

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**FLUIDODINÂMICA E SECAGEM DO ÁCIDO ADÍPICO
EM LEITO VIBROFLUIDIZADO**

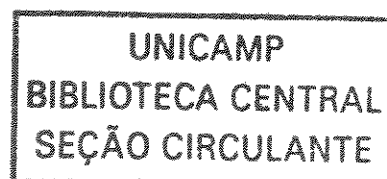
Autora: Virgínia Aparecida da Silva Moris

Orientadora: Prof^ª. D^{ra} Sandra Cristina dos Santos Rocha

Co-orientadora: Prof^ª. D^{ra} Kátia Tannous

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Campinas – SP
Novembro / 2002



UNIDADE	RC
Nº CHAMADA	T/UNICAMP
	M 826f
V	EX
TOMBO BC	52069
PROC.	16-124/03
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	12/02/03
Nº CPD	

CM00179057-7

BIB ID 276356

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

M826f

Moris, Virgínia Aparecida da Silva

Fluidodinâmica e secagem do ácido adípico em leito
vibrofluidizado / Virgínia Aparecida da Silva Moris. --
Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientadores: Sandra Cristina dos Santos Rocha e Kátia
Tannous.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Ácidos orgânicos. 2. Secagem. 3. Planejamento
experimental. 4. Fluidização - Vibração. I. Rocha, Sandra
Cristina dos Santos. II. Tannous, Kátia. III. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química.
IV. Título.

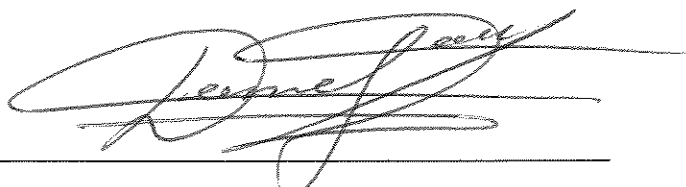
Tese de Doutorado defendida por Virgínia Aparecida da Silva Moris e aprovada em 31 de outubro de 2002 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



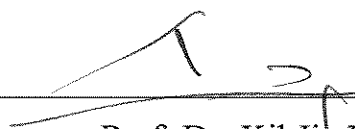
Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha
DTF/FEQ – UNICAMP (Orientadora)



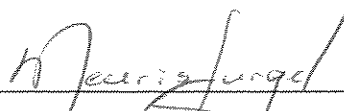
Profa. Dra. Ana Maria da Silveira
DEQ – UFSCar



Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori
DEQ - UFSCar



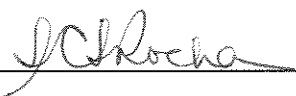
Prof. Dr. Kil Jin Park
FEAGRI - UNICAMP



Profa. Dra. Meuris Gurgel Carlos da Silva
FEQ - UNICAMP

2002/10/31

Esse exemplar corresponde à redação final da Tese de Doutorado em Engenharia Química defendida por Virgínia Aparecida da Silva Moris e aprovada pela Comissão Julgadora em 31 de Outubro de 2002.

A handwritten signature in black ink, reading "S.C. Rocha", is positioned above a horizontal line. The signature is written in a cursive style.

Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha

SUMÁRIO

Epígrafe	i
Dedicatória	ii
Agradecimentos	iii
Lista de figuras	vi
Lista de tabelas	xiv
Nomenclatura	xvi
Resumo	xix
Abstract	xxi
1- Introdução	1
2- Revisão Bibliográfica	4
2.1- Ácido Adípico	4
2.2- Leito Fluidizado	5
2.3- Secagem	12
2.3.1- Generalidades	12
2.3.2- Determinação do conteúdo de umidade	13
2.3.3- Equações para umidade de equilíbrio	16
2.3.4- Isotermas de sorção	17
2.3.5- Curvas de secagem	19
2.4- Leito Vibrofluidizado	22
2.4.1- Características	22
2.4.2- Fluidodinâmica em Leito Vibrofluidizado	30
2.4.3- Secagem em Leito Vibrofluidizado	56
2.4.4- Aspectos técnicos e de projeto	68
2.4.5- Efeitos das forças interpartículas em LFC e LVF	69
3- Material e metodologia experimental	74
3.1- Material utilizado	74
3.2- Desenvolvimento e construção do equipamento	75
3.3- Procedimento experimental	78
3.3.1- Caracterização física das partículas sólidas	78

3.3.2-	Testes fluidodinâmicos do material seco	79
3.3.3-	Testes fluidodinâmicos do material úmido	83
3.3.4-	Sistema de amostragem	86
3.3.5-	Experimentos de secagem	90
3.3.5.1-	Determinação do conteúdo de umidade no equipamento “Karl Fisher”	91
3.3.5.2-	Obtenção das isothermas de dessorção	92
4-	Resultados e discussão	94
4.1-	Análise fluidodinâmica do material seco	94
4.2-	Análise da influência da distribuição granulométrica das partículas no comportamento fluidodinâmico em LFC e LVF	105
4.3-	Análise estatística dos parâmetros vibracionais e carga de partículas no comportamento fluidodinâmico em LVF	113
4.4-	Análise do comportamento fluidodinâmico em LVF e LFC do material úmido	135
4.4.1-	Análise da fluidodinâmica para o material umidificado artificialmente	136
4.4.2-	Análise da fluidodinâmica para o material úmido proveniente da indústria	140
4.5-	Secagem do Ácido Adípico em LVF	148
4.5.1-	Análise do ácido adípico em microscópio óptico com aquecimento	148
4.5.2-	Curvas de secagem	150
4.5.3-	Análise da variação da umidade do material com a faixa de tamanho dos cristais após o processo de secagem	166
4.5.4-	Análise granulométrica do material seco à estufa e em LFV	168
4.5.5-	Análise das isothermas de dessorção	177
4.5.6-	Caracterização física do material seco na indústria, na estufa à vácuo e em leite vibrofluidizado	179
4.5.7-	Análise do material seco em microscópio eletrônico de varredura (MEV)	181
5-	Conclusões	185
6-	Sugestões para trabalhos futuros	188
	Referências Bibliográficas	189

*“É melhor tentar e falhar,
que preocupar-se e ver a vida passar;
é melhor tentar, ainda que em vão,
que sentar-se fazendo nada até o final.
Eu prefiro na chuva caminhar,
que em dias tristes em casa me esconder.
prefiro ser feliz,
que em conformidade viver.....”*

MARTIN LUTHER KING

Aos meus pais pelo exemplo de vida.

Ao meu marido com muito amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pela sua presença sempre constante em minha vida, que sem Ele seria impossível a realização de mais uma etapa.

Aos meus pais, que com certeza não chegaria até aqui sem os esforços e tantas renúncias que fizeram para o meu crescimento. A minha gratidão e admiração à vocês é infinita!!!!

A Professora Dra. Sandra Cristina, que no decorrer de todos esses anos mostrou-se extremamente competente, séria, didática, dedicada, excelente orientadora e uma grande amiga. Estou levando comigo um pouquinho de suas virtudes que muito admiro. Tive a opção em lhe escolher pela segunda vez e se o tempo voltasse faria novamente a mesma escolha, pois hoje posso dizer com muito orgulho o quanto foi gratificante ter a oportunidade em trabalhar com você. E uma das coisas que quero guardar com muito carinho é o seu amor pelo ensino, em saber simplificar o que para muitos de nós seria impossível e o seu jeito especial em nos mostrar o certo e o errado, e estar sempre incentivando o nosso crescimento contínuo. Pela oportunidade em participar do PED ao seu lado, pois sempre me transmitiu segurança e confiança em enfrentar desafios, como aprendi... MUITO OBRIGADA POR TUDO!!!!

Ao meu marido, pela presença e compreensão em todos os momentos, que com seu amor me transmitiu muita força e coragem.

A FAPESP, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho, ao incentivo em participações em reuniões científicas, publicações de trabalhos, autorização para participação no PED, pois todo o conjunto de oportunidades foram de grande importância para o meu crescimento.

A professora Dra. Kátia Tannous pela co-orientação e amizade.

Aos amigos do laboratório, pois juntos passamos por vários momentos maravilhosos e também algumas crises, afinal cada um do seu jeito e com a sua história. A união nos fez mais fortes, e essa união e amizade me deixa muito feliz por estar concluindo essa etapa pensando em todos vocês e levando comigo uma experiência de vida que muito amadureci. Obrigada àqueles que souberam me compreender quando a solução foi isolar o laboratório por alguns dias, eta dia difícil!!!! Ao Michael pela ajuda nos dias de isolamento e até nos últimos instantes, às idas e vindas ao IPT, enfim temos muitas coisas a recordar e dar boas risadas juntos.....obrigada e parabéns por ser essa pessoa maravilhosa, responsável, dedicada e com um futuro brilhante!!!!

Ao Seu Levi, que foi uma pessoa indispensável em toda a montagem experimental e que me acompanhou passo a passo trabalhando brilhantemente. Com o decorrer do tempo criou-se uma amizade e hoje é uma pessoa especial, que tive a oportunidade em aprender e crescer junto com ele, o meu muito obrigada !!!

Aos técnicos da faculdade, Alexandre, Daniel, Valdemir, Edgar pela ajuda e paciência com a minha insistência em procurá-los.

Ao Prof. Dr. Theo pelo empréstimo do laboratório para os testes iniciais.

A Profa. Maria Inês Ré pelo empréstimo de seu laboratório no IPT e à técnica Shirley que esteve sempre em prontidão em nos receber para as análises com muita alegria.

À July, minha grande amiga, que simplesmente surgiu em minha vida como um anjo....pessoa iluminada e repleta de alegria!! Quantos momentos alegres passamos juntos e nos tristes e difíceis, você soube me dar uma força que sempre me manteve de cabeça erguida.

À TODA à minha família maravilhosa, minhas irmãs: Sandra, Sônia, Regina e meu irmão Virgílio, aos sobrinhos: Matheus, Camila, Mariana, Lucas e a fofucha Amanda, enfim a todos.....

Aos amigos que estou levando comigo, foram muitas pessoas maravilhosas que surgiram na minha vida nesses anos e que foram muito importantes, Juliana, Fernanda, Marta, Josy, Fátima, Osvaldo, Carlos Alberto, Dalcir, Dany, Melissa, Mário, Douglas, Alex, Cleverson, Lecsí, Sérgio, Vinicius, Rodrigo, Érica, Rosalinda, Cristinane, Fábio (IC), Cris, Fábio (técnico), Pedro, Levi, Wanda, Miriam, Samira, Ana Rita, Vicente, Diego, Michelle, Marcius, Diogo, Lucas, enfim a todos aqueles que estão indo comigo na eterna lembrança com muita alegria, MUITO OBRIGADA!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Regimes de fluidização em função da velocidade específica do gás	7
Figura 2.2	Diagrama de Geldart	10
Figura 2.3	Exemplo de curva de secagem	20
Figura 2.4	Áreas de aplicação industrial de equipamentos vibrados	24
Figura 2.5	Vibrador Mecânico de Inércia	28
Figura 2.6	Vibrador Excêntrico	28
Figura 2.7	Vibrador Pneumático	29
Figura 2.8	Vibrador Eletromagnético	29
Figura 2.9	Trajectoria do leito de partículas e do vaso durante o período de vibração	31
Figura 2.10	Altura do leito e queda de pressão versus frequência de vibração	33
Figura 2.11	Velocidade mínima de mistura de sólidos para o leito vibrofluidizado – efeito da aceleração vibracional	36
Figura 2.12	Curvas típicas de fluidização para leito vibrado	38
Figura 2.13	Efeito da frequência de vibração na curva de $\Delta P-u$	39
Figura 2.14	Fator de vibração em função da frequência angular vibração	41
Figura 2.15	Fator de vibração em função da frequência angular vibração	42
Figura 2.16	Eficiência de vibração em função da intensidade vibração	45
Figura 2.17	Efeito da vibração sob expansão do leito	47
Figura 2.18	L_c/L_f em função do diâmetro das partículas	48
Figura 2.19	Comportamento de FI sem a presença de vibração	50
Figura 2.20	Curvas características de fluidização – perda de carga em função da velocidade gás para diferentes condições	51
Figura 2.21	Cartas de fluidização variando frequência e amplitude de vibração em leito vibrofluidizado agitado	54
Figura 2.22	Taxa de secagem em função da intensidade vibracional	58
Figura 2.23	Umidade residual nos anéis de cebola em função do tempo secagem	59
Figura 2.24	Curvas típicas de queda de pressão em função da velocidade	64

Figura 2.25	Velocidade gás na condição de fluidização completamente desenvolvida em função do conteúdo de umidade variando a intensidade vibracional	65
Figura 2.26	Queda de pressão em função da velocidade gás variando a intensidade vibracional	66
Figura 2.27	Conteúdo de umidade de equilíbrio em função da atividade de água	67
Figura 2.28	Umidade final em função da temperatura	68
Figura 2.31	Velocidade de mínima fluidização em função do conteúdo de umidade do material	73
Figura 3.1	Leito vibrofluidizado	76
Figura 3.2	Esquema de montagem de vibrador excêntrico	77
Figura 3.3	Instalação do vibrador excêntrico	77
Figura 3.4	Esquema de medida do ângulo de repouso	78
Figura 3.5	Montagem experimental utilizada para estudo fluidodinâmico do material seco	81
Figura 3.6	Esquema de montagem dos leitos de sílica gel na linha	81
Figura 3.7	Representação esquemática do procedimento de padronização da umidade inicial do aa	85
Figura 3.8	Ilustração do esquema proposto	85
Figura 3.9	Tubo em acrílico que suporta o pesa filtro com a amostra a ser retida do leito em determinados intervalos de tempo	87
Figura 3.10	Montagem experimental com o sistema de amostragem	88
Figura 3.11	Esquema da montagem experimental com o sistema de amostragem acoplado ao sistema	89
Figura 3.12	Equipamento para determinação de umidade, “Karl Fisher”	92
Figura 4.1	Queda de pressão em função da velocidade ar, carga = 600 g, sem vibração (LFC)	96
Figura 4.2	Queda de pressão em função da velocidade ar, carga = 600 g, $f = 200\text{rpm}$, $a = 0,01\text{m}$, $G = 0,5$	97
Figura 4.3	Queda de pressão em função da velocidade ar, carga = 600 g, $f = 350\text{rpm}$, $a = 0,01\text{m}$, $G = 1,5$	97

Figura 4.4	Queda de pressão em função da velocidade ar, carga = 600 g, $f = 350\text{rpm}$, $a = 0,02\text{m}$, $G = 2,7$	98
Figura 4.5	Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 300g,	100
Figura 4.6	Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 300g,	100
Figura 4.7	Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 500g	101
Figura 4.8	Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 600g	101
Figura 4.9	Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 700g	102
Figura 4.10	Ácido adípico – lote 1, $d_p > 600\mu\text{m}$, microscopia óptica, aumento 40 x	106
Figura 4.11	Ácido adípico – lote 2, d_p entre 600 e $420\mu\text{m}$, microscopia óptica, aumento 40 x	106
Figura 4.12	Ácido adípico – lote 3, d_p entre 420 e $250\mu\text{m}$, microscopia óptica, aumento 40 x	106
Figura 4.13	Ácido adípico – lote 4, d_p entre 250 e $75\mu\text{m}$, microscopia óptica, aumento 40 x	107
Figura 4.14	Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 300g, lote 1 = partículas $> 600\mu\text{m}$	108
Figura 4.15	Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 300g, lote 2 = 600 - $420\mu\text{m}$	109
Figura 4.16	Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 300g, lote 3 = 420 - $250\mu\text{m}$	109
Figura 4.17	Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 300g, lote 4 = 250 - $75\mu\text{m}$	110
Figura 4.18	Fator de vibração em função da frequência para os lotes 1, 2, 3 e 4	110

Figura 4.19	Índice de fluidização em função da velocidade ar para os lotes 1, 2, 3, e 4, $f = 200\text{rpm}$	112
Figura 4.20	Índice de fluidização em função da velocidade para os lotes 1, 2, 3, e 4, $f = 350\text{rpm}$	112
Figura 4.21	Índice de fluidização em função da velocidade para os lotes 1, 2, 3, e 4, $f = 435\text{rpm}$	113
Figura 4.22	Queda de pressão em função da velocidade ar, Curvas fluidodinâmicas correspondentes às corridas 9 e 10	116
Figura 4.23	Queda de pressão em função da velocidade ar, Curvas fluidodinâmicas correspondentes às corridas 7 e 17	116
Figura 4.24	Queda de pressão em função da velocidade ar, Curvas fluidodinâmicas correspondentes às corridas 3 e 13	117
Figura 4.25	Diagrama de pareto para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização	119
Figura 4.26	Valores preditos em função dos valores observados para a queda de pressão na condição de mínima fluidização	121
Figura 4.27	Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, $X_3 = -1$	122
Figura 4.28	Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, $X_3 = 0$	122
Figura 4.29	Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, $X_3 = +1$	123
Figura 4.30	Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, $X_2 = -1$	123
Figura 4.31	Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, $X_2 = 0$	124
Figura 4.32	Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, $X_2 = +1$	124
Figura 4.33	Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, $X_1 = -1$	125

Figura 4.34	Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, $X_1 = 0$	125
Figura 4.35	Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, $X_1 = +1$	126
Figura 4.36	Diagrama de pareto para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização	128
Figura 4.37	Valores preditos em função dos valores observados para a velocidade na condição de mínima fluidização	130
Figura 4.38	Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima fluidização, $X_3 = -1$	131
Figura 4.39	Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima fluidização, $X_3 = 0$	131
Figura 4.40	Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima fluidização, $X_3 = +1$	132
Figura 4.41	superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima fluidização, $X_2 = -1$	132
Figura 4.42	superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima fluidização, $X_2 = 0$	133
Figura 4.43	superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima fluidização, $X_2 = +1$	133
Figura 4.44	Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima fluidização, $X_1 = -1$	134
Figura 4.45	superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima fluidização, $X_1 = 0$	134
Figura 4.46	superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima fluidização, $X_1 = +1$	135
Figura 4.47	Amostras do ácido adípico seco (a), $X = 0,25$ b.u. %, e úmido (b), $X = 2,8$ b.u.%	136
Figura 4.48	Queda de pressão em função da velocidade ar, sem a presença de vibração, carga de partículas = 300g, ácido adípico úmido, $X = 3,3\%$...	138

Figura 4.49	Queda de pressão em função da velocidade ar, com a presença de vibração, carga de partículas = 300g, ácido adípico úmido, $X = 3,3\%$...	138
Figura 4.50	Queda de pressão em função da velocidade ar, com a presença de vibração, carga de partículas = 300g, ácido adípico úmido, $X = 2,8\%$...	139
Figura 4.51	Queda de pressão em função da velocidade ar, com a presença de vibração, carga de partículas = 300g, ácido adípico úmido, $X = 0,3\%$...	139
Figura 4.52	Ácido adípico úmido proveniente da indústria	140
Figura 4.53	Queda de pressão em função da velocidade ar, para amplitude de 0,01m nas curvas fluidodinâmicas do ácido adípico, 300g, $\overline{X_1} = 5,1\%$...	144
Figura 4.54	Queda de pressão em função da velocidade ar, para amplitude de 0,02m nas curvas fluidodinâmicas do ácido adípico, 300g, $\overline{X_1} = 5,1\%$...	144
Figura 4.55	Queda de pressão em função da velocidade ar, para amplitude de 0,01m nas curvas fluidodinâmicas do ácido adípico, 300g, $\overline{X_1} = 2,8\%$...	146
Figura 4.56	Queda de pressão em função da velocidade ar, para amplitude de 0,02m nas curvas fluidodinâmicas do ácido adípico, 300g, $\overline{X_1} = 2,8\%$...	146
Figura 4.57	Queda de pressão em função da velocidade ar, para o material com teor de umidade 1,2% com aplicação de vibração	147
Figura 4.58	Queda de pressão em função da velocidade ar a diferentes teores de umidade para o LFC	148
Figura 4.59	Imagens obtidas por microscopia óptica com aquecimento – ampliação de 100X	149
Figura 4.60	Curva de secagem (a) e taxa de secagem (b), amostra A	153
Figura 4.61	Curva de secagem (a) e taxa de secagem (b), amostra B	154
Figura 4.62	Curva de secagem (a) e taxa de secagem (b), amostra C	155
Figura 4.63	Curva de secagem (a) e taxa de secagem (b), amostra D	156
Figura 4.64	Curva de secagem (a) e taxa de secagem (b), amostra E	157
Figura 4.65	Curva de secagem (a) e taxa de secagem (b), amostra F	158
Figura 4.66	Curva de secagem (a) e taxa de secagem (b), amostra G	159
Figura 4.67	Curva de secagem (a) e taxa de secagem (b), amostra H	160
Figura 4.68	Curva de secagem (a) e taxa de secagem (b), amostra I	161

Figura 4.69	Curva de secagem (a) e taxa de secagem (b), amostra J	162
Figura 4.70	Perfil da temperatura em um ponto acima do leito de partículas em função do tempo	163
Figura 4.71	Conteúdo de umidade em função do tempo de secagem do ácido adípico em LFV/LFC	164
Figura 4.72	Conteúdo de umidade em função do tempo de secagem altos valores de temperatura e velocidade ar	164
Figura 4.73	Conteúdo de umidade em função do tempo de secagem variando a velocidade gás e tempo de vibração	165
Figura 4.74	Conteúdo de umidade em função do tempo de secagem variando a velocidade gás	165
Figura 4.75	Dados de umidade do material recolhido em cada peneira após armazenado por um mês em dessecador	166
Figura 4.76	Dados de umidade do material recolhido em cada peneira – lote A – após secagem em estufa à vácuo	167
Figura 4.77	Dados de umidade do material recolhido em cada peneira – lote B – após secagem em estufa à vácuo	167
Figura 4.78	% Retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira, Polígono de frequência – lotes A e B	170
Figura 4.79	% Retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira, Polígono de frequência – lote A e amostras A e B	171
Figura 4.80	% Retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira, Polígono de frequência – lote A e amostras C e D	171
Figura 4.81	% Retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira, Polígono de frequência – lote A e amostras B e D	172
Figura 4.82	% Retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira, Polígono de frequência – lote A e amostras A, C e J	173
Figura 4.83	% Retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira, Polígono de frequência – lote B e amostras E e F	174
Figura 4.84	% Retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira, Polígono de frequência – lote B e amostras G e H	174

Figura 4.85	% Retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira, Polígono de frequência – lote B e amostras F e H	175
Figura 4.86	% Retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira, Polígono de frequência – lote B e amostras E, G e I	176
Figura 4.87	% Retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira, Polígono de frequência – Material seco comercial e lotes A e B	176
Figura 4.88	Conteúdo de umidade em função da umidade relativa, Isotermas de dessorção à T = 40 e 60 °C	178
Figura 4.89	Material seco na estufa à vácuo, 80 °C, lote B, ampliação 100X	182
Figura 4.90	Material seco na estufa à vácuo, 80 °C, lote A, ampliação 100X	182
Figura 4.91	Material seco em LVF, amostra A, ampliação 100X	183
Figura 4.92	Material seco em LVF, amostra C, ampliação 100X	183
Figura 4.93	Material seco em LVF, amostra I, ampliação 100X	184
Figura 4.94	Material seco em LVF, amostra J, ampliação 100X	184

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Algumas propriedades do aa	5
Tabela 2.2	Equações para umidade de equilíbrio	16
Tabela 2.3	Aplicações industriais para secadores em leitos vibrofluidizados	25
Tabela 3.1	Intervalos das variáveis utilizados no trabalho	79
Tabela 3.2	Sais utilizados e suas respectivas umidades relativas do ambiente (UR %)	93
Tabela 4.1	Intervalos de operação dos parâmetros	96
Tabela 4.2	Redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização variando a intensidade vibracional (G) para uma carga de 300g	103
Tabela 4.3	Redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização variando a intensidade vibracional (G) para uma carga de 500g	103
Tabela 4.4	Redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização variando a intensidade vibracional (G) para uma carga de 600g	104
Tabela 4.5	Redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização variando a intensidade vibracional (G) para uma carga de 700g	104
Tabela 4.6	Cálculo da eficiência de vibração - k_v	105
Tabela 4.7	Valores utilizados no planejamento	114
Tabela 4.8	Valores codificados das variáveis independentes e as respostas analisadas	115
Tabela 4.9	Estimativa dos efeitos para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização	118
Tabela 4.10	Coeficientes de regressão para o modelo estatístico para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização	119
Tabela 4.11	Análise da variância para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização	120
Tabela 4.12	Estimativa dos efeitos para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização	127
Tabela 4.13	Coeficientes de regressão para o modelo estatístico da velocidade na condição de mínima vibrofluidização	128

Tabela 4.14	Análise da variância para velocidade na condição de mínima vibrofluidização	129
Tabela 4.15	Umidade do aa utilizada nos experimentos fluidodinâmicos com o material úmido	141
Tabela 4.16	Condições experimentais de cada experimento realizado no estudo fluidodinâmico do material úmido	142
Tabela 4.17	Condições experimentais dos ensaios de secagem	151
Tabela 4.18	Valores de diâmetro médio de Sauter e umidade média final para os lotes A e B submetidos a secagem na estufa à vácuo e em diferentes condições experimentais	169
Tabela 4.19	Dados de umidade relativa em função do teor de umidade de equilíbrio à $T = 40$ e $60\text{ }^{\circ}\text{C}$	178
Tabela 4.20	Valores obtidos no <i>Powder Characteristics</i> – modelo PT-N – Hosokawa Microns	180

NOMENCLATURA

a -	amplitude de vibração	(m)
D_p -	diâmetro da abertura da peneira	(μm)
d_p -	diâmetro médio de Sauter das partículas	(μm)
f -	frequência de vibração	(rpm)
FI -	índice de fluidização	(-)
F_v ou K_v	fator de vibração	(-)
g -	aceleração da gravidade	(m/s^2)
G -	intensidade vibracional	(-)
H -	altura do leito	(m)
H_0 -	altura inicial do leito	(m)
HR -	Índice de Hausner	(-)
m_a -	massa de água no material	(kg)
m_b -	massa de partículas no leito	(kg)
m_s -	massa de material seco	(kg)
m_u -	massa de material úmido	(kg)
T -	temperatura de entrada do gás	($^{\circ}\text{C}$)
t_{corr} -	tempo de cada corrida experimental	(min)
t_{vib} -	tempo de vibração o qual o leito foi submetido	(min)
$(u_{mf})_{cf}$ -	velocidade gás na condição de fluidização completamente desenvolvida com vibração	(m/s)
u_{mf} -	velocidade na condição de mínima fluidização	(m/s)
$u_{\text{gás}}$ -	velocidade de operação do gás	(m/s)

u_{mm} -	velocidade de mínima mistura	(m/s)
UR_{amb} -	umidade relativa do ambiente	(%)
UR_{linha} -	umidade relativa na linha de gás	(%)
$(u_{mf})_v$ -	Velocidade gás na condição de mínima fluidização com vibração	(m/s)
X -	conteúdo de umidade de um material em base seca	(kg água/kg material seco)
X_2 -	conteúdo de umidade do ácido adípico após os ensaios fluidodinâmicos à temperatura ambiente	b.u. (%)
X'_1 -	conteúdo de umidade do ácido adípico retirado do leito em função do tempo de secagem	b.u. (%)
X_0 -	conteúdo de umidade do ácido adípico úmido proveniente da indústria	b.u. (%)
X_{eq} -	conteúdo de umidade de equilíbrio	b.u. (%)
X_f -	conteúdo de umidade médio do ácido adípico final após cada corrida experimental de secagem	b.u. (%)
X_1 -	conteúdo de umidade do ácido adípico úmido submetido a diferentes intervalos de tempo na estufa	b.u. (%)
$\overline{X_1}$ -	conteúdo de umidade médio de X_1	b.u. (%)
W -	conteúdo de umidade de um material em base úmida	(kg água/kg material úmido)
w -	frequência angular	(rad/s)
$(\Delta P_{mf})_{cf}$ -	Queda de Pressão na condição de fluidização completamente desenvolvida com vibração	(Pa)
$(\Delta P_{mf})_v$ -	Queda de Pressão na condição de mínima fluidização com vibração	(Pa)

Letras Gregas

ρ_b -	densidade aparente aerada	(g/cm ³)
ρ_t -	densidade aparente compactada	(g/cm ³)
μ -	viscosidade do fluido	(cP)
ϕ -	Esfericidade	(-)
ε -	porosidade do leito	(-)
ε_{mf} -	porosidade do leito na condição de mínima fluidização	(-)

Abreviações

aa	Ácido adípico
LFC	Leito Fluidizado Convencional
LVF	Leito Vibrofluidizado

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e montagem de um leito vibrofluidizado juntamente com um sistema de amostragem para o estudo fluidodinâmico e a secagem de ácido adípico. A distribuição granulométrica do material encontra-se na faixa de 75 a 600 μm e densidade de 1340 kg/m^3 .

O ácido adípico é muito utilizado na produção do fio de Nylon e entre os ácidos alifáticos dicarboxílicos é o mais importante. O conteúdo de umidade do produto comercial é de aproximadamente 0,25 % b.u.

O material utilizado, o ácido adípico, apresenta dificuldades em atingir o regime de fluidização em leito fluidizado convencional, quando úmido. O efeito da vibração ajuda a manter o aglomerado em estado móvel, quando úmido, e melhora a taxa de circulação com quebra das bolhas, quando seco.

O estudo fluidodinâmico foi realizado a partir das curvas de queda de pressão em função da velocidade do gás para o leito fluidizado convencional e vibrado. Verificou-se uma redução na queda de pressão na condição de mínima fluidização entre 4 e 32% e com o aumento da carga de partículas o efeito da vibração foi reduzido.

As curvas fluidodinâmicas obtidas representaram reprodutibilidade das curvas apresentadas na literatura (Strumillo, 1980).

A influência da distribuição granulométrica do ácido adípico no comportamento fluidodinâmico foi acompanhado com o aumento da frequência de vibração imposta ao sistema. A análise do fator de vibração em função da frequência de vibração mostrou que as partículas menores foram mais afetadas pelo efeito da vibração, comparando com as partículas maiores.

A análise estatística mostrou que a queda de pressão e a velocidade na condição de mínima vibrofluidização foram fortemente influenciadas pela carga de partículas presentes no leito; observou-se o deslocamento das superfícies de respostas variando a carga de partículas.

O estudo fluidodinâmico realizado com o material úmido mostrou que as forças interpartículas existentes no material umidificado artificialmente atuam de forma diferente comparadas às forças existentes no material úmido proveniente do processo de cristalização.

O processo de secagem do ácido adípico é uma etapa importante, pois determina a qualidade do produto final, tanto em nível de conteúdo final de umidade, como de especificação do tamanho e forma dos cristais.

O sistema de amostragem desenvolvido no trabalho apresentou bons resultados e praticamente não causou variação da massa do leito de partículas nos experimentos de secagem.

As curvas de secagem obtidas no trabalho mostraram a existência dos dois períodos de taxa de secagem, constante e decrescente. O menor conteúdo de umidade final encontrado nos experimentos foi de aproximadamente 0,55% b.u. e a especificada para o produto comercial é de 0,25% b.u.. Esse conteúdo de umidade pode ser alcançado em condições operacionais diferentes dos experimentos realizados no presente trabalho. Observou-se a variação do conteúdo de umidade com o tamanho do cristal, visto que o material apresenta uma ampla distribuição de tamanho –75 a 600 μm .

Os resultados obtidos com as curvas das isotermas de dessorção à temperaturas de 40 e 60°C mostraram que a dessorção do material praticamente independe da umidade relativa do ambiente para as temperaturas analisadas.

O material seco na indústria e no leito vibrofluidizado desenvolvido no trabalho apresentaram boa fluidez, o que foi verificado com os resultados de ângulo de repouso e Índice de Hausner obtidos no equipamento “Powder Characteristics”.

ABSTRACT

The objective of this work is the development and building of a vibrofluidized bed and sampling system for the fluid-dynamic study and drying of adipic acid. The adipic acid investigated in this work presents particle diameter in the range of 75 – 600 μm and density of 1340 kg/m^3 .

Adipic acid is the main intermediate product in the synthesis of Nylon. It is the most important of all aliphatic dicarboxylic acid. The moisture content of commercial product is 0.25% w.b..

The wet or moistened adipic acid has a tendency to agglomerate. In such case, fluidization does not occur and the particle can not be treated in conventional fluidized bed. The effect of vibration helps to maintain the agglomerate in mobile state, when wet, and it improves the circulation of particles by breaking of the bubbles, when dry.

The fluid-dynamic study of the vibrofluidized bed has been done through the fluidization curves for both systems, conventional and vibrated, to verify the pressure drop variation versus air velocity as function of the vibration parameters, frequency and amplitude.

The minimum fluidization pressure drop in vibrofluidized bed was found to be lower than in a conventional fluidized bed. With vibration imposition, it has been obtained a decrease on the minimum fluidization pressure drop in the range of 4 – 30%. The effect of vibration had a considerable attenuation on the minimum fluidization pressure drop with increase in the load of particles.

The reproduction of distinct fluidization curves was obtained in this work as in the literature for a vibrofluidized bed (Strumillo, 1980).

The influence of the particle size distribution was investigated through the fluidization curves for different vibration parameters. The curves obtained of vibration factor versus vibration frequency showed that for a fixed load, the smaller particles are more affected by the vibration than the larger ones.

The statistical analysis showed that the minimum fluidization pressure drop and air velocity were influenced strongly by the load of particles, the displacement of the fitted surface was observed varying the load of particles.

The fluid-dynamic study with the wet material showed that the interparticle forces in the artificially moistened material act in a different way compared to the existent forces in the industrial wet material, coming from the crystallization process.

The drying process of adipic acid is an important stage, because it determines the quality of final product: moisture content and specification of the size and form of the crystals.

The sampling system developed in this work presented good results and, practically, did not cause variation of the mass in the bed of particles in the drying experiments.

The drying curves analysis showed two steps, constant and decreasing drying rates. The smallest final moisture content obtained was of 0.55 % w.b., while for the commercial product is of 0.25 % w.b. This final moisture content can be reduced by changing the operational conditions, like increasing the air temperature. The variation of the moisture content was observed for different sizes of crystals, due to a wide distribution of size, 75 – 600 μm .

Sorption isotherms were determined at 40 and 60⁰C. The analysis of sorption isotherms curves showed that the moisture content is not related to water activity.

The results of repose angle and Hausner Index obtained in the equipment “Powder Characteristics” showed that the dry adipic acid in the industry and in the vibrofluidized bed developed in this work presented good flowability.

CAPÍTULO 1

1 - INTRODUÇÃO

O leito fluidizado é uma técnica eficiente de contato sólido-fluido e utilizada industrialmente desde 1948, e atualmente muito aplicada em secagem devido à alta eficiência térmica. No entanto, apresenta algumas restrições quanto ao processamento de materiais difíceis de fluidizar; a não homogeneidade desse processo possui um efeito negativo sobre o contato entre sólido-fluido e a produtividade do processo em geral.

A necessidade em atingir um regime de fluidização com características fluidodinâmicas favoráveis levou alguns pesquisadores a utilizarem diferentes técnicas, com o objetivo de obter uma fluidização de melhor qualidade. Algumas técnicas estão sendo utilizadas, como: trabalhar com gás a alta pressão, fluidização com circulação com pulsação do fluido, agitação mecânica, vibração mecânica, etc.

Os trabalhos que aplicam a vibração mecânica na fase sólida têm como objetivo melhorar a qualidade da fluidização, principalmente para materiais que apresentam ampla distribuição de tamanho das partículas, materiais aglomerados, materiais termoplásticos, materiais pastosos, bem como para materiais friáveis. A aplicação comercial do leito vibrofluidizado vem crescendo nas últimas décadas por proporcionar uma economia relevante no consumo de energia na fluidização e por fluidizar materiais que apresentam dificuldades para o regime de fluidização.

A vibração domina as forças de atração interpartículas e, portanto, aumenta a qualidade da fluidização de partículas finas, que tendem a aglomerar e materiais úmidos que apresentam a tendência de grudar uns com os outros.

A avaliação e o uso da vibração no comportamento dinâmico de materiais granulares é um tema de amplo interesse na engenharia de processos, destacando-se: aglomeração de partículas, MARTERS E STOLITZE (1973); carga e descarga em silos, ROBERTS (1984); classificação com peneiras vibratórias, PERRY E CHILTON (1974), filtração, MELLOWES (1985); fluidização, MROWIEC e CIESIELCZYK (1977);

granulação, ERDESZ e OMÓS (1986); transporte em dutos, ERDESZ e SZALAY (1988) e sobretudo a secagem onde se concentra o maior número de aplicações, MUJUMDAR (1982), FINZER e KIECKBUSCH (1986), DALEFFE *et al.* (2001), etc.

A vibração mecânica associada à secagem em leito fluidizado resulta em uma unidade de processo conhecida como secador de leito vibrofluidizado, onde os sólidos são mantidos em um leito fluidizado como uma ação conjunta do escoamento do ar e das vibrações mecânicas. Uma característica importante da secagem em leito vibrofluidizado é a existência de um valor ótimo dos parâmetros de vibração, que proporcionam uma alta velocidade de secagem.

Existem inúmeras vantagens em se trabalhar com leito vibrofluidizado: a vibração mecânica ajuda a fluidização, a quantidade de ar requerida é reduzida, exigindo assim vazões menores e, com isto, gerando maior eficiência de secagem; o produto não fica sujeito aos fortes atritos e choques provocados pela “ebulição” do leito fluidizado convencional; haverá fluidização homogênea, mesmo para materiais aglomerantes, com um melhor controle do tempo de residência, sem ocorrer a degradação térmica em zonas estagnadas, ou seja, as vibrações servem para manter o aglomerado em estado móvel, bem como para quebrar os agregados, resultando em uma melhor fluidização e secagem.

O material estudado, ácido adípico, apresenta características de materiais que são amplamente utilizados em leitos vibrofluidizados, tais como: forma e tamanho diversos, apresentam uma estrutura aglomerada e pegajosa quando úmido. A sua importância comercial se concentra na produção do fio de Nylon, que requer o material de alta qualidade. A secagem do ácido adípico (aa) é uma etapa importante no processo de produção, pois determina a qualidade do produto, tanto em nível de conteúdo final de umidade, como de especificação do tamanho e forma dos cristais.

Devido ao material apresentar características coesivas quando úmido, a secagem do ácido adípico é uma etapa importante e determinante no produto final. Na indústria química a secagem do ácido adípico é realizada em secadores pneumático e fluidizado; entretanto o secador pneumático causa a quebra dos cristais na região de aceleração, resultando em um produto final com análise granulométrica fora de especificação e causando o empedramento

do material depois de embalado. O leito fluidizado apresenta problemas de estabilização do regime para as partículas a serem secas, implicando na não uniformidade do produto.

A proposta deste trabalho consiste em desenvolver e construir um secador vibrofluidizado, em escala de laboratório, realizando um estudo da fluidodinâmica do material seco e úmido e da secagem do ácido adípico úmido.

As etapas deste trabalho se resumem em:

- realizar o projeto e a montagem de um sistema experimental de secagem em leito vibrofluidizado, em escala de laboratório;
- estudar a fluidodinâmica do leito para as partículas secas em leito fluidizado convencional e vibrofluidizado;
- realizar uma análise estatística dos parâmetros vibracionais e da carga de partículas no comportamento fluidodinâmico em leito vibrofluidizado;
- estudar a influência da distribuição granulométrica do material seco no comportamento fluidodinâmico em leito fluidizado convencional e vibrofluidizado;
- estudar a fluidodinâmica do leito para as partículas úmidas provenientes da indústria e umidificada em laboratório, para leito fluidizado convencional e vibrofluidizado;
- idealizar e efetuar a montagem de um sistema de amostragem do material para o experimentos de secagem;
- analisar a cinética de secagem do material e as isotermas de dessorção do material;
- realizar a análise granulométrica dos cristais secos em estufa à vácuo e após o processo de secagem em leito vibrofluidizado e verificar os cristais em microscópio eletrônico de varredura depois do processo de secagem.

A maioria dos trabalhos presentes na literatura tratam de materiais que são umidificados artificialmente ou através de injeção de líquido durante o processo. Esse trabalho enfoca o desenvolvimento de um equipamento para secagem do ácido adípico proveniente da indústria, com o objetivo de obter condições favoráveis de secagem do material, visando a qualidade do produto final.

CAPÍTULO 2

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de iniciar um estudo sobre a secagem do ácido adípico em leito vibrofluidizado uma série de itens é apresentado a seguir:

- Material utilizado, ácido adípico;
- Leito fluidizado;
- Secagem;
- Leito vibrofluidizado.

Os itens citados serão úteis para facilitar o desenvolvimento e o estudo da secagem do ácido adípico em leito vibrofluidizado a serem realizados neste trabalho.

2.1 – Ácido adípico

O ácido adípico (aa) é um importante intermediário utilizado nas indústrias química, farmacêutica e alimentícia. Também conhecido pela IUPAC, como ácido hexanodióico ou ácido 1,4-butanodicarboxílico, entre os ácidos alifáticos dicarboxílicos, comercialmente, é o mais importante. Muito utilizado na produção da fibra Nylon 6.6, foi descoberto nos anos 30 por W.H. Carothers da Du Pont (ULLMANN'S, 1988).

Entre suas características físicas, pode-se citar que são cristais incolores, inodoros e com sabor ácido. Muito solúvel em metanol e etanol, solúvel em água e acetona, e solúvel muito lentamente em ciclohexano e benzeno. Cristaliza-se em forma de prismas monoclinicos a partir da água, acetato de etila ou acetona. A solubilidade em água aumenta com a temperatura.

A presença de umidade inclusa pode gerar dificuldades no processo de secagem de alguns materiais cristalinos. A possibilidade de permanecer água inclusa nos cristais de ácido adípico afeta a qualidade final do fio de nylon, que é a sua principal aplicação industrial.

A umidade inclusa presente em um material cristalino pode distinguir-se em dois diferentes tipos de inclusão líquida (DENBIGH e WHITE, 1966):

- primária: adquirida durante o crescimento do cristal e aumenta significativamente com o tamanho do cristal;
- secundária: todo o tipo de inclusão que aparece durante o processo da formação do cristal.

O conteúdo de água no produto comercial é de aproximadamente 0,25% b.u. e as principais propriedades do aa estão presentes na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Algumas Propriedades do aa:

Massa específica (kg/m ³)	1340 kg/m ³
Calor Específico(J/kg.K)	1590 J/kg K (sólido) e 2260 J/kg K (líquido)
Ponto de fusão	152 °C
Ponto sublimação	110 °C
Peso molecular	146,14
Ponto de ignição	196 °C
Ponto de combustão	232 °C
pH	3,2 (0,1% solução aquosa)
Forma dos cristais	Monoclínico

O trabalho de CASTELLAN e CAVALLARD (1991) estuda o processo para produção do ácido adípico.

Algumas aplicações se concentram em: sistema de poliuretanos, sínteses orgânicas, polímeros e fibras têxteis de poliamida, lubrificantes, plastificantes, adesivos, tintas e resinas, espumas flexíveis e rígidas, aplicações em indústrias alimentícias, etc.

Na indústria química sua principal aplicação se dá na produção do Nylon 6.6, que requer o ácido adípico como matéria prima de alta qualidade. O processo de purificação do ácido adípico é importante, pois existe uma quantidade significativa de ácidos succínico e glutárico, que são indesejáveis.

2.2 – Leito Fluidizado

KUNII e LEVENSPIEL (1991) descrevem o regime de fluidização da seguinte forma: passa-se um fluido através de um leito de partículas finas (Figura 2.1). A baixas velocidades, o fluido percola pelos espaços vazios entre as partículas sem que haja movimento das mesmas (leito fixo). Com o aumento da velocidade gás, as partículas começam a mover-se, passando o regime de leito fixo para um regime de leito expandido. Numa velocidade maior, chega-se a um ponto onde as partículas suspendem-se no gás ou líquido. Neste ponto a força de atrito entre as partículas e o fluido contrabalança o peso da partícula. A componente vertical da força compressiva entre as partículas adjacentes desaparece e a queda de pressão através de qualquer seção no leito torna-se igual ao peso das partículas naquela seção (leito fluidizado, velocidade de mínima fluidização (u_{mf})). Acima da velocidade de mínima fluidização as partículas começam a se movimentar, exceto os sólidos que possuem forças coesivas.

Um acréscimo na velocidade do gás, além da mínima fluidização em sistemas gás-sólidos pode ser observada grande instabilidade com formação de bolhas e canais preferenciais. A maiores velocidades, a agitação torna-se mais violenta e o movimento dos sólidos mais vigoroso.

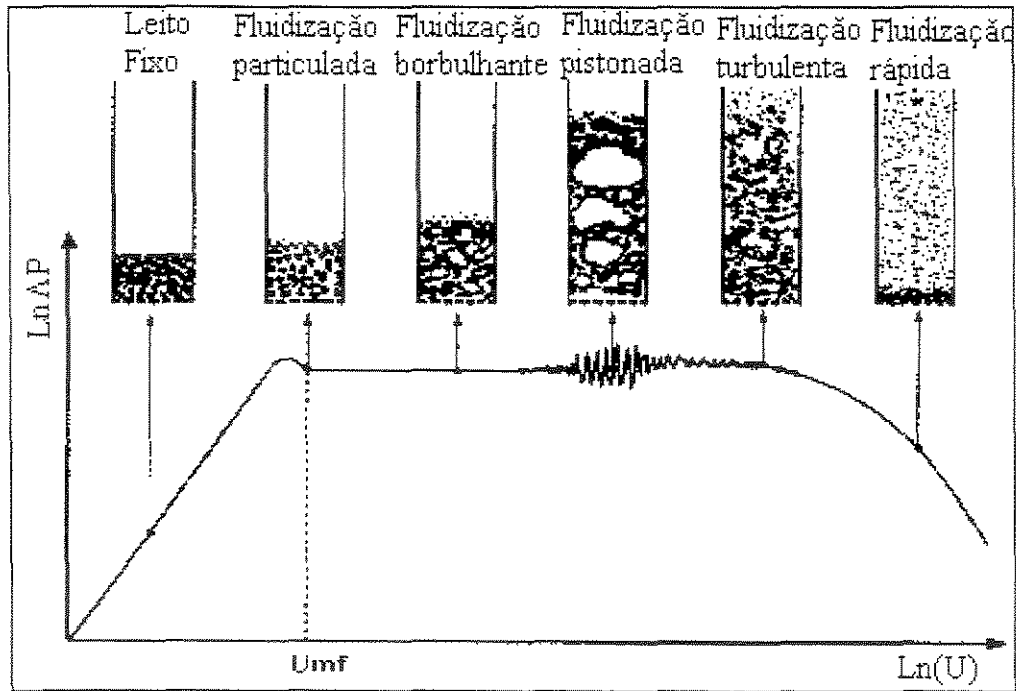


Figura 2.1: Regimes de fluidização em função da velocidade específica do gás (adaptado de KUNII e LEVENSPIEL (1991))

São muitas as equações desenvolvidas para a predição da u_{mf} . Uma das mais conhecidas é a equação de Ergun (1952):

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u_{mf}}{\phi^2 d_p^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f u_{mf}^2}{\phi d_p} \quad (2.1)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = (\rho_p - \rho_f)(1-\varepsilon)g \quad (2.2)$$

onde ΔP é a queda de pressão no leito, ε é a porosidade de leito, ε_{mf} é a porosidade de leito na condição de mínima fluidização, ρ_f e ρ_p são as massas específicas do fluido e da partícula, ϕ é a esfericidade das partículas, μ é a viscosidade do fluido, d_p é o diâmetro das

partículas, g é a aceleração da gravidade. Em condições de fluidização incipiente ou mínima fluidização pode-se combinar a Equação (2.1) com a equação de queda de pressão em leito fluidizado (2.2), obtendo-se uma correlação para predição da velocidade de mínima fluidização:

$$150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu u_{mf}}{\phi^2 d_p^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_f u_{mf}^2}{\phi d_p} = (\rho_p - \rho_f)(1 - \varepsilon_{mf})g \quad (2.3)$$

Como pode-se ver na Equação (2.3), u_{mf} depende das propriedades do material, do fluido e da velocidade gás. Utilizando-se os grupos adimensionais de Arquimedes (Ar) e Reynolds (Re), tem-se a equação da seguinte forma:

$$\frac{Ar}{Re_{mf}} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} + \frac{1,75}{\phi \varepsilon_{mf}^3} Re_{mf} \quad (2.4)$$

sendo o número de Arquimedes Ar , dado por :

$$Ar = \rho_f \phi^3 d_p^3 (\rho_p - \rho_f) g / \mu^2 \quad (2.5)$$

e o número de Reynolds :

$$Re_{mf} = \rho_f \phi d_p U_{mf} / \mu \quad (2.6)$$

Existem outras correlações adotando valores de porosidade de mínima fluidização (ϵ_{mf}) e de esfericidade (ϕ) para vários sistemas. Uma das primeiras aproximações, foi a relação de WEN e YU (1966), que é bastante utilizada:

$$u_{mf} = \frac{\mu}{\rho_f \phi d_p} (1135,7 + 0,0408 Ar)^{1/2} - 33,7 \quad (2.7)$$

O comportamento das partículas no leito fluidizado depende da combinação entre o tamanho das partículas e densidades do fluido e do sólido (GELDART (1986)). A Figura 2.2 mostra o diagrama de fluidização de Geldart, aplicado para se verificar a classificação do sólido e o regime de fluidização. Existem quatro grupos de partículas, como se pode observar na Figura 2.2. No grupo C as forças interpartículas são maiores do que o fluido pode exercer na partícula, tornando a fluidização extremamente difícil. Neste grupo, o tamanho das partículas é pequeno.

No grupo A estão as partículas que originam leitos com boa qualidade de fluidização. O leito de partículas deste grupo expande consideravelmente entre a velocidade de mínima fluidização (u_{mf}) e a velocidade em que inicia a formação de bolhas (u_{mb}), pois as forças são pouco coesivas.

No grupo B as forças interpartículas são desprezíveis e as bolhas começam a se formar acima da velocidade de mínima fluidização. O tamanho das bolhas aumenta com a altura do leito e com a velocidade em excesso do gás ($u - u_{mf}$). A fluidização de partículas desse grupo é denominada fluidização borbulhante.

No grupo D encontram-se partículas maiores e/ou densas. As partículas são grosseiras e mais facilmente jorráveis, as forças coesivas interpartículas são menores comparadas com a força de arraste, e para partículas desse grupo, d_p é geralmente maior que 1 mm.

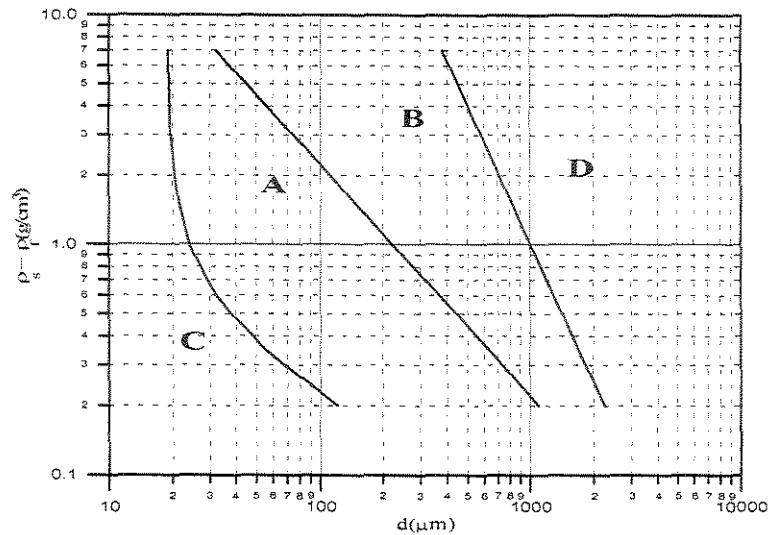


Figura 2.2 - Diagrama de Geldart (GELDART (1986)).

A homogeneização das partículas através do leito fluidizado, ou de qualquer outro tipo de leito, é essencial em todo projeto de equipamento. Uma má distribuição do material pode levar à formação de canais preferenciais, pelos quais o fluido tende a passar, diminuindo a eficiência do processo, que se baseia no contato íntimo entre as fases sólida e fluida. Os distribuidores são utilizados em leitos fluidizados como suporte para o material, e para assegurar uma distribuição de fluido uniforme dentro do leito (KUNII e LEVENSPIEL (1991)). Os distribuidores devem ser ainda fortes o suficiente para resistir às deformações nas condições sob as quais estão submetidas e resistir às tensões induzidas pela expansão térmica. Os mesmos devem operar por longos períodos sem obstruir, e devem ser de fácil desobstrução, devendo evitar a erosão e os atritos das partículas; devem ainda operar com uma menor queda de pressão possível, para minimizar o consumo de energia.

Em alguns processos de fluidização, a atrição das partículas é um sério problema. A distribuição do tamanho das partículas que estão sujeitas à atrição é um elemento importante na caracterização do fenômeno. A atrição aumenta o número de partículas e reduz o tamanho da mesma (RAY et al, 1987), podendo em alguns casos alterar a fluidodinâmica do sistema.

VAUX et al (1979) estudaram os fatores que causaram atrição no calcário em um combustor de leito fluidizado. Os fatores foram divididos em dois grupos, um grupo de fatores relaciona-se com forças mecânicas e o resultado está diretamente ligado com a atrição das partículas e o outro grupo refere-se a causas de processos para a atrição, como choque térmico, mudanças químicas, etc.

Em relação aos processos onde ocorre atrição, três mecanismos podem ser descritos:

- o atrito mecânico é devido à agitação da camada fluidizada conduzindo a degradação das partículas e está ligado aos choques entre as partículas e as paredes do leito. Existem duas possíveis zonas no leito fluidizado onde ocorre o processo de atrição mecânica, a primeira situada diretamente acima do distribuidor, onde observa-se choques mecânicos violentos entre as partículas e a segunda está situada na parte superior do leito, onde o efeito do jato é desprezado, a velocidade do gás é uniforme e inferior aquela da primeira zona. A importância relativa a cada uma destas zonas depende da velocidade média de fluidização, da altura do leito, do projeto do distribuidor, da distribuição granulométrica inicial das partículas, do fator de forma e da resistência mecânica;
- atrito térmico : quando as partículas são submetidas a fortes gradientes de temperatura;
- atrito químico: quando ocorre uma reação gás-sólido, as partículas podem apresentar mudanças de estruturas internas, favorecendo assim suas rupturas.

O atrito das partículas pode ser reduzido operando-se o leito em condições apropriadas, como mostrado em diversos trabalhos (BLINICHEV et al (1968), VAUX e KEAIRNS (1980), HISASHI (1981)) , sendo as principais:

- trabalhar com partículas de pequena área superficial, fator de forma próximo de 1 e de resistência mecânica elevada para amortizar o efeito dos choques mecânicos;
- operar com velocidades de fluidização moderadas;
- projetar adequadamente o distribuidor do gás, tal que o efeito do jato seja desprezível diante dos outros parâmetros de atrição. BLINICHEV et al (1968), mostraram que a percentagem de área livre deve ser em torno de 3 a 4% da superfície total do distribuidor para minimizar o efeito do jato e obter uma boa qualidade de fluidização;

- evitar a presença de instrumentação, de modo a minimizar o impacto de partículas, com consequente alteração de sua fluidodinâmica.

2.3 – Secagem

2.3.1- Generalidades

A operação de secagem tem como principal finalidade o produto final, isto é, trata-se de um dos últimos procedimentos antes do empacotamento e expedição do produto, que poderá ser mandado ao consumidor, ou servirá como matéria prima para outros processos.

Pode-se citar alguns casos em que o processo de secagem é essencial:

- reduzir custos de transporte e de embalagens e
- preservar as propriedades definitivas (por exemplo, manter a forma natural do cristal para que não empedre), etc.

Atualmente o processo de secagem também vem sendo apontado como uma alternativa de tratamento ou redução de volume de resíduos ou de seu potencial de periculosidade na área ambiental.

SHERWOOD (1929), KEEY (1972), PERRY e CHILTON (1974), FOUST et al (1980), STRUMILLO e KUDRA (1986), MENON e MUJUMDAR (1987), GEANKOPLIS (1993) descreveram o comportamento geral do processo de secagem com base nos processos simultâneos de transferência de calor e massa e a classificação dos mecanismos pelos quais ocorre a retirada de umidade dos materiais sólidos.

Observa-se que dois fenômenos ocorrem simultaneamente quando um sólido úmido é submetido à secagem (MENON e MUJUMDAR, 1987):

- transferência de energia (calor) do ambiente para evaporar a umidade superficial, sendo esta transferência dependente das condições externas de temperatura, umidade do ar, velocidade e direção do ar, área de exposição do sólido e pressão;

- transferência de massa (umidade), do interior para superfície do material e subsequente evaporação devido ao primeiro processo sendo que o movimento interno da umidade no material sólido é função da natureza física do sólido, temperatura e conteúdo de umidade.

Diferentes critérios devem ser considerados para a escolha do secador para um determinado material, STRUMILLO e KUDRA (1986):

- o modo de funcionamento do equipamento: pode ser contínuo ou batelada. A escolha depende da importância da produção e deve ser economicamente viável;
- a transmissão da fonte de calor, pois a escolha da temperatura de secagem é um ponto importante devendo ser considerado que: (1) uma temperatura elevada aumenta a velocidade de secagem, mas pode causar danos à superfície do material, impedindo a eliminação do conteúdo de umidade; (2) uma temperatura excessivamente baixa aumenta consideravelmente a duração da operação de secagem; (3) determinados materiais são termosensíveis, e, portanto, não podem ser submetidos a temperaturas elevadas;
- o tempo de secagem: um ponto determinante para a eficiência global de secagem;
- a qualidade do produto a ser seco: o tipo de material desejado (textura do produto, material pulverizado, particulado, granulares, fibras, soluções, suspensões, etc);
- a segurança;
- o consumo de energia.

2.3.2 - Determinação do conteúdo de umidade em sólidos

O conteúdo de umidade de um material no processo de secagem e especialmente o conteúdo de umidade final são considerados parâmetros importantes na secagem.

O conteúdo de umidade de um material pode ser definido de duas maneiras, STRUMILLO e KUDRA (1986):

$$\text{Base seca: } X = \frac{m_a}{m_s} \quad (2.8)$$

$$\text{Base úmida: } W = \frac{m_a}{m_u} = \frac{m_a}{m_a + m_s} \quad (2.9)$$

onde: m_a = massa de água no material (kg); m_s = massa de material seco (kg); m_u = massa de material úmido (kg); X = conteúdo de umidade em base seca (kg água/kg material seco); W = conteúdo de umidade em base úmida (kg de água/kg material úmido).

Existem técnicas que podem ser utilizadas para obter o conteúdo de umidade do material, que podem ser divididas em dois grupos: o método direto e o indireto (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

Métodos diretos

Aquecimento do material: uma amostra de sólido com determinada massa é colocada em um recipiente apropriado e é aquecido à determinada temperatura até atingir peso constante. Quando o material for termolábil ou altamente higroscópico o aquecimento deve ser feito a vácuo;

Secagem química: os seguintes materiais são comumente utilizados: óxido de bário, ácido sulfúrico concentrado, pentóxido de fósforo, etc. Neste caso o material é colocado em contato com o adsorvente apropriado por um longo período de tempo para atingir peso constante;

Destilação azeótropica: é um método adequado para determinação de umidade em combustíveis;

Método químico: é baseado na reação de iodo em presença de água. A titulação do método de “Karl Fischer” utiliza reagentes especiais, consistindo de dióxido de enxofre, piridina, iodo e metanol. O ponto final da titulação corresponde ao aparecimento do excesso de iodo pela mudança da coloração, que pode ser detectada visualmente ou por

meio elétrico. A reação entre o reagente de “Karl Fischer” e a água pode ser descrita da seguinte maneira:



Os componentes ácidos são ligados pela piridina. No exato momento em que não houver mais água na solução, o iodo livre age como depolarizador e provoca alterações da corrente ou tensão.

A titulação de “Karl Fischer” para a determinação do conteúdo de umidade pode ser realizada através de uma grande variedade de procedimentos, mas geralmente um equipamento acoplado a uma bureta automática é utilizado. A água é extraída pelo refluxo com metanol e uma alíquota do extrato é titulada com o reagente “Karl Fischer” (dióxido de enxofre, piridina e iodo em metanol), onde os reagentes e o aparelho devem ser mantidos livres da umidade atmosférica e a proporção do agente extrator (metanol) para uma certa quantidade de amostra deve ser grande para garantir a extração completa da água.

O método pode ser empregado para derivados do leite, frutas, vegetais, grãos, compostos orgânicos, entre outros; e para materiais que possuem baixo conteúdo de umidade, abaixo de 1% (KHOPKAR, 1984; SMYTH, 1992), exceto quando se trata de substâncias de redução ou de oxidação forte, ou substâncias que reagem diretamente com o reagente “Karl Fischer”.

Métodos indiretos: Condutividade Elétrica, microondas e adsorção infravermelha.

Na determinação da umidade por microondas estabelece-se um campo elétrico alternado de alta frequência no interior do material a ser aquecido, uma vez estabelecido este campo elétrico, a segunda exigência envolve as características das perdas dielétricas do material. O principal fenômeno responsável pelo aquecimento e conseqüente extração da água é a rotação dipolar, onde o calor é gerado no interior da própria amostra.

2.3.3 - Equações para umidade de equilíbrio

Define-se umidade de equilíbrio como sendo o conteúdo de umidade de um material depois de exposto a um ambiente em condições de temperatura e umidade relativa controladas, após um determinado intervalo de tempo. O material está higroscopicamente em equilíbrio com o ambiente em que se encontra quando a tensão de vapor d'água correspondente à umidade do material for igual a tensão de vapor d'água do ar ambiente. Para cada material, a tensão de vapor tem um valor característico de acordo com o valor da temperatura e o conteúdo de umidade do material.

Vários modelos empíricos e semi-empíricos foram desenvolvidos na tentativa de se obter um melhor ajuste aos dados experimentais. Algumas equações obtidas para grãos e materiais inorgânicos encontram-se na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Equações para umidade de equilíbrio

Equação	Referência
$X_{eq} = a \left[T \ln \left(\frac{1}{UR} \right) \right]^{-b} \quad (2.10)$	HALSEY (1948)
$X_{eq} = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-aT} \right]^{(1/b)} \quad (2.11)$	HENDERSON (1952)
$X_{eq} = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-a(T + c)} \right]^{(1/b)} \quad (2.12)$	THOMPSON (1968)
$X_{eq} = \frac{-1}{cT^d} \ln \left[\frac{\ln(UR)}{-aT^b} \right] \quad (2.13)$	CHEN-CLAYTON (1971)

Continuação Tabela 2.2:

$X_{eq} = \frac{a \left[\frac{1}{T} \ln \left(\frac{1}{1 - UR} \right) \right]}{b - \left[\frac{1}{T} \ln \left(\frac{1}{1 - UR} \right) \right]} \quad (2.14)$	SCHUCHMANN et al. (1990)
$X_{eq} = \frac{a \cdot (UR)}{[1 - b(UR)][1 + (a - b)UR]} \quad (2.15)$	JAAFAR e MICHALOWSKI (1990)
$X_{eq} = \frac{a}{1 + b \cdot T^3 \ln \left(\frac{1}{UR} \right)} \quad (2.16)$	KEEY (1991)

onde: a, b, c e d são os parâmetros relacionados às equações de umidade de equilíbrio, dimensionais ou adimensionais dependendo da equação; X_{eq} a umidade de equilíbrio (kg água/kg sólido seco)x100; UR a umidade relativa do ar (-); T a temperatura absoluta.

PAPADAKIS et al (1993) utilizaram as correlações 2.10, 2.11, 2.14 e 2.16 para representar os dados experimentais de umidade de equilíbrio para a dessorção de resina de troca iônica, sílica gel e trigo e a adsorção de três diferentes tipos de celulose e obtiveram bons resultados.

A correlação proposta por JAAFAR e MICHALOWSKI (1990), Equação 2.15, ajustou-se bem aos dados experimentais obtidos para 29 materiais, na maioria inorgânicos.

2.3.4 - Isotermas de Sorção

A isoterma de sorção é a representação gráfica da umidade relativa de equilíbrio, ou da pressão parcial de vapor de um produto, em função de seu conteúdo de umidade à uma determinada temperatura. As informações resultantes dessas curvas tornam-se úteis nos

processos de concentração e secagem, pois a menor ou maior facilidade para eliminação da umidade está relacionada à atividade de água e com a estabilidade (FENNEMA, 1993).

A ligação entre a umidade e o material sólido está intimamente relacionada ao equilíbrio hidrotérmico do material e à atmosfera ambiente (isoterma de sorção).

As isotermas permitem conhecer os conteúdos mínimos de umidade a uma dada condição de secagem ou na armazenagem de um determinado material.

Para a determinação das isotermas existem na literatura vários métodos analíticos. No trabalho de TEIXEIRA (1987) divide-se os métodos, segundo o princípio de medição, em duas categorias: a) métodos onde se mede a pressão parcial de vapor, ou umidade relativa de equilíbrio, de amostras do produto com conteúdo de umidade previamente conhecido, e; b) métodos onde se mede o conteúdo de umidade do produto em situação de equilíbrio a diferentes umidades relativas. Enquadram-se na primeira categoria de métodos, aqueles em que a pressão parcial de vapor do produto é medida manometricamente, ou aqueles em que a umidade relativa de equilíbrio é medida diretamente por sensores (higrômetro elétrico, célula de ponto de orvalho, psicrômetro, etc). Na segunda categoria de métodos estão aqueles em que se efetua a determinação do conteúdo de umidade das amostras após o equilíbrio, e, geralmente, gravimetricamente. Nestes casos, os ambientes com diferentes umidades relativas para equilíbrio das amostras são preparados em dessecadores ou frascos herméticos. A umidade relativa do ambiente pode ser dada por diferentes tipos de soluções salinas, ácido sulfúrico em várias concentrações, ou por outras substâncias, como glicerol. Dá-se preferência às soluções saturadas de sais, uma vez que permitem a manutenção da umidade relativa constante com maior facilidade, pois mesmo que absorvam ou percam umidade, a umidade relativa do ambiente não se altera, desde que as soluções ainda estejam saturadas.

O método dos dessecadores consiste em se colocar pequenas quantidades de amostras do produto num recipiente (dessecador ou similar), no interior do qual, a umidade do ar e a temperatura se mantêm constantes. Quando se estabelecer o equilíbrio, após certo intervalo de tempo, entre o conteúdo de umidade da amostra e o ambiente do recinto onde se encontra, a massa da amostra deixa de variar. Determina-se então o conteúdo de umidade da amostra e se obtém, dessa forma, um ponto da isoterma de sorção (PENA, 1994).

À temperatura ambiente e para umidades do ar elevadas (acima de 85%), os tempos para se atingir o equilíbrio são altos, podendo chegar a várias semanas. Nestas condições, para produtos biológicos, ocorrem modificações de estrutura e aparecimento de mofo, antes de alcançar o estado de equilíbrio. Visando diminuir a duração do ensaio, tem-se proposto métodos dinâmicos de fluxo contínuo. O método dinâmico consiste essencialmente em forçar o ar, com umidade relativa e temperatura controladas, a passar pela amostra até que não ocorra variação de massa da mesma. Dessa forma, se atinge o estado de equilíbrio higroscópico num período de tempo inferior àquele necessário quando se utiliza o método estático, nas mesmas condições de temperatura e umidade relativa (KNEULE, 1976; STRUMILLO e KUDRA, 1986).

O conteúdo de umidade de equilíbrio de um material higroscópico, para determinada condição de temperatura e umidade relativa, depende do caminho utilizado para atingir a condição de equilíbrio. Assim, para uma mesma umidade relativa, pode haver duas isotermas, denominadas isotermas de adsorção e dessorção, obtidas em função das condições experimentais iniciais. Isso porque o material pode estar com conteúdo de umidade maior ou menor que a umidade de equilíbrio para as condições do ambiente. CHUNG e PFOST (1967) explicam o fenômeno com base na contração de volume que ocorre durante a dessorção de umidade no processo de secagem. Isto é, a redução de volume do produto acarreta diminuição de pontos de ligação disponíveis para ligações d'água com as moléculas das substâncias, o que resulta na histerese.

2.3.5 - Curvas de secagem

São denominadas curvas de secagem a representação gráfica da variação da umidade do material em função do tempo para um processo de secagem.

A Figura 2.3 apresenta as curvas: evolução do conteúdo de umidade no produto (X), de sua temperatura (T_s) e da velocidade de secagem (dN_s/dt), também chamada de cinética de secagem, ao longo do tempo.

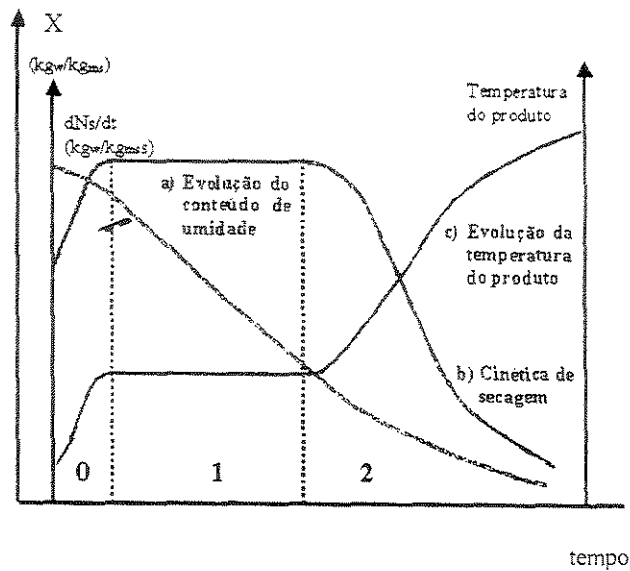


Figura 2.3 – Exemplo de curva de secagem

A curva (a) representa a diminuição do conteúdo de umidade do produto durante a secagem (umidade do produto, X , em base seca, em relação ao tempo de secagem, t).

A curva (b) representa a cinética de secagem do produto, dN_s/dt , obtida diferenciando a curva (a) e a curva (c) representa a temperatura do material durante a secagem.

A evolução das transferências simultâneas de calor e massa no decorrer da operação de secagem faz com que a curva seja dividida esquematicamente em três períodos. DAUDIN (1983), descreve os três períodos como período 0, período 1 e período 2.

Período 0: período de indução ou de entrada em regime operacional.

No início da secagem, a temperatura do sistema ar-produto é baixa e a pressão parcial de vapor da água na superfície do produto é desprezível, e por consequência, a transferência de massa e a taxa de secagem também são. Com a elevação da temperatura do produto ocorre um aumento da pressão e da taxa de secagem. Este fenômeno ocorre até que a transferência de calor compense a transferência de massa. Se a temperatura do ar for inferior àquela do produto, esta última diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio. A duração deste período é insignificante em relação ao período total de secagem.

Período 1: Período de secagem à taxa constante.

Durante o período à taxa constante, toda a superfície exposta do sólido está saturada de água. A secagem ocorre como se fosse a evaporação de uma massa de líquido sem influência direta do sólido na taxa de secagem. A temperatura atinge, conforme se pode esperar, a temperatura de bulbo úmido do ar. A velocidade de secagem é por consequência, constante.

Durante este período, como no anterior, a quantidade de água dentro do material é grande. A água evapora-se como água livre. A pressão de vapor da água na superfície é constante e igual à pressão de vapor da água pura à temperatura do material, que por sua vez, é também constante e igual à temperatura de bulbo úmido do ar, característica do fato de que as transferências de calor e massa se compensam exatamente.

Este período continua, enquanto a migração de água do interior até a superfície do material for suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície.

Período 2: Período de taxa de secagem decrescente.

Desde o momento em que a água que migra do interior do sólido para a superfície começa a ser deficiente na superfície, a taxa de secagem diminui.

O período é regido pelo mecanismo de migração interna da água, a característica da estrutura interna do material é um fator essencial para o estudo do mecanismo, como a higroscopicidade do material.

Os diferentes mecanismos que governam o movimento da água são: o movimento de água líquida sob efeito das forças da gravidade; a migração capilar da água líquida sob a ação da tensão superficial; a difusão de água líquida sob o efeito de um gradiente de umidade segundo a lei de Fick; a difusão de água líquida adsorvida sobre as superfícies internas dos poros vazios; a difusão de vapor sob um efeito de um gradiente de pressão parcial de vapor de água; o escoamento de água sob o efeito de uma diferença de pressão total entre o interior e exterior do produto, e a migração de água líquida ou vapor sob o efeito de um gradiente de temperatura (PARK, 1998).

Durante este período, a troca de calor não é mais compensada; conseqüentemente, a temperatura do material aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Por todo

este período o fator limitante é a migração interna de água. Esta redução na taxa de secagem é, às vezes, interpretada como uma diminuição da superfície molhada no período 2, mas a interpretação mais freqüente é pelo abaixamento da pressão parcial de vapor de água na superfície. No final deste período o material estará em equilíbrio com o ar e a velocidade de secagem é nula.

Os métodos de cálculo da cinética de secagem são aplicados de modo diferente dependendo do período de secagem considerado. No período de taxa de secagem constante são as transferências de calor e de massa na interface ar-produto que governam a secagem e fixam a velocidade, enquanto, que no segundo período, são as transferências internas que são limitantes (DAUDIN, 1983).

2.4 –Leito Vibrofluidizado

2.4.1 – Características

O leito vibrofluidizado é uma modificação do leito fluidizado e tem sido estudado por vários autores como por exemplo, GUPTA e MUJUMDAR (1980) e por STRUMILLO e PAKOWSKI (1980).

Alguns produtos granulares que apresentam dificuldades no processo de fluidização, são (DANIELSON e HOVMAND, 1980):

- materiais que apresentam ampla distribuição de tamanho das partículas;
- materiais aglomerados;
- materiais termoplásticos e
- materiais pastosos.

Existem inúmeras vantagens em se trabalhar com leito vibrofluidizado: a vibração mecânica ajuda a fluidização, a quantidade de ar requerida é reduzida, exigindo assim vazões menores e, com isto, gerando maior eficiência de secagem; o produto não fica

sujeito aos fortes atritos e choques provocados pela “ebulição” do leito fluidizado convencional; haverá fluidização homogênea, mesmo para materiais aglomerantes, com um melhor controle do tempo de residência, sem ocorrer a degradação térmica em zonas estagnadas, ou seja, as vibrações servem para manter o aglomerado em estado móvel, bem como para quebrar os agregados, resultando em uma melhor fluidização e secagem.

A aplicação e o uso dos equipamentos com vibração vem sendo limitada devido à necessidade de tecnologia apropriada e do uso de vibradores versáteis para cada equipamento. Também existem poucos dados que consideram o efeito da vibração em vários processos relacionados com as propriedades das partículas.

Os benefícios econômicos da aplicação da energia vibracional têm sido raramente estudado (VINOGRADOV e MAKARIYEV, 1983). A relação custo/benefício que determina o valor ótimo da intensidade vibracional deve ser encontrada para cada caso individual.

Vários trabalhos trazem estudos teóricos e experimentais baseando-se em processos térmicos, aerodinâmicos e mecânicos em leitos vibrofluidizados (CHLENOV e MIKHAILOV, 1972) e as várias aplicações são discutidas em diversos livros (KARMAZIN, 1977; DORNEI, 1982; ERDESZ, 1984; MUJUMDAR, 1984).

O principal obstáculo no uso efetivo da transferência do impulso vibracional é o alto grau de dissipação de energia que ocorre devido aos resultados das forças de impacto e atrito agindo sobre as partículas. Este e outros fenômenos (carga eletrostática) causam uma considerável diminuição na energia cinética transferida para as partículas. Uma atenção especial deve ser dada ao estudo dos materiais e à natureza mecânica dos sistemas com o efeito da vibração; os parâmetros vibracionais, aerodinâmicos e mecânicos. Os regimes de operação devem ser escolhidos para serem consistentes com as propriedades de cada material processado.

Muitos trabalhos enfocam as flutuações de pressão (RYZHKOV, 1976), a distribuição da porosidade (MARKOVSKI e SYROMYATNIKOV, 1972) e a estabilidade (MOLERUS, 1967) em leitos vibrofluidizados. Os resultados desses estudos mostram que as propriedades físicas do material particulado exercem um papel importante na dissipação de energia cinética (distribuição do tamanho de partículas, características de atrito e

elasticidade, etc). Todo tipo de vibração externa (mecânica, acústica, pulsante) que age sobre as partículas fracamente ligadas, durante o deslocamento, geralmente perde energia cinética pelo atrito e impacto das partículas umas com as outras.

Diversas aplicações industriais têm feito uso da técnica de vibração. A Figura 2.4 demonstra essa afirmação.

A aplicação comercial do leito vibrofluidizado vem crescendo nas últimas décadas por proporcionar uma economia relevante no consumo de energia na fluidização e por fluidizar materiais que apresentam dificuldades para o regime.

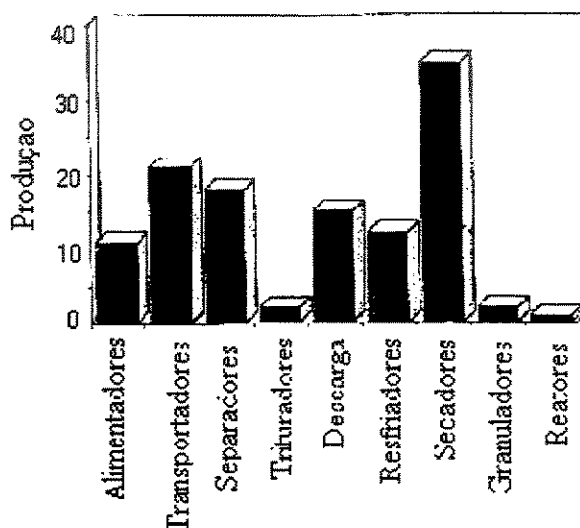


Figura 2.4 - Áreas de aplicação industrial de equipamentos vibrados

(MUJUMDAR e ERDESZ, 1988)

Entre as operações térmicas, a secagem e resfriamento são as mais frequentemente utilizadas em operações das indústrias química e alimentícia, e, pela Figura 2.4, verifica-se uma vasta aplicação da vibração em secadores.

A Tabela 2.3 lista uma variedade de produtos que são secos em leito vibrofluidizado, em aplicações industriais.

Tabela 2.3 – Aplicações industriais para secadores em leitos vibrofluidizados

(REAY e BAKER (1985)):

Químicas	Cloreto de Potássio, Sal comum, Sulfato de Sódio, Uréia, Detergentes em pó e granulado, Produtos Farmacêuticos, Ácido Cítrico
Alimentícias	Milho, Amendoim, Açúcar, Nozes, Soja, Produtos Lácticos, Café Solúvel
Minerais	Areia, Carvão, Quartzo, Argila
Plásticas	Acetato de Polivinil, Prolipropileno, Nylon Cloreto de Polivinil

Quando há a vibração em um leito de partículas, podem ocorrer diversos tipos de regime, sendo que para esses regimes são definidos parâmetros concernentes à vibração. Os mais importantes são:

a = amplitude de vibração;

$\omega = 2\pi f$, frequência angular de vibração;

f = frequência de vibração;

$a\omega^2$ = aceleração vibracional;

F'_v = força atuante sobre a partícula devido à vibração;

F_a = força atuante sobre a partícula devido ao atrito com o gás;

u_{mf} = velocidade mínima de fluidização e

u_g = velocidade do gás de operação na entrada do leito.

GUPTA e MUJUMDAR (1980), definiram três regimes em um leito vibrofluidizado, dependente da força de fluidização do gás (F_a), relacionada com a força de vibração (F'_v):

- A. Regime de leito vibrado: $F_a > F'_v$;
- B. Regime de leito vibrofluidizado: $F_a \cong F'_v$;
- C. Regime de leito vibrado por fluidização: $F_a < F'_v$.

Para o regime A, as partículas se comportam como em um leito fluidizado convencional, sendo que a vibração contribui para melhorar a estabilidade e homogeneidade do leito. Quanto ao regime B, tanto a vibração como o escoamento do gás, contribuem para a fluidização, e, finalmente, no regime C, as forças de vibração deslocam as partículas para o alto, num movimento que propicia as transferências de calor e massa.

Uma outra classificação é dada por STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980, a qual é baseada no adimensional G , intensidade vibracional, que relaciona a aceleração vibracional e a da gravidade, onde:

A . Regime de leito vibrado: o leito sofre a vibração, sem escoamento do ar, para $G > 1$;

B . Regime de leito vibrofluidizado: um leito aerado no qual o ar escoar com velocidade inferior à velocidade mínima de fluidização, ou seja, $u_g < u_{mf}$, e a vibração produz $G < 1$;

C . Regime de leito fluidizado vibrado: é formado em condições tais que $u_g > u_{mf}$.

Os conceitos fundamentais inerentes aos leitos vibrofluidizados, como a mecânica e fluidodinâmica do leito submetido à vibração (velocidade incipiente de vibro-fluidização, queda de pressão, porosidade, etc), bem como a mistura e as propriedades do leito, a transferência de calor e massa e a secagem em leito vibrofluidizado (por condução, convecção e radiação), foram revistas de forma abrangente por GUPTA e MUJUMDAR (1980), STRUMILLO e PAKOWSKI (1980), MUJUMDAR (1981), PAKOWSKI et al (1984) e STRUMILLO e KUDRA (1986).

A vibração intensifica as transferências de calor, massa e momento em vários processos principalmente nas indústrias química e alimentícia. Geralmente a intensificação é baseada segundo STRUMILLO e KUDRA (1986) em:

- um aumento nos coeficientes de transferência devido ao aumento da turbulência na camada limite e
- um aumento da área interfacial como resultado da reação de vibração na estrutura do leito, sendo que essa influência tem uma característica positiva, exceto para alguns tipos de partículas.

As vibrações classificam-se, segundo THOMSON (1972) em livre e forçada. A vibração livre ocorre quando o sistema oscila sob a ação de forças que lhe são inerentes, ou seja, na ausência de qualquer força externa. Por exemplo, quando um corpo é deslocado da sua posição de equilíbrio e em seguida é solto, ocorrem as oscilações, podendo esse sistema vibrar com uma ou mais de suas frequências naturais. A vibração é forçada quando ocorre sob excitação de forças externas; então o sistema é forçado a vibrar na frequência de excitação. Caso essa frequência de excitação coincidir com uma das frequências naturais do sistema, diz-se o sistema está em condição de ressonância. Nessa condição, o sistema vibra com uma amplitude máxima, pois há a absorção máxima de energia do sistema excitador. Por exemplo, a ressonância pode ser a causa de rupturas em estruturas como as de edifícios, pontes e asas de avião. Entretanto, os sistemas de vibração estão sujeitos a um grau de amortecimento, devido à dissipação de energia pelo atrito e outras resistências, sendo que o amortecimento modifica as frequências naturais do sistema. Quanto maior for o amortecimento do sistema, menor será a amplitude de vibração na frequência de ressonância.

Em leitos Vibrofluidizados a movimentação das partículas é realizada por dispositivos que geram ação vibracional. Os tipos de vibradores comumente encontrados são (FINZER e KIECKBUSCH, 1992):

- a) Vibrador Mecânico de Inércia - produz uma força de excitação mediante a rotação de massas desequilibradas. A Figura 2.5 apresenta um sistema constituído por um disco perfurado. Nos orifícios do disco (2), solidário a um eixo (1), são inseridas uma ou mais barras (3).

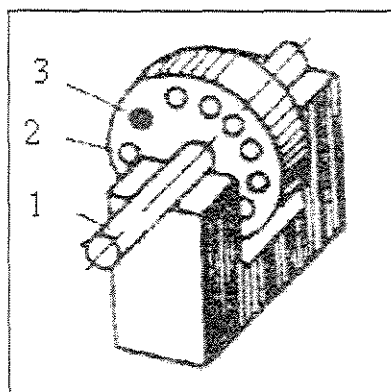


Figura 2.5 – Vibrador mecânico de inércia

- b) Vibrador Excêntrico - é utilizado quando necessita-se de forças de excitação elevadas e de baixa frequência. A Figura 2.6 mostra o sistema constituído por dois eixos (1), acoplados às excêntricas (2). O vibrador é suportado por quatro molas helicoidais na base. O vibrador excêntrico requer que o ângulo de vibração seja fixado antes de ser instalado, pois somente a frequência e amplitude podem ser alteradas.

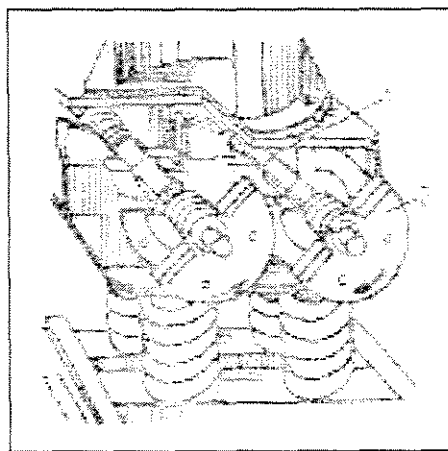


Figura 2.6 – Vibrador Excêntrico

- c) Vibrador Pneumático ou Hidráulico - são usados para proporcionar alta frequência de vibração. Na Figura 2.7, o ar da linha entra pelo canal (1) e movimenta o pistão para direita. Quando o pistão ficar totalmente postado à direita, o ar da linha é admitido pelo canal (2) e então o movimento do pistão segue para esquerda. Nos vibradores hidráulicos o movimento de um pistão é promovido pelo escoamento de um líquido.

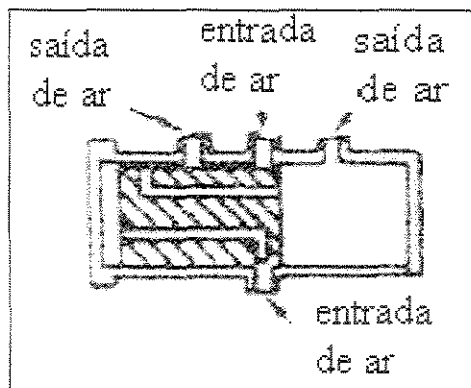


Figura 2.7 - Vibrador Pneumático

- d) Vibrador Eletromagnético - é usado para sistemas que trabalham com alta frequência de vibração. A Figura 2.8 mostra o esquema deste vibrador formado pelo indutor (1), pelo induzido (2) e pelo sistema elástico (3). O indutor é alimentado pela rede elétrica. Ao aumentar o fluxo magnético o induzido é atraído pelo indutor. Quando o fluxo diminui, o induzido retrocede pela ação do sistema elástico.

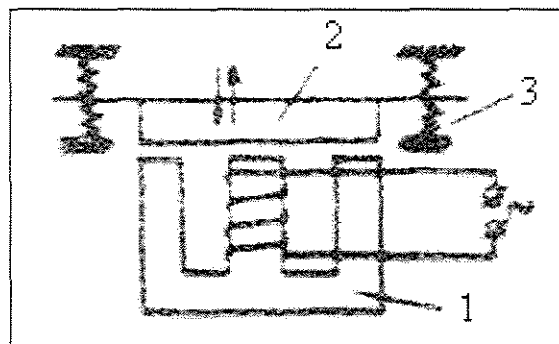


Figura 2.8 - Vibrador Eletromagnético

2.4.2 – Fluidodinâmica em Leito Vibrofluidizado

O comportamento fluidodinâmico de leitos vibrados em condição de fluidização é afetado principalmente pelas propriedades físicas das partículas (tamanho, forma, características coesivas e adesivas, etc) e pela intensidade vibracional (G). Como resultado de vários estudos experimentais em leitos vibrofluidizados, verificou-se:

- a queda de pressão e velocidade de mínima fluidização são menores em leitos vibrofluidizados em comparação com o convencional, e a redução tipicamente aumenta com a intensidade vibracional e
- a baixa intensidade de vibração ($G < 1$) geralmente diminui a porosidade do leito.

JINESCU (1971) verificou que geralmente o efeito da vibração provoca uma melhora na homogeneidade do leito, sendo provavelmente possível, devido à vibração, impedir a coalescência das bolhas formadas. O contrário foi observado no trabalho de MORSE (1955), que discute que a melhora na homogeneidade do leito ocorre somente para leito com partículas finas. MUSHTAEV (1973) observou uma degeneração na estrutura do leito a uma intensidade vibracional de $a\omega^2 / g \geq 4$.

Uma considerável melhora da fluidização das partículas foi observada como uma consequência do efeito de vibração (YOSHIDA, 1969). A vibração domina as forças de atração interpartículas e portanto aumenta a qualidade da fluidização para partículas finas (1-5 μm) que tendem a aglomerar e para materiais úmidos que tem a tendência de grudar uns com os outros.

A Equação 2.17 apresenta o balanço de forças da partícula em relação ao sistema de coordenadas estacionárias em leitos vibrados na direção vertical (PAKOWSKI et al (1984) e STRUMILLO e KUDRA (1986)).

$$m_b \cdot (a_1 + a_w) - m_b \cdot g + N + \Sigma R = 0 \quad (2.17)$$

onde m_b = massa de partículas no leito, a_l e a_w = componentes verticais da aceleração, do leito relativo ao prato do mesmo e do prato relativo a um sistema de coordenadas estacionárias, N = força normal vertical ao fundo do leito e ΣR = somatório de todas as forças de resistências (por exemplo: atrito, arraste, etc).

Quando o leito se desloca no sentido ascendente, existe um exato instante (t_s) em que o mesmo perde o contato com o suporte (placa distribuidora), sem ter ainda modificado a sua posição (Figura 2.9). Nessa situação tem-se $N = 0$ e $a_l = 0$. Após esse instante, ocorre o afastamento do leito em relação ao suporte e as partículas se projetam como um corpo único separando-se da placa. No instante t_c as partículas tornam a atingir o suporte do vaso (PAKOWSKI et al, 1984).

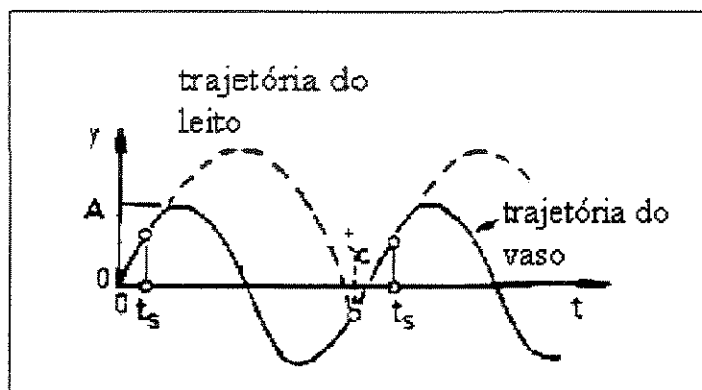


Figura 2.9 – Trajetória do leito de partículas e do vaso durante o período de vibração, PAKOWSKI et al, 1984

Quando o leito é lançado para cima e se separa do suporte, surge uma pequena região livre de partículas, situada entre a base do leito e o suporte do vaso. Esse espaço vazio cresce em uma parte do ciclo, atinge um valor máximo, e decresce novamente, até ocorrer a colisão do leito com o vaso, GUTMAN (1976). No momento da expansão do leito cria-se um vácuo e a pressão é inferior a das regiões adjacentes. Como consequência o ar escoar através do leito, em direção ao vazio, revertendo-se o sentido do escoamento.

Quando o leito se desloca de volta para o suporte do vaso, a pressão no espaço vazio aumenta, e o gás é novamente forçado a um deslocamento para cima através do leito. Essa reversão do escoamento do ar no leito, várias vezes por segundo, tem uma influência considerável sobre a circulação de sólidos no leito.

Observações experimentais em leitos submetidos à vibração, evidenciam o tipo de escoamento circulatório. Esse tipo de movimento é induzido por esforços de cisalhamento nas paredes do vaso e esta circulação é mais intensa onde apenas o suporte do vaso vibra, STRUMILLO e PAKOWSKI (1980); FINZER e KIECKBUSCH (1986).

A circulação das partículas tem grande efeito, não apenas na cinética de secagem, mas sobretudo na uniformidade desse processo em todo o leito.

ERDÉSZ (1990) estudou a fluidodinâmica em leitos vibrofluidizados variando a intensidade da vibração e levando em conta o efeito da ressonância. Do ponto de vista industrial, o uso de leitos vibrofluidizados (LVF) em regimes de ressonância são de grande importância, desde que exista uma boa mistura de partículas e os processos de transferência de calor e massa sejam mais intensos comparados com o leito fluidizado convencional (LFC), em determinadas condições operacionais.

A ressonância ocorre quando a altura do leito atinge o valor máximo e ao mesmo tempo a queda de pressão sobre o leito é mínima, como pode ser observado na Figura 2.10.

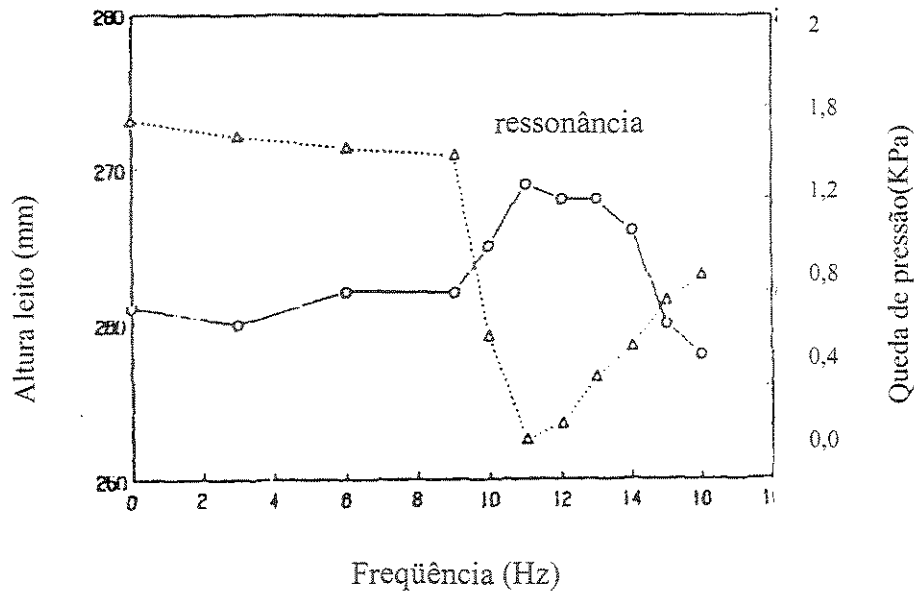


Figura 2.10 – Altura do leito e queda de pressão em função da frequência de vibração, onde os símbolos (Δ) e (o) indicam a queda de pressão e a altura leito, respectivamente

Baseado em considerações puramente teóricas, BRATU e JINESCU (1972) propuseram a seguinte equação para prever u_{mfv} em leitos vibrados, assumindo que para um ciclo de vibração, na velocidade de mínima fluidização o tempo transcorrido para o leito deslocar-se no sentido ascendente é igual ao tempo gasto para atingir a placa distribuidora de ar:

$$u_{mfv} = u_{mf} \left[1 - \frac{1 + \varepsilon}{2\pi j} \frac{a\omega^2}{g} \right] \quad (2.18)$$

$0 < \varepsilon < 1$ e valores experimentais de j ajustaram o modelo como $j = 1$ no intervalo de

$$4 \leq \frac{a\omega^2}{g} \leq 5 \text{ e } j=2 \text{ para valores maiores de } a\omega^2/g.$$

onde ε (coeficiente de colisão) e j (razão entre os tempos ascendente e descendente) são constantes experimentais.

MUSHTAEV et al (1973) realizaram experimentos com partículas de PVC com diâmetro de 2000 μm e chegaram à seguinte correlação:

$$u_{mfv} = 6,9 \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right)^{0,63} \left(\frac{1}{\nu_g} \right)^{0,33} (d_p)^{0,88} \left[1 - 0,09 \frac{a\omega^2}{g} \right] \quad (2.19)$$

onde o primeiro termo provavelmente corresponde a u_{mf} , reduzindo então para a forma proposta por BRATU e JINESCU (1972):

$$u_{mfv} = u_{mf} \left[1 - 0,09 \frac{a\omega^2}{g} \right] \quad (2.20)$$

Pode-se notar a similaridade entre as Equações 2.18 e 2.20, portanto, o coeficiente 0,09 corresponderia a $(1+\varepsilon)/2\Pi j$. É interessante notar que enquanto BRATU e JINESCU (1972) encontraram a influência da vibração somente em u_{mf} para $\frac{a\omega^2}{g} > 1$, MUSHTAEV et

al (1973) observaram o efeito para valores menores de $\frac{a\omega^2}{g}$, onde nessas equações:

u_{mf} é a velocidade de mínima fluidização; u_{mfv} é a velocidade de mínima fluidização com vibração; ν_g : é a viscosidade cinemática do gás (m^2/s); d_p é o diâmetro equivalente da partícula (cm); $a\omega^2$ é a aceleração vibracional; ρ_p e ρ_g as densidades do sólido e do gás.

Devido à energia vibracional adicionada ao sistema, a velocidade do gás é função da intensidade de vibração e pode ser determinada experimentalmente. Para $G > 1$, a seguinte equação foi obtida por regressão para estimar a velocidade do gás em leitos vibrados (ERDÉSZ et al, 1986):

$$u_{mfv} = u_{mf} \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{mf}}{\Delta P_{mfv}} \right)^3} \quad (2.21)$$

onde ΔP_{mf} é a queda de pressão mínima fluidização e ΔP_{mfv} é a queda de pressão mínima fluidização com vibração.

Os autores trabalharam com a velocidade do gás 10% maior que a velocidade correspondente a fluidização incipiente:

$$u_g = 1,1u_{mfv} \quad (2.22)$$

Nenhuma das equações citadas para estimativa da velocidade na condição de mínima fluidização com vibração leva em consideração as forças de atração existentes entre as partículas, pois quando presentes, podem afetar o comportamento fluidodinâmico do leito e conseqüentemente a velocidade de mínima fluidização com vibração.

Para leito fluidizado convencional, a transição de leito fixo para fluidizado, geralmente é obtida pela interseção da curva de queda de pressão pela velocidade do gás, dando uma boa estimativa de u_{mf} . No entanto, em leitos vibrados a transição ocorre em um intervalo amplo de velocidades do gás e portanto a definição não é apropriada. A fluidodinâmica em leito vibrado não é bem definida pela u_{mf} .

GUPTA e MUJUMDAR (1980) estudaram a fluidodinâmica em leito fluidizado vibrado verticalmente. Foi utilizada uma placa distribuidora com furos de 1,6mm e com espaçamento triangular de 3,2mm. Um motor SCR foi usado para obter uma frequência de vibração adequada. As seguintes variáveis foram analisadas nos respectivos intervalos: frequência (0-105Hz), amplitude ($0,5 \times 10^{-3}$ m), altura do leito ($12,5-100 \times 10^{-3}$ m), diâmetro das partículas (900-3900 μ m), densidade das partículas (570-890 kgm/m³), esfericidade (0,55-1,0) e a presença de umidade na superfície da partícula. O objetivo do trabalho foi o estudo detalhado do comportamento fluidodinâmico em termos da queda de pressão no leito, ΔP_{mf} ; velocidade mínima de fluidização, u_{mf} , e velocidade mínima de mistura u_{mm} .

Os autores definiram u_{mm} , velocidade mínima de mistura de sólidos, como a velocidade mínima de operação do gás para que a mistura de sólidos seja observada visualmente. É a velocidade requerida para ocorrer uma boa mistura de partículas e diminui significativamente com o aumento da intensidade vibracional, G. A Figura 2.11 representa

uma indicação de como essa velocidade diminui quando se aplica a vibração ao sistema baseado em observações visuais. A linha traçada na Figura indica o ajuste dos dados obtidos experimentalmente.

O efeito dos parâmetros de vibração no sistema na queda de pressão no leito foi analisada pela velocidade mínima de mistura (u_{mm}) e pelo comportamento fluidodinâmico do leito de partículas, a partir de bases quantitativas bem como observações visuais. Correlações empíricas foram propostas para o cálculo da queda de pressão e de u_{mm} , onde foi observado que ambas decrescem significativamente com o aumento da intensidade vibracional.

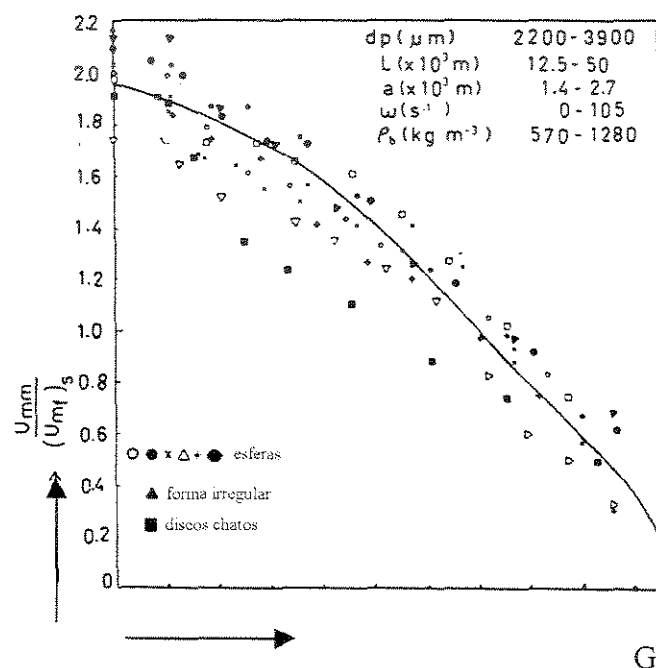


Figura 2.11 – Velocidade mínima de mistura de sólidos para o leito vibrofluidizado – efeito da intensidade vibracional (GUPTA e MUJUMDAR (1980))

A seguinte equação empírica foi obtida, baseada nos dados experimentais para partículas esféricas e não esféricas (GUPTA e MUJUMDAR, 1980):

$$\frac{u_{mm}}{u_{mf}} = 1,952 - 0,275 \left(\frac{a\omega^2}{g} \right) - 0,686 \left(\frac{a\omega^2}{g} \right)^2 \quad (2.23)$$

Observa-se, claramente, que u_{mm} diminui com o aumento da aceleração vibracional. A estimativa do desvio da equação é 0,140 e u_{mf} foi obtida pela correlação de WEN e YU (1966) e as constantes são alteradas, caso seja usada uma correlação diferente para o cálculo de u_{mf} .

A técnica tradicionalmente usada para analisar a fluidodinâmica da interação gás-sólido faz uso da curva de fluidização, ou seja, da relação entre a queda de pressão do gás que escoar através de um leito e a velocidade do gás. Os experimentos realizados nas últimas duas décadas indicaram que a forma da curva de fluidização é dependente dos parâmetros de vibração.

A Figura 2.12 b, c e d representa as curvas típicas de fluidização para leitos vibrados comparado ao leito fluidizado convencional, sem vibração – Figura 2.12 a. A forma da curva de fluidização é dependente da relação entre as forças vibracionais e aerodinâmicas (F'_v/F_a) atuando no leito. Três diferentes formas de curvas de queda de pressão-velocidade podem ser obtidas (GUPTA e MUJUMDAR (1980)):

- A curva "b" assemelha-se à do leito de partículas sem vibração, geralmente obtidas para leitos fundos ($>50 \times 10^{-3} \text{m}$), com baixa amplitude ($< 2,5 \times 10^{-3} \text{m}$) e alta frequência de vibração, onde o pico de pressão não é observado. Essa condição tende a desfavorecer a transmissão da vibração;
- A curva "c" é obtida com condições moderadas de amplitude e frequência e altura de leito intermediária ($25\text{-}50 \times 10^{-3} \text{m}$). Caracterizada pela transição de leito

fixo para fluidizado, ocorre a um amplo intervalo de velocidade do gás, e pode ser quebrada em três distintos segmentos de linha. Este tipo de curva foi obtido no trabalho de STRUMILLO e PAKOWSKI (1980);

- A curva "d" ocorre quando realmente a vibração domina a dinâmica do leito, tem-se $a\omega^2/g < 1$, ocorrendo então a compactação do leito. O efeito da compactação é responsável pela perda de pressão mais intensa no mesmo. Foi obtida no trabalho de BRATU e JINESCU (1971). O estudo deste comportamento foi observado somente para leitos rasos ($< 12,5 \times 10^{-3} \text{ m}$) sob altas condições de amplitude de vibração ($> 4 \times 10^{-3} \text{ m}$).

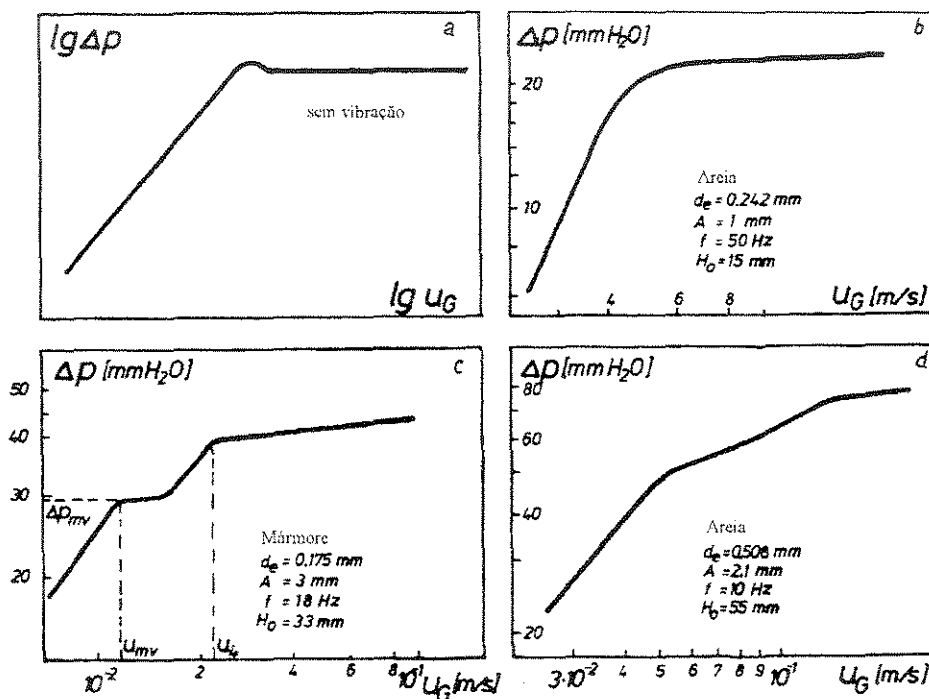


Figura 2.12 - Curvas típicas de fluidização para leito fluidizado convencional a) e vibrado b), c), e d), GUPTA e MUJUMDAR (1980)

O comportamento descrito nas curvas apresentadas na Figura 2.12 é amplamente dependente da razão das forças de vibração e fluidodinâmicas que agem sobre o leito de partículas.

A Figura 2.13 mostra o comportamento fluidodinâmico obtido por GUPTA e MUJUMDAR (1980), para leitos vibrados, quando a frequência de vibração é alterada, mantendo todos os outros parâmetros constantes. Observa-se a redução da perda de carga com o aumento da frequência vibracional.

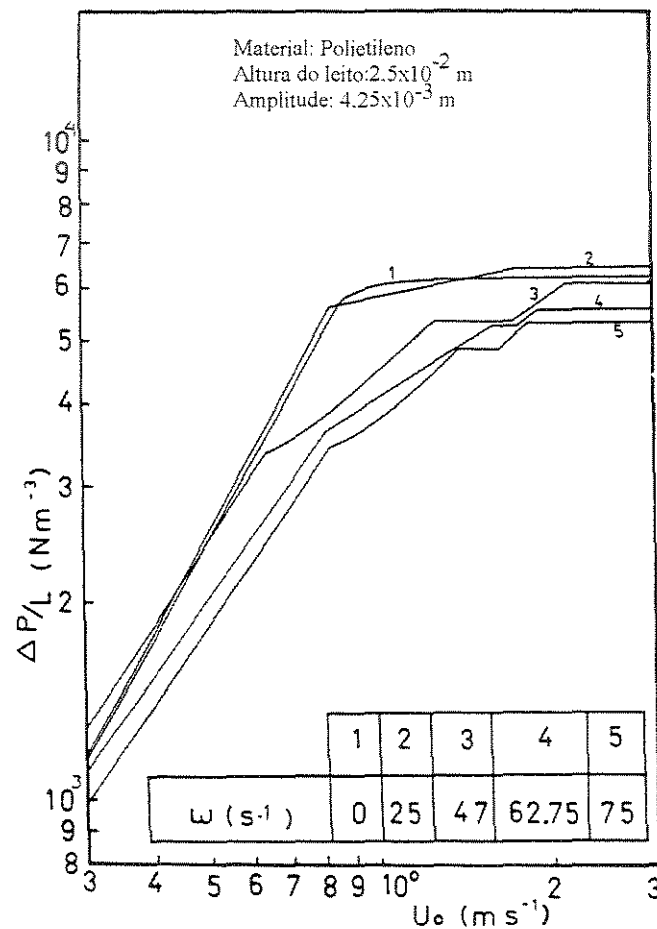


Figura 2.13 - Efeito da frequência de vibração na curva de $\Delta P-u$

GUPTA e MUJUMDAR (1980)

No leito vibrofluidizado, a queda de pressão no leito é 20-30% menor comparado com o leito fluidizado convencional e é um parâmetro dependente da intensidade de vibração.

Ocorre uma redução na queda de pressão do distribuidor na vibrofluidização comparada com a fluidização convencional que é provavelmente devido ao curto tempo de contato do leito de partículas com a placa. Portanto, as partículas são mergulhadas nos orifícios do distribuidor sob um curto período de tempo.

Diferentes correlações tem sido propostas para a queda de pressão de mínima fluidização com vibração. Uma equação típica, válida para $\frac{a\omega^2}{g} > 1$ foi obtida por MUSHTAEV et al (1973):

$$\frac{\Delta P_{mfv}}{\Delta P_{mf}} = \left(\frac{a\omega^2}{g} \right)^{-m} \quad (2.24)$$

onde: $m = 0,41 + 19,6.d_p \cdot \rho_p$

A equação proposta por GUPTA e MUJUMDAR (1980):

$$\frac{\Delta P_{mfv}}{\Delta P_{mf}} = 1 - 0,0935 \left(\frac{d_p}{H} \right)^{0,946} \left(\frac{a\omega^2}{g} \right)^{0,606} (\phi_v)^{1,637} \quad (2.25)$$

onde ϕ_v é o fator de forma da partícula, d_p é o diâmetro das partículas e H a altura inicial das partículas no leito.

Nas condições trabalhadas o erro padrão estimado é 0,154, indicando um bom ajuste dos dados experimentais.

Nas Figuras 2.14 e 2.15 o fator de vibração, $F_v = \frac{(\Delta P_{mf})_v}{(\Delta P_{mf})_s}$, foi acompanhado em função da frequência angular de vibração imposta ao sistema.

Pela Figura 2.14 observa-se o efeito de atenuação da vibração com o aumento da altura do leito e para uma altura de leito excedendo 50mm o efeito da vibração em ΔP_{mf} desaparece, entretanto essa altura não é mostrada na Figura.

A Figura 2.15 mostra que para uma altura de leito fixa de $1,25 \times 10^{-3}$ m, as partículas maiores foram mais afetadas pelo efeito da vibração comparadas com as de menor tamanho.

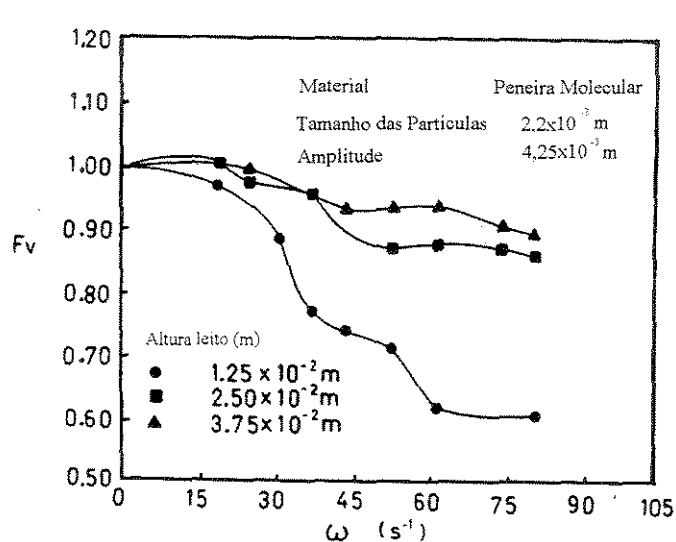


Figura 2.14 – Fator de vibração em função da frequência angular de vibração

($F_v \times \omega$), GUPTA e MUJUMDAR (1980)

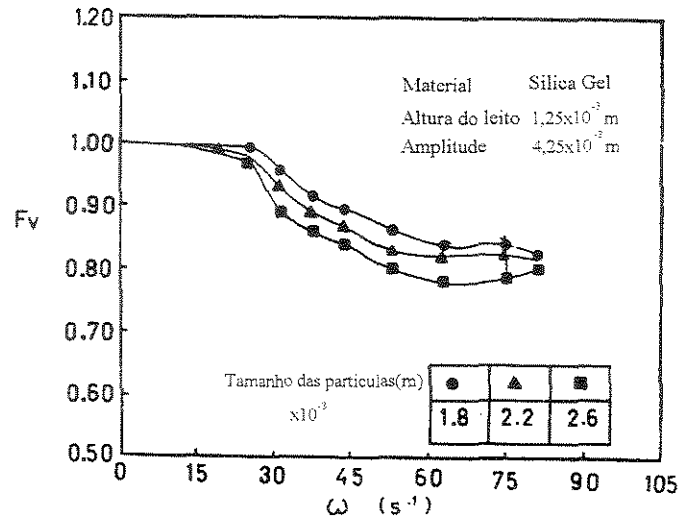


Figura 2.15 - Fator de vibração em função da frequência angular de vibração

($F_v \times w$), GUPTA e MUJUMDAR (1980)

MUJUMDAR e PAKOWSKI (1983) desenvolveram um modelo para leitos vibrados verticalmente avaliando o efeito da porosidade do leito e a distribuição do gás na placa. As equações do modelo foram ajustadas com dados obtidos experimentalmente e chegou-se às seguintes conclusões:

- a uma intensidade de vibração constante, os sistemas de leito vibrofluidizado são mais sensíveis a um intervalo de amplitude de 1-10 mm e de frequência de 10-40Hz. Um aumento no valor da amplitude resulta em um aumento na queda de pressão, o aumento na frequência reduz o valor da queda de pressão, desde que o valor da amplitude seja desprezível e
- se o sistema é controlado pelo ajuste da amplitude, então o mesmo não é sensível a intensidade de vibração, isto é, a pressão média é a mesma para cada intensidade de vibração - significando que baixas intensidades de vibração e consequentemente baixas frequências podem ser usadas na prática.

Para um leito vibrado, a porosidade está intimamente ligada com a intensidade de vibração. A seguinte equação é proposta para o cálculo da porosidade (CHEVILENKO et al (1979)):

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_0} = 1 - \exp \left[-0,54(k_f - 1) \left(\frac{aw^2}{g} \right)^{0,75/k_f} \right] \quad (2.26)$$

onde: $k_f = \frac{u_g}{u_{mf}}$

MORI et al (1990) trabalharam com partículas do grupo C utilizando leito vibrofluidizado. O ângulo do vibrador foi fixado em 45° (ângulo ótimo) por evitar a formação de canais preferenciais e melhorar a qualidade da fluidização de partículas que apresentaram dificuldade para atingir o regime. Com os resultados observados concluíram que, as partículas do grupo C classificam-se em três sub-grupos em relação à vibrofluidizabilidade:

- partículas que são facilmente fluidizadas e proporcionam grande expansão no leito e elutriam-se facilmente;
- partículas muito adesivas, que apresentam dificuldades em fluidizar, onde o leito vibrofluidizado deve ser utilizado e
- partículas fluidizáveis sob condições de bolha, similares ao grupo A no leito vibrofluidizado, onde a elutriação das partículas poder ser controlada.

ERDÉSZ e ORMÓS (1984) estudaram um sistema vibrofluidizado baseando-se em medidas fluidodinâmicas e observaram a viabilidade do uso do equipamento devido a economia de energia utilizando o modelo de oscilação de massa.

Do ponto de vista tecnológico é mais vantajoso se o sistema está fixo e somente a placa distribuidora é deslocada, diminuindo o consumo de energia.

Os experimentos foram realizados com partículas de areia , variando o tamanho das partículas, altura do leito e placa distribuidora (variando a resistência ao fluxo de gás).

Alguns parâmetros de vibração que foram utilizados: $a = 0,6; 0,9$ e $1,85$ mm; $w = 0$ a 267 s^{-1} e $G = 0$ a $13,4$.

A seguinte equação polinomial foi obtida por análise estatística de valores medidos para eficiência de vibração, k_v (erro padrão = $0,036$):

$$K_v = 1,06 - 0,03452G + 0,00056G^2 - 0,00007G^3 \quad (2.27)$$

onde K_v é a eficiência de vibração, definida como a razão entre ΔP_{mf} com e sem vibração,

$$K_v = \frac{(\Delta P_{mf})_v}{(\Delta P_{mf})_s}.$$

A Figura 2.16 mostra valores obtidos de k_v e G , sendo a curva obtida pela regressão da Equação 2.27. Pode-se observar que devido à compactação do leito, a vibração inicialmente impede a fluidização ($G=0-1,0$), mas acima deste valor, $G>1,0$, uma significativa melhora ocorre, i.e, o efeito da vibração reduz quase que pela metade a ΔP_{mf} . A deficiência da Equação 2.27 é que não é levada em conta a compactação inicial do leito, sendo válida somente para $G>1,0$.

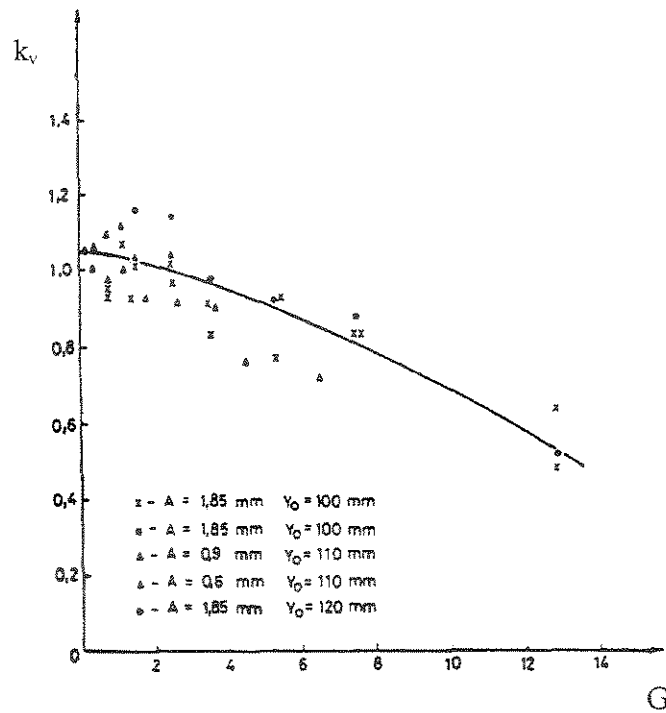


Figura 2.16 – Eficiência de vibração em função da intensidade vibracional, ERDÉSZ e ORMÓS (1984)

MORI et al (1991) estudaram a vibrofluidização de partículas finas em um leito de acrílico, com diâmetro de 205mm e altura de 500mm. O leito foi revestido internamente com fita de celofane para eliminar a eletricidade estática.

Os autores também descrevem a dificuldade em se fluidizar partículas menores do que 10 a 30 μm devido à ocorrência de canais preferenciais. Esta classe de partículas, segundo MOROOKA (1988), pode ser fluidizada em leitos fluidizados convencionais, pois elas se aglomeram em partículas secundárias maiores. Contudo, em colunas largas, não é fácil conseguir a fluidização destas partículas em todo o leito, e um aumento na velocidade do gás ocasiona uma separação a um extremo tal, que algumas partículas são elutriadas. Assim, os autores sugerem o uso de leitos vibrofluidizados que satisfatoriamente conseguem atingir a fluidização de partículas muito finas com velocidades do ar baixas.

A direção da vibração foi alterada variando o ângulo que o vibrador foi instalado. Quando instalado verticalmente, o motor produz uma vibração rotacional horizontal e se instalado horizontalmente produz vibração na vertical. Optaram por trabalhar com um ângulo intermediário, 45° , por obter melhor qualidade do regime de fluidização.

A Figura 2.17 mostra a comparação entre a expansão do leito e o estado de fluidização para as partículas de alumina em leitos convencional e vibrado (amplitude de 0,5mm e frequência de 50Hz), onde as linhas cheias representam o regime de fluidização. Na figura, L_c é a altura do leito estático e L_f a altura do leito em estado de fluidização. A região de má qualidade de fluidização é representada pelas linhas pontilhadas, onde prevalece a formação de canais ou com a maioria das partículas ainda em estado de leito fixo.

Sem a presença de vibração as partículas com $d_p < 10\mu\text{m}$ não atingiram o estado de fluidização com velocidades menores que 4,5cm/s. Observou-se uma considerável melhora no estado de fluidização com a presença de vibração no sistema. Partículas com $d_p > 1\mu\text{m}$ fluidizaram a uma velocidade de 1,8cm/s e d_p de $0,4\mu\text{m}$ fluidizaram com velocidade $> 4,5\text{cm/s}$. Uma expansão maior que 2 foi observada com partículas de $10\mu\text{m}$, sendo que para partículas menores a expansão foi bem menor.

Foi observado também que a taxa de elutriação de partículas aumenta com a diminuição do tamanho das partículas e que a vibração pode diminuir a elutriação de partículas finas, possibilitando uma boa qualidade de fluidização.

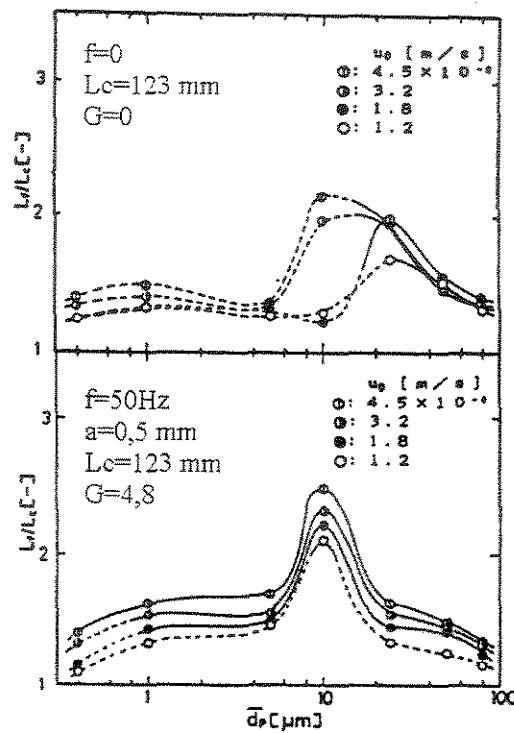


Figura 2.17 – L_c / L_f em função do diâmetro médio das partículas,

MORI et al (1991)

A Figura 2.18 mostra a relação entre a taxa de elutriação de partículas de alumina de diâmetro de 1, 5 e $10 \mu\text{m}$ pela velocidade do gás. As partículas com $5 \mu\text{m}$ apresentaram uma alta taxa de elutriação, aumentando rapidamente com a velocidade do gás. No entanto, para as partículas com $1 \mu\text{m}$, a taxa de elutriação foi bem menor, mesmo a altas velocidades do gás. Portanto, a vibração pode inibir a elutriação de partículas finas, permitindo atingir uma boa qualidade de fluidização.

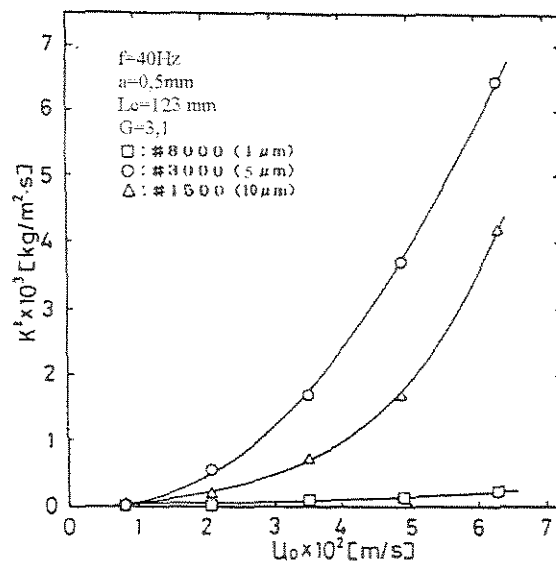


Figura 2.18 – Taxa de elutrição de partículas de alumina 1, 5 e 10 μm em função da velocidade do gás, MORI et al (1991)

MOROOKA et al (1988) desenvolveram um modelo para formação dos aglomerados, resultando em uma equação que leva em conta os vários fatores que afetam o equilíbrio do tamanho do aglomerado. Foram testados 8 tipos de diferentes partículas. As de CaCO_3 apresentaram forte tendência em formar aglomerados e o regime de fluidização foi obtido por poucos minutos. À baixas velocidades do gás as partículas não fluidizaram, apresentando comportamento semelhante às do grupo C.

O tamanho do aglomerado de Si_3N_4 diminuiu aproximadamente 10% quando a temperatura do leito passou de 291 para 573K, significando que a água absorvida internamente se mostrou parcialmente responsável pela qualidade do regime de fluidização.

MARRING et al (1994) estudaram a fluidização de partículas de esfera de vidro e de fécula de batata variando a velocidade de fluidização. A vibração foi imposta à placa distribuidora a diferentes valores de intensidade vibracional, para se obter o efeito da vibração na qualidade da fluidização.

O número de fluidização (FI) é definido como a razão da queda de pressão no leito e o peso das partículas por unidade da área da seção transversal, A: $FI = \frac{\Delta PA}{mg}$, onde: m = massa do leito e g = aceleração gravitacional.

Os resultados da qualidade da fluidização foram apresentados principalmente em superfícies tridimensionais, mostrando a variação do número de fluidização (FI) com a velocidade superficial de fluidização e intensidade vibracional. A intensidade de vibração (G (-)) requerida para fluidizar o pó aumentou com o aumento da coesividade, sendo que o grau de coesividade de fécula de batata foi analisado variando o conteúdo de umidade.

Uma indicação para qualidade da fluidização pode ser dada pela queda de pressão acima do leito; caso a fluidização seja boa, a queda de pressão acima do leito fluidizado é aproximadamente igual ao peso do leito por unidade da área da seção transversal do leito. Quando as forças interpartículas causam formação de canais preferenciais, a queda de pressão será menor, indicando uma fluidização pobre.

Com o objetivo de estudar a variação do comportamento da fluidização com a intensidade vibracional mais rigorosamente, o FI e a porosidade do leito foram medidos com a vazão do gás decrescente em todo intervalo da amplitude de vibração, mantendo a frequência constante em 70Hz. A intensidade de vibração variou em um intervalo de 0-5.

A cada intensidade vibracional (G) a velocidade de mínima fluidização foi determinada em gráficos separados de FI em função da velocidade do gás. A u_{mf} foi também determinada pela equação de Carman-Kozeny:

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 \rho_p g}{180\mu} \frac{\varepsilon_{mf}^3}{(1 - \varepsilon_{mf})} \quad (2.28)$$

A fluidização de fécula de batata pode ser observada pela Figura 2.19, para mínima coesividade estudada (W (conteúdo de água) = 6%). Pela Figura observa-se que as partículas não podem ser fluidizadas sem a presença de vibração, devido à instabilidade de

FI, pois os valores de FI obtidos aumentam e diminuem bruscamente. Com o aumento da velocidade do gás o FI aumenta para um valor maior que 1, podendo aparecer rupturas na horizontal e o leito tende a levantar como um tampão. A altas velocidades inicia-se a formação de canais associados a um baixo valor de FI e o gás escapa através dos canais. Na velocidade decrescente, os canais já formados permanecem estáveis e FI apresenta valores baixos.

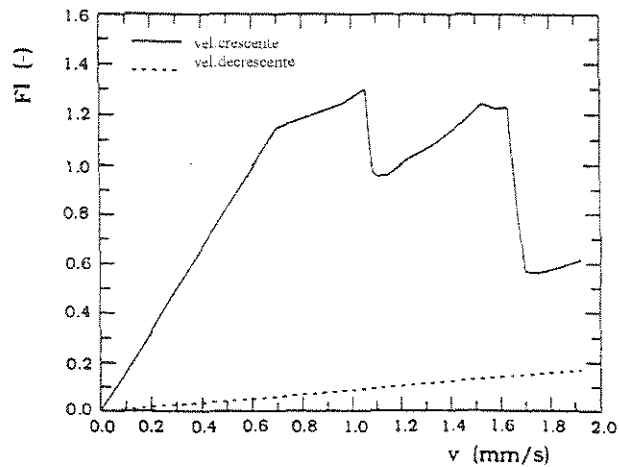


Figura 2.19 – Comportamento de FI sem a presença de vibração,

MARRING et al (1984)

As principais conclusões obtidas no trabalho foram:

- partículas de esfera de vidro fluidizaram sem vibração, e o efeito da vibração diminuiu a porosidade e velocidade de mínima fluidização;
- o leito de fécula de batata não fluidizou somente com a aeração, e fluidizou bem quando a vibração foi aplicada. A velocidade de ar mínima e a intensidade vibracional foram determinadas a três diferentes frequências com o objetivo em obter uma fluidização de boa qualidade e
- a intensidade de vibração requerida para uma boa fluidização foi determinada para cada situação estudada.

DELLA TONIA JR. e FREIRE (1989) desenvolveram um leito vibrofluidizado construído em uma coluna de vidro com diâmetro de 11,4 cm. A vibração foi imposta à placa distribuidora de ar com amplitude de 0 a 20mm. O motor de velocidade variada opera na faixa de 10 a 1000 rpm. As variações de frequência e amplitude foram determinadas através das leituras de um tacômetro e de uma régua milimetrada. Nos experimentos foram utilizados painço e sementes de urucum. O equipamento desenvolvido apresentou resultados satisfatórios e a Figura 2.20 ilustra algumas curvas fluidodinâmicas obtidas no trabalho. Os autores concluíram, baseando nas curvas fluidodinâmicas obtidas no trabalho, que a velocidade mínima de fluidização bem como a perda de carga são menores quando comparadas à fluidização convencional.

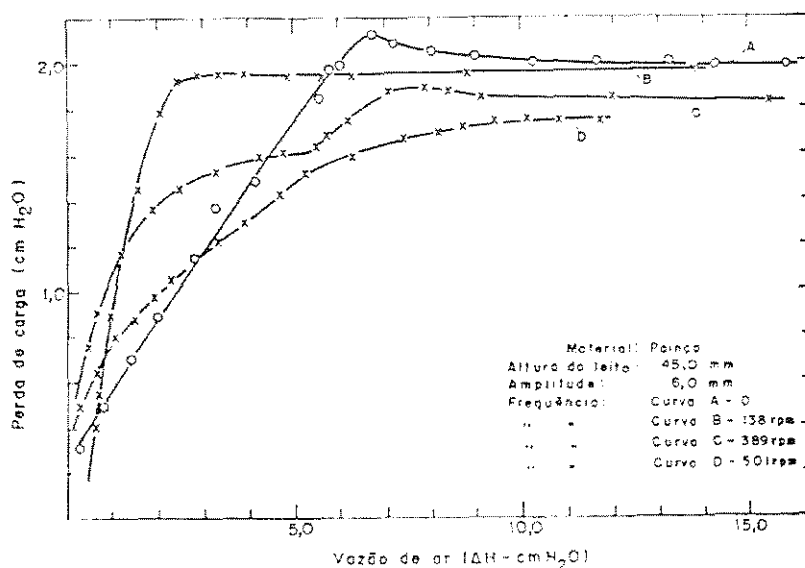


Figura 2.20 – Curvas Características de fluidização – perda de carga em função da velocidade de ar para diferentes condições, DELLA TONIA JR. e FREIRE (1989)

ERDÉSZ et al (1986) compararam com dados experimentais obtidos no trabalho em LFC e LVF, a perda de carga e velocidade na condição de mínima fluidização, com equações propostas na literatura. Observou-se que há similaridade entre os leitos fluidizado convencional e o vibrado, ocorrendo mudanças não lineares das características fluidodinâmicas em decorrência da inserção de energia de vibração.

Algumas vantagens da aplicação dessa operação de vibrofluidização:

- em comparação com leito fluidizado convencional, a velocidade de mínima fluidização e a queda de pressão na fluidização incipiente são menores para LVF; assim como consumo de energia;
- tempo de residência, intensidade da mistura e propriedades de transferência de massa e calor são controladas no LVF pelas mudanças na amplitude e/ou frequência da vibração;
- devido ao controle independente da velocidade do gás e dos parâmetros de vibração, boas condições de transferência de calor e de massa podem ser asseguradas e
- materiais pastosos podem ser processados com maior eficiência em LVF do que em LFC.

Por outro lado, foram colocadas algumas desvantagens:

- necessidade de aparelhos de mecanismos especiais (vibradores, pulsadores, etc);
- necessidade de isolamento acústica e de vibração.

As principais características fluidodinâmicas dos leitos fluidizados estudadas e observadas no trabalho foram: velocidade mínima de fluidização do gás, queda de pressão do leito na condição de mínima fluidização e porosidade média do leito.

Algumas observações foram feitas no trabalho:

- com o aumento do parâmetro G a queda de pressão do leito inicialmente aumenta com o leito compactado e depois diminuiu;
- a velocidade incipiente de fluidização diminuiu com o aumento de G e
- a porosidade do leito diminuiu para $G=1$; depois aumentou e oscilou, sem nenhuma possibilidade de predição.

O trabalho apresenta várias correlações para cálculo dos parâmetros fluidodinâmicos em LVF.

KUIPERS et al (1996) estudaram a fluidização da fécula de batata (partículas pertencentes ao grupo C) em leito vibrofluidizado agitado. O efeito da vibração senoidal introduzida à placa distribuidora e/ou o sistema de agitação foram analisados. O número de fluidização, expansão do leito, torque e o comportamento das partículas observados visualmente foram determinados em função da velocidade do gás, altura do leito, conteúdo de umidade das partículas, velocidade do agitador e intensidade vibracional (frequência e amplitude de vibração).

As vibrações impostas ao sistema juntamente com o gás mostraram bons resultados na eliminação dos canais preferenciais somente na parte inferior do leito. Aplicando simultaneamente a vibração e agitação no leito aerado eliminou-se os canais preferenciais e os aglomerados, obtendo assim uma fluidização homogênea. Combinações ótimas dos parâmetros de vibração e agitação foram obtidas para diferentes condições de conteúdo de umidade e altura do leito.

A Figura 2.21a mostra a qualidade da fluidização para $W=13,1\%$ em base úmida, $H_0=0,74\text{m}$ e $u_g/u_{mf}=1,1$ variando a intensidade vibracional (G). Na região entre $G=2$ e $G=8$ (região branca do gráfico) observa-se uma fluidização de boa qualidade, e devido às limitações do sistema experimental construído não foi analisado o comportamento das partículas para $G>8$. O consumo de energia de vibração aumenta fortemente com o aumento da frequência (comparado com a amplitude).

A Figura 2.21b apresenta dados das partículas com conteúdo de umidade $W = 13,2\%$ em base úmida e $H_0=0,4\text{m}$, diferente da altura inicial da Figura 2.21a, e não se observou boas condições de fluidização para $x_0>1\text{mm}$ em baixas alturas de leito. A mínima amplitude observada para se obter uma boa qualidade da fluidização foi para $x_0=0,3\text{mm}$.

A Figura 2.21c diferencia no conteúdo de umidade comparada com a Figura 2.21a. Observa-se uma boa qualidade de fluidização somente para $G = 8$. Portanto, com o aumento do conteúdo de umidade tornou-se necessário altos valores de amplitude e frequência de vibração para se obter uma boa qualidade da fluidização.

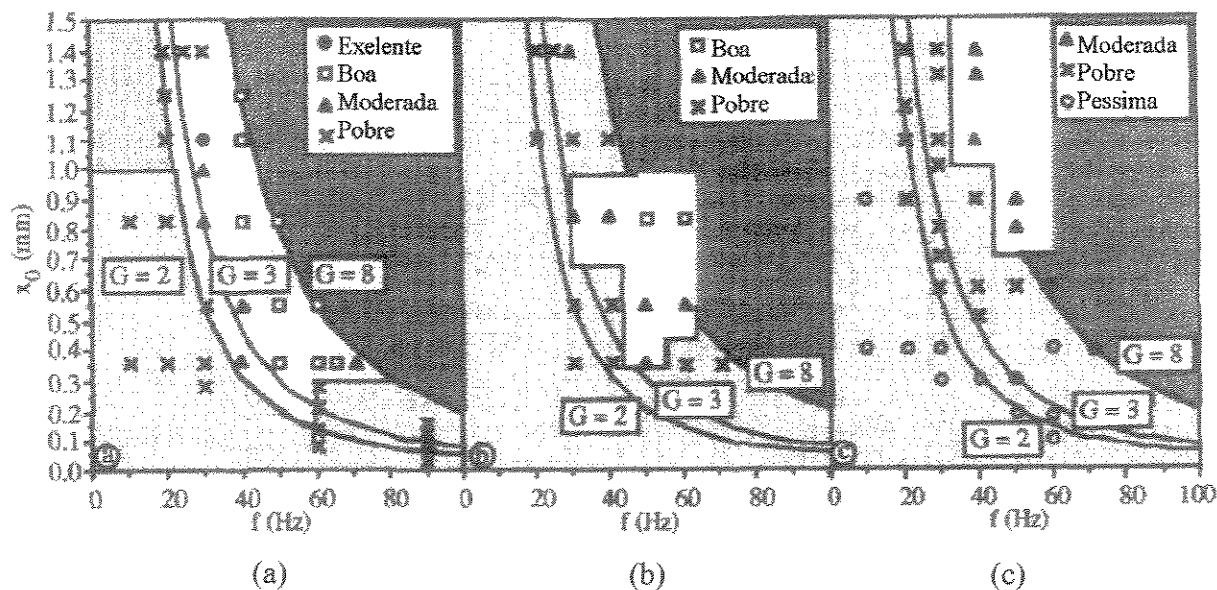


Figura 2.21 – Cartas de fluidização variando frequência e amplitude de vibração em leito vibrofluidizado agitado (KUIPERS et al, 1996).

MALHOTRA e MUJUMDAR (1985) avaliaram os resultados de medidas de queda de pressão em função da intensidade vibracional com a imersão de vários cilindros circulares, com o leito de partículas secas e úmidas. Um leito bidimensional construído em acrílico (20x5cm) foi utilizado nos experimentos com uma placa distribuidora de 4% de área livre e diâmetro do furo de 1mm.

Os dados de queda de pressão foram coletados variando a frequência de vibração, mantendo constante a razão u_g/u_{mf} (razão entre a velocidade do gás pela velocidade na condição de mínima fluidização) a uma determinada amplitude de vibração, onde u_{mf} foi determinado graficamente, ΔP em função de u a $G = 0$ (sem vibração) para as partículas secas e úmidas.

As seguintes observações foram feitas no trabalho: para valores de $u_g/u_{mf} < 0,6$ o efeito da vibração primeiramente aumenta a queda de pressão (ΔP) no leito no intervalo de $G = 0$ a 1, devido à compactação, e reduz gradualmente até $G = 3,5$ apresentando uma considerável redução após este valor. Para $u_g/u_{mf} > 0,6$, a fase inicial de compactação do leito não existe apresentando um declínio gradual em ΔP até $G = 4,0$.

Para materiais pastosos, aglomerados, etc, a estrutura do leito se apresenta bastante irregular na fluidização, apresentando formação de canais preferenciais. A $G = 0$, o leito freqüentemente se move como um pistão, e momentaneamente acarreta em oscilações muito bruscas na queda de pressão. Para garantir a uniformidade do leito nos experimentos realizados a cada início de corrida foi aplicada uma vibração fixada em $G = 2$ para todos os experimentos para proporcionar uma expansão e obter um estado inicial uniforme de estrutura do leito.

O conteúdo de umidade das partículas mostrou ser uma variável importante no processo, afetando a dinâmica do leito e consequentemente o fenômeno de transferência de calor e massa. As partículas com conteúdo de umidade até 0,006 (kg glicerina/kg material seco) fluidizaram sem a presença de vibração, tornando a fluidização impossível acima deste valor sem a presença de vibração.

O trabalho de GARIM e FREIRE (1998) mostra que para LFC a variação da queda de pressão representada pelas curvas de desvio padrão é independente da altura do leito de partículas, e para LVF a variação da queda de pressão representada pelas curvas de desvio padrão é dependente da altura do leito de partículas e da intensidade vibracional. As curvas de desvio padrão também permitiram a determinação das condições nas quais a vibração imposta ao sistema é predominante em relação à força exercida pelo escoamento do ar através do leito de partículas.

JINESCU et al (2000) estudaram os parâmetros fluidodinâmicos em LVF com persulfato de potássio em pó, obtendo um LVF cuja estrutura mostrou-se quase homogênea, onde as bolhas de ar praticamente desapareceram com o aumento de G . O sistema de vibração utilizado consiste de um vibrador eletromagnético.

O estudo experimental teve como objetivo determinar os seguintes parâmetros: velocidade de mínima vibrofluidização, perda de carga na condição de mínima vibrofluidização, altura e expansão do leito.

A velocidade de mínima vibrofluidização e a perda de carga na condição de mínima vibrofluidização foram obtidas experimentalmente através das curvas de perda de carga em função da velocidade do ar. Os principais parâmetros que determinam a qualidade da

fluidização em LVF observado no trabalho foram: velocidade do ar, intensidade vibracional, altura inicial da partículas (H_0) e a razão H_0/D (D = diâmetro da coluna).

2.4.3 – Secagem em Leito Vibrofluidizado

O leito vibrofluidizado é bastante utilizado para secagem de materiais granulares, devido às inúmeras vantagens que oferece. Uma característica importante da secagem em leito vibrofluidizado é a existência de um valor ótimo dos parâmetros de vibração, que proporcionam uma alta velocidade de secagem. Muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas para obtenção de condições ótimas de operação para materiais específicos. Entre elas, cita-se os trabalhos de SUZUKI et al, 1980, que estudaram a secagem de resina de troca iônica, nos períodos de taxa de secagem constante e decrescente. STRUMILLO e GUPTA (1986) propõem uma faixa ótima para implementar as transferências de calor em massa em um intervalo de aceleração vibracional de $a\omega^2/g = (2-6)g$.

O secador de leito vibrofluidizado apresenta as seguintes vantagens:

- a vibração mecânica facilita a fluidização, então a quantidade de ar requerida é reduzida, ocorrendo assim vazões menores e, com isso, uma maior eficiência de secagem;
- a escolha da velocidade do gás é independente da fluidodinâmica do leito em equipamentos vibrados, por intensificar a mistura e fluidização das partículas devido à energia vibracional fornecida ao sistema;
- a vibração na placa distribuidora proporciona aumento na taxa de secagem, devido à quebra do aglomerado, ao aumento da área de contato entre partícula e gás, ao aumento na taxa de circulação das partículas e redução da quantidade de gás que atravessa o leito em forma de bolhas;
- o produto não fica sujeito aos fortes atritos e choques devido à “ebulição” do leito fluidizado convencional;

- ocorre fluidização homogênea, até mesmo para materiais aglomerantes, com um melhor controle do tempo de residência, não ocorrendo a degradação térmica das zonas estagnadas, isto é, as vibrações ajudam a manter o aglomerado em estado móvel, bem como a quebrar os agregados, permitindo com isso uma melhor fluidização;
- ocorrem altas taxas de transferência de calor e massa e
- o movimento do material através do secador é mais suave, o que reduz o atrito entre as partículas, sendo portanto muito adequado ao tratamento de materiais frágeis, apesar da necessidade de vibração, ocorre um menor consumo de potência total.

A secagem em leitos vibratórios é apropriada para processamento de materiais em que a vazão de ar é governada pela exigência de fluidização e não pelo calor requerido pela secagem, ou quando vazões elevadas de ar não são recomendadas para processamento de materiais facilmente oxidáveis, PAKOWSKI et al, 1984.

Quando se agita um leito de secagem sob ação vibracional, pode ocorrer um aumento na taxa de secagem, dependendo das condições de operação, de parâmetros geométricos e das características físicas do leito. A influência da vibração sobre a taxa de secagem depende da faixa de velocidade do ar. Para $u_g < u_{mf}$, a influência é maior do que quando $u_g > u_{mf}$. Para $aw^2/g \gg 1$, o aumento de u_g acima de u_{mf} , pode reduzir a taxa de secagem. Mantendo a velocidade do ar constante, a influência de aw^2/g , sobre a taxa de secagem pode ser representada esquematicamente pela Figura 2.22, PAKOWSKI et al (1984).

Quando ocorre aumento da taxa de secagem, a mistura das partículas é mais intensa e ocorre a desagregação de aglomerados, ERDÉSZ, RINGER e MUJUMDAR (1989). Os processos de transferência de calor e massa ocorrem em maior intensidade quando a operação é realizada em regime de ressonância, ERDÉSZ (1990). A Figura 2.22 sugere que a máxima taxa de secagem corresponde a uma condição de ressonância.

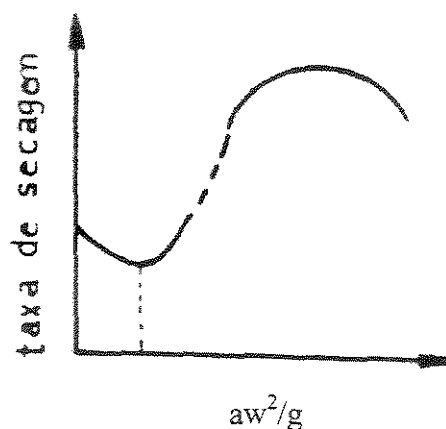


Figura 2.22 - Taxa de secagem em função da intensidade vibracional
PAKOWSK et al (1984)

OSINSKII et al (1969) estudaram a secagem do PVAB (acetato de polivinil bisulfeto) com diâmetro de $675\mu\text{m}$, em que o conteúdo de umidade passou de 12-18% para 2% em secador vibrofluidizado. Foram observadas as duas etapas no período da secagem: a taxa constante e decrescente. O conteúdo de umidade crítica ficou em torno de 4%. A taxa de secagem no período constante aumentou de 0,6 a 2,6% por minuto com o aumento da temperatura de 35 para 54°C . No período de taxa decrescente ocorreu uma agregação das partículas depois de ter sido removida a umidade de superfície criando uma resistência adicional. Como a maior parte da secagem ocorreu nesse período por difusão, a variação da velocidade do gás entre 0,27 e 0,47 m/s teve pouca influência no tempo de secagem total.

Os dados obtidos nos leitos vibrado e convencional foram comparados sob as mesmas condições operacionais. A taxa de secagem a período constante foi de 5 a 6 vezes maior em leito vibrado, e o tempo de secagem reduziu de 2,5 a 3 vezes.

As seguintes condições ótimas foram propostas para o sistema estudado: amplitude de 1,5-2,0mm, frequência 17,5-19Hz, ângulo de vibração 80^0 , temperatura de entrada do gás de $50\text{-}52^0\text{C}$, velocidade do gás $0,35\text{m/s}$ e altura do leito de $0,04\text{m}$.

FINZER e KIECKBUSCH (1986) apresentaram resultados para a desidratação de fatias de cebola. Foi utilizado um leito de acrílico, com 15cm de diâmetro, conectado a um vibrador excêntrico, com possibilidade de variar a amplitude e frequência de vibração no sistema. A Figura 2.23 mostra que a vibração reduz o tempo de secagem, e com o aumento de aw^2/g , mantendo-se constante a frequência, ocorre um aumento da taxa de secagem. Pelos resultados experimentais conclui-se que para aw^2/g acima de 5,6 este aumento é insignificante. Pelos ensaios 2 e 5 conclui-se que a amplitude é mais importante que a frequência de vibração. Isso porque apesar de aw^2/g ser próximo para os dois ensaios, o menor tempo de secagem para alcançar umidades finais iguais, correspondeu a uma maior amplitude de vibração.

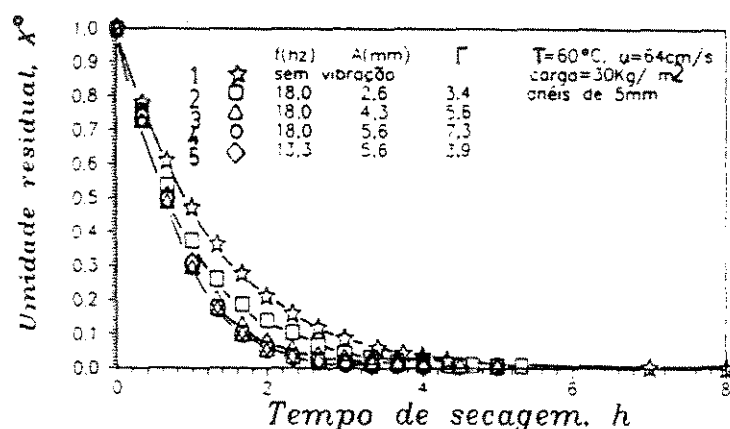


Figura 2.23 – Umidade residual nos anéis de cebola em função do tempo de secagem, FINZER e KIECKBUSCH (1986)

SUZUKI e HOSAKA, (1980) trabalharam com a velocidade do gás menor que a velocidade de mínima fluidização (u_{mf}), utilizando partículas de resina de troca iônica, com conteúdo de umidade maior que $0,5 \text{ kg-H}_2\text{O/kg-ms}$. A uniformidade do conteúdo de umidade final mostrou ser dependente da velocidade do gás, intensidade vibracional e altura do leito.

Em leitos vibrofluidizados a taxa de circulação das partículas varia sob a influência das condições vibracionais. O modelo proposto para secagem neste trabalho inclui a taxa de circulação das partículas como um parâmetro adotado para cálculo da taxa de secagem e da distribuição do conteúdo de umidade, que corresponda a todos os estados da fluidização.

Uma pequena porção de partículas foi coletada em determinados intervalos de tempo para determinar o conteúdo de umidade. A temperatura do leito e do gás foi acompanhada por termopares de cobre-constantan. A umidade do gás foi determinada pelas temperaturas de bulbo seco e úmido acompanhadas por termopares de cobre-constantan, e os valores foram verificados por um higrômetro.

Quando o leito foi vibrado sob condições favoráveis, observou-se no processo de secagem que o conteúdo de umidade e temperatura foram uniformes. Portanto o efeito da vibração na uniformidade do conteúdo de umidade no leito pode ser discutido quantitativamente em termos da taxa de circulação obtida devido à vibração.

MARELLA et al (1997) afirmaram que a combinação de agitação mecânica, centrífuga e vibração com a fluidização garante melhorias no produto e economia de energia. Os autores propuseram um modelo matemático de remoção de umidade da caseína em um secador vibrofluidizado, envolvendo os diferentes parâmetros que afetam essa remoção. Diferentes fatores que afetam o processo da perda de umidade em leito vibrofluidizado foram correlacionados dentro de um modelo matemático, onde os dados foram analisados graficamente. O tempo de secagem predito pelo modelo variou de valores reais de 2 a 25%. A amostragem foi feita de 5 em 5 minutos, de forma a obter amostragem representativa.

Neste estudo não foi observada taxa de secagem a período constante. Em geral os obstáculos para que ocorra transferências de calor e massa são as condições de fronteira estagnada, mecanismo difusional, etc. Uma das vantagens do efeito da vibração no leito se dá pela forma que evita a estagnação das condições de fronteira, forte mistura no leito, o que foi confirmado comparando a taxa de secagem inicial com e sem presença de vibração, 41,5 e 34,8 kg/kg.h.m², respectivamente a uma velocidade de 0,7 m/s.

BORDE et al (1997) estudaram a taxa de secagem de partículas granulares em secador vibrofluidizado teórica e experimentalmente. Os efeitos combinados de geometria,

dinâmica do gás e parâmetros termofísicos foram analisados utilizando o modelo matemático desenvolvido no trabalho.

A intensidade vibracional mostrou ser um parâmetro significativo na taxa de secagem, aumentando de 3 para 7, e reduz o tempo de secagem em aproximadamente 45%. O efeito do diâmetro das partículas no tempo de secagem foi estudado, segundo a classificação de GELDART (1986), diminuindo o diâmetro das partículas em 60% acarreta em um aumento na taxa de secagem de 10%.

Um modelo para secagem em leito vibrofluidizado, para um regime oscilatório foi desenvolvido. Com o objetivo de verificar o modelo, foi realizada uma série de experimentos. Os resultados experimentais se resumiram em:

- os principais parâmetros relacionados com a taxa de secagem foram: temperatura de entrada do gás e intensidade vibracional;
- o diâmetro das partículas pouco afetou a taxa de secagem em comparação com a intensidade de vibração e a temperatura de entrada do gás e
- os experimentos realizados com partículas de areia mostraram que a taxa de secagem durante o primeiro período é a mesma para diferentes conteúdos de umidade inicial.

SUZUKI e FUJIGAMI (1980) avaliaram o efeito da uniformidade do conteúdo de umidade, que foi comparado em termos da taxa de circulação das partículas (r) atingida devido ao efeito da vibração. O leito utilizado foi o mesmo proposto por SUZUKI e HOSAKA (1980). Utilizou-se três tipos de esferas de vidro e o conteúdo de umidade inicial preparado foi de 0,02 kg H₂O/kg-ms.

A posição da amostragem foi feita a 7/8 da altura do leito acima do distribuidor, as amostras coletadas eram de aproximadamente 3g, e obteve-se de 8 a 15 pontos em cada corrida experimental.

Os resultados experimentais mostraram um decréscimo no efeito da vibração com o aumento do diâmetro das partículas, para a mesma velocidade do gás. Para as partículas

menores, os resultados foram diferentes dos demais, que pode ser devido à relação entre o diâmetro e a força de ligação das partículas quando úmidas.

JINESCU e BALABAN (1980) utilizaram um leito vibrofluidizado vertical para o estudo da cinética de secagem de poliestireno com alto conteúdo de umidade. Uma equação empírica para a taxa de secagem foi obtida em termos dos seguintes fatores: diâmetro volumétrico das partículas, umidade livre inicial, índice de fluidização, razão entre a altura e o diâmetro da coluna, razão entre a aceleração vibracional e gravitacional, temperatura do agente de fluidização e natureza das partículas.

CHEN et al (1991) estudaram as características da aglomeração de partículas em secador vibrofluidizado. Uma secagem imprópria implicou numa aglomeração em que as partículas comportaram como “cachos”, consistindo de duas ou mais partículas. Essa aglomeração resultou em uma grande distribuição do tamanho de partículas, que não é usualmente desejada. O distribuidor utilizado foi uma placa perfurada com diâmetros dos furos de 3mm e com espaçamento quadrático. Foi colocada uma tela de aço inox de 400 mesh acima da placa perfurada. As características das partículas aglomeradas foram estudadas utilizando: leito vibrofluidizado a alta amplitude (amplitude de vibração de 3,8 cm) e leito vibrofluidizado a baixa amplitude (amplitude de vibração de 0,26 cm). O estudo foi feito com o perclorato de amônia, com diâmetros na faixa de 250 μ m – 270 μ m. As variáveis analisadas experimentalmente foram: intensidade de vibração, amplitude de vibração e a temperatura de entrada do gás. A distribuição de tamanho da partícula seca foi a mesma das partículas úmidas, observação analisada em microscópio. A frequência de vibração foi medida com tacômetro. A secagem a alta amplitude, 3,8 cm, foi a condição favorável para que a aglomeração de partículas fosse evitada. Baseado nos resultados experimentais, chegou-se a três principais conclusões:

- no início da secagem em leito vibro-fluidizado foi necessário um movimento relativo entre as partículas para garantir a secagem;
- no intervalo das condições de operação estudada, a vibração do leito vibrofluidizado à alta amplitude mostrou um grau menor de partículas

aglomeradas e ambos, a amplitude de vibração e frequência de vibração são importantes para prevenir a aglomeração de partículas e

- a temperatura do gás de entrada não deve ser alta, podendo resultar em um alto grau de aglomeração de partículas.

DONG et al (1991) mostraram os resultados experimentais para a secagem das partículas: sílica gel, ácido cítrico e farinha milho em leito vibrofluidizado, analisando o efeito da vibração durante a secagem no período de taxa decrescente. O material escolhido para se fazer a análise experimental da influência da vibração durante o período da taxa decrescente foi a farinha de milho, devido à presença de umidade livre, capilar, adsortiva e osmótica. Os resultados mostraram que o conteúdo de umidade crítica depende da frequência de vibração, que decresce significativamente com o aumento da frequência de vibração. Esse material mostrou que a amplitude da vibração tem pouca influência na migração da umidade do interior para superfície da partícula. A taxa de secagem no período decrescente foi influenciada pelo tamanho da partícula. A taxa de secagem no período decrescente para partículas menores mostrou ser maior do que para partículas maiores, devido ao pequeno trecho para ocorrer a difusão das partículas menores. Para a farinha de milho, o conteúdo de umidade crítica variou com a frequência de vibração no secador vibrofluidizado, existindo uma frequência ótima (f_{ot}) na qual o conteúdo de umidade crítica tem um valor mínimo independentemente da amplitude da vibração. A taxa de secagem no período decrescente apresentou um valor máximo à frequência ótima (f_{ot}).

GUPTA et al (1980) estudaram o efeito da vibração na taxa de secagem da sílica gel e partículas de peneira molecular, e concluíram que o efeito da vibração não afeta a medida do conteúdo de umidade crítica ou a taxa de secagem no período decrescente. STRUMILLO e PAKOWSKI (1980) relataram que a vibração ajuda manter uma melhor condição de secagem no período de taxa decrescente.

MORENO et al (2000) obtiveram dados empíricos de velocidade de mínima fluidização, queda de pressão e cinética de secagem em um leito vibrofluidizado (LVF) para partículas de serragem. A técnica de vibração foi utilizada para minimizar problemas de aglomeração de partículas e atingir o regime de fluidização. Os resultados do trabalho

mostraram a viabilidade em secar serragem com conteúdo de umidade superior a 2 kg água/kg material seco mantendo um alto grau de homogeneidade e a qualidade do regime de fluidização.

A utilização da vibração mecânica proporcionou uma importante redução na velocidade requerida para secagem da serragem em LVF. A redução pode chegar a 50% em relação a velocidade de mínima fluidização e 70% em relação a u_{cf} (velocidade de fluidização completa) comparando com o leito fluidizado convencional (LFC).

As curvas de queda de pressão em função velocidade do gás permitiram caracterizar a fluidização para o LVF, um exemplo se encontra na Figura 2.24. O ponto A corresponde à condição de mínima vibrofluidização (u_{mfv}) e o ponto B à fluidização completamente desenvolvida (u_{cf}) e depende da umidade inicial das partículas.

A velocidade de mínima vibrofluidização (u_{mv}) e a velocidade de fluidização completa (u_{cf}) foram determinadas em relação aos parâmetros de processo.

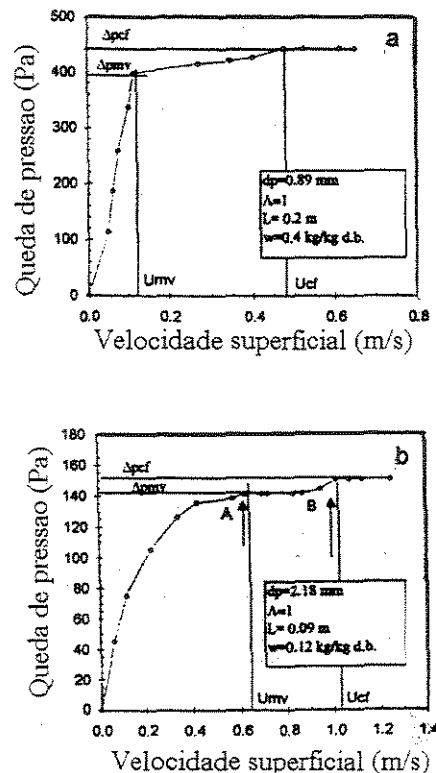


Figura 2.24 – Curvas típicas de queda de pressão em função da velocidade, onde A é a intensidade vibracional, L é a altura do leito e w é o conteúdo de umidade em base seca (MORENO et al, 2000)

A Figura 2.25 mostra o decréscimo de u_{cf} com o aumento da intensidade vibracional até um valor máximo, sendo que a partir desse ponto o efeito da vibração não é mais significativo. Observa-se o efeito que a frequência e amplitude de vibração exercem em u_{cf} . Para os valores de alto conteúdo de umidade a vibração exerce um efeito significativo, permitindo a fluidização da serragem para conteúdos de umidade superiores a 2 kg água/kg material seco a baixas velocidades.

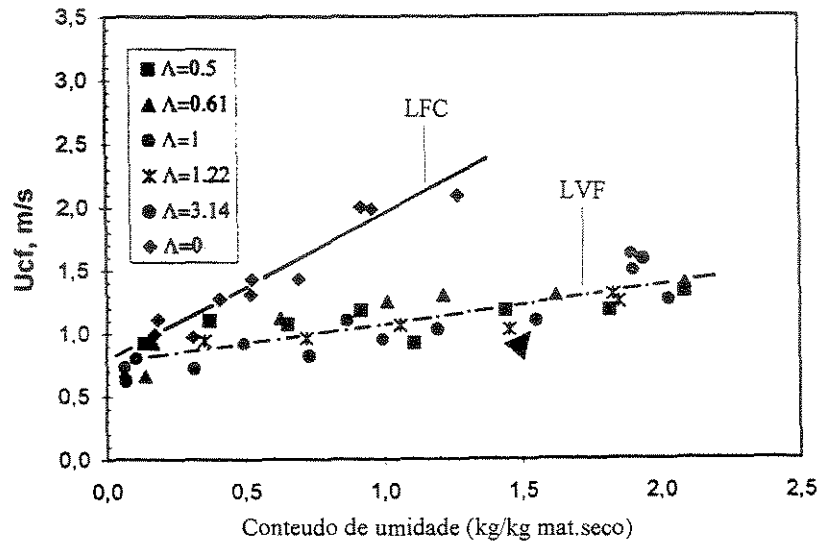


Figura 2.25 – Velocidade do gás na condição de fluidização completamente desenvolvida em função do conteúdo de umidade variando a intensidade (MORENO et al ,2000)

VIZCARRA et al (2001) estudaram a secagem de sementes de trigo em leito vibrofluidizado em operação em batelada e contínua. Nas curvas de secagem para a operação em batelada os parâmetros estudados foram: intensidade vibracional, carga de sólidos, temperatura de entrada e velocidade do ar. Para o sistema contínuo a distribuição do tempo de residência dos sólidos foi determinada experimentalmente.

O conteúdo inicial de umidade do material utilizado foi de 13% b.s. e com umidificação, o conteúdo de umidade chegou em 25% b.s.

As curvas de secagem para a operação em batelada foram obtidas em diferentes temperaturas de entrada do ar (303, 343 e 373 K), intensidade vibracional (5,69; 6,02; 8,7), carga de sólidos (8, 10 e 12kg) e a vazão volumétrica de alimentação de ar (0,19; 0,27 e

0,35 m³/s). Em todas as corridas experimentais a temperatura do leito foi registrada durante o processo de secagem e o conteúdo de umidade das partículas foi determinado em função do tempo por uma média de amostragem simultânea em diferentes posições do leito.

A Figura 2.26 mostra as curvas da queda de pressão do leito em função da velocidade do ar para o sistema com e sem vibração, onde pode ser observado que a quantidade de ar necessária para a condição de mínima fluidização foi aproximadamente duas vezes a quantidade requerida para o sistema vibrofluidizado, dependendo da intensidade vibracional aplicada ao leito.

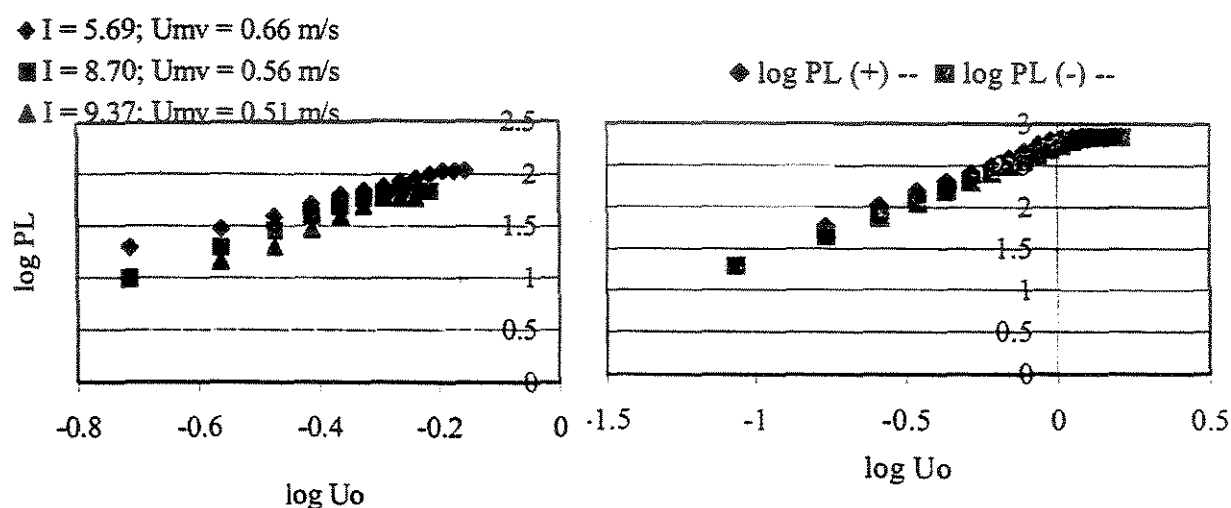


Figura 2.26 – Queda de pressão em função da velocidade do gás variando a intensidade vibracional (I) – a) sem vibração b) para velocidade crescente e decrescente (VIZCARRA et al ,2001)

O trabalho de VIX et al (1994) trata da secagem dos cristais de ácido adípico em leito fluidizado convencional. A primeira parte do trabalho apresenta os resultados experimentais obtidos para as propriedades do aa. Uma atenção especial foi dada à determinação das isotermas de sorção mostrando que o produto é higroscópico e que contém água interna (Figura 2.27). A quantidade de água retirada mostrou ser dependente do tamanho do cristal. Na análise termo-gravimétrica observou-se a cinética de sublimação a temperaturas acima de 110°C.

A segunda parte do trabalho mostra os resultados experimentais analisando as curvas de secagem em duas etapas: a secagem convectiva para atingir o conteúdo de umidade crítica, dependendo do tamanho do cristal; e a outra etapa de remoção de água interna que resulta num conteúdo de umidade final, que depende principalmente da temperatura do gás de secagem. A produção de partículas finas foi observada a temperatura acima de 110° C e é linearmente dependente do tempo.

Os cristais de aa utilizados no trabalho foram produzidos em laboratório por recristalização a partir do produto comercial e a umidade do cristal foi determinada pelo equipamento “Karl-Fisher”, variando entre 4 e 7% b.s. Foi feita uma comparação da granulometria para a secagem em um leito fluidizado e em um processo de secagem lenta (4 dias). O diâmetro médio do cristal na sua forma inicial foi de 450 μ m e diminuiu para 380 μ m para os cristais que foram fluidizados. Foi observado que o conteúdo de umidade aumenta com o tamanho da partícula, de 2300 ppm para os cristais menores ($d_p = 150\mu$ m) para 6700 ppm para os maiores ($d_p=670\mu$ m). A umidade interna não é uniformemente distribuída nos cristais. Concluíram que a água retida internamente aumenta durante o crescimento do cristal. Foi também observado que a taxa de evaporação aumenta com um acréscimo na temperatura, comportamento que pode ser atribuído à sublimação.

Os experimentos mostraram que o conteúdo de umidade final se relacionou com a granulometria e temperatura. A umidade dos cristais no final da secagem ficou em torno de 0,2% b.s, A Figura 2.28 ilustra a variação da umidade final com a temperatura.

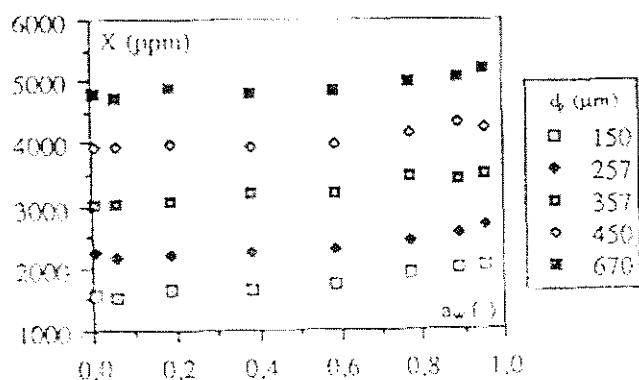


Figura 2.27 – Umidade de equilíbrio em função da atividade de água, VIX et al (1996)

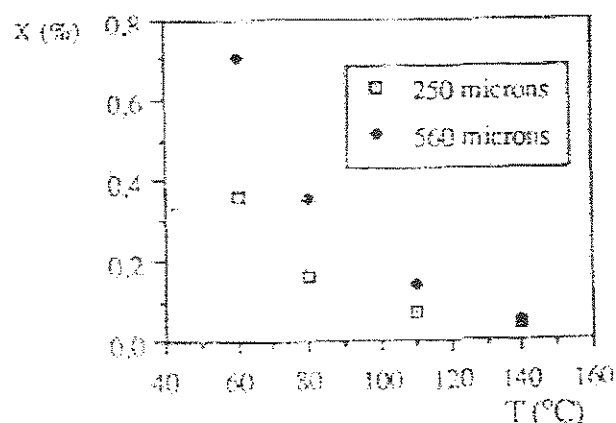


Figura 2.28 – Umidade final em função da temperatura
VIX et al (1996)

2.4.4 - Aspectos técnicos e de projeto

Os projetos realizados em leitos vibrofluidizados são caracterizados pela versatilidade e facilidade de controle dos parâmetros de vibração (amplitude e frequência de vibração). O procedimento dos cálculos de projeto é similar ao leito fluidizado convencional.

Um algoritmo e software para se otimizar o controle e projeto desse tipo de equipamento foi desenvolvido por SZALAY et al (1995) - "Classification Scheme of Vibrated Systems". O algoritmo foi testado usando dados experimentais obtidos em escala de laboratório, em secador de leito vibrofluidizado. Foi observado que a introdução de energia em forma de vibração periódica e pulsos podem resultar em um aumento de eficiência térmica e energética de uma dada operação.

As propriedades físicas dos materiais podem ser alteradas devido ao efeito da vibração. A sensibilidade das partículas devido ao efeito de vibração deve ser testada em laboratório, com e sem tratamento térmico.

Tecnicamente a energia vibracional pode ser proveniente de uma oscilação do equipamento inteiro ou parte dele (vibração aplicada ao distribuidor do gás), e as pulsações podem ser causadas por pulsos no gás (interrupções periódicas na válvula) ou pelo uso de

geradores ultra-sônicos. A seleção de um ou outro é definida geralmente por questão econômica.

É importante conhecer o intervalo ótimo da intensidade de vibração para se obter uma alta eficiência no processo.

Os resultados preliminares obtidos no trabalho de ERDÉSZ (1990) mostraram a necessidade do estudo em escala de laboratório, para todo tipo de material, antes do projeto e dimensionamento do equipamento.

2.4.5 – Efeito das forças interpartículas em LVF e LFC

As forças interpartículas afetam o comportamento fluidodinâmico do material, a taxa de circulação, as transferências de calor e massa e conseqüentemente o processo de secagem. Na literatura encontram-se alguns trabalhos avaliando o efeito da adição de um fluido sobre partículas inertes em LVF com o objetivo de avaliar o efeito destas forças no comportamento do leito das partículas. Deve-se destacar, que nenhuma das equações propostas na literatura para estimativa dos parâmetros fluidodinâmicos em LVF leva em consideração as forças interpartículas.

MOLERUS (1982) concluiu que o comportamento fluidodinâmico das partículas estudadas mostrou-se dependente da razão das forças coesivas e de arraste de cada partícula individual.

A dificuldade em fluidizar determinados materiais pode estar relacionada ao fato das forças interpartículas serem maiores do que o fluido pode exercer. As forças interpartículas resultam de contribuições como de Van der Waals, forças eletrostáticas, pontes líquida ou sólida, umidade e materiais com superfície pegajosas, forma irregular das partículas, etc.

As forças interpartículas devido à umidade e à ampla distribuição de tamanho do material, por exemplo, se enquadram nos tipos de materiais comumente utilizados em processos de secagem. Devido a essas características, o processo de secagem de cada

produto necessita de um específico procedimento para propiciar condições fluidodinâmicas favoráveis para difusão interna e externa e evitar a aglomeração das partículas.

SEVILLE e CLIFT (1984) estudaram o efeito da adição de líquido na fluidização de um determinado material e observaram um aumento da coesividade deste material, dificultando a fluidização. Um aumento na porosidade do leito e na velocidade na condição de mínima fluidização foi observado nas condições trabalhadas. A adição de uma pequena quantidade de líquido não volátil em material do grupo B, segundo a classificação do diagrama de GELDART (1986), mostra o comportamento fluidodinâmico do material na faixa de transição do grupo A para C.

MALHOTRA et al (1984) utilizaram partículas inertes de vidro (“balottini”) com diâmetro médio de $3,53 \times 10^{-4}$ m e $6,67 \times 10^{-4}$ m; o glicerol como fluido, por apresentar baixo grau de evaporação nas condições experimentais trabalhadas; intensidade vibracional entre 0 e 4 e razão entre massa de glicerol e massa de inertes de 0 a 0,006. Avaliaram o efeito da adição da pasta de glicerol no leito de partículas inertes no comportamento fluidodinâmico, alterando as forças existentes entre as partículas. Concluíram que os leitos de partículas úmidas, vibrados ou não, se comportaram diferentemente dos leitos com partículas secas, baseando nas curvas de escoamento e nas observações visuais.

O objetivo principal do trabalho de DALEFFE et al (2001) foi a análise do comportamento fluidodinâmico em LFC e LVF, variando a temperatura do leito, parâmetros vibracionais e o grau de saturação da pasta alimentada utilizando partículas inertes de vidro com diâmetro médio de $1,85 \times 10^{-3}$ m, valores de saturação do glicerol de 0; 0,00084; 0,00126; 0,00168; 0,00210 e 0,00420 e intensidade vibracional de 0; 0,5; 1,00 e 1,5. Para maiores valores de saturação do glicerol nas condições trabalhadas, observou-se grande instabilidade na fluidização, sendo este um fator limitante para determinar o maior grau de saturação utilizado no trabalho. Algumas conclusões foram obtidas no trabalho em relação à adição de pasta no leito: a velocidade e a queda de pressão de mínima fluidização diminuíram com o aumento da temperatura, com ou sem vibração; para o LFC a queda de pressão diminuiu com o aumento do grau de saturação e a velocidade de mínima fluidização aumentou; para o LVF a influência do grau de saturação do glicerol não se mostrou significativa para a queda de pressão e velocidade de mínima fluidização.

Medidas de densidade aparente têm sido utilizadas para determinar a fluidez de um material particulado. A razão entre os valores de densidade aparente de empacotamento até volume constante e densidade aparente aerada, é conhecida como *Índice de Hausner* (HR). Esse índice tem sido utilizado para avaliar o efeito de forma, tamanho e umidade relativa na coesividade de partículas sólidas (DIAS e RÉ, 2001). A coesividade mostra a tendência do material de aglomerar pela ação de forças de atração exercidas entre as partículas, como Van der Waals, forças eletrostáticas, pontes líquida ou sólida, etc. DIAS e RÉ (2001) trabalharam com a determinação de uma série de medidas como densidade aparente, ângulo de repouso e de queda para misturas binárias com o objetivo de estabelecer relações entre características e a macroestrutura granular como a fluidez e compressibilidade do material. Os resultados mostraram que as propriedades usadas para caracterizar o empacotamento e a fluidez dessas misturas binárias (HR e ângulo de repouso) variaram em função da fração de finos incorporados ao material.

O estado de fluidização é observado quando a força da gravidade é equilibrada pelo aumento da força de arraste do fluido. A força intermolecular diminui com a separação molecular, a' , e pode ser definida para interação entre partículas esféricas como:

$$F_{vw} = \frac{A'R}{12a'^2} \quad (2.30)$$

onde R = raio da esfera, A' = constante de Hamaker e a' = superfície de separação. A força de Van der Waals então depende da curvatura local da partícula e é praticamente independente de R como foi observado no trabalho de SEVILLE et al. (2000).

As pontes líquidas podem ser modificadas alterando a quantidade de líquido livre e suas propriedades como tensão superficial e viscosidade. Algumas aplicações práticas são encontradas em processos de aglomeração, secagem e alguns tipos de reatores e bioreatores.

GELDART et al. (1984) mostraram a possibilidade do HR distinguir quantitativamente as partículas que apresentam boa fluidez, grupo A, e partículas coesivas

de difícil fluidez, grupo C. Os seguintes limites do *Índice de Hausner* foram propostos no trabalho: $HR > 1,4$ pertencem ao grupo C; $HR < 1,25$ pertencem ao grupo A e $1,25 < HR < 1,4$ são do grupo AC – apresentando características de ambos os grupos.

Uma partícula sólida apresenta características como ângulo de repouso, ângulo de queda, habilidade de empacotamento, que controlam seu comportamento – fluidez, aglomeração – em alguma aplicação industrial ou armazenamento e transporte. Estas características dependem de algumas propriedades das partículas como diâmetro médio, distribuição granulométrica e características morfológicas. JONG e FINKERS (1999) mostraram que uma boa escoabilidade é favorecida por uma granulometria equivalente a uma área superficial pequena/unidade de massa, esfericidade, uniformidade das partículas, baixa capacidade de indução de atividade eletrostática e densidade aparente elevada. Concluíram que um valor de ângulo de repouso $> 40^\circ$ implica em material coesivo.

YU et al (1997) relacionaram o ângulo de repouso com a fluidez do material. Quanto maior o ângulo de repouso, menor a fluidez do material, principalmente para materiais coesivos, onde as forças resultantes do contato entre partículas e as que agem em cada partícula são da mesma ordem de grandeza da força gravitacional. Quanto menores os valores dos parâmetros: ângulo de repouso, compressibilidade e coesividade melhores serão as características reológicas do material particulado.

STRUMILLO e KUDRA (1986) mostram a influência do conteúdo de umidade, tipo do material e diâmetro da partícula, no comportamento fluidodinâmico em leitos fluidizados. Nos materiais que facilmente absorvem água, porosos e capilares porosos e que apresentam alto conteúdo de umidade, as características fluidodinâmicas não são alteradas comparadas com o material seco. Por exemplo, algumas resinas de troca iônica com 50% de umidade, apresentam a mesma habilidade de fluidização comparada com o material seco. Todavia, para um maior conteúdo de umidade pode começar a surgir dificuldades em atingir o regime de fluidização, aumentando significativamente a velocidade na condição de mínima fluidização. Para materiais que não absorvem água, como esferas de vidro ou areia, ocorre um aumento na velocidade de mínima fluidização para baixos conteúdos de umidade. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 2.29 para dois tipos de materiais citados que mostra o aumento na velocidade de mínima fluidização devido ao aumento do

conteúdo de umidade do material. A porosidade do leito aumenta com o aumento do conteúdo de umidade, juntamente com a não uniformidade da estrutura do leito e a formação de canais preferenciais.

Para a maioria das aplicações de secagem a maior dificuldade em iniciar o regime de fluidização corresponde a um determinado intervalo de umidade que corresponde à umidade livre, período de taxa de secagem constante. O conteúdo de umidade já não mais interfere na fluidodinâmica do leito para taxa de secagem decrescente.

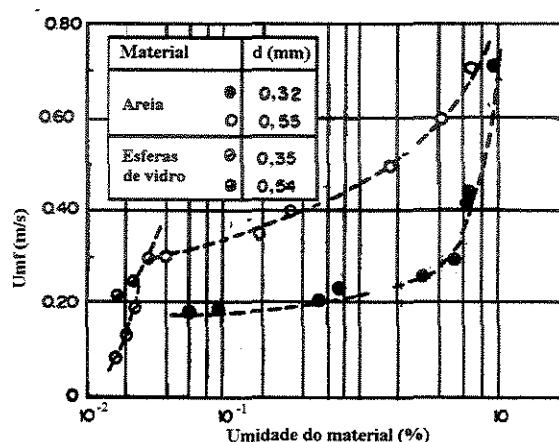


Figura 2.29 – Velocidade de mínima fluidização em função do conteúdo de umidade do material, STRUMILLO (1980)

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo teve como objetivo principal fundamentar a base de estudo para a realização do trabalho, para definir as características do equipamento desenvolvido no trabalho.

Alguns aspectos referentes ao leito vibrofluidizado foram discutidos, tais como a recomendação da imposição das vibrações somente à placa distribuidora de gás, visando a viabilidade do leito vibrofluidizado para a aplicação industrial principalmente em termos energéticos. Não foram encontrados na literatura trabalhos envolvendo o projeto de leitos vibrofluidizado para partículas finas, abaixo de 1 mm, que é o enfoque deste trabalho.

CAPÍTULO 3

3 – MATERIAL E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 - Material utilizado

O ácido adípico seco e úmido disponível para os testes experimentais realizados no trabalho foi adquirido do processo industrial logo após a saída do material do secador utilizado no processo e antes deste, respectivamente. A distribuição granulométrica do material seco utilizado encontrou-se na faixa de 75 a 600 μm , sendo o diâmetro médio de Sauter 311 μm e a classificação do material se enquadra no grupo A, segundo o diagrama de GELDART (1986). Esse material seco, com uma ampla faixa de distribuição granulométrica, foi separado com o auxílio de quatro peneiras e um vibrador mecânico por 20 minutos em quatro diferentes lotes. Os lotes foram denominados de: lote1 = partículas > 600 μm , lote2 = 420 - 600 μm , lote3 = 250 - 420 μm e lote4 = 75 - 250 μm , para um estudo da influência da distribuição granulométrica no comportamento fluidodinâmico para cada lote separado.

A escolha do material, ácido adípico (aa), baseou-se nas características de materiais de formas e tamanho diversos, que são pegajosos e pastosos quando úmidos e amplamente utilizados em leitos vibrados. Além disso o processo de secagem do material é uma etapa importante, pois determina a qualidade do produto final, tanto em nível de conteúdo final de umidade, como de especificação do tamanho e forma dos cristais. A secagem é a última etapa para posterior armazenamento do material que será utilizado em inúmeras aplicações industriais, como por exemplo: sistema de poliuretano, sínteses orgânicas, polímeros e fibras têxteis de poliamida, lubrificantes, plastificantes, adesivos, tintas e resinas, espumas flexíveis e rígidas, produção do Nylon 6.6, aplicações em indústrias alimentícias, detergentes e de calçados etc.

3.2 – Desenvolvimento e construção do equipamento

O leito vibrofluidizado e o mecanismo de vibração desenvolvido e construído para o trabalho são mostrados nas Figuras 3.1 e 3.2. O leito foi constituído por um tubo cilíndrico de acrílico de 0,10 m de diâmetro interno e 0,50 m de comprimento e revestido internamente com fitas de alumínio cortadas em tiras de aproximadamente 0,01 m, fixadas por fitas adesivas de celofane e aterrado (11) para eliminar a eletricidade estática formada pelo atrito do material com o leito de acrílico (1); e se encontra fixo por um flange de acrílico e outro fino de alumínio (2) e cantoneiras (3) fixas à mesa (4).

Uma das características principais deste equipamento é a imposição do movimento vibratório somente à placa distribuidora de gás. O eixo (5) sai do conjunto excêntrico e é fixo, soldado, à placa distribuidora (6) que impõe as vibrações ao leito de partículas sólidas. A placa distribuidora se encontra na câmara plena (7), que tem a finalidade de melhor distribuir o gás antes do contato com as partículas. A parte do sistema (II) vibra com o auxílio de uma luva de látex (8), com o objetivo de que não ocorra acúmulo das partículas finas junto à parte do sistema que vibra. Em (I) se encontra a parte fixa do sistema que apoia o leito de acrílico.

O motor de velocidade variada (9), no qual se controla a velocidade de rotação, é conectado ao conjunto excêntrico (10) por meio de uma correia. Em (11) observa-se o aterramento do leito.

Legenda

- 1- leito de acrílico revestido com fitas de celofane e alumínio
- 2- flange que fixa o leito acrílico
- 3- cantoneiras que fixam o leito à mesa
- 4- mesa
- 5- eixo de conexão do conjunto excêntrico à placa distribuidora gás
- 6- placa distribuidora gás
- 7- câmara plena, entrada de gás pelas laterais
- 8- luva de látex presa ao flange que fixa o leito de acrílico e ao plenum (altura=8cm)
- 9- motor de velocidade variada
- 10- conjunto excêntrico
- 11- aterramento do leito de acrílico

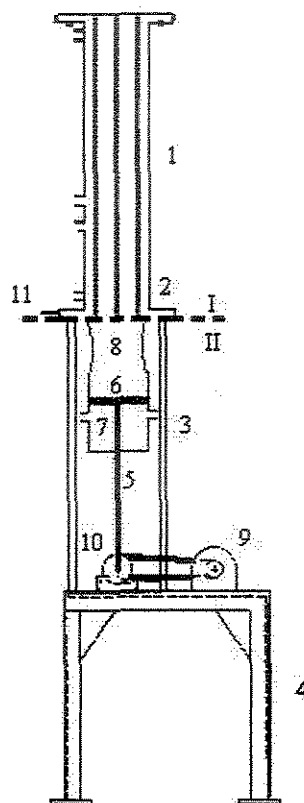


Figura 3.1 - Leito vibrofluidizado

O vibrador foi construído de forma a permitir trabalhar com uma faixa de amplitude de 0 a $4 \cdot 10^{-2}$ m sendo a frequência controlada pelo motor M 610 de 0,5cv. A frequência nos experimentos foi acompanhada por um tacômetro óptico (EXTECH instruments, faixas de 5–1000rpm ou de 1000–100000rpm, a uma distância de 50 a 150mm dependendo da luz ambiente) e a amplitude desejada regulada no próprio vibrador pelas peças justapostas (5 e 6), conforme Figura 3.2.

O conjunto excêntrico é mostrado na Figura 3.2, que se encontra fixo à mesa (1) por parafusos, é constituído por um mancal com caixa estampada - $\phi 12$ (2 e 3); um eixo de transmissão de rotação (4), o qual se move por meio de uma correia conectada ao motor de velocidade variada. Por duas peças justapostas (5 e 6) em posição excêntrica controla-se a

amplitude de vibração do sistema, com variação de centro à extremidade de 0-20mm, permitindo uma variação máxima de amplitude de 40mm. As peças são fixas por um parafuso allen, onde se regula a amplitude desejada, e a frequência é controlada pela velocidade de rotação do motor (0-2200rpm). O eixo de conexão do conjunto excêntrico (7) é fixo à placa distribuidora e impõe o movimento vibratório desejado ao sistema.

A Figura 3.3 ilustra uma foto do acoplamento do conjunto excêntrico ao motor de velocidade variada.

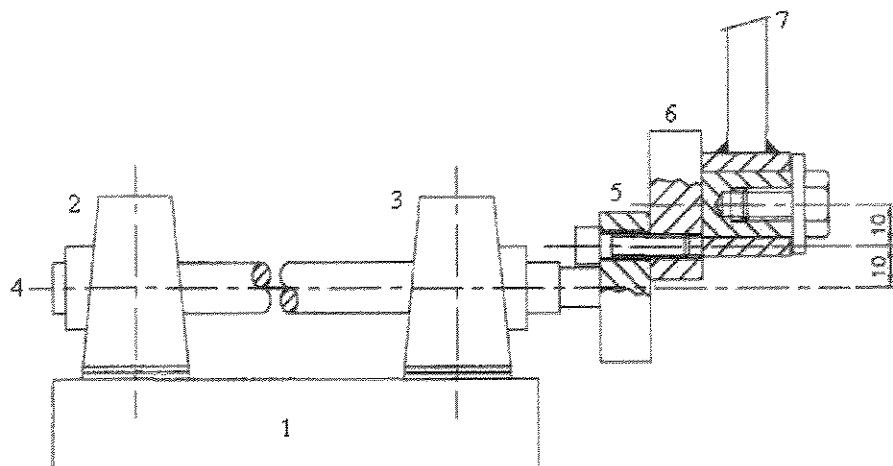


Figura 3.2 - Esquema da montagem do vibrador excêntrico

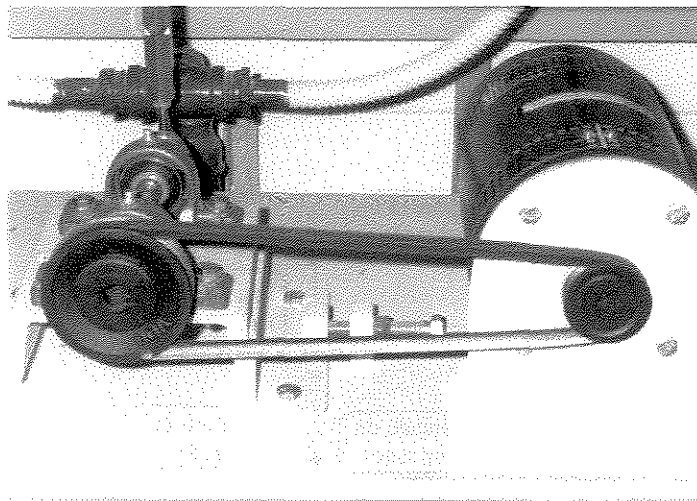


Figura 3.3 – Instalação do vibrador excêntrico

3.3 – Procedimento Experimental

3.3.1 - Caracterização física das partículas sólidas

As seguintes propriedades foram determinadas para caracterização física das partículas sólidas do material que foi submetido à secagem na indústria e no laboratório. O equipamento utilizado foi o *Powder Characteristics* – modelo PT-N– Hosokawa Microns; sendo as análises realizadas no IPT/SP, seguindo as metodologias:

- densidade aparente aerada: obtida por derramamento de uma dada massa de amostra, m_1 , através de uma peneira vibratória em um recipiente de volume conhecido, V . O material em excesso era retirado do topo do recipiente com uma régua, sem perturbar ou alterar o empacotamento;
- densidade aparente compactada: para a medida da densidade aparente compactada, uma extensão era colocada no recipiente contendo m_1 e um excesso de material era adicionado, após 180 batidas, a extensão era retirada, o excesso do material era removido do topo do recipiente e este novamente pesado, m_2 e
- ângulo de repouso: definido como o ângulo entre o plano horizontal e a inclinação de uma pilha de material particulado criada pelo derramamento uniforme feito através de uma peneira vibratória quando a altura não mais varia, conforme Figura 3.4.

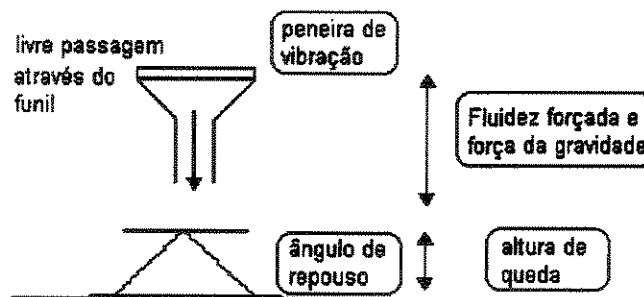


Figura 3.4 - Esquema da medida do ângulo de repouso, DIAS e RÉ (2001)

3.3.2 – Testes fluidodinâmicos para o material seco

Os testes fluidodinâmicos com o material seco foram realizados variando a carga de partículas (300, 500, 600 e 700g) e os parâmetros vibracionais, com o objetivo de avaliar o comportamento fluidodinâmico do material no equipamento desenvolvido, para o posterior estudo da secagem do aa. Pretende-se também analisar a viabilidade do equipamento desenvolvido e construído neste trabalho para processar o aa, que apresenta dificuldades de fluidizar em leitos fluidizados convencionais quando úmido.

Em cada corrida experimental obteve-se dados de queda de pressão em função da velocidade de ar crescente e decrescente.

A Tabela 3.1 mostra os intervalos das variáveis utilizados no trabalho.

Tabela 3.1 – Intervalos das variáveis utilizados no trabalho

Variáveis	Valores realizados os experimentos
Frequência de vibração (rpm)	0, 200, 350 e 435
Amplitude de vibração (m)	0, 0,005, 0,01 e 0,02
Carga de partículas (g)	300, 500, 600 e 700
Intensidade vibracional - G (-)	0, 0,5, 0,9, 1,5, 2,7 e 4,2

A Figura 3.5 mostra um esquema geral da montagem experimental, onde o ar é fornecido por um compressor radial CRE03, 2cv (1), com os acessórios: filtro e atenuador de ruídos que fazem parte do conjunto. A tubulação dimensionada para o projeto foi de 1 e ½” de aço galvanizado. Quando é necessário trabalhar à temperatura ambiente, dispõe-se na linha de um resfriador (2) com aletas de alumínio e tubos de cobre, onde o fluido refrigerante é a água. A vazão de ar é controlada por uma válvula (3) e em seguida o ar passa por um leito de sílica gel (4). Os leitos de sílica foram acoplados à linha por uniões de PVC e construídos em acrílico para facilitar a visualização da saturação da sílica. O leito é constituído por uma coluna cilíndrica de 60mm de diâmetro externo com 5mm de

espessura, e nas partes superior e inferior foram colocadas telas para possibilitar a passagem do ar e para evitar que a sílica entre na linha de alimentação. Foram acoplados na linha dois leitos de sílica em paralelo para permitir que nos experimentos de secagem, caso ocorra a saturação em um dos leitos, o outro permita continuar os experimentos (Figura 3.6). Em (5) e (6) encontra-se um ponto de tomada de pressão na linha e na placa de orifício. Pelo painel de manômetros de tubo em U (13) acompanha-se a perda de carga no leito de partículas, na placa de orifício e na linha. Para o cálculo da vazão de ar utilizou-se as medidas da temperatura do gás na entrada do leito, da perda de carga na placa de orifício e na linha de gás (OWER e PANKHURST, 1977). O aquecedor elétrico composto por um conjunto de resistências (7) encontra-se após o leito de sílica para os experimentos de secagem. O ar então chega à câmara plena (10) – construída em aço inox com o objetivo de melhorar a distribuição do ar antes do leito de partículas - parte do sistema que vibra, e passa pela placa distribuidora de gás (a qual é fixada na parte superior da câmara plena). Optou-se por utilizar uma placa distribuidora perfurada de aço inox, com 5% de área livre e diâmetro dos furos de 1mm com espaçamento triangular (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Em (9) o leito construído em acrílico com 0,10 m de diâmetro interno e altura de 0,50 m, revestido internamente por fitas de celofane e alumínio, é fixado por cantoneiras (11) à mesa (8). A mesa de 500x600x800 mm (8) é fixada ao chão para dar firmeza ao sistema de vibração e em cima desta encontra-se o vibrador excêntrico e o motor elétrico.

De (12) sai um eixo do vibrador que está fixo à placa distribuidora e proporciona a vibração ao sistema (10). Após cada corrida experimental o vibrador foi lubrificado com óleo, com o objetivo de abrandar a geração de calor por atrito e reduzir o desgaste das peças. Em (14) encontra-se o fio terra e um flange de alumínio e em (15) o ciclone construído em aço inox para coletar as partículas que são elutriadas.

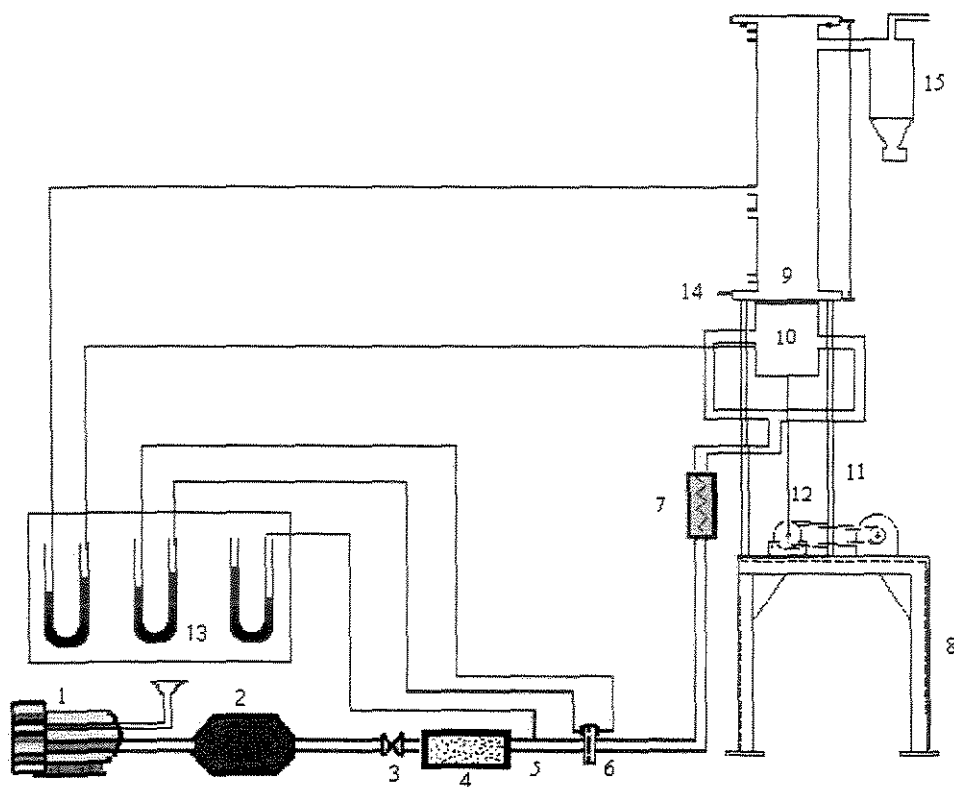
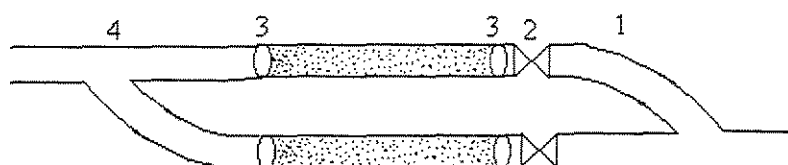


Figura 3.5 – Montagem experimental utilizada para estudo fluidodinâmico do material seco



Legenda

- 1-entrada do ar
- 2-válvulas de controle para entrada do ar em um dos leitos de sílica
- 3-uniões de PVC
- 4-saída do ar

Figura 3.6 – Esquema de Montagem dos leitos de sílica gel na linha

As medidas de vazão foram obtidas através da placa de orifício, que consiste numa fina placa de aço inox presa entre dois flanges na tubulação de ar com um orifício coaxial ao tubo. Duas tomadas de pressão foram instaladas, uma antes e outra imediatamente depois da placa e a medida acompanhada pelo manômetro (queda de pressão na placa de orifício). Para os testes experimentais utilizados foram utilizadas duas placas de orifício com diâmetros de orifício de 5 e 8 mm (para o material seco e úmido, respectivamente). A aferição da placa de orifício permite a obtenção da vazão do ar pela seguinte equação:

$$Q = k \varepsilon \alpha a_2 \sqrt{\frac{1}{1-m^2} (\Delta h) \frac{b}{k_1 + T}} \quad (3.1)$$

em que:

Q = vazão mássica (kg/min)

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

P_1 = pressão estática na linha de ar (cm H₂O)

b = pressão barométrica local (mmHg)

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

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

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

$a_1 = \frac{\pi D^2}{4}$ (área do tubo, em cm²)

$a_2 = \frac{\pi d^2}{4}$ (área do orifício, em cm²)

Δh = queda de pressão na placa de orifício (cm H₂O)

T = temperatura do ar na entrada do leito (°C)

Quando a temperatura e a altura barométrica são dados em $^{\circ}\text{C}$ e mmHg os valores de k e k_1 são respectivamente 0,0573 e 273.

3.3.3 – Testes fluidodinâmicos para o material úmido

Para realizar os testes fluidodinâmicos do material úmido, foi necessário umidificá-lo artificialmente, pois o conteúdo de umidade inicial do ácido adípico disponível no Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem estava na faixa de 0,25 b.u.% (produto comercial). O material foi umidificado da seguinte forma: pesou-se uma determinada quantidade de amostra (300g) em uma peneira que foi colocada sob um banho de água a uma temperatura de aproximadamente 70°C por um determinado intervalo de tempo mexendo com uma pá, a umidade foi então determinada no equipamento “Karl Fischer” e o material foi alimentado no leito e realizada a corrida experimental seguindo o mesmo procedimento dos ensaios fluidodinâmicos realizados à temperatura ambiente com o material seco. A carga de partículas utilizadas nos experimentos foi de 300g e os ensaios realizados com e sem vibração.

Também foram realizados testes fluidodinâmicos do material adquirido do processo industrial, antes da entrada do material no secador, com teor de umidade entre 6 a 8 % b.u (X_0), sendo o material acondicionado em três tambores fechados. Foram realizados testes no leito fluidizado com 300g deste material (6 a 8 % b.u), à temperatura ambiente, e nenhum movimento de partículas foi observado, somente o ar percolou o leito. Com o objetivo de estudar o comportamento fluidodinâmico com e sem a presença de vibração, para diferentes conteúdos de umidade do material foi proposta uma metodologia para controlar e variar o conteúdo de umidade do material a ser alimentado no leito, com o auxílio de uma estufa de secagem e esterilização. O material retirado dos tambores foi então submetido à estufa em diferentes intervalos de tempo, acondicionados em dessecadores e submetidos aos testes experimentais. Para cada conteúdo de umidade foram construídas as curvas fluidodinâmicas em diferentes condições, sem vibração e com vibração, variando os parâmetros vibracionais. A seguinte metodologia foi proposta para variar o teor de umidade do material:

- retirou-se uma amostra de 300g e efetuou-se a verificação de sua umidade, utilizando o equipamento “Karl Fischer” (X_0), do material proveniente da indústria, antes de entrar no secador industrial e acondicionado em tambores. Definida a umidade inicial do aa, o material foi colocado em um recipiente de vidro pirex, com capacidade aproximada de 1,5 l, maior que o volume ocupado pela amostra, e levado à estufa de secagem e esterilização, Modelo 515, a uma temperatura de aproximadamente 75°C;
- definiu-se um intervalo de tempo em que o material deveria ficar na estufa;
- durante este intervalo o material foi agitado por uma haste constituída por três pás de aço inox fixadas em sua ponta e formando um ângulo de 120° entre si. Estabeleceu-se um ciclo em que a haste foi girada manualmente, promovendo uma mistura do material, com o objetivo de uniformizar a umidade na amostra, evitando assim regiões de maiores ou menores teores de umidade e
- ao final do intervalo estabelecido, retirou-se a amostra e este material foi reservado em um dessecador, até atingir aproximadamente a temperatura ambiente. Sua umidade então foi determinada em “Karl Fischer” (X_1), estando disponível para os ensaios fluidodinâmicos.

As Figuras 3.7 e 3.8 ilustram o equipamento utilizado para realizar o controle da umidade do material para ser submetidos aos testes fluidodinâmicos variando o conteúdo de umidade.

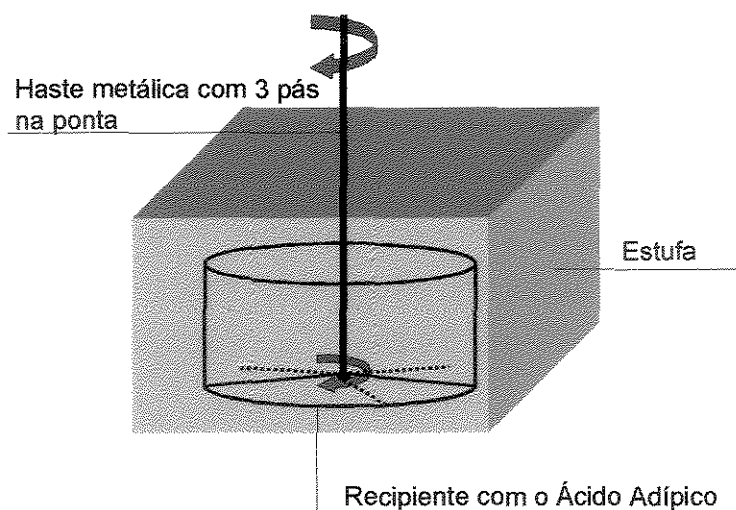


Figura 3.7 - Representação esquemática do equipamento usado para a padronização da umidade ácido adípico

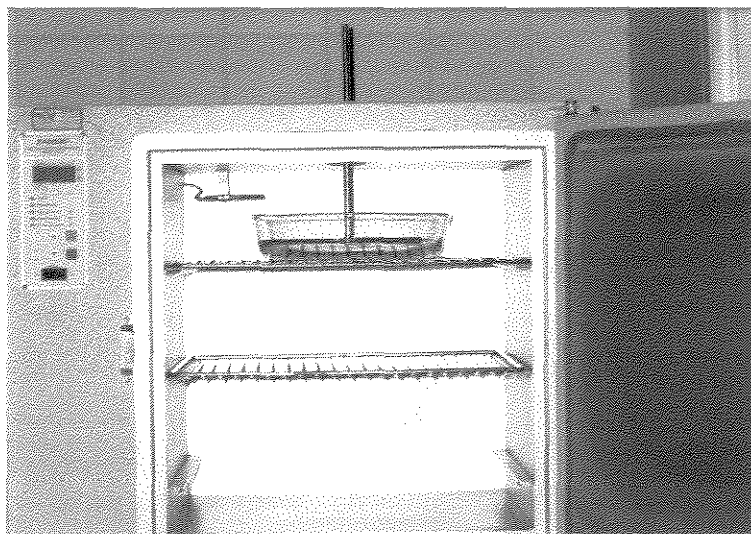


Figura 3.8 – Ilustração do esquema proposto

3.3.4 – Sistema de amostragem

Foi desenvolvido um sistema de amostragem para obtenção dos dados de umidade em função do tempo sem causar alteração significativa de massa no leito, portanto não provocando alterações no regime fluidodinâmico. Alguns testes preliminares foram realizados com o sistema de amostragem utilizado para a construção das curvas de secagem e o sistema mais adequado e que foi utilizado no trabalho é descrito a seguir.

O sistema de amostragem é constituído por um tubo em acrílico com diâmetro de 5 cm e altura de 18 cm fixo por um suporte à parede do Laboratório; a tampa de fundo do tubo com um sistema de rosca, possui um suporte (copinho) para adaptar um pesa filtro (20x20 mm), onde foram recolhidas as amostras em determinados intervalos de tempo do experimento. A tampa na parte superior do tubo em acrílico foi perfurada e faz a conexão com uma haste em U de aço inox, com diâmetro interno de 4 mm e externo de 6 mm. Uma das pontas da haste foi colocada dentro do pesa filtro e uma tela de aço inox de 600 μm foi colocada na parte superior do pesa filtro e fixada na haste com o objetivo de evitar o escape de partículas para fora do pesa filtro. Na parte superior do tubo em acrílico foi feita uma picagem para acionar o vácuo ao sistema; e a outra ponta da haste faz a “pescagem” do material no leito por um sistema de mola, através do qual a amostra é succionada e recolhida no pesa filtro. Utilizou-se uma bomba a vácuo (20) que permite a variação de pressão e através de testes preliminares chegou-se a uma pressão em que as perdas de material foram desprezíveis.

A Figura 3.9 apresenta o esquema do sistema de amostragem, utilizado para determinação do teor de umidade em função do tempo (curvas de secagem) e a seguinte metodologia foi utilizada:

- tampou-se o leito devidamente carregado com o material a um determinado conteúdo de umidade, juntamente com a haste em aço inox (tubo em U);
- o tubo em acrílico (19) permitiu a visualização da amostragem do material e em um determinado intervalo de tempo a bomba à vácuo foi acionada e recolhida a

amostra dentro do pesa filtro, que imediatamente foi tampado e acondicionado em dessecador;

- em cada pescagem realizada no leito recolheu aproximadamente 0,3 g de material, que foi suficiente para determinação do teor de umidade no equipamento “Karl Fischer” e
- após a retirada de cada amostra o vácuo foi acionado novamente a uma pressão maior com uma das pontas da haste em U fora do leito de partículas com o objetivo de garantir a retirada todo o material do tubo da haste, sem causar influências na determinação do conteúdo de umidade da próxima amostragem.

As Figuras 3.10 a 3.11 mostram o sistema experimental com o sistema de amostragem desenvolvido anexado à montagem experimental descrita anteriormente.

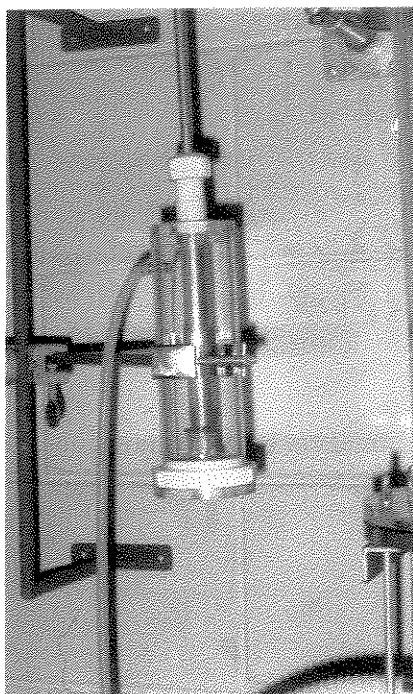


Figura 3.9 – Tubo em acrílico que suporta o pesa filtro com a amostra a ser retirada do leito em determinados intervalos de tempo

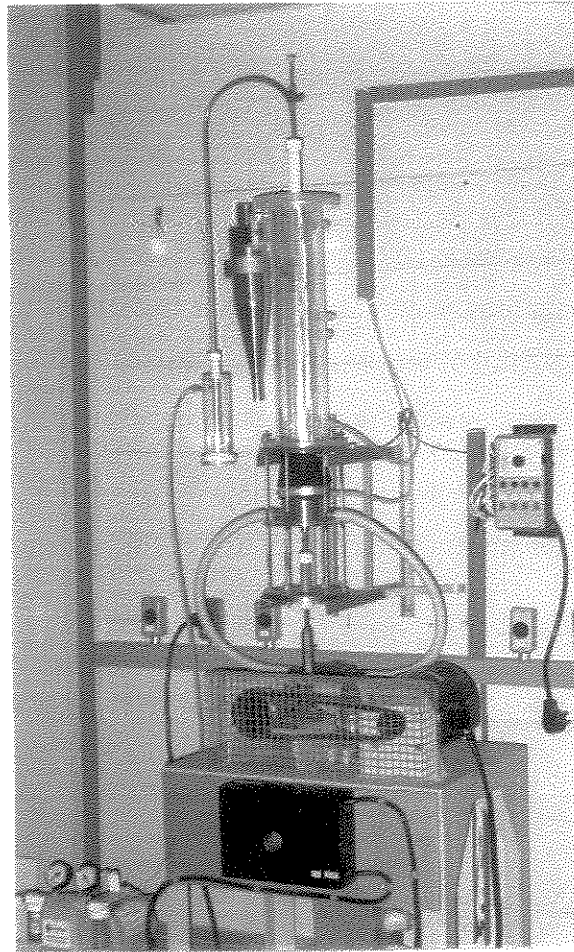


Figura 3.10 – Montagem Experimental com o sistema de amostragem

LEGENDA

- 1-compressor
- 2-resfriador
- 3-válvula de controle de vazão
- 4-leitos de sílica gel
- 5-tomada de pressão na linha
- 6-tomada de pressão na placa de orifício
- 7-aquecedor
- 8-mesa de fixação do motor e vibrador
- 9-leito em acrílico revestido
- 10-câmara plena em aço inox
- 11-cantoneiras
- 12- eixo do vibrador conectado à placa dist.
- 13-painel com os manômetros em U
- 14-controlador da altura do amostrador e mola
- 15 e 17 – fio terra
- 16-ciclone
- 18-pesa filtro (20x20mm)
- 19-tubo em acrílico com picagem para acionar o vácuo
- 20-bomba à vácuo – FANEM
- 21-termohigrômetro para acompanhar a UR e a temperatura do ar de entrada

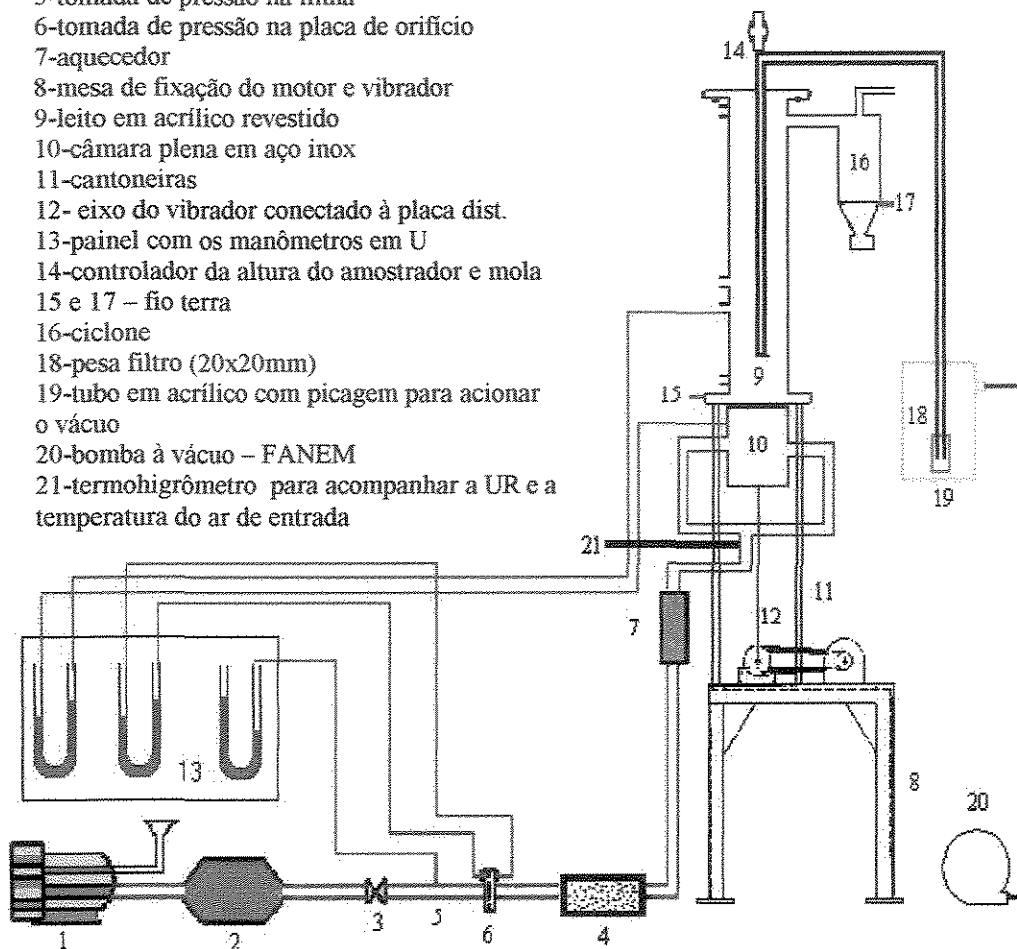


Figura 3.11 – Esquema da montagem experimental com o sistema de amostragem acoplado ao sistema

3.3.5 - Experimentos de Secagem

Para os experimentos de secagem a seguinte metodologia foi seguida:

- a umidade inicial do material a ser alimentado no leito (X_1) foi determinada no equipamento “Karl Fischer” para uma carga de 300g de material e colocado em dessecador;
- após o soprador (1) ser ligado, regulou-se a velocidade do gás através da válvula (3), o aquecedor elétrico foi ligado para atingir a temperatura desejada e o sistema funcionou sem carga de sólidos, até que o regime térmico fosse estabelecido. Para cada temperatura de trabalho, foram definidos em ensaios preliminares, a potência e o número de resistências necessárias para atingir a temperatura desejada ($T = 60, 80$ e 100^0C);
- o sistema de aquecimento e a válvula foram desligados;
- o leito então foi alimentado rapidamente com o material acondicionado no dessecador (X_1), com o auxílio de uma colher;
- novamente o aquecimento e a velocidade do gás foram acionados e o sistema de vibração, a uma determinada intensidade vibracional ($G=0,5$), foi ligado. Para cada condição experimental foi fixado um intervalo de tempo para que a vibração fosse interrompida, e isso aconteceu quando pode-se visualizar que o material já se movimentava com facilidade, ocorrendo a fluidização convencional;
- em determinados intervalos de tempo de processo durante a secagem realizou-se a coleta do material ($\pm 0,3\text{g}$) com o sistema de amostragem descrito;
- o pesa filtro foi imediatamente tampado e em seguida a umidade do material determinada no equipamento “Karl Fischer”, X'_1 ;
- com os dados da umidade (X'_1) em função do tempo, para cada temperatura e velocidade do gás, plotou-se as curvas de secagem;

- a umidade relativa do gás e a temperatura na entrada do leito também foram acompanhadas nos experimentos por um termohigrômetro (21), sendo necessário o acompanhamento da umidade relativa do gás na entrada do leito devido à variação observada visualmente na fluidodinâmica do material em dias mais úmidos e
- a câmara plena de aço inoxidável, com diâmetro de 10cm e o diâmetro de entrada do ar pelas laterais de 1,7 cm foi projetada com base em testes preliminares, realizados com uma câmara plena de PVC. Os experimentos realizados à temperatura ambiente foram todos realizados com a câmara em PVC e os de secagem com a câmara de aço inox.

3.3.5.1 – Determinação do conteúdo de umidade no equipamento “Karl Fischer”

Devido à pequena quantidade de amostra retirada do leito em cada intervalo de tempo e ao baixo conteúdo de umidade no produto final, alguns cuidados foram tomados para reduzir os possíveis erros experimentais na determinação da umidade no equipamento “Karl Fischer”:

- com o objetivo de impedir a reabsorção de umidade proveniente do ambiente, as amostras recolhidas nos pesa filtros foram imediatamente fechadas durante todo o procedimento de análise e colocadas em dessecador;
- cada amostra recolhida foi submetida a medidas no equipamento “Karl Fischer” em triplicada, apresentando valores próximos, sendo considerada a média entre os valores obtidos;
- a climatização do ambiente proporcionou uma maior reprodutibilidade nas 3 medidas efetuadas, para cada amostra recolhida do leito, no equipamento “Karl Fischer”. Para o controle da temperatura e da umidade relativa do ambiente utilizou-se um equipamento de ar condicionado (CONSUL, Air Master 7500 Btu) e um desumidificador de ar (ARSEC, modelo 160M3-U) que ficaram

ligados no laboratório, durante 24 horas, em todos os experimentos de secagem e

- dentro do compartimento de pesagem da balança analítica, foram colocados dois beakers com sílica gel para manter o ambiente o mais seco possível, durante a pesagem do material utilizado para realizar a determinação da umidade.

A Figura 3.12 ilustra o equipamento “Karl Fischer” utilizado neste trabalho.

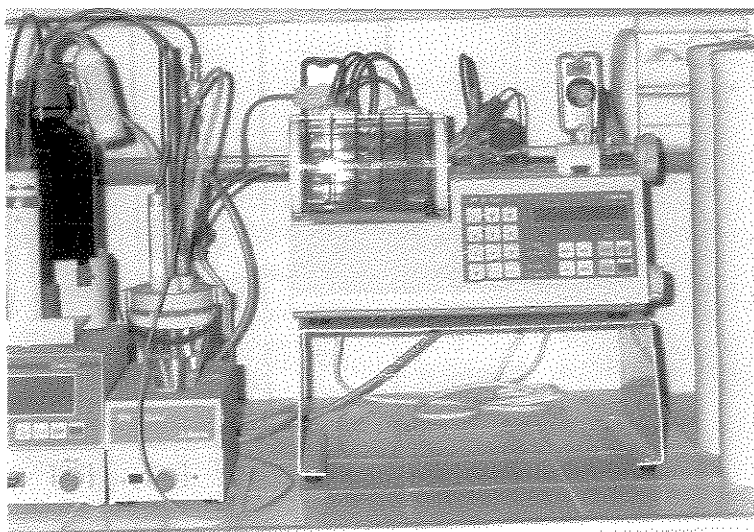


Figura 3.12 – Equipamento para determinação do conteúdo de umidade,
“Karl Fischer”

3.3.5.2 – Obtenção das Isotermas de dessorção

As isotermas de dessorção de umidade foram obtidas às temperaturas de 60, 80 e 100°C, pelo método estático, nas temperaturas do processo de secagem. As isotermas de dessorção são de extrema importância no processo de secagem, com o objetivo de se conhecer os teores mínimos de umidade para uma dada condição a qual o material será submetido ao processo de secagem.

Foram utilizadas soluções salinas para controle da umidade relativa do ambiente. A escolha de soluções saturadas de sais foi devida à facilidade da manutenção da umidade relativa do ambiente constante.

A Tabela 3.2 mostra os sais utilizados e as umidades relativas (UR) em função da temperatura, segundo GREENSPAN (1977), tendo sido realizada uma extrapolação das curvas para alguns sais. As soluções salinas foram preparadas a 100°C, para garantir a saturação na temperatura na qual os ensaios foram conduzidos.

As amostras de material foram colocadas em placas de Petri, ± 2 g, suportadas em um recipiente de acrílico com os pés em aço inox e introduzidas em frascos herméticos de vidro de 750 ml., contendo as soluções saturadas de sal. Os frascos foram colocados na estufa a uma determinada temperatura.

As amostras foram acompanhadas através de determinações sucessivas de massa das amostras em intervalos de 48 horas, até o equilíbrio, alcançado quando a massa da amostra fica constante. Após alcançado o equilíbrio, o conteúdo de umidade de equilíbrio é determinado na estufa a vácuo por 24 horas à temperatura de 70°C.

Tabela 3.2 - Sais utilizados e suas respectivas umidades relativas do ambiente (UR %), GREENSPAN (1977)

Sais Utilizados	UR, % (40°C)	UR, % (60°C)	UR, % (80°C)
1) Cloreto de Lítio	0,1121	0,1095	0,1051
2) Cloreto de Magnésio	0,3160	0,2926	0,2605
3) Carbonato de Potássio	0,4325	0,4330	0,4340
4) Nitrato de Magnésio	0,4842	0,4250	0,3675
5) Brometo de Sódio	0,5317	0,4966	0,5143
6) Cloreto de Sódio	0,7468	0,7450	0,7629
7) Sulfato de Amônio	0,7991	0,7840	0,7710
8) Cloreto de Potássio	0,8232	0,8025	0,7890

CAPÍTULO 4

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os itens a seguir apresentam os resultados obtidos no trabalho, tais como: a análise fluidodinâmica para o material seco com o objetivo de obter as curvas fluidodinâmicas características para o leito vibrofluidizado desenvolvido e definir os parâmetros ótimos de vibração baseado em um planejamento experimental; a análise da influência da vibração para diferentes faixas de tamanho das partículas (distribuição granulométrica) no comportamento fluidodinâmico; a análise do comportamento fluidodinâmico do material umidificado artificialmente e proveniente da indústria, com o objetivo de definir os parâmetros vibracionais e velocidade do gás para os experimentos de secagem; a análise do material em microscópio óptico com aquecimento para definir os limites de temperatura dos experimentos de secagem e finalmente, o estudo da secagem do material e das isotermas de dessorção e finalizando com a análise do produto final em microscópio eletrônico de varredura.

4.1 – Análise fluidodinâmica do material seco

O estudo fluidodinâmico do ácido adípico (aa) em leito vibrofluidizado (LVF) foi realizado com a finalidade de verificar os aspectos dinâmicos, comparar o comportamento com o leito fluidizado convencional (LFC) e analisar a viabilidade do equipamento desenvolvido para o posterior estudo da secagem do material, o qual apresenta dificuldades de fluidizar em LFC, quando úmido.

A distribuição granulométrica para o material proveniente da indústria, após a saída do secador, estava na faixa de 75 a 600 μm , obtendo-se um diâmetro médio de Sauter de 311 μm e uma umidade especificada em torno de 0,25 % b.u.

Os gráficos de queda de pressão em função da velocidade do ar (crescente e decrescente) foram obtidos em função da carga de partículas (300, 500, 600 e 700g) e parâmetros vibracionais (frequência e amplitude de vibração).

As Figuras 4.1 a 4.4 ilustram o comportamento fluidodinâmico para uma carga de 600g, sendo o mesmo procedimento aplicado para as outras cargas de partículas citadas. Os resultados obtidos para as demais cargas foram semelhantes, exceto para a carga igual a 700g onde o efeito da vibração foi reduzido.

A velocidade na condição de mínima vibrofluidização foi determinada no ponto em que foi observado visualmente o início de um movimento das partículas em relação às outras - velocidade de mínima mistura definida no trabalho de GUPTA e MUJUMDAR (1980) e a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização, no ponto correspondente à velocidade na condição de mínima vibrofluidização, nas curvas de queda de pressão em função da velocidade de ar. Para o leito fluidizado convencional, a velocidade na condição de mínima fluidização corresponde ao ponto onde nas curvas observou-se a estabilização da queda de pressão, garantindo uma fluidização completa.

Nos casos em que ocorreram a formação de dois patamares (pontos 1 e 2 da Figura 4.4), o ponto 1 corresponde ao início da mistura das partículas e em 2 o leito se encontra na condição de fluidização plenamente desenvolvida apresentando uma alta taxa de circulação de partículas, condições verificadas por observação visual. O comportamento fluidodinâmico apresentado nessa figura é também encontrado na literatura como característico de fluidização com vibração, STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram a suavização na curva quando a vibração foi imposta ao sistema comparada ao LFC e uma redução na velocidade de mínima vibrofluidização de aproximadamente 0,24 para 0,18 m/s, velocidades determinadas no ponto onde observou-se visualmente o movimento das partículas. Para uma intensidade vibracional maior, $G=1,5$, Figura 4.3, a redução na queda de pressão foi mais acentuada e a velocidade de mínima vibrofluidização reduziu para aproximadamente 0,15 m/s.

Para o LVF os parâmetros vibracionais frequência (f) e amplitude (a) foram alterados na faixa determinada por testes preliminares, nos quais se verificou mudanças no comportamento do leito de partículas e foram estabelecidos valores máximos permitidos pela construção e limitações do equipamento. A Tabela 4.1 mostra os intervalos dos parâmetros utilizados no trabalho.

Tabela 4.1 – Intervalos de operação dos parâmetros

Parâmetros	Intervalos
Frequência de vibração (rpm)	0, 200, 350 e 435
Amplitude de vibração (m)	0, 0,05, 0,01 e 0,02
Carga de partículas (g)	300, 500, 600 e 700
Intensidade vibracional, G (-)	0, 0,5, 0,9, 1,5, 2,7, 4,2

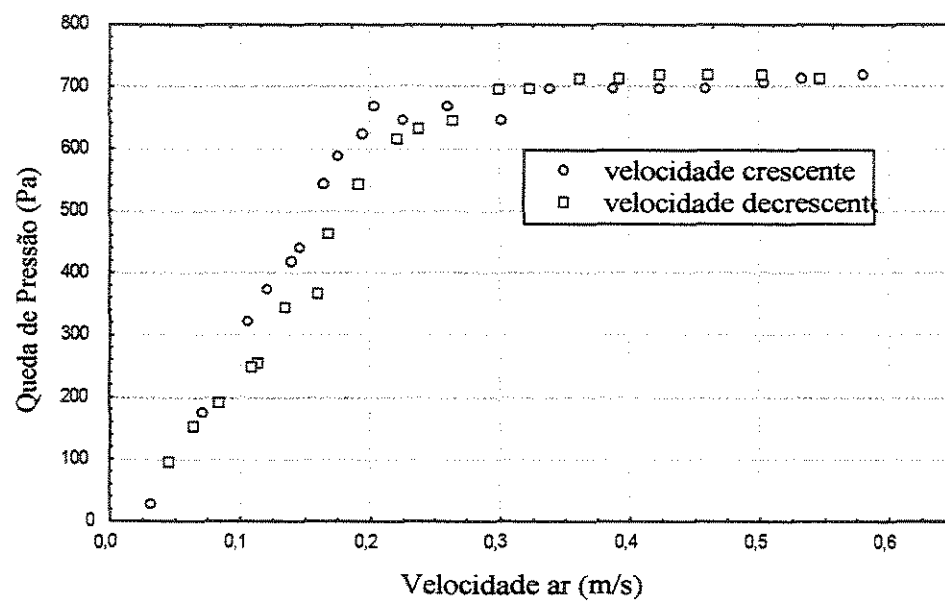


Figura 4.1 - Queda de pressão em função da velocidade ar,
carga = 600g , sem vibração (LFC)

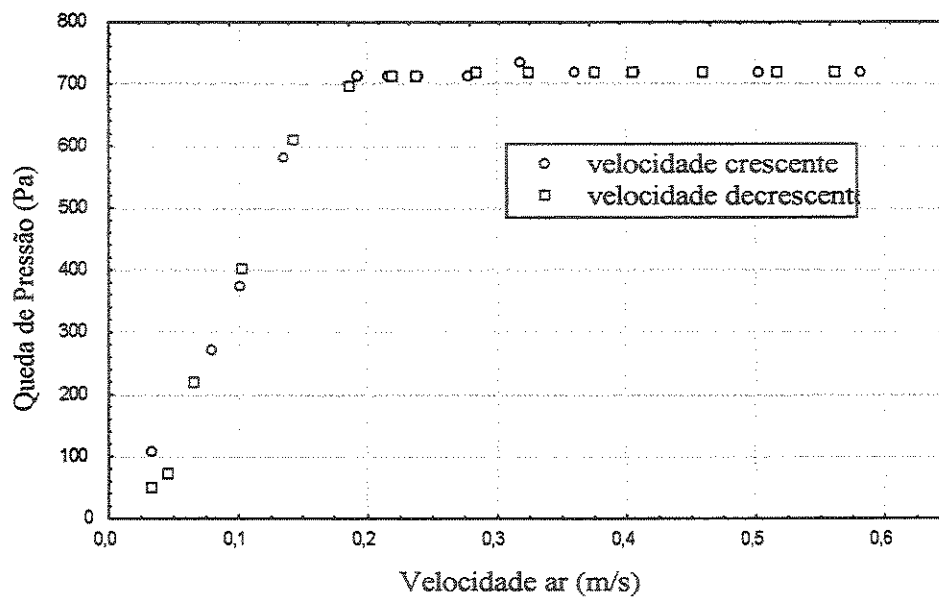


Figura 4.2 - Queda de pressão em função da velocidade ar,
carga = 600g, $f = 200\text{rpm}$, $a = 0,01\text{m}$, $G = 0,5$

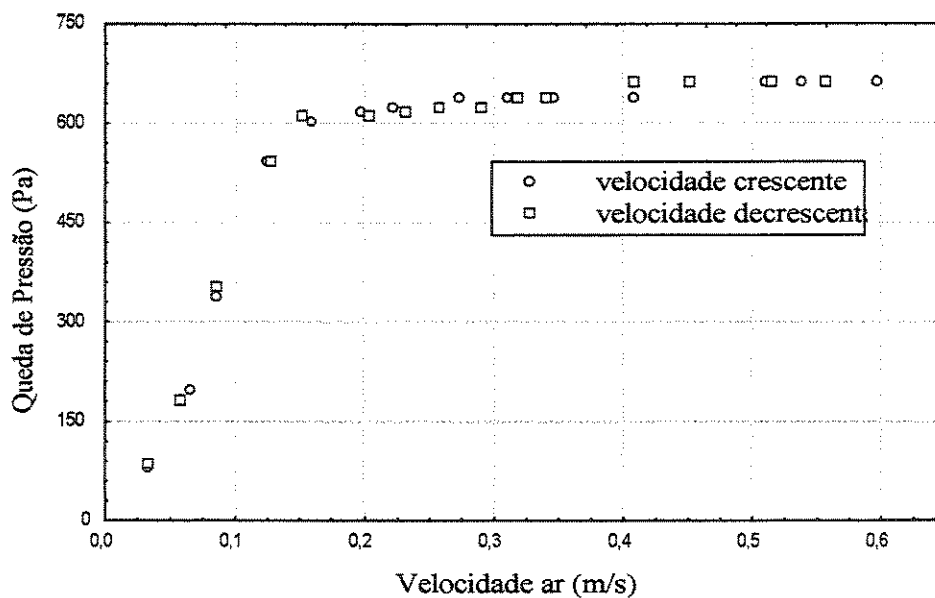


Figura 4.3 - Queda de pressão em função da velocidade ar,
carga = 600g, $f = 350\text{rpm}$, $a = 0,01\text{m}$, $G = 1,5$

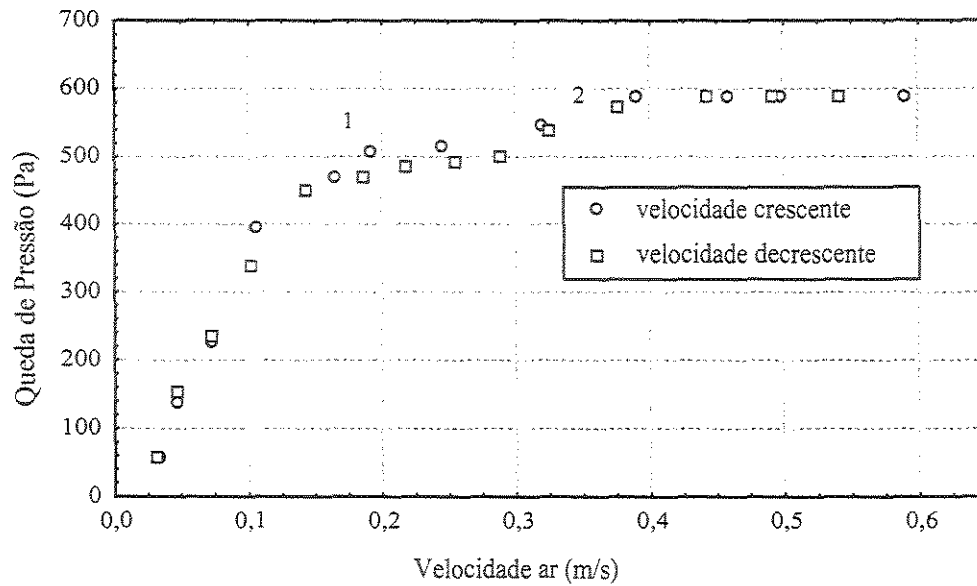


Figura 4.4 – Queda de pressão em função da velocidade ar,
carga = 600g, $f = 350\text{rpm}$, $a = 0,02\text{m}$, $G = 2,7$

A partir das curvas de fluidização foi possível realizar uma comparação entre os dois sistemas (LFC – sem vibração e LVF) através da queda de pressão na condição de mínima fluidização.

As Figuras 4.5 a 4.9 mostram a influência da amplitude e da frequência sobre a queda de pressão para uma determinada carga de partículas. Os pontos obtidos experimentalmente foram ligados somente para uma comparação entre as diferentes condições experimentais, sem e com vibração.

Pela Figura 4.9 observa-se a redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização comparada com o LFC, dependendo da faixa de frequência utilizada como consequência da vibração imposta ao sistema. Observa-se uma suavização da curva para $a=0,01\text{m}$ e $f=200\text{rpm}$, comparada com a do leito sem vibração, LFC. Para $a=0,02\text{m}$ e $f=350\text{rpm}$ observa-se neste caso a formação de dois patamares, como na Figura 4.4.

Trabalhando com baixos valores de velocidade do gás (leito fixo) a queda de pressão para o sistema com vibração mostrou-se maior que para o convencional (sem vibração), principalmente aumentando a carga de partículas no leito, pois os pontos de contato

partícula-partícula aumentam e consequentemente, diminuem os espaços vazios existentes no leito, efeito da compactação do material.

Como pode-se observar nas Figuras 4.5 – 4.9, as alterações nas curvas de queda de pressão em função de velocidade gás são dependentes dos parâmetros vibracionais.

Nas curvas fluidodinâmicas obtidas neste trabalho verificou-se uma redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização entre 2 a 32% dependendo da faixa dos parâmetros vibracionais utilizados e da carga das partículas sólidas presente no leito. Nota-se apenas uma suavização nas curvas quando se trabalha com condições moderadas de frequência e amplitude comparando com o leito sem vibração.

Um aumento na altura inicial do leito (carga de partículas sólidas) reduz a influência das vibrações sobre as partículas e a queda de pressão na condição de mínima fluidização se aproxima da condição sem vibração, como foi observado para uma carga maior que 700g. Na Figura 4.9 observa-se uma redução na queda de pressão na condição de mínima fluidização de no máximo 8,0%. No trabalho de GUPTA e MUJUMDAR (1980) também foi observado o efeito da vibração variando a altura do leito, onde concluíram que o efeito da vibração praticamente desaparece para alturas de leito maiores que 50 mm.

Através das Figuras 4.5 – 4.9 pode-se acompanhar a variação da amplitude e frequência ao mesmo tempo, verificando que os dois parâmetros causam variações nas curvas fluidodinâmicas. Nas Figuras 4.5 e 4.6 constata-se uma redução na queda de pressão na condição de mínima fluidização de 4,4 a 24%.

A Figura 4.8 mostra a variação nas curvas com a amplitude e frequência de vibração ao mesmo tempo, onde o efeito da amplitude na redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização mostrou-se mais significativo comparando as curvas a $a=0,01$ m, $f=200$ rpm e $a=0,01$ m, $f=350$ rpm com $a=0,01$ m, $f=350$ rpm e $a=0,02$ m, $f=350$ rpm.

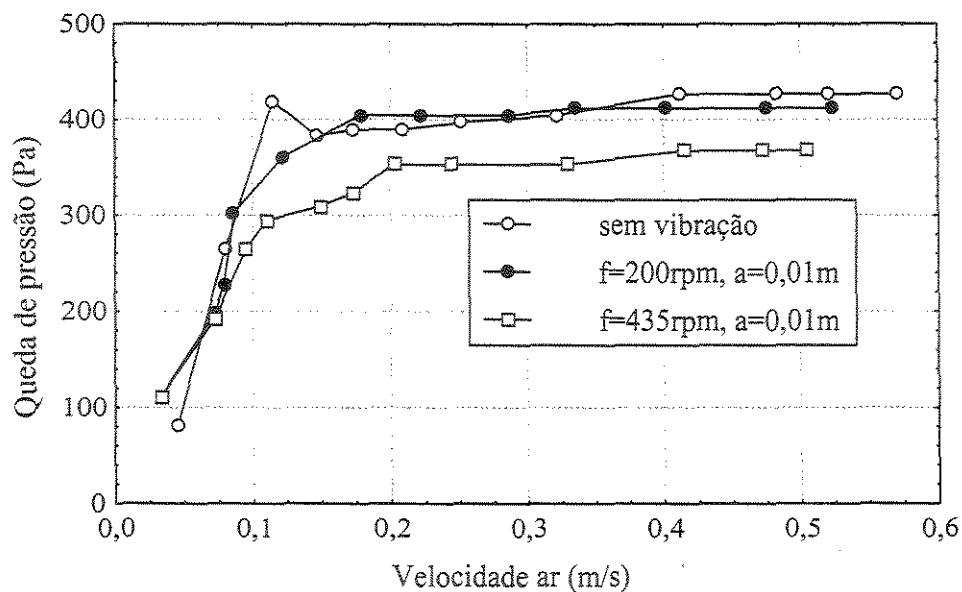


Figura 4.5 – Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 300g

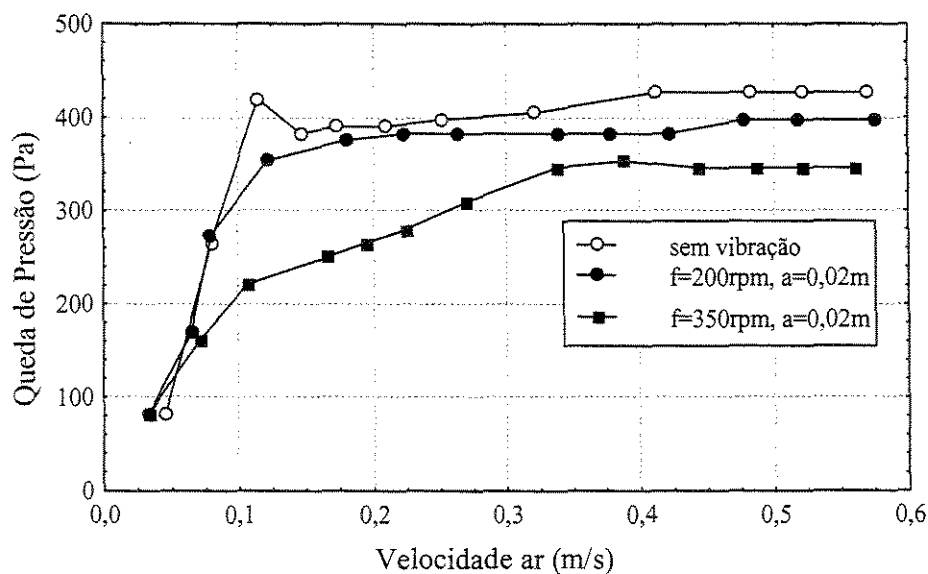


Figura 4.6 – Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 300g

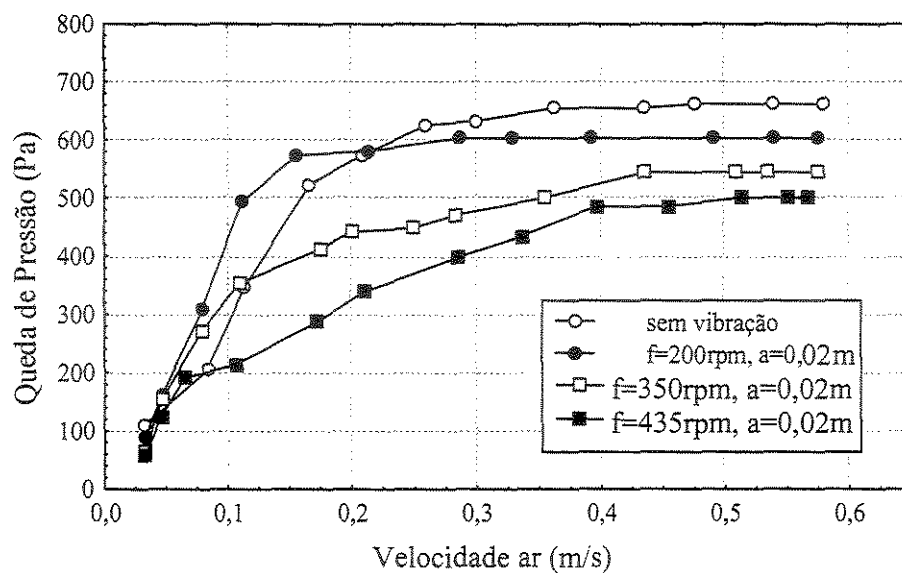


Figura 4.7 - Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 500g

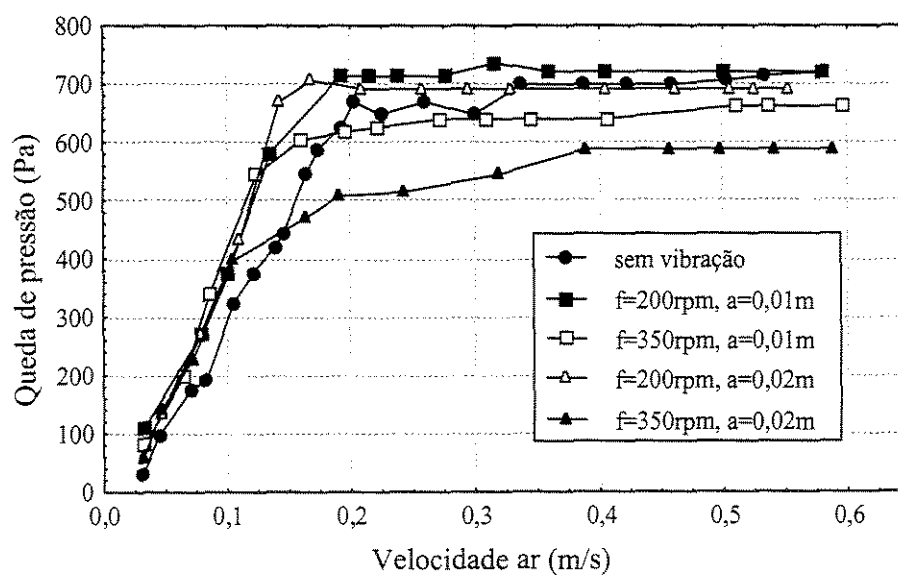


Figura 4.8 – Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 600g

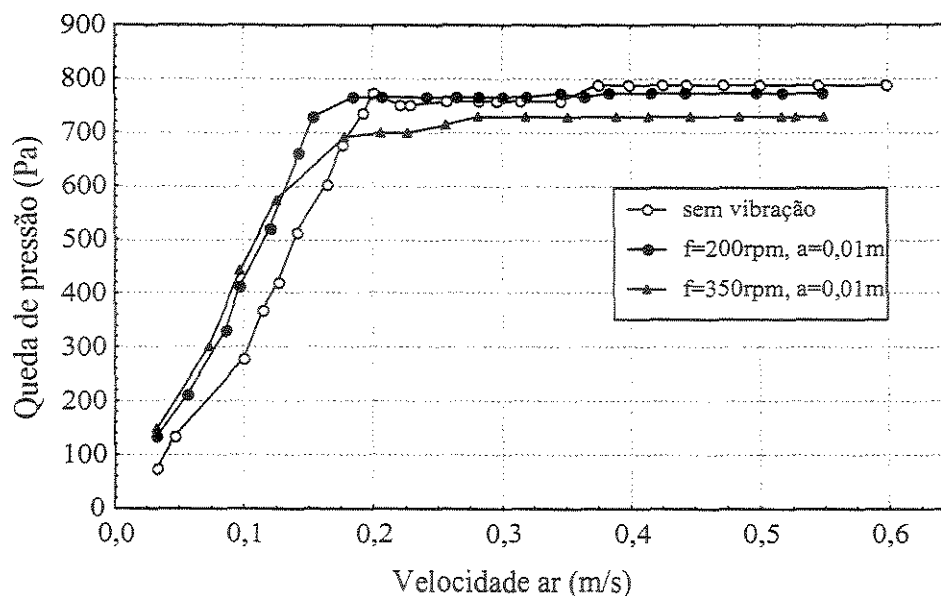


Figura 4.9 – Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com ácido adípico, carga partículas = 700g

A comparação das curvas obtidas no trabalho com aquelas encontradas na literatura, STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980, por exemplo, permite afirmar que a imposição das vibrações somente a placa distribuidora do gás caracteriza o equipamento desenvolvido como um LVF. Esta técnica da imposição da vibração somente à placa apresenta vantagens, principalmente em termos energéticos, comparada à vibração imposta sobre o equipamento todo.

As Tabelas 4.2 a 4.5 mostram a redução da queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização variando a intensidade vibracional (G), em relação à queda de pressão na condição de mínima fluidização no LFC.

Tabela 4.2 – Redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização variando a intensidade vibracional (G) para uma carga de 300g

G (-)	Redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização em relação ao LFC (%)
0,5	4,4
0,9	8,1
2,1	20,0
2,7	24,0

Tabela 4.3 – Redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização variando a intensidade vibracional (G) para uma carga de 500g

G (-)	redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização em relação ao LFC (%)
0,9	10,0
2,7	22,2
4,2	32,0

Verificou-se um aumento na redução da queda de pressão com o aumento de G e para $G > 1,0$, a redução é mais acentuada. Dependendo da carga de partículas utilizadas observou-se que para $G > 1,0$ a faixa de redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização é significativa ficando entre 20 – 32% (Tabelas 4.2 e 4.3).

Tabela 4.4 – Redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização variando a intensidade vibracional (G) para uma carga de 600g

G (-)	redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização em relação ao LFC (%)
0,9	3,2
1,5	8,0
2,7	24,0

Tabela 4.5 – Redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização variando a intensidade vibracional (G) para uma carga de 700g

G (-)	Redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização em relação ao LFC (%)
0,5	2,2
1,5	8,0

Na literatura encontram-se algumas correlações para cálculo da queda de pressão na condição de mínima fluidização em leitos vibrofluidizados.

A seguinte equação polinomial foi obtida por uma análise estatística para a eficiência de vibração, k_v (Erdész e Ormós, 1984):

$$k_v = 1,06 - 0,03452.G + 0,00056.G^2 - 0,00007.G^3, \text{ para } G > 1,0 \quad (4.1)$$

onde k_v é a eficiência de vibração, definida como a razão entre as perdas de carga na condição de mínima fluidização em leitos fluidizados com e sem a presença de vibração, ou seja:

$$k_v = \frac{(\Delta P_{mf})_v}{(\Delta P_{mf})_s} \quad (4.2)$$

Utilizando a Equação 4.1 calculou-se os valores de k_v para os valores de G utilizados nos experimentos (somente para $G > 1,0$), obtendo-se desvios na faixa de 8,0 a 17,4% (Tabela 4.6) comparando-se os valores de k_v calculados com os valores obtidos experimentalmente, utilizando a Equação 4.2. Os valores dos desvios foram obtidos comparando com os valores experimentais e pode ser considerado satisfatório pela complexidade do sistema gás-sólido analisado.

Tabela 4.6 – Cálculo da eficiência de vibração - k_v

Carga de partículas (g)	G (-)	k_v –calculado	$k_{v\text{experimental}}$	desvio(%)
300	2,1	0,98	0,84	14,3
300	2,7	0,96	0,81	15,6
500	2,7	0,96	0,82	14,6
500	4,2	0,92	0,76	17,4
600	1,5	1,0	0,92	8,0
600	2,7	0,96	0,84	12,5
700	1,5	1,0	0,90	10,0

4.2 - Análise da influência da distribuição granulométrica das partículas no comportamento fluidodinâmico em LFC e LVF

As partículas com diâmetro médio de $311\mu\text{m}$ foram separadas em quatro diferentes lotes, com auxílio de peneiras e vibrador mecânico: lote1 = partículas $> 600\mu\text{m}$, lote2 = $600 - 420\mu\text{m}$, lote3 = $420 - 250\mu\text{m}$ e lote4 = $250 - 75\mu\text{m}$.

As Figuras 4.10 a 4.13 ilustram o material estudado nas diferentes faixas de tamanho analisadas.

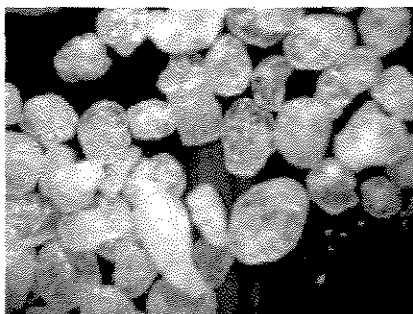


Figura 4.10 – Ácido adípico – lote 1, $d_p > 600\mu\text{m}$

Microscopia Óptica, aumento 40x

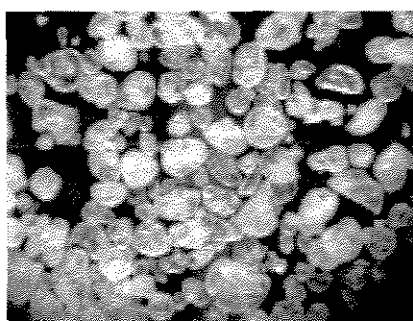


Figura 4.11 – Ácido adípico – lote 2 - d_p entre 600 e 420 μm ,

Microscopia Óptica, aumento 40x

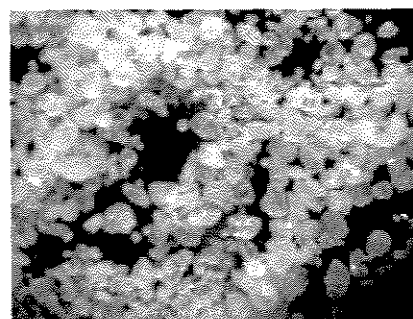


Figura 4.12 – Ácido adípico – lote 3 - d_p entre 420 e 250 μm ,

Microscopia Óptica, aumento 40x

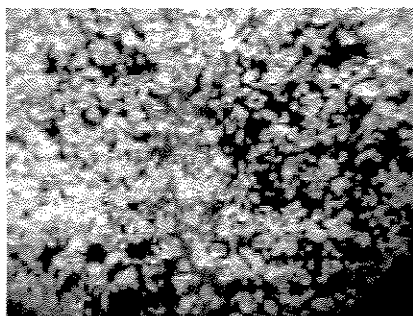


Figura 4.13 – Ácido adípico – lote 4 d_p entre 250 e 75 μ m,
Microscopia Óptica, aumento 40x

Foram coletados dados de queda de pressão em função da velocidade do ar com o objetivo de avaliar o comportamento fluidodinâmico para as diferentes faixas de tamanho do material estudado variando a frequência de vibração (Figuras 4.14 a 4.17). Os testes experimentais foram realizados com uma carga fixa de partículas de 300g para os quatro lotes, variando a frequência e a amplitude de vibração.

As Figuras 4.14 a 4.17 mostram, para cada lote de partículas analisado, as curvas da queda de pressão em função da velocidade ar variando os parâmetros vibracionais ($f=0$, 200, 350 e 435 rpm). As faixas de frequência utilizadas foram: 200, 350 e 435rpm e $f=0$ (sem vibração) para uma amplitude de 0,01m.

Observa-se uma redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização, comparada com o LFC (Figuras 4.14 a 4.17), cujo valor depende da faixa de frequência utilizada. As alterações nas curvas de queda de pressão em função de velocidade gás são dependentes da frequência de vibração imposta ao sistema.

Para frequência de vibração moderada, $f=200$ rpm, notou-se apenas uma suavização nas curvas fluidodinâmicas obtidas comparando com o leito sem vibração, $f=0$.

Nas curvas fluidodinâmicas obtidas neste trabalho verificou-se uma redução mais acentuada da queda de pressão na condição de mínima fluidização para as partículas menores, como mostra a Figura 4.17.

Foram obtidos valores experimentais de k_v , eficiência de vibração a partir das Figuras 4.14 a 4.17 e definida como a razão entre a queda de pressão na condição de mínima fluidização em leitos fluidizados com e sem a presença de vibração.

A Figura 4.18 mostra a variação do fator de vibração (F_v) ou de k_v , eficiência de vibração, em função da frequência de vibração para cada lote analisado. Para uma carga de 300g as partículas menores – lote 4 – foram mais afetadas pelo efeito da vibração comparando com as partículas maiores – lote 1. Esse fenômeno pode ser explicado devido às forças interpartículas para as partículas menores serem maiores, ocasionando a formação de canais preferenciais e uma queda de pressão menor. O contrário foi observado no trabalho de GUPTA e MUJUMDAR (1980), onde as partículas maiores de sílica gel (2600 μm) foram mais afetadas devido ao efeito da vibração comparadas às partículas menores (1800 μm).

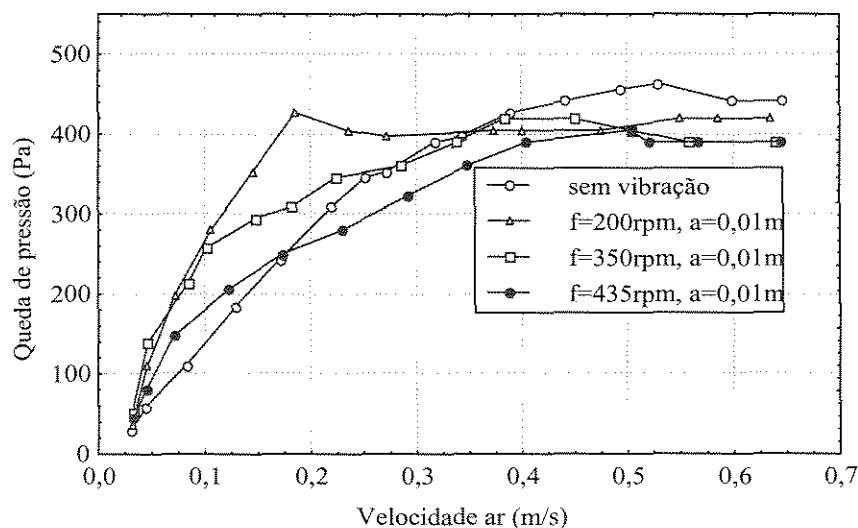


Figura 4.14 – Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com o ácido adípico, carga partículas = 300g, lote1 = partículas > 600 μm

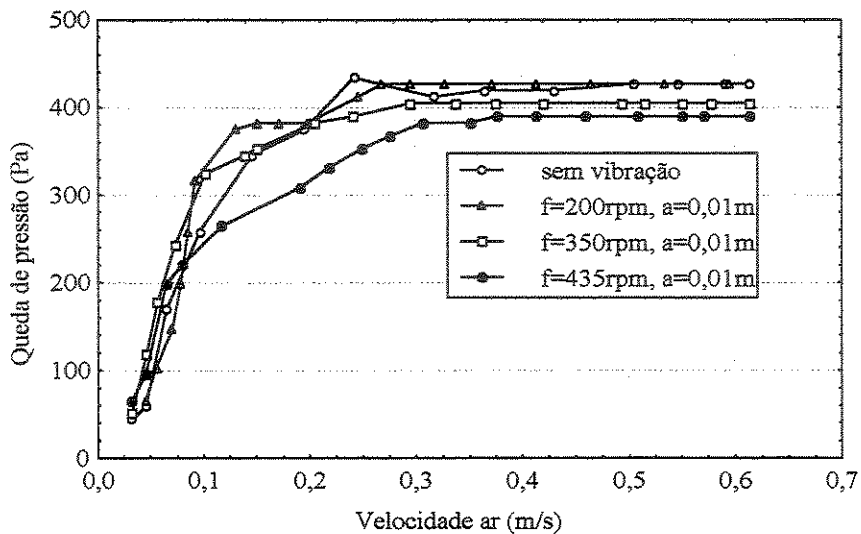


Figura 4.15 – Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com o ácido adípico, carga partículas = 300g, lote2 = 600 - 420 μ m

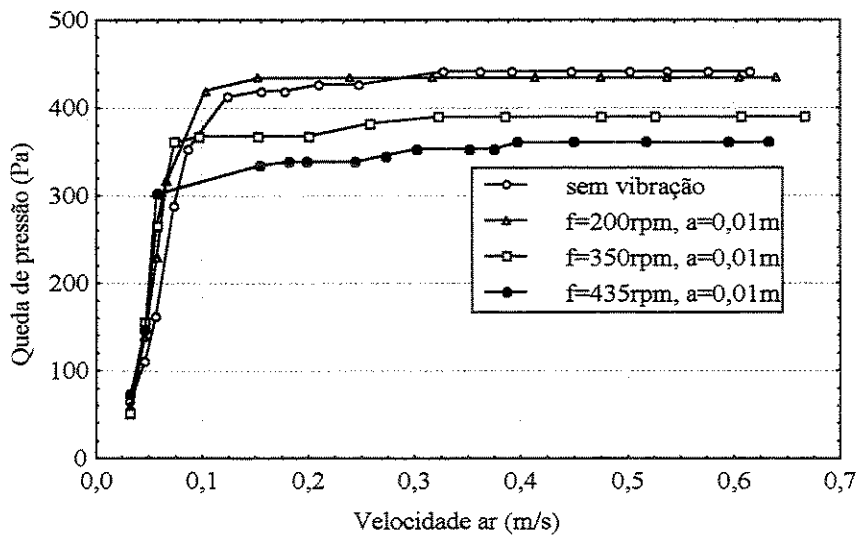


Figura 4.16 – Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com o ácido adípico, carga partículas = 300g, lote3 = 420 - 250 μ m

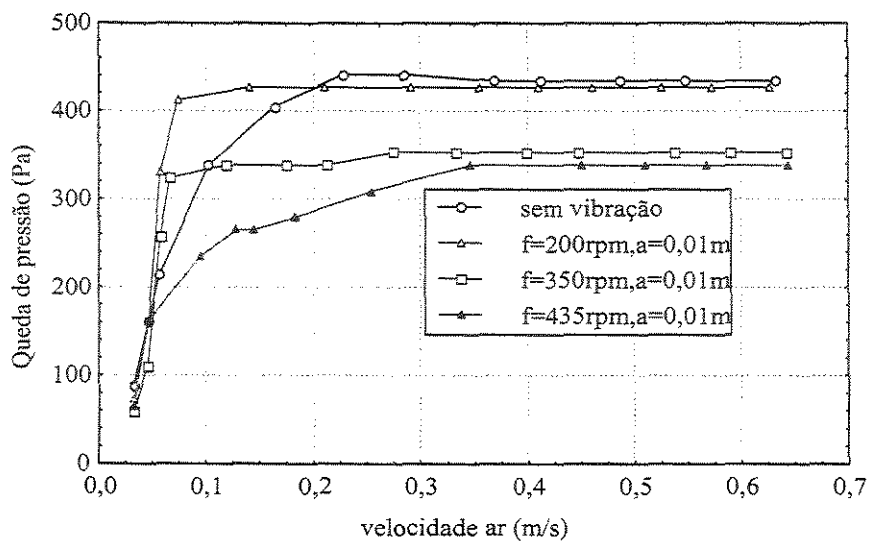


Figura 4.17 – Queda de pressão em função da velocidade ar em LFC e LVF com o ácido adipico, carga partículas = 300g, lote4 = 250 - 75 μm

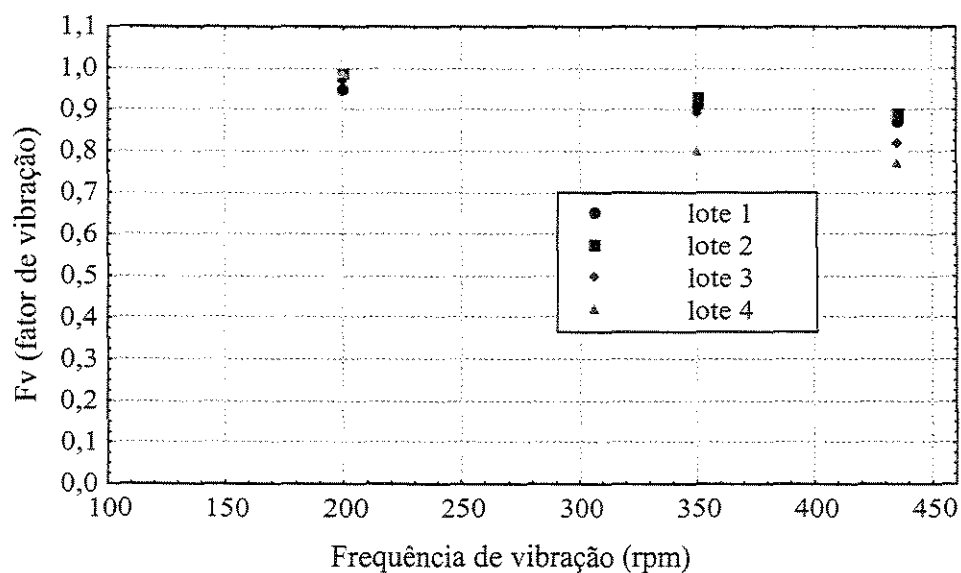


Figura 4.18 – Fator de vibração em função da frequência de vibração para os lotes 1, 2, 3 e 4

O índice de fluidização é definido segundo JONG (1970), como a razão da queda de pressão no leito pelo peso das partículas por unidade de área da seção transversal:

$$FI = \frac{\Delta P \cdot A}{m \cdot g} \quad (4.3)$$

onde m é a massa de partículas no leito, ΔP a queda de pressão no leito, g a aceleração da gravidade e A área da seção transversal.

As Figuras 4.19 a 4.21 apresentam o índice de fluidização (FI) em função da velocidade do ar para uma dada frequência de vibração. Para as partículas menores, cujos leitos apresentam menor porosidade e maior coesividade, observa-se pelas Figuras uma maior inclinação nas curvas do leito fixo, ocasionando uma variação na velocidade na condição de mínima fluidização a uma mesma frequência de vibração aplicada em cada lote de partículas analisado.

À medida que toma-se um lote de partículas de menor diâmetro médio observa-se que a velocidade na condição de mínima fluidização é menor, prevalecendo a formação de canais preferenciais até velocidades do ar relativamente altas, dentro da faixa estudada.

As Figuras 4.19 a 4.21 mostram que aumentando a frequência de vibração o índice de fluidização para os lotes 1 e 2 tende a se aproximar de 1,0, e para os lotes 3 e 4 o índice de fluidização é menor que 1,0, isto é, o peso das partículas é maior que a queda de pressão no leito, sugerindo que o efeito da vibração aplicada domina as forças existentes entre as partículas.

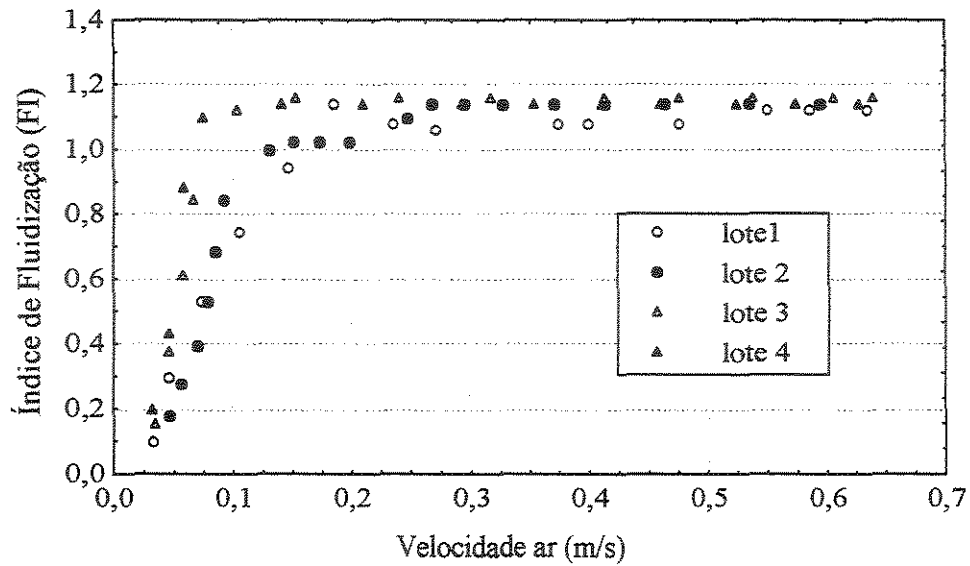


Figura 4.19 – Índice de fluidização em função da velocidade ar para os lotes 1, 2, 3 e 4, $f=200\text{rpm}$

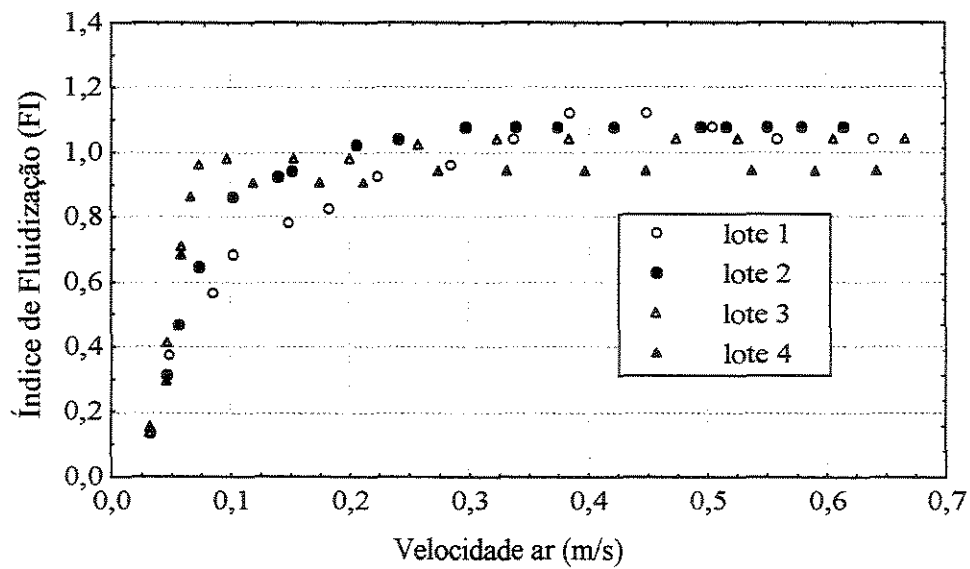


Figura 4.20 – Índice de fluidização em função da velocidade ar para os lotes 1, 2, 3 e 4, $f=350\text{rpm}$

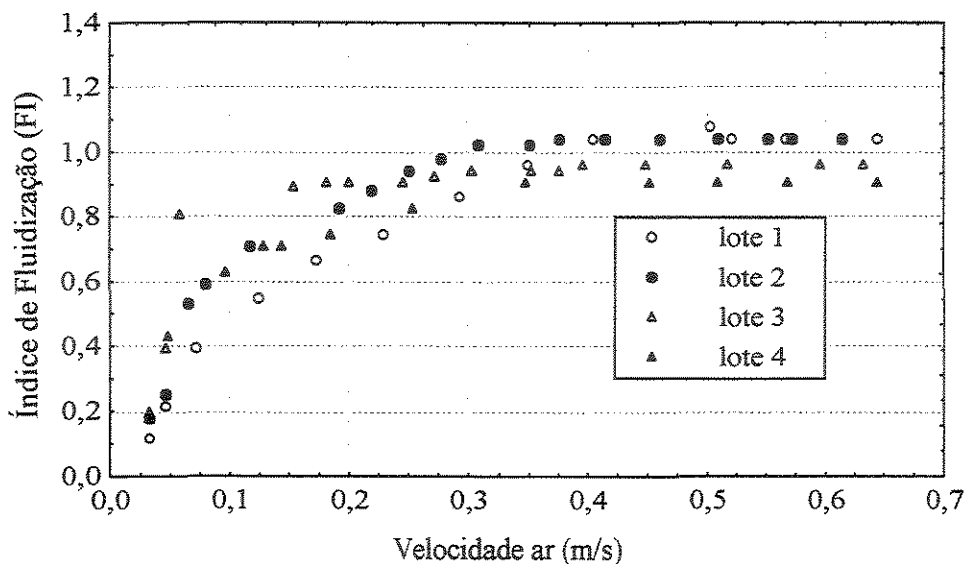


Figura 4.21 – Índice de fluidização em função da velocidade ar
para os lotes 1, 2, 3 e 4, $f=435\text{rpm}$

4.3 – Análise estatística dos parâmetros vibracionais e carga de partículas no comportamento fluidodinâmico em LVF

Com o objetivo de analisar a influência dos parâmetros vibracionais (frequência e amplitude de vibração) e a carga de partículas (variáveis independentes) sobre a queda de pressão e a velocidade na condição de mínima vibrofluidização (variáveis dependentes), utilizou-se a técnica de planejamento fatorial ($2^3 = 8$, com repetições para a obtenção da estimativa do erro experimental) – BRUNS et al, 2001 – em que para cada variável estudada usou-se dois níveis diferentes (um nível máximo (+) e um nível mínimo (-)) com as repetições nos pontos centrais. O planejamento fatorial é representado da seguinte maneira: $2^3 = 8$, sendo 8 ensaios e possibilitando com os resultados dos ensaios, estimar 7 efeitos: 3 efeitos principais (frequência (1), amplitude (2) e carga de partículas (3), 3 interações de dois fatores (12, 13, 23), e uma interação de três fatores (123)).

Os níveis de cada fator foram escolhidos de acordo com as limitações práticas do equipamento que foram determinadas em testes preliminares citados anteriormente (item 4.1). As variáveis operacionais e os níveis estão presentes na Tabela 4.7 e a análise estatística foi realizada com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.7 – Valores utilizados no planejamento

	Máximo (+1)	Ponto central (0)	Mínimo (-1)
Frequência (rpm)	400	300	200
Amplitude (m)	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$
Carga de partículas (g)	700	500	300

As respostas analisadas, queda de pressão e a velocidade na condição de mínima vibrofluidização, foram obtidas a partir das curvas fluidodinâmicas para cada condição do planejamento experimental, sendo as corridas experimentais realizadas aleatoriamente.

A velocidade na condição de mínima vibrofluidização foi determinada no ponto em que foi observado visualmente o início de um movimento das partículas em relação às outras - velocidade de mínima mistura definida no trabalho de GUPTA e MUJUMDAR (1980 - b), e a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização foi tomada como sendo o ponto correspondente a velocidade de mínima vibrofluidização nas curva fluidodinâmicas, o que na maioria dos casos correspondeu ao ponto onde ocorre a estabilização das curvas. Nos casos em que ocorreram a formação de dois patamares (pontos 1 e 2 da Figura 4.24), o ponto 1 corresponde ao início da mistura das partículas, $(u_{mf})_v$ e $(\Delta P_{mf})_v$, e em 2 o leito se encontra na condição de fluidização plenamente desenvolvida, $(u_{mf})_{cf}$ e $(\Delta P_{mf})_{cf}$, apresentando uma alta taxa de circulação de partículas, condições verificadas por observação visual.

As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 mostram algumas das corridas experimentais realizadas no planejamento experimental. Em cada Figura é apresentada a duplicada de cada corrida, mostrando a reprodutibilidade dos experimentos.

A Tabela 4.8 apresenta a matriz experimental dos ensaios realizados e os valores obtidos para as respostas (a queda de pressão e a velocidade na condição de mínima vibrofluidização), que foram determinadas através das curvas fluidodinâmicas.

Tabela 4.8 - Valores codificados das variáveis independentes e as respostas analisadas

Corrida experimental	Frequência (X ₁)	Amplitude (X ₂)	Carga de partículas (X ₃)	Queda de pressão (R ₁) (cm H ₂ O)	Velocidade (R ₂) (m/s)
1	-1	-1	-1	400	0,26
2	1	-1	-1	390	0,24
3	-1	1	-1	302	0,21
4	1	1	-1	240	0,20
5	-1	-1	1	810	0,35
6	1	-1	1	840	0,33
7	-1	1	1	780	0,30
8	1	1	1	750	0,36
9 (C)	0	0	0	530	0,31
10 (C)	0	0	0	540	0,28
11	-1	-1	-1	402	0,27
12	1	-1	-1	395	0,26
13	-1	1	-1	305	0,20
14	1	1	-1	242	0,19
15	-1	-1	1	820	0,36
16	1	-1	1	810	0,34
17	-1	1	1	790	0,31
18	1	1	1	7500	0,35
19 (C)	0	0	0	560	0,26
20 (C)	0	0	0	550	0,25

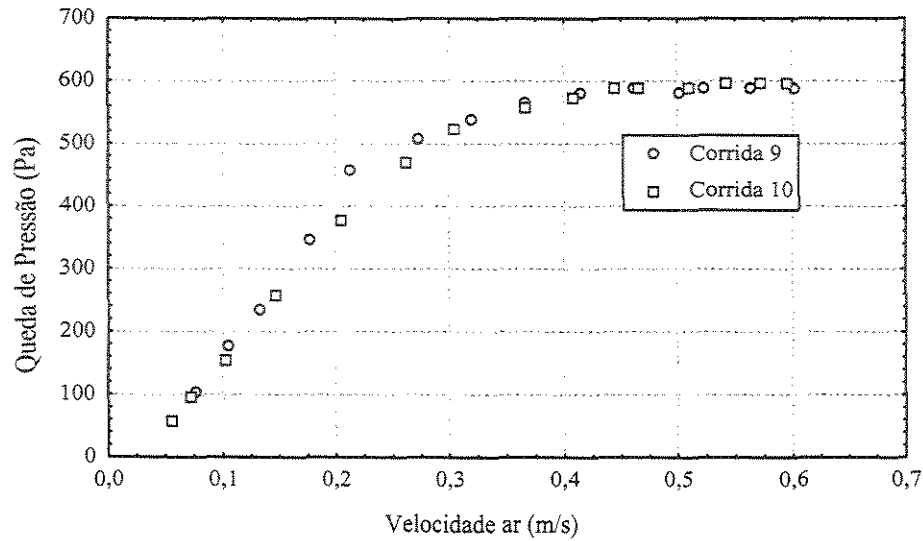


Figura 4.22 – Queda de pressão em função da velocidade ar ,
Curvas Fluidodinâmicas correspondentes às Corridas 9 e 10

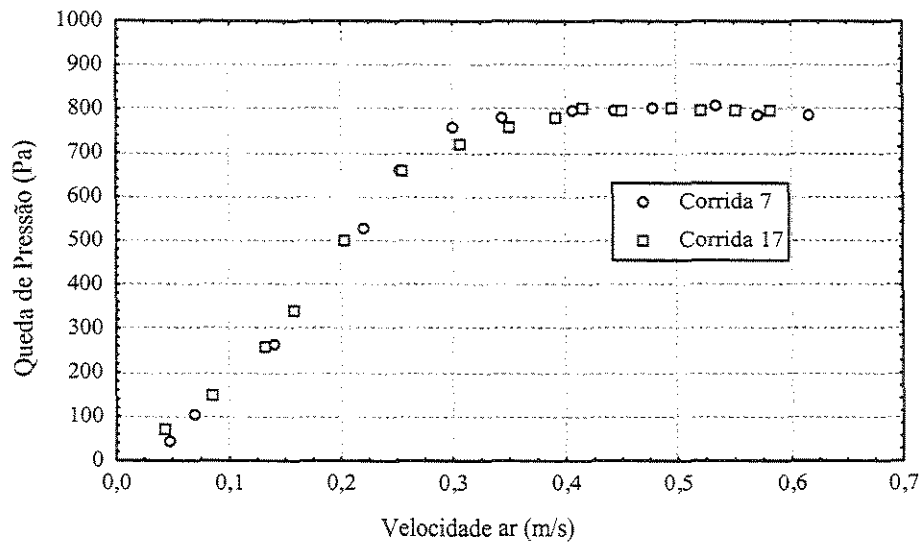


Figura 4.23 – Queda de pressão em função da velocidade ar ,
Curvas Fluidodinâmicas correspondentes às Corridas 7 e 17

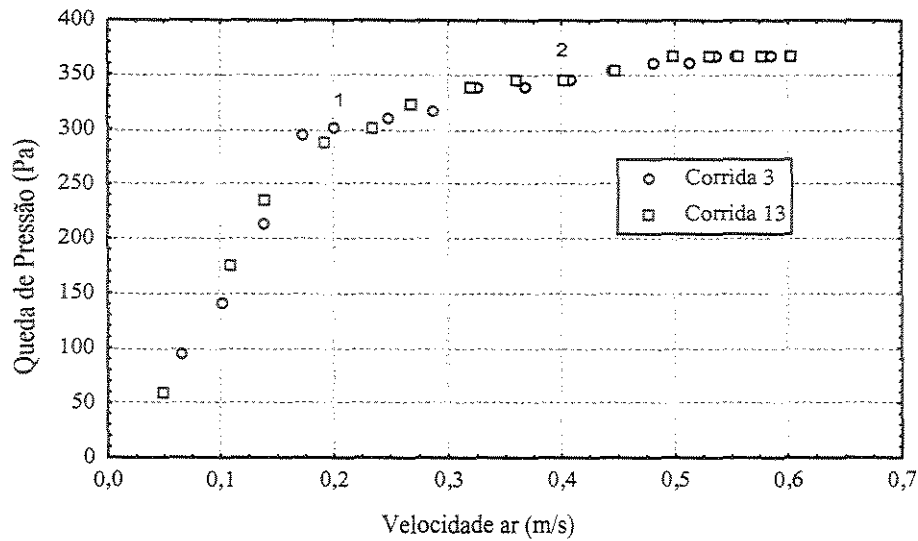


Figura 4.24 – Queda de pressão em função da velocidade ar, Curvas Fluidodinâmicas correspondentes às Corridas 3 e 13

A análise estatística para as duas respostas, queda de pressão e a velocidade na condição de mínima vibrofluidização são apresentadas separadamente, sendo primeiramente apresentados os resultados obtidos na análise da queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização.

A Tabela 4.9 mostra a estimativa dos efeitos, onde para a resposta queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização apenas a iteração frequência, amplitude e carga não se mostraram estatisticamente significativa.

Tabela 4.9 – Estimativa dos efeitos para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização

Variáveis independentes	Efeitos estimados	Desvio padrão	Limite de confiança (-95%)	Limite de confiança (+95%)
Média	560,30	2,21	555,44	565,16
(1) frequência	-24,00	4,93	-34,86	-13,14
(2) amplitude	-88,50	4,93	-99,36	-77,64
(3) carga	429,25	4,93	448,39	470,11
(12)	-24,75	4,93	-35,61	-13,89
(13)	11,50	4,93	0,64	22,36
(23)	36,00	4,93	25,14	46,86

A significância estatística dos efeitos individuais e interações das variáveis independentes é confirmada no gráfico de Pareto, Figura 4.25, onde os efeitos estatisticamente significativos estão à direita da reta vertical indicativa do limite de confiança de 95%. Essa figura também mostra a forte influência da carga de partículas em relação aos outros parâmetros do modelo e o efeito negativo da amplitude e frequência de vibração.

O modelo estatístico codificado obtido para correlacionar as variáveis com as respostas foi um modelo de primeira ordem levando em conta as interações que se mostraram estatisticamente significativas na seguinte equação:

$$\Delta P = 560,3 - 12.X_1 - 44,25.X_2 + 229,625.X_3 - 12,375.X_1.X_2 + 5,75.X_1.X_3 + 18.X_2.X_3 \quad (4.4)$$

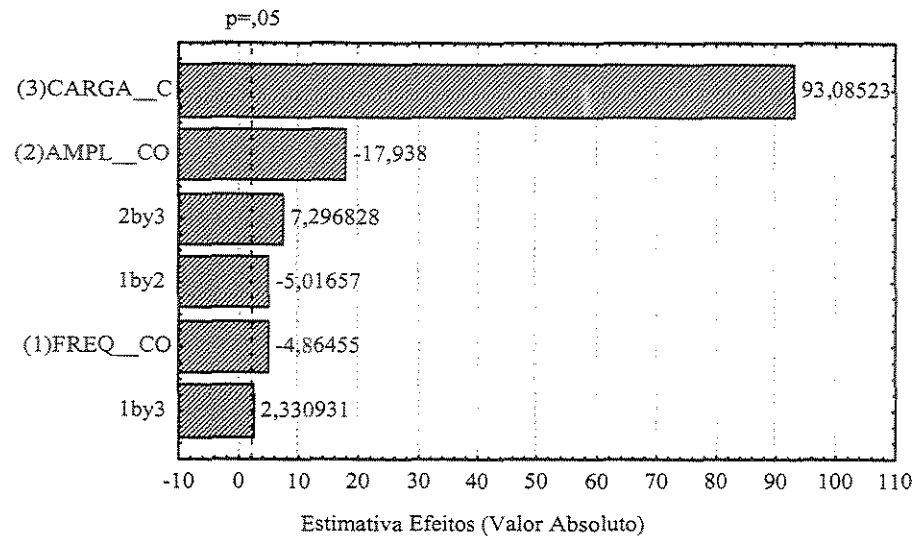


Figura 4.25 – Diagrama de pareto para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização

A Tabela 4.10 apresenta os valores dos coeficientes de regressão para o modelo codificado, estatisticamente significativo, apresentado na equação 4.4.

Tabela 4.10 – Coeficientes de regressão para o modelo estatístico para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização

Variáveis independentes	Coeficientes da regressão	Desvio padrão
Média	560,30	2,21
(1) frequência	-12,00	2,47
(2) amplitude	-44,25	2,47
(3) carga	229,63	2,47
(12)	-12,36	2,47
(13)	5,75	2,47
(23)	18,00	2,47

A validação do modelo estatístico foi realizada pela análise de variância para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização, segundo BRUNS et al, 2001 e os resultados estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Análise da variância para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização

Fonte de variação	Soma quadrática	Número de graus de liberdade	Média quadrática
Regressão	885438,5	06	147573,1
Resíduos	2261,7	13	174,0
Falta de ajuste	1190,7	2	595,4
Erro puro	1071,0	11	97,4
Total	887700,2	19	

O coeficiente de regressão para a queda de pressão foi de $R^2=0,99745$ em relação ao valor máximo explicável de 99,8 %. Através do teste F, comparando o $F_{\text{calculado}}=848$, isto é, a razão entre a média quadrática da regressão e média quadrática dos resíduos, com o F_{tabelado} , $F_{6,13}=2,92$, onde o $F_{\text{calculado}}$ é aproximadamente 290 vezes maior que o F_{tabelado} (BRUNS et al, 2001 aconselham para um bom ajuste do modelo um $F_{\text{calculado}} > 3 F_{\text{tabelado}}$) observa-se que a regressão é significativa apresentando um ótimo ajuste de 99,628 %.

A comparação entre os valores experimentais e calculados, através do modelo de 1ª ordem para a queda de pressão, é ilustrado na Figura 4.26. Verifica-se uma ótima distribuição dos pontos em torno da reta ideal, sem tendências, confirmando juntamente com a análise da variância um bom ajuste entre os valores observados e os preditos.

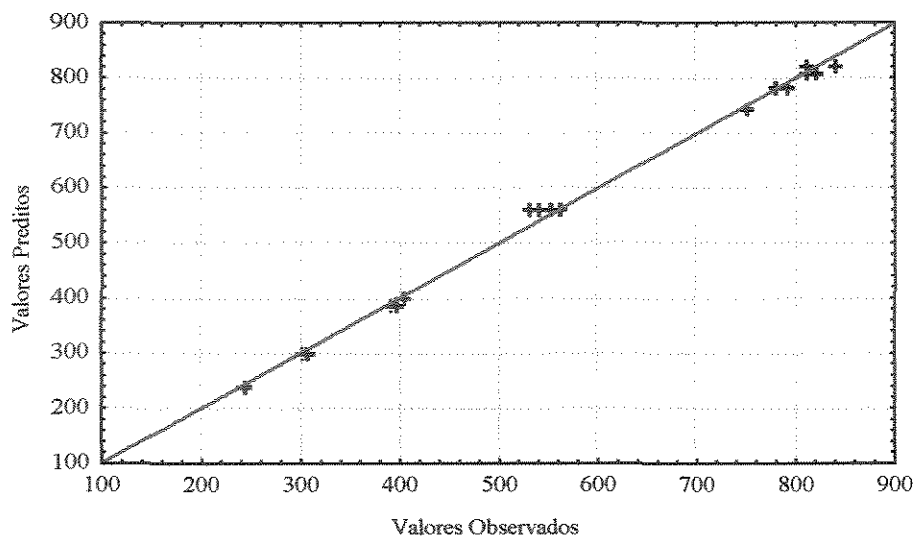


Figura 4.26 – Valores preditos em função dos valores observados para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização.

As Figuras 4.27 a 4.35 representam as superfícies de resposta para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização, confirmando a influência marcante da carga de partículas na resposta analisada.

As Figuras 4.27, 4.28 e 4.29 mostram o deslocamento da superfície no eixo da resposta analisada, queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização, variando os níveis de X_3 de -1 para $+1$ (carga de partículas). Para obter uma baixa queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização, para cada carga analisada, deve-se trabalhar com altas frequência e amplitude de vibração como pode ser observado nas Figuras, onde observa-se um decréscimo da queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização com o aumento da frequência e amplitude de vibração. Como observado no item 4.1, a aplicação da vibração modifica o comportamento fluidodinâmico do leito e provoca a redução da queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização e aumenta com o aumento dos parâmetros vibracionais (frequência e amplitude de vibração).

Ocorre uma atenuação do efeito da vibração sobre a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização com o aumento da carga de partículas ($X_3 = -1$, ocorre uma variação de 252 – 390 cm H₂O; $X_3 = 0$ uma variação de 502 – 595 cm H₂O e para $X_3 = +1$ uma variação de 752 – 816 cm H₂O). O mesmo foi observado no item 4.1,

aumentando a carga de partículas o efeito da vibração foi reduzido, como foi observado para uma carga igual e maior que 700g

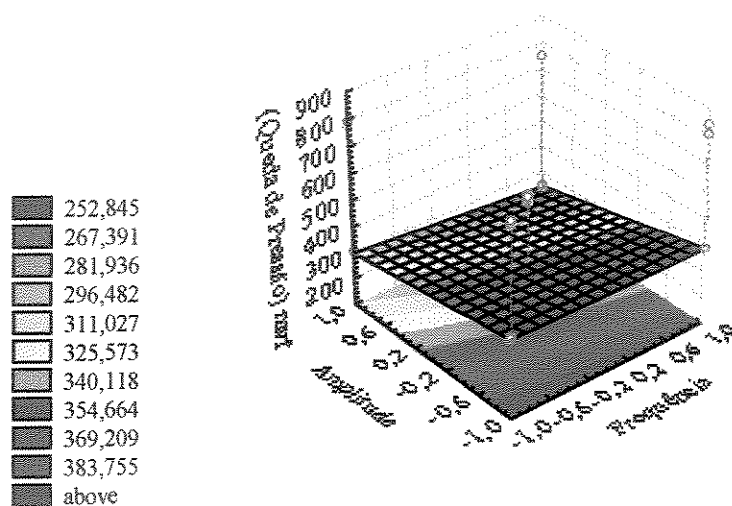


Figura 4.27 – Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, carga de partículas = 300g.

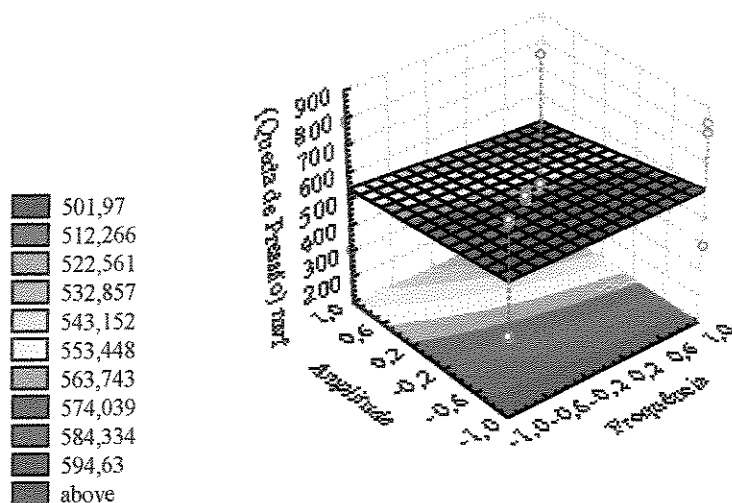


Figura 4.28 – Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, carga de partículas = 500g.

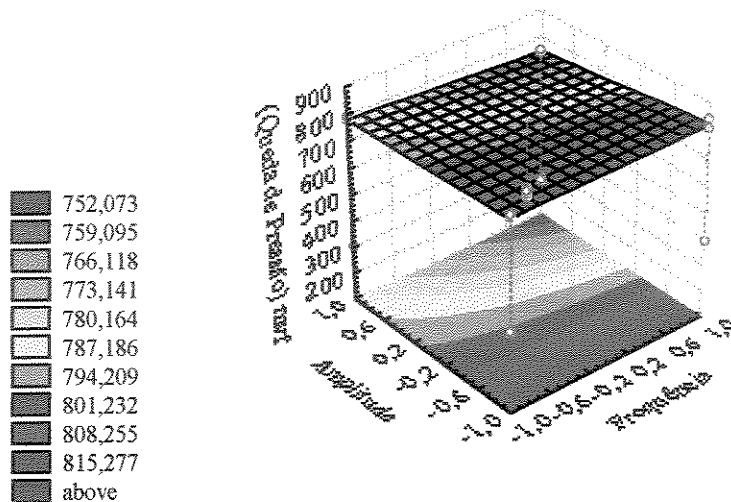


Figura 4.29 – Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, carga de partículas = 700g.

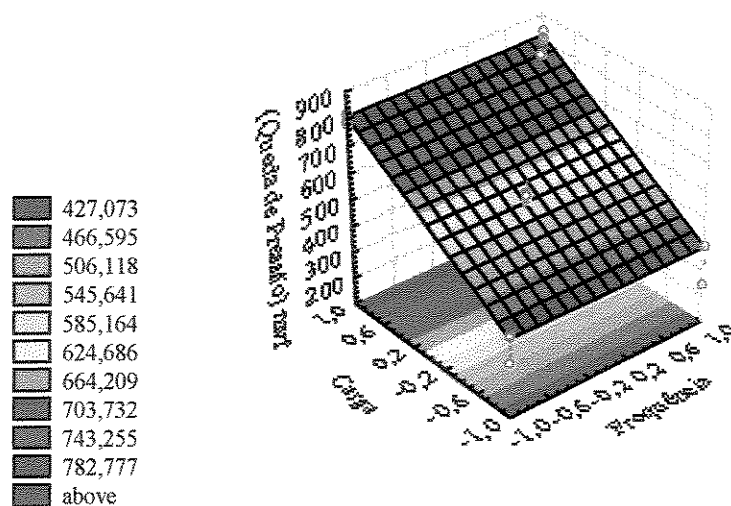


Figura 4.30 – Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização, amplitude = 0,005 m

Analisando a Figura 4.30, observa-se que para obtenção de baixos valores de queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização, deve-se trabalhar com baixas cargas e qualquer valor de frequência de vibração, fixando a amplitude no menor valor ($X_2 = -1$).

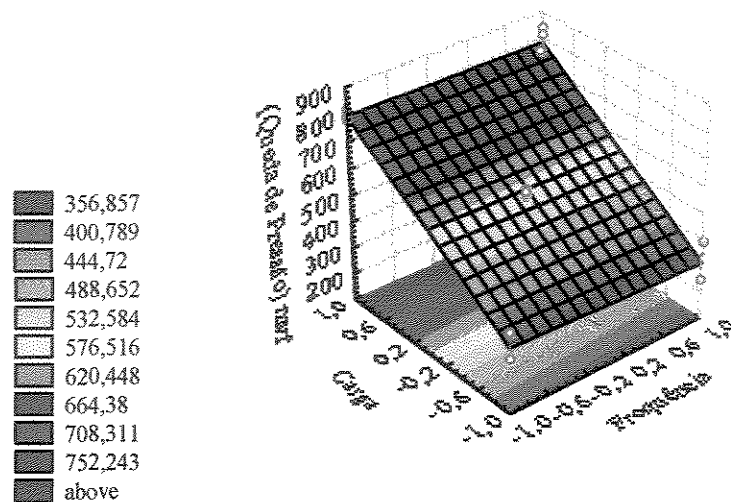


Figura 4.31– Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, amplitude = $1,25 \cdot 10^{-2}$ m

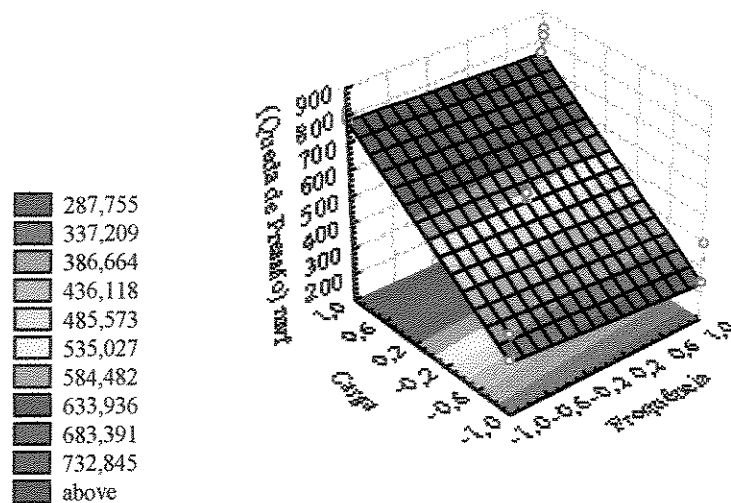


Figura 4.32 – Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, amplitude = $2,0 \cdot 10^{-2}$ m

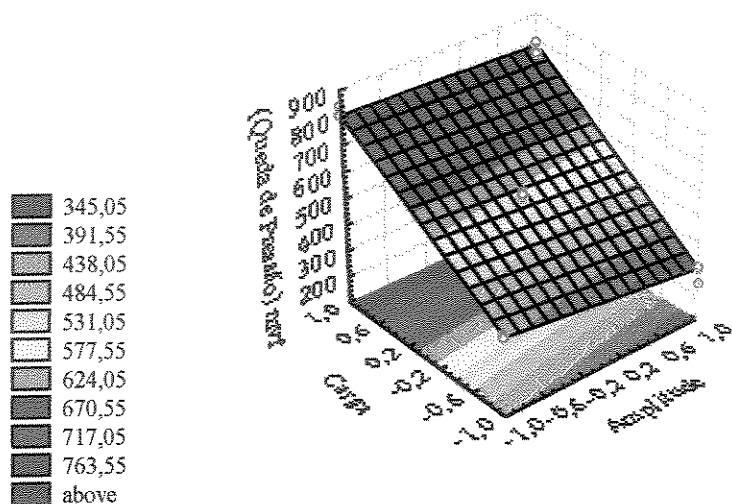


Figura 4.33 – Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, frequência = 200rpm

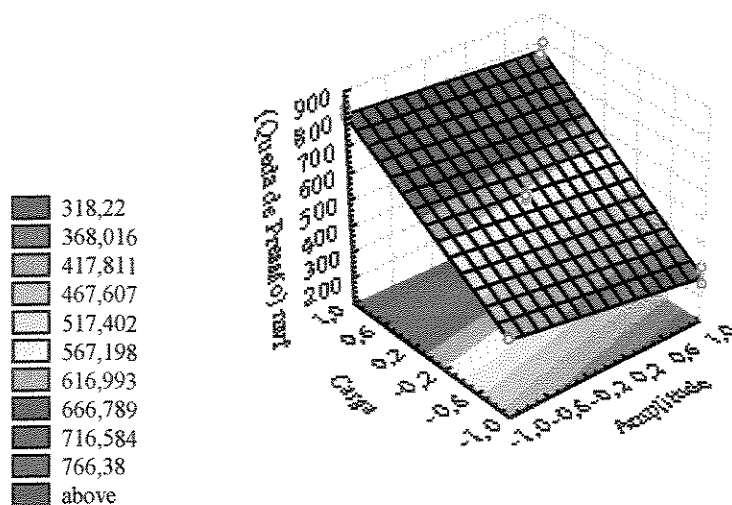


Figura 4.34 – Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima fluidização, frequência = 300rpm

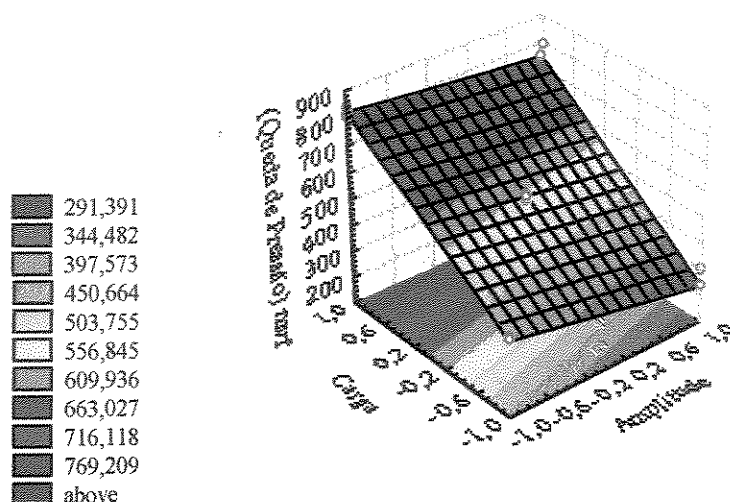


Figura 4.35 – Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização, frequência = 400rpm

As Figuras 4.27 a 4.35 também indicam uma interação entre a frequência e amplitude de vibração na queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização. A influência da amplitude de vibração na queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização aumenta com a frequência de vibração.

Aumentando o nível da variável amplitude de vibração observa-se que para baixos valores de queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização é necessário trabalhar com baixa carga e frequência intermediária (Figuras 4.30 a 4.32). Fazendo a mesma análise para a variável frequência de vibração observa-se que para a obtenção de baixos valores de queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização é necessário trabalhar com baixa carga e maiores amplitudes (Figuras 4.33 a 4.35).

Analisando as Figuras 4.27 a 4.35, chega-se ao ponto ótimo de trabalho: baixa carga de partículas com frequência intermediária e alta amplitude de vibração, obtendo-se assim, menores valores de queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização. Pela Figura 4.25 observa-se que as variáveis frequência e amplitude de vibração apresentaram um efeito negativo sobre a resposta analisada, sendo o efeito negativo maior o da amplitude,

que explica o fato de obter menores valores de queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização com maiores valores de amplitude de vibração.

O mesmo procedimento foi realizado para a outra resposta analisada, a velocidade na condição de mínima vibrofluidização.

A Tabela 4.12 apresenta os efeitos das variáveis independentes para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização, para um modelo de primeira ordem com três interações e um limite de confiança de 95%. As variáveis que não apresentaram significância estatística no estudo foram a frequência (X_1), frequência x carga ($X_1 \times X_3$), frequência x amplitude x carga ($X_1 \times X_2 \times X_3$), desprezadas na análise do modelo.

Tabela 4.12 – Estimativa dos efeitos para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização

Variáveis independentes	Efeitos estimados	Desvio padrão	Limite de confiança (-95%)	Limite de confiança (+95%)
Média	0,2815	0,003471	0,2739	0,2891
(2) amplitude	-0,03625	0,007761	-0,0533	-0,01917
(3) carga	0,10875	0,007761	0,09167	0,1258
(12)	0,01875	0,007761	0,001669	0,03583
(23)	0,02125	0,007761	0,004169	0,03833

A significância estatística dos efeitos individuais e interações das variáveis independentes, desprezando os efeitos que não se mostraram estatisticamente significativos, é apresentado no gráfico de Pareto, Figura 4.36, com limite de confiança de 95%.

A Figura 4.36 mostra a forte influência da carga de partículas em relação aos outros parâmetros do modelo e o efeito negativo da amplitude de vibração.

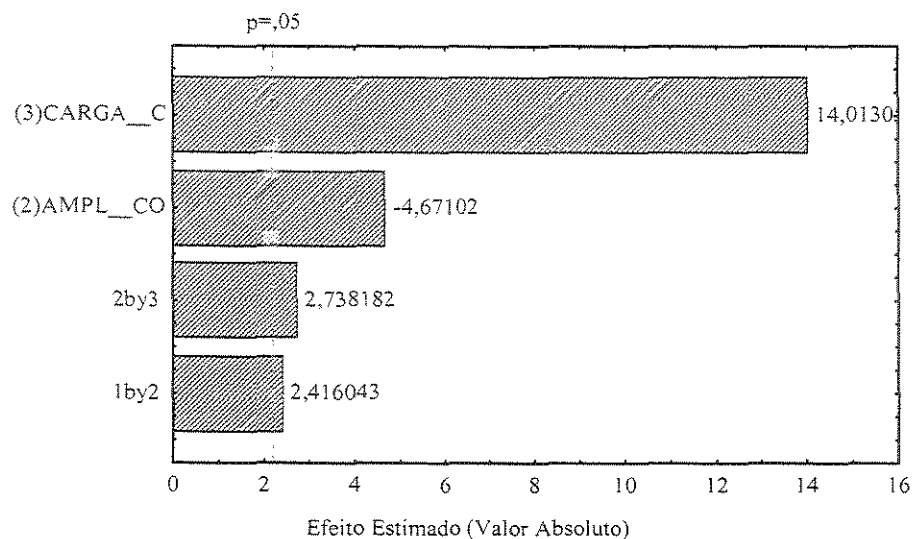


Figura 4.36 – Diagrama de pareto para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização

A Tabela 4.13 apresenta os coeficientes da regressão para o modelo codificado, estatisticamente significativo.

Tabela 4.13 – Coeficientes de regressão para o modelo estatístico da velocidade na condição de mínima vibrofluidização

Variáveis independentes	Coeficientes de regressão	Desvio padrão
Média	0,2815	0,003471
(2) amplitude	-0,01813	0,00388
(3) carga	0,05438	0,00388
(12)	0,009375	0,00388
(23)	0,01063	0,00388

O modelo estatístico codificado obtido para correlacionar as variáveis com as respostas foi um modelo de primeira ordem levando em conta as interações que se mostraram estatisticamente significativas representado pela seguinte equação:

$$(u_{mf})_v = 0,2815 - 0,018125.X_2 + 0,054375.X_3 + 0,009375.X_1.X_2 + 0,010625.X_2.X_3 \quad (4.5)$$

A validação do modelo estatístico foi realizada pela análise de variância, conforme Tabela 4.14. A análise da variância do modelo estatístico para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização foi realizada segundo BRUNS et al, 2001.

Tabela 4.14 – Análise da variância para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização

Fonte de variação	Soma quadrática	Número de graus de liberdade	Média quadrática
Regressão	0,055775	4	0,013944
Resíduos	0,00468	15	0,000312
Falta de ajuste	0,002030	4	0,0005075
Erro puro	0,00265	11	0,000241
Total	0,060455	19	

O coeficiente de regressão para a velocidade foi de $R^2=0,9226$ em relação ao valor máximo explicável de 95,6%. Através do teste F, comparando o $F_{\text{calculado}} = 44,7$, isto é, a razão entre a média quadrática da regressão e média quadrática dos resíduos, com o F_{tabelado} , $F_{4,15} = 3,06$ onde o $F_{\text{calculado}}$ é aproximadamente 15 vezes maior que o F_{tabelado} (BRUNS et al, 2001 aconselham para um bom ajuste do modelo um $F_{\text{calculado}} > 3 F_{\text{tabelado}}$) apresentando um ajuste de 90,194 %.

A comparação entre os valores experimentais e calculados através do modelo de 1ª ordem para velocidade na condição de mínima vibrofluidização é ilustrado na Figura 4.37. Verifica-se uma boa distribuição dos pontos em torno da reta ideal, confirmando juntamente com a análise da variância um bom ajuste entre os valores observados e os preditos.

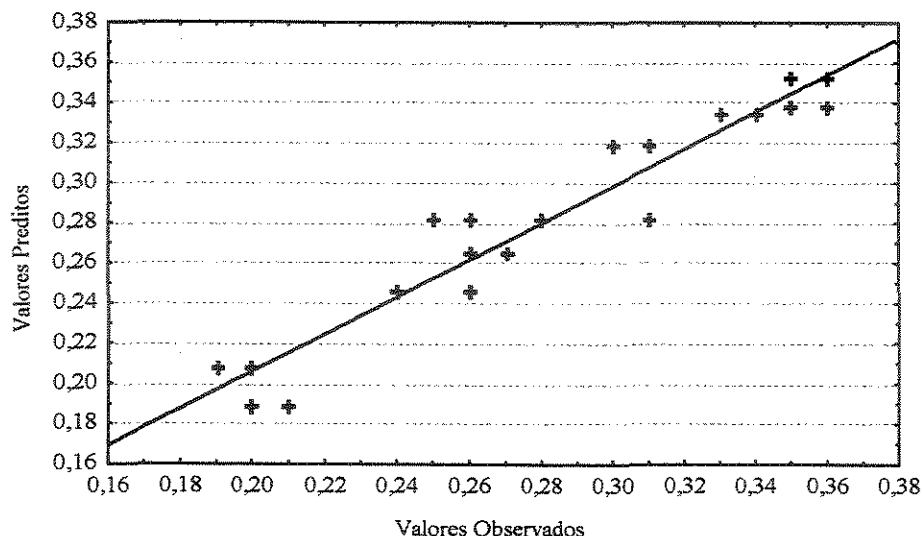


Figura 4.37 – Valores preditos em função dos valores observados para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização

As Figuras 4.38, 4.39 e 4.40 mostram o deslocamento da superfície no eixo z variando os níveis de X_3 de -1 para $+1$ (carga de partículas). Para obter baixos valores de velocidade na condição de mínima vibrofluidização, para cada carga analisada, deve-se trabalhar com valores maiores de amplitude e menores de frequência de vibração (observe-se um decréscimo da velocidade na condição de mínima vibrofluidização com o aumento da amplitude de vibração). A Figura 4.36 mostra o efeito negativo da amplitude de vibração na resposta, com o aumento da amplitude ocorre uma redução na velocidade na condição de mínima vibrofluidização.

Ocorre uma atenuação do efeito da vibração sobre a velocidade na condição de mínima vibrofluidização com o aumento da carga de partículas ($X_3 = -1$, ocorre uma variação de $0,196 - 0,258$ m/s; $X_3 = 0$ uma variação de $0,259 - 0,304$ m/s e para $X_3 = +1$ uma variação de $0,322 - 0,350$ m/s).

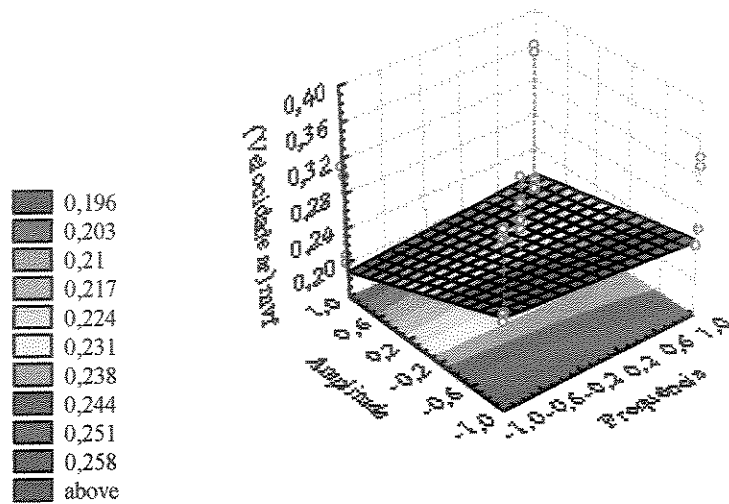


Figura 4.38 –Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização, carga de partículas = 300g

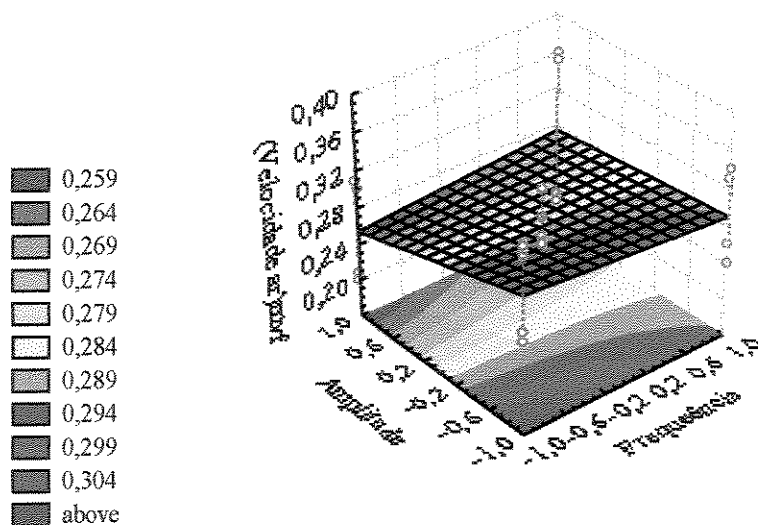


Figura 4.39 –Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização, carga de partículas = 500g

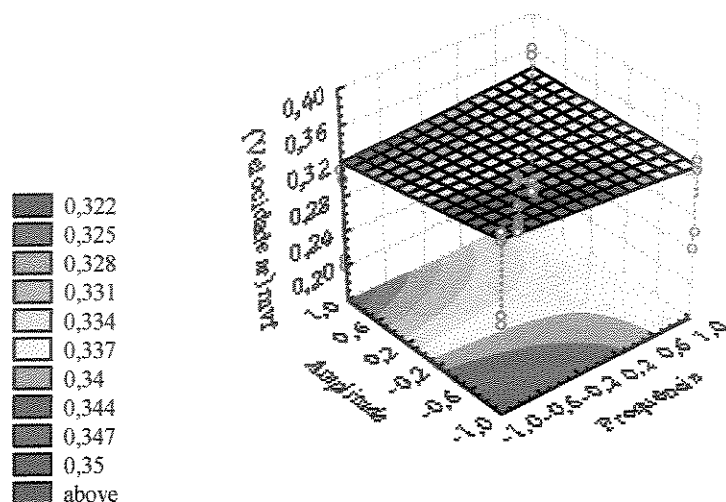


Figura 4.40 –Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização, carga de partículas = 700g

As Figuras 4.41, 4.42 e 4.43 mostram a variação da amplitude na resposta, onde observa-se que para obter menores valores na velocidade na condição de mínima vibrofluidização deve-se trabalhar com baixas cargas de partículas e valores intermediários para baixo de frequência de vibração.

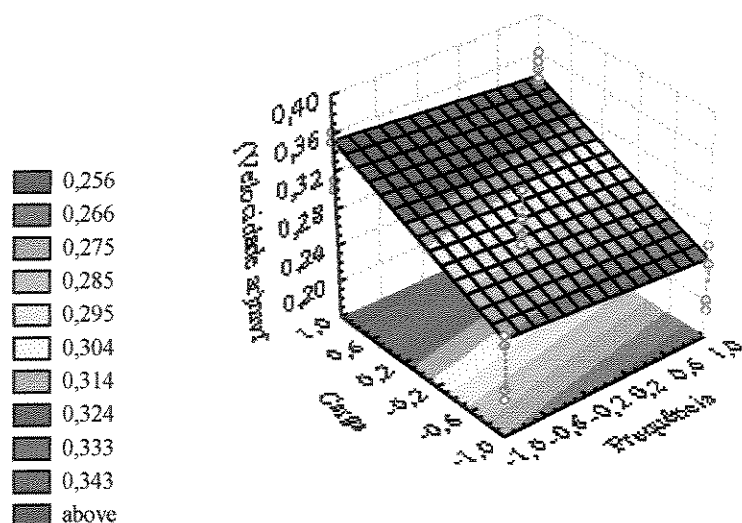


Figura 4.41 –Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização, amplitude = $0,5 \cdot 10^{-2}$ m

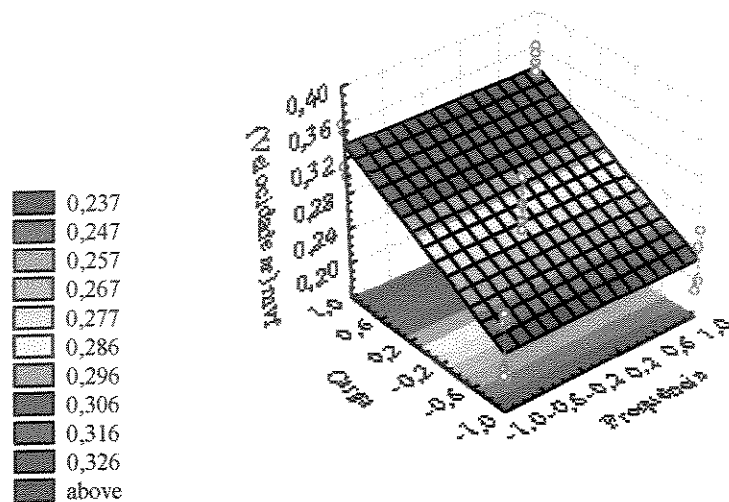


Figura 4.42 –Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização, amplitude = $1,25 \cdot 10^{-2}$ m

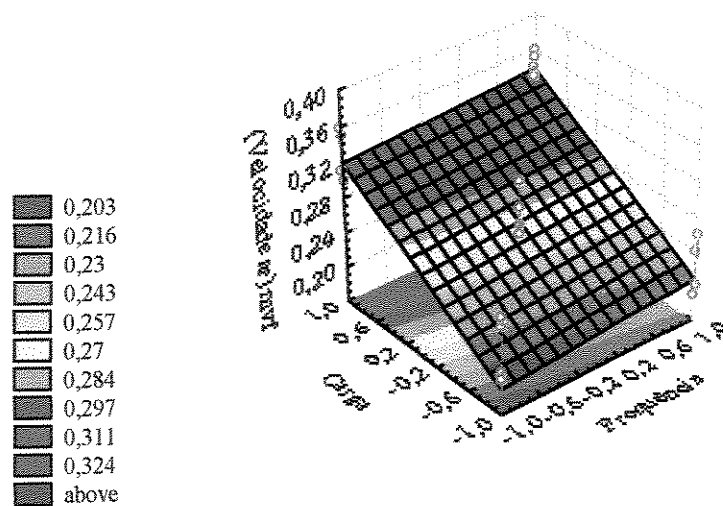


Figura 4.43 –Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização, amplitude = $0,20 \cdot 10^{-2}$ m

As Figuras 4.44, 4.45 e 4.46 mostram as superfícies de respostas obtidas e que a variação na frequência de vibração não proporciona redução significativa na resposta analisada.

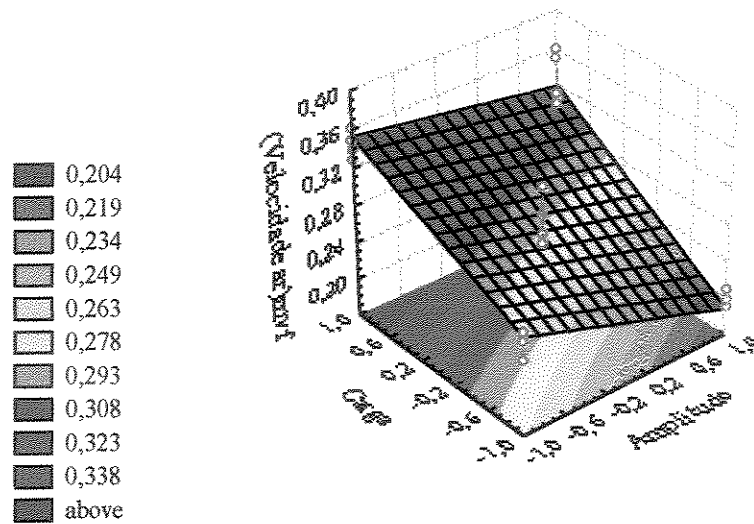


Figura 4.44 –Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização, frequência = 200 rpm

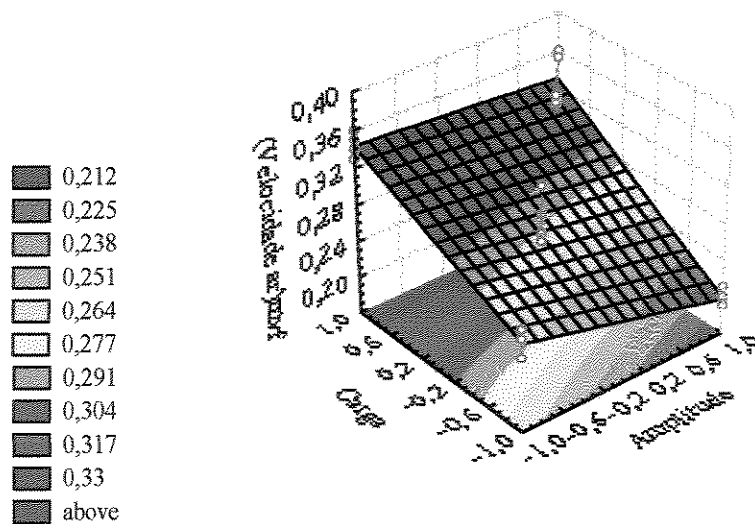


Figura 4.45 – Contorno da Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização, frequência = 300 rpm

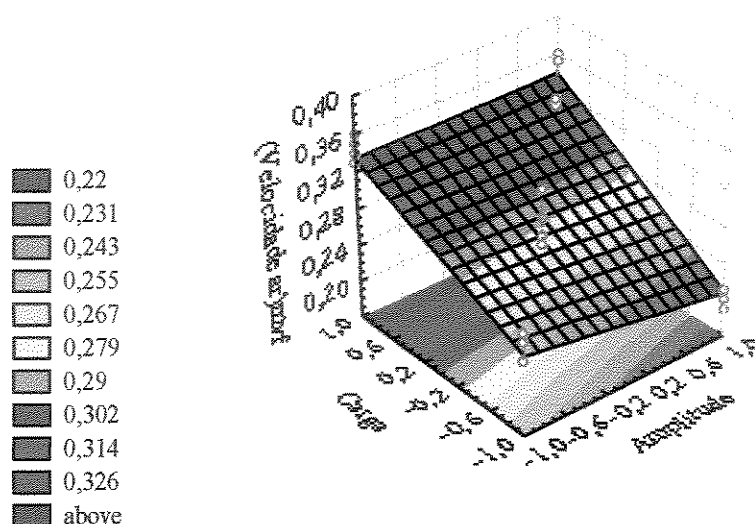


Figura 4.46 – Contorno da Superfície de resposta para a velocidade na condição de mínima vibrofluidização, frequência = 400 rpm

4.4 – Análise do comportamento fluidodinâmico em LVF e LFC do material úmido

Alguns trabalhos encontrados na literatura (MOLERUS (1982), SEVILLE e CLIFT (1984), STRUMILLO e KUDRA (1986), MALHOTRA et al (1984)) estudam a influência do conteúdo de umidade em LFC e LVF. O estudo fluidodinâmico para as partículas úmidas em LFC mostra que a umidade superficial das partículas afeta diretamente o comportamento fluidodinâmico e consequentemente os fenômenos de transferência de calor e massa, portanto se torna essencial avaliar o efeito da umidade superficial (água livre) no leito de partículas (STRUMILLO e KUDRA, 1986). No presente trabalho analisou-se a variação do conteúdo de umidade do material umidificado artificialmente e do material úmido proveniente da indústria, antes da entrada do secador.

4.4.1 – Análise da fluidodinâmica para o material umidificado artificialmente

A Figura 4.47 mostra o material seco e umidificado no banho, possibilitando uma visualização dos cristais de ácido adípico e a alteração causada por uma modificação na umidade.

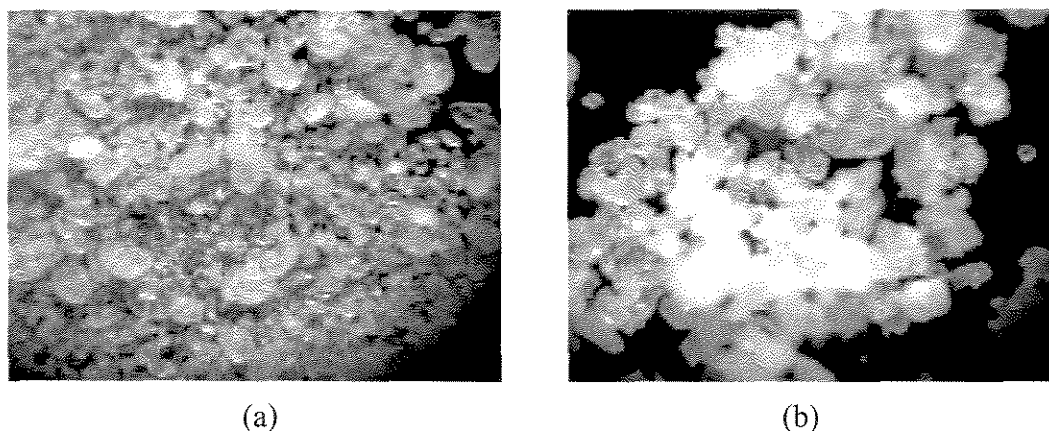


Figura 4.47 – Amostras de ácido adípico seco (a), $X = 0,25\% \text{ b.u.}$, e úmido (b), $X = 2,8\% \text{ b.u.}$

A Figura 4.48 mostra a queda de pressão em função da velocidade do ar para o ácido adípico com conteúdo de umidade de $3,3\% \text{ b.u.}$, sem a presença de vibração ao sistema. A instabilidade prevaleceu em todo o experimento, mostrando que o regime de fluidização não foi atingido nestas condições ($X = 3,3\% \text{ b.u.}$ em LFC). Observa-se que inicialmente a queda de pressão aumenta com o aumento da velocidade do gás até que surge a formação de canais preferenciais no leito, diminuindo a queda de pressão. Ocorre em seguida o colapso do leito e novamente o processo se repete. Visualmente nota-se um comportamento instável, devido à formação dos canais preferenciais e o colapso das partículas, o leito então se move como um pistão e momentaneamente aumenta a queda de pressão a altos valores.

O ácido adípico úmido não permitiu uma boa fluidização sem a presença de vibração, apresentando uma fluidização de qualidade pobre e com formação de canais

preferenciais, como também foi observado no trabalho de MARRING et al (1994) para a fécula de batata no leito sem vibração.

O comportamento irregular foi reduzido com a aplicação de vibração ao sistema, dependendo do conteúdo de umidade, como se pode observar nas Figuras 4.49 – 4.51.

Somente no início dos experimentos com material úmido, com aplicação da vibração, o leito de partículas mostrou-se irregular, pois a vibração diminuiu a formação dos canais preferenciais e auxiliou para a condução ao regime de fluidização, havendo uma mistura do aglomerado úmido.

Um ponto importante observado na realização dos experimentos para o material úmido se encontra no modo de alimentar as partículas no leito, o que acarreta em diferentes valores de perda de carga para cada corrida experimental nas mesmas condições experimentais. Em todos os experimentos, antes de iniciar a coleta dos dados experimentais uma intensidade vibracional de 1,5 foi imposta ao sistema com o intuito de se obter um estado de estrutura inicial do leito uniforme (MALHOTRA e MUJUMDAR, 1985).

O regime de fluidização para os diferentes conteúdos de umidade estudados em LVF (Figuras 4.49 – 4.51) pode ser comparado com o resultado obtido para o LFC (Figura 4.48).

Para um conteúdo de umidade de 0,3 % b.u. (partícula praticamente seca) a Figura 4.51 mostra um comportamento da curva fluidodinâmica semelhante ao encontrado para as partículas secas ($X=0,25\%$ b.u.), onde não foi observada a formação de canais preferenciais.

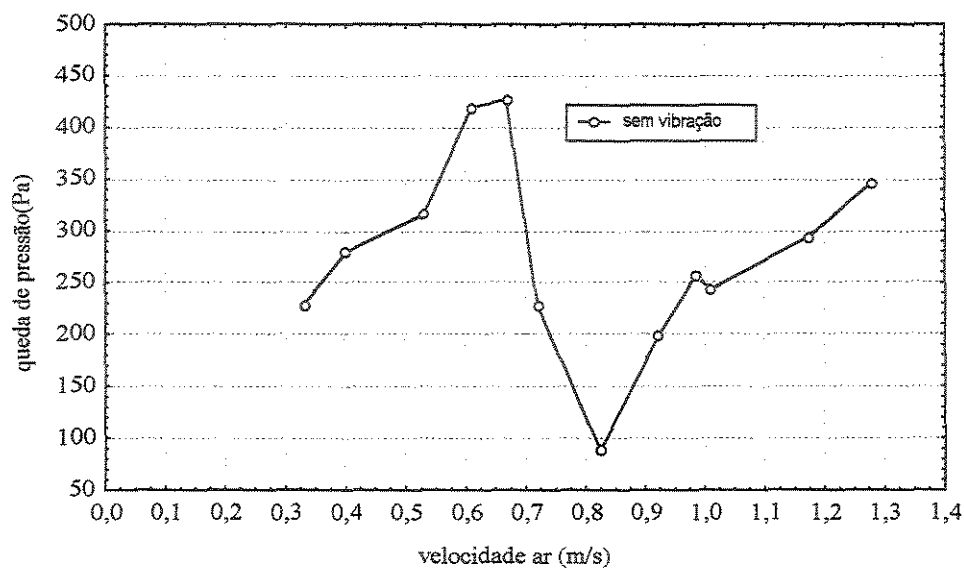


Figura 4.48 – Queda de pressão em função da velocidade ar sem a presença de vibração, carga de partículas = 300g, ácido adípico úmido, $X=3,3\%$ b.u.

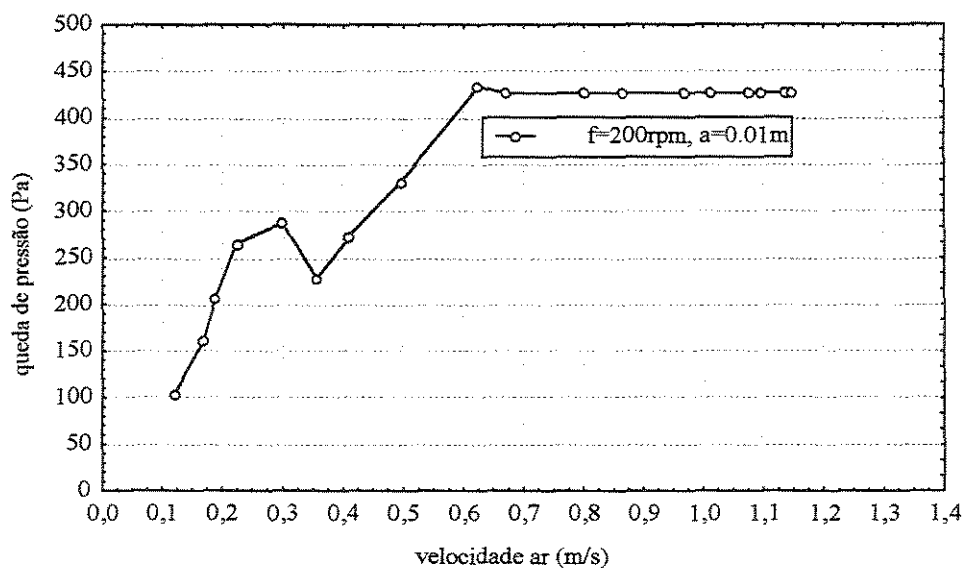


Figura 4.49 – Queda de pressão em função da velocidade ar com a presença de vibração, carga de partículas = 300g, ácido adípico úmido, $X=3,3\%$ b.u.

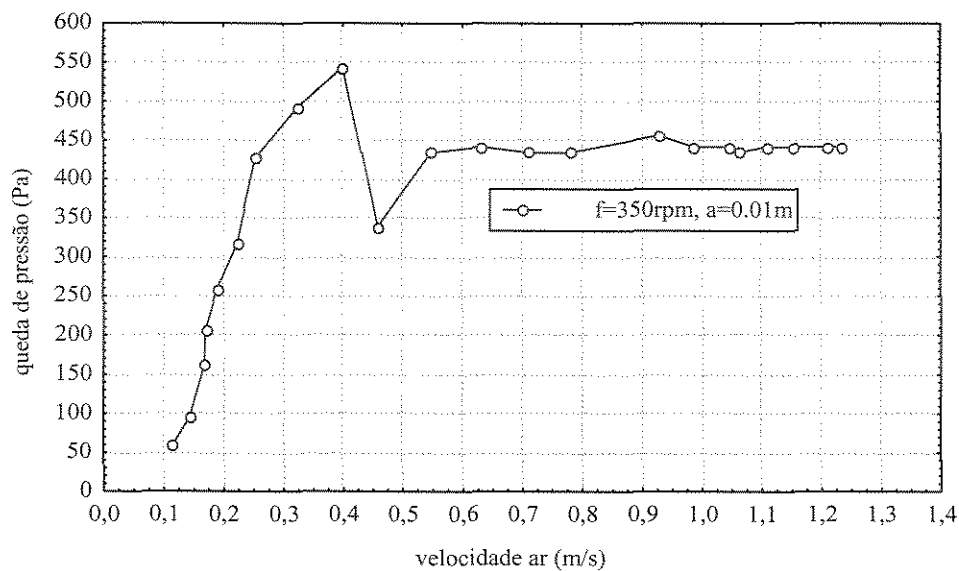


Figura 4.50 – Queda de pressão em função da velocidade ar com a presença de vibração, carga de partículas = 300g, ácido adípico úmido, X=2,8% b.u.

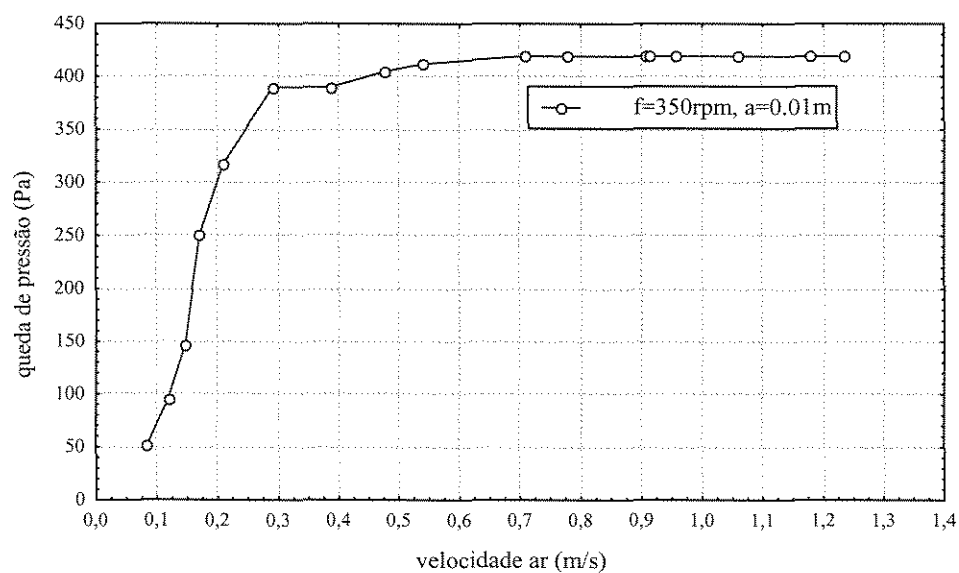


Figura 4.51 – Queda de pressão em função da velocidade ar com a presença de vibração, carga de partículas = 300g, ácido adípico úmido, X=0,3% b.u.

4.4.2 – Análise fluidodinâmica para o material úmido proveniente da indústria

O material úmido foi adquirido em dois tambores, proveniente da indústria antes da entrada no secador, a uma umidade especificada em torno de 6 a 8 % b.u. A Figura 4.52 ilustra o material úmido retirado de um tambor.

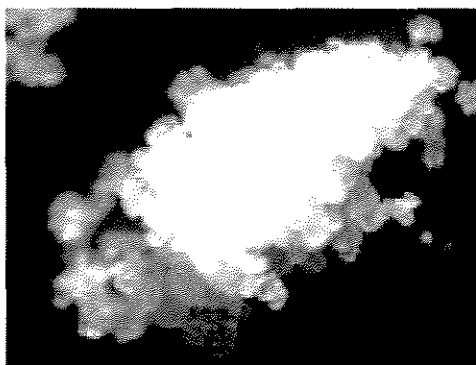


Figura 4.52 – Ácido Adípico úmido proveniente da indústria

Foram realizados ensaios fluidodinâmicos variando a umidade do ácido adípico para uma carga de partículas fixa de 300 g, seguindo a metodologia anteriormente descrita no item 3.3.3. Para validar tal metodologia do controle da umidade do material a ser alimentado no leito, é apresentada a Tabela 4.15, que indica os valores obtidos para testes utilizando diferentes tempos de exposição do aa à estufa à temperatura de 75°C.

Onde: X_0 = umidade do aa antes de ser levado à estufa, retirado de um dos tambores (% b.u.);

X_1 = umidade do aa depois de ser levado à estufa por um determinado intervalo de tempo (% b.u.);

$\overline{X_1}$ = umidade média de X_1 (% b.u.) e

X_2 = umidade do aa depois de se realizar o ensaio fluidodinâmico à temperatura ambiente (% b.u.).

Tabela 4.15 – Umidade do aa utilizada nos experimentos fluidodinâmicos
com o material úmido

Tempo na estufa = 60 minutos					
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3		
X_0	6,2%	5,8%	6,9%		
X_1	1,3%	1,23%	1,24%		
X_2	0,67%	0,74%	0,76%		
$\overline{X}_I = 1,26$					
Tempo na estufa = 35 minutos					
	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6	Amostra 7	Amostra 8
X_0	7,6%	7,9%	7,8%	7,4%	7,7%
X_1	2,7%	3,2%	2,9%	2,4%	2,8%
X_2	1,2%	1,2%	1,2%	1,0%	1,2%
$\overline{X}_I = 2,8\%$					
Tempo na estufa = 20 minutos					
	Amostra 9	Amostra 10	Amostra 11	Amostra 12	Amostra 13
X_0	5,72%	5,22%	6,52%	5,95%	5,94%
X_1	3,4%	3,71%	4,23%	4,17%	4,07%
X_2	2,6%	1,1%	1,5%	1,5%	1,3%
$\overline{X}_I = 3,9\%$					

Tempo na estufa = 10 minutos					
	Amostra 14	Amostra 15	Amostra 16	Amostra 17	Amostra 18
X_0	6,0%	5,9%	5,6%	5,7%	5,9%
X_1	4,8%	5,3%	4,9%	5,2%	5,1%
X_2	1,7%	2,0%	1,8%	1,5%	2,0%
$X_I = 5,1\%$					

A Tabela 4.16 mostra as condições experimentais a que foram submetidas cada amostra citada na Tabela 4.15.

Tabela 4.16 – Condições experimentais de cada experimento realizado no estudo fluidodinâmico do material úmido:

Amostras	Condições experimentais
Amostra 1	Sem vibração
Amostra 3	$f = 200 \text{ rpm}$, $a = 0,01\text{m}$
Amostra 4	Sem vibração
Amostra 5	$f = 200 \text{ rpm}$, $a = 0,01\text{m}$
Amostra 6	$f = 400 \text{ rpm}$, $a = 0,01\text{m}$
Amostra 7	$f = 200 \text{ rpm}$, $a = 0,02\text{m}$
Amostra 8	$f = 400 \text{ rpm}$, $a = 0,02\text{m}$
Amostra 9	Sem vibração
Amostra 10	$f = 400 \text{ rpm}$, $a = 0,02\text{m}$
Amostra 11	$f = 200 \text{ rpm}$, $a = 0,02\text{cm}$
Amostra 12	$f = 400 \text{ rpm}$, $a = 0,01\text{m}$
Amostra 13	$f = 200 \text{ rpm}$, $a = 0,01\text{m}$
Amostra 14	$f = 200 \text{ rpm}$, $a = 0,01\text{m}$

Continuação da Tabela 4.16

Amostra 15	Sem vibração
Amostra 16	$f = 400 \text{ rpm}, a = 0,01\text{m}$
Amostra 17	$f = 200 \text{ rpm}, a = 0,02\text{m}$
Amostra 18	$f = 400 \text{ rpm}, a = 0,02\text{m}$

O estudo fluidodinâmico do ácido adípico úmido, proveniente da indústria, em leito vibrofluidizado (LVF) foi realizado com a finalidade de comparar o comportamento com o leito fluidizado convencional (LFC), e verificar condições favoráveis para se realizar a secagem em laboratório do material úmido.

A partir das curvas de fluidização foi possível realizar uma comparação entre os dois sistemas (LFC – sem vibração e LVF). As Figuras 4.53 a 4.57 mostram a influência dos parâmetros vibracionais no comportamento fluidodinâmico das partículas úmidas.

As Figuras 4.53 e 4.54 mostram as curvas fluidodinâmicas para o material colocado na estufa por 10 minutos, resultando em um teor de umidade $\overline{X}_t = 5,1\%$. Para o leito fluidizado convencional – sem vibração – nenhum movimento das partículas foi observado, o ar somente percolou o leito até a máxima velocidade de gás fornecida pelo equipamento. Para uma amplitude fixa de 0,01 m, variando a frequência vibracional, observou-se que com o aumento da frequência o leito se mostrou mais aglomerado acarretando em uma maior perda de carga, como pode ser observado pela Figura 4.53. Alterando a amplitude para 0,02 m, as curvas para frequências de 200 e 400 rpm se encontram mais próximas, mas ainda para uma frequência de 200rpm ainda tem-se uma menor perda de carga. Para o conteúdo de umidade estudada, $\overline{X}_t = 5,1\%$, a vibração manteve o aglomerado em estado móvel com pequena taxa de circulação das partículas, devido à relação entre as forças de ligação das partículas quando úmidas e a força de arraste ser desfavorável.

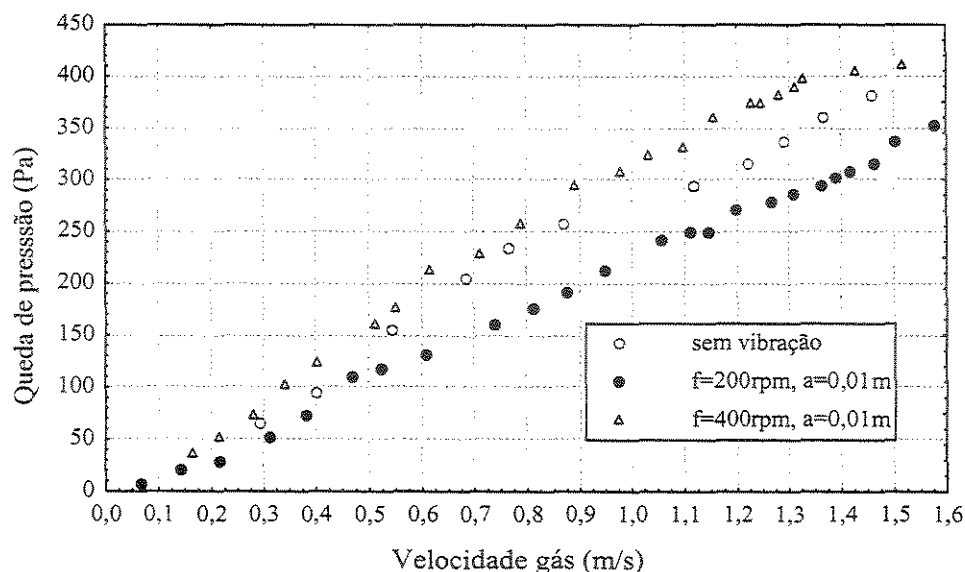


Figura 4.53 – Queda de pressão em função da velocidade ar para amplitude de 0,01m nas curvas fluidodinâmicas do ácido adípico, 300g, $\overline{X}_f = 5,1\%$.

Dependendo do conteúdo de umidade, acima de uma determinada frequência de vibração utilizada, $(\Delta P_{mf})_v$ apresentou maiores valores que $(\Delta P_{mf})_s$, pelas forças de adesão interpartículas, devido à presença de umidade no material.

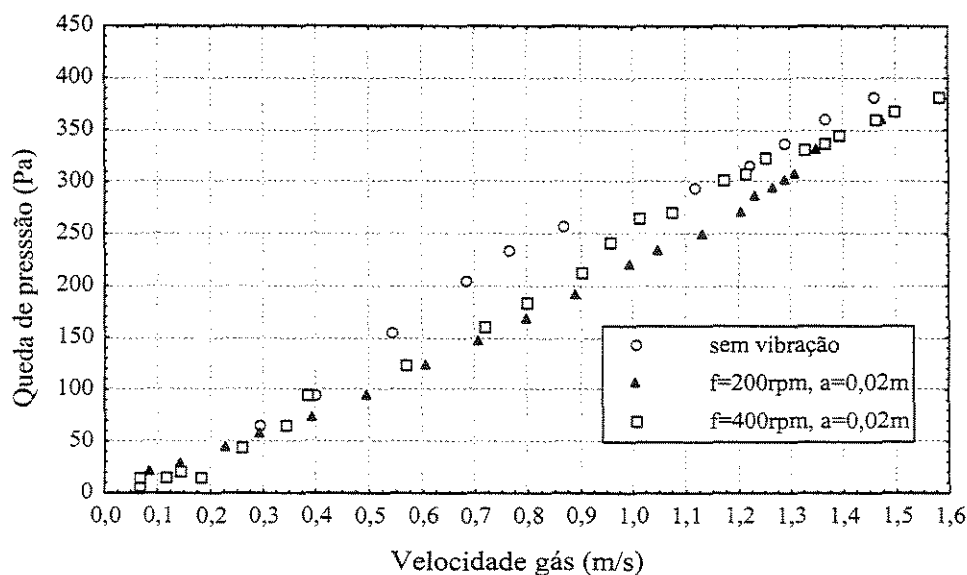


Figura 4.54 – Queda de pressão em função da velocidade ar para amplitude de 0,02m nas curvas fluidodinâmicas do ácido adípico, 300g, $\overline{X}_f = 5,1\%$.

As Figuras 4.55 e 4.56 mostram as curvas para o material colocado na estufa por 35 minutos, $\overline{X}_f = 2,8\%$, sem e com aplicação de vibração. Para o LFC a uma determinada velocidade do gás, aproximadamente 1,5 m/s, formou-se um canal preferencial no canto esquerdo do leito caindo bruscamente a perda de carga sem nenhum movimento de partículas. Fixando a amplitude em 0,01m para $f=200\text{rpm}$, Figura 4.55, a uma velocidade do gás de aproximadamente 1,08 m/s inicia a formação de canais preferenciais, mas devido ao efeito da vibração houve a quebra dos canais e uma boa taxa de circulação das partículas foi observada. Aumentando a frequência de vibração para 400rpm houve uma maior compactação do leito com formação de um “bolo” central e movimento do aglomerado com baixa taxa de circulação. A queda de pressão é menor para $a = 0,01\text{m}$ e $f=200\text{rpm}$ comparada com o leito sem vibração e a uma frequência de vibração de 400rpm e $a = 0,01\text{m}$. O aumento da frequência de vibração de 200 para 400rpm provocou um efeito significativo na aglomeração das partículas, aumentando as forças intermoleculares existentes e uma maior aglomeração foi observada no centro do leito. O valor da queda de pressão fica praticamente constante para uma velocidade do gás acima de 1,1 m/s a um valor aproximado de 250 Pa. A Figura 4.56 mostra as curvas fluidodinâmicas para o LFC e com aplicação de vibração, amplitude de 0,02 m e frequência de 200 e 400rpm. Para frequência de 200rpm a formação dos primeiros canais ocorreu para uma velocidade do gás de aproximadamente 1,35 m/s com uma baixa taxa de circulação. Aumentando a frequência para 400rpm houve a formação de um canal preferencial no canto direito do leito a uma velocidade do gás de aproximadamente 1,05 m/s e somente a 1,45 m/s observou-se uma boa mistura.

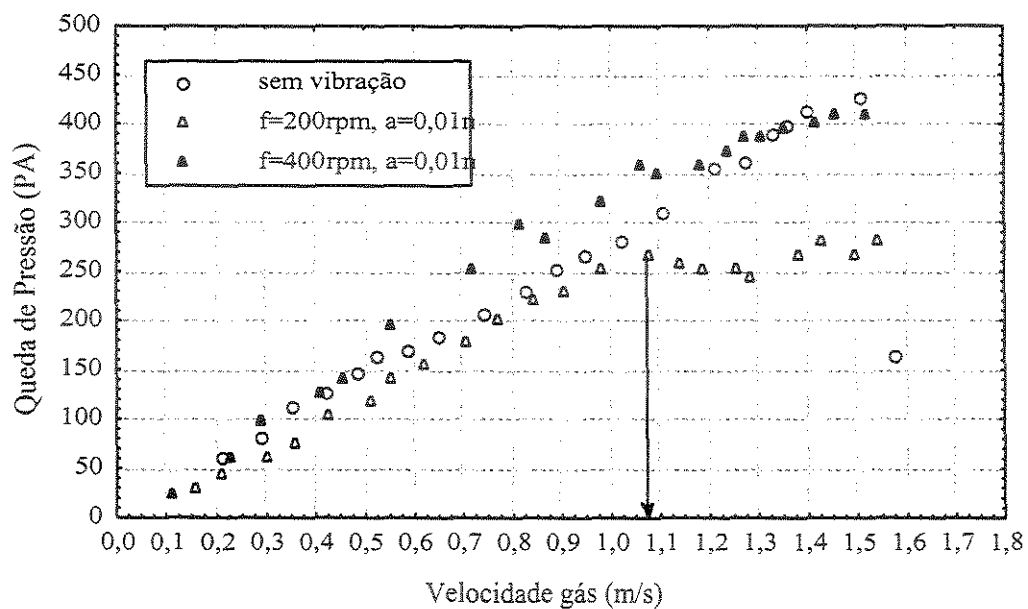


Figura 4.55 - Queda de pressão em função da velocidade ar para amplitude de 0,01m nas curvas fluidodinâmicas do ácido adípico, 300g, $\overline{X}_I = 2,8\%$.

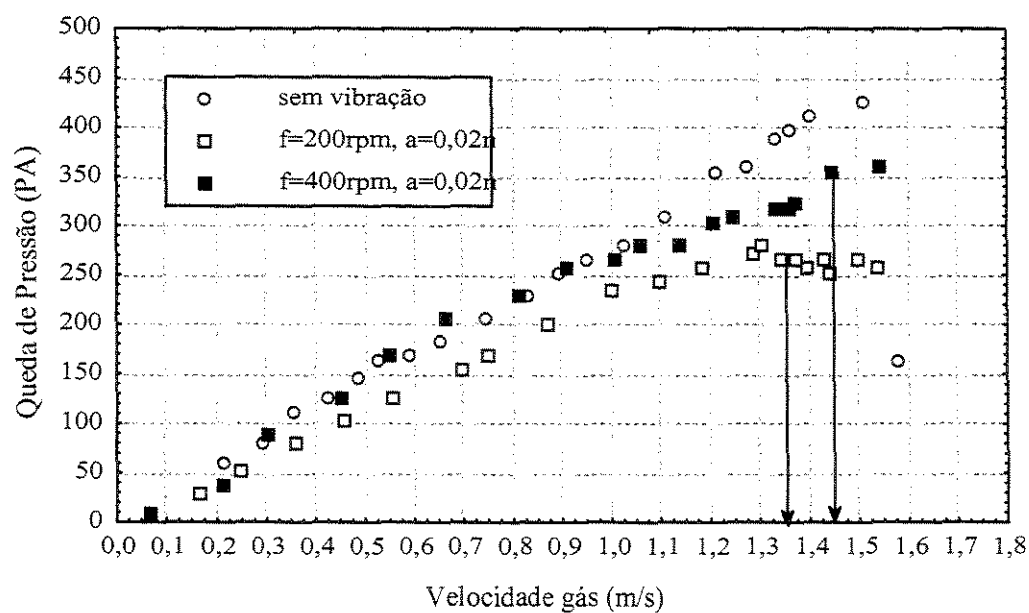


Figura 4.56 - Queda de pressão em função da velocidade ar para amplitude de 0,02m nas curvas fluidodinâmicas do ácido adípico, 300g, $\overline{X}_I = 2,8\%$.

A Figura 4.57 mostra a curva fluidodinâmica para a Amostra 3, $\overline{X}_t = 1,2\%$, para a qual observou-se uma boa taxa de circulação das partículas e um comportamento fluidodinâmico similar ao apresentado para as partículas secas.

O comportamento fluidodinâmico a diferentes teores de umidade para o leito sem aplicação de vibração pode ser observado pela Figura 4.58. Para o material colocado na estufa por 10 e 20 minutos o ar somente percolou o leito de partículas. Para o material colocado na estufa por 35 minutos, a uma determinada velocidade do gás, obteve-se a formação de um forte canal preferencial no canto esquerdo do leito acarretando em uma brusca queda da perda de carga, mas sem o estabelecimento de regime de fluidização.

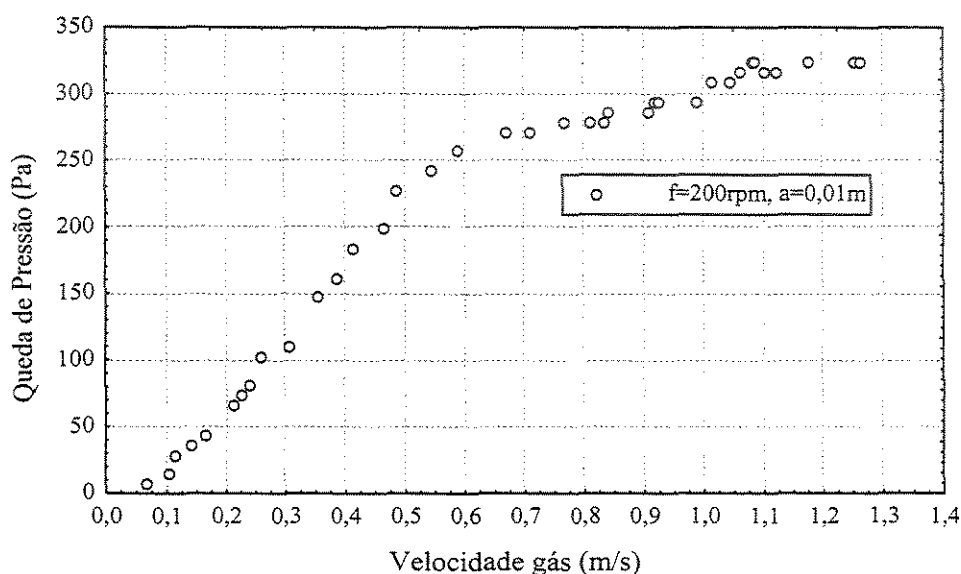


Figura 4.57 – Queda de pressão em função da velocidade ar para o material com teor de umidade 1,2% com aplicação de vibração

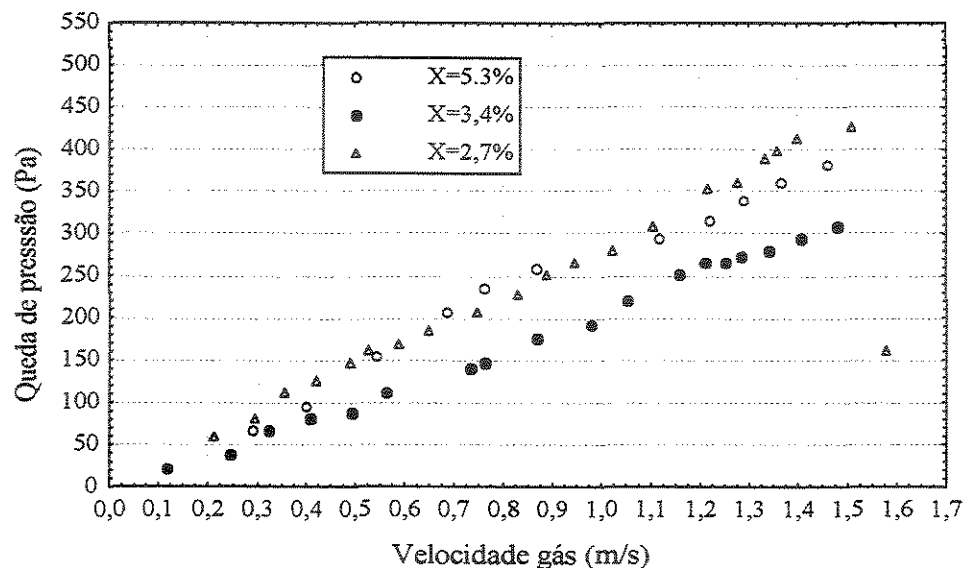


Figura 4.58 – Queda de pressão em função da velocidade ar a diferentes conteúdos de umidade para o LFC

4.6 – SECAGEM DO ÁCIDO ADÍPICO EM LVF

4.6.1 – Análise do ácido adípico em microscópio óptico com aquecimento

Antes de iniciar os experimentos de secagem foram realizadas algumas análises em microscópio óptico com aquecimento para verificar a temperatura em que começa ocorrer deterioração no cristal, com o objetivo de estimar a faixa de temperatura para o processo de secagem.

O material foi colocado em uma placa de platina com aquecimento de 20 a 160°C. A Figura 4.59 mostra uma série de fotos tiradas a diferentes temperaturas podendo-se acompanhar as alterações que ocorreram nos cristais com o aumento da temperatura.

O acompanhamento do aquecimento do material úmido mostrou que começa a ocorrer alterações no cristal a uma temperatura próxima de 100°C, chegando-se à temperatura que inicia a fusão do material, 152°C. Após essa temperatura o cristal derrete completamente e volta a cristalizar com o decréscimo da temperatura.

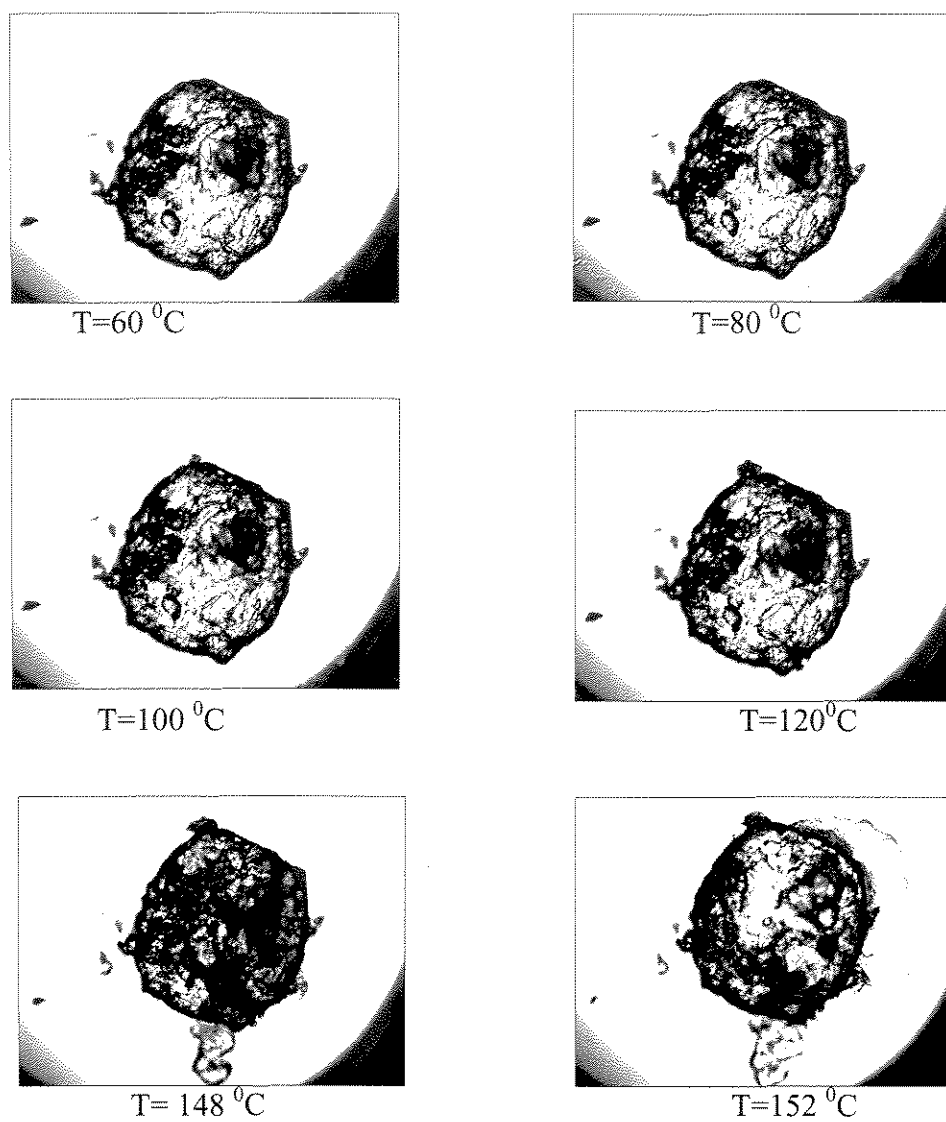


Figura 4.59 – Imagens obtidas por microscopia óptica com aquecimento – ampliação de 100X

Os experimentos de secagem foram então projetados para três diferentes temperaturas do ar na entrada do leito, 60, 80 e 100°C, garantindo que a temperatura no leito de partículas estivesse sempre inferior a 100°C.

4.6.2 - Curvas de secagem

Seguindo a metodologia descrita no item 3.3.5, foram obtidas as curvas experimentais de secagem – conteúdo de umidade em função do tempo ($X_1 \times t$).

Foram realizados 10 ensaios de secagem variando algumas condições experimentais, segundo a Tabela 4.17 que mostra um resumo das amostras analisadas nos experimentos e as condições experimentais para as corridas realizadas neste trabalho. Os valores de X_1 , $u_{gás}$ e G foram definidos com base nos experimentos onde avaliou-se o efeito da umidade do material no comportamento fluidodinâmico à temperatura ambiente. Em todos os experimentos de secagem, o tempo de vibração foi fixado em 20 ou 30 minutos a uma intensidade vibracional, $G = 0,5$, correspondendo a uma frequência de 200rpm e amplitude 0,01m. No início da secagem a vibração exerceu um papel importante para manter o leito agitado e quebrar os aglomerados e canais preferenciais, tendo sido interrompida quando o material já se movimentava no leito com facilidade - regime de fluidização plenamente desenvolvido, apresentando uma alta taxa de circulação. O tempo de vibração foi de 30 minutos para valores menores de velocidade do ar para as Amostras D, F e H.

Tabela 4.17 – Condições experimentais dos ensaios de secagem

	$X_1(\%)$ b.u.	$u_{\text{gás}}$ (m/s)	t_{corr} (min)	t_{vib} (min)	UR_{amb} (%)	UR_{linha} (%)	T (°C)	Equipamento utilizado
Amostra A	2,98	1,3	120	20	56-58	23	80	LVF/LFC
Amostra B	2,89	0,9	120	20	55-58	25	80	LVF/LFC
Amostra C	2,86	1,3	120	20	60-62	26	60	LVF/LFC
Amostra D	2,70	0,9	120	30	56-58	23	60	LVF/LFC
Amostra E	5,52	1,3	180	20	57-58	23	80	LVF/LFC
Amostra F	5,36	0,9	180	30	59-60	22	80	LVF/LFC
Amostra G	5,11	1,3	180	20	60-62	24	60	LVF/LFC
Amostra H	4,90	0,9	120	30	55-56	21	60	LVF/LFC
Amostra I	5,47	1,3	120	20	56-58	24	100	LVF/LFC
Amostra J	3,48	1,3	120	20	60-62	26	100	LVF/LFC

As Figuras 4.60 a 4.69 mostram as curvas de secagem (X_1'/X_1 em função do tempo) nas condições experimentais utilizadas para as amostras de A a J, Tabela 4.17.

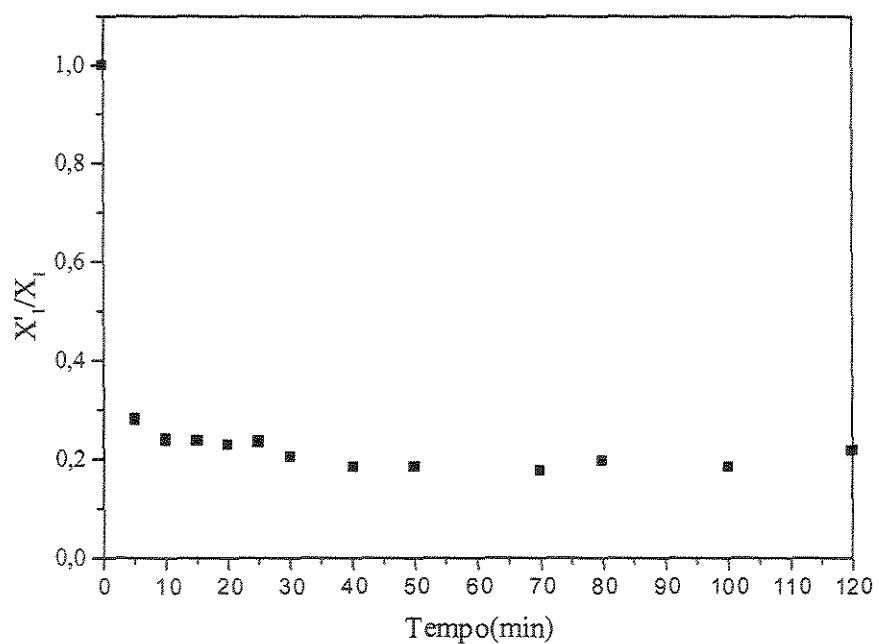
As curvas de secagem obtidas no trabalho apresentaram os dois períodos: a taxa constante e decrescente. A quantidade de umidade removida diminui até um ponto em que a umidade chega ao equilíbrio.

Durante o período à taxa constante, a quantidade de água no material é grande e a água evapora-se como água livre. Este período continua, enquanto a migração de água do interior até a superfície do material for suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície.

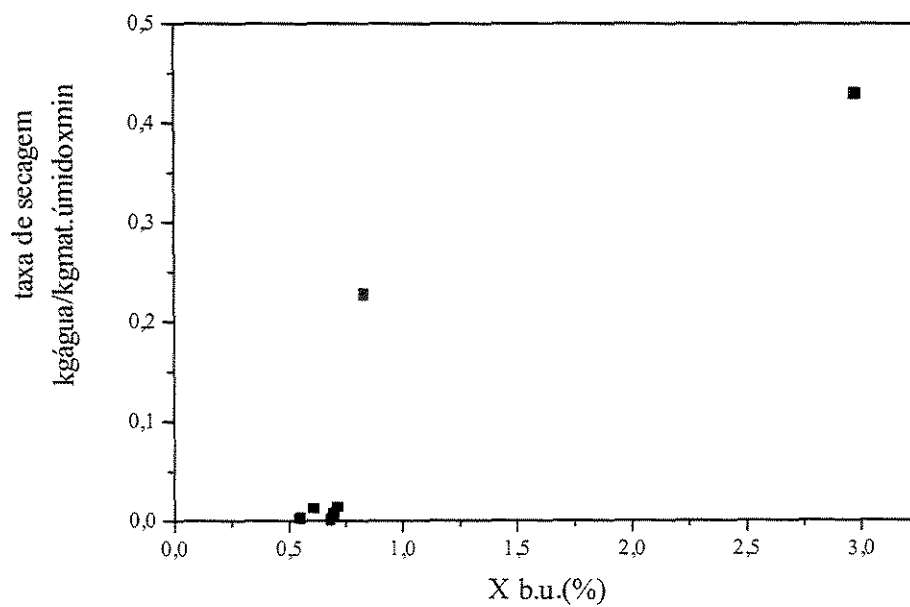
No período de taxa de secagem decrescente, momento em que a água que migra do interior do sólido para a superfície começa a ser deficiente na superfície, a taxa de secagem diminui. O período é controlado pelo mecanismo de migração interna da água, a característica da estrutura interna do material é um fator essencial para o estudo do mecanismo. Por todo este período o fator limitante é a migração interna de água. No final deste período o material praticamente entra em equilíbrio com o ar e a velocidade de secagem é nula.

deste período o material praticamente entra em equilíbrio com o ar e a velocidade de secagem é nula.

A taxa de secagem ($-dX/dt$) dos ensaios realizados pode ser obtida em qualquer ponto através da diferenciação da curva de X_1' em função de t . A taxa de secagem constante foi obtida por diferenciação da regressão linear do tipo $X=at+b$, onde $a=(dX/dt)$, para as curvas que apresentaram coeficientes de correlação entre 0,87 a 0,98. As taxas de secagem decrescente foram obtidas por diferenciação dos pontos das curvas onde o ajuste linear não se apresentou satisfatório. Para três amostras apresentadas na Tabela 4.17, A, I e J, não foi possível acompanhar a taxa de secagem no período constante. Para as amostras I e J a taxa constante provavelmente ocorreu durante os primeiros minutos do experimento, dificultando a amostragem em um curto período de tempo e para a amostra A que foi o primeiro experimento realizado, o primeiro ponto de amostragem foi realizado aos 5 minutos.

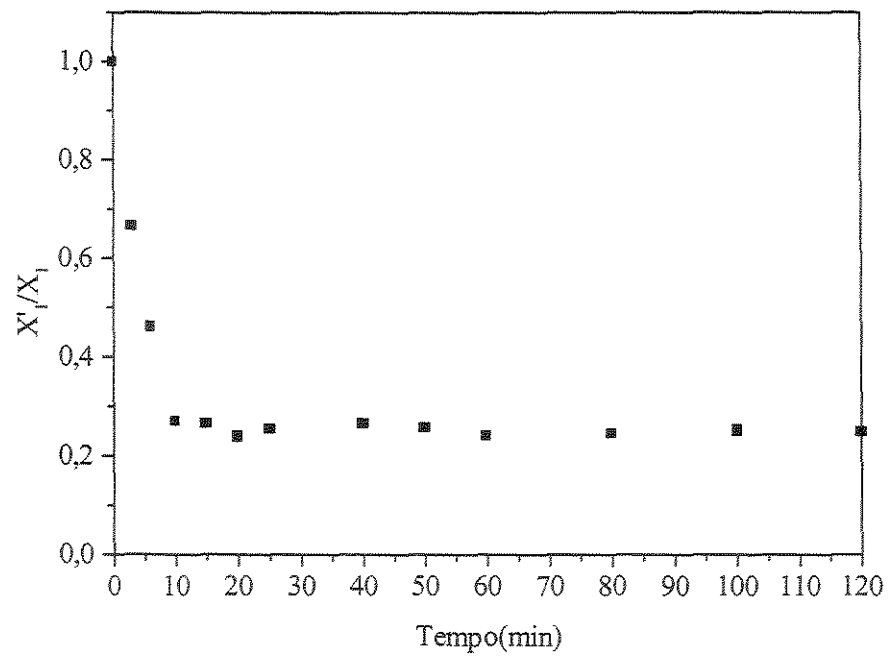


(a)

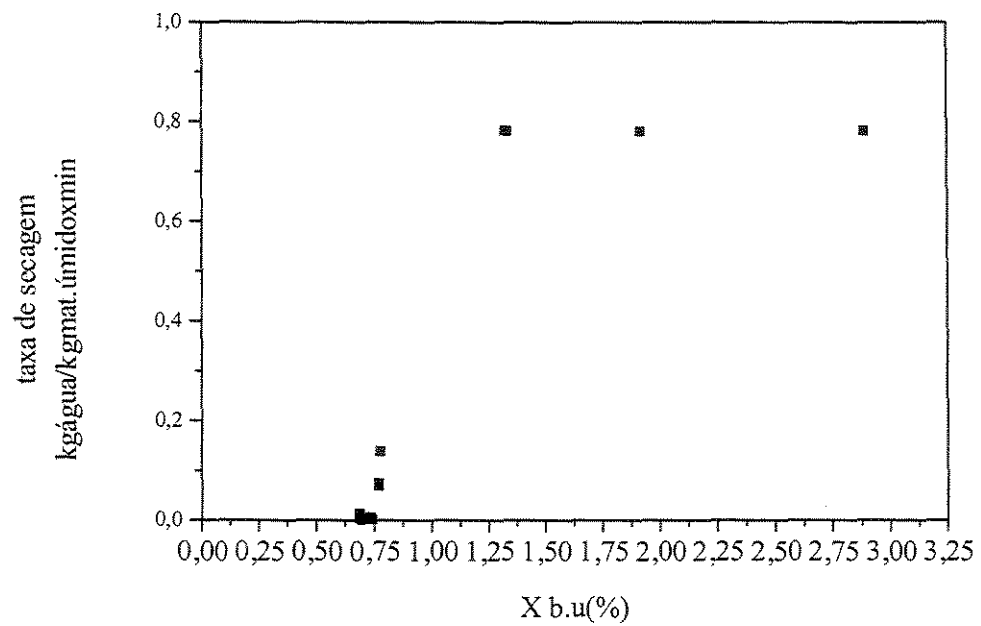


(b)

Figura 4.60 – Curva de Secagem (a) e Curva da Taxa de Secagem (b), Amostra A

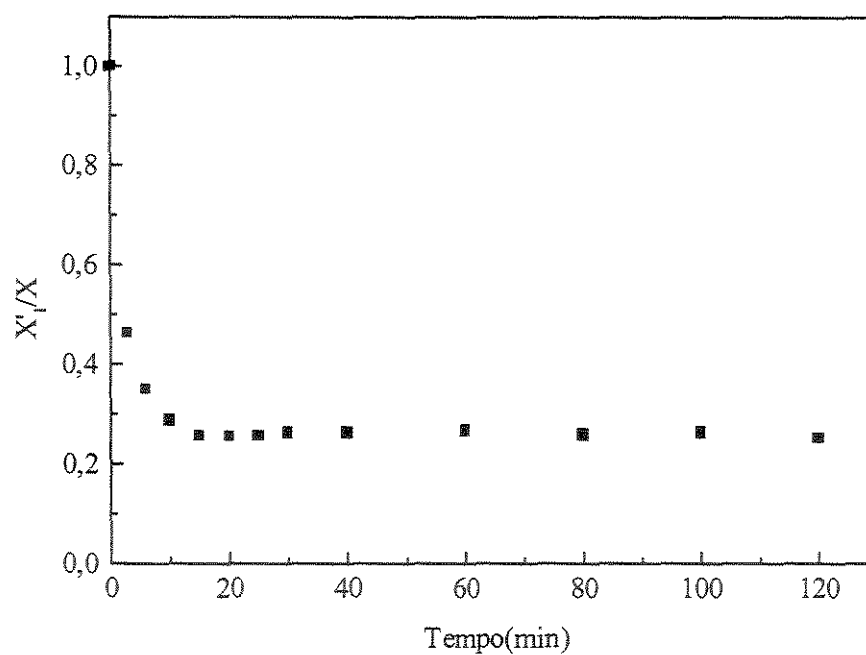


(a)

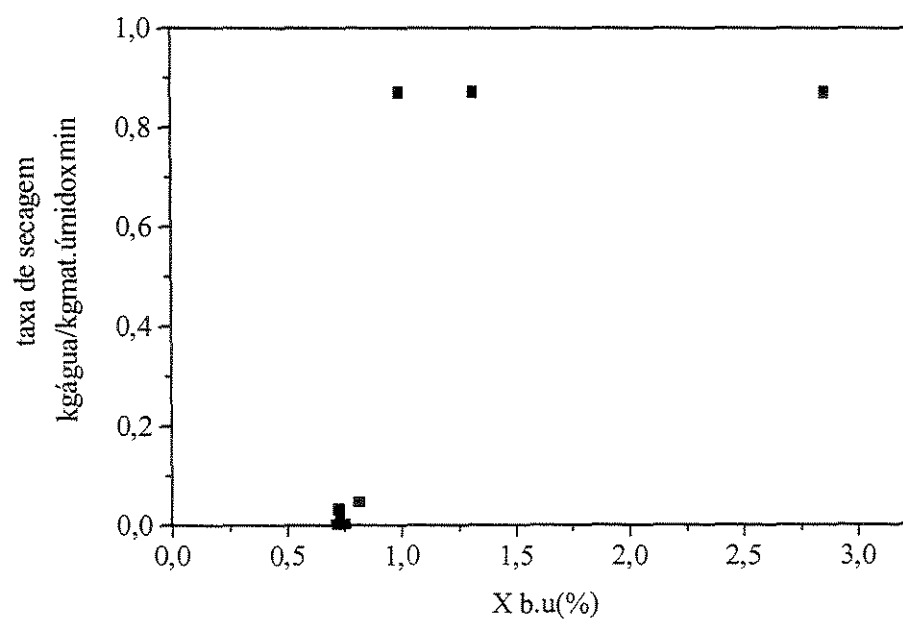


(b)

Figura 4.61 – Curvas de Secagem (a) e Taxa de Secagem (b), Amostra B

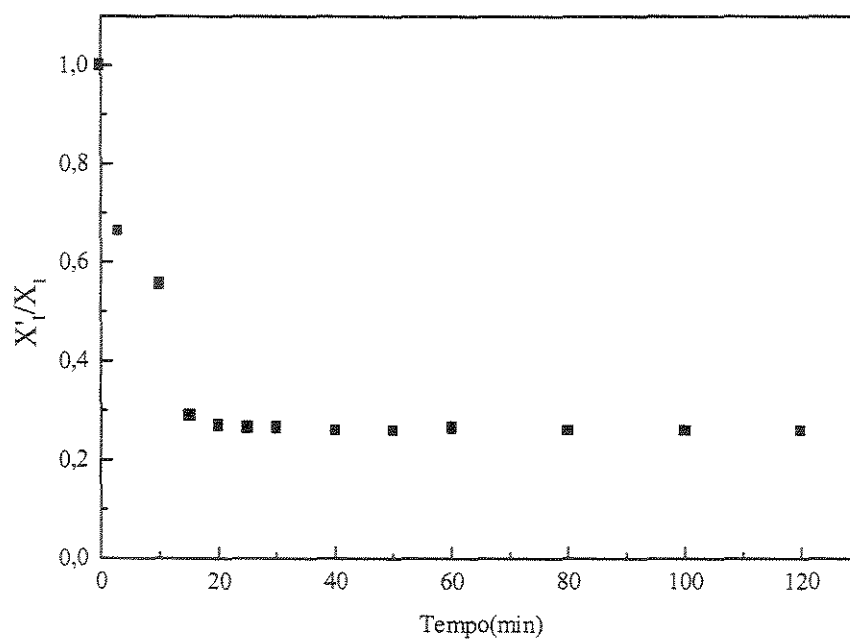


(a)

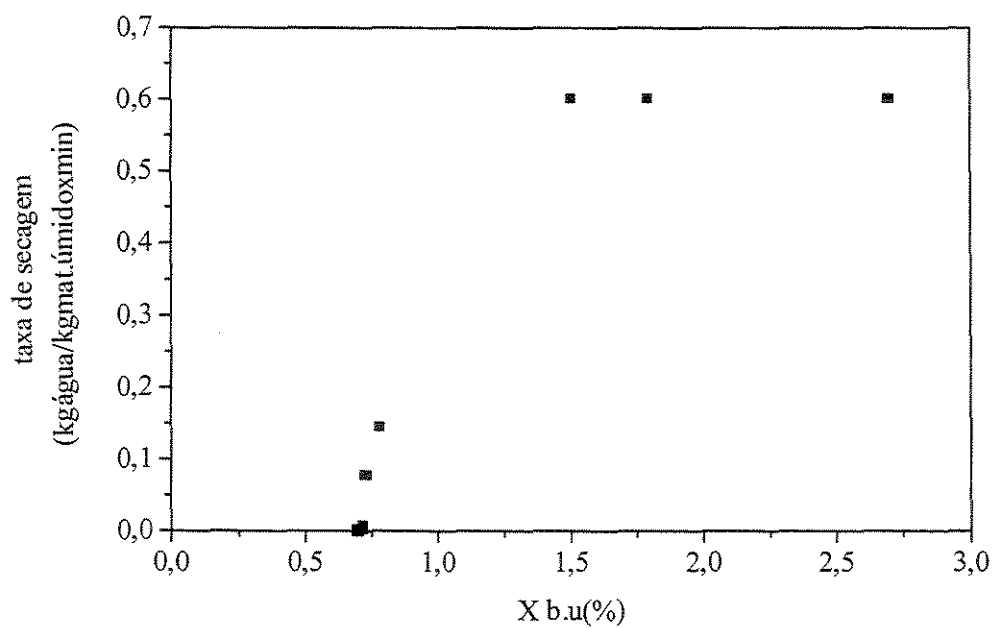


(b)

Figura 4.62. – Curvas de Secagem (a) e Taxa de Secagem (b), Amostra C

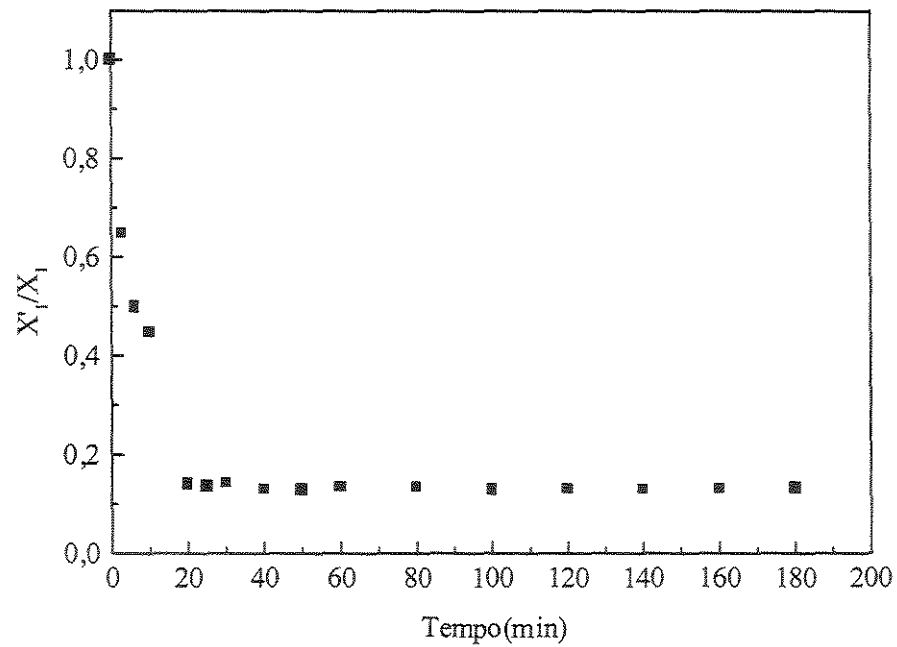


(a)

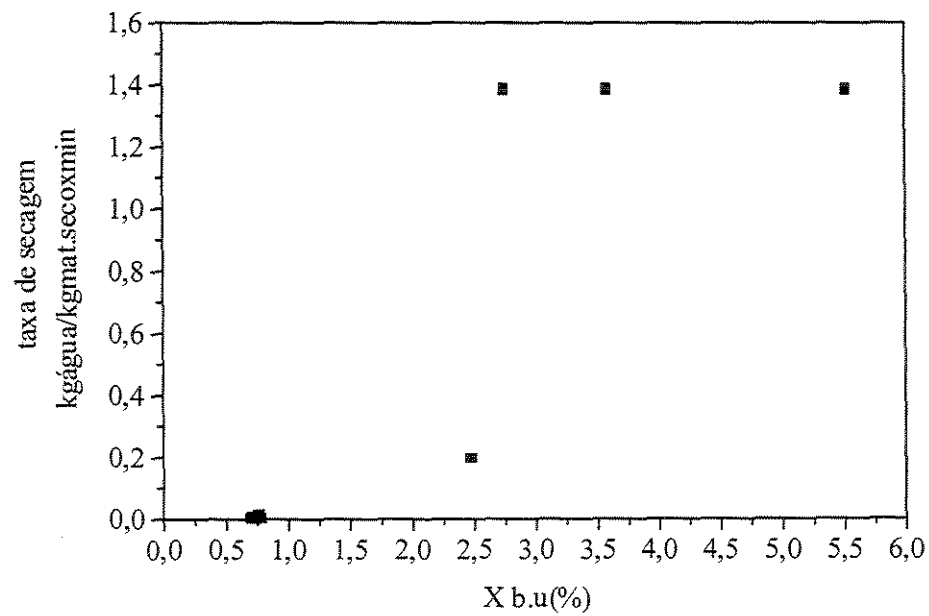


(b)

Figura 4.63 – Curvas de Secagem (a) e Taxa de Secagem (b), Amostra D

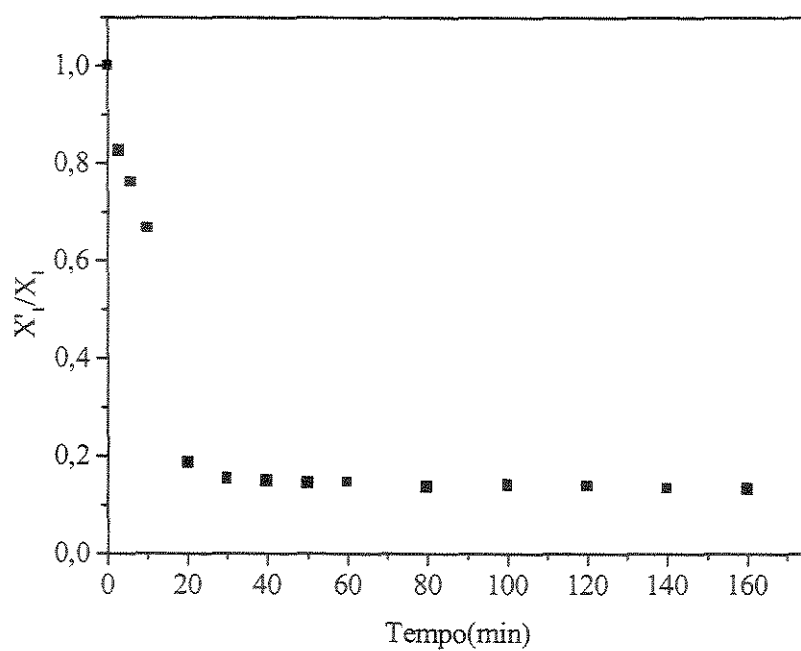


(a)

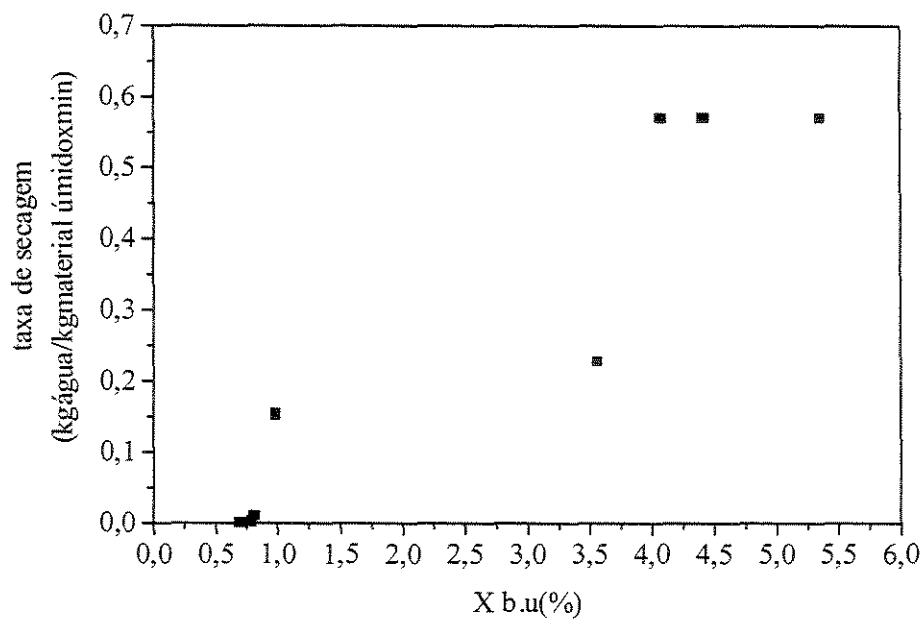


(b)

Figura 4.64. – Curvas de Secagem (a) e Taxa de Secagem (b), Amostra E

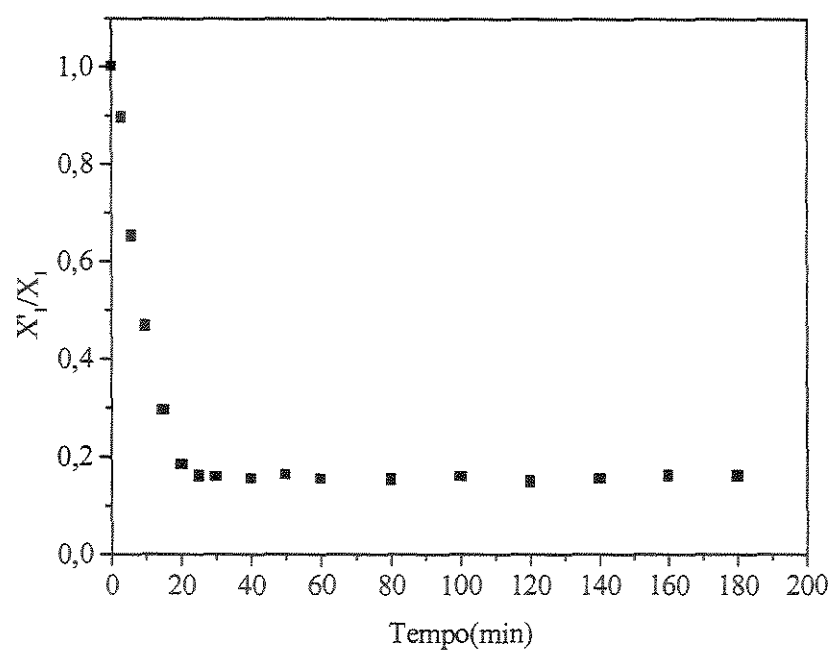


(a)

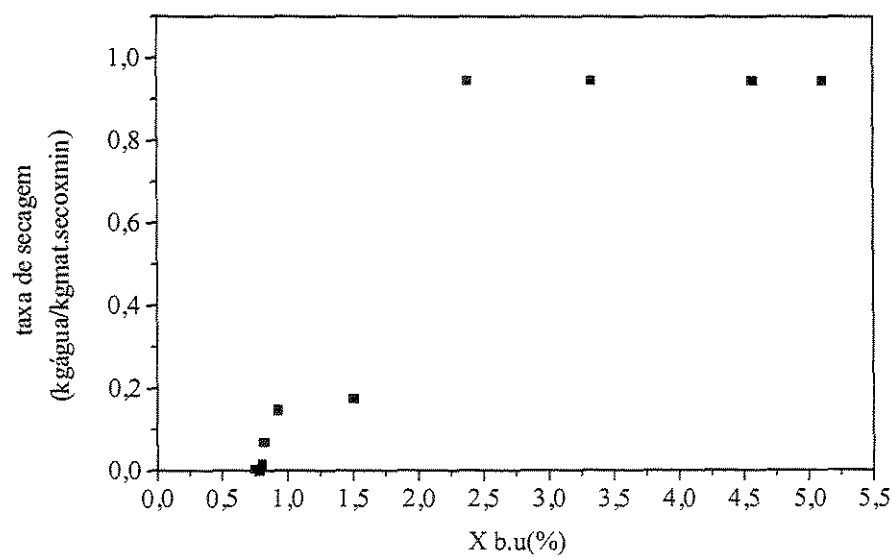


(b)

Figura 4.65 – Curvas de Secagem (a) e Taxa de Secagem (b), Amostra F

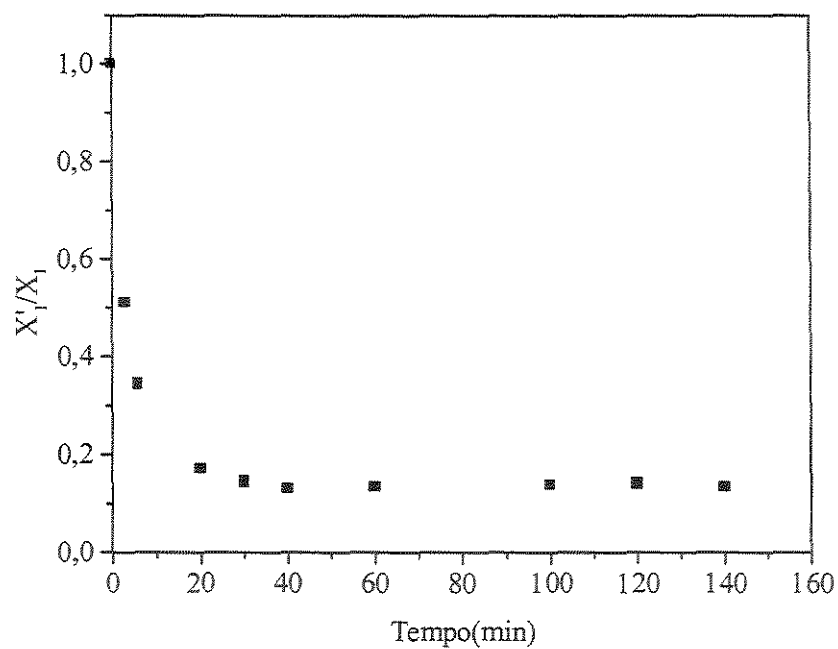


(a)

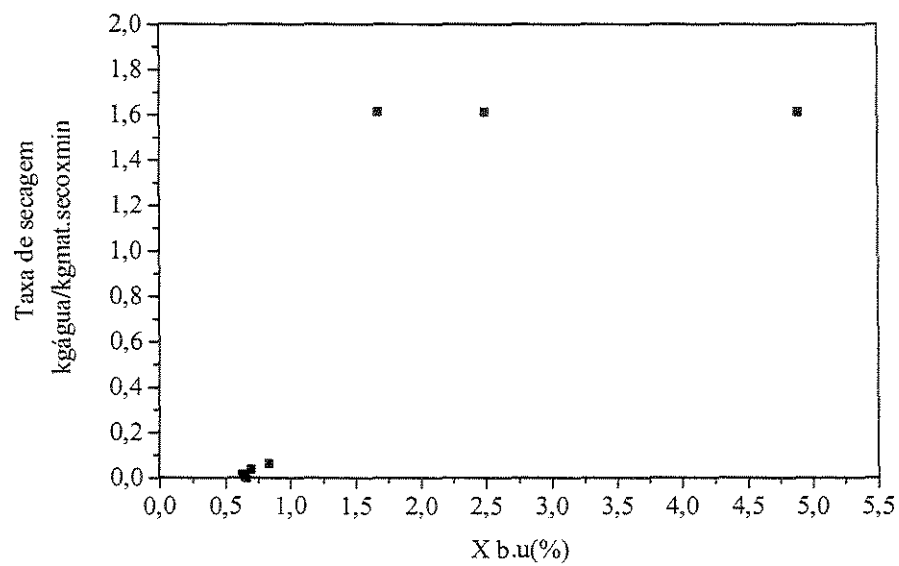


(b)

Figura 4.66 – Curvas de Secagem (a) e Taxa de Secagem (b), Amostra G

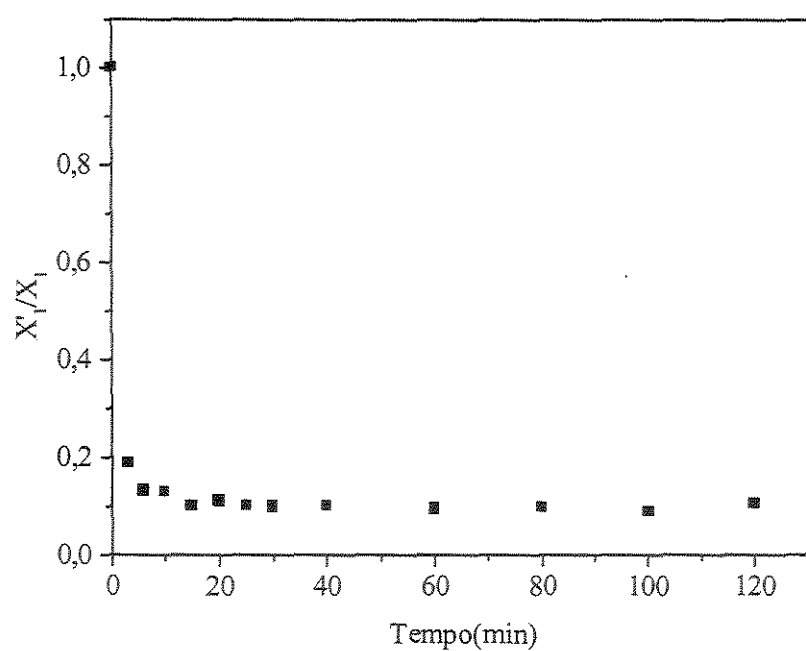


(a)

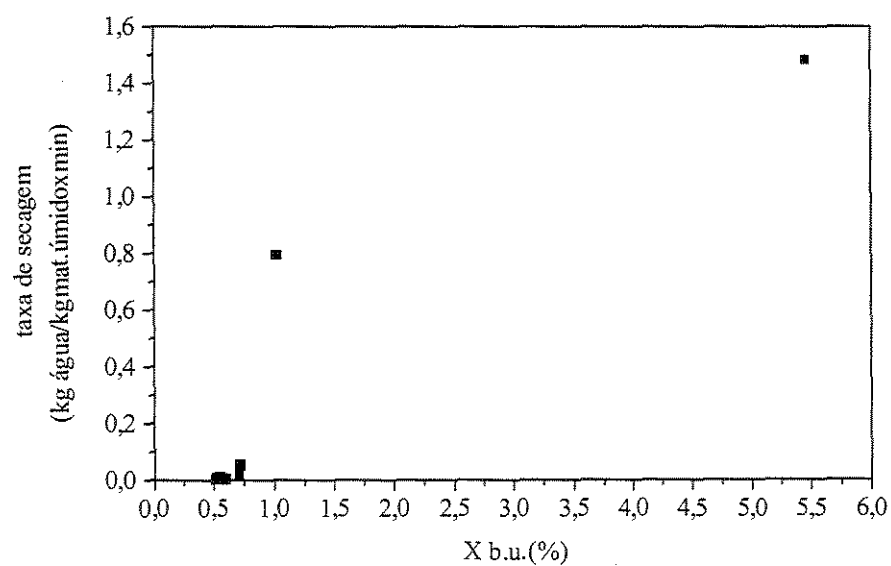


(b)

Figura 4.67 – Curvas de Secagem (a) e Taxa de Secagem (b), Amostra H

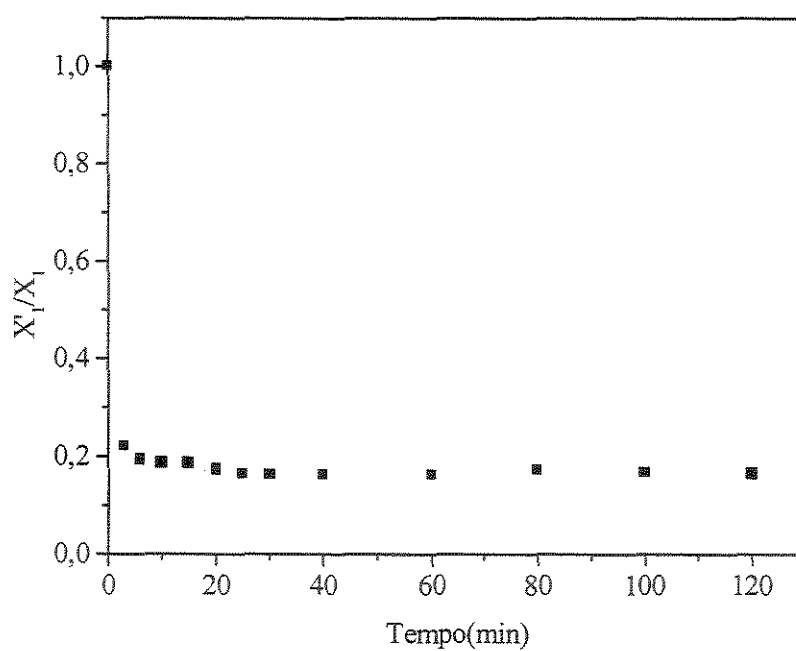


(a)

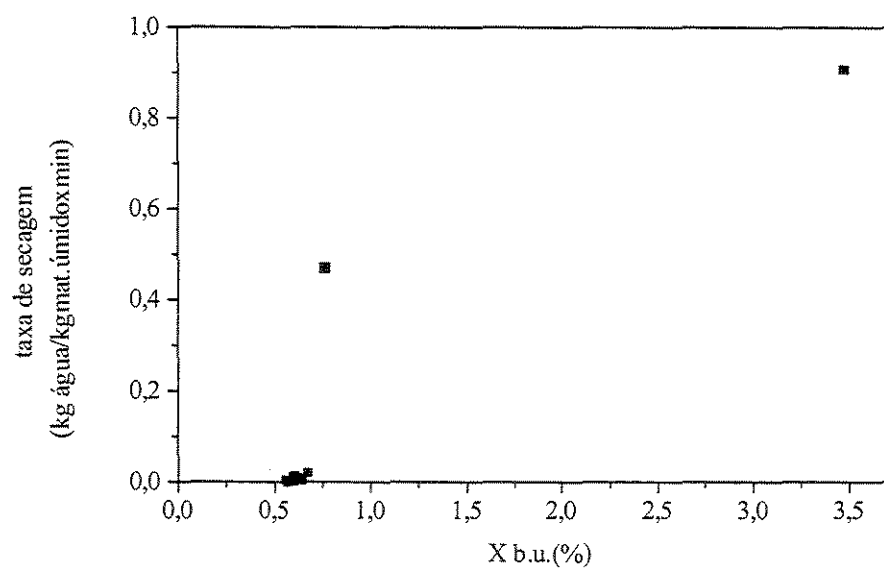


(b)

Figura 4.68 – Curvas de Secagem (a) e Taxa de Secagem (b), Amostra I



(a)



(b)

Figura 4.69 – Curvas de Secagem (a) e Taxa de Secagem (b), Amostra J

A temperatura do gás de saída foi acompanhada em função do tempo por um termômetro situado a 5 cm acima do leito de partículas, para diferentes temperaturas do ar na entrada do leito, Figura 4.70. Neste ponto, a temperatura mostrou-se menor que a temperatura do ar de entrada devido às perdas de calor para o leito de partículas e o ambiente. Para as Amostras I e J as curvas apresentaram comportamento semelhante, em condições experimentais onde variou-se apenas a umidade do material alimentado no leito.

A Figura 4.71 mostra o efeito da temperatura no processo de secagem, cujo efeito está relacionado principalmente ao transporte interno de umidade nas partículas, pela difusão. Verifica-se a temperatura como uma variável importante no processo de secagem do material estudado.

Observa-se pela Figura 4.72 a diferença nas curvas para o período de taxa de secagem constante e decrescente, como também foi observado nas Figura 4.68 e 4.69.

As Figuras 4.73 e 4.74 mostram o efeito da velocidade de ar, para as Amostras E e F e em seguida C e D. Para as Amostras C e D obteve-se valores de taxa de secagem, no período constante, de aproximadamente 0,9 e 0,6, onde apresentou uma taxa de secagem maior a uma velocidade do gás maior, onde justamente nesse período é esperada a influência das transferências por convecção. O mesmo foi observado para as Amostras E e F.

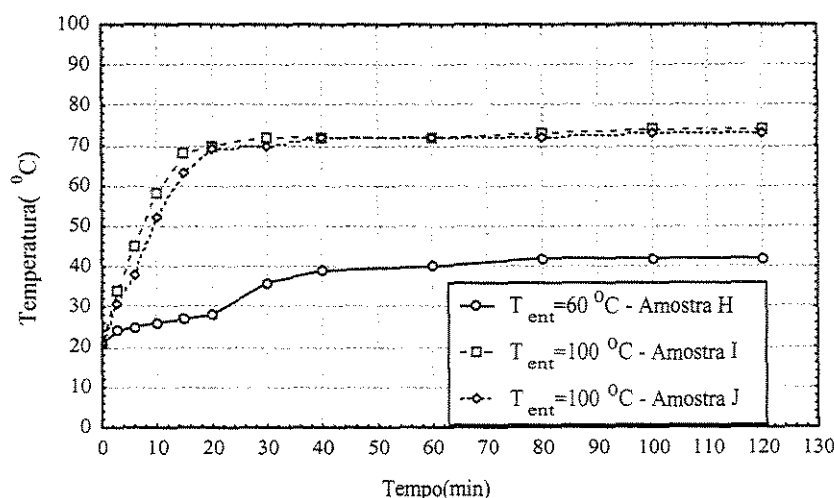


Figura 4.70 - Perfil da Temperatura em um ponto acima do leito de partículas em função do tempo

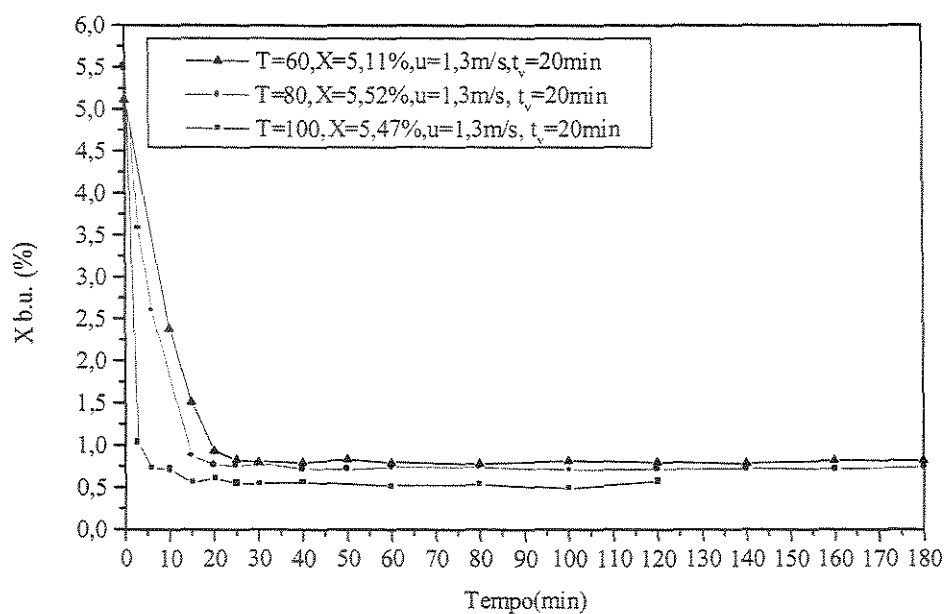


Figura 4.71 – Conteúdo de umidade em função do tempo nos experimentos de secagem do ácido adípico em LVF/LFC

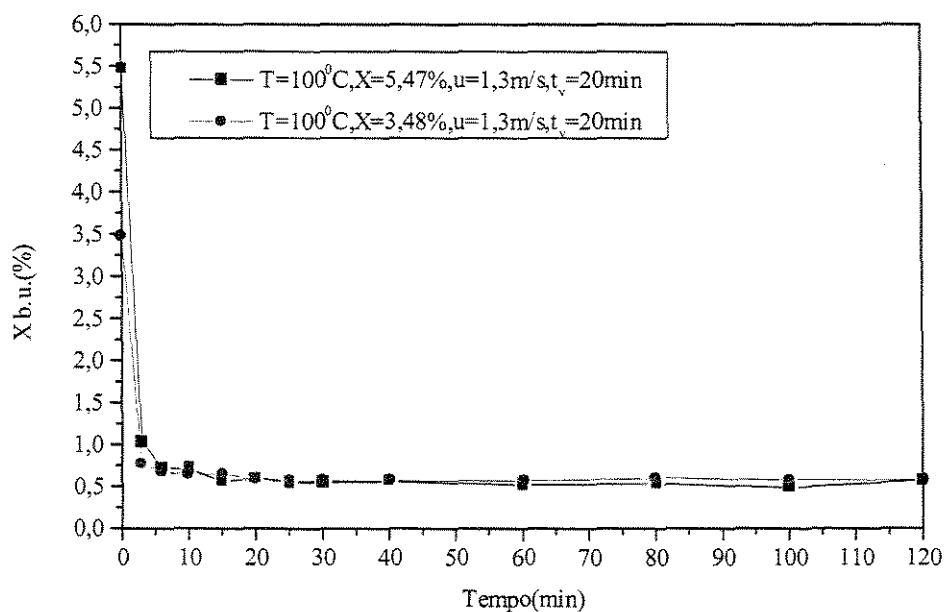


Figura 4.72 – Conteúdo de umidade em função do tempo nos experimentos de secagem do ácido adípico em LVF/LFC a altos valores de temperatura e velocidade ar

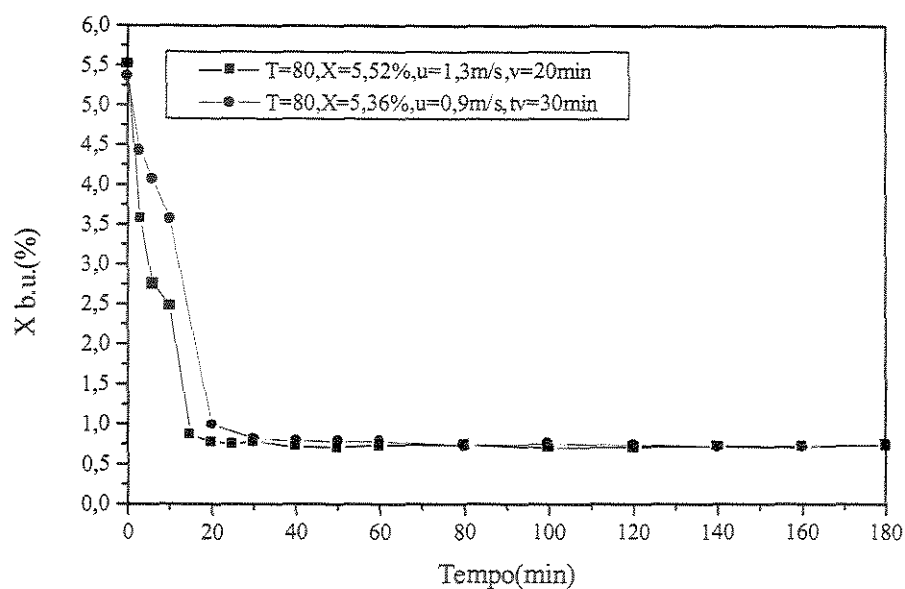


Figura 4.73 - Conteúdo de umidade em função do tempo nos experimentos de secagem do ácido adípico em LVF/LFC variando a velocidade gás e tempo de vibração

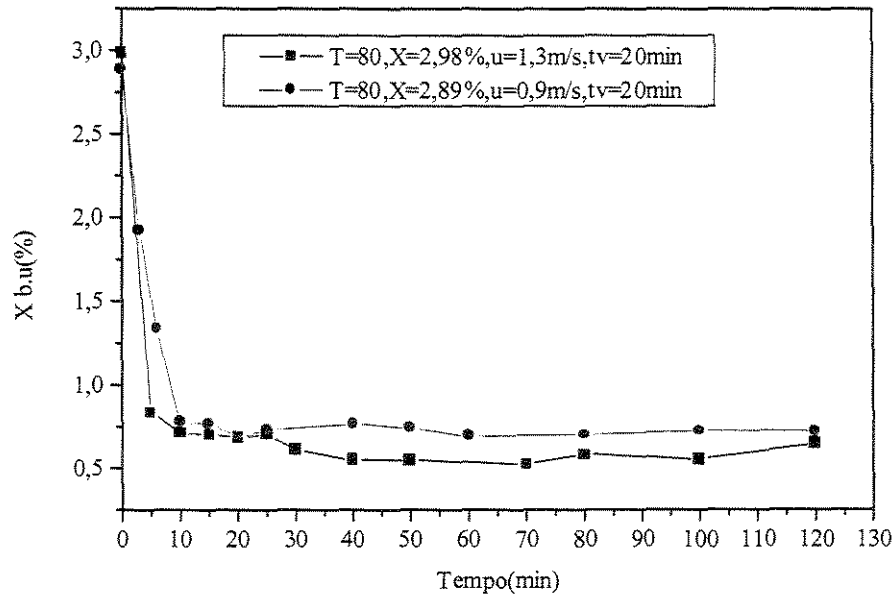


Figura 4.74 - Conteúdo de umidade em função do tempo nos experimentos de secagem do ácido adípico em LVF/LFC variando a velocidade gás

4.6.3 – Análise da variação da umidade do material com a faixa de tamanho dos cristais após o processo de secagem

A análise do conteúdo de umidade para a distribuição granulométrica obtida pelo método de Tyler mostrou a diferença de umidade do material recolhido em cada peneira, ou seja, observou-se a variação da umidade com a faixa de tamanho dos cristais. A Figura 4.75 mostra o conteúdo de umidade em função do tamanho dos cristais para algumas amostras, que foram submetidas ao processo de secagem e armazenadas por um mês em dessecador. Antes da amostra ser submetida à análise granulométrica o conteúdo de umidade da mistura encontrado foi de 0,935 b.u.%.

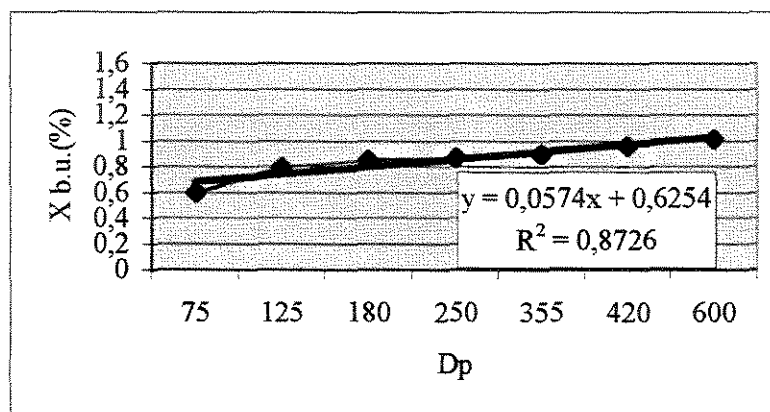


Figura 4.75 – Dados de umidade do material recolhido em cada peneira após armazenada por um mês em dessecador em função do diâmetro de abertura de cada peneira

O mesmo procedimento foi utilizado para os lotes A e B, materiais úmidos proveniente da indústria e dividido em dois lotes que foram denominados de lote A e lote B. A secagem dos lotes A e B foi realizada em estufa à vácuo a uma temperatura de 80 °C e uma pressão igual a 25,6 mm Hg e em seguida o conteúdo de umidade para a distribuição granulométrica obtida pelo método de Tyler foi determinado no equipamento “Karl Fischer”. As Figuras 4.76 e 4.77 ilustram a variação da umidade com o tamanho dos cristais recolhidos em cada peneira. Os resultados mostram que a variação do conteúdo de umidade é linear com o tamanho do cristal, observação que está de acordo com os resultados do

trabalho de VIX et al (1994) para o mesmo material estudado, onde o conteúdo de umidade aumenta com o tamanho da partícula, de 2300 ppm para os cristais menores ($d_p = 150\mu\text{m}$) para 6700 ppm para os maiores ($d_p=670\mu\text{m}$).

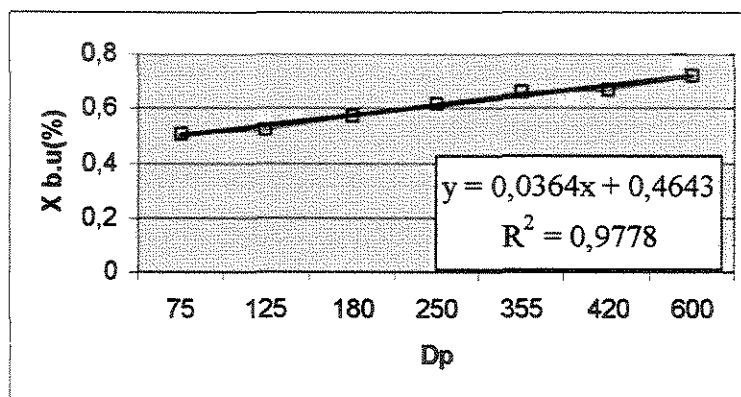


Figura 4.76 - Dados de umidade do material recolhido em cada peneira – Lote A - após secagem em estufa à vácuo a uma temperatura de 80°C e uma pressão de 25,6 mm Hg em função do diâmetro de abertura de cada peneira

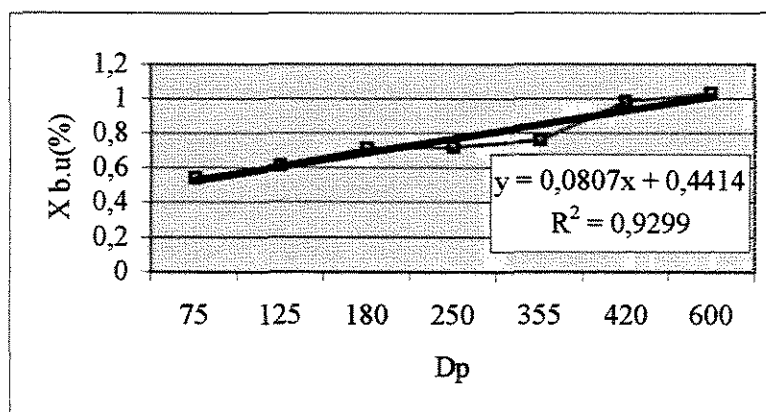


Figura 4.77 - Dados de umidade do material recolhido em cada peneira – Lote B - após secagem em estufa à vácuo a uma temperatura de 80°C e uma pressão de 25,6 mm Hg em função do diâmetro de abertura de cada peneira

4.6.4 – Análise granulométrica do material seco em estufa á vácuo e em LVF

O material original utilizado, proveniente da indústria, estava dividido em dois lotes que foram denominados de lote A e lote B, retirados de recipientes distintos. Uma determinada quantidade de material de cada lote foi submetido à secagem na estufa á vácuo nas seguintes condições: $T = 80^{\circ}\text{C}$, $P = 25,6 \text{ in Hg}$ e por um período de tempo de 24 horas, por um período de 24 horas com o objetivo de realizar a comparação do material seco em condições brandas, lotes A e B, com as amostras A, B, C, D, E, F, G, H, I e J submetidas ao processo de secagem em LVF. A Tabela 4.18 mostra os resultados do conteúdo de umidade médio final e o diâmetro médio de Sauter obtidos para os lotes A e B e das amostras A a J submetidas ao processo de secagem em diferentes condições experimentais.

Analisando apenas o diâmetro médio de Sauter para os lotes A e B e para as amostras de A a J, Tabela 4.18, encontra-se dificuldade para realizar uma análise comparativa. Então, foram construídos os polígonos de frequência para cada condição experimental e para os lotes A e B.

As Figuras 4.78 a 4.86 mostram as distribuições granulométricas através dos polígonos de frequência, que representam a percentagem retida em cada peneira em função do diâmetro de abertura de cada peneira, obtidos pela análise granulométrica dos lotes A e B e das amostras de A a J, recolhidas após cada corrida experimental.

Tabela 4.18 - Valores de diâmetro médio de Sauter e umidade média final para os lotes A e B submetidos a secagem na estufa à vácuo e em diferentes condições experimentais

	Secagem	X _f b.u.(%)	d _p (μm)
Lote A	à vácuo -80°C	0,856	327,1
Lote B	à vácuo -80°C	0,726	300,0
Amostra A	LVF/LFC	0,63	377,2
Lote A	80°C, 1,3m/s, t _v =20min		
Amostra B	LVF/LFC	0,72	318,6
Lote A	80°C, 0,9m/s, t _v =20min		
Amostra C	LVF/LFC	0,75	424,8
Lote A	60°C, 1,3m/s, t _v =20min		
Amostra D	LVF/LFC	0,71	365,5
Lote A	60°C, 0,9m/s, t _v =30min		
Amostra E	LVF/LFC	0,74	383,8
Lote B	80°C, 1,3m/s, t _v =20min		
Amostra F	LVF/LFC	0,76	379,7
Lote B	80°C, 0,9m/s, t _v =30min		
Amostra G	LVF/LFC	0,8	403,8
Lote B	60°C, 1,3m/s, t _v =20min		
Amostra H	LVF/LFC	0,68	383,2
Lote B	60°C, 0,9m/s, t _v =30min		
Amostra I	LVF/LFC	0,55	272,7
Lote B	100°C, 1,3m/s, t _v =20min		
Amostra J	LVF/LFC	0,58	347,9
Lote A	100°C, 1,3m/s, t _v =20min		

O polígono de frequência para o lote B apresentou uma distribuição mais ampla comparada ao lote A, Figura 4.78, onde observa-se distribuição monomodal para ambos.

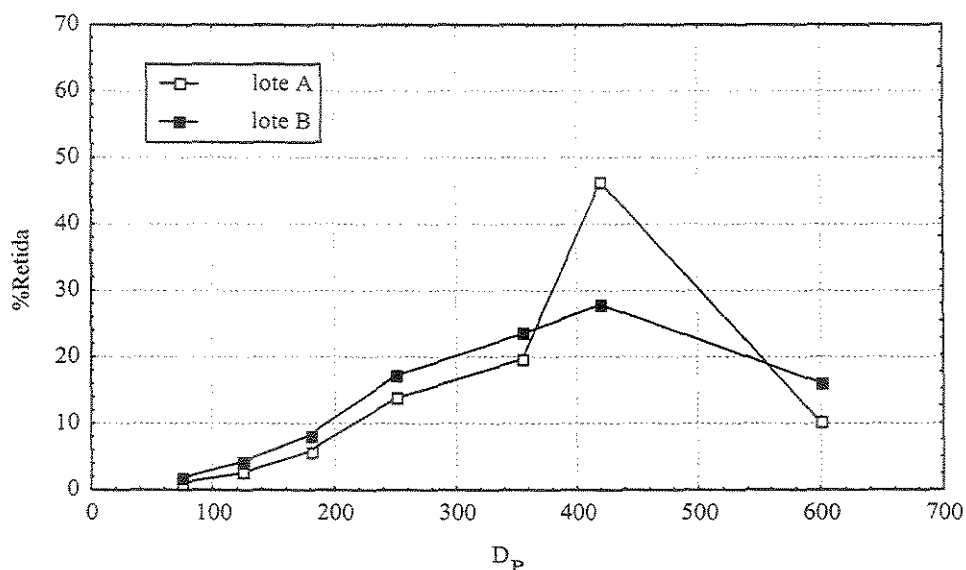


Figura 4.78 – Percentagem retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira - Polígono de frequência – lotes A e B

Comparando as Amostras A e B, Figura 4.78, submetidas no processo a diferentes velocidades do gás, mesma temperatura (80°C) e tempo de vibração, observa-se um polígono de frequência um pouco mais amplo (distribuído) para a Amostra B comparado ao lote A e Amostra A, mostrando que a uma velocidade do gás menor, um movimento mais suave das partículas provocou uma suavização na curva e um diâmetro médio de Sauter pouco menor.

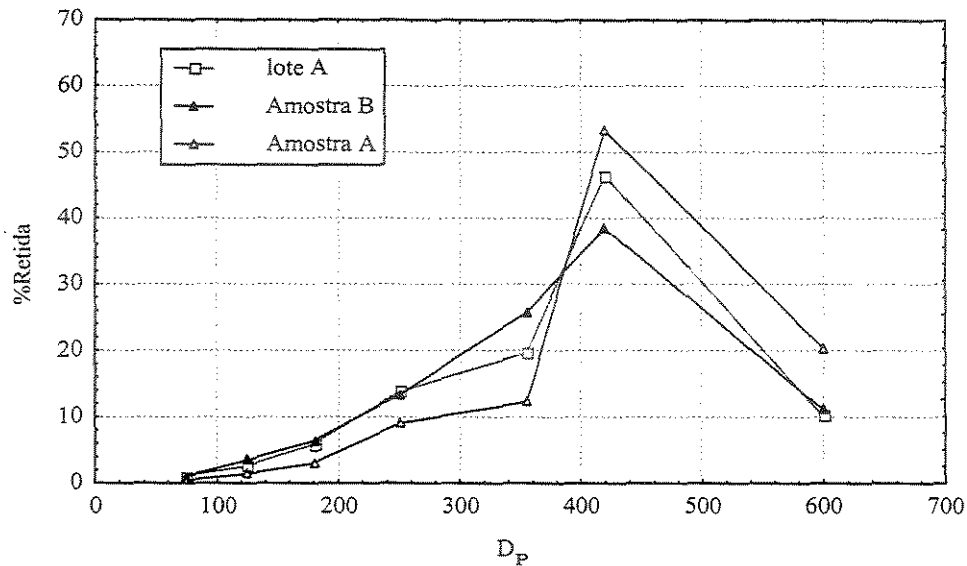


Figura 4.79 – Percentagem retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira - Polígono de frequência – lote A e Amostras A e B

Trabalhando com temperatura do gás menor, de 60°C, Figura 4.80 observa-se que o efeito de um tempo maior de vibração promove uma pequena quebra dos cristais comparando as Amostras C e D. A uma velocidade menor do gás, as curvas do lote A e Amostra D apresentaram comportamento semelhante.

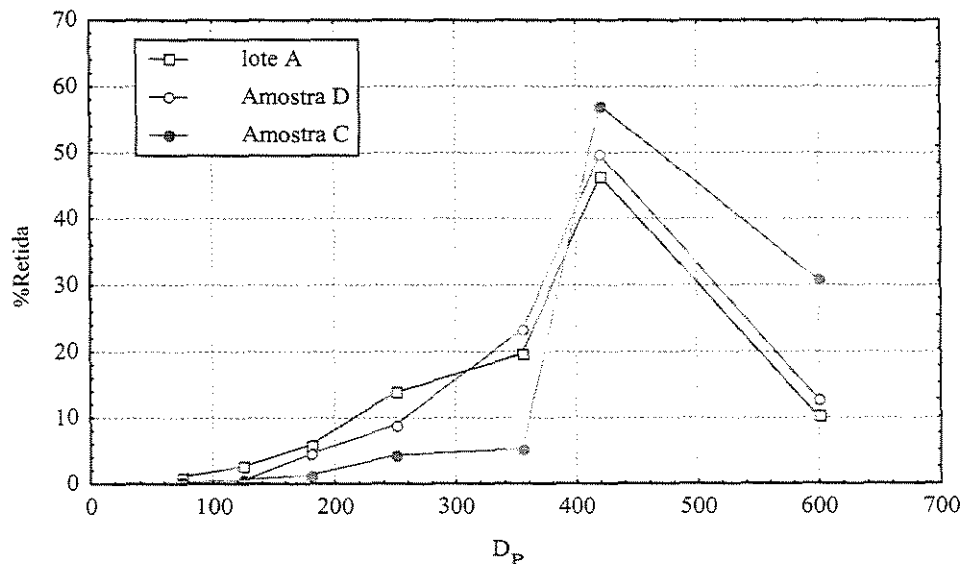


Figura 4.80 – Percentagem retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira Polígono de frequência – lote A e amostras C e D

Na Figura 4.81 observa-se a semelhança no comportamento das curvas comparada ao lote A. A amostra B apresentou uma distribuição mais ampla e com os cristais com tamanho um pouco menor comparado ao lote A. Comparando as amostras B e D, para a Amostra B observa-se uma distribuição mais ampla com diâmetro de Sauter menor devido ao efeito da temperatura; mesmo com um tempo de vibração de 30 minutos à uma temperatura menor, a amostra D apresentou uma distribuição semelhante ao lote A.

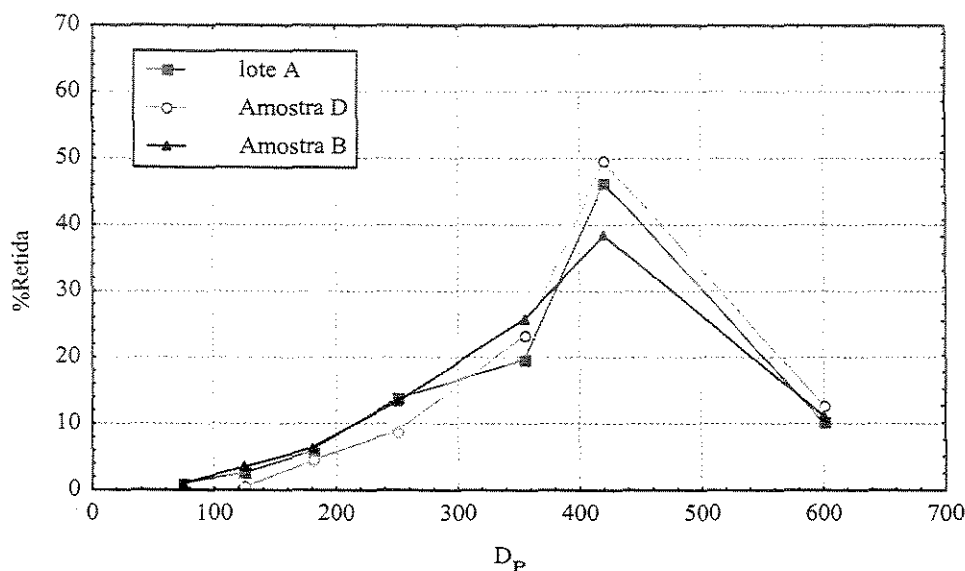


Figura 4.81 – Percentagem retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira - Polígono de frequência – lote A e amostras B e D

A velocidades altas e mesmo tempo de vibração a diferentes temperaturas observa-se o comportamento semelhante das curvas das amostras A e C comparadas ao lote A, comportamento monomodal, apresentando um diâmetro maior para os cristais da Amostra C, submetida a uma menor temperatura. O comportamento bimodal foi obtido para a amostra J, mostrando o efeito da temperatura na quebra dos cristais, sendo que os dois picos nas curvas concentram-se entre 180 a 360 μm , onde já se observava uma pequena tendência nas outras curvas a temperaturas menores (A e C) e entre 360 a 600 μm , Figura 4.82.

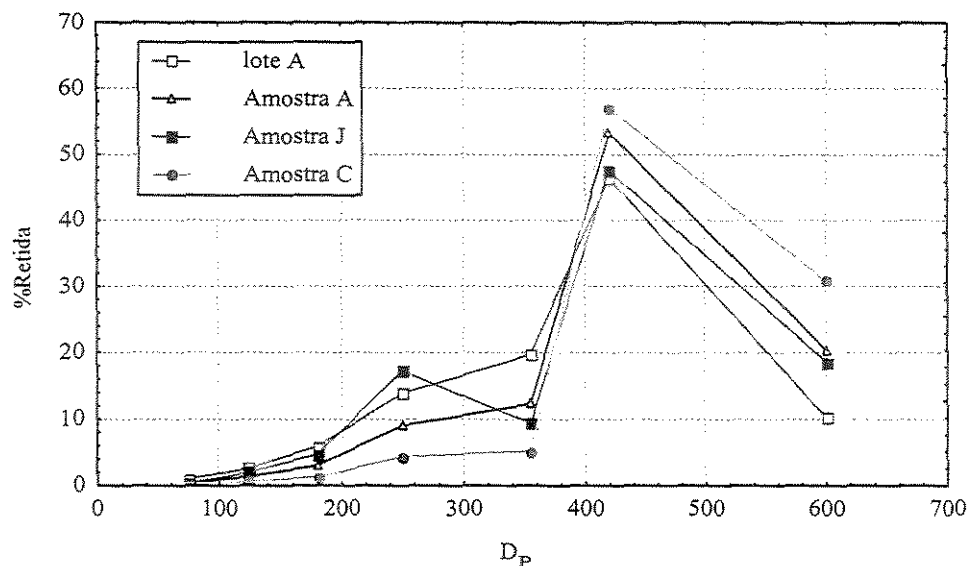


Figura 4.82 – Percentagem retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira - Polígono de frequência – lote A e amostras A, C e J

Analisando as amostras retiradas do lote B, observa-se pela Figura 4.83 que os experimentos realizados a 80°C e a diferentes velocidades de gás mostraram os polígonos de frequência praticamente coincidentes. O efeito da velocidade do gás e do tempo de vibração a essa temperatura mostraram-se desprezíveis no que se refere à distribuição granulométrica do produto final.

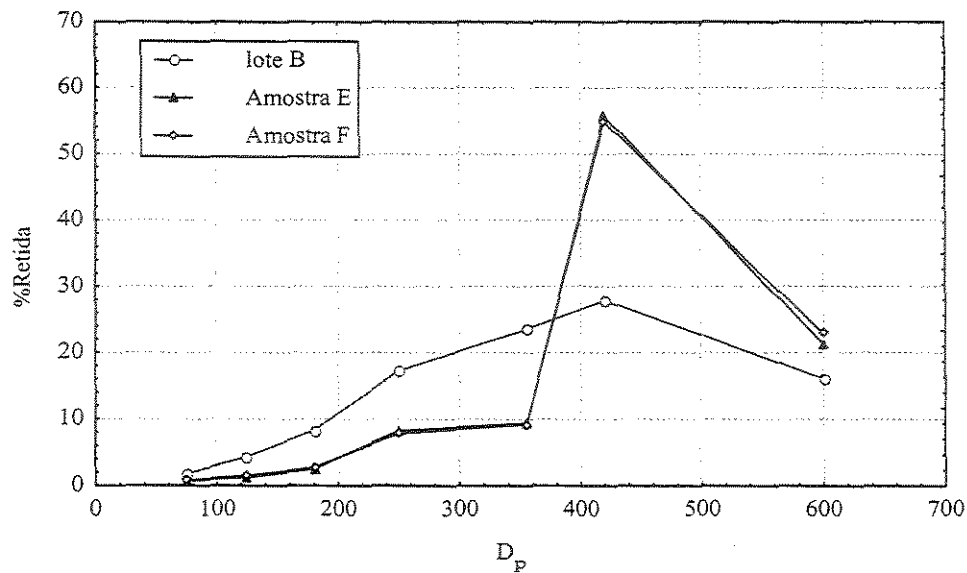


Figura 4.83 – Percentagem retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira - Polígono de frequência – lote B e amostras E e F

Para uma temperatura menor, 60⁰C, os polígonos de frequência já apresentam uma pequena diferença comparando as amostras G e H, Figura 4.84. O tempo de vibração de 30 minutos para a amostra H gerou cristais um pouco menores comparados com a amostra G.

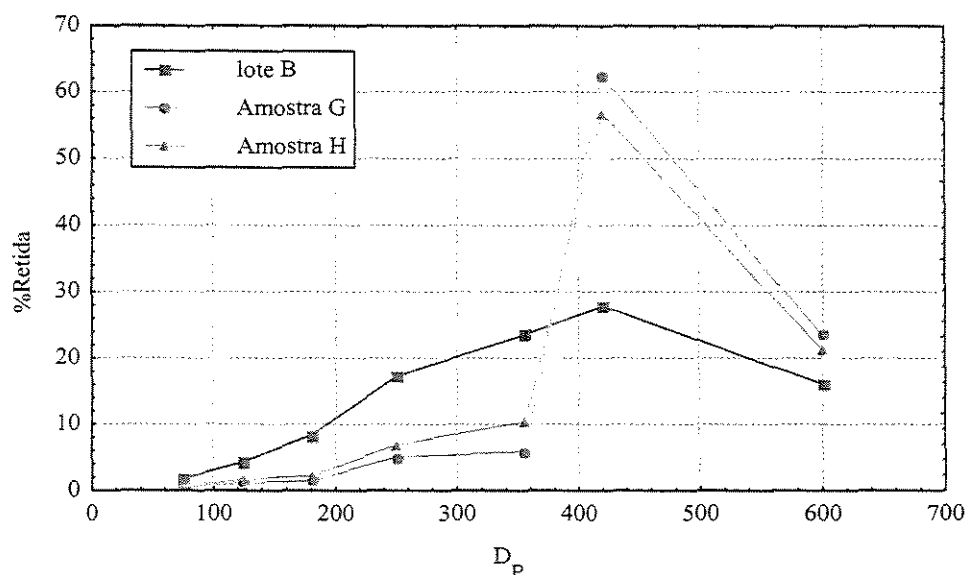


Figura 4.84 – Percentagem retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira - Polígono de frequência – lote B e amostras G e H

Comparando as amostras F e H, Figura 4.85, corridas experimentais realizadas a $T = 80$ e 60°C , respectivamente, a uma velocidade de gás baixa e mesmo tempo de vibração, observa-se a semelhança dos dois polígonos de frequência obtidos. Trabalhando com baixas velocidades de gás, a alteração na temperatura do gás de 60 para 80°C , praticamente não alterou a forma da distribuição granulométrica do produto final para as amostras retiradas do lote B.

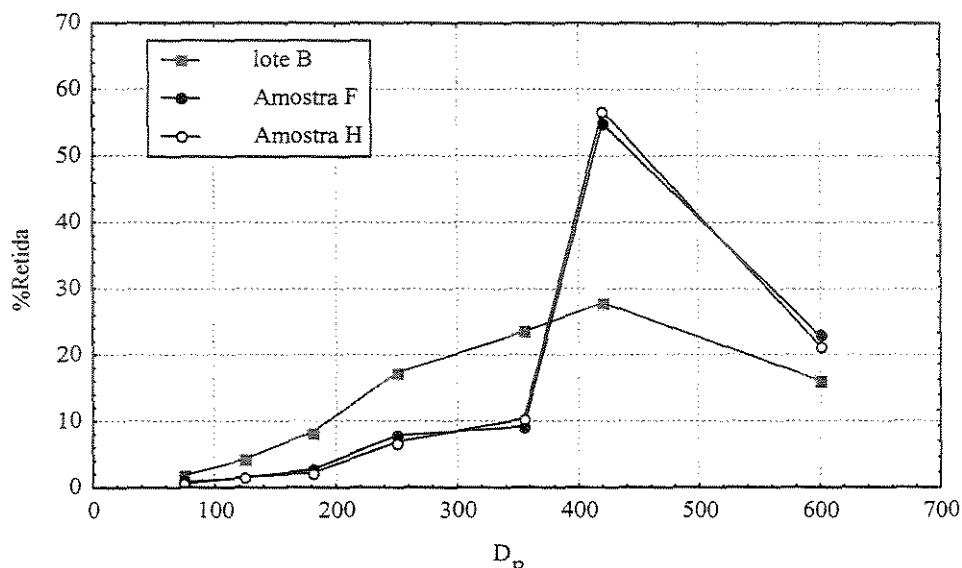


Figura 4.85 – Percentagem retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira - Polígono de frequência – lote B e amostras F e H

A Figura 4.86 apresenta as curvas de polígono de frequência a altas velocidades do gás ($u=1,3$ m/s) variando a temperatura gás (60 , 80 e 100°C). O comportamento monomodal e semelhante foi observado para as amostras E e G, apresentando um pico menor para a amostra E, em que obteve-se uma pequena diferença no tamanho das partículas comparadas à amostra G, devido ao efeito da temperatura do gás a altas velocidades. Para a amostra I observa-se um comportamento bimodal, mostrando que a partir de uma determinada temperatura ocorre a quebra dos cristais em tamanhos distintos.

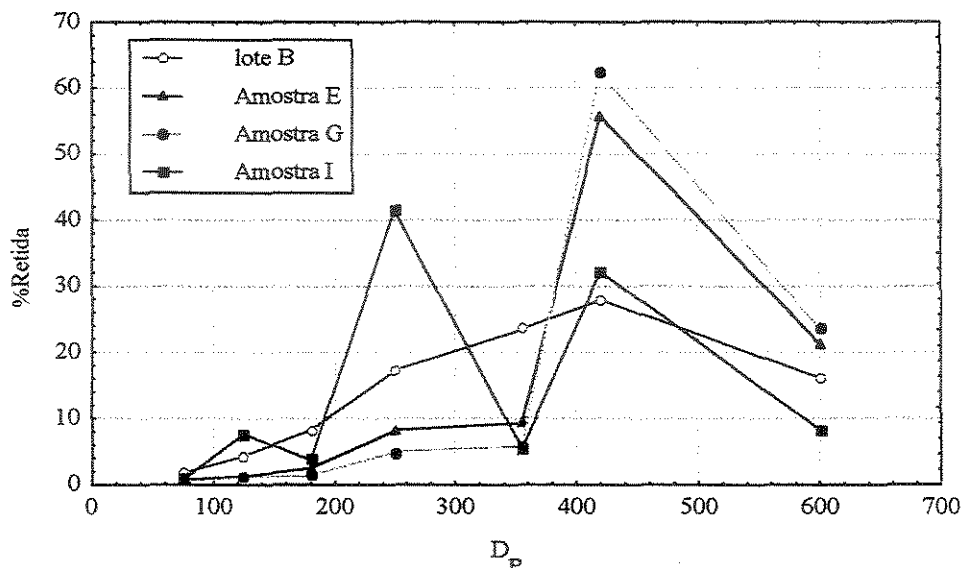


Figura 4.86 – Percentagem retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira - Polígono de frequência – lote B e amostras E, G e I

A Figura 4.87 mostra os polígonos de frequência obtido pela análise granulométrica do material seco comercial e o material seco na estufa à vácuo, lotes A e B. Observa-se uma distribuição mais ampla e comportamento semelhante do lote B e o material seco na indústria; o lote A apresenta um pico acentuado. Aproximadamente 46 % das partículas do lote A ficaram retidas na peneira de 420 µm.

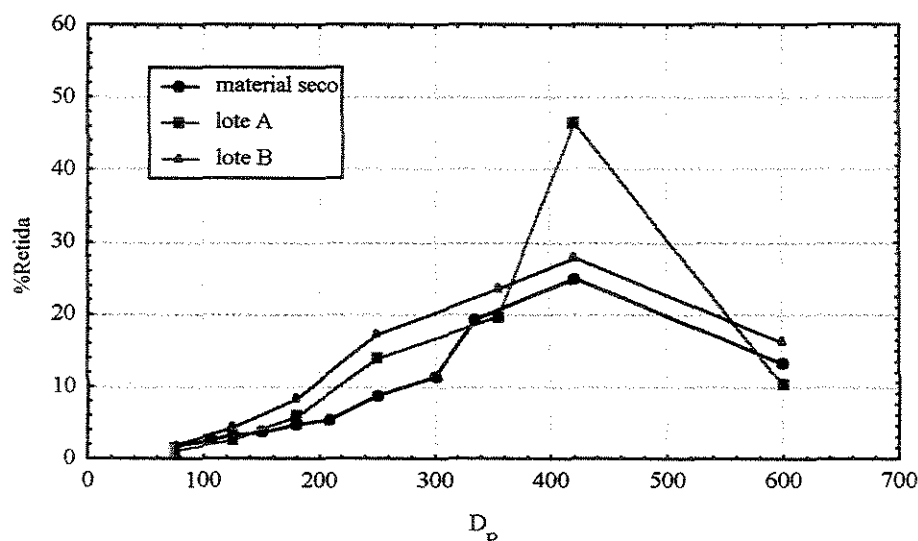


Figura 4.87 – Percentagem retida em função do diâmetro de abertura de cada peneira - Polígono de frequência – Material seco comercial e lotes A e B.

4.6.5 – Análise das isotermas de dessorção

As isotermas de sorção permitem conhecer os teores mínimos de umidade a que o material pode chegar em um ambiente de umidade relativa controlada. Usualmente as isotermas de dessorção são de extrema importância na secagem, com o objetivo de se conhecer os teores mínimos de umidade para uma dada condição, à qual o material será submetido no processo ou em armazenamento.

Inicialmente, planejou-se a obtenção das isotermas nas mesmas temperaturas dos experimentos de secagem, 60, 80 e 100°C. No decorrer das pesagens sucessivas do material submetido à temperatura de 80°C, em ambiente controlado por soluções salinas, observou-se alterações de cor do material branco para um marrom escuro e em alguns casos, mudança do estado sólido para líquido. Os problemas ocorreram em maior evidência para os sais de sulfato de amônia e cloreto de potássio.

Como consequência, as isotermas a 80 e 100°C não são apresentadas no trabalho, e para complementar o estudo do comportamento do material, as isotermas foram construídas a 40 e 60°C.

A Figura 4.88 mostra as curvas obtidas, seguindo metodologia descrita no item 3.3.5.2. As curvas não apresentaram os comportamentos mais comuns encontradas na literatura, onde os resultados mostram que a dessorção do material praticamente independe da umidade relativa do ambiente para as duas temperaturas analisadas. Concluindo-se que a umidade restante que ficou no material encontra-se internamente ligada aos cristais como umidade inclusa.

A variação da umidade de equilíbrio ficou entre: $X_{eq} = 0,5055$ a $0,7468$ % b.u à $T=40^{\circ}\text{C}$, e $X_{eq} = 0,4120$ a $0,728\%$ b.u à $T = 60^{\circ}\text{C}$, conforme a Tabela 4.19. Os valores encontrados para X_{eq} diminuíram com o aumento da temperatura. Para os experimentos de secagem à 60°C, verificou-se o menor conteúdo de umidade final do material de 0,71% b.u., o que está de acordo com os resultados obtidos no equilíbrio.

O comportamento das isotermas obtido no trabalho mostrou-se semelhante ao encontrado por Vix et al (1994), onde as isotermas foram construídas com ácido sulfúrico em diferentes concentrações à temperaturas de 50 e 80°C.

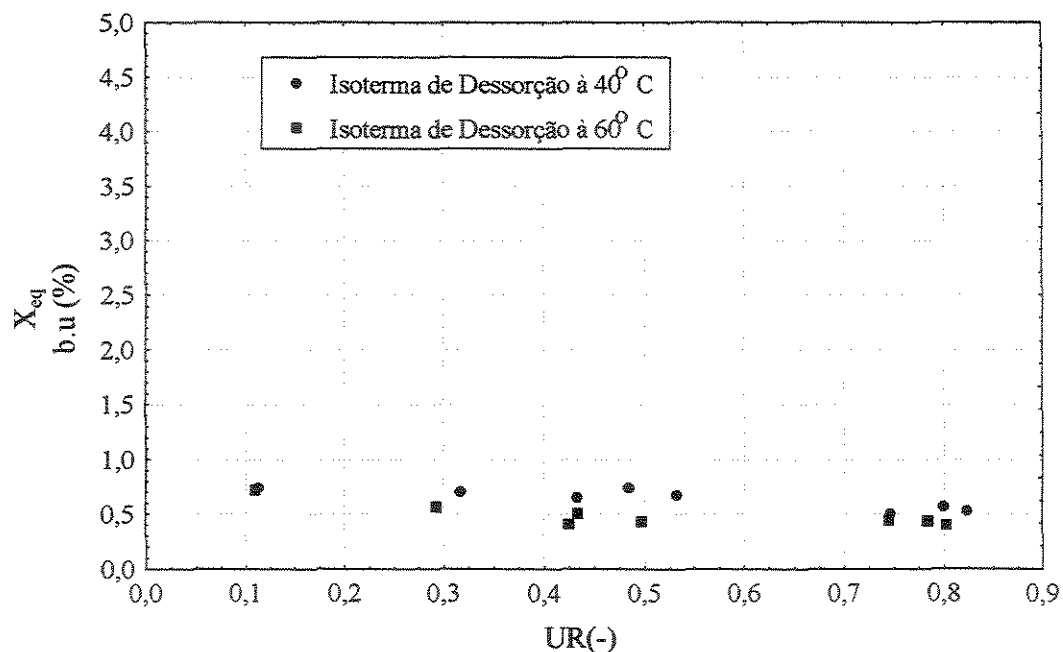


Figura 4.88 – Conteúdo de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa -
Isotermas de dessorção à T= 40 e 60°C

Tabela 4.19 – Dados de umidade relativa em função do teor umidade de equilíbrio
à T= 40 e 60°C

UR (-) à 40° C	UR (-) à 60° C	X_{eq} (T=40°C)	X_{eq} (T=60°C)
0,1121	0,1095	0,7468	0,7280
0,3160	0,2926	0,7026	0,5690
0,4325	0,4250	0,6524	0,4120
0,4842	0,4330	0,7447	0,5040
0,5317	0,4966	0,6829	0,4380
0,7468	0,7450	0,5055	0,4500
0,7991	0,7840	0,5735	0,4410
0,8232	0,8025	0,5334	0,4066

4.6.6 – Caracterização física do material seco na indústria, na estufa à vácuo e em leito vibrofluidizado

Devido à dificuldade de se observar um comportamento fluidodinâmico estável para as partículas úmidas, dependendo do intervalo do conteúdo de umidade e trabalhando à temperatura ambiente, decidiu-se ampliar os conhecimentos sobre as características físicas do material referentes à fluidez.

Foram realizadas algumas análises no equipamento *Powder Characteristics* – modelo PT-N – Hosokawa Microns, cedido pelo IPT – SP, restrito à partículas com diâmetro inferior a 700 μm . Foram determinadas as densidades aparente aerada e compactada – possibilitando o cálculo do Índice de Hausner (HR) - e ângulo de repouso, onde todas as medidas foram realizadas em triplicada e os resultados apresentados na Tabela 4.20 representam os valores médios. O objetivo inicial foi realizar essas medidas para o material seco, para o qual foi realizado todo o estudo fluidodinâmico variando-se a carga de partículas e os parâmetros vibracionais – amplitude e frequência de vibração – e para o material a diferentes teores de umidade para posterior estudo da secagem. Entretanto, a umidade presente nas partículas impossibilitou a obtenção das mesmas medidas, pois devido à aglomeração do material úmido, não foram possíveis as determinações no equipamento, *Powder Characteristics*. Os resultados obtidos com o material seco proveniente da indústria para todos os testes fluidodinâmicos, com algumas amostras submetidas a diferentes condições de secagem em leito vibrofluidizado e para o material seco em condições brandas – secagem na estufa à vácuo, 80°C, encontram-se na Tabela 4.20. O HR mostrou que o material seco na indústria apresenta boa fluidez, o que concorda com os resultados fluidodinâmicos obtidos nos testes experimentais realizados. As análises dos lotes A e B e as amostras submetidas à secagem em leito vibrofluidizado também apresentaram $\text{HR} < 1,25$, indicando que o material após a secagem também apresentou boa fluidez. Yu et al. (1997) mostram que quanto maior o ângulo de repouso, menor a fluidez do material, principalmente para materiais coesivos, onde as forças resultantes do contato entre partículas e as que agem em cada partícula são da mesma ordem de grandeza da força gravitacional. Os menores valores de ângulo de repouso

encontrados foram para as amostras I e J, submetidas à temperatura e velocidade do gás maiores, as quais apresentaram menores valores de conteúdo de umidade médio final.

Tabela 4.20 – Valores obtidos no *Powder Characteristics* – modelo PT-N – Hosokawa Microns

	$\rho_b(\text{g/cm}^3)$	$\rho_t(\text{g/cm}^3)$	HR (-)	Ângulo de repouso (°)
Material seco na indústria	0,763	0,791	1,04	37,7
Lote A	0,748	0,798	1,07	36,9
Lote B	0,761	0,802	1,05	36,6
Amostra A	0,754	0,785	1,04	34,2
Amostra B	0,730	0,771	1,06	34,1
Amostra E	0,744	0,797	1,07	34,8
Amostra F	0,746	0,790	1,06	34,6
Amostra G	0,755	0,803	1,06	34,7
Amostra H	0,766	0,796	1,04	34,4
Amostra I	0,758	0,803	1,06	33,4
Amostra J	0,759	0,800	1,05	33,5

4.6.6 – Análise do material seco em microscópio eletrônico de varredura (MEV)

As amostras secas em condições brandas, na estufa à vácuo temperatura de 80°C, e em LVF foram acondicionadas em dessecadores para posterior análise em MEV. O objetivo das análises foi acompanhar visualmente o material após ser submetido ao processo de secagem e observar possíveis alterações.

As Figuras 4.89 a 4.94 representam as fotos obtidas por MEV para algumas amostras submetidas à secagem. A ampliação das fotos foi de 100 vezes e observou-se que, tanto para o material seco na estufa como em LVF não ocorreram alterações devido ao efeito da temperatura e velocidade do gás de processo, prevalecendo um material cristalino de cor branca.

Devido à ampla distribuição granulométrica do material, 75 a 600 µm, mesmo para o material submetido à secagem na estufa, verificou-se um material com diferentes tamanhos de partículas.

As amostras do lote B apresentaram partículas com tamanhos mais uniformes comparadas ao lote A, como foi também observado nos polígonos de frequência (item 4.6.3).

Os resultados mostraram que visualmente o material seco em LVF não sofreu alterações nos cristais de ácido adípico comparadas às amostras secas em estufa à vácuo.

As amostras I e J, submetidas a maiores temperatura e velocidade do gás, apresentaram quebra dos cristais, conforme pode ser visto nas Figuras 4.93 e 4.94.

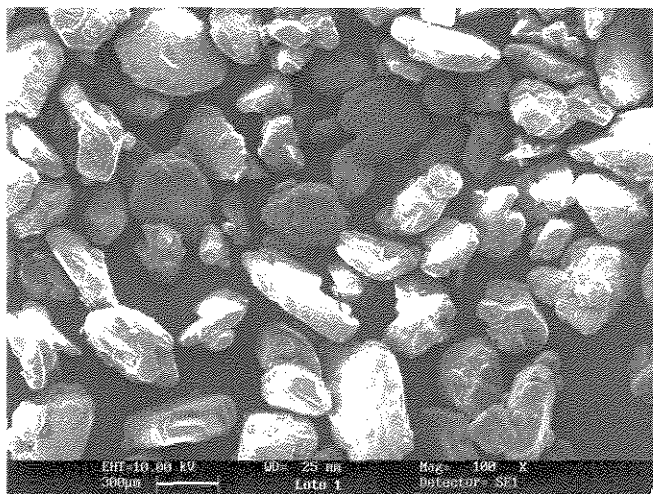


Figura 4.89 – Material seco na estufa à vácuo, 80⁰C, lote B, ampliação 100x.

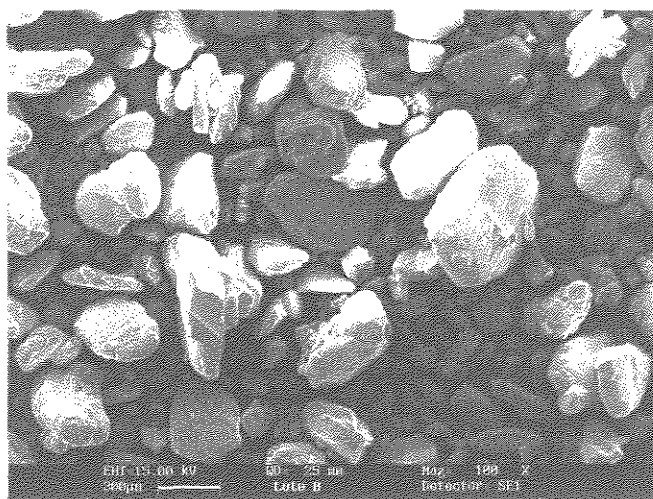


Figura 4.90 – Material seco na estufa à vácuo, 80⁰C, lote A, ampliação 100x.

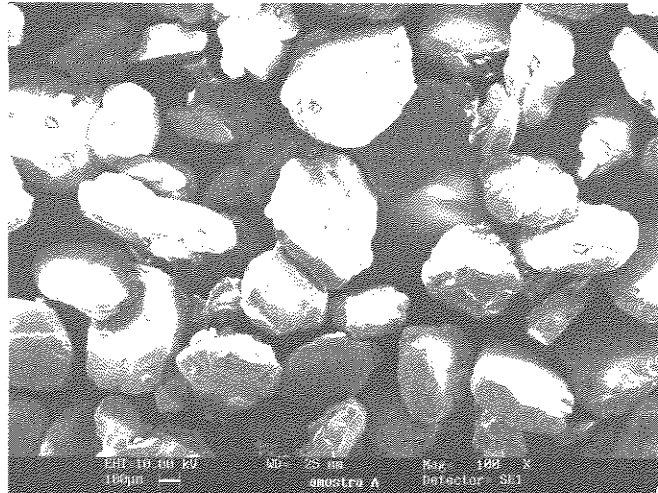


Figura 4.91 – Material seco em LVF, amostra A, ampliação 100x.

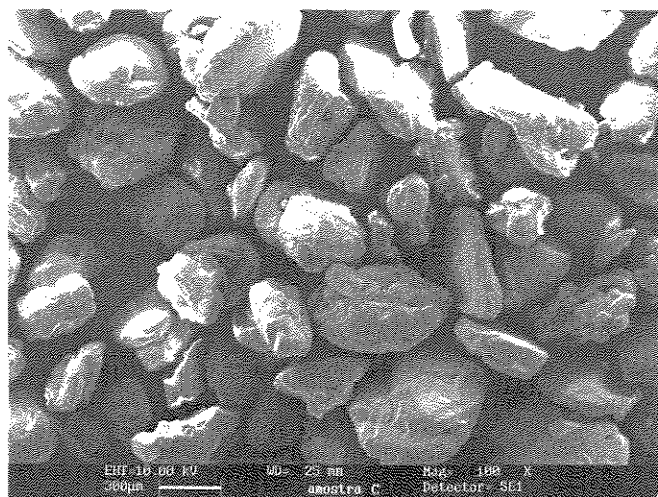


Figura 4.92 - Material seco em LVF, amostra C, ampliação 100x.

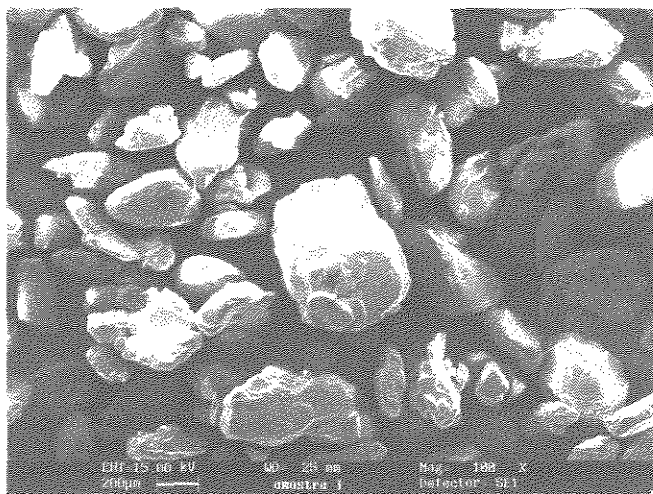


Figura 4.93 - Material seco em LVF, amostra I, ampliação 100x.

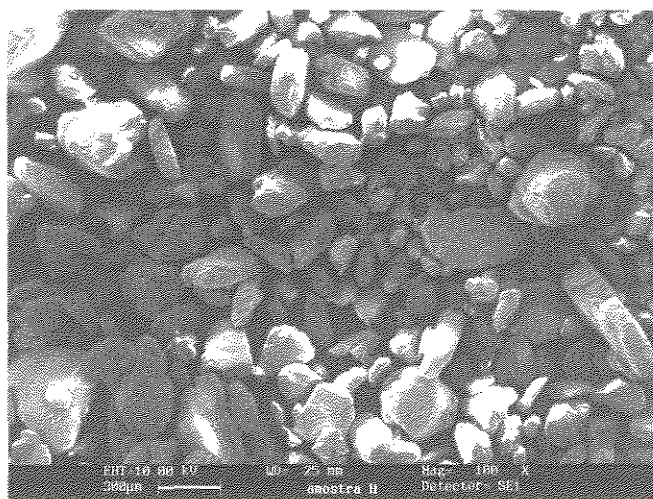


Figura 4.94 – Material seco em LVF, amostra J, ampliação 100x.

CAPÍTULO 5

5 - CONCLUSÕES

O leito vibrofluidizado desenvolvido e a montagem experimental mostraram-se viáveis no que se refere à aplicação das vibrações no leito de partículas sólidas através da placa distribuidora de gás e em relação a sua operacionalidade, especialmente considerando que o material submetido aos testes experimentais se caracteriza como um pó fino e que facilmente poderia cessar o movimento da vibração com o acúmulo de material na parte do sistema submetido à vibração.

As curvas características da queda de pressão em função da velocidade do gás obtidas para o ácido adípico seco, apresentaram reprodutibilidade das curvas apresentadas na literatura (STRUMILLO, 1980). A influência da imposição das vibrações foi nitidamente observada nas curvas obtidas no trabalho. Verificou-se uma redução da queda de pressão na condição de mínima fluidização entre 2 a 32% dependendo da faixa dos parâmetros vibracionais utilizados e da carga das partículas sólidas presente no leito, onde a redução foi mais acentuada para $G > 1$. Em condições moderadas de frequência e amplitude de vibração impostas ao sistema, apenas uma suavização nas curvas foi obtida comparando com o leito sem vibração.

Utilizando a correlação da eficiência de vibração, proposta por ERDÉSZ e ORMÓS, 1984, obteve-se desvios na faixa de 8 a 17,4%.

O estudo da distribuição granulométrica do ácido adípico foi acompanhado pelas curvas fluidodinâmicas de queda de pressão em função da velocidade do ar. A análise do fator de vibração em função da frequência de vibração mostrou que as partículas menores foram mais afetadas pelo efeito da vibração comparando com as partículas maiores.

A análise estatística possibilitou um bom ajuste dos dados experimentais para a queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização, determinando a influência das variáveis na resposta. A queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização foi fortemente influenciada pela carga de partículas presentes no leito; observou-se o

deslocamento das superfícies de respostas variando a carga de partículas. Baixos valores de queda de pressão na condição de mínima vibrofluidização foram obtidos com altos valores de frequência e amplitude de vibração. O modelo estatístico codificado proposto apresentou um ótimo e um bom ajuste para a queda de pressão e velocidade na condição de mínima vibrofluidização, respectivamente. Baixos valores de velocidade na condição de mínima vibrofluidização foram obtidos com baixa carga de partículas e alta amplitude de vibração, onde a influência da frequência não se mostrou significativa.

Os resultados obtidos nos experimentos, realizados à temperatura ambiente com o material umidificado artificialmente e o úmido proveniente da indústria, mostraram que as forças existentes no material úmido atuam diferentemente dependendo de como a água foi distribuída nos cristais. O estudo fluidodinâmico para o material úmido proveniente da indústria apresentou menores valores de queda de pressão à baixa intensidade vibracional, $G < 1$, sendo o comportamento contrário ao verificado para o material seco proveniente da indústria e submetido aos testes fluidodinâmicos.

O sistema de amostragem desenvolvido no trabalho, para a obtenção dos dados de umidade do ácido adípico em função do tempo, apresentou viabilidade no processo de secagem. Não foi obtida alteração significativa de massa do leito, consequentemente a amostragem não provocou alterações no comportamento fluidodinâmico do material estudado.

As curvas de secagem obtidas no trabalho mostram a existência dos dois períodos de taxa de secagem, constante e decrescente. Para os experimentos de secagem a baixas temperatura e velocidade do ar, o tempo de vibração imposta ao leito foi maior, por apresentar uma maior dificuldade para atingir o regime de fluidização.

O menor conteúdo de umidade final encontrado nos experimentos foi de aproximadamente 0,55% b.u. e a especificada para o produto comercial é de 0,25% b.u. Esse conteúdo de umidade pode ser alcançado em condições de processo diferentes dos experimentos realizados no presente trabalho. Também foi observado que ocorre variação do conteúdo de umidade com o tamanho do cristal, observação que está de acordo com os resultados do trabalho de Vix et al (1994).

Os polígonos de frequência obtidos no trabalho mostraram quebra dos cristais quando trabalhou-se com altas temperaturas do ar de secagem, apresentando um comportamento bimodal das curvas obtidas. Para as amostras retiradas do lote B, com um conteúdo de umidade maior, a velocidade do gás (à 60 e 80°C) não exerceu influência significativa na distribuição do produto final; em alguns casos as curvas se mostraram quase coincidentes.

As isotermas determinadas à temperaturas de 40 e 60°C mostraram que a dessorção do material praticamente independe da umidade relativa do ambiente para cada temperatura analisada. O comportamento das isotermas obtido no trabalho mostrou-se semelhante ao encontrado por VIX et al (1994), à 50 e 80°C.

Finalmente, tendo em vista os objetivos do trabalho e os resultados obtidos, as principais contribuições deste trabalho foram: a construção de um leito vibrofluidizado adequado para o estudo fluidodinâmico de partículas finas com a vibração imposta à placa distribuidora de gás; o estudo da secagem do ácido adípico e um sistema de amostragem viável ao processo; resultados importantes para a fluidodinâmica em leito vibrofluidizado; resultados inéditos da secagem do ácido adípico em leito vibrofluidizado, sendo este um material que apresenta problemas de qualidade do produto final, devido justamente a etapa de secagem.

CAPÍTULO 6

6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o sistema experimental desenvolvido no trabalho são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros com o LVF:

- realizar o acompanhamento da taxa de elutriação das partículas, recolhidas no ciclone, quantificando a taxa de elutriação com a variação dos parâmetros vibracionais;
- para uma dada temperatura e velocidade do gás, variar os parâmetros vibracionais, determinando os parâmetros ótimos de vibração que propiciam altas taxas de secagem. E em cada condição, determinar o conteúdo de umidade onde inicia o movimento das partículas e correlacioná-lo com a intensidade vibracional imposta ao sistema;
- verificar a variação de altura do leito com o aumento da velocidade do gás para diferentes parâmetros vibracionais;
- analisar a viabilidade econômica do equipamento desenvolvido;
- estudar as alterações causadas pelo efeito das forças interpartículas para diferentes materiais, com a imposição da vibração ao sistema;
- realizar o estudo da influência dos parâmetros vibracionais no coeficiente de transferência de calor e massa em LVF;
- ampliar o estudo para diferentes tipos de partículas, que apresentam dificuldades para o regime de fluidização em leito fluidizado convencional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLINICHEV et al., "An investigation of the size reduction of granular materials during their processing in fluidized beds", *Ind. Chem. Eng.*, v. 8 (4), p. 615, 1968.

BORDE et al, "Heat and Mass Transfer in a Moving Vibrofluidized Granular Bed", *Powder Handling & Processing*, v.9, n.4, p. 311-314, 1997.

BRATU, E. A. e JINESCU, G. I., *Brit. Chem. Eng.*, v.16 (8), pp.691-695, 1971.

BRATU, E. A. e JINESCU, G. I., *Ver. Roum. Chim.*, v. 17(1), pp. 49-56, 1972.

BRUNS et al, "Como Fazer Experimentos – Pesquisa e Desenvolvimento na ciência e na indústria", editora da UNICAMP, 401 p., 2001.

CARROL, P. J. e COLIJN, H., "Vibrations in solids flow". *Chemical Engineering Progress*, New York, 71(2), pp. 56-68, 1975.

CASTELLAN, A. et al. "Industrial Production and Use of Adipic Acid." *Catalysis Today*, v.9, n.3, pp. 237-254, 1991.

CHEN, Y., L., LIN, P., S. e PENG, Y., L., "Particle Agglomeration Characteristics in Vibro fluidized Bed Dryers", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v.24(5), 1991.

CHEVILENKO et al , *Khim. Prom.*, v.36, 366 p., 1979.

CHOC, M., *Stroirenstvi*, v.25, 497, 1975.

CHUNG, D. S., e PFOST, H. B., "Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products", *Transf. of ASAE*, 10(4), pp. 549-551.

DALEFFE, R. V., CAMARGO, C. F. S. e FREIRE, J. T., "Análise da presença de glicerol no comportamento fluidodinâmico de leitos fluidizado e vibrofluidizado", XXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São João Del Rei – MG, CDROOM 2001.

DANIELSON, S. e HOVMAND, S., *Drying'80*, v.1, pp. 194-199, 1980.

DAVIDSON et al, *Fluidization*, 2^{ed}, 1985.

DAUDIN, J.D., "Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques Solides", *Sciences des Aliments*, v.3, p.1-36, 1983.

DELLA TONIA JR. e FREIRE, J. T., "Leito Vibrofluidizado I–Desenvolvimento do equipamento e testes Preliminares", XVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, pp. 307 – 311, São Carlos – SP, 1989.

DENBIGH, K. e WHITE, E. T., "Studies on Liquid inclusions in crystals", *Chemical Eng. Science*, vol.21, pp.739-754, 1966.

- DIAS, S. T. e RÉ, M. I., "Características de empacotamento de misturas binárias de partículas Sólidas", XXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, São João Del Rei – MG, CDROOM, 2001.
- DONG, Z. X., PAN, Y. K. e WEI, Z., "Effect of Vibration on the Drying Rate During the Falling Rate Period". *Drying Technology*, v.9, n.3, pp.723-733, 1991.
- ERDÉSZ, K. e ORMÓS, Z., "Bed Expansion and Pressure Drop in Vibrofluidized Layers", *Drying'84*, pp.164-177, 1984.
- ERDÉSZ, K. e ORMÓS, "Granulation in vibrofluidized bed", *Drying of solids –Recent international developments*, NewDlhi, John Wiley, pp.54-72, 1986.
- ERDÉSZ, K. e MUJUMDAR, A. S., "Hydrodynamics aspects of convencional and Vibrofluidized beds – A comparative evaluation". *Powder Techonology*, Lausanne, 46 (2), pp.167-172, 1986.
- ERDÉSZ, K. e MUJUMDAR, A.S., "Numerical Investigation of Phenomenological Model for Vibrated Fluidized Beds", *Drying Technology*, v.7, n.3, pp.487-502, 1989.
- ERDÉSZ, K., RINGER, D. e MUJUMDAR, A. S. "Transport Process in Vibro-fluidized Beds" In *Transport in Fluidized Particle Systems*, Amsterdam, Elsevier Science Publishers, pp.317-357, 1989.
- ERDÉSZ, K., "Hydrodynamic studies on vibrated fluidized beds", *Podwer Handling & Processing*, v. 2(4), pp. 327-339, 1990.
- ERDÉSZ, K e SZALAY, A., "Experimental study on the vibracional transport of bulk solids", *Powder Technology*, Lausanne, v.55(2), pp.87-96, 1988.
- FINZER, J. R. D. e KIECKBUSCH, T. G., "Secagem de fatias de cebola sob vibração", *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 6 (2), pp.99-120, 1986.
- FINZER, J. R. D. e KIECKBUSCH, T. G., "Secagem em sistemas com vibração", In: Freire, J. T., Sartori, D. J. M., *Tópicos especiais em secagem*, São Carlos – SP, vol.1, pp.87-127, 1992.
- FOUST et al, "Principles of Unit Operations", New York: Willey, 1980.
- FENNEMA, O. R., "Food Chemistry", 2nd ed. Marcel Dekker, New York, 1993.
- GAL,S. "Recent Advances in the Techniques for the Determination of Sorptions Isotherms". *Water Relations of Foods*, Ed. R. B. Duckworth, Academic Press, New York. 139 p, 1975.
- GARIM, M. M. e FREIRE, J. T., "Uma análise das curvas características de leito fluidizado e vibrofluidizado utilizando as curvas de desvio padrão das medidas realizadas", *Anais do XXVI ENEMP*, vol.1, pp. 253-259, Teresópolis – RJ, 1998.

GEANKAPLIS, C. J., "Transport process and unit operations", 3ed, New Jersey: Prentice Hall, 1993.

GELDART, D.; HARNBY, N. e WONG, A. C. (1984), Powder Technology, 37, pp. 25-37.

GELDART, D. "Gas Fluidization Technology." 1986.

GUPTA, R. e MUJUMDAR, A. S. "Aerodynamic of Vibrated Fluid Beds", The Canadian Journal of Chemical Engineering, v.58, pp. 332-338, 1980.

GUPTA, R. e MUJUMDAR, A. S., "Aerodynamics and Thermal Characteristics of Vibrated Fluid Beds: a Review, Drying 80, Vol.1, pp. 141-150, 1980.

GUTMAN, R. G., "Vibrated beds of powders: parte I - Theoretical model for the vibrated Bed", Trans. of the Inst. of Chem. Eng., v.53 (3), pp. 174-183, 1976.

HENDERSON, S. M., "A basic concept of equilibrium moisture", Agr. Eng., V. 33, pp. 29-31, 1952.

HISASHI, K., "Attrition rates of relatively coarse solid particle in various types of fluidized beds", AIChE Symp. Series, vol. 77, n. 205, pp.96, 1981.

HOEBINK, J. e RIETEMA, K. "Fluidized Bed Drying." Fluidization and its Applications, 1973.

JAAFAR, F. e MICHALOWSKI, S., "Modified BET equation for sorption/desorption isotherms", Drying Technology, V.8, n.4, pp. 811-827, 1990.

JINESCU, G. I., Rev. Roum. Chim, v.16 (8), pp. 1255-1268, 1971.

JINESCU, G, TEBRENCU, C., IONESCU, E., PETRESCU, M. e JINESCU, C., "Hydrodynamic Aspects at Vibrated-Fluidized Drying of Polydisperse Powdery Materials", Proceedings of the 12th International Drying Symposium IDS 2000, pp. 28 – 31 Agosto 2000, CDROOM.

JONG, J. A. H. e FINKERS, J. (1999), "Properly determine powder flowability to maximize plant output", Chemical Engineering Progress, Powder flowability. In DIAS, S. T. e RÉ, M. I., XXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, CDROOM, 2001

KEEY, R. B., "Drying: Principles and Practice", Oxford: Pergamon Press, 1972.

KHOPKAR, S. M., "Concepts in Analytical Chemistry", New York: John Wiley&Sons, 48 p., 1984.

KUIPERS, N. J. M., STAMHUIS, E. J. e BEENACKERS, A. A. C. M., "Fluidization of potato starch in a stirred vibrating fluidized bed", Chemical Engineering Science, v.51, n.11, pp. 2727 – 2732, 1996.

- KUNII, D. e LEVENSPIEL, O. "Fluidization engineering". New York, John Wiley, 489p, 1991.
- LABUZA, T. P., "Sorption phenomena in foods", Food Technology", v.22, pp. 263- 272, 1968.
- LEWIS et al, "Thermodynamics", 2ed, Ed. Mc Graw-Hill, New York, 1961.
- MALHOTRA, K. e MUJUMDAR, A. S., "Flow Patterns for Cylinders Immersed in an Aerated Vibrated Bed", The Canadian Journal of Chemical Engineering, v.63, pp.22-28, 1985.
- MARTERS, K. e STOLITZE, A., "Agglomeration advances", Food Engineering, v.2, pp.64-67, 1973.
- MARELLA et al, "Mathematical Model for Vibrofluidized Beds for Drying Casein", Journal Food Sci. Technol., v.34, n.2, pp.153-154, 1997.
- MARRING, E., HOFFMANN, A. C. e JANSSEN, L.P.B.M., "The effect of vibration on the Fluidization Behaviour of Some Cohesive Powders", Powder Technology, v.79, pp.1-10, 1994.
- MELLOWES, W. A., "A vibratory filtration model for candl-type filters", Powder Technology, Lausanne, v.43(3), pp.203-212, 1985.
- MENON, A. S. e MUJUMDAR, A. S., "Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers", Handbook of Industrial Drying, New York: Macel Dekker, cap.9, pp.295- 326, 1987.
- MORENO, R., RIOS, R. e CALBUCURA, H., " Batch Vibrating Fluid Bed Dryer for Sawdust Particles: Experimental Results", Drying Technology, v.18, n.7, pp. 1481 – 1493, 2000.
- MORI, S., YAMAMOTO, A., HARUTA, T. e YAMADA, I., " Vibro-Fluidization of Group - C Particles and its Applications", AIChE Symposium Series, n.276, v.86, pp.88-94, 1990.
- MORI et al, "Vibro-fluidization of Very Fine Particles", International Chemical Engineering, n.3, v.31, pp.475-480, 1991.
- MOROOKA, S., KUSAKABE, K. e KOBATA, A., " Fluidization State of Ultrafine Powders", Journal of Chemical Engineering of Japan, v.21, n.1, pp.41- 46, 1988.
- MROWIEC, M. e CIESIELCZYK, W., "Fluidized - bed dryers for paste materials", International Chemical Engineering, New York, v.17(2), pp.373-379, 1977.
- MUJUMDAR, A., S., "Aerodynamics, heat transfer and drying in vibrated fluid beds", Latin American Heat and Mass Transfer Conference, Argentina, pp.373-379, Nov. 1982.

MUJUMDAR, A.S., Handbook of Ind. Drying, McGill University, New York and Basel, 948 p., 1987.

MUJUMDAR, A., S. "Drying of Granular Materials", Lectures Notes. McGill University, Montreal Canada, 148 p, 1981.

MUJUMDAR, A. S e ERDESZ, K. "Applications of Vibration Techniques for Drying and Agglomeration in Food Processing", Drying Technology, 6 (2), pp. 255-274, 1988.

MUSHTAEV et al, Chem. & Petrol. Engg., v. 12, pp. 1083-1085, 1973.

MORSE, R. D., Ind. & Engg. Chem., v. 47 (6), pp. 1170-1180, 1965.

OSINSKII, U. P. et al, Chem. Pet. Eng., v.11, pp.866-869, 1969.

OWER, E. e PANKHURST, R. C., "The Measurement of Air Flow", 5 ed., New York: Pergamon Press, 1977, 362p.

PAPADAKIS et al., "Correlations for the equilibrium moisture content of solids", Drying Technology, V.11, n. 3, pp. 543-553, 1993.

PAKOWSKI, Z. et al. "Theory and Application of Vibrated Beds and Vibrated Fluid Beds for Drying Processes." In Advances in drying. Washington, Hemisphere Publishing, pp.245-305, 1984.

PENA, R. S. et al., "Levantamento de Isoterma de Adsorção de Umidade a 15°C, do Guaraná (*Paullinia cupana*) em Pó, Obtido por Atomização em Spray Dryer". Anais Assoc. Bras. Qui.; v.44, pp.1-6, 1994.

PERRY, R. H. e CHILTON, C. H., "Chemical Engineers' Handbook", 5ª ed., Tokyo, McGraw-Hill International, 1974.

RAY et al, "Particle Attrition Phenomena in a Fluidized Bed", Powder Technology, v.49, pp. 193-206, 1987.

REAY, D. e BAKER, C. G. J. " DRYING." in – Fluidization, London Academic Press, pp.529 – 562, 1985.

ROBERTS, A.W., "Vibration of fine powders and its application", Handbook of powder Science and technology, New York, Van Nostrand, pp.181-229, 1984.

SCHUCHMANN, H., ROY, I. e PELEG,M., "Empirical models for moisture sorption isotherms at very high water activities", Journal of Food Science, v. 55, n.3, pp. 759-762, 1990.

SEVILLE, J. P. K. e CLIFT, R., The effect of thin liquid layers on fluidisation characteristics. Powder Technology, vol. 37, pp.117 – 129, 1984.

SEVILLE, J. P. K., WILLETT, C. D. e KNIGHT, P.C., Interparticle forces in fluidization: a review, *Powder Technology*, 113, pp. 261-268, 2000.

SZALAY, A. et al, "Principles for Hydrodynamical and Geometrical Design of Vibrated Bed Driers", *Drying Technology*, v.13, n.5-7, pp.1249-1260, 1995.

STRUMILLO, C. e PAKOWSKI, Z. "Drying of Granular Products in Vibrofluidized Beds." *Drying* 80, v.1, pp.211-226, 1980.

STRUMILLO, C. e KUDRA, T., "Drying: Principles, Applications and Design". Gordon and Breach Science Publishers, London, 348 p, 1986.

SUZUKI, K. et al. "Drying Characteristics of Particles in a Constant Drying Rate Period in Vibro-Fluidized Bed", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v.13, pp.117-122, 1980.

SUZUKI, K. et al. "Some Investigations of Falling Rate Period of Vibro-Fluidized Bed Drying." *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v.13, pp.493 -495, 1980.

TEIXEIRA NETO, R. O., "Levantamento e aplicação de isotermas", In: Jardim, D. C. P. (coord.). I Seminário sobre atividade de água em alimentos, Campinal, ITAL, 1987.

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

THOMSON, W.T., "Theory of Vibration with Applications". 2.ed, New Jersey, Pretice-Hall, 467 p, 1972.

THOMPSON, T. L. et al., "Mathematical simulation of corn drying – a new model". *Trans. of ASAE*, 11(4), pp. 582-586, 1968.

VAUX et al, "Measurement of Attrition Tendency in Fluidization", *AIChE 72nd Annual Meeting*, San Francisco, 1979.

ULLMANN'S Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6^{ed}. Weinheim: VCH, 1998. CDROM.

VIZCARRA, M. G., PÉREZ, C., MARTÍNEZ, C. e RUÍZ, R., "Wheat Drying Analysis in a Vibrofluidized Bed", *Proceedings of the Second Inter American Drying Conference*; Boca del Rio, Vera Cruz, México, July 2001, pp.227 – 233.

VIX et al., "Laboratory Drying of Adipic Acid in a Fluidized Bed", *Drying* 94, v. B, 1105-1111, 1994.

YOSHIDA, T. e KAUSAKA, Y., *Int. Chem. Engg.*, v. 9(1), p. 1977-1980, 1969.

YU, A. B.; Bridgwater, J. e Burbidge, A., "On the modelling of the packing of fine particles", *Powder Technology*, 88, p.71 –79, 1997.

WEN, C. J. e YU, Y. H., "A generalized Method for predicting the minimum fluidization velocity", AIChE, V.12, 610, 1966.

WONG et al, "Mass transfer from large diameter vibrating cylinders", Trans. Of the Inst. of Chem. Eng., London, v. 53 (3), p. 214-216, 1978.