75%, calculado sobre o teor de sólidos totais (MASTERS, 1991).

Quando diferentes açúcares tais como frutose, glicose, sacarose, lactose, maltose, xaropes de glicose e maltodextrinas, são comparados em seus desempenhos como suporte para atomização, os melhores são os produtos com maiores temperaturas de transição vítrea (T_g) e de fusão (T_m). Estes parâmetros são relacionados com o comprimento das cadeias dos carboidratos. Quando usados como suportes de atomização para suco de laranja, maltodextrinas de baixa Dextrose Equivalente (DE) apresentaram maiores temperaturas de fusão do que maltodextrinas de (DE) mais alto, nas mesmas concentrações (TSOUROUFLIS, 1976).

Um suporte tem por objetivo facilitar o processo de secagem, melhorar a qualidade do produto final e reduzir os custos do processo. Entre os suportes de amido e derivados, podemos citar: amidos e féculas, pirodextrinas ou dextrinas ácidas, dextrinas enzimáticas, maltodextrinas, ciclodextrinas e xaropes. Encontram-se na literatura citações de uso de temperaturas altas no sistema de secagem de sucos de frutas, mesmo levando em conta a energia requerida para o processo de evaporação. Por outro lado, o tempo de secagem é muito mais curto que nos outros processos e os danos das partículas podem ser reduzidos pelo controle do tempo de residência das partículas na zona quente do secador. Maltodextrinas e xaropes de glicose são suportes usuais para sucos de laranja, limão, pêssego e abricó, como relatado por vários autores (MASTERS, 1991; LLOYD; NELSON, 1984).

A presença de substâncias ácidas nos produtos a serem desidratados parece ser um importante parâmetro. Por exemplo, o suco de laranja é mais difícil de processar que os mesmos materiais com teor de acidez mais baixa. No entanto a influência destes ácidos é difícil (BHANDARI et al., 1993).

Segundo Brennan; Herrera; Jowitt (1971) diversos produtos podem ser usados como suportes na secagem de sucos de frutas por atomização. A seleção do melhor suporte deve levar em conta uma série de fatores que envolvem a qualidade do produto, o preço do suporte e o desempenho no processo. Os autores citam as dificuldades para se obter um produto de qualidade sem uso de suporte e relatam que não conseguiram desidratar suco de laranja com 40% de sólidos sem uso de suporte, pois ocorria a aderência do produto na parede do secador. O rendimento do processo sem suporte foi muito baixo, de 1 a 2%, calculados sobre o total de sólidos de alimentação, mesmo considerando o material retido nas paredes que era difícil de ser removido. O produto era higroscópico e de difícil manuseio.

A maltodextrina é um dos materiais mais utilizados como encapsulante na secagem por atomização, isso devido ao seu baixo custo e baixa higroscopicidade, evitando a aglomeração das partículas. Esse material também possui efeito antioxidante e uma ótima retenção de substâncias voláteis, na ordem de 65 a 80% (KENYON; ANDERSON, 1988). Maltodextrina é o nome comum para oligo e polissacarídeos de glicose, formados durante a decomposição parcial do amido. Dextrinas ou maltodextrinas são produzidas pelo aquecimento do amido (gelatinização) seguido da hidrólise enzimática. O grau de decomposição química fica entre aquele do amido e do xarope de amido, com um DE (Dextrose Equivalente) entre 2 e 20. Usualmente, estes compostos são produzidos na forma de pó. O conteúdo de umidade varia de 3,0 a 5,0%. Estes produtos na forma seca são brancos, têm boa estabilidade (*free-flowing*), com sabor muito suave, e com pouca ou nenhuma doçura.

As maltodextrinas são freqüentemente classificadas pelos seus valores de DE. A Tabela 2.1 resume estes dados.

Estes carboidratos podem ser reconstituídos em água para clarear ou turvar soluções, dependendo do tipo de produto. Eles são igualmente solúveis em alimentos líquidos comestíveis, incluindo leite, sucos de frutas, sopas e outros produtos aquosos.

Um outro aditivo muito utilizado em secagem é a goma arábica. Trata-se de um exudado gomoso dessecado dos troncos e dos ramos da *Acacia senegal* ou de outras espécies africanas de *Acacia*, a qual possui muitas espécies distribuídas nas regiões de clima tropical e subtropical. As mais importantes áreas de crescimento das espécies que produzem as melhores gomas são o Sudão e a Nigéria (BEMILLER; WHISTLER, 1996).

A goma arábica é um heteropolissacarídeo complexo de estrutura muito ramificada, cuja cadeia principal é formada por unidades de D-galactopiranosose, unidas por ligações glicosídicas em β -D-(1 \rightarrow 3). Cadeias laterais com diferentes estruturas químicas, formadas de D-galactopiranosose, L-ramnose, L-arabinofuranose, e ácido D-glucurônico estão ligadas à cadeia principal por ligações β (1 \rightarrow 6) (POTTER; HOTCHKISS, 1995).

A goma arábica dissolve-se facilmente quando agitada em água. Ela é a única entre as gomas alimentícias que apresenta alta solubilidade e baixa viscosidade em solução, facilitando desta maneira o processo de atomização (ROSEMBERG; KOPELMAN; TALMON, 1990). Industrialmente, a goma arábica é utilizada para retardar ou prevenir a cristalização de açúcares em produtos de confeitaria, para estabilizar emulsões e para aumentar a viscosidade de alimentos (efeito espessante). Em produtos de laticínios congelados, como nos sorvetes, ela ajuda na formação e retenção de pequenos cristais de gelo. Em bebidas, a goma arábica tem a função de estabilizar a espuma. É especialmente importante como material encapsulante em mistura de bebidas cítricas em pó com a função de reter os componentes voláteis de aromas (WHISTLE; DANIEL, 1985).

De acordo com Reinecius (2001), a goma arábica pode ou não oferecer proteção con-

Tabela 2.1: Composição de maltodextrinas em função dos valores de DE (JUNK; PANCOAST, 1973).

Faixa de DE	Composição em carboidratos (%)			
	Monossacarídeos	Dissacarídeos	Trissacarídeos	Tetrassacarídeos ou superior
9-12	1	4	5	90
13-17	1	5	7	87
17-20	1	7	9	83

-tra a deterioração oxidativa, dependendo da goma utilizada. Algumas espécies oferecem uma notável proteção, enquanto outras oferecem pouca, ou nenhuma proteção ao material ativo.

2.7 Isotermas de sorção de umidade

O conhecimento das propriedades termodinâmicas envolvidas no processo de sorção da água nos alimentos é importante na desidratação em vários aspectos. Primeiro, as propriedades termodinâmicas dos alimentos relacionam a concentração de água no alimento com sua pressão parcial de vapor, o que é crítico para a análise do fenômeno de transferência de massa e calor durante a desidratação. Segundo, elas determinam o ponto final ao qual o alimento pode ser desidratado. Terceiro, com a entalpia de sorção é possível se conhecer a quantidade mínima de energia para se remover uma certa quantidade de água de um alimento. Finalmente, o conhecimento das propriedades termodinâmicas pode ajudar no entendimento da microestrutura associada com o alimento, assim como interpretações teóricas para fenômenos físicos que ocorrem na relação alimento-água (RIZVI, 1995).

A relação entre o conteúdo de umidade de equilíbrio do material com o ar é determinada, experimentalmente, permitindo-se suficiente tempo de contato do material com o ar a uma temperatura e umidade constantes. Pontos obtidos para vários valores de umidade do ar, à mesma temperatura formam a curva chamada isoterma de equilíbrio (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

Em lugar da umidade relativa de equilíbrio, a isoterma pode ser construída em relação à atividade termodinâmica da água, a_w (FORTES; OKOS, 1980), que é definida como:

$$a_w = \frac{P_{vm}}{P_{vo}} = \frac{\varphi}{100} \quad (2.5)$$

Onde:

a_w = atividade de água (-)

P_{vm} = pressão de vapor da água no material alimentício (Pa)

P_{vo} = pressão de vapor da água na saturação (Pa)

φ = umidade relativa na qual o alimento nem ganha e nem perde umidade para a atmosfera (%).

Brunauer et al. (1940), classificaram as isotermas de adsorção em cinco tipos. A isoterma de adsorção do tipo I é denominada Langmuir e a do tipo II sigmóide ou em forma de S. Os outros três tipos não possuem nomes especiais. As isotermas de sorção de umidade da maioria dos alimentos apresentam-se não linear, geralmente no formato sigmoidal, sendo classificadas como do tipo II. Alimentos ricos em componentes solúveis como açúcares, apresentam comportamento do tipo III. Os cinco tipos de isotermas de adsorção podem ser vistos na Figura 2.8.

Outro comportamento comumente observado é que diferentes caminhos são obtidos durante os processos de adsorção e a dessorção, resultando na histerese. A isoterma de dessorção permanece acima da isoterma de adsorção, desta maneira um maior conteúdo de umidade é retido no processo de dessorção, quando comparado à adsorção a uma dada umidade relativa (RIZVI, 1995). Portanto, como o equilíbrio pode ser atingido por caminhos distintos dependendo se a umidade foi absorvida ou dessorvida, as isotermas são estritamente chamadas de isotermas de adsorção ou dessorção (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

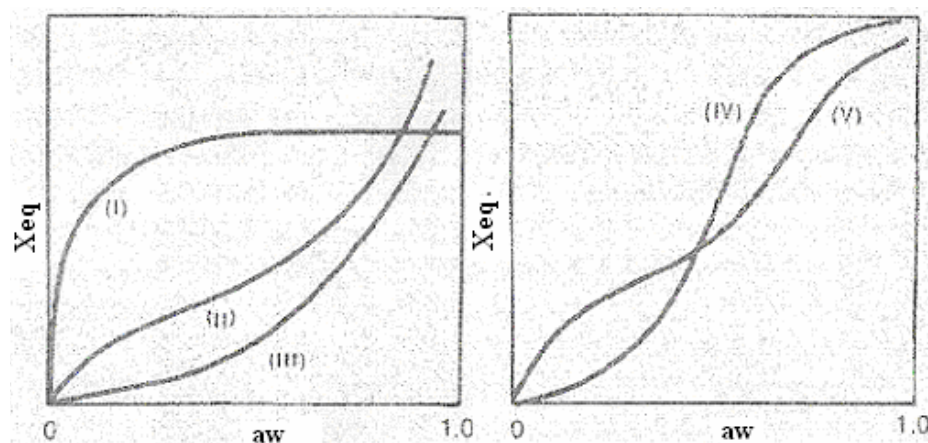


Figura 2.8: Tipos de isotermas de adsorção de Van der Waals (BRUNAUER et al., 1940).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios com os secadores pulso-fluidizado e vibro-fluidizado foram realizados no Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos (UNESP- Campus de São José do Rio Preto), onde os equipamentos foram construídos.

As secagens por atomização (*spray dryer*) foram realizadas no Laboratório de Operações Unitárias da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA), USP de Pirassununga-SP.

3.1 Materiais

3.1.1 Partículas e polpas

Os materiais utilizados como inertes foram esferas de vidro e teflon. Algumas características destes materiais podem ser vistas na Tabela 3.1.

Tanto as partículas de teflon como as partículas de vidro utilizadas tinham formato esférico. As esferas de teflon tinham diâmetro de 10 mm, apresentando uniformidade de tamanho. Como as partículas de vidro não apresentavam uniformidade de tamanho, foi realizada a classificação das mesmas através de peneiramento, utilizando-se peneiras Tyler 3^{1/2}; 4, 5 e 6. As peneiras foram acopladas a um vibrador de bandejas Produtest, que trabalhou sobre grau de agitação no nível máximo por 5 minutos. O diâmetro médio de Sauter obtido foi de 4,31 mm.

Tabela 3.1: Características dos materiais inertes utilizados (VAN VLACK, 1984).

Material	Densidade (g/mL)	Condutividade Térmica (W/mm °C)	Dilatação Linear (°C ⁻¹)
Vidro comum	2,5	0,00075	9 x 10 ⁻⁶
Teflon®	2,2	0,0002	100 x 10 ⁻⁶

Após a verificação de que a distribuição de tamanho do vidro estava interferindo significativamente no comportamento fluidodinâmico do leito pulso-fluidizado optou-se por utilizar as partículas de vidro que haviam permanecido entre as peneiras com aberturas 4,76 e 4 mm, de modo que o diâmetro médio das partículas foi de $\bar{d}_p = 4,38$ mm.

Nos experimentos de filmagem do leito para avaliar o grau de agitação das partículas foram empregadas esferas de teflon, sendo parte delas pintadas de preto com tinta esmalte em *spray*.

O suco de limão foi obtido a partir de limões Taiti (*Citrus aurantifolia Swing var. taiti*) adquiridos no mercado local. Estes apresentaram estado de maturação avançado com coloração verde/ amarela, como pode ser visto na Figura 3.1. As frutas foram descascadas manualmente, cortadas ao meio e o suco foi extraído com o auxílio de um espremedor manual.

O suco de limão foi passado por uma peneira plástica, com orifícios de 1,4 mm, e o teor de sólidos solúveis do suco foi medido em refratômetro óptico.

A obtenção do suco para a realização da secagem no *spray dryer* ocorreu de forma similar à anterior, entretanto foi utilizada uma despulpadeira, já que a quantidade de suco necessária para a realização do experimento era maior.

Para realização dos experimentos utilizando pasta de limão no secador pulso-fluidizado, foi usado suco de limão concentrado, o qual foi doado pela empresa Bascitrus Agroindústria S.A. de Mirassol-SP. Os experimentos de secagem de pasta de tomate no secador de leito pulso-fluidizado foram realizados com extrato de tomate comercial.



Figura 3.1: Limões in natura para obtenção do suco.

Nas etapas posteriores, o termo suco será utilizado referindo-se ao suco extraído diretamente da fruta, o suco concentrado de limão será referido como pasta de limão. Ambos serão utilizados com e sem maltodextrina.

Os experimentos de secagem com pasta de gesso foram feitos com gesso de acabamentos, da marca Juntalider.

Nos ensaios realizados no secador de leite pulso-fluidizado, a maltodextrina utilizada foi da marca MOR-REX® 1910, com dextrose equivalente (DE) igual a 10. Nos experimentos de secagem no *spray dryer* as maltodextrinas utilizadas foram de DE 10 e DE 20, da marca Cargill.

Na determinação das isotermas de sorção de umidade, os aditivos utilizados foram maltodextrina da marca MOR-REX®, com $17.0 \leq DE \leq 19.9$ e a goma arábica foi Synth (Brasil).

3.1.2 Secador de leite Pulso-fluidizado

O secador de leite pulso-fluidizado é apresentado na Figura 3.2, constituído pelas seguintes partes:

- (1) ventilador centrífugo/radial;
- (2) compartimento de aquecimento do ar;
- (3) painel de controle;
- (4) leito de inertes;
- (5) compartimento de armazenagem de pasta;
- (6) sistema de alimentação de pasta;
- (7) ciclone;
- (8) recipiente de recolhimento de pó;
- (9) sistema responsável pela pulsação de ar;
- (10) manômetro de tubo em “U”.

O ventilador centrífugo contou com um motor elétrico de 2CV de potência e rotação de 1750 rpm. A frequência de rotação e, conseqüentemente, a velocidade do ar, foi controlada por um variador de frequência.

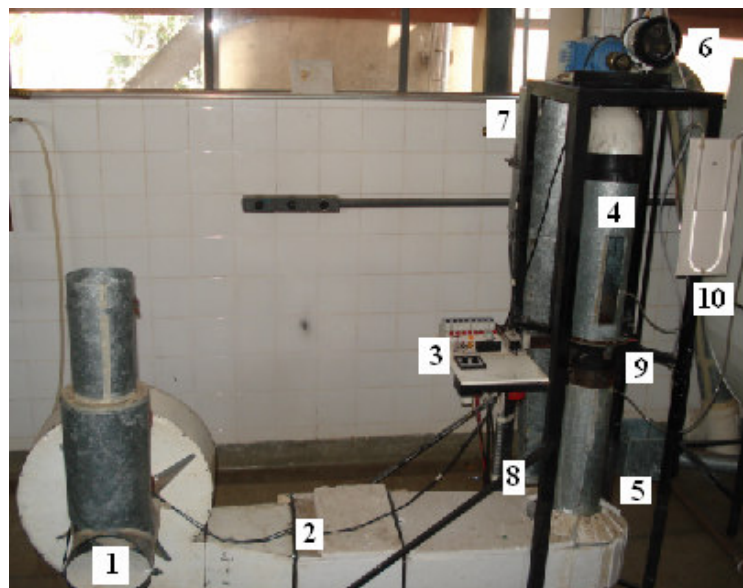


Figura 3.2: Secador de leito pulso-fluidizado

Ao sair do ventilador, o ar foi direcionado para o compartimento de aquecimento, no qual estava localizado um conjunto de resistências elétricas, que contava com 8 resistências de 1200 W cada e uma resistência de 1000W, a qual tinha sua energia controlada por um potenciômetro, o que permitia o ajuste fino da temperatura do ar.

O painel de controle do equipamento possuía oito disjuntores que acionavam as resistências de 1200W e um potenciômetro, que acionava uma resistência de 1000W. Nele encontravam-se ainda a chave do ventilador e o relê de tempo que controlava a abertura e fechamento da solenóide, responsável pelas pulsações de ar.

O leito de inertes foi construído em chapa de aço galvanizado, com diâmetro de 150 mm e altura de 450 mm e possuía um visor de vidro em sua parte frontal com as dimensões de 60 x 250 mm. Na base do mesmo foi inserida uma tela de inox com orifícios de 1 mm, que permitia a sustentação dos inertes. Um leito com as mesmas dimensões foi construído em acrílico com parede de 3 mm de espessura, o que permitiu a visualização das partículas para a realização dos testes de agitação.

A Figura 3.3 mostra o leito de inertes e o tubo injetor de suco/maltodextrina. No caso da alimentação de suco de limão e suco de limão com maltodextrina a injeção foi feita com o auxílio de uma bomba dosadora do tipo diafragma. A bomba utilizada era da marca Injetronic, modelo V – 1.5/4. Após sair da bomba o suco era direcionado ao leito por uma mangueira de silicone acoplada a um tubo de cobre de diâmetro externo de 3,2 mm e diâmetro interno de 2,0 mm. Este tubo era fixado na parte inferior do leito, sendo que saía da parede do mesmo e

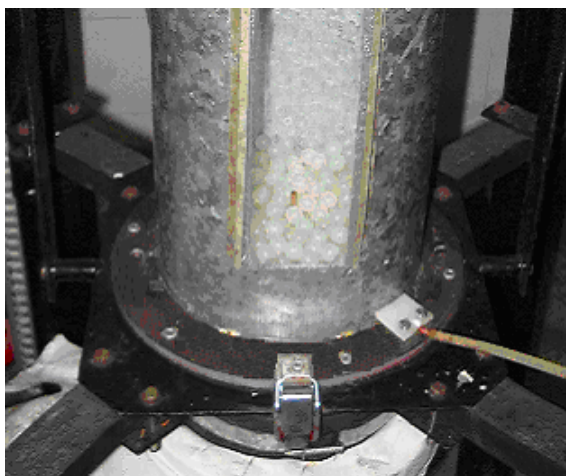


Figura 3.3: Tubo injetor de suco.

terminava na parte central do leito, onde sofria uma curva de 90° e tornava-se paralelo ao fluxo de ar no interior do leito.

Desta forma o tubo de cobre injetava o suco no interior das partículas inertes, com sentido de baixo para cima, ou seja, no mesmo sentido do ar de secagem

No caso das pastas de gesso e de limão, a bomba não foi utilizada, devido ao entupimento do tubo injetor causado pelas pastas. Neste caso foi utilizada uma seringa de 20 mL que era introduzida em um orifício na lateral do leito para a injeção das pastas.

Após passar pelo leito de inertes o ar era conduzido até um ciclone para separação do pó obtido do ar de secagem. O ciclone Lapple foi construído com chapas de aço galvanizado e tinha diâmetro interno de 300 mm e altura de 400 mm na parte cilíndrica. Logo abaixo do ciclone encontrava-se um recipiente para o recolhimento do pó produzido. Maiores detalhes da construção de equipamento e de outras modificações sofridas pelo mesmo ao longo de seu desenvolvimento podem ser vistas no Apêndice B.

O sistema de pulsação foi proveniente de uma válvula tipo borboleta movimentada por uma solenóide da marca Soletec, da série E, modelo 075, com 30 mm de curso. Esta solenóide foi instalada na lateral da tubulação de ar, logo abaixo do leito de inertes. A válvula borboleta foi construída com um disco de chapa metálica número 14 e com diâmetro de 150mm (igual ao diâmetro interno da tubulação). O disco foi inserido na tubulação, podendo ser removido quando o sistema de pulsação não era acionado. O mesmo foi fixado a um eixo pivotante, localizado no centro da tubulação, que realizava um movimento giratório máximo de 90° . O movimento longitudinal da solenóide acionava um braço fixado à ponta do eixo pivotante transformando o movimento longitudinal em movimento giratório. Desta maneira, quando a

válvula solenóide era acionada o disco girava, de modo que sua posição variava 90° em relação ao fluxo de ar. Assim, o fluxo de ar era liberado ou interrompido, de acordo com o acionamento ou desligamento da solenóide.

Um dispositivo instalado na solenóide permitiu o bloqueio do curso de seu pistão em diversas posições. Desta maneira, diferentes ângulos da borboleta podiam ser obtidos através de seu ajuste. A solenóide utilizada pode ser vista na Figura 3.4, localizada ao lado da tubulação de ar logo abaixo ao leito de inertes e o disco no interior da tubulação, responsável pela pulsação do ar, pode ser visto na Figura 3.5.

Para o controle dos tempos de abertura da válvula borboleta, permitindo a regulação dos intervalos de pulsação de ar no leito, foi utilizado um relê de tempo conjugado que controlava dois tempos simultaneamente. O relê de tempo utilizado era da Marca Seltron, modelo RDT-M. Este foi construído por encomenda para atender às condições de processo desejadas.

Através de duas escalas, encontradas no relê, podiam ser programados os intervalos de pulsação de ar, de modo que eram determinados os tempos que o ar passava livremente pela tubulação e os intervalos de tempo que sua passagem era bloqueada.



Figura 3.4: Solenóide responsável pelo efeito de pulsação.

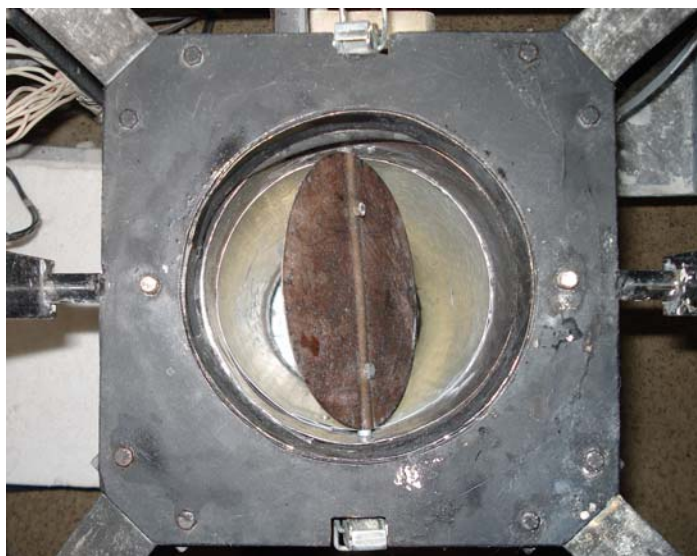


Figura 3.5: Disco responsável pela pulsação de ar, abaixo do leito de inertes.

O relê de tempo tinha dois botões giratórios, com escala de 0-10, sendo que cada posição correspondia a um tempo (válvula aberta ou fechada). Para que fossem obtidos os tempos em cada posição dos botões, foi utilizado um cronômetro digital, sendo realizadas dez repetições para cada posição. O relê de tempo foi inserido no painel de controle do equipamento e pode ser visto na Figura 3.6.

Na construção do equipamento, a ligação entre a câmara de aquecimento de ar e o leito de inertes passou por uma evolução ao longo da construção do equipamento. A primeira versão foi a construção de uma curva, a qual foi feita em chapa galvanizada nº 24, com espessura de 0,64 mm e diâmetro de 150 mm. A mesma pode ser vista na Figura 3.7.

Após testes preliminares realizados no secador, observou-se que em decorrência desta curva o ar era distribuído de maneira heterogênea no leito de inertes. Para tentar minimizar este problema, foi construída uma câmara de distribuição de ar (plenum), um sistema de aletas, um copo distribuidor de ar e uma placa distribuidora.

A câmara de distribuição de ar foi feita em chapa galvanizada nº 24, com espessura de 0,64 mm e com as dimensões de 150x300x700 mm (a mesma seção da câmara de aquecimento), sendo a parte final na forma de semicírculo com 150 mm de raio. O eixo central deste semicírculo coincidia com eixo de uma tubulação vertical que foi construída com o mesmo material citado anteriormente, com 150 mm de diâmetro e 420 mm de altura. A câmara de distribuição de ar pode ser vista na Figura 3.8.



Figura 3.6: Relê de tempo utilizado para controlar os intervalos de pulsação.



Figura 3.7: Curva de conexão entre a câmara de aquecimento e o leito de inertes.
1: Câmara de aquecimento de ar; 2: Leito de inertes.



Figura 3.8: Câmara de distribuição de ar

As aletas foram construídas em chapa galvanizada nº 24, com espessura de 0,64 mm, possuíam 70 mm de largura e em sua parte central foi fixado um eixo, o qual permitia o movimento de giro para qualquer ângulo desejado. Cada aleta possuía uma borboleta na parte externa de seu eixo, que permitia a fixação em qualquer posição angular desejada. O sistema de aletas é apresentado dentro da tubulação na Figura 3.9.

O copo distribuidor foi feito em chapa galvanizada, com as mesmas características da utilizada para as aletas. O copo, com altura de 145 mm e diâmetro de 90 mm foi conectado a uma chapa na forma de anulo, com diâmetro interno igual a 90 mm (mesmo diâmetro do copo distribuidor) e diâmetro externo igual a 150mm (diâmetro da tubulação de ar). Desta forma o ar que seguia pela tubulação abaixo do leito era direcionado para o interior do copo e distribuído por 16 orifícios com 32 mm de diâmetro, localizados em sua lateral. O copo distribuidor foi inserido na parte inferior da tubulação localizada abaixo do leito de inertes e pode ser visto na Figura 3.10.

A placa de orifícios foi construída em *nylon*, com espessura de 8 mm e diâmetro de 150 mm. Inicialmente, a placa foi perfurada com orifícios de 8 mm. A passagem de ar sofreu variações entre 5 e 18 % de área livre em sua evolução. A placa de orifícios responsável pela homogeneização do fluxo de ar no leito de inertes pode ser vista na Figura 3.11.



Figura 3.9: Sistema de aletas utilizado para homogeneização da velocidade do ar no leito com aletas em diferentes posições.



Figura 3.10: Copo distribuidor de fluxo de ar.



Figura 3.11: Placa de orifícios responsável pela homogeneização da velocidade do ar.

3.1.3 Secador de leito vibro-fluidizado

Como modificação no secador de leito pulso-fluidizado, um sistema de vibração no leito foi instalado, através de um sistema de eixo excêntrico. A base metálica na qual o leito de inertes era preso, era ligada à estrutura do equipamento por quatro coxins de borrachas com as dimensões de 20 x 32 x 150 mm, como mostra a Figura 3.12.

Estas borrachas eram aparafusadas à estrutura do equipamento e à base onde ficava preso o leito. Uma estrutura metálica em formato de “U” foi conectada à base do leito, essa tinha sua parte superior conectada ao sistema excêntrico de vibração acoplado ao motor elétrico responsável por este movimento. As borrachas proporcionavam certa mobilidade ao leito, o que possibilitava ao mesmo realizar movimentos verticais de oscilação. O sistema excêntrico e o motor elétrico podem ser vistos na Figura 3.13.

Este sistema podia ter sua excentricidade aumentada ou diminuída, de modo que era possível variar a amplitude do movimento vibratório do leito de 0 mm até 15 mm.

A rotação era proveniente de um motor elétrico de 0,5 CV e um variador de frequência permitia o ajuste da rotação desejada.



Figura 3.12: Base onde o leito de inertes é fixado por presilhas.



Figura 3.13: Sistema excêntrico e motor elétrico responsáveis pela vibração do leito de inertes.

3.1.4 Secador por Atomização (“*Spray Dryer*”)

A Figura 3.14 mostra o secador *spray dryer* utilizado e identifica seus principais componentes.

- (1) Câmara de secagem;
- (2) Ciclone separador de pó;
- (3) Painel de programação e controle;
- (4) Frasco coletor de pó;
- (5) Bico atomizador;

Este equipamento foi construído pela Labmaq do Brasil LTDA, modelo SD 5.0. A sua construção é toda em aço inoxidável e o mesmo tem uma altura de 2,45 m. Primeiramente o ar era captado do ambiente por um soprador, que tinha a função de impulsionar o mesmo até o compartimento de aquecimento do ar. O soprador era do tipo centrífugo, contava com um motor de 4 CV e possuía uma vazão de ar que podia variar de 5,3 a 12 m³/h.

Após deixar o soprador, o ar passava pelo sistema de aquecimento, o qual possuía um conjunto de resistências elétricas que somavam uma potência total de 10.500 W. A temperatura máxima de operação do equipamento é de 250°C, a qual podia ser monitorada através de dois termopares que estavam localizados antes da entrada do ar na câmara de secagem e após a saída do ciclone.

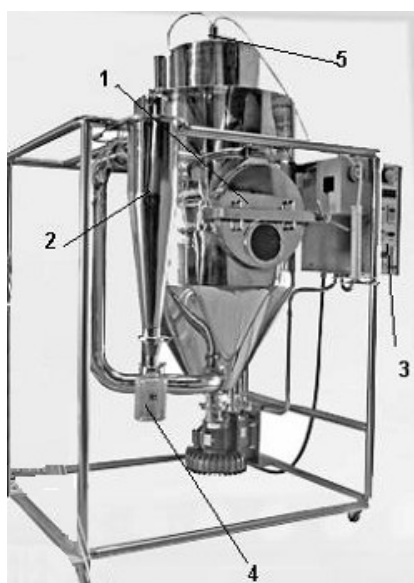


Figura 3.14: *Spray Dryer* e seus principais componentes:

Após a passagem pelo aquecedor, o ar seguia por uma tubulação até a parte superior do equipamento, onde era inserido na câmara de secagem de maneira co-corrente ao produto.

O material a ser seco era bombeado por uma bomba peristáltica, que possuía vazão máxima de 5 L/h. À bomba estavam acopladas mangueiras de silicone que conduziam o material até a parte superior do secador, onde o mesmo se juntava ao ar de atomização proveniente de um compressor. Este ar tinha a função de aumentar a pressão da injeção, para que o material fosse aspergido pelo bico atomizador com orifício de 2 mm.

A câmara de secagem contava com um sistema de vibração mecânico acoplado à base cônica da câmara de secagem, usado na secagem de produtos que apresentam grande aderência às paredes do equipamento, mesmo após secos.

Todo o controle era feito no painel de programação, onde se controlava a vazão do ar de secagem, sua temperatura de entrada e saída, a vazão de polpa injetada e a vazão do ar de atomização. O painel de controle é mostrado na Figura 3.15.



Figura 3.15: Painel de controle do *spray dryer*.

3.2 Métodos experimentais

3.2.1 Experimentos de perda de carga no secador de leito pulso-fluidizado

Os experimentos de perda de carga foram realizados através do acoplamento ao equipamento de um manômetro em U, para que fosse medida a diferença de pressão existente entre dois pontos, sendo que o primeiro imediatamente antes da válvula borboleta responsável pelo efeito pulsante do ar e o segundo logo acima do leito de inertes, a uma altura de 130 mm acima da tela de inox que sustentava os inertes. Para a obtenção das curvas de fluidização, as diferentes velocidade do ar foram conseguidas através do variador de frequência acoplado ao motor do ventilador.

Os tempos de pulsação de ar variaram tanto a amplitude da fase ativa como da fase inativa e todos os dados de tomada de pressão foram obtidos através da leitura do manômetro na fase ativa do processo. As tomadas de pressão foram realizadas tanto para velocidades crescentes do ar como para velocidades decrescentes, para se verificar a existência de histerese.

Os experimentos de perda de carga foram divididos em várias etapas, sendo que foram realizados experimentos de perda de carga no leito, experimentos com a placa distribuidora acoplada ao equipamento e experimentos com e sem o ciclone. Foram utilizados ainda diferentes ângulos na válvula borboleta, entre os quais, 30, 60 e 90°.

As partículas utilizadas foram de teflon, de vidro e de vidro classificadas e as alturas de leito utilizadas foram de 2 e 4 cm.

3.2.2 Avaliação das melhores condições de agitação das partículas inertes

A avaliação do grau de agitação das partículas foi feita através de filmagens do leito e análises das imagens em velocidade reduzida. As filmagens foram realizadas com uma filmadora digital da marca Sony.

Os ensaios foram realizados com o tubo de acrílico e para melhor visualização da movimentação das partículas, esferas de teflon suficientes para cobrir uma camada no interior do tubo foram pintadas na coloração preta e as mesmas eram colocadas sempre na parte inferior do leito antes de submetidas à agitação. Uma régua foi fixada atrás do tubo de acrílico para que fosse possível observar a altura das partículas sob agitação.

As variáveis aplicadas para a agitação das partículas foram o ângulo da válvula borboleta, fixados em 30, 60 e 90° (tomando como referencial uma linha imaginária perpendicular ao fluxo de ar); a altura do leito de inertes, iguais a 2 e 4 cm e a velocidade do ar, que ficou entre 4,5 e 6,5 m/s. A medida das velocidades do ar era realizada através de um anemômetro digital de ventoinha Airflow LCA 6000. Foram realizados ainda testes utilizando ou não a placa distribuidora abaixo do leito. Os intervalos de pulsação de ar se mantiveram fixos em 2s para a fase ativa e 2s para a fase inativa. Para as filmagens foram utilizadas condições adequadas de iluminação, com a instalação de uma lâmpada na parte superior do leito. As imagens foram analisadas em velocidade reduzida, o que permitiu de maneira clara a visualização do movimento das partículas e a forma como as esferas de coloração diferente se misturavam com as demais.

3.2.3 Secagem no leito pulso-fluidizado e avaliação do Hold-up

Os inertes utilizados nos experimentos de secagem foram as esferas de teflon e a altura do leito foi de 4 cm.

Foram realizados experimentos com suco de limão, suco de limão com adição de maltodextrina, pasta de gesso, pasta de limão e pasta de tomate. No caso da injeção do suco de limão e suco de limão com maltodextrina, a injeção ocorreu utilizando-se a bomba dosadora, a qual tinha sua vazão previamente calibrada com uma proveta de 100 ± 1 mL e um cronômetro digital.

Para a secagem da pasta de gesso, com concentração em massa 20% de gesso (p/p) a bomba dosadora não pôde ser utilizada. Durante a realização de testes preliminares tentou-se bombeá-la com a bomba dosadora e observou-se que mesmo com agitação constante da pasta, ocorria a decantação dos sólidos no interior das mangueiras da bomba, o que proporcionava o seu entupimento e interrupção no bombeamento em poucos minutos de processo.

Deste modo, optou-se pela injeção da pasta com uma seringa de 20 mL. Para isso foi utilizada uma mangueira de silicone, que ligava a seringa ao tubo injetor do leito de inertes. Entretanto, como ocorreu com a bomba dosadora, a decantação dos sólidos da solução dentro do tubo de cobre (tubo injetor) provocou o entupimento do mesmo, inviabilizando o método. A forma de injeção encontrada foi a de se fazer um orifício na lateral do leito, para que a seringa fosse inserida no mesmo e a pasta fosse diretamente injetada na superfície das partículas inertes. Para o controle de vazão foi utilizado um cronômetro digital. Dessa forma a pasta era injetada em intervalos de tempos constantes, a fim de se obter a vazão desejada ao experimento.

No caso da pasta de limão, pasta de maltodextrina e pasta de tomate, a injeção foi feita de maneira similar à pasta de gesso.

Para o preparo das amostras de suco com maltodextrina e de pasta de limão com maltodextrina, os mesmos eram transferidos para um béquer, pesados em balança semi-analítica e a adição de maltodextrina era feita levando-se em conta a quantidade de sólidos solúveis do suco, já que verificou-se que a quantidade de sólidos totais do mesmo não diferia de forma significativa da quantidade de sólidos solúveis.

Uma solução de maltodextrina e água destilada era preparada através da dissolução da mesma em água a 40° C, na proporção de 1:1 em massa. Essa solução era em seguida misturada ao suco ou pasta para a realização da secagem.

A avaliação da quantidade de material que ficava aderida às esferas durante a secagem sob diferentes condições foi feita através da pesagem das mesmas no início e no decorrer do processo, para que fosse avaliada a cinética do processo de adesão dos sólidos às partículas inertes e ao tubo. Assim, o leito de inertes, as paredes do tubo e o pote coletor de pó eram pesados em intervalos de 5 minutos.

O material aderido às partículas e às paredes do tubo ou material Hold-up foi calculado da seguinte forma (PAN et al., 2001):

$$H_u = \frac{m_m}{m_p} * 100 \quad (3.1)$$

onde:

H_u = Hold-up (%);

m_m = Massa do material aderido (g);

m_p = Massa inicial das partículas inertes ou do tubo (g);

As avaliações de Hold-up foram feitas para o secador de leite pulso-fluidizado vibro-fluidizado (através do acionamento do sistema de vibração). Outra variável que foi testada foi a posição da válvula borboleta responsável pela pulsação de ar. Esta foi testada nas posições de 30 e 90 ° (em relação a uma linha imaginária perpendicular ao fluxo de ar). Foram feitos testes ainda considerando-se a injeção da pasta na fase ativa e na fase inativa do processo, vazões de pasta de 200 a 600 mL/h e velocidades do ar de 6, 7 e 8 m/s, para se verificar o efeito da agitação das partículas na produção de pó e na sua adesão às partículas inertes. A vazão de ar foi controlada através da medida de sua velocidade na saída do ciclone. Esta era realizada na parte central da saída do ciclone com o auxílio de um anemômetro digital de ventoinha Airflow LCA 6000. A temperatura do ar de secagem variou de 50 a 70° C sendo medida com o auxílio de termopares. A medida da temperatura foi realizada no centro da tubulação que conduzia o ar até o leito, cerca de 5 cm abaixo do mesmo

3.2.4 Experimentos de secagem no *spray dryer*

Os experimentos de secagem no *spray dryer* foram realizados utilizando-se amostras de suco de limão com maltodextrina sob diferentes concentrações. A injeção dos mesmos era realizada através de uma bomba peristáltica cuja calibração era feita no início de cada experimento de maneira similar à calibração da bomba diafragma do secador pulso-fluidizado. A vazão de suco atomizado variou nos experimentos de 770 a 1000 mL/h.

Durante os experimentos, a temperatura do ar de secagem variou de 110 a 155° C, a vazão do ar de atomização foi mantida em 50 L/min e a vazão do ar de secagem foi mantida em 12 m³/h.

A adição de maltodextrina ao suco era feita de maneira similar ao preparo de suco para a secagem no secador de leite pulso-fluidizado. Durante os experimentos a porcentagem de maltodextrina no suco variou de 50 a 70% em relação aos sólidos e foram utilizadas as maltodextrinas de DE igual a 10 e 20.

3.2.5 Isotermas de sorção

As isotermas de sorção foram obtidas através do método estático gravimétrico, de pesagens sucessivas das amostras até a obtenção de peso constante. Essas foram feitas utilizando-se amostras de suco de limão em pó com e sem agentes encapsulantes. Os agentes utilizados foram maltodextrina e goma arábica.

Para a obtenção dos pós, uma solução na proporção em massa de 1:1 foi preparada, dissolvendo-se maltodextrina em água destilada a 40°C. Essa solução foi adicionada ao suco levando-se em conta um balanço de massa de modo que o produto seco tivesse 18% de maltodextrina no total de massa seca. O mesmo procedimento foi realizado para a goma arábica.

As amostras de suco foram levadas a estufa a vácuo, onde permaneceram por 48 horas a uma temperatura de 60°C. Em seguida as amostras foram retiradas da estufa, moídas em um moinho de facas da marca Marconi, modelo MA-340 e peneiradas.

O teor de umidade de equilíbrio das amostras foi determinado às temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C pelo método estático gravimétrico (JOWITT, 1983). Foram utilizadas amostras em triplicatas de 1 g do suco em pó de limão com e sem a adição de agentes encapsulantes. Dez soluções saturadas selecionadas (NaOH, LiCl, $KC_2H_3O_2$, $MgCl_2$, K_2CO_3 , $Mg(NO_3)_2$, $NaNO_2$, NaCl, KCl, $BaCl_2$) foram usadas para se obter diferentes umidades relativas numa faixa de 0,059 a 0,907.

Cada solução foi transferida para um pote hermético de 200 mL, que possuía no seu interior um tripé, o qual serviu como suporte para os recipientes de plásticos com as amostras. Antes do uso dos potes e suportes, eles foram desinfetados com água sanitária comercial. As amostras, de massa inicial conhecida, foram colocadas sobre um recipiente de plástico suportado pelo tripé e os potes foram fechados e mantidos em estufa com circulação de ar e temperatura controlada. Foram realizadas quantificações semanais da massa em balança analítica de exatidão $\pm 0,0001$ g, até atingirem massa constante. O tempo requerido de equilíbrio foi de 4 a 5 semanas e após o equilíbrio das amostras foi determinada a umidade das mesmas em estufa a vácuo até peso constante a 60 ° C.

3.2.6 Procedimento de cálculo para as isotermas de sorção

Para o ajuste das isotermas de sorção foram utilizados sete modelos matemáticos: Henderson, Oswin, Lewicki (dois parâmetros), Lewicki (três parâmetros), Ferro-Fontan, Peleg e GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer). Os modelos podem ser vistos na Tabela 3.2 através das equações 3.2 a 3.8, onde X_{eq} é a umidade de equilíbrio das amostras e a_w é a atividade de água.

O ajuste dos modelos aos dados experimentais foi feito a partir do método dos mínimos quadrados não linear, representado pela função quadrática residual (ϕ):

$$\phi = \sum_{i=1}^N \left(\hat{X}_{eq} - X_{eq} \right)^2 \quad (3.9)$$

onde:

\hat{X}_{eq} = valores da umidade de equilíbrio fornecidos pelo modelo;

X_{eq} = valores obtidos experimentalmente

N: número de pontos amostrados.

Para a otimização do processo de busca do ponto de mínimo da função ϕ , foi empregado o algoritmo de Marquardt (1963), através do *software* Origin 6.0.

Foi considerado o modelo mais adequado o ajuste que apresentou o coeficiente de determinação (R^2) mais próximo da unidade e o menor valor para soma quadrática residual (SSR).

3.2.7 Propriedades termodinâmicas

O calor isostérico de sorção ou entalpia de sorção (q_{st}) foi definido como a diferença entre o calor total de sorção (Q_{st}) e o calor de vaporização da água. Ele foi determinado através da equação de Clausius-Clapeyron que é derivada da seguinte equação 3.10 (RIZVI, 1995):

$$\left. \frac{\partial \ln(a_w)}{\partial (1/T)} \right|_X = \frac{Q_{st} - \lambda}{R} = \frac{q_{st}}{R} \quad (3.10)$$

onde:

Q_{st} = calor total de sorção (KJ/Mol);

q_{st} = calor isostérico de sorção (KJ/Mol);

a_w = atividade de água (-);

T = temperatura absoluta (K);

R = constante universal dos gases (8.314 J/Mol K);

λ = calor de vaporização da água pura (J/Kg);

Tabela 3.2: Modelos matemáticos utilizados para os ajustes das isotermas de sorção. (*)

HENDERSON (1952)	$X_{eq} = \left[\frac{-\ln(1-a_w)}{A} \right]^{\frac{1}{B}}$	(3.2)
OSWIM (1946)	$X_{eq} = A \left(\frac{a_w}{(1-a_w)} \right)^B$	(3.3)
Lewicki (dois parâmetros) (LEWICKI; WOLF, 1995)	$X_{eq} = A \left(\frac{1}{a_w} - 1 \right)^{B-1}$	(3.4)
LEWICKI (três parâmetros) (1998)	$X_{eq} = \frac{F}{(1-a_w)^G} - \frac{F}{1+a_w^H}$	(3.5)
FERRO-FONTAN (FERRO FONTAN et al., 1982)	$X_{eq} = \left[\frac{\gamma}{\ln(\alpha/a_w)} \right]^{\frac{1}{r}}$	(3.6)
PELEG (1993)	$X_{eq} = K_1 \cdot a_w^{n_1} + K_2 \cdot a_w^{n_2}$	(3.7)
GAB (VAN DEN BERG, 1985)	$X_{eq} = \frac{(C-1) \cdot K \cdot a_w \cdot X_m}{1 + (C-1) \cdot K \cdot a_w} + \frac{K \cdot a_w \cdot X_m}{1 - K \cdot a_w}$	(3.8)

(*) A, B, F, G, H, γ , α , Γ , K_1 , K_2 , n_1 , n_2 , C, K, X_m constantes das equações.

Uma relação exponencial empírica entre o calor isostérico de sorção e o conteúdo de umidade, como proposto por Tsami et al. (1990), foi ajustada a estes valores de acordo com a equação 3.11, para a determinação das constantes.

$$q_{st} = q_0 \exp(-X_{eq}/X_0) \quad (3.11)$$

onde:

q_0 = calor de sorção da primeira camada de água (KJ/Mol);

X_{eq} = conteúdo de umidade de equilíbrio (Kg água/Kg sólido seco);

X_0 = conteúdo de umidade inicial do material (Kg água/Kg sólido seco);

3.2.8 Determinação das propriedades físico-químicas dos pós obtidos

3.2.8.1 Sólidos totais

A determinação dos sólidos totais do produto foi realizada em estufa a vácuo a uma temperatura de 60°C até peso constante, sendo o tempo de 48 h suficiente. A medição feita em duplicata.

3.2.8.2 Molhabilidade

Baseou-se na metodologia proposta por Vissotto et al. (2006), a qual consistia na queda de 2,0 g de amostra sobre 400 mL de água destilada à temperatura ambiente. A água foi colocada em um béquer de 1.000 mL e a amostra lançada sobre a água com o auxílio de uma chapa metálica que continha a amostra. Com o auxílio de uma régua, a amostra era raspada para cair no béquer. Dessa forma, a amostra se espalhou homogeneamente na superfície do líquido. O tempo necessário para que as partículas de pó molhassem foi medido visualmente com o auxílio de um cronômetro digital. As medições foram realizadas em triplicata.

3.2.8.3 Dispersibilidade

Seguindo a metodologia proposta por Jaya e Das (2004), 13 gramas da amostra foram agitados manualmente com o auxílio de um bastão em 100 gramas de água destilada a 50°C em béquer por aproximadamente 15 s. A solução foi filtrada com papel filtro, sendo a matéria seca estimada, medindo-se a umidade do filtrado em estufa a vácuo por 48 horas a temperatura de 60°C por 24h em triplicata.

A dispersibilidade foi obtida através da equação 3.12:

$$DS(\%) = \frac{(w + a)S_p}{a.S_j} \quad (3.12)$$

onde:

w = peso da água utilizada no experimento (g);

S_p = porcentagem de sólidos totais presentes no pó (%);

S_j = porcentagem de matéria seca presente no suco reconstituído (%);

a = peso da amostra utilizada (g);

3.2.8.4 Higroscopicidade

Em triplicatas, o experimento foi realizado baseando-se no método descrito por Jaya e Das (2004). Três amostras de cerca de 1g de foram acondicionadas em dessecadores com umidade relativa de 80,63%. Para a obtenção desta umidade relativa utilizou-se uma solução saturada de sulfato de amônio a 30 °C. As amostras foram pesadas a cada 15 minutos até que a diferença entre duas pesagens sucessivas não fosse superior a 0,5%.

A higroscopicidade dos pós, Hg (%) foi calculada através da equação 3.13:

$$Hg = \frac{b/a + W_i}{1 + b/a} \quad (3.13)$$

onde:

b = aumento de massa dos pós (g);

a = quantidade de amostra total utilizada no experimento (g);

W_i = umidade presente no pó antes da realização do experimento (% b.u.);

3.2.8.5 Grau de aglomeração

O grau de aglomeração foi avaliado baseando-se no método utilizado por Nijdam & Langrish (2006). A amostra foi levada à estufa a uma temperatura de 102°C por um período de 1 h. Após resfriar em dessecador, uma porção de aproximadamente 1,5 g de amostra foi pesada e rapidamente transferida para peneira de aço inoxidável (peneira Tyler número 32) de 500 µm, a qual foi submetida à vibração. O equipamento utilizado foi um vibrador de bandejas Produtest, que trabalhou sob grau de agitação no nível 6 por 5 minutos. O pó que atravessou a peneira foi pesado e o índice de aglomeração determinado pela equação 3.14:

$$Ag = \frac{M_T - M_F}{M_T} \times 100 \quad (3.14)$$

onde

M_T = massa total de amostra (g);

M_F = massa de amostra fina que atravessa a peneira (g).

3.2.8.6 Determinação da cor

A coloração dos pós foi determinada através de um colorímetro (MiniScan XE Plus), com amostras em duplicata. Foram obtidos desta forma os valores de L^* (luminosidade), a^* (intensidade de preto) e b^* (intensidade de branco). A medição consta simplesmente de uma pré-calibração do equipamento com as cores preta e branca, seguida da exposição da amostra ao visor do equipamento. Neste momento o equipamento emite uma luz contra a amostra e fornece os valores de L^* , a^* e b^* . Este equipamento foi utilizado no Laboratório de Tecnologia de Alimentos da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos.

3.2.8.7 Determinação da atividade de água

As análises de atividade de água foram realizadas em duplicata utilizando-se o equipamento da Aqualab (CX-2) disponível no Laboratório de Tecnologia de Alimentos da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. Para a realização do teste as amostras eram simplesmente colocadas em uma cubeta própria do equipamento e inseridas no mesmo. Após um tempo de estabilização era realizada a leitura da atividade de água.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimentos preliminares de fluidização

Através de testes de fluidização das partículas, observou-se que o ar era distribuído de maneira heterogênea no leito de inertes. Isto acontecia porque logo após a passagem pela câmara de aquecimento de ar, este era direcionado a uma curva de 90°, antes de chegar ao leito. Na passagem pela curva, o ar tomava o caminho preferencial da parte externa da mesma, conseqüentemente, entrava no leito com um perfil radial de velocidade. Isto fazia com que as partículas inertes apresentassem um movimento irregular, subindo próximo à parede e descendo pela parte central do leito. A Figura 4.1 mostra de forma esquemática o comportamento do ar antes de chegar ao leito.

Tentando-se diminuir este efeito, foi construída a câmara de distribuição de ar. Realizando-se testes de fluidização com esta nova câmara, observou-se que o problema de distribuição de velocidades de maneira heterogênea no leito não havia sido resolvido.

Uma outra alternativa para se melhorar a distribuição de velocidades no leito foi a construção de duas aletas e sua inserção na parte inferior do tubo, localizado abaixo do leito. A idéia de utilização destas aletas foi a de que a modificação de seu ângulo de inclinação em relação ao fluxo de ar poderia alterar a direção do escoamento do ar, sendo possível uniformizar o perfil de velocidade. Cada aleta possuía uma borboleta na parte externa de seu eixo, que permitia a fixação em qualquer posição angular desejada. Mesmo com o uso das aletas, a heterogeneidade do escoamento do ar ainda persistiu.

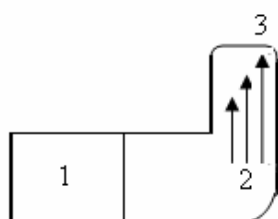


Figura 4.1: Perfil heterogêneo de velocidade do ar abaixo do leito de inertes
1: sistema de aquecimento do ar, 2: perfil de velocidades, 3: leito de inertes.

Outra tentativa para se resolver o problema foi a construção de um copo distribuidor de ar, que foi inserido na parte inferior da tubulação localizada abaixo do leito de inertes. Mesmo com o copo distribuidor, o problema não foi solucionado.

Finalmente, foi construída uma placa de orifícios. Os orifícios tinham 8 mm de diâmetro e inicialmente a mesma foi perfurada de maneira que a área livre para passagem do ar fosse de 5%. Após a realização de testes, percebeu-se que se tratava de uma área livre muito pequena, que não permitia a fluidização dos inertes devido a alta perda de carga. A área foi aumentada e testada com 10 e 15%, sendo que após os testes, verificou-se que com 15% a fluidização ocorria, entretanto ainda de forma heterogênea.

Finalmente, optou-se por perfurar a placa de maneira diferente em suas laterais, de modo que o fluxo de ar fosse corrigido pela passagem através dos orifícios da placa, localizados em locais pré-determinados. Assim, a lateral do leito que apresentava menor fluidização das partículas teve maior área perfurada. A placa teve uma área perfurada total de 18% e proporcionou boa fluidização das partículas inertes, de maneira que não ocorresse e formação de jorros em suas laterais.

4.1.1 Classificação das partículas de vidro

Como se verá no item 4.2.4, a distribuição granulométrica das partículas de vidro estava influenciando no comportamento fluidodinâmico do leito. Assim, foi feito o peneiramento das partículas para se avaliar sua distribuição granulométrica. O resultado obtido pode ser visto na Figura 4.2, que relaciona a fração de partículas retidas nas peneiras com seus respectivos diâmetros.

Através do cálculo do diâmetro médio de Sauter, o valor obtido foi de 4,31 mm. Mesmo com a distribuição tendendo a uma curva normal e não apresentando grande amplitude no tamanho das partículas, resolveu-se utilizar partículas de vidro que ficaram retidas entre duas peneiras para se dar maior uniformidade ao diâmetro das esferas. Assim, no restante deste trabalho será empregada a denominação *partículas de vidro* para se referir às partículas com a distribuição granulométrica apresentada na Figura 4.2 e a denominação *partículas de vidro classificado* para se referir às partículas retidas entre as peneiras de 4,76 e 4 mm, cujo diâmetro médio era de 4,38 mm.

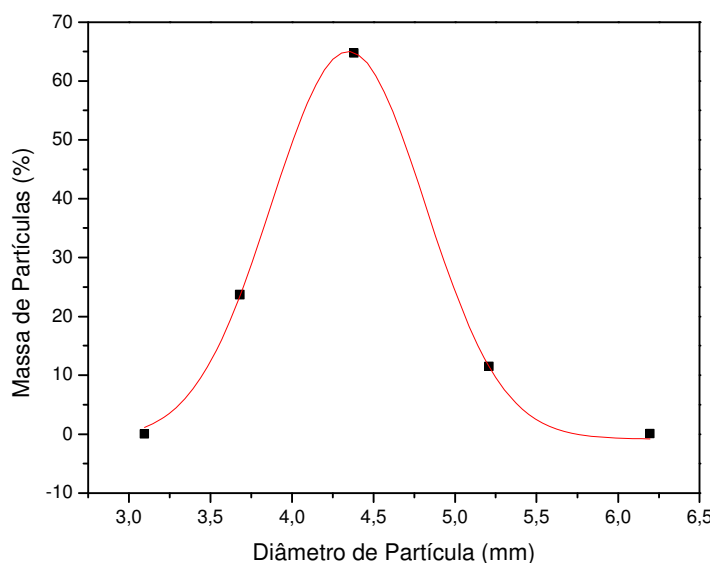


Figura 4.2: Distribuição granulométrica das partículas de vidro.

4.2 Experimentos de perda de carga

Os testes de perda de carga no secador de leito pulso-fluidizado foram realizados sob diversas configurações do equipamento. Foram realizados primeiramente testes com o secador sem o ciclone acoplado e sem a utilização da placa de distribuição, os quais foram realizados com a válvula borboleta nos ângulos de 30, 60 e 90°. Estes testes foram realizados para as partículas de teflon e vidro, com altura de leito de 4 cm. Posteriormente foi acoplada ao sistema a placa de distribuição de fluxo. Nos experimentos com a placa distribuidora, as perdas de carga foram encontradas tanto para o leito de partículas quanto para o sistema (placa distribuidora + válvula borboleta).

Finalmente, foi acoplado ao sistema o ciclone, para se verificar se o mesmo apresentaria algum efeito nas curvas de fluidização. Com o ciclone acoplado ao equipamento foram realizados experimentos com e sem a placa distribuidora.

Como percebeu-se que a distribuição de tamanho das partículas de vidro estava influenciando as curvas de fluidização, o mesmo passou por uma classificação em peneiras. Assim, foram realizados experimentos com placa distribuidora e sem o ciclone para o vidro classificado, variando-se as posições da válvula borboleta.

Foram realizados ainda experimentos com altura de leito de 2 cm para as partículas de vidro e de teflon, para a borboleta nas posições de 30 e 90° com a utilização de placa distribuidora.

Os testes foram realizados com velocidade crescente e decrescente do ar, sendo que a velocidade crescente foi obtida através do aumento gradativo da frequência de rotação do ventilador e a velocidade decrescente foi obtida através da diminuição gradativa da frequência de rotação do ventilador

Para se obter as velocidades de mínima fluidização, foi empregado o método gráfico. Assim, os pontos experimentais da queda de pressão do leito fixo foram ajustados por uma reta, bem como os pontos experimentais da região fluidizada. Da intersecção das duas retas obteve-se a velocidade de mínima fluidização.

A Tabela 4.1 apresenta as velocidades de mínima fluidização encontradas para as partículas de vidro, vidro classificado e teflon nas diferentes condições do equipamento.

4.2.1- Queda de pressão no leito, submetido a diferentes ângulos da válvula borboleta

Os experimentos para se avaliar a queda de pressão no leito sob os diferentes ângulos da válvula borboleta foram realizados sem a placa distribuidora acoplada ao equipamento. As curvas de fluidização foram construídas tanto para velocidade do ar crescente como para velocidade decrescente para observar-se a ocorrência ou não de histerese. Não foi observada histerese expressiva, provavelmente devido ao grande tamanho das partículas. Foram utilizados tempos de 2 segundos, tanto para a fase ativa como para a fase inativa.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram a perda de carga para velocidades crescentes e decrescentes para as partículas de teflon e de vidro, respectivamente, com a borboleta a 90°.

Para as partículas de teflon, observou-se que a velocidade de mínima fluidização, apresentou-se ligeiramente maior para a curva crescente, sendo que permaneceu em 2,30 m/s enquanto para a decrescente, seu valor foi de 2,10 m/s. A perda de carga na faixa constante foi de cerca de 180 Pa. Cabral et al. (2007) encontraram velocidades mínimas de fluidização em leito fluidizado para partículas cilíndricas equiláteras de teflon com diâmetro de 3 mm entre 1,65 e 1,79 m/s. Já as quedas de pressão foram muito superiores às encontradas neste trabalho,

Tabela 4.1: Velocidades de mínima fluidização para vidro, vidro classificado e teflon. (*)

		Altura de leito (cm)	Posição da Borboleta	Partícula inerte	Velocidade Crescente (m/s)	Velocidade Decrescente (m/s)		
Sem ciclone	Sem placa	4		teflon	2,30	2,10		
		4	90 ^o	vidro (1)	1,80	1,80		
		4		Teflon	2,50	2,40		
		4	60 ^o	vidro (1)	2,00	1,90		
		4		teflon	NC	NC		
		4	30 ^o	vidro (1)	NC	NC		
	Com placa		4		teflon	3,00	2,80	
			4	90 ^o	vidro (1)	1,90	1,90	
			4		teflon	2,55	2,45	
			4	60 ^o	vidro (1)	2,20	2,20	
			4		teflon	2,45	2,45	
			4	30 ^o	vidro (1)	2,30	2,20	
			Com placa	4	90 ^o	teflon	4,20	NC
				4		vidro (1)	3,20	NC
Sem placa	4	90 ^o		teflon	4,20	NC		
	4			vidro (1)	2,50	NC		
Sem ciclone	Com placa	4	90 ^o	vidro (2)	2,05	2,05		
		4	60 ^o	vidro (2)	1,95	2,05		
		4	30 ^o	vidro (2)	1,75	1,80		
		2	90 ^o	teflon	2,90	2,90		
	Com placa	2		vidro (2)	2,00	2,00		
		2	30 ^o	teflon	2,40	2,25		
		2		vidro (2)	2,00	1,90		
		2		vidro (2)	2,00	1,90		

(*) NC – não calculado; vidro (1) – partículas de vidro que não foram classificadas; vidro (2) – partículas de vidro classificadas.

entre 2092,29 a 2115,6 Pa. Provavelmente esta diferença deve-se ao fato da altura do leito daqueles autores ser de 144,3 mm e à diferença no formato das partículas.

No caso das partículas de vidro, verificou-se que as velocidades de mínima fluidização foram iguais, sendo de 1,80 m/s. A queda de pressão encontrada para a faixa constante foi de cerca de 550 Pa. Viu-se que o vidro apresentou um comportamento anômalo, como verificado na Figura 4.4 e que a queda de pressão apresentou-se como uma linha quase na vertical na faixa de leito fixo. Este comportamento atípico levou a posterior classificação das partículas de vidro.

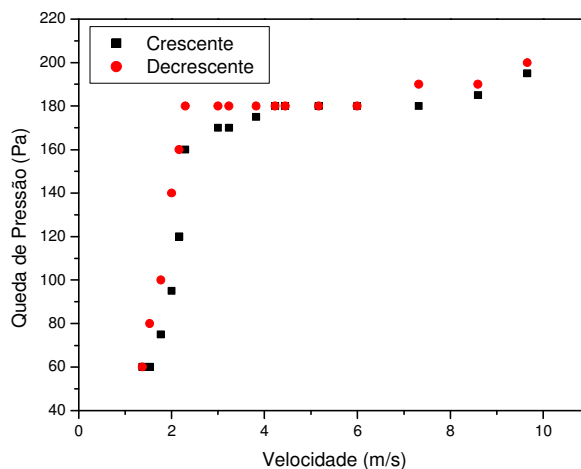


Figura 4.3: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, leito com 4cm de altura, velocidade do ar crescente e decrescente e borboleta a 90°.

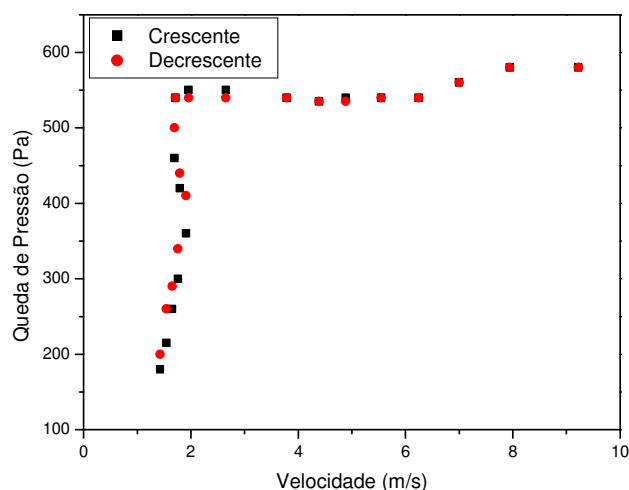


Figura 4.4: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, leito com 4cm de altura, velocidade do ar crescente e decrescente e borboleta a 90°.

Os experimentos realizados com a válvula borboleta a 60°, mostraram resultados muito próximos aos encontrados para a válvula a 90°. Observou-se que os valores encontrados para as quedas de pressão eram praticamente os mesmos encontrados para a válvula a 90°. Entretanto, as velocidades de mínima fluidização encontradas apresentaram valores superiores, tanto para as partículas de teflon quanto para as de vidro, sendo que para as partículas de teflon foram de 2,5 m/s para a velocidade crescente e 2,4 para a decrescente e para as de vidro foram de 2 m/s para a velocidade crescente e 1,9 para a decrescente. Isto provavelmente ocorreu porque o escoamento do gás ganha caminhos preferenciais, desta

forma o gás não é uniformemente distribuído na seção transversal, conseqüentemente é necessária uma maior quantidade de gás para a fluidização das partículas.

Com a válvula borboleta na posição de 30° verificou-se que o aumento da velocidade provocou um aumento na queda de pressão, não sendo encontrada, para nenhum dos materiais estudados, a fase de queda de pressão constante característica dos leitos fluidizados. Isto ocorreu porque a perda de carga aumenta continuamente com a vazão do ar crescente à medida que o ar se depara com a válvula borboleta na posição de 30°. O efeito obtido de crescimento da queda de pressão com a velocidade pode ser observado nas Figuras 4.5 e 4.6, para as partículas de teflon e vidro, respectivamente.

Através da Figura 4.7, é possível ver que as posições de 60 e 90° não apresentaram diferença no seu comportamento apresentando velocidades de mínima fluidização das partículas de teflon muito próximas e resultando em uma queda de pressão com valores próximos a 200 Pa na faixa constante, diferindo apenas da posição de 30°, que apresentou uma perda de carga muito superior.

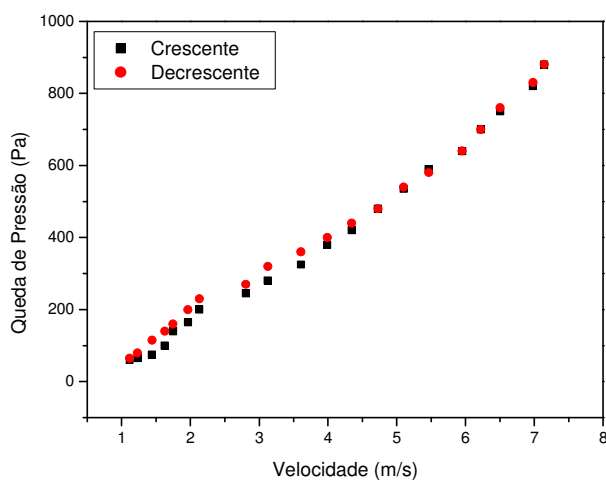


Figura 4.5: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, leito com 4cm de altura, velocidade do ar crescente e decrescente e borboleta a 30°.

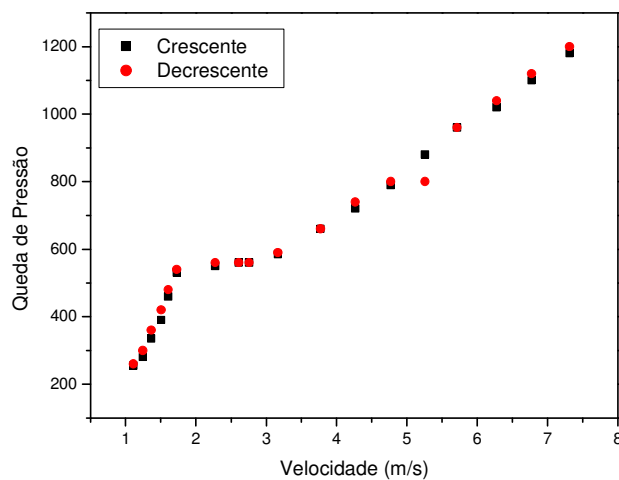


Figura 4.6: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, leito com 4cm de altura, velocidade do ar crescente e decrescente e borboleta a 30°.

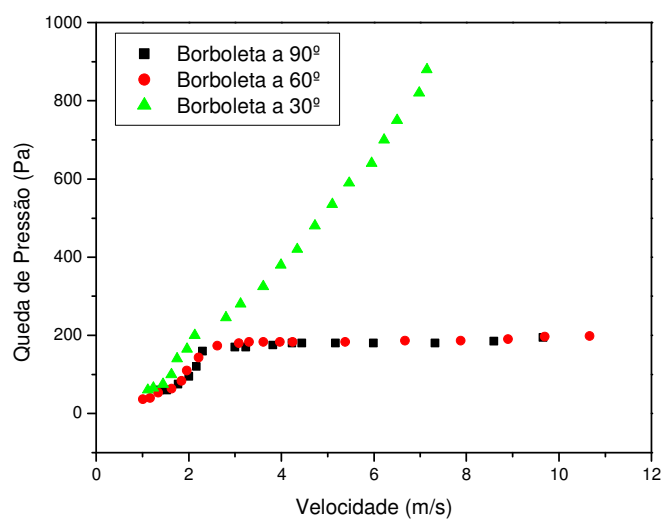


Figura 4.7: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, leito com 4cm de altura, velocidade do ar crescente e borboleta a 30°, 60° e 90°.

Dessa forma, a válvula borboleta nas posições de 60 e 90° apresentou curvas de fluidização semelhantes e próximas à do leito fluidizado convencional. Já a posição de 30° resultou em uma queda de pressão crescente com o aumento da velocidade, não sendo encontrada a faixa de queda de pressão constante.

4.2.2- Queda de pressão no leito sob diferentes ângulos, utilizando-se a placa distribuidora.

Nos testes de perda de carga com a placa distribuidora, observou-se que a perda de carga total do sistema (leito + placa distribuidora + válvula borboleta) foi sempre crescente com o aumento da vazão de ar para todas as aberturas da válvula borboleta. Este comportamento foi similar ao obtido para o sistema sem placa e com a válvula borboleta a 30°. Assim, não foi observado o patamar de queda de pressão constante obtido para o sistema sem a placa distribuidora e com a válvula a 60 e 90°. Portanto, conclui-se que este resultado era devido à combinação dos efeitos da válvula borboleta e da placa distribuidora. Deste modo, decidiu-se realizar experimentos específicos de perda de carga sem partículas no leito e a partir da diferença entre os resultados com e sem partículas foi possível inferir-se a perda de carga de cada elemento.

Dessa forma, encontrou-se a perda de carga do leito através da diferença entre a perda de carga total do sistema (placa distribuidora + válvula borboleta + leito) e a perda de carga dos acessórios (placa distribuidora + válvula borboleta).

A Figura 4.8 mostra as perdas de carga totais do sistema e do leito de inertes, para as partículas de teflon, com as velocidades crescente e decrescente para a borboleta na posição de 90°.

As velocidades de mínima fluidização encontradas para as partículas de teflon, quando utilizou-se a placa distribuidora abaixo do leito, foram de 3 e 2,8 m/s para as velocidades crescente e decrescente, respectivamente, apresentando-se superiores às obtidas sem a utilização da placa distribuidora. Viu-se que a perda de carga do leito de partículas permaneceu na faixa de 200 Pa, após a fluidização das partículas.

Observou-se no caso das partículas de teflon, que nas velocidades maiores, a perda de carga teve a tendência em diminuir. Isto deve ter ocorrido, provavelmente devido à diminuição da força de arraste das partículas ocasionado pela movimentação das partículas.

Nitz e Taranto (2007) estudaram a secagem de feijão em leito pulso-fluidizado rotativo, com diâmetro de partícula de 6,65 mm e densidade de 1,45 g/cm³. Encontraram quedas de pressão próximas às deste trabalho, com alturas de leito que estiveram entre 28 e 78mm, frequências de rotação do disco que variaram de 200 a 950 rpm, que resultaram em quedas de pressão na faixa de 116 a 506 Pa. Já a velocidade de mínima fluidização encontrada para o feijão foi de 0,4 m/s no secador fluidizado convencional, enquanto que para o secador

pulso-fluidizado rotativo as velocidades mínimas de pulso-fluidização (v_{mpf}) foram de 0,47 m/s para a frequência de rotação do disco de 200 rpm e altura do leito de 53mm e de 0,52 m/s para a frequência de rotação do disco de 950 rpm e altura do leito de 78mm. Provavelmente, as velocidades encontradas para o feijão foram bem inferiores às obtidas neste trabalho devido à diferença de densidade existente entre as partículas. Outro fator que pode ter colaborado para a diferença nas velocidades de fluidização é o formato das partículas, o que pode acarretar em diferentes formas de acomodação das partículas no leito e diferentes porosidades no mesmo.

A Figura 4.9 mostra a perda de carga das partículas de vidro para a válvula na posição de 90°. Foi observado um comportamento atípico, de aumento da queda de pressão com pequenas variações de velocidade, o que resultou em uma curva quase vertical na faixa de leito fixo. A velocidade de mínima fluidização permaneceu na faixa de 1,9 m/s, tanto para a velocidade crescente como decrescente.

Através dos experimentos realizados com a borboleta nas posições de 30, 60 e 90°, observou-se que a perda de carga no leito não sofreu variações consideráveis, permanecendo em torno de 600 Pa para as partículas de vidro e 200 Pa para as de teflon, na região de fluidização. A perda de carga total do sistema não apresentou diferença considerável para as aberturas de válvula de 90 e 60°, entretanto, a posição de 30° resultou em perdas de carga significativamente maiores. A Figura 4.10 mostra as perdas de carga totais e dos leitos de partículas de vidro e teflon variando com as velocidades crescentes com a válvula borboleta a 60 °.

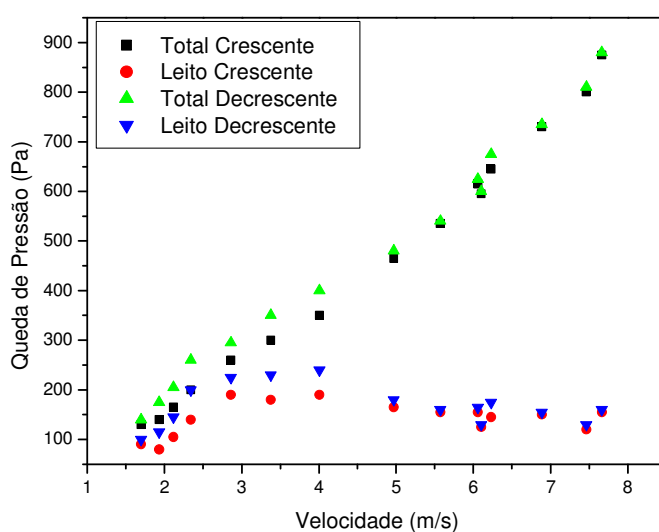


Figura 4.8: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, leito de 4cm de altura, velocidade do ar crescente e decrescente, borboleta a 90° e placa distribuidora.

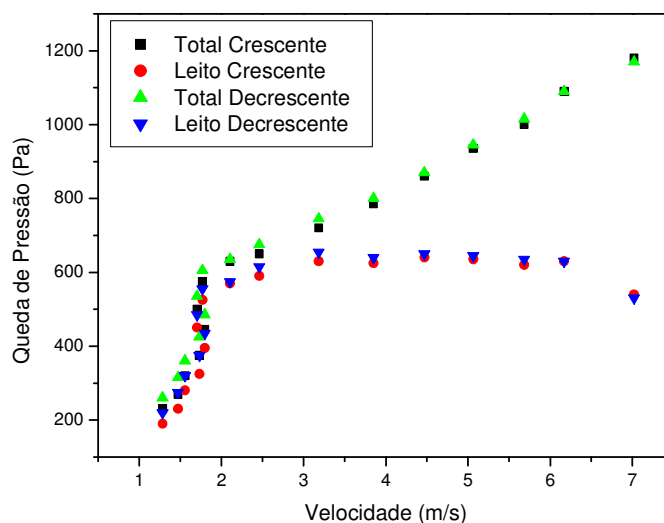


Figura 4.9: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, leito de 4cm de altura, velocidade crescente e decrescente, com borboleta a 90° e placa distribuidora.

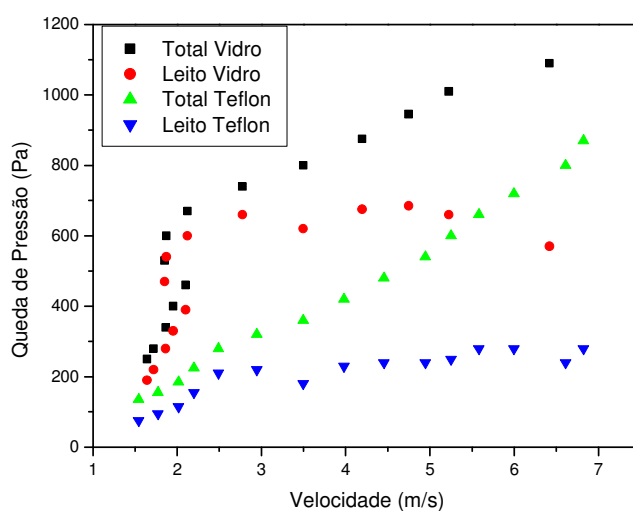


Figura 4.10: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro e teflon, altura do leito de 4cm, velocidade crescente, borboleta a 60° e placa distribuidora.

Através da Figura 4.11 é possível verificar o aumento da perda de carga total do sistema encontrada com a válvula borboleta na posição de 30°. É possível ver também que em velocidades superiores à velocidade de mínima fluidização das partículas, a queda de pressão do leito apresentou um comportamento irregular, provavelmente devido à fluidização não homogênea das partículas para a válvula borboleta na posição de 30°.

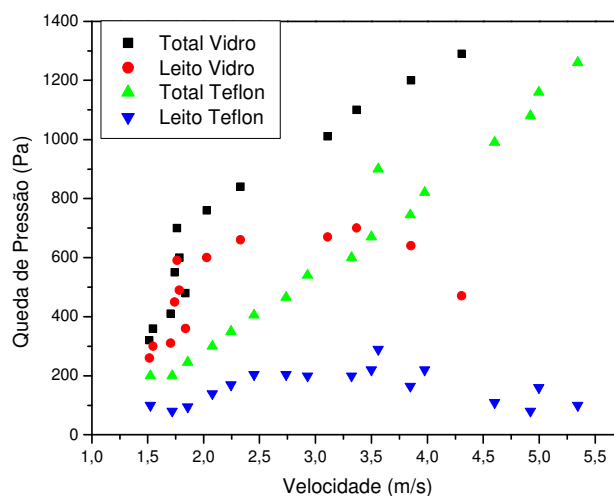


Figura 4.11: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado partículas de vidro e teflon, altura do leito de 4cm, velocidade crescente, borboleta a 30° e placa distribuidora.

A adição da placa distribuidora abaixo do leito provocou o aumento da queda de pressão total do sistema e o aumento da velocidade de mínima fluidização das partículas. Isto foi visto tanto nas partículas de vidro como no teflon. A perda de carga do leito não sofreu alteração.

4.2.3- Experimentos com o ciclone acoplado ao equipamento

Alguns experimentos de perda de carga foram realizados com o ciclone acoplado ao equipamento para se verificar o seu efeito na curva de fluidização. Os mesmos foram feitos com a válvula borboleta na posição de 90° e em diferentes tempos de fase ativa e inativa. Os experimentos foram feitos com e sem placa distribuidora e os tempos de pulsação utilizados para as fases ativa e inativa podem ser vistos na Tabela 4.2.

Com os experimentos realizados sem a placa distribuidora, foram atingidas altas velocidades de ar e verificou-se que nestas a queda de pressão apresentou uma tendência de elevação com o aumento da velocidade do ar. Este efeito gerado pelo ciclone pode ser visto na Figura 4.12 que mostra a curva obtida para as partículas de teflon, nos diferentes tempos de pulsação com velocidade do ar crescente e sem a utilização da placa distribuidora.

Viu-se que após a fluidização das partículas, a queda de pressão tende ao valor constante de 200 Pa até a velocidade de 8m/s, a partir da qual a queda de pressão tende a

aumentar. A velocidade de mínima fluidização das partículas sofreu um aumento significativo, sendo que para as partículas de teflon a velocidade encontrada foi de 4,2 m/s.

Considerando-se os diferentes tempos de pulsação de ar no leito, viu-se que os mesmos não apresentaram influência nas curvas de fluidização, tanto nas partículas de teflon como nas partículas de vidro. Isso provavelmente ocorreu devido ao tamanho das partículas e sua fácil acomodação no leito. Dessa forma, o intervalo de 1 s de fase inativa foi suficiente para que as partículas inertes se acomodassem da mesma forma como ocorreu no intervalo de 3 s, o que acarretou no mesmo comportamento do leito após o início da fase ativa subsequente.

Tabela 4.2: Tempos de pulsação utilizados nos experimentos de perda de carga.

Configuração	Fase ativa (s)	Fase inativa (s)
1	2	2
2	5	3
3	3	3
4	4	2
5	3	1

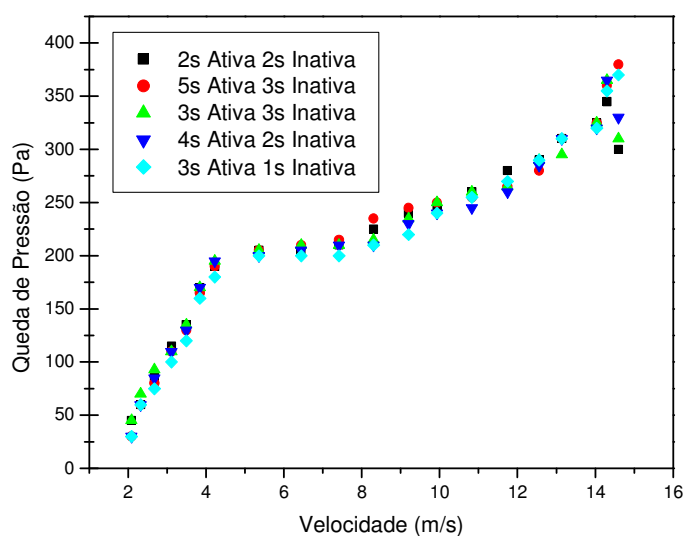


Figura 4.12: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, altura de 4cm, nos diferentes tempos de pulsação, velocidade crescente, com ciclone, sem placa distribuidora e borboleta a 90°.

Apesar de a adição da placa distribuidora ter provocado o aumento da queda de pressão do sistema em toda a faixa de velocidade, a velocidade de mínima fluidização das partículas permaneceu inalterada, como pode ser visto na Figura 4.13, que mostra a curva obtida para as partículas de teflon, com velocidade crescente e intervalos de pulsação de 2 s (ativa e inativa).

No caso das partículas de vidro, observou-se o mesmo efeito obtido para as de teflon na adição do ciclone ao equipamento. A velocidade de mínima fluidização encontrada para as partículas de vidro, foi de 2,5 m/s, como pode ser visto na Figura 4.14. Adicionando-se a placa distribuidora ao equipamento, foi observado o aumento da queda de pressão e um aumento na velocidade de mínima fluidização, para cerca de 3,2 m/s, como pode ser visto na Figura 4.15, que mostra a curva obtida para as partículas de vidro, com velocidade crescente e intervalos de pulsação de 2 s (ativa e inativa).

Foi visto que os diferentes tempos de pulsação não apresentaram influência nas curvas de fluidização das partículas, tanto nos inertes de vidro como nos de teflon. Em altas velocidades foi observado um aumento na queda de pressão, o qual foi provocado pela adição do ciclone ao equipamento. As velocidades de mínima fluidização para as partículas de teflon foram as mesmas para o equipamento com e sem placa e no caso das partículas de vidro a adição da placa provocou um aumento na velocidade de mínima fluidização.

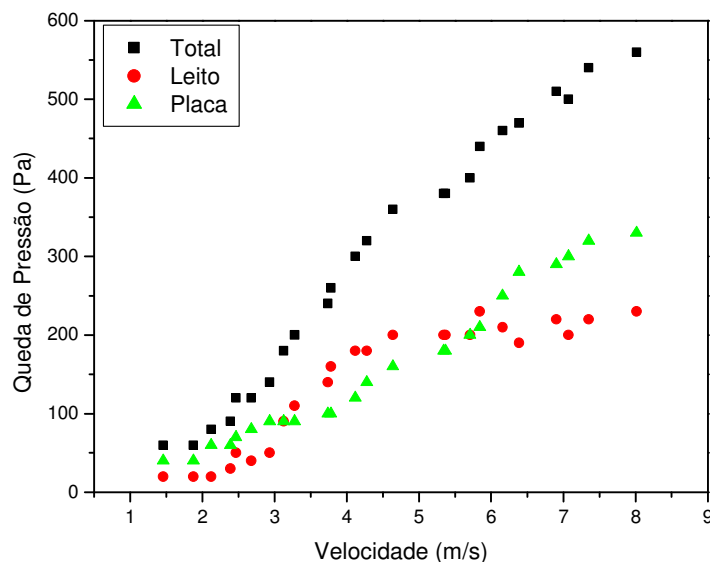


Figura 4.13: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon 4cm, velocidade crescente, com ciclone, com placa distribuidora, borboleta a 90° e tempo de pulsação de 2s (ativa e inativa).

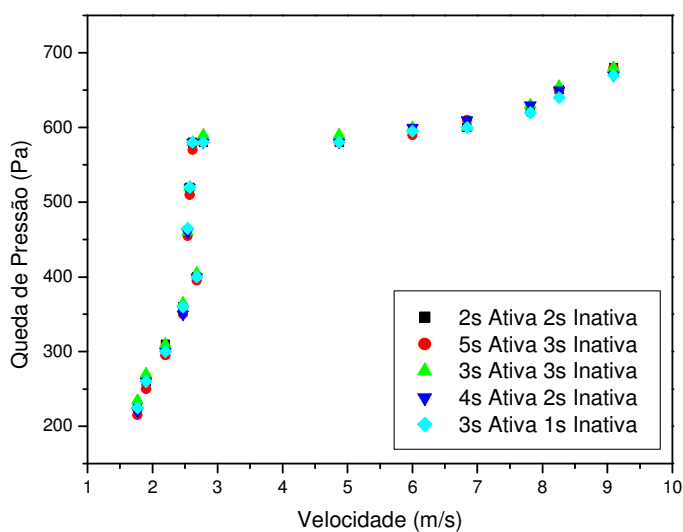


Figura 4.14: : Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, altura de 4cm, diferentes tempos de pulsação, velocidade crescente, com ciclone, sem placa distribuidora e borboleta a 90°.

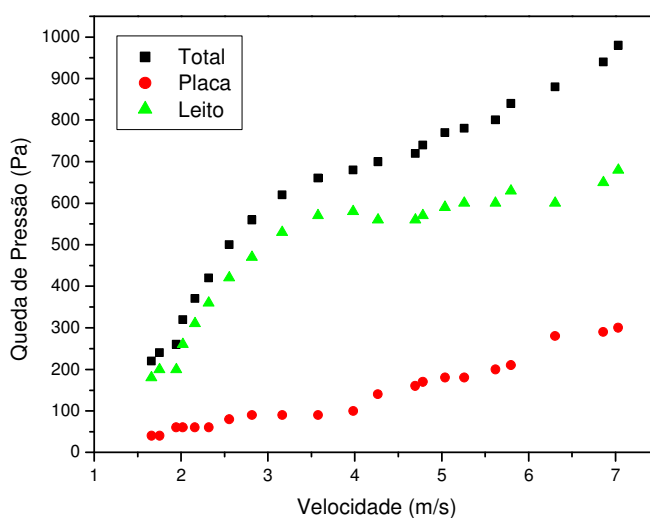


Figura 4.15: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, altura de 4cm, velocidade crescente, com ciclone, com placa distribuidora, borboleta a 90° e tempo de pulsação de 2s (ativa e inativa).

4.2.4- Efeito da classificação das partículas de vidro

Como foi notado que o vidro apresentou um comportamento atípico em alguns casos, originando uma curva não característica mesmo na condição de 90° da borboleta, resultando

em uma queda de pressão que apresentava grande variação com pequenos aumentos na velocidade, suspeitou-se que a ampla faixa de diâmetro de partículas pudesse ter influência sobre a queda de pressão no leito. Assim, as partículas foram peneiradas e somente as partículas passantes pela peneira com abertura de 4,76 mm e que ficaram retidas na peneira com abertura de 4 mm foram empregadas, de modo que o diâmetro médio das partículas foi de 4,38 mm.

As curvas de queda de pressão foram construídas para a válvula borboleta nas posições de 90, 60 e 30°, utilizando-se placa distribuidora e retirando-se o ciclone do equipamento.

Nos experimentos realizados com o vidro classificado, observou-se que as curvas de fluidização para as posições de 90 e 60° apresentaram-se ainda tendendo a uma vertical na faixa de leito fixo, entretanto, a curva atípica observada anteriormente no vidro com diferentes tamanhos desapareceu.

Comparando-se as partículas de vidro classificado com as de vidro não classificado, observou-se que as velocidades de mínima fluidização para o caso da válvula borboleta na posição de 90° apresentaram pouca variação, sendo que para o vidro classificado foram de 2,05 m/s para as velocidades do ar crescente e decrescente, sendo que para o vidro não classificado, nas mesmas condições foram de 1,9 m/s.

Cabral et al. (2007) encontraram velocidades mínimas de fluidização em leito fluidizado muito próximas às encontradas neste trabalho para partículas esféricas de vidro com diâmetro de partícula de 3,6 mm, sendo que as velocidades encontradas estiveram entre 1,92 e 2,16 m/s. Com relação às quedas de pressão de mínima fluidização, apresentaram-se bem superiores às encontradas neste trabalho, variando entre 2478,8 e 2586,1 Pa, provavelmente a devido à altura de leito utilizada, que foi de 144,3 mm.

Para a válvula borboleta na posição de 60°, viu-se que a velocidade de mínima fluidização do vidro classificado sofreu um pequeno decréscimo, quando comparado com o vidro não classificado, o que foi também observado para a válvula borboleta na posição de 30°. As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 mostram as curvas obtidas para o vidro classificado com velocidades crescente e decrescente para as posições de 90°, 60 e 30°, respectivamente.

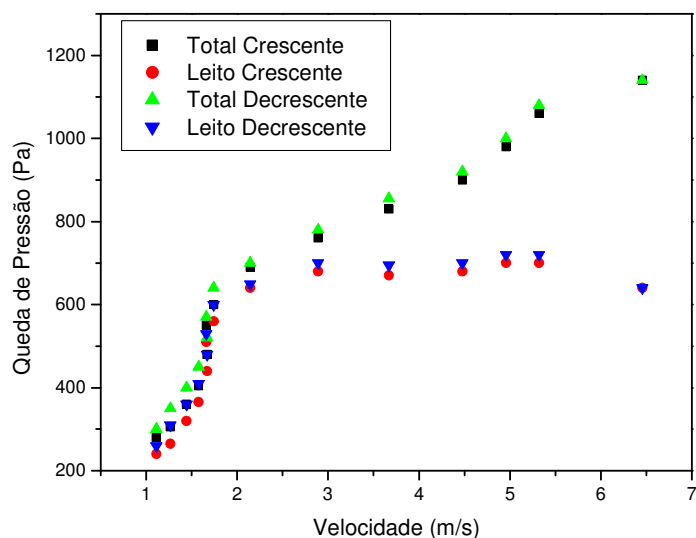


Figura 4.16: Queda de pressão no pulso-fluidizado partículas de vidro classificado, altura do leito de 4cm, velocidade crescente e decrescente, borboleta a 90° e placa distribuidora.

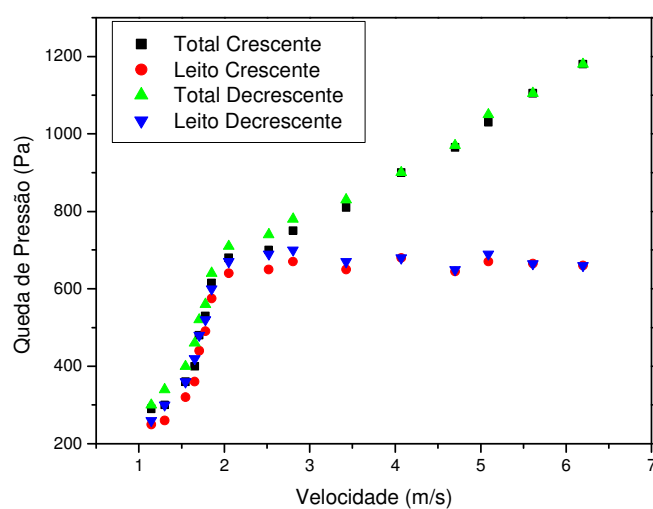


Figura 4.17: Queda de pressão no pulso-fluidizado partículas de vidro classificado, altura do leito de 4cm, velocidade crescente e decrescente, borboleta a 60° e placa distribuidora.

A Figura 4.19 mostra a curva obtida para o vidro classificado e não classificado para a válvula borboleta a 60°. É possível verificar que o comportamento atípico observado para o vidro desapareceu, entretanto a curva obtida para o vidro classificado tende ainda a uma vertical.

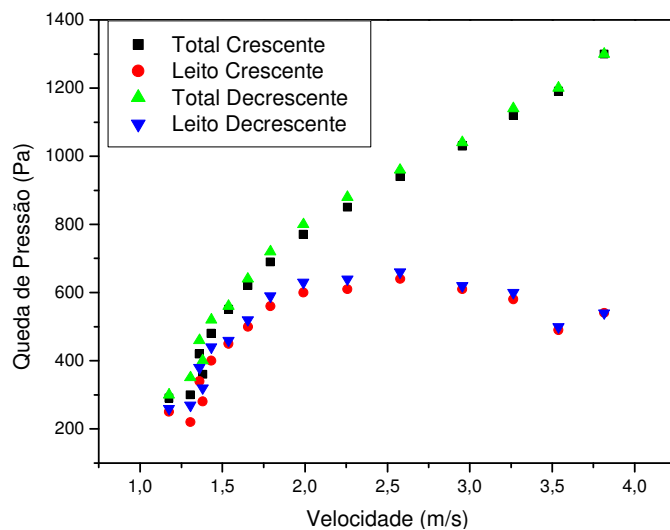


Figura 4.18 Queda de pressão no pulso-fluidizado com partículas de vidro classificado, altura do leito de 4cm, velocidade crescente e decrescente, borboleta a 30° e placa distribuidora.

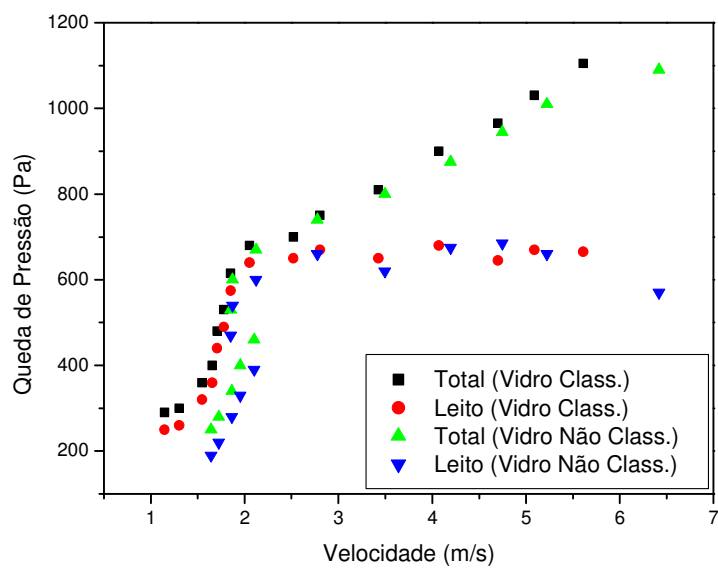


Figura 4.19: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro classificado e não classificado, altura de leito de 4cm, velocidade crescente, borboleta a 60° e placa distribuidora.

4.2.5 – Efeito da variação na altura do leito

Os experimentos com altura de leito de 2 cm foram realizados para as partículas de vidro classificado e teflon nas posições da válvula borboleta de 90 e 30°. Em todos os experimentos utilizou-se placa distribuidora e as pulsações de ar foram mantidas em 2 s para as fases ativa e inativa.

No caso das partículas de teflon, percebeu-se que para a abertura da válvula borboleta de 90°, as diferentes alturas do leito praticamente não apresentaram diferença quanto à perda de carga no leito na faixa de queda de pressão constante, sendo que em ambos os casos, a queda de pressão permaneceu em valores próximos a 150 Pa. As velocidades de mínima fluidização das partículas apresentaram também valores bem próximos. Isto pode ser verificado na Figura 4.20, que mostra a perda de carga para as partículas de teflon com alturas de leito de 4 e 2 cm.

Através da Figura 4.21, verifica-se que para a posição da válvula borboleta de 30°, as partículas de teflon apresentaram diferença quanto à perda de carga na faixa que tende à queda de pressão constante. Viu-se que a altura de leito de 2 cm apresentou a queda de pressão tendendo a 150 Pa enquanto a altura de 4 cm tendendo a 200 Pa. Quanto à velocidade de mínima fluidização, verificou-se que a altura de 4 cm de leito apresentou-se ligeiramente superior.

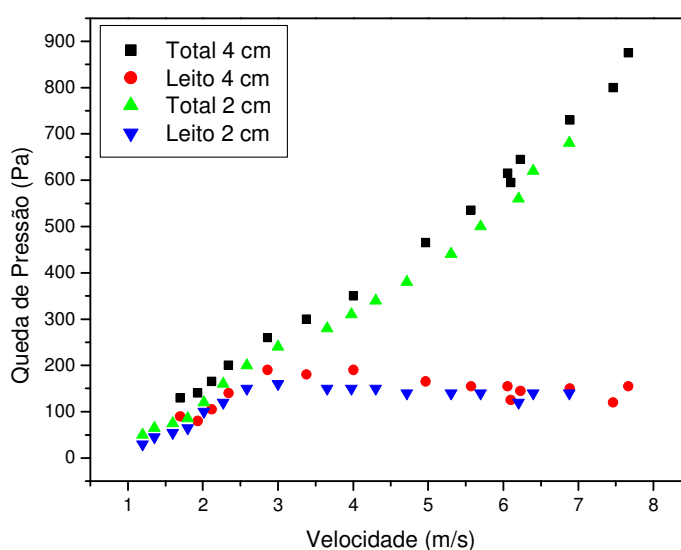


Figura 4.20: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, alturas do leito de 2 e 4 cm, velocidade crescente, borboleta a 90° e placa distribuidora.

Comparando-se os valores obtidos para as partículas de vidro com altura de 4 e 2 cm na abertura da válvula de 90°, notou-se que a velocidade de mínima fluidização praticamente não apresentou variação. A queda de pressão entretanto apresentou-se bem maior na faixa constante para a altura de 4 cm, tendo um valor de cerca de 680 Pa e um decréscimo para cerca de 400 Pa na altura de 2 cm. Isto pode ser verificado na Figura 4.22, que mostra a perda de carga no leito com as partículas de vidro, nas alturas de leito de 2 e 4 cm e na posição de válvula borboleta de 90°.

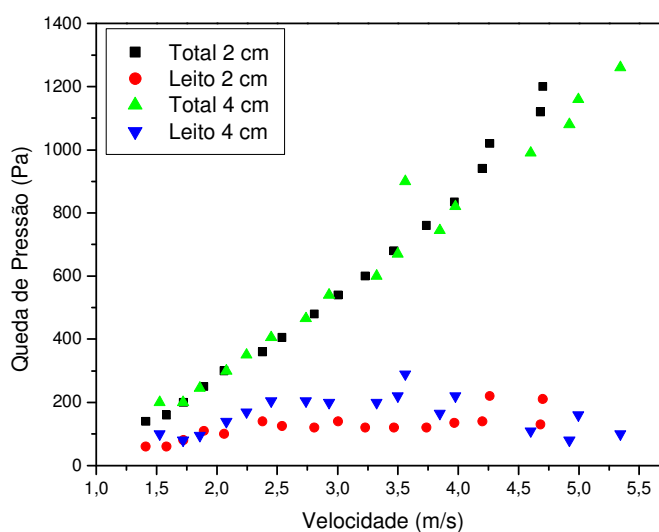


Figura 4.21: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de teflon, alturas do leito de 2 e 4 cm, velocidade crescente, borboleta a 30° e placa distribuidora.

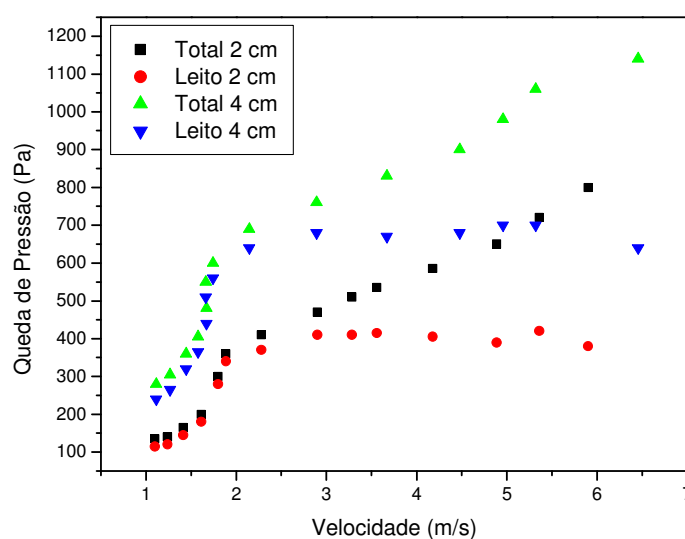


Figura 4.22: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, alturas do leito de 2 e 4 cm, velocidade crescente, borboleta a 90° e placa distribuidora.

Ribeiro (2005) em estudos realizados em leito pulso-fluidizado rotativo com celulose microcristalina, com diâmetro de partícula entre 200 e 500 μm , verificou que tanto o aumento da carga no leito quando o aumento da frequência de rotação do disco não influenciaram a velocidade de mínima fluidização, sendo que para variação de frequência de disco entre 5 e 15 Hz e variação da carga no leito de 0,4 a 1,5 Kg, as velocidades mínimas de pulso-fluidização apresentaram-se na faixa de 0,4 m/s. Já as quedas de pressão apresentaram variação com a carga de inertes, apresentando-se na faixa de 200 Pa para uma carga de 0,4 Kg e 800 Pa para uma carga de 1,5 Kg no leito.

No caso da válvula borboleta na posição de 30°, notou-se que as partículas de vidro apresentaram resultados próximos aos obtidos para a posição de 90°, entretanto, observou-se que a faixa de queda de pressão que tende a valores constantes apresentou pontos mais dispersos na curva para a altura de 4 cm. Isso devido ao fato de a borboleta na posição de 30° proporcionar uma fluidização menos homogênea das partículas como pode ser visto na Figura 4.23. Com relação à velocidade de mínima fluidização das partículas, a altura de leito de 2 cm apresentou velocidades de mínima fluidização superiores à altura de 4 cm.

Resultados semelhantes foram encontrados por Ambrosio-Ugri e Taranto (2004), em estudos realizados no comportamento de partículas de 2-hidróxidobenzóico, com diâmetro de 80 μm em leito fluidizado pulsado rotativo. Embora as partículas apresentassem grande

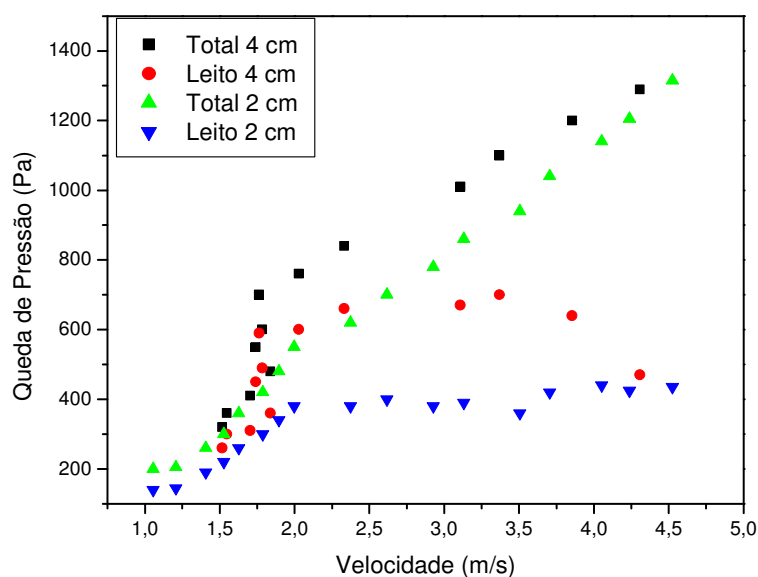


Figura 4.23: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro, alturas do leito de 2 e 4 cm, velocidade crescente, borboleta a 30° e placa distribuidora.

diferença de tamanho das partículas estudadas no presente trabalho, foi verificado que o aumento da carga de sólidos resultou na diminuição da velocidade mínima de pulso-fluidização. Foi verificado ainda que o aumento da frequência de rotação do disco causa a diminuição da velocidade mínima de pulso-fluidização.

As Figuras 4.24 e 4.25 mostram as curvas obtidas para as partículas de teflon e vidro nas alturas de 2 e 4 cm e posições de 90° e 30°, respectivamente. É possível notar que os pontos obtidos para a posição de 90° apresentaram-se menos dispersos, o que ressalta o fato de a posição de 30° apresentar uma fluidização mais heterogênea das partículas.

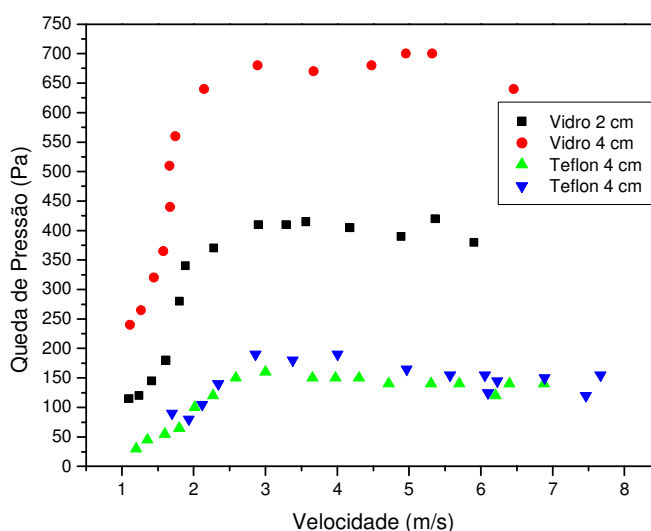


Figura 4.24: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro e teflon, alturas do leito de 2 e 4 cm, velocidade crescente, borboleta a 90° e placa distribuidora.

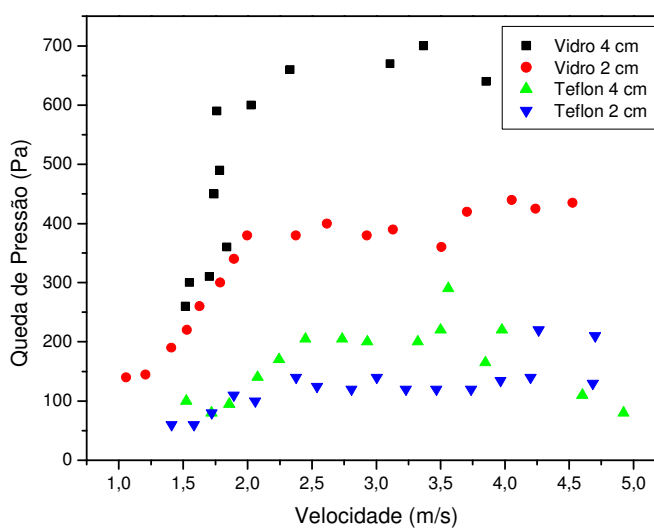


Figura 4.25: Queda de pressão no leito pulso-fluidizado com partículas de vidro e teflon, alturas do leito de 2 e 4 cm, velocidade crescente, borboleta a 30° e placa distribuidora

4.3- Cálculo das velocidades de mínima fluidização para o teflon e para o vidro

Através da equação de Ergun (2.4), foi possível calcular as velocidades de mínima fluidização para o teflon e para o vidro. Para os cálculos foram utilizados as propriedades mostrados na Tabela 4.3.

Foram encontrados valores relativamente próximos aos obtidos experimentalmente, levando-se em conta as aproximações realizadas para o cálculo nas propriedades de esfericidade, densidade das partículas e porosidade de mínima fluidização das mesmas.

Os valores calculados para a velocidade de mínima fluidização foram 4,47 m/s para o teflon e 3,13 m/s para o vidro, que são próximos aos vistos na Tabela 4.1 para a configuração do equipamento com placa distribuidora, ciclone acoplado e válvula borboleta a 90°.

4.4 Experimentos de agitação de partículas

Os experimentos de agitação das partículas foram feitos para os ângulos de 30, 60 e 90° na válvula borboleta. As velocidades do ar utilizadas foram de 4,5 e 6,5 m/s. Os experimentos foram feitos com e sem a placa distribuidora abaixo do leito de partículas.

Tabela 4.3: Parâmetros utilizados para o cálculo da velocidade de mínima fluidização das partículas de teflon e vidro.

Propriedade	Valor	Fonte
Diâmetro da partícula (d_p)	Teflon - 0,01 m	Experimental
	Vidro - 0,00438 m	
Densidade do ar a 25° C (ρ_g)	1,316043 Kg/m ³	(KREITH, 1977)
Viscosidade do ar a 25° C (μ)	1,6 x 10 ⁻⁵ Pa.s	(PERRY; CHILTON, 1980)
Porosidade de mínima fluidização (ϵ_{mf})	0,6 (teflon/ vidro)	(KUNII; LEVENSPIEL, 1991)
Esfericidade da partícula (ϕ)	1 (teflon/ vidro)	Suposição
Densidade da partícula (ρ_s)	Teflon - 2200 Kg/m ³	(VAN VLACK, 1984)
	Vidro - 2500 Kg/m ³	
Aceleração da gravidade (g)	9,81 m/s ²	-

Através dos testes verificou-se que as partículas estudadas pertenciam ao grupo D, da classificação de Geldart (1973). Viu-se que as partículas formavam jorros facilmente visualizados quando as mesmas eram expostas a distribuição heterogênea de velocidade.

Nos testes realizados sem placa distribuidora, pôde-se perceber que a posição de 60° apresentou uma espécie de jorro na lateral em que a válvula borboleta era aberta, entretanto, no lado oposto ocorreu a formação de uma zona morta (circulada em vermelho) na qual as partículas permaneciam paradas e sem circulação no leito. Para o ângulo de 60° com velocidade de 6,5 m/s o jorro lateral permaneceu na altura de 16 cm, na velocidade de 4,5 m/s altura do jorro ficou por volta de 13 cm.

A Figura 4.26 mostra a agitação do leito com a borboleta na posição de 60° sem a utilização da placa distribuidora e com velocidade de 4,5 m/s. Através da mesma é possível visualizar pela seta qual o sentido do movimento das partículas, sendo que as mesmas sofriam um movimento de subida na lateral esquerda e desciam do lado direito do leito. A área circulada apresentou-se como uma zona morta no leito, onde as partículas não apresentavam movimentação.

Tornou-se assim a utilização da placa imprescindível para se obter uma boa mistura das partículas e a não ocorrência da formação de zonas mortas no leito.

A configuração do equipamento para a posição da borboleta de 30° sem a placa distribuidora originou dois jorros localizados nas laterais do leito. Os dois não apresentavam a mesma intensidade, já que ocorria uma tendência ao jato na lateral em que a válvula borboleta abria ser ligeiramente maior, entretanto a agitação do leito ocorria de maneira eficaz, já que

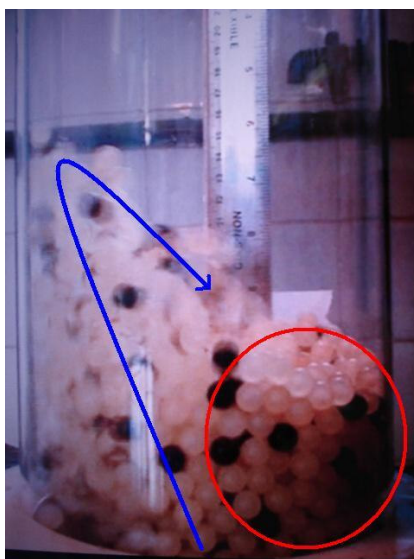


Figura 4.26: Agitação das partículas com borboleta no ângulo de 60° , velocidade de 4,5 m/s, sem placa distribuidora.

não se formavam pontos mortos no leito. Os dois jorros subiam pelas laterais do leito e retornavam pelo centro, fazendo movimentos cíclicos com sentidos contrários que coincidiam na parte central do leito.

Mesmo com a utilização da placa distribuidora, os jorros eram formados nas laterais do leito. A Figura 4.27, mostra a agitação das partículas para o ângulo de 30, com velocidade de 6,5 m/s utilizando-se placa distribuidora.

Pôde-se observar que a parte central do leito permaneceu em um nível mais baixo, de maneira que a parte superior do leito pode ser determinada por uma linha em formato de “V”. As duas velocidades estudadas apresentaram influência direta na altura dos jorros laterais, sendo que os mesmos atingiram a altura de 6 cm para a velocidade do ar de 4,5 m/s e um aumento para cerca de 10 cm quando a velocidade do ar foi aumentada para 6,5 m/s. Sem a placa distribuidora a altura do leito foi de 9 cm para a velocidade de 4,5 m/s e de 13 cm para a velocidade de 6,5 m/s.

Nos experimentos realizados sem placa distribuidora para a borboleta na posição de 90° mostraram que o leito apresentou um movimento cíclico. Entretanto, neste caso, as partículas se comportaram de maneira diferente da obtida para a borboleta na posição de 60°, onde o movimento cíclico se restringia às partículas da lateral do leito.

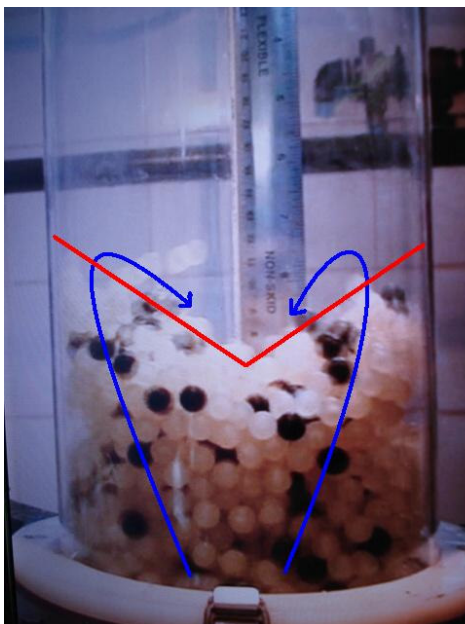


Figura 4.27: Agitação das partículas para o ângulo de 30, com velocidade de 6,5 m/s utilizando-se placa distribuidora.

Para a abertura de 90° quase a totalidade das partículas sofria este movimento, como pode ser visto na Figura 4.28 que mostra o movimento das partículas sem a placa distribuidora e com velocidade do ar de 6,5 m/s.

Nota-se que as partículas sofreram o movimento de subida em quase todo o leito. Verificou-se também, que na lateral direita (circulada em vermelho) ocorreu a formação de um ponto de estagnação, no qual as partículas permaneciam com movimentação muito baixa.

Essas partículas eram empurradas pelas outras que realizavam o movimento de descida e quando chegavam à parte central do leito, sofriam o movimento de subida. A altura máxima atingida pelas partículas foi de 18 cm para a velocidade de 6,5 m/s e de 13 cm para a velocidade de 4,5 m/s.

A introdução da placa distribuidora proporcionou uma boa mistura e agitação das partículas. Observou-se que não houve a formação de pontos mortos no leito e que o mesmo apresentava movimentos de subida e descida das partículas. Notou-se que nesses movimentos de subida, o leito subia com sua parte superior tendendo a uma linha horizontal, como um bloco de partículas, apresentando entretanto boa mistura entre si, como mostra a Figura 4.29 para a borboleta na posição de 90° e velocidade do ar de 6,5 m/s com a placa distribuidora.

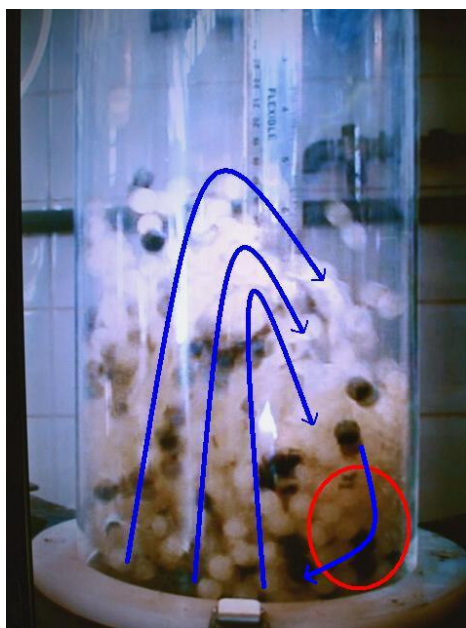


Figura 4.28: Agitação das partículas para a válvula na posição de 90°, sem placa distribuidora e com velocidade do ar de 6,5 m/s.

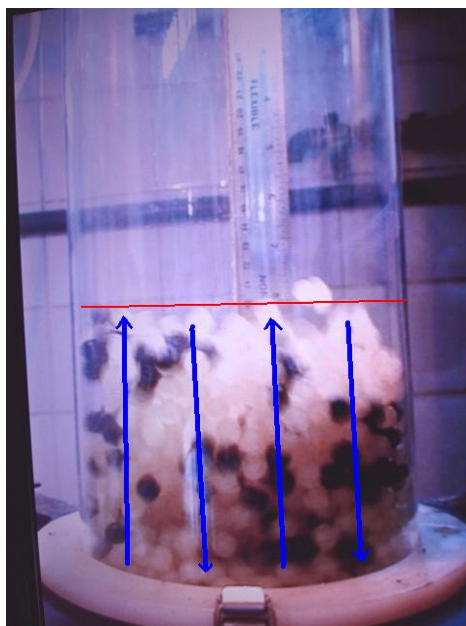


Figura 4.29: Agitação das partículas para a válvula na posição de 90° , com placa distribuidora e com velocidade do ar de 6,5 m/s.

Com a velocidade do ar em 4,5 m/s, a altura máxima das partículas foi de 9 cm e para a velocidade do ar de 6,5 m/s foi de cerca de 12 cm, ou seja, valores expressivamente inferiores àqueles obtidos nos ensaios sem a placa distribuidora, denotando a intensidade dos canais preferenciais de escoamento do ar para os experimentos realizados sem placa.

Resultados muito próximos a estes foram encontrados para a borboleta na posição de 60° utilizando a placa distribuidora, na qual o leito apresentou movimentação similar à obtida para a abertura de 90° e a tendência à formação de uma linha horizontal na superfície do leito. Para a velocidade de 6,5 m/s a altura do leito permaneceu na altura de 12 cm e para a velocidade de 4,5 a altura do leito foi de 9 cm, semelhantes às encontradas para a posição de 90° .

Como as configurações de 60° e 90° apresentaram resultados muito próximos quanto à agitação das partículas e a configuração de 60° acarretou em uma perda de carga muito superior, considerando a perda total do sistema, esta foi descartada das próximas etapas. Os testes posteriores de secagem utilizaram as posições de 30° e 90° na borboleta e a altura de 4 cm no leito de partículas.

No caso dos experimentos realizados com a altura de 2 cm de leito, observou-se que os mesmos apresentaram comportamentos semelhantes aos de 4 cm, tendo sempre a mesma tendência de agitação e de movimentação de partículas. Entretanto viu-se que a quantidade de partículas seria insuficiente para que fosse procedida a secagem, devido à pequena área

disponível para a adesão e secagem da pasta. Por este motivo esta altura foi descartada das etapas posteriores.

4.5 - Secagem de pastas

4.5.1 Avaliação da injeção na fase ativa e inativa e influência do ângulo da válvula borboleta

Inicialmente, foram feitos testes para avaliar se a injeção de pasta na fase ativa ou na inativa tinha influência nas características de secagem. Esta avaliação foi realizada fixando-se a temperatura do ar em 60° C, a velocidade do ar em 7m/s e partículas inertes de teflon. Com relação à válvula borboleta, foram utilizadas duas posições, de 30 e 90°. Os tempos de pulsação foram mantidos em 2s para a fase ativa e 2s para a fase inativa.

Foram realizados experimentos com injeção de pasta na fase ativa do processo e experimentos com injeção de pasta na fase inativa. A vazão de pasta de gesso foi mantida fixa em 300 mL/h, sendo injetados 5 mL a cada minuto. Assim, a cada minuto, eram injetadas no leito 5 porções de pasta de 1 mL a cada 10 s.

A queda de pressão foi monitorada a cada 5 minutos e ao final dos trinta minutos foram obtidos a quantidade de pó produzida, a quantidade de material aderido às partículas inertes e a quantidade de material aderido às paredes do tubo. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 4.4.

Através dos resultados obtidos, constatou-se que a maior produção de pó ocorreu para a posição da válvula em 90°. Isto porque nesta posição da válvula o leito de partículas fluidiza de maneira mais homogênea e causa um maior choque entre as partículas e entre estas e a parede do leito. Considerando-se a quantidade de material seco aderida às paredes do tubo, observou-se também que a abertura de 90° apresentou a menor quantidade de material aderido, provavelmente porque com a válvula na posição de 30° ocorrem dois jorros localizados nas laterais do leito, de modo que a pasta injetada é arrastada pelas partículas e entra em contato com as paredes do tubo. Dessa forma a pasta ainda com alta umidade adere com maior facilidade às paredes do tubo. Como o atrito entre as partículas e a parede do leito nesta posição da borboleta não é suficientemente forte para desprender esta camada de

sólidos, o resultado final é uma quantidade maior de sólidos aderida nas duas laterais do leito onde ocorre a circulação das partículas.

Quanto à quantidade de material aderido às partículas inertes, observou-se que a posição de 30° acarretou em uma quantidade de sólidos muito superior à encontrada para a posição da válvula em 90°. Novamente, acredita-se que a menor movimentação das partículas para esta abertura de válvula seja responsável pela maior retenção de pasta sobre os inertes.

Comparando-se os resultados da injeção de pasta na fase ativa e na inativa, observa-se para ambas as aberturas de válvula que os resultados da injeção na fase ativa produziram maior quantidade de pó e menor quantidade de pasta aderida às paredes do tubo e às esferas.

Fazendo-se um balanço entre a quantidade de pó recolhida e a quantidade de material aderida nas esferas e nas paredes do tubo, em todas as configurações foram encontrados valores próximos à quantidade total de sólidos injetados no leito no período do experimento.

As diferenças encontradas provavelmente foram provenientes de perdas ocorridas ao longo do ciclone ou devido a finos que foram carregados pelo ar na saída do mesmo. Durante os experimentos, foi observado que a queda de pressão no leito permaneceu constante, de maneira que o aumento da quantidade de material aderida às partículas inertes não alterou a perda de carga do leito de forma que essa pudesse ser sensível ao manômetro de tubo em U.

Como foi observado que a injeção na fase ativa do processo e a borboleta na posição de 90° apresentaram os melhores resultados, os testes seguintes permaneceram com esta configuração.

4.5.2 Avaliação da velocidade do ar, temperatura do ar e vazão de pasta

As temperaturas utilizadas foram de 60 e 70° C, as vazões de ar foram de 6 m/s e 8m/s e as vazões de pasta testadas foram de 300 e 600 mL/h. Os intervalos de fase ativa e inativa do processo foram mantidos em 2 s.

Observou-se que os valores obtidos para o hold-up do tubo apresentavam-se pouco significativos para as análises, já que a quantidade de material aderida ao tubo era muito pequena em relação à massa total do mesmo, o que resultava em grande erro na pesagem. Portanto, serão apresentados apenas resultados da quantidade de material aderida às partículas inertes (hold-up das esferas) e a quantidade de pó produzida recolhida.

Tabela 4.4: Resultados obtidos na avaliação de diferentes ângulos da borboleta e variação do período de injeção de pasta.

	Borboleta 90°		Borboleta 30°	
	Injeção Ativa	Injeção inativa	Injeção Ativa	Injeção inativa
Pó produzido (g)	19,51	16,41	12,70	9,22
Aderido ao tubo (g)	1,26	3,49	2,03	3,56
Hold-up do tubo (%)	0,09	0,26	0,15	0,26
Aderido às esferas (g)	4,19	4,38	12,48	16,32
Hold-up das esferas (%)	0,98	1,02	2,92	3,82
Queda de Pressão (Pa)	110	110	80	80

A Figura 4.30 mostra a produção de pó para as diferentes vazões de ar na temperatura de 60 ° C e vazão de pasta de 300 mL/h.

Comparando-se as duas velocidades de ar utilizadas (6 e 8 m/s), constata-se que a maior vazão possibilita a maior produção de pó no decorrer de todo o processo. Isto devido ao maior grau de agitação das partículas inertes e da força dos choques entre as partículas e entre as mesmas e as paredes do tubo, o que facilita o desprendimento do material seco. Isto foi observado tanto para a vazão de pasta de 300 mL/h quanto para a vazão de 600 mL/h.

Foi visto que a produção de pó apresentou-se de maneira crescente ao longo de todo o processo, entretanto, nos primeiros quinze minutos, a taxa de crescimento foi menor que nos últimos minutos do processo. Isto se deve ao fato de que na primeira parte do experimento, grande parte do material que é injetado no leito se adere às partículas, dificultando a produção de pó. Com cerca de quinze minutos de injeção, a adesão da pasta aos inertes tende a se manter em um valor constante e a secagem tende a entrar em regime permanente. Nesta fase do processo, uma maior parte da pasta que é injetada tende a secar e se desprender das partículas e a eficiência do processo é aumentada.

A Figura 4.31 mostra a taxa de produção de pó nas velocidades de 6 e 8 m/s, na temperatura de 60° C e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso. É possível verificar que a taxa de produção de pó na velocidade de ar de 8 m/s foi sempre superior à obtida para a velocidade menor do ar. Sabe-se pelos resultados obtidos no hold-up das esferas, o qual chega a um valor máximo e tende a se estabilizar, como será visto adiante, que a taxa de produção teria também a tendência em se estabilizar em um valor máximo com o decorrer do processo.

A Figura 4.32, mostra o hold-up das esferas no decorrer do processo para diferentes vazões de ar. Viu-se que para a vazão de pasta de 300 mL/h e temperatura de 60° C, que o hold-up das esferas atingiu um valor praticamente constante próximo a 1,5% para a velocidade de 8 m/s e próximo a 2,0% para a velocidade de 6 m/s.

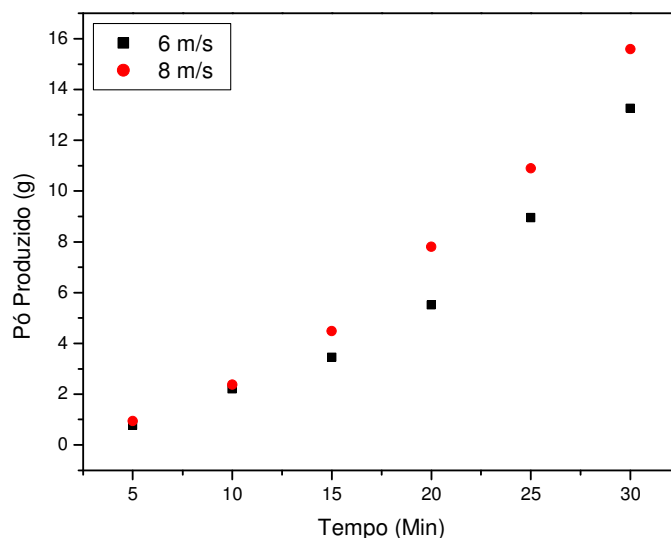


Figura 4.30: Pó de gesso produzido nas velocidades de 6 e 8 m/s, temperatura de 60° e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso.

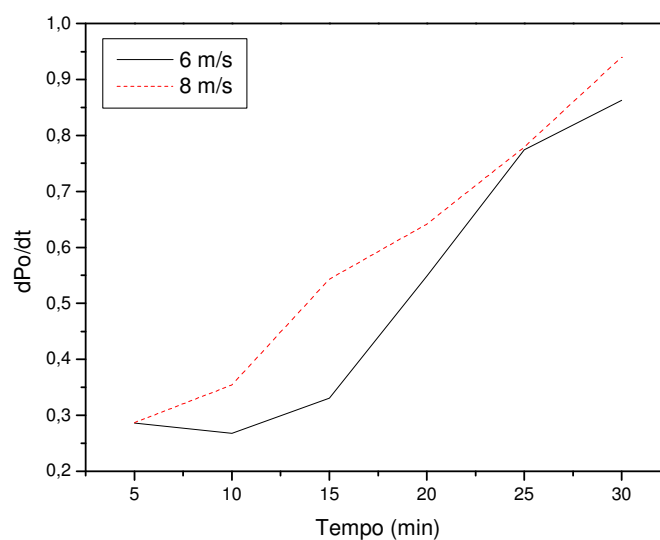


Figura 4.31: Taxa de produção de pó de gesso nas velocidades de 6 e 8 m/s, temperatura de 60° C e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso.

No caso da vazão de 600 mL/h, esses valores foram muito superiores, sendo que foram próximos a 7,6% para a velocidade de 6 m/s e 5,4% para a velocidade de 8 m/s. Observou-se que quando a vazão de pasta foi dobrada, o hold-up das esferas sofreu um aumento superior à duplicação, provavelmente devido a algum mecanismo de secagem não identificado.

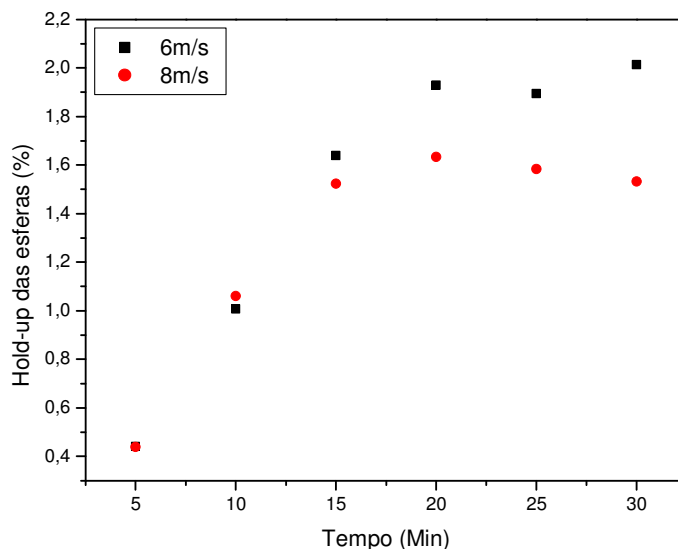


Figura 4.32: Hold-up das esferas nas velocidades de 6 e 8 m/s, temperatura de 60° C e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso.

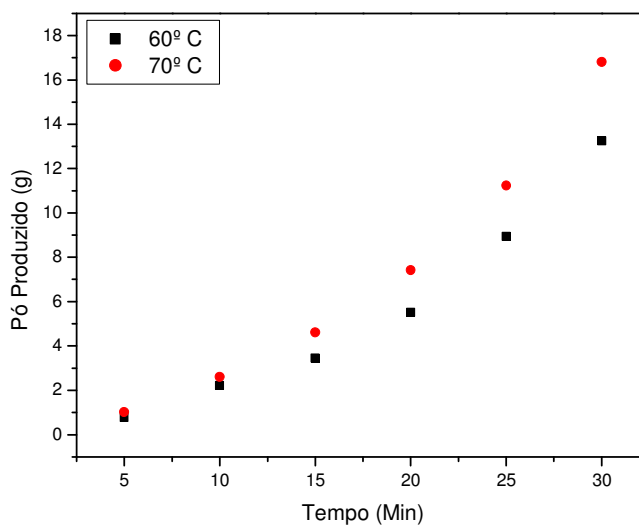


Figura 4.33: Pó de gesso produzido nas temperaturas de 60 e 70° C, velocidade do ar de 6 m/s e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso.

Nos ensaios a diferentes temperaturas, notou-se que o aumento da temperatura proporcionou uma maior produção de pó, como pode ser visto na Figura 4.33. Isso pode ter ocorrido porque o aumento da temperatura tende a provocar a diminuição da viscosidade da pasta, o que conseqüentemente melhora a distribuição da pasta sobre as partículas. Ademais, o aumento da temperatura aumenta a troca de calor convectiva, ocasionando uma secagem mais eficiente e um maior desprendimento da pasta dos sólidos inertes.

Na Figura 4.34 é apresentado o hold-up das esferas para a vazão de pasta de 300 mL/h. Pode-se observar que não há diferença expressiva nos valores de hold-up das esferas com o aumento da temperatura.

Na vazão de pasta de 600 mL/h, percebeu-se que o aumento da temperatura provocou a diminuição do hold-up das esferas. Isto ocorreu tanto na velocidade do ar de 6 m/s como na velocidade de 8 m/s, como pode ser visto nas Figuras 4.35 e 4.36, respectivamente.

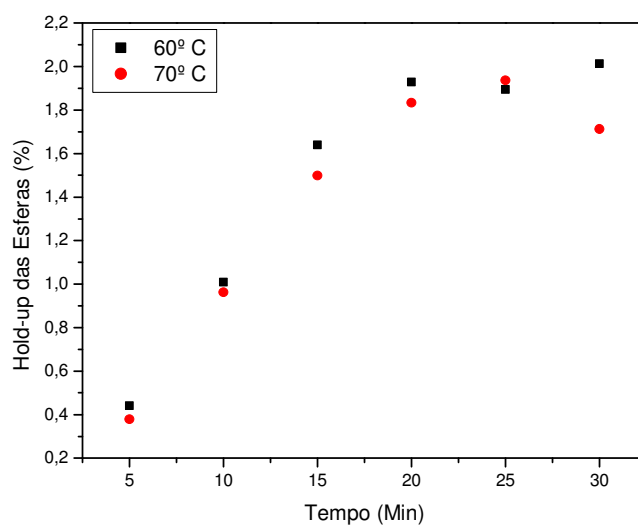


Figura 4.34: Hold-up das esferas nas temperaturas de 60 e 70° C, velocidade do ar de 6m/s e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso.

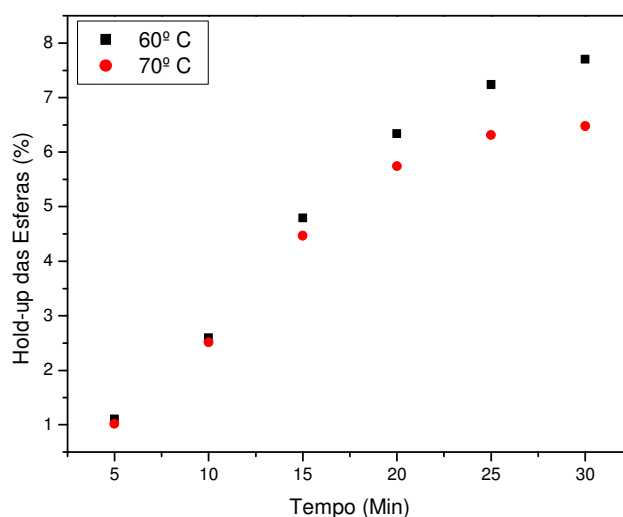


Figura 4.35: Hold-up das esferas nas temperaturas de 60 e 70° C, velocidade do ar de 6 m/s e vazão de 600 mL/h de pasta de gesso.

O fato do hold-up não ter apresentado dependência clara com a temperatura para a vazão de pasta de 300 mL/h pode estar relacionado à precisão da medida de peso das esferas, uma vez que a massa de esferas limpas (cerca de 420 g) é muito superior à quantidade máxima de pasta aderida (cerca de 30 g), de modo que os valores de hold-up obtidos podem não diferir devido à inexatidão da medida.

Considerando as duas velocidades de ar utilizadas, é possível verificar através da Figuras 4.37 que o hold-up das esferas diminui significativamente com o aumento da velocidade do ar de 6 para 8 m/s. Novamente, a intensa agitação das partículas a 8 m/s parece ser o fator responsável pela menor adesão de pasta às partículas.

Considerando-se a cinética da produção de pó, na velocidade de ar de 8 m/s, não foi possível notar de maneira clara a diferença gerada para as diferentes temperaturas, como pode ser visto na Figura 4.38, que mostra a cinética de produção de pó nas temperaturas de 60 e 70° C, vazão de ar de 8 m/s e vazão de pasta de 300 mL/h. Isso provavelmente ocorreu porque na maior vazão de ar o grau de agitação das partículas foi tão intenso que sobrepujou o efeito da temperatura. Resultados semelhantes foram obtidos para a vazão de pasta de 600 mL/h.

Comparando-se as duas vazões de pasta, observou-se que o aumento na vazão de 300 para 600 mL/h proporcionou um aumento no hold-up das esferas. No caso da temperatura de 70° e velocidade do ar de 8 m/s, o hold-up das esferas varia de 1,8 % para a vazão de 300 mL/h para 4,9 % para a vazão de 600 mL/h, o que compromete a eficiência do processo

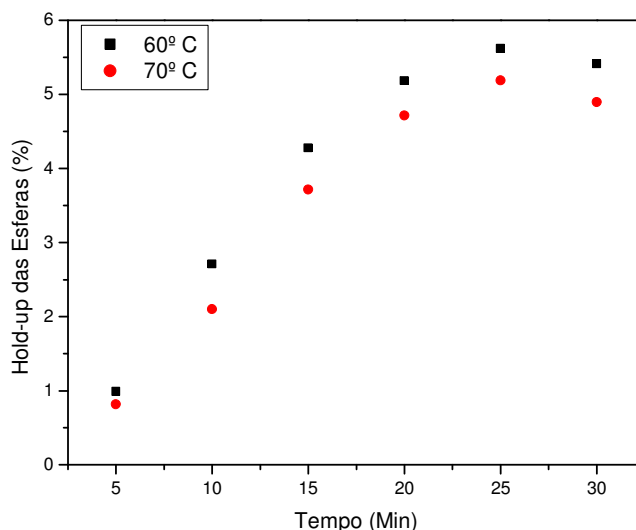


Figura 4.36: Hold-up das esferas nas temperaturas de 60 e 70° C, velocidade do ar de 8 m/s e vazão de 600 mL/h de pasta de gesso.

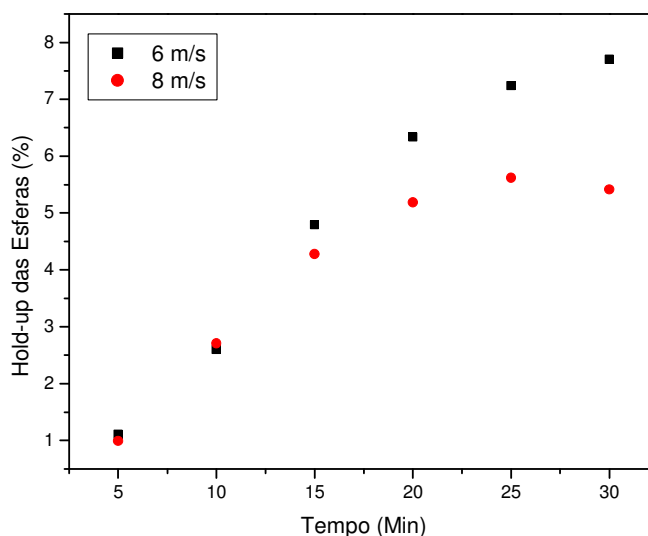


Figura 4.37: Hold-up das esferas na temperatura de 60° C, velocidade do ar de 6 e 8 m/s e vazão de 600 mL/h de pasta de gesso.

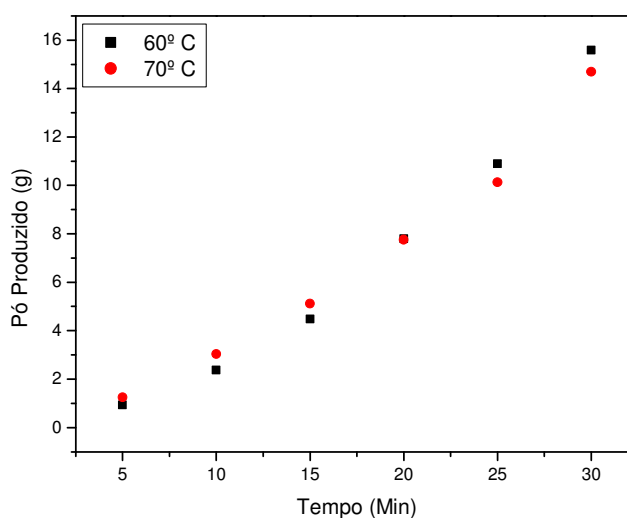


Figura 4.38: Pó de gesso produzido nas temperaturas de 60 e 70° C, velocidade do ar de 8 m/s e vazão de 300 mL/h de pasta de gesso.

No caso da temperatura de 70° C e vazão do ar de 6 m/s, o hold-up das esferas saltou de 1,8 para 6,2 %. O hold-up das esferas nas diferentes vazões de pasta pode ser visto na Figura 4.39.

Uma hipótese para este efeito diz respeito à espessura do filme de pasta sobre as partículas, assumindo que para as velocidades empregadas a resistência externa à transferência de massa seja desprezível. Quanto menor a vazão de pasta, mais fino o filme sobre as partículas. Como no interior do filme o transporte de massa é difusivo, pode ter

ocorrido segregação de sólido, uma vez que a emulsão de gesso é instável. Deste modo, a superfície livre do filme teria maior teor de umidade que a superfície aderida às partículas.

Para filmes mais espessos esse fenômeno é mais pronunciado, de modo que para a vazão de pasta de 600 mL/h haveria mais sólido aderido às partículas. Para a vazão de 300 mL/h, o filme é mais delgado, mais homogêneo e susceptível a ser quebrado pelos choques entre as partículas.

A Figura 4.40 mostra a cinética da produção de pó para as duas vazões de pasta, na temperatura de 70° e velocidade do ar de 8 m/s. Como esperado, a vazão maior possibilitou uma maior produção ao longo de todo o processo, apresentando uma produção de pó cerca de duas vezes superior à da menor vazão para qualquer tempo estudado.

Considerando-se a eficiência do processo como sendo a quantidade de pó produzido dividido pela massa injetada no mesmo intervalo de tempo, observa-se que a eficiência apresentou-se maior para a vazão de pasta de 300 mL/h, sendo que após 15 min esta tendência é mais acentuada, como pode ser visto na Figura 4.41. Como visto anteriormente, o tempo de 15 min é suficiente para que a quantidade máxima de pasta fique aderida sobre os inertes, de modo que após este tempo praticamente toda massa injetada será seca.

Considerando-se a eficiência de cada período de 5 minutos, observou-se que nos últimos 10 minutos a eficiência cresceu significativamente. Isto ocorreu porque a quantidade de sólidos aderida às esferas atingiu um valor máximo, assim a maior parte dos sólidos injetados no leito na parte final não se aderiu às partículas. O desprendimento foi efetivo e a produção de pó teve alta eficiência, atingindo cerca de 90% .

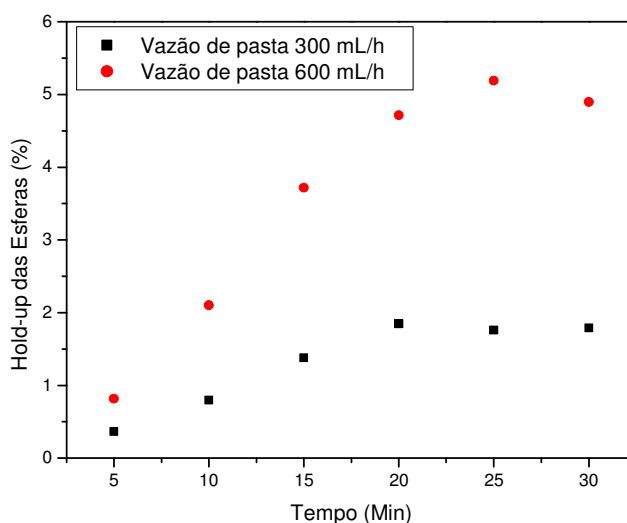


Figura 4.39: Hold-up das esferas nas vazões de pasta de gesso de 300 e 600 mL/h, temperatura de 70° C e velocidade do ar de 8 m/s.

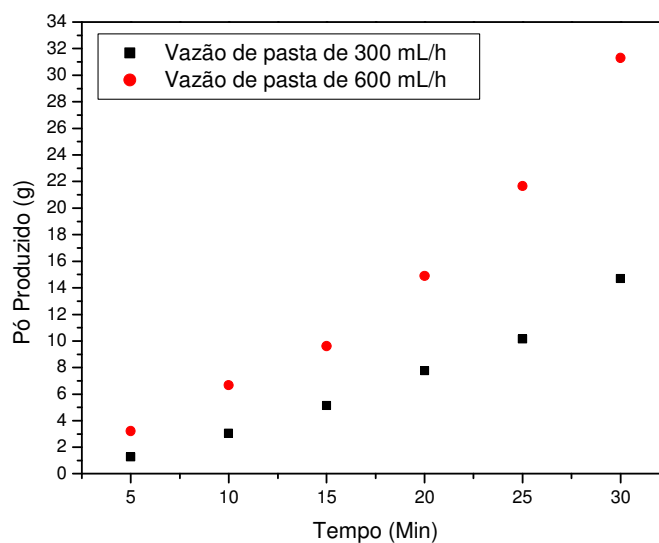


Figura 4.40: Pó de gesso produzido nas vazões de pasta de gesso de 300 e 600 mL/h, temperatura de 70° C e velocidade do ar de 8 m/s.

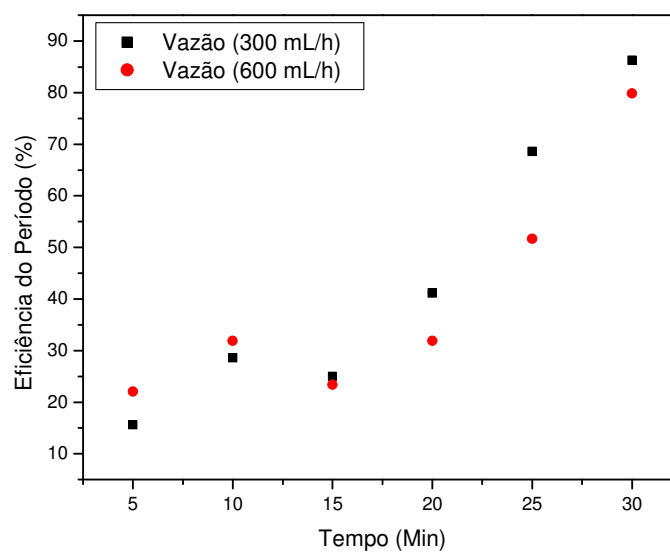


Figura 4.41: Eficiência no período na secagem de gesso com vazões de 300 e 600 mL/h, temperatura de 60° C e velocidade do ar de 6 m/s.

Foi possível observar que dependendo da utilização do secador pulso-fluidizado deve-se escolher a vazão de processo. No caso de sua utilização para recobrimento de partículas, a menor vazão de pasta resultará na formação de uma película mais fina sobre as partículas e a maior vazão resultará em uma camada mais espessa. No caso de sua utilização para a

secagem, a maior vazão de pasta proporcionará a maior produção de pó após o período de saturação das partículas inertes com a pasta.

4.5.3 Comparação entre pulso-fluidizado e vibro-fluidizado

Para a comparação com os resultados obtidos com o secador leito pulso-fluidizado foi utilizado um secador de leito vibro-fluidizado, o qual foi construído através de uma mudança no pulso-fluidizado com o acoplamento de um sistema de eixo excêntrico. O secador de leito vibro-fluidizado foi utilizado com a configuração de excentricidade do eixo de 2 mm e frequência de 14,58 Hz. O leito pulso-fluidizado foi utilizado com intervalo de pulsação de 2s (ativa/inativa). Em ambos os casos, o ar de secagem foi mantido na temperatura de 60° C e na velocidade de 8 m/s. A pasta usada foi pasta de gesso, na concentração de 20% (p/p) e vazão de 600 mL /h.

Observou-se que o leito pulso-fluidizado apresentou melhores resultados de rendimento, bem como menor adesão de material às partículas inertes. Pode ser visto na Figura 4.42, que a quantidade de material seco obtida no secador pulso-fluidizado foi superior em todo o processo.

Através da Figura 4.43, é possível observar que o hold-up das esferas, no caso do secador vibro-fluidizado, não teve a tendência a se estabilizar com o decorrer do processo, como ocorreu com o secador pulso-fluidizado. No pulso-fluidizado, foi possível observar que após o tempo de vinte minutos, o valor tende a ser constante, o que não ocorre com o vibro-fluidizado, no qual a massa de material aderido às esferas apresentou-se crescente, independentemente do tempo.

A Figura 4.44 mostra a eficiência de cada período de 5 minutos para os dois secadores. Observou-se que o valor máximo atingido pelo secador vibro-fluidizado foi cerca de 40% na etapa final do processo. Já o secador pulso-fluidizado, teve eficiência superior a 100% nos últimos cinco minutos do processo. Isso pode ser explicado, levando-se em conta que uma parte do material que já estava aderido às partículas, despreendeu-se nessa etapa do processo.

Assim, além do material injetado naquele período, houve um acréscimo no pó produzido do material que se despreendeu no período em questão.

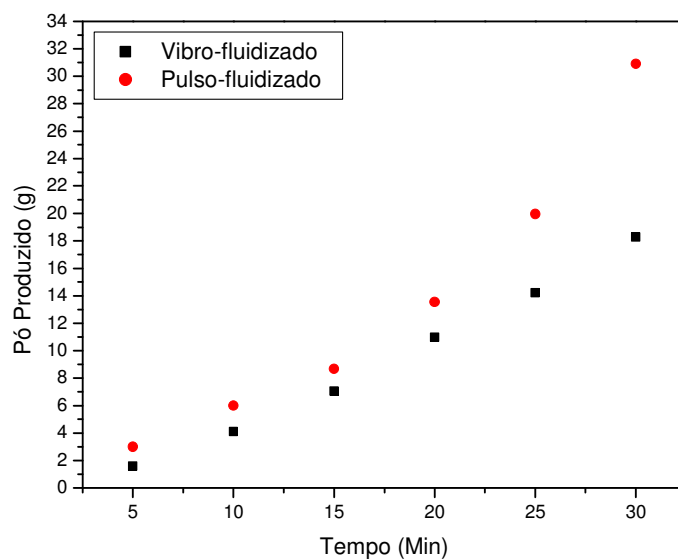


Figura 4.42: Pó de gesso produzido nos secadores de leito pulso-fluidizado e vibro-fluidizado, temperatura de 60° C, velocidade do ar de 8 m/s e vazão de 600 mL/h de pasta de gesso.

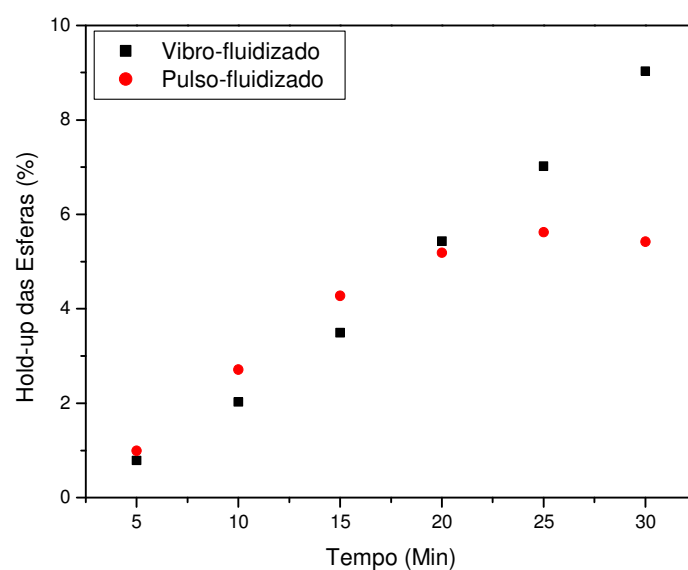


Figura 4.43: Hold-up das esferas nos secadores de leito pulso-fluidizado e vibro-fluidizado, temperatura de 60° C, velocidade do ar de 8 m/s e vazão de 600 mL/h.de pasta de gesso.

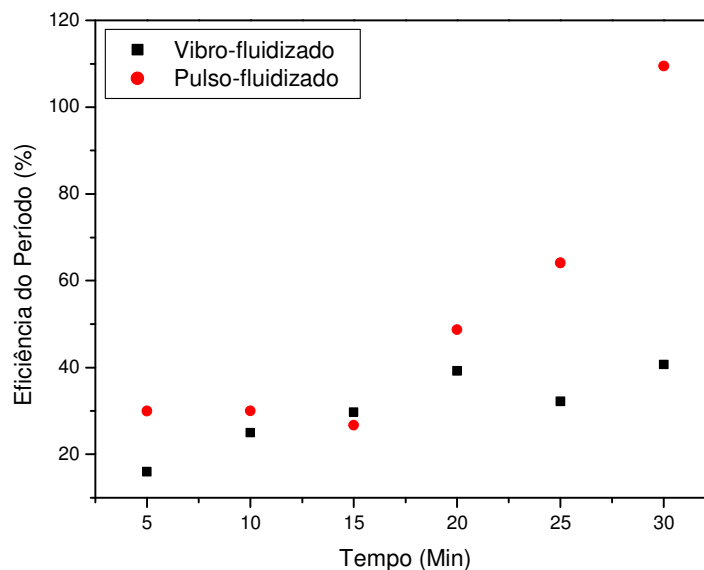


Figura 4.44: Eficiência do período na secagem em secadores pulso e vibro-fluidizado, temperatura de 60° C, velocidade do ar de 8 m/s e vazão de 600 mL/h de pasta de gesso.

Utilizando-se a definição do parâmetro vibracional como :

$$\Gamma = \frac{AW^2}{g} = \frac{A(2\pi f)^2}{g} \quad (4.1)$$

onde:

Γ = adimensional de vibração (-);

A = amplitude de vibração (m);

f = frequência vibracional (s^{-1});

W = frequência angular vibracional ($rad\ s^{-1}$);

g = aceleração da gravidade (m/s^2).

O cálculo do adimensional de vibração do presente trabalho resultou em 3,42, o que é um parâmetro relativamente alto de vibração quando comparado a trabalhos como o de Camargo (2003), no qual o adimensional de vibração variou de 0 a 6,6. Nesta condição vibracional a movimentação das partículas é intensa e os coeficientes de transferência de calor e de massa são elevados.

Viu-se que mesmo com a vibração das partículas, o secador pulso-fluidizado foi mais eficiente, provavelmente pela intensidade dos choques entre os inertes, o que provocou o maior desprendimento dos sólidos. Ressalta-se que esta adaptação do leito pulso-fluidizado ao

vibro-fluidizado é rudimentar e deve ser aprimorada. Como o sistema de vibração e o leito pertenciam à mesma estrutura metálica, certamente parte da vibração gerada foi transferida à estrutura e ao leito, não sendo totalmente empregada na vibração das partículas. Para que isto ocorresse, seria necessário construir o sistema vibracional em separado à estrutura do leito, como o empregado por Camargo (2003). Como retratam-se na literatura, trabalhos como o apresentado por Daleffe (2005) sobre estudo fluidodinâmico de um secador vibro-fluidizado, no qual foram utilizadas frequências entre 0 e 18,2 Hz e amplitudes entre 0 e 0,021m. Uma possível alternativa seria a utilização de menores frequências e maiores amplitudes na vibração do leito, o que poderia resultar em choques mais efetivos das partículas e maior desprendimento de material das mesmas.

4.5.4 Experimentos de secagem com pasta de limão, maltodextrina e tomate no leito pulso-fluidizado

Foram realizados testes de secagem com pasta de limão, pasta de limão com maltodextrina e pasta de tomate. Durante os experimentos foi utilizada a temperatura do ar de 60° C e a velocidade do ar de 8 m/s. As vazões de pasta foram de 300 e 600 mL/h.

O primeiro teste foi realizado utilizando-se pasta de limão na concentração de 20° Brix e vazão de pasta de 300 mL/h. Observou-se que após cinco minutos do início da injeção ocorreu o colapso total do leito. As partículas formaram um corpo sólido que não foi desestruturado nem mesmo pelas pulsações de ar. Os efeitos de pulsação de ar eram suficientes apenas para elevar uma parte das partículas, ainda aderidas e após a passagem do ar elas voltavam a se acomodar. Após o colapso do leito, a injeção de pasta foi cessada e o escoamento do ar bem como a pulsação foram mantidos. Ainda assim as esferas permaneceram aderidas por uma hora, não voltando a fluidizar. A queda de pressão do leito sofreu uma variação com o colapso do leito, passando de 110 para 150 Pa após o colapso.

Através do balanço dos sólidos verificou-se que estes permaneceram em sua totalidade aderidos às partículas inertes e às paredes do tubo.

Os testes de pasta de limão e maltodextrina foram realizados com as mesmas amostras de pasta de limão, entretanto adicionando-se maltodextrina para que a concentração da mesma fosse de 65% em relação aos sólidos.

Os resultados foram semelhantes ao experimento anterior e o colapso do leito ocorreu após 5 minutos de injeção de pasta. A queda de pressão do leito sofreu um aumento, devido à adesividade das partículas e subiu de 110 para 210 Pa. Da mesma maneira como ocorreu com a pasta de limão, mesmo após a parada na injeção de pasta, o leito permaneceu em colapso.

Com os resultados obtidos viu-se que a dificuldade de secar o limão provavelmente ocorre devido à baixa temperatura de transição vítrea do material, o que faz com que o processo de secagem ocorra em temperaturas superiores à mesma e resulta na adesão do material, a qual é característica do estado gomoso que o mesmo se encontra em temperaturas superiores à de transição. De acordo com Roos; Karel (1991) a temperatura de transição vítrea da sacarose pura é de 62° C e as maltodextrinas de DE iguais a 20, 10 e 4 tem temperaturas de transição vítrea de 135, 160 e 190° C, respectivamente. Apesar de a adição desses agentes elevar a temperatura de transição vítrea da mistura, a mesma é também influenciada pelo alto teor de água presente nas amostras. Uma alternativa para se tentar realizar secagem do suco seria a utilização de paredes resfriadas e baixas temperaturas de ar, o que provavelmente dificultaria o processo de transferência de massa e acarretaria em altos custos operacionais.

Por fim foi realizado um ensaio com pasta de maltodextrina na concentração de 20° Brix. Tentou-se injetar a pasta na vazão de 600 mL/h, entretanto, após 10 minutos de injeção percebeu-se parte da pasta estava escorrendo para a base do leito, ou seja, a quantidade de pasta injetada foi superior à capacidade de adesão da mesma sobre as partículas. Para a vazão de 300 mL/h constatou-se que não houve colapso do leito e as partículas permaneceram fluidizando normalmente. Entretanto, a secagem não ocorreu de maneira efetiva, uma vez que a quantidade de pó produzida foi insignificante. A Figura 4.45 mostra o hold-up das esferas para a secagem de pasta de maltodextrina e gesso com vazão de pasta de 300 mL/h, temperatura de 60° C e velocidade do ar de 8 m/s, através da qual é possível verificar a elevada adesão de sólidos às partículas inertes na secagem de pasta de maltodextrina.

Foi observado que o hold-up das esferas na injeção da maltodextrina não tende a um valor constante como ocorre com o gesso, sendo este sempre crescente ao longo do processo e correspondendo à quase totalidade dos sólidos injetados no leito, como pode ser visto na Figura 4.46. Nos experimentos com injeção de pasta de maltodextrina a queda de pressão permaneceu constante, sendo de 110 Pa em todo o processo.

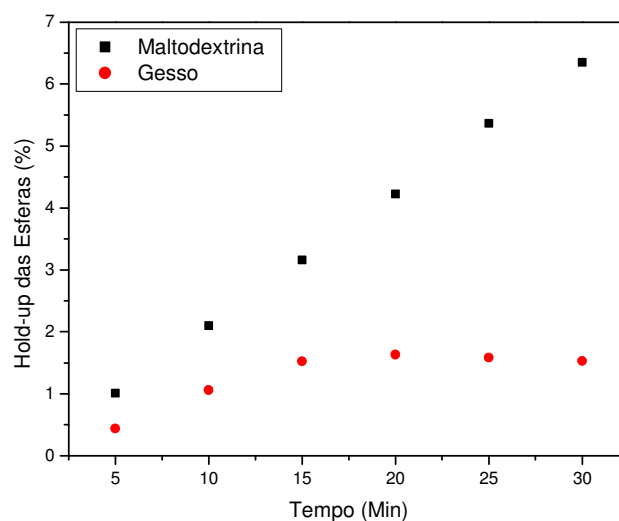


Figura 4.45: Hold-up das esferas na secagem de gesso e maltodextrina com vazão de 300 mL/h, temperatura de 60° C e velocidade do ar de 8 m/s.

Resultados muito próximos ao da maltodextrina pura foram obtidos para o extrato de tomate, na concentração de 20° Brix, onde praticamente todos os sólidos injetados permaneceram aderidos às partículas inertes. O leito permaneceu fluidizando normalmente durante o experimento, não havendo o colapso do leito e nem a formação de aglomerados de partículas. A Figura 4.47 mostra o hold-up das esferas obtido para as pastas de tomate e maltodextrina.

No caso do tomate, foi visto que a queda de pressão sofreu um aumento logo após o início da injeção de pasta. A pressão variou de 110 para 140 Pa após o início da injeção e permaneceu constante ao longo do processo.

Tanto o tomate quanto a maltodextrina não resultaram na produção de quantidades significativas de pó, sendo que foram recolhidos somente resquícios no caso do tomate e cerca de 1,5 g no caso da maltodextrina, considerando a injeção de 30 g de sólidos.

O fato do tomate não apresentar a mesma adesividade presente no limão, pode ser devido ao fato de que seus sólidos apresentam cerca de 50% de açúcares, entre glicose, frutose e sacarose. Já no caso do limão, sabe-se que quase a totalidade de seus sólidos são carboidratos, o que torna ainda mais difícil o processo de secagem, ocorrendo o favorecimento da adesão das partículas.

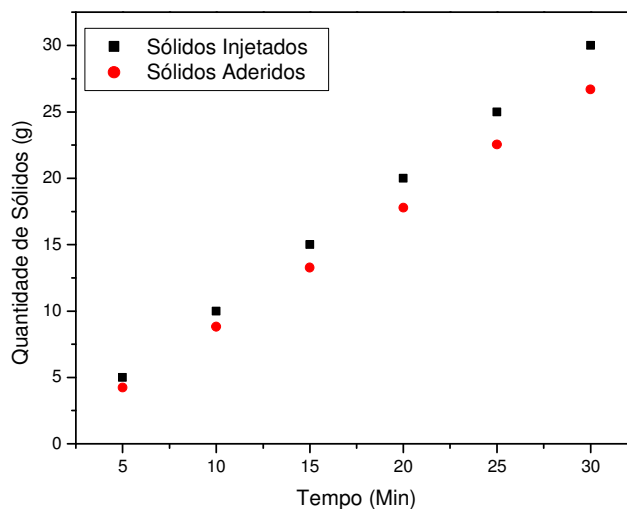


Figura 4.46: Quantidade de sólidos injetados e sólidos aderidos na secagem de pasta de maltodextrina, vazão de 300 mL/h, temperatura de 60° C e velocidade do ar de 8 m/s.

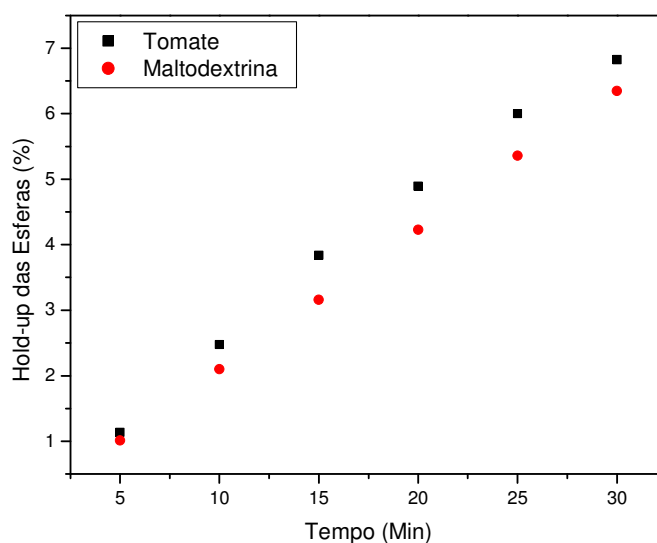


Figura 4.47: Hold-up das esferas na secagem de extrato de tomate e maltodextrina com vazão de 300 mL/h, temperatura de 60° C e velocidade do ar de 8 m/s.

A influência do açúcar no sentido de promover a acumulação e instabilidade de leitos na secagem de pastas e suspensões é conhecida amplamente e discutida na literatura, conforme cita Martinez et al. (1995), entre outros. Polpas com elevadas concentrações de açúcares, principalmente redutores, de acordo com Ramos (1997), promovem a formação de películas fortemente aderidas à superfície das partículas, cujo atrito e impacto entre as partículas não são suficientes para rompê-las à medida que a secagem prossegue. Devido

ainda à característica aderente dos açúcares, ocorre a formação de aglomerados de partículas, que comprometem a qualidade do leite, provocando problemas de instabilidade que muitas vezes culminam no colapso do leite. A instabilidade, se dá principalmente no momento da alimentação, quando sob o efeito da temperatura, as partículas molhadas com a polpa apresentam maior tendência a se aglomerarem. Justifica-se assim o efeito positivo do açúcar na retenção dos sólidos (MEDEIROS, 2001).

Segundo Bhandari; Datta; Howes (1997) a polpa de tomate é um exemplo típico de produto que apresenta grande dificuldade em ser seco em *spray dryer* devido à baixa temperatura de transição vítrea de açúcares presentes no mesmo, os quais apresentam baixo peso molecular.

4.5.6 Experimentos de secagem de suco de limão no leite pulso-fluidizado

Para efeito de comparação com a secagem de pasta de limão, foram realizados alguns testes de secagem no secador pulso-fluidizado com suco de limão, os quais foram realizados com adição de maltodextrina nas concentrações de 55 e 65 %. Os experimentos mostraram que na secagem de suco de limão com maltodextrina o colapso do leite ocorre como na pasta de limão, entretanto em tempos ligeiramente maiores. Isto provavelmente devido à menor quantidades de sólidos presentes no suco, o que resulta numa menor quantidade de açúcares sendo injetados no leite de partículas e conseqüentemente, mais tempo para a ocorrência do colapso do leite.

Como verificou-se que a umidade da amostra (b.u.) era complementar ao teor de sólidos solúveis, o valor do Brix foi utilizado para estimar a quantidade de sólidos no suco e calcular a adição de maltodextrina ao mesmo. Isto pode ser visto na Tabela 4.5 que mostra a relação existente entre a quantidade de sólidos solúveis no suco e a umidade do mesmo.

O teor de sólidos solúveis do suco utilizado nos experimentos variou de 7 a 8° Brix e o valor do hold-up das esferas e do tempo de colapso do leite, para as diferentes concentrações e diferentes temperaturas do ar, pode ser visto na Tabela 4.6.

Tabela 4.5: Relação entre sólidos solúveis do suco de limão e sólidos totais.

Sólidos solúveis	°Brix do suco
0,0707 ± 0,0077	7,0
0,0770 ± 0,0001	7,2
0,0751 ± 0,0002	7,0

Tabela 4.6: Influência da concentração de maltodextrina e da temperatura do ar de secagem no tempo de colapso e hold-up das esferas na secagem de suco de limão em secador de leito pulso-fluidizado.

Concentração de Maltodextrina	Temperatura (° C)	Tempo de colapso (Min)	Hold-up das Esferas (%)
55%	50	6,50	0,88
	60	5,83	0,92
	70	6,16	0,94
65%	50	6,33	1,09
	60	6,58	1,09
	70	6,12	1,10

Verificou-se que tanto a temperatura quanto a concentração de maltodextrina adicionada ao suco não apresentaram diferença expressiva no tempo de colapso do leito. No caso do hold-up das esferas, foi possível verificar que o aumento na concentração de maltodextrina resultou em um ligeiro aumento na massa de material aderida às partículas inertes, devido ao aumento de sólidos injetados no leito durante a secagem.

Foi visto, em experimento realizado com a adição de 70% de maltodextrina, que em baixa vazão (200 mL/h) a adesão e colapso das partículas não ocorre, sendo que o leito permanece com fluidização normal. Entretanto, a produção de pó não ocorre, sendo que foram encontrados somente resquícios de pó no recipiente de recolhimento.

De acordo com Bhandari et al. (1993) o problema de adesão no caso de sucos de frutas ocorre principalmente devido às baixas temperaturas de transição vítrea dos açúcares de baixo peso molecular presentes nos produtos como sacarose, glicose e frutose. A diminuição das temperaturas de transição vítrea é ainda favorecida pelo aumento da quantidade de água nesses alimentos. Como retratado por Truong; Bhandari; Howes (2005) ácidos orgânicos como tartárico, cítrico e málico também contribuem para que a temperatura de transição vítrea do alimento seja menor, o que contribui para a existência do estado gomoso do material e conseqüentemente coesão interparticular e entre as mesmas e a superfície do secador. Isto deve estar colaborando no caso do limão, para a diminuição da temperatura de transição e aumento da adesão.

4.6 Secagem de suco de limão em *spray dryer*

Como observou-se que tanto a pasta de limão como o suco de limão apresentaram problemas de adesão nas partículas inertes no secador pulso-fluidizado o que impossibilitava o processo de secagem e que o mesmo problema ocorria ainda com a adição de maltodextrina, optou-se por realizar alguns testes de secagem em secador por atomização *spray dryer*, por se tratar de um método mais difundido e aplicado industrialmente. Devido a dificuldades de bombeamento da pasta, foram utilizadas nos testes amostras de suco de limão e suco de limão com maltodextrina, as quais apresentariam o mesmo comportamento da pasta de limão.

Os teores de sólidos solúveis do suco de limão utilizado nos experimentos no *spray* foram próximos aos empregados no secador pulso-fluidizado, ou seja, entre 7,5 a 7,75°Brix. As condições operacionais utilizadas nos experimentos de secagem de suco de limão no *spray dryer* são apresentadas na Tabela 4.7.

A vazão de injeção de suco no equipamento sofreu variações durante os experimentos e a vazão encontrada como favorável para a realização dos experimentos foi de 1000 mL/h.

Entre as diferentes temperaturas utilizadas, foi visto que a temperatura de 140° C foi a temperatura mais eficiente para que ocorresse a secagem do produto e não houvesse adesão ou queima do mesmo.

As porcentagens de maltodextrina utilizadas foram de 50, 55, 60, 65 e 70%, verificando-se que tanto para a maltodextrina com DE igual a 10 como para a maltodextrina com DE igual a 20, a quantidade mínima de maltodextrina a ser adicionada ao suco para que se conseguisse realizar a secagem com sucesso foi de 65%. Foi observado que em porcentagens inferiores a esta, ocorria adesão dos sólidos às paredes do equipamento e às paredes da tubulação que direcionava o ar de secagem até o ciclone. Nestes casos, a remoção dos sólidos das paredes do equipamento era difícil, devido à alta adesão das partículas ao mesmo.

Com a utilização de maltodextrinas de diferentes DE, foi visto que para a mesma porcentagem de adição, no caso 65%, a quantidade de pó produzida com a maltodextrina de DE 10 foi superior à de DE 20.

Devido à grande dificuldade existente na secagem de materiais ricos em açúcares, além da utilização de aditivos na tentativa de redução de adesão, outras alternativas reportadas na literatura são o controle da temperatura do ar de secagem, tentando-se utilizar a temperatu-

Tabela 4.7: Condições operacionais utilizadas na secagem de suco de limão em *spray dryer*.

Experimento	Temperatura (° C)	Vazão (mL/h)	Maltodextrina (%)	Produção de pó	DE (Dextrose Equivalente)
1	110	770	50	Não	
2	130	770	55	Não	
3	145	770	60	Não	10
4	155	1000	70	Sim	
5	140	1000	65	Sim	
6	140	1000	60	Não	20
7	140	1000	65	Sim	

ra apropriada (BHANDARI et al., 1997), a introdução de ar frio no fundo do secador (LAZAR et al., 1956) a refrigeração da parede do secador (BRENNAM; HERRERA; JOWITT, 1971).

Os pós obtidos nas secagens de suco com 65% de maltodextrina (DE=10) e com 65% de maltodextrina (DE=20) foram submetidos a análises físico químicas, entre as quais estão umidade, molhabilidade, grau de aglomeração, higroscopicidade, dispersibilidade, determinação da cor e atividade de água. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

4.6.1 Análises físico-químicos dos pós

Os resultados obtidos para os pós de suco de limão com 65% de maltodextrina com DE igual a 10 e 20 secos em *spray dryer* podem ser vistos na Tabela 4.8.

Os valores obtidos para a higroscopicidade do suco de limão em pó apresentaram-se próximos aos encontrados por Jaya e Das (2004), que obtiveram valores entre 5,13 e 9,38% para manga em pó. Estes autores encontraram valores de dispersibilidade que variaram de 67,05 a 99,98 para a manga em pó, valores que estão no mesmo intervalo dos obtidos para o limão em pó. Pôde-se observar no caso do limão que as maltodextrinas de diferentes DE utilizadas apresentaram uma diferença muito pequena para a dispersibilidade, resultando em valores que variaram cerca de 1%.

Tabela 4.8: Análises físico-químicas de suco de limão em pó com 65% de maltodextrina secos em *spray dryer* a 140° C e vazão de 1000 mL/h.

Teste	Limão com 65% de maltodextrina DE-10	Limão com 65% de maltodextrina DE-20
Umidade (BU)	5,36 ± 0,1353	7,82 ± 0,1195
Molhabilidade (s)	123,67 ± 10,2632	130,33 ± 8,9629
Grau de aglomeração (%)	74,51 ± 4,0337	77,04 ± 3,3471
Higroscopicidade (%)	5,34 ± 0,0066	7,81 ± 0,0045
Dispersibilidade (%)	78,73	79,28
Determinação da cor		
L*	89,94 ± 0,10	94,26 ± 0
a*	1,71 ± 0,01	-0,4 ± 0,03
b*	13,58 ± 0,07	7,11 ± 0,02
Atividade de água (-)	0,156 ± 0,004	0,195 ± 0,003

A molhabilidade dos pós de limão apresentou-se relativamente grande quando comparada àquelas encontradas por Jaya e Das (2004), que encontraram valores entre 17,35-35,27s para a manga em pó. Quando comparados com os resultados obtidos por Vissoto et al. (2006) a molhabilidade apresentou valores relativamente pequenos, já que os valores encontrados pelos autores para achocolatado em pó foram de até 8 min ou 480s.

Os resultados obtidos para o grau de aglomeração do suco de limão foram bem superiores aos encontrados por Jaya e Das (2004), que obtiveram valores entre 8,96-33,97% para a manga em pó.

4.7 Isotermas do suco de limão em pó.

Para efeito de caracterização e para que fosse entendido o mecanismo de ação dos agentes encapsulantes na secagem e seu comportamento sob diferentes condições de umidade, resolveu-se construir isotermas de sorção dos pós de limão. Para isso, foram utilizadas amostras de limão, limão com maltodextrina e foi utilizado ainda um outro agente encapsulante para comparação, a goma arábica. Os pós utilizados para a determinação das isotermas foram obtidos conforme descrito no item 3.2.5. A umidade de equilíbrio em função da atividade de água para o suco de limão em pó com e sem aditivos nas diferentes temperaturas é apresentada na Tabela A.1 do apêndice A. O conteúdo de umidade para cada atividade de água é o valor médio de três amostras. Os resultados dos ajustes das isotermas de suco de limão, suco de limão com goma arábica e suco de limão com maltodextrina para os diferentes modelos são apresentados nas Tabelas A.2, A.3 e A.4, respectivamente, no apêndice A.

Todos os modelos testados apresentaram resultados satisfatórios, com coeficientes de determinação acima de 90% e soma quadrática residual inferior a 0,0291. Assim, adotou-se o modelo de GAB para as análises a seguir, uma vez que este modelo é bastante empregado para produtos alimentícios e comporta considerações físicas (GABAS et al., 1999; TELIS et al., 2000).

Os resultados obtidos para os ajustes com a equação de GAB para os pós de limão, limão com maltodextrina e limão com goma arábica podem ser vistos na Tabela 4.9.

Os resultados obtidos para as constantes C e K do modelo de GAB, encontrados para as diferentes amostras de limão em pó nas diferentes temperaturas estão de acordo com Lewick (1997), que sugere valores de $0,24 < K \leq 1$ e $5,67 \leq C \leq \infty$ baseado na análise matemática do ajuste e garantindo que constantes nesta faixa de valores possibilitam que a monocamada seja estimada com erro inferior a $\pm 15,5\%$.

Tabela 4.9: Parâmetros estimados para as constantes da equação de GAB nas isotermas de limão, limão com maltodextrina e limão com goma arábica.

	Limão			
	20° C	30° C	40° C	50° C
C	27.3634	16.3431	22.1899	12.9603
K	0.9235	0.9004	0.9521	0.9283
X _m	0.1532	0.1664	0.1409	0.1568
SSR	5.0×10^{-4}	0.0026	0.0045	2.8×10^{-4}
R ²	0.9993	0.9954	0.9932	0.9995
Limão com Maltodextrina				
C	15.3137	6.2594	9.3879	4.8343
K	0.9597	0.9135	0.9714	0.9468
X _m	0.0552	0.068	0.0545	0.0627
SSR	9.4×10^{-4}	3.9×10^{-4}	6.3×10^{-4}	3.1×10^{-5}
R ²	0.9935	0.9967	0.9952	0.9997
Limão Goma Arábica goma				
C	10.8954	16.0392	8.9276	6.2818
K	0.9260	0.9747	0.9541	0.9563
X _m	0.0761	0.0632	0.0711	0.0712
SSR	7.4×10^{-4}	0.0012	7.8×10^{-5}	5.3×10^{-5}
R ²	0.9959	0.9943	0.9996	0.9997

Na Figura 4.48 são apresentados os resultados experimentais para a umidade de equilíbrio em função da atividade de água para o limão em pó, assim como as curvas de ajuste fornecidas pelo modelo de GAB. Nota-se que as curvas obtidas são do tipo II, de acordo com a classificação de Brunauer et al. (1940).

Geralmente observa-se que a umidade de equilíbrio tende a diminuir com o aumento da temperatura, considerando uma mesma atividade de água. Esta diminuição está relacionada com a natureza e constituição do alimento (RIZVI, 1995). No caso do limão, observa-se que esta diferença não é tão pronunciada, talvez devido a mudanças físicas ou químicas ocorridas durante o processo de secagem, sabendo-se que o formato e a posição da isoterma dependem da composição da amostra, da estrutura física (amorfa ou cristalina) e de pré-tratamentos.

Hubinger et al. (1992) compararam isotermas de pedaços de abacaxi secos a vácuo nas temperaturas de 25 e 50°C e encontraram uma pequena dependência das isotermas com relação à temperatura.

Pode-se observar que existe a tendência do cruzamento das isotermas em altas atividades de água. Alguns estudos têm mostrado este comportamento em atividades de água superiores a 0,7 em produtos com alto conteúdo de açúcar, como frutas, o que pode ser explicado pelo aumento da solubilidade do açúcar em água causado pelo aumento da temperatura (TSAMI et al., 1990; GABAS et al., 1999; SARAVACOS et al., 1986).

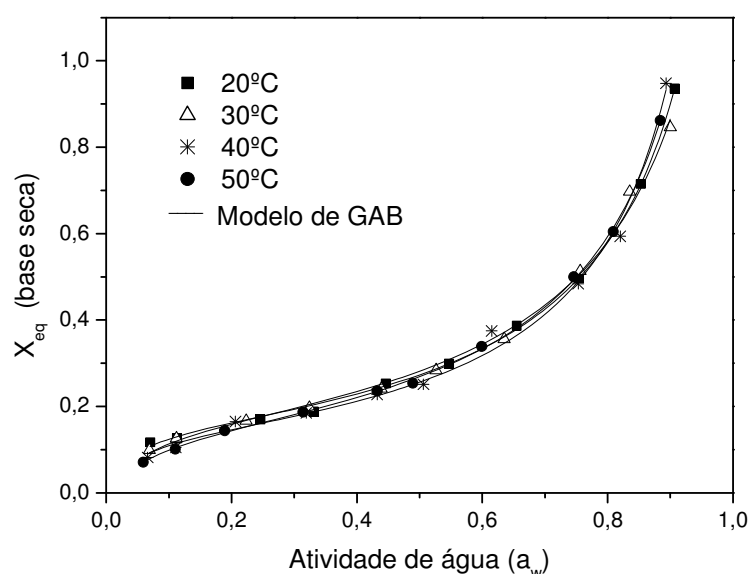


Figura 4.48: Isotermas de adsorção do limão em pó a diferentes temperaturas.

O valor de umidade da monocamada (X_m) é de particular interesse, já que indica o conteúdo de água que está fortemente adsorvida em sítios específicos na superfície do alimento, sendo considerado o conteúdo ótimo de umidade para que se assegure a estabilidade do alimento.

Para o pó de limão puro, os resultados encontrados para X_m variaram entre 14,09 e 16,64% (base seca). Nicoletti et al. (2001) encontraram valores entre 6,3 e 13,2% para pedaços de abacaxi, com a temperatura variando entre 40 e 70°C. Resultados para uva (GABAS et al., 1999), caqui (GABAS et al., 2000) e ameixa (TELIS et al., 2000) estão na faixa de 10,9 a 15,2% (b.s.), o que mostra que a magnitude dos valores de X_m encontrados neste trabalho estão de acordo com a literatura.

Quanto ao valor de C, observou-se que o aumento da temperatura de 20°C para 50°C provoca uma diminuição em seu valor. Iglesias e Chirife (1982) estudaram mais de 30 diferentes produtos alimentícios e observaram que em 74% deles o valor de C não diminuiu com o aumento da temperatura, provavelmente devido a mudanças irreversíveis associadas com o aumento da temperatura como reações enzimáticas e desnaturação de proteínas.

O valor de K fornece uma medida das interações entre as moléculas das multicamadas com o adsorvente e tende a estar entre o valor da energia das moléculas na monocamada e aquele da água líquida. Se K for igual a 1, as multicamadas têm propriedades de água líquida (PEREZ-ALONSO et al., 2006) e o comportamento da sorção poderia ser modelado pela equação de BET (SOBRAL; LEBERT; BIMBENET, 1999). Os valores de K do pó puro do suco de limão apresentaram as variações pequenas que estão entre 0,9004 a 0,9521.

Embora as isotermas obtidas para o suco de limão com maltodextrina e suco de limão com goma arábica sejam também pertencentes ao tipo II, pôde-se observar significativas diferenças entre essas e a isoterma do suco de limão (sem aditivo). Esta diferença pode ser observada na Figura 4.49, que mostra a influência dos aditivos nas isotermas a 20°C.

A umidade de equilíbrio das amostras contendo aditivos foi significativamente menor, a uma dada atividade de água, do que aquela encontrada para o suco de limão puro. Um comportamento semelhante foi encontrado por Silva et al. (2006) trabalhando com polpa de camu-camu e maltodextrina.

De acordo com a equação de GAB, as isotermas de suco de limão com aditivos apresentaram valores menores para o conteúdo de umidade da monocamada. Amostras contendo maltodextrina (LI+MA) apresentaram valores de X_m entre 5,45 e 6,8% (b.s.), enquanto o suco de limão com goma arábica (LI+GA) apresentaram valores de X_m entre 6,32 e 7,61% (b.s.).

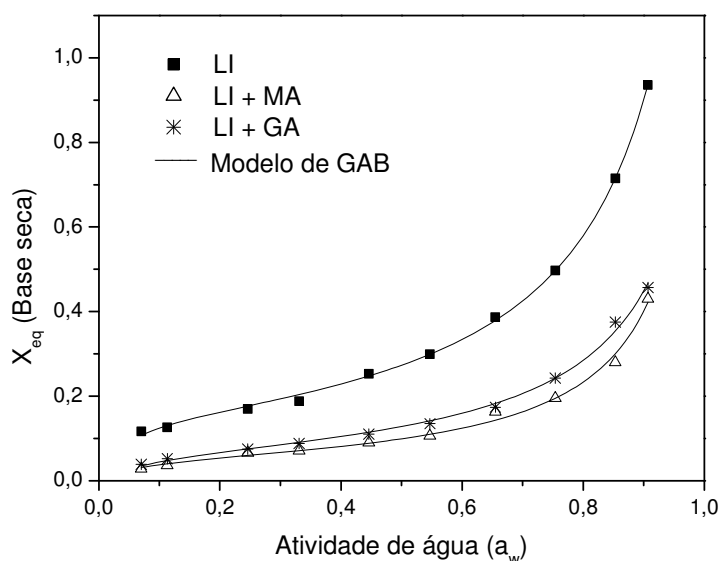


Figura 4.49: Influência dos aditivos nas isotermas de adsorção do suco de limão a 20°C.

Em ambos os casos o valor encontrado para a monocamada não mostrou dependência clara com a temperatura.

A presença de aditivos no suco de limão, provavelmente modificou o balanço de sítios hidrofóbicos/hidrofílicos, promovendo uma menor quantidade de água adsorvida.

Perez-Alonso et al. (2006) encontraram valores de X_m entre 6,96 e 7,35% (b.s.) para maltodextrina (DE 10) e valores entre 8,11 e 11% (b.s.) para goma arábica, numa faixa de temperatura entre 25 e 40°C, o que está de acordo com este trabalho já que as amostras contendo maltodextrina resultaram em valores de X_m menores que os obtidos para as amostras com goma arábica.

Silva et al. (2006) observaram que a adição de 30% de maltodextrina DE 20 em polpa de camu-camu reduz o valor de X_m de 15,8 para 6,5% (b.s.). Um efeito muito similar ao obtido para o suco de limão.

Para as amostras de LI + MA, o parâmetro C decresceu de 15,31 a 20°C para 4,83 a 50°C, enquanto nas amostras de LI + GA, os valores decresceram de 10,89 a 20°C para 6,28 a 50°C. Apesar de apresentarem valores menores para o parâmetro C na temperatura de 50°C que na temperatura de 20°C, no caso da goma arábica este parâmetro obtido a 30°C apresentou-se maior que na temperatura de 20°C, sendo de 16,0392 para 30°C e de 10,8954 para 20°C. Já no caso da adição da maltodextrina, observou-se que o valor obtido a 40°C, que foi de 9,3879 foi maior que o obtido para a temperatura de 30°C, que foi de 6,2594.

Valores similares foram encontrados para maltodextrina e goma arábica por Perez-Alonso et al. (2006), entre 5,26 e 18,83, entretanto, estes autores encontraram um diferente

comportamento para o parâmetro C com a variação da temperatura, ou seja, ocorreu um aumento de C com a elevação da temperatura para goma arábica, e um decréscimo deste parâmetro com o aumento da temperatura para maltodextrina.

Righetto e Neto (2005) também não encontraram uma variação regular de C com a temperatura para amostras de maltodextrina. Por outro lado, amostras com goma arábica apresentaram um claro decréscimo de C com o aumento da temperatura. Silva et al. (2006) observaram que a maltodextrina reduz o valor de C na polpa de camu-camu, o que está de acordo com os resultados obtidos neste trabalho.

O parâmetro K praticamente não foi afetado pela presença de aditivos, apresentando uma variação de 0,9260 a 0,9747 para amostras de LI + GA, e uma variação de 0,9135 a 0,9714 para amostras com LI + MA. Righetto e Neto (2005) não observaram variação de K relacionadas com a presença de aditivos, enquanto Perez-Alonso et al. (2006) observaram valores de K menores para GA do que para MA.

A relação entre o calor isostérico de sorção (q_{st}) e o conteúdo de umidade para o suco de limão puro e com aditivos pode ser vista na Figura 4.50. As curvas mostram a quantidade de calor necessária para remover a água do suco de limão em pó de um conteúdo de umidade inicial de 0,3 (b.s.) para um conteúdo de umidade de cerca de 0,025 kg/kg.

Para pequenos valores de umidade, (< 0.1 b.s.), os valores de q_{st} (kJ/mol) são extremamente negativos, o que significa que a sorção da água é mais difícil. De acordo com Tsami, (1991), quanto mais negativo o valor de q_{st} , maior o grau de ligação da água na superfície do alimento.

Em quase toda a faixa de umidade estudada, os valores de q_{st} obtidos para as amostras de limão puro apresentam valores mais baixos do que os encontrados para as amostras com maltodextrina e com goma arábica. Isto significa que o grau de ligação da água na amostra de suco de limão é maior do que nas amostras com agentes encapsulantes. Entretanto com a diminuição da umidade, as amostras contendo aditivos apresentam uma diminuição acentuada nos valores de q_{st} , resultando em valores mais negativos que o suco de limão puro em umidade de 0,025 (b.s.), principalmente para as amostras de limão com maltodextrina.

Em conteúdos de umidade superiores a 0,2 kg/kg (b.s.) q_{st} apresenta valores positivos para amostras com agente encapsulante. É importante perceber que em umidades menores que 0,2 kg/kg (b.s.), o valor de q_{st} pode ser considerado como uma simulação da energia necessária para o processo de secagem, que geralmente é menor para produtos adicionados de agentes encapsulantes.

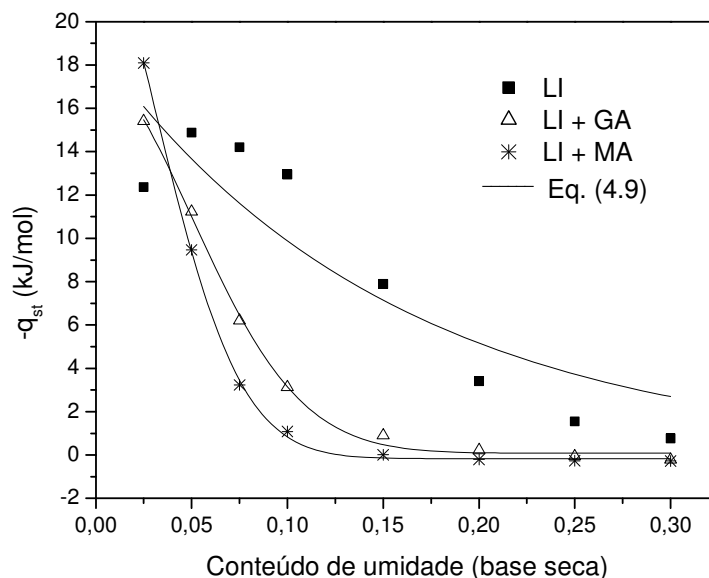


Figura 4.50: Influência de aditivos no calor de sorção de água para o suco de limão em pó.

Pode-se supor que em umidades superiores a 0,3 (b.s.), as diferenças entre o valor de q_{st} tendem a desaparecer para todas as amostras estudadas.

Os valores experimentais de q_{st} foram ajustados para a equação (3.11), as constantes q_0 e X_0 foram determinadas e são apresentadas na Tabela 4.10, juntamente com o coeficiente de determinação (R^2). Os valores obtidos para os testes de higroscopicidade, grau de aglomeração e dispersibilidade são apresentados na Tabela 4.11.

Pode-se verificar na Tabela 4.10, que os coeficientes de determinação apresentaram-se satisfatórios. Os valores calculados para q_0 foram maiores para LI + GA do que para LI + MA e para limão puro. Estes resultados foram aproximadamente duas vezes superiores ao encontrados em frutas como uva (GABAS et al.,1999), ameixas (GABAS et al.,2000) e vegetais (KIRANOUDIS et al.,1993).

Na Tabela 4.11, observa-se que a higroscopicidade apresentou um decréscimo com a adição dos dois materiais encapsulantes, o que está de acordo com a Figura 4.49, que mostra a umidade de equilíbrio versus a atividade de água.

Tabela 4.10: Parâmetros da equação (3.11) para as amostras de limão.

Amostra	q_0 (kJ/mol)	X_0 (% base seca)	R^2
LI	18,9	15,4	0,90
LI+GA	25,9	5,2	0,98
LI+MA	40,5	3,2	0,99

Tabela 4.11: Qualidade do suco de limão em pó.

Amostra	Propriedades do limão em pó		
	Higroscopicidade (%)	Grau de Aglomeração (%)	Dispersibilidade (%)
LI	12.70 ± 1.03	34.77 ± 2.43	98.09 ± 1.77
LI+GA	7.24 ± 0.94	24.16 ± 1.03	94.73 ± 2.11
LI+MA	6.81 ± 1.11	21.11 ± 2.12	95.77 ± 1.03

De maneira geral, a adição de maltodextrina e goma arábica proporcionou um decréscimo nos valores de higroscopicidade, grau de aglomeração e dispersibilidade; apresentando resultados similares entre si.

5 - CONCLUSÕES

O leito pulso-fluidizado foi construído, desenvolvido e caracterizado quanto às características fluidodinâmicas e de secagem. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que:

1. O leito pulso-fluidizado tem comportamento similar ao fluidizado tradicional em termos de perda de carga, sendo que a frequência de pulsação não teve influência sobre esta variável;
2. A abertura da válvula borboleta, que admitia a entrada do ar no sistema, em 30°, 60° e 90° em relação à seção transversal de escoamento, resultou em padrões de movimentação distintos das partículas do leito. As aberturas de 30° e 90° resultaram em maior movimentação das partículas e foram empregadas nos ensaios de secagem;
3. Os testes de secagem com injeção de pastas de gesso nas fases ativa e passiva apresentaram resultados mais favoráveis para a injeção na fase ativa. Do mesmo modo, a abertura de válvula de 90° resultou em maior eficiência de secagem se comparada com a abertura de 30°;
4. As variáveis de processo temperatura, vazão de ar e vazão de pasta influenciaram na cinética de secagem, sendo que a maior temperatura (70° C), a maior velocidade do ar (8 m/s) proporcionaram maior produção de pó e menor retenção de sólido aderido às partículas inertes do leito;
5. O leito pulso-fluidizado não foi eficiente para a secagem de pasta e suco de limão, acarretando colapso do leito com a injeção contínua destes fluidos. O uso de maltodextrina como agente facilitador da secagem não foi positivo para a produção de pó;
6. A secagem de solução de maltodextrina pura e de extrato de tomate não proporcionaram o colapso do leito, mas também não houve produção de pó;
7. O leito vibro-fluidizado foi menos eficiente do que o pulso-fluidizado na secagem de pasta de gesso;
8. O secador *spray dryer* obteve êxito na secagem de suco de limão, mas foi necessária a adição de, no mínimo, 65 % de maltodextrina;
9. As isotermas de sorção dos pós de limão e dos pós com maltodextrina e goma arábica mostraram que as curvas resultantes pertenceram ao tipo II, de acordo com a

classificação de Brunauer et al. (1940). O modelo que melhor ajustou os dados experimentais foi o de GAB;

10. As umidades de equilíbrio encontradas para o pó de limão com maltodextrina e pó de limão com goma arábica apresentaram-se menores que as encontradas para o pó de limão puro, bem como seus calores isostéricos de sorção.

6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como viu-se que o secador pulso-fluidizado não apresentou-se eficiente na secagem do limão, e nos casos do tomate e maltodextrina ainda apresentou problemas de adesividade do material às partículas inertes, alguns outros trabalhos podem ser realizados com o mesmo, entre eles:

1. Secagens no leito pulso-fluidizado de outros materiais alimentícios que apresentem menores teores de açúcares ou outros tipos de carboidratos, que apresentem maiores temperaturas de transição vítrea;
2. Utilização do secador pulso-fluidizado no recobrimento de partículas;
3. Estudo da adição de outros agentes facilitadores da secagem nos materiais a serem secos, como goma arábica e CMC;
4. Secagem de materiais granulares para a avaliação da cinética de secagem;
5. Estudo fluidodinâmico no leito pulso-fluidizado de materiais granulares com menores diâmetros de partículas;

7 – BIBLIOGRAFIA

ACHANTA, S.; OKOS, M.R. Predicting the quality of dehydrated foods and byopolymers research needs and opportunities. **Drying Technology** 14(6): 1329-1368, 1996.

ALSINA, O.L.S.; MORAIS, V.L.M.; LIMA, L.M.R.; SOARES, F.H.L. **Studies on the performance of the spouted bed dryer for the dehydration of West Indian cherry pulp.** In: Drying'96. Mujumdar, A.S. ed. Hemisphere Publishing Corp., New York, p.867-872. 1996.

AMBROSIO-UGRI M.C.B.; TARANTO, O.P. Drying in the rotating-pulsed fluidized bed. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, Vol.4, p. 95-100, January-March 2007.

AMBROSIO-UGRI, M.C.B.; TARANTO, O.P. Estudo fluidodinâmico do leito fluidizado pulsado rotativo. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 26, nº 1, p. 53-57, 2004.

BE MILLER, J.N.; WHISTLER, R.L. Carbohydrates. In: FENNEMA, O.R. Food Chemistry. 3ed. Cap.4, p. 157-224, 1996.

BHANDARI, B. R.; DATTA, N.; CROOKS, R.; HOWES, T.; RIGBY, S. A semi-empirical approach to optimise the quantity of drying aids required to spray dry sugar-rich foods. **Drying Technology**, 15, p. 2509–2525, 1997.

BHANDARI, B. R.; DATTA, N.; HOWES, T. Problems associated with spray drying of sugar-rich foods. **Drying Technology**, 15(2), p. 671–685, 1997.

BHANDARI, B. R.; SENOUSI, A.; DUMOULIN, E. D.; LEBERT, A. Spray drying of concentrated fruit juices. **Drying Technology**, 11, p. 1081–1092, 1993.

BHANDARI, B.R.; SENOUSI, A.; DUMOULIN, E.D.; LEBERT, A. Spray drying of concentrated fruit juices. **Drying technology**, v. 11, n. 5, p. 1081-1092, New York, 1993.

BLACHA-JURKIEWICZ, J.; GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R. Drying of Granular Material in Pulse fluidized Bed. **Drying'87**, p. 109-114, 1987.

BORDE, I.; DUKHOVNY, M.; ELPERIN, T.; KATZ, V. **Investigation of drying in multistage dryer with a vibrofluidized bed.** In Drying 96, proceedings of the 10th International Drying Symposium, Kraków-Poland, Lodz Technical University, 1996. v. A, p. 398-404.

BRENNAM, J. G.; HERRERA, J.; JOWITT, R. A study of some of the factors affecting the spray drying of concentrated orange juice, on laboratory scale. **Journal of Food Technology**. Oxford, v. 6. p. 295-307, 1971.

BROWN, G. G.; FOUST, A. S.; KATZ, D. L.; SCHNEIDEWIND, R.; WHITE, R. R.; WOOD, W. P.; BROWN, G. M.; BROWNELL, L. E.; MARTIN, J. J.; WILLIAMS, G. B.; BANCHERO, J. T. ; YORK, J. L. **Unit Operations Wiley**, New York, USA.1950.

BRUNAUER, S.; DEMING, L.S.; DEMING, W.E; TELLER, E. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. **American Chemical Society**. J. 62: 1723-1732. 1940.

CABRAL, R.A.F.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V.R.N.; GABAS, A.L.; FINZER, J.R.D. Effect of apparent viscosity on fluidized bed drying process parameters of guava pulp. **Journal of Food Engineering** , 80, p. 1096–1106, 2007.

CAMARGO, C.F.S. Desenvolvimento de um leito vibro-fluidizado e estudos dos coeficientes de transferência de calor de corpos submersos.2003. 230f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP.

CHATTERJEE, A. Spout-fluid bed technique. **Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development**, v.9, n.2, p. 340-341,1970.

CHUA, K.J.; CHOU, S.K. Low-cost drying methods for developing countries. **Trends in Food Science and Technology**, 14: 519-528, 2003.

CUNHA, F.O.; SPITZNER NETO, P. I. ; FREIRE, J. T. . **Estudo da secagem de pastas: influencia da presença da pastas**. In: XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 1998, Teresópolis - RJ. Anais Do XXVI Enemp. Seropedica - RJ: Imprensa Universitaria Da UFRRJ, 1998. v. 1. p. 323-329.

DALEFFE, R.V. Contribuições para a análise do comportamento fluidodinâmico de um leito vibro-fluidizado. 2005. 334. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP.

DJURKOV, T.G. Rotation-pulsed fluid bed salt dryer. **In The3rd International Symposium for South-east European Countries (SEEC) on Fluidized Beds in Energy Production Chemical and Process Engineering and Ecology Sinaia, Romania; Proceedings**,.p. 153-157, 2001.

DJURKOV, T.G., Modeling of Bed Pressure Drops in Rotation-pulsed Fluidized Bed Dryer. **Drying'98**, v. A, p. 160-167, 1998.

ELENKOV, V.R.; DJURKOV, T.G., Rotating-pulsed Fluidized Bed Dryer for High moisture Content Bioproducts. **Drying'92**, p. 1636-1641, 1992.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns, **Chem. Eng. Prog.** 48(2), p.89-94, 1952.

FERRO-FONTAN, C.; CHIRIFE, J.; SANCHO, E.; IGLESIAS, H. A. Analysis of a model for water sorption phenomena in foods. **Journal of food science**, 47, 1590-1594, 1982

FINZER, J.R.D; KIECKBUSH, T.G. **Secagem em sistemas com vibração**. In FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. Tópicos especiais em secagem. São Carlos, SP: UFSCAR, 1992. v. 1. p. 87-127.

FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories: Their bases and limitations as applied to foods and grains. In : MUJUMDAR, A. S. **Advances in Drying**. 1 ed. Montreal: McGraw Hill, 1980. v.1, 301 p. p. 119-154.

FRACARO, A. A. PRODUÇÃO DE SUCO E POLPA DE MARACUJÁ 2004. Polpas. Produção de suco e polpa de maracujá. Disponível em:< <http://www.todafruta.com.br>>. Acesso em: 15/05/2008.

FREIRE, J.T. **Drying of pastes in spouted bed**. In Special Topics in Drying. Freire, J.T., Sartori, D.J.M., Eds.; São Carlos, Brazil, 1992.

GABAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS-ROMERO J. Thermodynamic models for water sorption by grape skin and pulp. **Drying Technology**, v. 17, n. 4-5, p. 961-974, 1999.

GABAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption enthalpy-entropy compensation based on isotherms of plum skin and pulp. **Journal of Food Science**, v. 65, n. 4, p. 680-684, 2000.

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 materials in a pulsed fluid bed dryer **Drying Technology**, v.17, n. 7-8, p.1523-1532, 1999.

GAWRZYNSKI, Z.; GLASER, R; ZGORZALEWICZ, J.; PELECH, Z.; STANISLAWSKI, J.; ROGULA, G.;PIECZABA, B. Operational Tests of a Pulsed Fluid Bed Dryer / Cooler for Granulated Sugar. **Proceedings of the 10th International Drying Symposium**, Poland, 1996.

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

GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, 7, p. 285-292, 1973.
GRBAVCIC, Z.B.; ARSENIJEVIC, Z.L.J.; GARIC-GRULOVIC, R.V. Drying of suspension and pastes in fluidized bed of inert particles. **J. Serb. Chem. Soc.** 65(12), p. 963-974, 2000.

GRBAVIC, Z. B.; VUKOVIC, D. V.; HADZISMAJLOVIC, D.Z. E.; GARIC, R. V. Prediction of maximum spoutable bed height in spout – fluid beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Ottawa, v. 69, p. 386-389, Feb . 1991.

HALL,G.M.; IGLESIAS, A. Functional properties of dried milk whey. **Food Science and Technology International** 3, pp. 381–383. 1997

HELDMAN, D.R.; HARTEL, R.W. **Principles of Food Processing**. Gaithersburg: Aspen, 1998, 288p.

HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural engineering**, 33, p.29-32, 1952.

HUBINGER, M.; MENEGALLI, F.C.; AGUERRE, R.J.; SUAREZ, C. Water vapour adsorption isotherms of guava, mango and pineapple. **Journal of Food Science**, v. 57, n. 6, p. 1405-1407, 1992.

HUFENUSSLER, M. Estudo de secagem de purê de banana em secador tipo jorro. EPUSP, 1985. 141 p. (mestrado).

IGLESIAS, H.A; CHIRIFE, J. **Handbook of food isotherms**. New York, USA: Academic Press. 1982.

JAYA, S.; DAS, H. Effect of maltodextrin, glicerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. **Journal of Food Engineering**, 63, p. 125-134, 2004.

JEZOWSKA, A. Kinetics of drying in cyclically shifted spouted bed. **Drying Technology**, v.11, n.2, p.319-337, 1993.

JIN, G.D.; NIE, Y.S.; LIU, D.Y. Numerical simulation of pulsed liquid fluidized bed and its experimental validation. **Powder technology**, p.119, 153-163, 2001.

JINESCU, G.; VASILESCU, P.; ISOPENCU, G.; PETRESCU, M..Aspects Concerning the Intensification of Drying Process of Powdery Biomaterials. **Proceedings of the 12th International Drying Symposium (IDS'2000)**, IDS 2000 Paper n° 243, 2000.

JUNK, W. R.; PANCOAST, H. M. *Handbook of Sugars for Processors, Chemists and Technologists*. Westport: The AVI Publishing Company, Inc., 1973, 327 p.

KACHAN, G.C. **Contribuição da desidratção da pasta de tomate em secador de leito de jorro**. EPUSP, 1988. 209 p. (Tese de Livre Docência).

KENYON, M.M.; ANDERSON, R.J. Maltodextrins and low-dextrose-equivalence with syrup solids. In: **Flavor encapsulation** (RISCH & REINECCIUS), 7-11, ACS Symposium series n° 370, American Chemical Society, 1988.

KIRANOUDIS, C.T.; MAROULIS, Z.B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D. Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables. **Journal of Food Engineering**, v. 20, p. 55-74, 1993.

KÖKSAL, M.; VURAL, H. Bubble size control in a two-dimensional fluidized bed using a moving double plate distributor. **Powder technology**, 95, p. 205-213. 1998.

KONO, H. Granulation of small granules from fine powder in spouted fluidized bed granulators. In: International Symposium. **Proceedings Powder Technology**., Kyoto. s.n.t. 1981.

KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. 3ª Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1977. 566p

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A.S.M. **Special drying techniques and novel dryers**, in: A.S. Mujumdar (Ed.), *Handbook of Industrial Drying*, Marcel Dekker Inc., NY, 1995, pp. 1087-1149.

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.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engeneering**. 2 ed. Boston, 1991, 491p.

LABMAQ DO BRASIL LTDA. (2003). **Manual de Operações do *Spray Dryer* MSD 5.0**. Depto. de Engenharia. Ribeirão Preto, 32p.

LAZAR, W.E.; BROWN, A.H.; SMITH, G.S.; WONG, F.F.; LINDQUIST, F. E. Experimental production of tomato powder by spray drying. **Food Technology**, p.129-134, 1956.

LEWICKI, P. P. A three parameter equation for food moisture sorption isotherms. **Journal of Food Process Engineering**, n. 21, p. 127-144, 1998.

LEWICKI, P. The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 32, p. 553-557, 1997.

LEWICKI, P.P.; WOLF, W. Rheological properties of raisins. Part II. Effect of water activity, **Journal of Food Engineering**. 26 p. 29-43.1995.

LI,Z.; KOBAYASHI,N.; DEGUCHI,S.; HASATANI,M. Investigation on the drying kinetics in a pulsed fluidized bed. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, Vol. 37, N. 9, p. 1179-1182, 2004.

LIM, C. J.; GRACE, J. R. Spouted Bed Hidrodynamics in a 0.91 m Diameter Vessel. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Ottawa, v. 65, p. 366-372, 1987.

LIMA, M.F.M. **Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro – Estudos fluidodinâmicos e térmicos**.1992. 132p. Dissertação de mestrado.Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande.

LIMA, M.F.M.; ROCHA, S.C.S.; ALSINA, O.L.S; JERÔNIMO, C.E.M; DA MATA, A.L.M.L. **Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro.** In: XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Vol. 1, p. 65-77, Águas de São Pedro, SP, BRASIL, 2000.

LLOYD, N.E.; NELSON, W.J. Glucosa and fructose containing sweeteners from starch, p. 611-660. In: WHISTLER R. L.; BEMILLER, J. N.; PASCHALL, E. F., (ed) Starch, 2nd ed., **Academic Press**, Inc., London. 1984.

MADONNA, L. A.; BOORNAZIAN, L.; BENDEL, B. K. E GEVEKE, D. **Some characteristics of spout fluid beds.** Verziroglou, International Conference on Alternative Energy Sources. v.6, p. 257-282, 1980.

MANSOUR, M. N.; Pulsed atmospheric fluidized bed combustor apparatus. U. S. Patent 1992000871963 (1993).

MARKOWSKI, A.S. Drying Characteristics in a jet-spouted bed dryer. **The Canadian Journal of Chemical Engineering** 70 (5): 938-944, oct 1992.

MARTINEZ, O.L.A.; BRENNAM, J.G.; NIRAJAM, K. **Estudio del secado de alimentos em um secador de fuente com partículas inertes.** In: Congresso Ibero-americano de Alimentos, 1, 1995, Campinas. Anais... Campinas: UNICAMP, 1995. p.72-81.

MASTERS, K. Spray drying Handbook. 5 Ed. New York. **Longman Scientific & Technical**, 1991. 725p.

MEDEIROS, M.F.D. Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro. 2001. 247f. Tese, Doutorado em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MROWIEC, M.; CIESIELCZYK, W. Fluidized-bed dryers for paste materials. **International Chemical Engineering** 17 (2): 373-379, 1977.

MUJUMDAR, A. S. Spouted bed technology - A brief review. São Carlos, Anais do X Encontro sobre Escoamento de Meios Porosos. v. 2, 1982

NATH, S.; SATPATHY, G.R. A systematic approach for investigation of spray drying process. **Drying Technology**, 16(6), p. 1173-1193, 1998.

NICOLETI, J.F.; TELIS-ROMERO, J; TELIS, V.R.N. Air-drying of fresh and osmotically pre-treated pineapple slices: fixed air temperature versus fixed slice temperature drying kinetics. **Drying Technology**, v. 19, n. 9, p. 2175-2191, 2001.

NIJDAM, J.J.; LANGRISH, T.A.G.; The effect of surface composition on the functional properties of milk powders. **Journal of Food Engineering**, 77, p. 919-952, 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, p. 249-256, 2007.

NITZ, M. Fluidodinâmica, secagem e recobrimento em leite pulso-fluidizado. 2006. 212f. (Tese de Doutorado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

OSWIN, C.R. The kinetics of package life III. The isotherm. **Journal of Chemical Industry**, 65, 419-421, 1946.

PAN, Y.K.; LI, J.G.; ZHAO, J.; YE, W.H.; MUJUMDAR, A.S.; KUDRA, T. Performance characteristics of vibrated fluid bed of inert particles for drying of liquid feeds. **Drying Technology**, v.19, n. 8, p.2003-2018, 2001.

PAN, Y.K.; LI, J.G.; ZHAO, L.J.; YE, W.H.; MUJUMDAR, A.S.; KUDRA, T. Performance characteristics of the vibrated fluid bed of inert particles for drying of liquid feeds, **Drying Technology**, 19, p. 2003–2018, no. 8, 2001.

PAN, Y.K.; LI, Z.Y.; MUJUMDAR, A.S.; KUDRA, T. Drying of a root crop in vibro fluidized beds. . **Drying Technology**, v.15, n. 1, p.215-223, 1997.

PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Process Engineering**, 16, p. 21-37, 1993.

PEÑA, L.M.R. **Estudo da instantaneização de misturas contendo cacau em pó por aglomeração com jato de vapor**. 2003. 259f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos)- Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PÉREZ-ALONSO, C; BERISTAIN, C.I; LOBATO-CALLEROS, C; RODRÍGUEZ HUEZO, M.E; VERNON-CARTER, E.J. Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 4, p. 753-760,

2006.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Manual de Engenharia Química**. 5ª Ed.. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

PHAM, Q. T. Behaviour of a conical spouted bed dryer for animal blood. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Ottawa, v. 61, p. 426-434. 1983.

POIRIER, M.G.; KUDRA, T.; PLATON, R.. Pulsed Fluid-Bed Technology – Opportunities for Low Temperature Drying of Bio Materials. **Proceedings of the 1st. Nordic Drying Conference**, Norway, 2001.

POTTER, N.N.; HOTCHKISS, J.H. **Food Science**. 3 ed. New York: Chapman and Hall, 1995. 608p.

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.

PRAKASH, S.; JHA, S.K.; DATTA, N. Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. **Journal of Food Engineering**, 62, p. 305-313, 2004.

RAMOS, C.M.P.; LIMA, M.F.M.; MARIA, Z.L. **Polpa de frutas desidratadas em leite de jorro. Influência da composição química no desempenho do processo**. 1997. 75p. Relatório Interno. UFRN. Natal.

RE, M. I.; FREIRE, J. T. **Drying of paste liquid material in spouted beds**. In: International Srying Symposium, 1988. Versailles: op 119. s.n.t.

RIBEIRO, M.D.S.; Estudo fluidodinâmico de um leito fluidizado pulsado rotativo com partículas secas e úmidas. 2005. 106f. (Dissertação de mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RIGHETTO, A.M.; NETTO, F.M. Effect of encapsulating materials on water sorption, glass, transition and stability of juice from immature acerola. **International Journal of Food Properties**, v. 8, p. 337-346, 2005.

RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In. M. A. RAO, & S. S. H. RIZVI (eds.), **Engineering properties of foods**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1995. 531p.

ROOS, Y.; KAREL, M. Phase transitions of mixtures of amorphous polysaccharides and sugars. **Biotech. Progress**, v. 7, p. 49-53, 1991.

ROSA, E.D.; TSUKADA, M.; FREITAS, L.A.P. **Secagem por atomização na indústria alimentícia: fundamentos e aplicações**. Departamento de engenharia Labmaq do Brasil, Ribeirão Preto, São Paulo, 2007.

ROSEMBERG, M.; KOPELMAN, I.J.; TALMON, Y. Factors affecting retention in spray drying microencapsulation of volatile materials. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 38, p. 1288-1294, 1990.

SARAVACOS, G.D; TSIOURVAS, D.A; TSAMI, E. Effect of temperature on the water adsorption isotherms of Sultana raisins. **Journal of Food Science**, v. 51, n. 2, p. 381-383 e 387, 1986.

SHILTON, N.C.; NIRANJAM, K.; Fluidization and its applications to food processing. **Food Structure**, v. 12, n. 3, p. 199 –215, 1993.

SHIRAI, T. Fluidized beds, Kagaku-Gijutsu-Sha, Kanazawa, 1958. In: KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. 2 ed. Boston, 1991, 491p.

SILVA, M.A; SOBRAL, P.J.A; KIECKBUSCH, T.G. State diagrams of freeze-dried camu camu (*myrciaria dubia* (hbk) mc vaugh) pulp with and without maltodextrin addition. **Journal of Food Engineering**, v. 77n. 3, p. 426-432, 2006.

SOBRAL, P.J.A; LEBERT, A; BIMBENET, J.J. Isothermes de désorption de la pomme de terre entre 40 et 70°C. **Science des Aliments**, v. 19, n. 6, 711-720, 1999.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, applications and design**. 1 ed. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448p.

STRUMILLO, P.I.; MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. Modern developments in drying of pastelike materials, in: A.S. Mujumdar (Ed.), **Advances in Drying**, McGraw Hill, Washington, DC, 1983, pp. 193–231.

TARUNA, I.; JINDAL V.K. Drying of soy pulp (okara) in a bed of inert particles. **Drying Technology**, V. 20 n. 4-5, 2002, p. 1035-1051.

TELIS, V.R.N; GABAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, v. 343, p. 49-56, 2000.

TELIS, V.R.N; GABAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, v. 343, p. 49-56, 2000.

TELIS-ROMERO, J.; BERISTAIN, C.I.; GABAS A.L.; TELIS, V.R.N. Effect of apparent viscosity on the pressure drop during fluidized bed drying of soursop pulp. **Chemical Engineering and Processing**, 46, p. 684–694, 2007.

TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J.J.; SYNOTT, E.C. Characterisation of food powder flowability. **Journal of Food Engineering**, v. 39, n.1, p. 31-37, Janeiro, 1999.

THORELY, B.; SOUNBY, J. B.; MATHUR, K. B.; OSBERG, G. L. An Analyses of Air and Solid Flow in a Spouted Wheat Bed. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Ottawa, v. 37, p. 184 –192, 1959.

TRUONG, V.; BHANDARI, B.R.; HOWES, T. Optimization of co-current spray drying process of sugar-rich foods. Part I—Moisture and glass transition temperature profile during drying. **Journal of Food Engineering**, 71, p. 55–65, 2005.

TSAMI, E. Net isosteric heat of sorption in dried fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 14, p. 327-335, 1991.

TSAMI, E.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D.; SARAVACOS, G.D. Heat of sorption of water in dried fruits. **International Journal of Food Science and Technology**, 25, p. 350-359. 1990.

TSOUROUFLIS, S.; FLINK, J. M.; KAREL, M.. Loss of structure in freeze-dried carbohydrates solutions: effect of temperature, moisture content and composition, **J. Sci. Fd Agric.**, 27pp. 509-519. 1976.

VAN DEN BERG, C. Development of B.E.T. like models for sorption of water of foods; theory and relevance. In D. Simatos & J.L. Multon (Eds). **Properties of water in foods**. (pp. 119-135). Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1985.

VAN VLACK, L.H. Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais. 4 ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1984. 567p.

VASSEUR, J. ; LONCIN, M. High heat transfer coefficient in thin film drying: Application to drum drying. In Mc Kenn, B.M. **Engineering Sciences in the Food Industry**. Elsevier Applied Science Publishers, 1985. p. 217-225.

VISSOTO, F.Z.; MONTENEGRO, F.M.; SANTOS, J.M. dos.; OLIVEIRA, S.J.R. de. Avaliação da influência dos processos de lecitinação e de aglomeração nas propriedades físicas de achocolatado em pó. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, 26(3), p. 666-671, jul/set. 2006.

WANG, X. S.; RHODES, M. J. Pulsed fluidization — a DEM study of a fascinating phenomenon. **Powder Technology**, v.159, pp.142-149, 2005b.

WANG, X. S.; RHODES, M. J. Using pulsed flow to overcome defluidization. **Chemical Engineering Science**, v.60, pp.5177-5181, 2005a.

WHISTLER R.L.; DANIEL, J.R. Carbohydrates. In: Fenema, O.R. **Food Chemistry**. 2 ed. New York: Dekker, 1985. p. 70-137.

YE, B. Combustion performance and high temperature hydrodynamics in a spouted and spout-fluid bed. Columbia, 1988. M. A. SC. DISSERTATION, Univ. of British Columbia. s. n. t.

8 APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela A.1: Umidade de equilíbrio (base seca) para o limão em pó.

Temperatura (°C)	Limão (LI)		Limão com Maltodextrina (LI+MA)		Limão com Goma Arábica (LI+GA)	
	(a_w)	(X_{eq})	a_w	(X_{eq})	a_w	(X_{eq})
20°C	0.070	0.117	0.070	0.028	0.070	0.039
	0.113	0.126	0.113	0.036	0.113	0.052
	0.246	0.170	0.246	0.066	0.246	0.075
	0.331	0.188	0.331	0.071	0.331	0.088
	0.446	0.253	0.446	0.090	0.446	0.110
	0.547	0.299	0.547	0.106	0.547	0.135
	0.655	0.387	0.655	0.163	0.655	0.174
	0.754	0.497	0.754	0.195	0.754	0.243
	0.853	0.715	0.853	0.280	0.853	0.375
	0.907	0.936	0.907	0.430	0.907	0.457
30°C	0.069	0.099	0.069	0.025	0.069	0.032
	0.112	0.126	0.112	0.036	0.112	0.042
	0.223	0.167	0.223	0.055	0.223	0.073
	0.324	0.197	0.324	0.069	0.324	0.082
	0.439	0.241	0.439	0.089	0.439	0.104
	0.526	0.284	0.526	0.107	0.526	0.119
	0.635	0.356	0.635	0.139	0.635	0.183
	0.756	0.513	0.756	0.207	0.756	0.235
	0.835	0.697	0.835	0.290	0.835	0.313
	0.900	0.846	0.900	0.366	0.900	0.517
40°C	0.066	0.082	0.066	0.020	0.066	0.028
	0.111	0.105	0.111	0.028	0.111	0.039
	0.206	0.165	0.206	0.051	0.206	0.063
	0.319	0.185	0.319	0.063	0.319	0.082
	0.432	0.228	0.432	0.083	0.432	0.105
	0.506	0.251	0.506	0.094	0.506	0.118
	0.615	0.375	0.615	0.145	0.615	0.163
	0.753	0.484	0.753	0.195	0.753	0.245
	0.82	0.594	0.82	0.246	0.82	0.312
	0.893	0.948	0.893	0.409	0.893	0.472
50°C	0.059	0.071	0.059	0.017	0.059	0.024
	0.110	0.101	0.110	0.025	0.110	0.034
	0.189	0.144	0.189	0.039	0.189	0.050
	0.314	0.187	0.314	0.056	0.314	0.069
	0.432	0.236	0.432	0.084	0.432	0.101
	0.489	0.254	0.489	0.094	0.489	0.113
	0.599	0.339	0.599	0.127	0.599	0.152
	0.746	0.500	0.746	0.196	0.746	0.233
	0.809	0.605	0.809	0.251	0.809	0.300
	0.884	0.862	0.884	0.370	0.884	0.448

Tabela A.2: Parâmetros estimados para suco de limão em pó a diferentes temperaturas.

Modelo	Parâmetro	Temperatura			
		20°C	30°C	40°C	50°C
Henderson	A	2.7198	2.8863	2.5992	2.7068
	B	1.0987	1.1725	1.0232	1.0848
	SSR	0.0206	0.0147	0.0291	0.0192
	R ²	0.9694	0.9746	0.9554	0.9776
Oswin	A	0.2861	0.2902	0.2706	0.2774
	B	0.5164	0.4971	0.5710	0.5516
	SSR	0.0034	0.0050	0.0084	0.0013
	R ²	0.9950	0.9913	0.9871	0.9977
Lewicki-2	A	0.2861	0.2902	0.2707	0.2774
	B	0.4837	0.5029	0.4292	0.4485
	SSR	0.0034	0.0050	0.0084	0.0013
	R ²	0.9949	0.9913	0.9871	0.9977
Lewicki-3	F	0.3104	0.3489	0.2614	0.3025
	G	0.5332	0.4793	0.6277	0.5628
	H	0.3018	0.4376	0.2832	0.4543
	SSR	5.8×10^{-4}	0.0044	0.0043	3.4×10^{-5}
	R ²	0.9991	0.9924	0.9935	0.9994
Ferro-Fontan	γ	0.1184	0.1753	0.0881	0.1469
	α	1.0326	1.1103	0.9834	1.0554
	r	1.4061	1.1881	1.5143	1.2276
	SSR	2.8×10^{-4}	0.0021	0.0037	7.6×10^{-4}
	R ²	0.9996	0.9964	0.9943	0.9987
Peleg	K ₁	0.3501	0.9170	1.5888	1.1012
	n ₁	0.4695	4.6789	9.6426	6.5272
	K ₂	1.0656	0.3067	0.4404	0.3933
	n ₂	6.0390	0.4123	0.6790	0.6184
	SSR	0.0017	5.3×10^{-4}	0.0049	6.9×10^{-4}
	R ²	0.9975	0.9991	0.9925	0.9995
GAB	C	27.3634	16.3431	22.1899	12.9603
	K	0.9235	0.9004	0.9521	0.9283
	X _m	0.1532	0.1664	0.1409	0.1568
	SSR	5.0×10^{-4}	0.0026	0.0045	2.8×10^{-4}
	R ²	0.9993	0.9954	0.9932	0.9995

Tabela A.3: Parâmetros estimados para suco de limão em pó com 18% de Goma Arábica a diferentes temperaturas.

Modelo	Parâmetro	Temperatura			
		20°C	30°C	40°C	50°C
Henderson	A	5.2351	4.3418	4.6436	4.5443
	B	0.9862	0.8515	0.9051	0.8757
	SSR	0.0038	0.0081	0.0036	0.0025
	R ²	0.9793	0.9605	0.9798	0.9926
Oswin	A	0.1305	0.1194	0.1233	0.1175
	B	0.5605	0.6489	0.6265	0.6551
	SSR	0.0013	0.0023	8.7×10^{-5}	1.2×10^{-4}
	R ²	0.9929	0.9886	0.9995	0.9993
Lewicki-2	A	0.1305	0.1195	0.1233	0.1175
	B	0.4396	0.3514	0.3736	0.3449
	SSR	0.0013	0.0023	8.3×10^{-4}	1.2×10^{-4}
	R ²	0.9930	0.9886	0.9982	0.9993
Lewicki-3	F	0.1464	0.1060	0.1232	0.1163
	G	0.5545	0.7234	0.6565	0.6849
	H	0.4892	0.2992	0.5062	0.5988
	SSR	0.0012	0.0012	8.7×10^{-5}	2.6×10^{-5}
	R ²	0.9935	0.9940	0.9995	0.9998
Ferro-Fontan	γ	0.0816	0.0330	0.0642	0.0799
	α	1.0947	0.9793	1.0396	1.0619
	r	1.0880	1.4077	1.1418	1.0280
	SSR	5.5×10^{-4}	0.0010	2.2×10^{-4}	1.6×10^{-4}
	R ²	0.9969	0.9950	0.9987	0.9990
Peleg	K ₁	0.1524	0.2376	0.2014	0.6736
	n ₁	0.5026	0.8676	0.577	7.6523
	K ₂	0.5377	1.0545	0.6807	0.2048
	n ₂	5.4510	12.0136	7.7071	0.8486
	SSR	1.2×10^{-4}	0.0013	2.3×10^{-4}	1.6×10^{-4}
	R ²	0.9996	0.9936	0.9987	0.9991
GAB	C	10.8954	16.0392	8.9276	6.2818
	K	0.9260	0.9747	0.9541	0.9563
	X _m	0.0761	0.0632	0.0711	0.0712
	SSR	7.4×10^{-4}	0.0012	7.8×10^{-5}	5.3×10^{-5}
	R ²	0.9959	0.9943	0.9996	0.9997

Tabela A.4: Parâmetros estimados para suco de limão em pó com 18% de Maltodextrina a diferentes temperaturas.

Modelo	Parâmetro	Temperatura			
		20°C	30°C	40°C	50°C
Henderson	A	5.4417	6.3030	5.0889	5.3397
	B	0.8953	0.9865	0.8491	0.8752
	SSR	0.0049	0.0015	0.0038	0.0012
	R ²	0.9657	0.9872	0.9710	0.9895
Oswin	A	0.1026	0.1070	0.0973	0.0974
	B	0.6131	0.5718	0.6627	0.6561
	SSR	0.0013	6.3×10^{-4}	9.5×10^{-4}	1.9×10^{-5}
	R ²	0.9909	0.9947	0.9928	0.9998
Lewicki-2	A	0.1027	0.1070	0.0973	0.0974
	B	0.3870	0.4282	0.3375	0.3439
	SSR	0.0013	6.3×10^{-4}	9.5×10^{-4}	1.9×10^{-4}
	R ²	0.9909	0.9947	0.9928	0.9998
Lewicki-3	F	0.0996	0.1296	0.0903	0.1025
	G	0.6547	0.5353	0.7171	0.6594
	H	0.3697	0.6808	0.4773	0.7368
	SSR	8.3×10^{-4}	6.6×10^{-4}	6.4×10^{-4}	2.1×10^{-5}
	R ²	0.9942	0.9944	0.9951	0.9998
Ferro-Fontan	γ	0.0267	0.0965	0.0374	0.0833
	α	0.9914	1.1527	1.0012	1.0955
	r	1.4114	0.9469	1.2374	0.9455
	SSR	8.4×10^{-4}	2.4×10^{-4}	7.7×10^{-4}	1.6×10^{-4}
	R ²	0.9942	0.9979	0.9942	0.9987
Peleg	K ₁	0.8314	0.4202	0.8329	0.5334
	n ₁	13.0028	5.2951	11.7471	7.6693
	K ₂	0.2117	0.1365	0.2094	0.1816
	n ₂	0.9108	0.6147	0.9921	0.9326
	SSR	0.0010	6.5×10^{-5}	6.3×10^{-4}	8.2×10^{-5}
	R ²	0.9927	0.9994	0.9953	0.9993
GAB	C	15.3137	6.2594	9.3879	4.8343
	K	0.9597	0.9135	0.9714	0.9468
	X _m	0.0552	0.068	0.0545	0.0627
	SSR	9.4×10^{-4}	3.9×10^{-4}	6.3×10^{-4}	3.1×10^{-5}
	R ²	0.9935	0.9967	0.9952	0.9997

APÊNDICE B

B.1 Ventilador centrífugo

Ventilador cujo corpo foi feito com chapas pretas nº 20 e o rotor foi construído com chapa preta nº 13. Este ventilador foi construído no próprio departamento. A energia mecânica do ventilador era proveniente de um motor elétrico de 4 pólos, com rotação de 1750 rpm. (rotações por minuto), 2 CV de potência e voltagem de 220 V conectado diretamente ao rotor do ventilador. A vazão de ar fornecida pelo ventilador pôde ser regulada através de válvulas tipo borboleta que se localizavam na tubulação pela qual o ar entrava no ventilador. Estas válvulas eram constituídas de discos de chapa pivotados que foram introduzidos na tubulação e tinham movimento rotacional. Desta forma estas podiam ser travadas em diversas posições e através da variação de seu ângulo de inclinação em relação à tubulação podiam ser obtidas diferentes áreas de entrada de ar, o que permitia o ajuste da vazão de fluido desejada ao experimento. Além dessa regulagem, foi utilizado um variador de frequência. A vazão do ventilador pôde ser regulada entre 0,9966 e 0,6501 m³/s. A conexão entre as diferentes partes do equipamento é feita por uma tubulação que foi construída com chapas de aço galvanizado nº 24, com espessura de 0,64 mm. A tubulação foi revestida com isopor.

B.2 Compartimento de aquecimento

Ao sair do ventilador centrífugo, o ar impulsionado passa pelo compartimento de aquecimento. O compartimento de aquecimento do ar é constituído por uma caixa de requadro metálico fechada por chapa de fibro-cimento (cimento-amianto) com as medidas de 150 mm de altura, 350 mm de largura e 300 mm de comprimento. No interior desta caixa foi instalado um conjunto de resistências elétricas aletadas específicas para ar. O conjunto de resistências contava com 8 resistências de 1200 W de potência cada. Todas as resistências possuíam uma chave de acionamento independente localizada no painel de controle. Isto permitia que se acionasse qualquer número de resistências simultaneamente. O compartimento de aquecimento contava ainda com uma resistência de 1000 W, a qual tinha controle de voltagem

acionada por um potenciômetro, que permitia o ajuste fino da temperatura. Desta maneira, podia-se atingir a temperatura desejada para o ar de secagem regulando-se a vazão de ar e a potência inserida neste.

B.3 Painel de controle

O painel de controle foi constituído por oito disjuntores que acionavam as resistências elétricas de 1200 W. No painel de controle encontrava-se ainda o potenciômetro, que regulava a corrente que passava pela resistência de 1000 W. O painel possuía também uma chave trifásica destinada ao acionamento do motor elétrico do ventilador centrífugo.

Todas as resistências possuíam luzes indicadoras (LEDs) no painel de controle, que serviam para mostrar o número de resistências acionadas.

Neste painel foi instalado também o relê de tempo, que controlava os tempos de abertura e fechamento da solenóide responsável pela pulsação do ar.

B.4 Leito de inertes

O leito das partículas passou por uma série de evoluções ao longo da construção do equipamento. Sua primeira versão foi feita em material acrílico, com espessura de 1,5 mm. O formato do leito era cilíndrico, com um diâmetro de 150 mm e uma altura de 450 mm. O objetivo de se construir o leito com um material transparente foi o de facilitar a visualização das partículas em seu interior. Entretanto, o aumento da temperatura até uma faixa de cerca de 70°C fez com que o leito perdesse sua resistência mecânica, sofrendo amolecimento, e perda de sua forma original.

Assim, foi construído um novo leito em chapa galvanizada nº 24, com espessura de 0,64 mm, diâmetro de 150 mm e altura de 450 mm. Para que fosse possível a visualização das partículas neste novo leito, foi colocado nele uma janela de vidro de espessura 3 mm e dimensões de 60 mm x 250 mm. Este vidro foi fixado no leito através de um sistema de encaixe no qual o vidro foi introduzido e depois as fissuras restantes entre o vidro e a lata foram vedadas com o silicone em pasta.

A parte inferior do leito foi presa por solda a um anel metálico de 1,5 mm de espessura com diâmetro externo de 205 mm e diâmetro interno de 150 mm. Este anel foi recoberto por uma camada de borracha em sua parte inferior, o que facilitou sua vedação e evitou o vazamento de ar quando este componente foi acoplado ao secador.

O interior do anel possuía uma tela, que tem a função de segurar as partículas inertes no interior do leito. Inicialmente a tela utilizada foi de aço com abertura de 1mm, entretanto a ação ácida do suco provocou sua corrosão. A solução foi a substituição por uma tela semelhante em aço inoxidável.

Na parte superior do anel metálico foram fixadas duas presilhas metálicas, que se encaixavam a presilhas de engate rápido presas ao equipamento e fixavam o leito ao mesmo.

B.5 Compartimento de armazenagem da pasta

Constituído por um recipiente de 150 x 150 x 150 mm, tinha um volume de aproximadamente 3375 mL. O compartimento foi construído com chapa galvanizada nº 24, com espessura de 0,64 mm e suas bordas vedadas com silicone em pasta. Inicialmente o compartimento foi fixado na parte superior do secador, entretanto, verificou-se que a bomba utilizada não eliminava o efeito de sifonagem do líquido. Desta maneira, como o leito de inertes encontrava-se abaixo do compartimento de armazenagem de pasta, a mesma descia por gravidade até o leito, o que provocava descontrole na vazão de líquido. Isto foi resolvido mudando-se o compartimento de armazenagem de pasta para uma nova posição, situada logo abaixo ao leito de inertes, o que resolveu o problema de sifonagem e tornou mais precisa a vazão de pasta inserida no leito.

B.6 Sistema de alimentação da pasta

Para a alimentação da pasta foi utilizada em testes preliminares a gravidade. O compartimento de armazenagem da pasta foi simplesmente fixado em uma parte superior ao leito e desta forma a pasta descia naturalmente. Para a regulação da vazão, um sistema que prendia a mangueira contra a estrutura do equipamento foi feito. Desta forma, a vazão podia

ser aumentada ou diminuída através do aperto ou não deste sistema, que era acionado por rosca.

Este sistema não proporcionava a precisão necessária à vazão de pasta, possuindo grande variação ao longo do processo de secagem. Isto causava freqüentemente o colapso do leito, devido ao excesso de injeção em determinados momentos e a falta de injeção logo em seguida. Ou seja, não foi possível se obter uma vazão constante e controlada de pasta com este sistema.

Foi então instalada uma bomba dosadora do tipo diafragma. A bomba utilizada foi da marca Injetronic, modelo V – 1.5/4. A bomba foi instalada logo acima do leito, ao lado do motor que proporciona a vibração do mesmo. Esta bomba possuía uma regulagem de fluxo, através da qual foi possível obter a vazão desejada ao processo. A bomba dosadora foi conectada ao compartimento de pasta por mangueiras plásticas transparentes, com diâmetro interno de 4mm e diâmetro externo de 6mm.

Após sair da bomba a pasta era direcionada ao leito por uma mangueira com as mesmas características da anterior. Esta mangueira foi acoplada a um tubo de cobre tipo capilar de diâmetro externo de 3,2 mm e diâmetro interno de 2,0 mm. Este tubo foi fixado na parte inferior do leito, sendo paralelo ao anel metálico que o envolvia. Na parte central do leito, o tubo sofria uma curva de 90 ° e tornava-se paralelo ao fluxo de ar no interior do leito. Desta forma o tubo de cobre injetava a polpa no interior das partículas inertes, com sentido de baixo para cima, ou seja, no mesmo sentido do ar de secagem.

Testes iniciais foram realizados com o tubo posicionado na parte superior do leito, com o objetivo de se injetar a pasta no sentido contrário ao ar de secagem. Entretanto, verificou-se neste caso que a velocidade necessária para a fluidização das partículas inertes era suficiente para fazer com que a pasta ou polpa que estava sendo injetada mudasse seu sentido e fosse arrastada pelo ar de secagem, antes mesmo de chegar a entrar em contato com as partículas inertes.

B.7 Ciclone

O ciclone foi construído com chapas de aço galvanizado nº 24 com espessura de 0,64 mm. O modelo foi o Lapple, seu diâmetro interno era de 300 mm na parte superior e a altura da parte cilíndrica era de 400 mm. A parte cônica do ciclone tinha diâmetro superior com a

mesma medida da parte cilíndrica e diâmetro inferior igual a 110 mm, sendo sua altura de 750 mm. A Figura B.2 mostra o ciclone e o recipiente de recolhimento de pó.

B.8 Recipiente de recolhimento de pó

Logo abaixo do ciclone foi conectado um recipiente para o recolhimento do pó. Este recipiente foi construído em aço galvanizado e vedado com silicone em pasta para evitar perdas de produto. O volume do recipiente é de aproximadamente 2 L e este ficava preso ao ciclone por um sistema de borrachas, que se ligavam ao ciclone fixando-o. A Figura B.1 mostra o recipiente, localizado logo abaixo do ciclone.

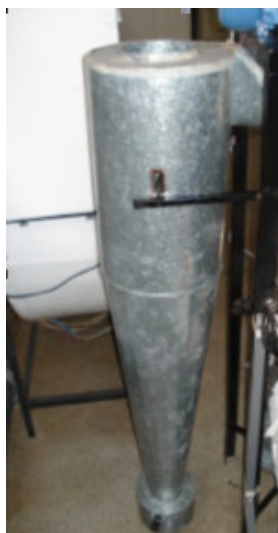


Figura B.1: Ciclone para separação do pó e ar provenientes da secagem.