

**Universidade Estadual de Campinas**  
**Faculdade de Engenharia de Alimentos**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR  
ROTATÓRIO COM RECHEIO DE INERTES**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos  
da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do  
título de doutor em Engenharia de Alimentos

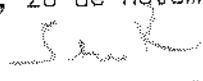
MAURO MARQUES BURJAILI  
Engenheiro Químico  
Mestre em Engenharia Mecânica

Prof. Dr. THEO GUENTER KIECKBUSCH  
Orientador

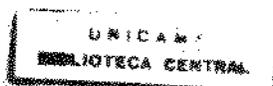
PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por MAURO MARQUES BURJAILI e aprovada pela Comissão Julgadora em 26.11.96.

Campinas, 26 de novembro de 1996

  
PROF.DR. THEO GUENTER KIECKBUSCH  
Presidente da Banca

Campinas - SP  
novembro de 1996

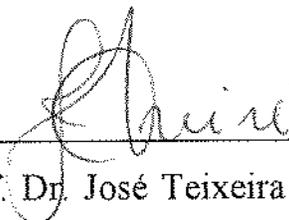


BANCA EXAMINADORA



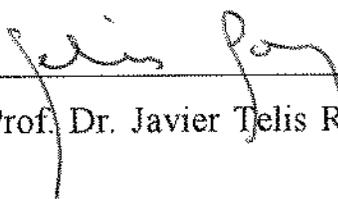
---

Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch



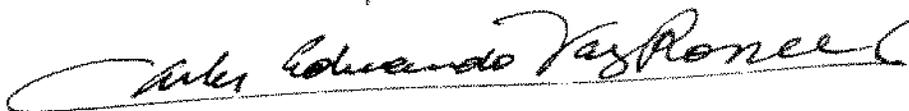
---

Prof. Dr. José Teixeira Freire



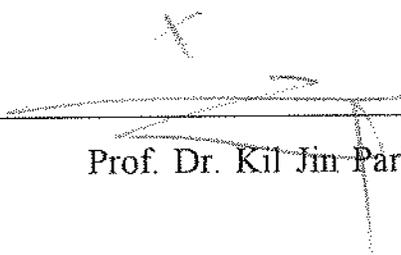
---

Prof. Dr. Javier Telis Romero



---

Dr. Carlos Eduardo Vaz Rossell



---

Prof. Dr. Kil Jin Park

---

Prof. Dr. Satoshi Tobinaga

---

Prof. Dr. Antonio Marsaioli Junior

**Aos meus pais, Nelson e Idelma;  
à Sandra e aos nossos  
Bruno e Caio.**

## AGRADECIMENTOS

A Theo Guenter Kieckbusch, a orientação.

A José Roberto Delalibera Finzer e José Romário Limaverde, as sugestões.

Aos membros da banca, as valiosas sugestões na revisão final do texto.

A José Romário Limaverde Jr., a contribuição na execução dos ensaios finais.

A Maria Madalena de Alcântara e Zuleide Ferreira da Costa, os trabalhos de laboratório.

A Humberto Belo, a participação em trabalhos mecânicos.

A Márcio Melazo, a confecção de desenhos.

A Atilio Balbo (Usina Santo Antônio Atilio Balbo S/A), o fornecimento de levedura termolisada.

A Tetsuya Oyama (NGK do Brasil), as doações das esferas de cerâmica.

A Jorge de Assis Barcelos (Usinas Itamarati S/A), Ricardo Garcia Rangel (Usina São Carlos) e Gilson Aparecido Marques Zolla (Coinbra Frutesp), as doações das esferas de aço.

À FAPEMIG e à UFU, o financiamento parcial da instalação experimental.

À CAPES-PICDT, a bolsa parcial de doutorado, durante o período de 3,5 anos.

# ÍNDICE

ÍNDICE DAS FIGURAS .....	v
ÍNDICE DE TABELAS .....	viii
NOMENCLATURA .....	viii
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1. INTRODUÇÃO .....	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	03
1. MATERIAIS PASTOSOS .....	03
2. EQUIPAMENTOS DE SECAGEM .....	04
2.1 Secadores de Leito Fluidizado .....	06
A. Leito Pulsofluidizado com Relocação do Fluxo Gasoso .....	08
B. Leito de Jorro .....	08
C. Leito de Jorro Bidimensional .....	10
D. Leito Vibrofluidizado .....	10
E. Leito Vibrojorrado .....	11
2.2 Secadores por Atomização ( <i>Spray Dryer</i> ) .....	11
2.3 Secadores Giratórios .....	12
A. Secador de Tambor ( <i>Drum Dryer</i> ) .....	12
B. Secadores Rotativos .....	14
C. Secadores com Película Agitada .....	17
D. Turbo-Secador ( <i>Turbo Dryer</i> ) .....	19
2.4 Secadores com Operação Via Contato-Sorção .....	21
A. Secador de Contato com Partículas Inertes .....	22
B. Leito Fluidizado Ativo .....	23
C. <i>Spray Dryer</i> com Sorção por Contato .....	24
3. SECAGEM COM CORPOS INERTES .....	25
4. CONSIDERAÇÕES SOBRE MOAGEM .....	29

3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	33
1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SECADOR ROTATÓRIO COM RECHEIO DE INERTES .....	33
2. SECADOR EXPERIMENTAL .....	34
2.1 Secador Inicial .....	34
2.2 Secador Definitivo .....	39
3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL COMPLEMENTAR .....	41
3.1 Sistema de Aquecimento e Escoamento de Ar .....	42
3.2 Psicrômetros .....	45
3.3 Sistema de Separação e Coleta de Pó .....	48
3.4 Sistema Motor .....	49
3.5 Sistema de Alimentação .....	50
4. MATERIAL PASTOSO PARA ALIMENTAÇÃO .....	52
5. OPERAÇÃO DO SISTEMA DE SECAGEM .....	53
4. OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DO SECADOR .....	54
1. DINÂMICA DO LEITO DE INERTES NO SECADOR INICIAL .....	54
2. ESTUDO DA DINÂMICA DO LEITO DE INERTES .....	56
A. Ensaio com Inertes de Polietileno .....	58
B. Ensaio com Inertes de Cerâmica .....	61
3. GEOMETRIA E CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO SECADOR DEFINITIVO ...	63
4. PREPARAÇÃO DA LEVEDURA PASTOSA .....	64
5. JATEAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DA LEVEDURA NO SRRI .....	65
6. DINÂMICA E ARRASTE DOS INERTES DE CERÂMICA .....	72
6.1 Influência da Força de Arraste do Ar .....	73
6.2 Estudo da Dinâmica dos Inertes de Diâmetros 0,03 E 0,04m .....	76
6.3 Estudo do Arraste dos Inertes .....	76
A. Esferas de 0,02m de Diâmetro .....	77
B. Esferas de 0,03m de Diâmetro .....	80
C. Esferas de 0,04m de Diâmetro .....	80
7. DINÂMICA E ARRASTE DOS INERTES DE AÇO .....	82
7.1 Simulação da Influência da Força de Arraste do ar .....	82
7.2 Esferas de Moinhos de Bolas .....	86

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

B917d Burjaili, Mauro Marques  
Desenvolvimento de um secador rotatório com recheio de inertes / Mauro Marques Burjaili. -- Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador : Theo Guenter Kieckbusch  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1.\*Secador rotatório 2. Secagem. 3. Levedura. 4. Pasta.  
I. Kieckbusch, Theo Guenter. II. Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

A. Estudo da Dinâmica dos Inertes .....	86
B. Estudo do Arraste dos Inertes .....	88
C. Desgaste dos Inertes .....	88
7.3 Esferas de Rolamentos Mecânicos .....	88
A. Estudo da Dinâmica dos Inertes .....	91
B. Estudo do Arraste dos Inertes .....	91
5. ENSAIOS DE SECAGEM .....	93
I. SECAGEM COM INERTES DE CERÂMICA DE DIÂMETRO 0,02m .....	94
1.1 Alimentação Contínua de Levedura .....	94
1.2 Alimentação Intermitente de Levedura .....	97
A. Influência do Tempo de Parada .....	103
B. Balanço de Massa (sólidos) .....	104
2. SECAGEM COM INERTES DE AÇO .....	106
2.1 Determinação do Tempo de Alimentação .....	106
2.2 Ensaios de Secagem .....	108
2.3 Umidade do Ar na Entrada e na Saída do SRRI .....	114
2.4 Variação da Temperatura do Ar ao longo do eixo do SRRI .....	116
2.5 Variação da Temperatura do Leito de Inertes ao longo do eixo do SRRI .....	120
2.6 Balanço de Massa (Sólidos) .....	126
2.7 Balanço de Massa (água) .....	127
2.8 Avaliação Energética do SRRI .....	127
A. Energia Específica .....	127
A.1 Energia no Soprador .....	128
A.2 Energia para Rotação do SRRI .....	129
A.3 Energia para Aquecimento do AR .....	129
B. Energia Mínima Necessária .....	132
2.9 Análise do Comportamento do secador .....	133
A. Calor Condutivo .....	133
B. Calor Convectivo .....	135
6. CONCLUSÕES .....	137

APÊNDICE A.	DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO DOS INERTES
APÊNDICE B.	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS INERTES
APÊNDICE C.	ANÁLISE DAS INCERTEZAS NAS MEDIDAS EXPERIMENTAIS
APÊNDICE D.	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DA LEVEDURA
APÊNDICE E.	CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS
APÊNDICE F.	DESGASTE DAS ESFERAS CERÂMICAS
APÊNDICE G.	ALIMENTAÇÃO INTERMITENTE DA LEVEDURA
APÊNDICE H.	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO PÓ DE LEVEDURA
APÊNDICE I.	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS
APÊNDICE J.	REOLOGIA DA PASTA DE LEVEDURA
APÊNDICE L.	EFICIÊNCIA DO MOTOR DO SOPRADOR
APÊNDICE M.	ISOTERMAS DE ADSORÇÃO DE UMIDADE
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	- Sistemas alimentadores de pastas: 1 - bocal com pressão; 2 - bocal pneumático; 3 - atomizador rotatório; 4 - extrusores; 5-compressores; 6 - rosca-sem-fim; 7 - vibradores (STRUMILLO et alii, 1983) . . . . .	05
Figura 2.2	- Leito fluidizados: (a) denso; (b) ebuliente; (c) borbulhante; (d) fracionado; (e) classificado; (f) canalizado; (g) jorro (VANECEK & MARKVART, 1966). . . . .	08
Figura 2.3	- Tipos de <i>drum dryer</i> para fluidos: (a) pastosos; (b) viscosos; (c) pouco viscosos (KEEY, 1972) . . . . .	13
Figura 2.4	- Secador rotativo (a) e "Efeito cascata" das partículas sólidas em três posições sequenciais do secador (b)(BAKER, 1988) . . . . .	15
Figura 2.5	- Secador rotativo com aquecimento indireto PERRY & GREEN, 1984) . . . . .	15
Figura 2.6	- Perfis típicos de aletas para secadores rotativos: (a) retas; (b) de 120°C; (c) de ângulo reto; (d) circulares (BAKER,1988) . . . . .	16
Figura 2.7	- Parâmetros das aletas (BAKER, 1988) . . . . .	17
Figura 2.8	- Relação entre <i>holdup</i> e posição da aleta para diversos valores do ângulo $\Psi^\circ$ (BAKER, 1988) . . . . .	18
Figura 2.9	- Secadores de película: (a) horizontal; (b) AP; (c) combinado (MILLIoud & ROUCH, 1973 e STOCKBURGER, 1976, citados por (STRUMILLO, 1983) . . . . .	19
Figura 2.10	- Instalação do <i>turbo dryer</i> (VOMM TURBO TECNOLOGIA) . . . . .	21
Figura 2.11	- Secador de contato com inertes (KUDRA, 1992) . . . . .	22
Figura 2.12	- Secadores com leito fluidizado ativo: (a) processo em batelada; (b) processo contínuo (KUDRA, 1992) . . . . .	23
Figura 2.13	- <i>Spray dryer</i> com sorção por contato (NAUKA & TEKHNIKA, 1990, citado por KUDRA, 1992) . . . . .	24
Figura 2.14	- Temperatura de saída do ar de secagem em operação em regime de batelada para diversos tipos de inertes e materiais úmidos, em leito de jorro (SCHNEIDER & BRIDGWATER, 1988) . . . . .	27
Figura 2.15	- Efeito do aumento da taxa de alimentação sobre o acúmulo de leite sólido no leito de inertes, em leito de jorro (ar a 100°C e 5,9 a	

	6,2kg/min; altura do leito igual a 0,33m) (BARRET & FANE, 1988) . . . . .	28
Figura 2.16 -	Leito de jorro com altura de 0,33m. Efeito da taxa de escoamento do ar sobre o acúmulo de sólidos nos inertes (BARRET & FANE, 1988) . . . . .	29
Figura 2.17 -	Leito de jorro com altura de 0,33m. Efeito do tipo de material sobre o acúmulo de sólidos nos inertes (BARRET & FANE, 1988) . . . . .	30
Figura 2.18 -	Moinho de bolas tipo cônico (McCABE et alii, 1985) . . . . .	31
Figura 2.19 -	Forças agindo sobre uma bola em um moinho de bolas (McCABE et alii, 1985) . . . . .	32
Figura 3.1 -	Secador rotatório com recheio de inertes inicial: 1 - flanges de acoplamento; 2- janelas de alimentação-coleta de material; 3 - anéis de sustentação; 4 - engrenagem; 5 - placas perfuradas; 6 - cilindro de secagem; 7 - chicanas; 8 - aletas . . . . .	35
Figura 3.2 -	Vistas do secador rotatório com recheio de inertes: (a) cilindro de secagem; (b) conjunto aletas-chicanas . . . . .	36
Figura 3.3 -	Vistas das placas perfuradas (a) e do flange de alojamento com anel de junção (b) . . . . .	38
Figura 3.4 -	Vistas frontal (a) e transversal (b) do corpo interno do secador com aletas de 70°C com largura de 0,075m . . . . .	39
Figura 3.5 -	Vistas dos flanges de alojamento com anel de junção e das placas perfuradas com coroa circular com furos (a) e sem furos (b) . . . . .	40
Figura 3.6 -	Foto da instalação completa de secagem para o secador rotatório com recheio de inertes . . . . .	42
Figura 3.7 -	Instalação experimental de secagem para secador rotatório com recheio de inertes . . . . .	43
Figura 3.8 -	Vista do sistema de aquecimento e escoamento de ar . . . . .	44
Figura 3.9 -	Vista do <i>o'ring</i> no flange do duto de ajuste . . . . .	45
Figura 3.10 -	Psicrômetro (FARIA & ROCHA, 1992) . . . . .	46
Figura 3.11 -	Vista do sistema de separação e coleta . . . . .	49
Figura 3.12 -	Vista do sistema motor acoplado ao SRRI . . . . .	50
Figura 3.13 -	Vista do sistema de alimentação do material pastoso . . . . .	51
Figura 3.14 -	Vista do tronco de cone-placa perfurada e duto alimentador . . . . .	51
Figura 3.15 -	Vista do duto metálico de alimentação com o sistema de rôtula com	

	sedê na base do tronco de cone, conectado ao duto da bomba . . . . .	52
Figura 4.1	- Movimentação das partículas do leito: (a) esquema da trajetória dos inertes; (b) vistas para duas posições das aletas (cilindro a 31,7rpm) . . . . .	55
Figura 4.2	- Vista da instalação do secador rotatório modelo . . . . .	56
Figura 4.3	- Corpo interno (a) e placas e aletas (b) do secador rotatório modelo . . . . .	57
Figura 4.4	- Vista da distribuição do leito de esferas de polietileno: cilindro a 31,7rpm, 4 aletas de 70°C com 0,059m de largura; leito com $z=0,08m$ . . . . .	62
Figura 4.5	- Vista da distribuição do leito de esferas de cerâmica para duas posições do cilindro a 33,0rpm, com 4 aletas de 70°C e 0,059m de largura, e leito com $z=0,08m$ . . . . .	63
Figura 4.6	- Instalação de secagem com cilindro de acrílico . . . . .	67
Figura 4.7	- Fotografias do jateamento da levedura: (a) efeito pulsante (ar a 3,69kg/min); (b) efeito de flutuação do jato (ar a 6,18kg/min). . . . .	69
Figura 4.8	- (a) Distribuição e (b) desprendimento da levedura . . . . .	70
Figura 4.9	- Vistas das dinâmicas do leito de inertes com diâmetro: (a) 0,02m (cilindro a 33,00rpm e $z=0,105m$ ); (b) 0,03m (cilindro a 36,69rpm e $z=0,120m$ ); (c) 0,04m (cilindro a 40,32rpm e $z=0,120m$ ) . . . . .	77
Figura 4.10	- Nível do leito em função do tempo de operação; esferas de cerâmica de diâmetro 0,02m; SRRI a 33,0rpm e ar a 2,96kg/min . . . . .	78
Figura 4.11	- Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de cerâmica de diâmetro igual a 0,02m, com SRRI a 33,0rpm e ar a: 2,51kg/min (a) e 1,96kg/min (b) . . . . .	79
Figura 4.12	- Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de cerâmica de diâmetro igual a 0,03m, com SRRI a 36,69rpm e ar a: 3,22kg/min (a) e 2,82kg/min (b) . . . . .	81
Figura 4.13	- Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de cerâmica de diâmetro igual a 0,03m, com SRRI a 36,69rpm e ar a 2,70kg/min . . . . .	82
Figura 4.14	- Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de cerâmica de diâmetro 0,04m, SRRI a 40,32rpm, sem escoamento de ar . . . . .	83
Figura 4.15	- Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para	

	esferas de cerâmica de diâmetro 0,04m, SRRI a 40,32rpm e ar a: 3,88kg/min (a) e 3,08kg/min (b) .....	84
Figura 4.16 -	Leito de esferas de aço (moinhos), com diâmetro de Sauter, 0,0311m e z=0,0125m: (a) vista sem movimentação; (b) vista da dinâmica satisfatória (cilindro a 31,62rpm) .....	87
Figura 4.17 -	Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação. Esferas de aço de moinhos com diâmetro de Sauter 0,0311m, cilindro a 31,62rpm e ar a: 4,67kg/min (a) e 4,14kg/min (b) .....	89
Figura 4.18 -	Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de aço de moinhos com diâmetro de Sauter 0,0311m. Cilindro a 31,62rpm e ar a 3,22kg/min .....	90
Figura 4.19 -	Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de aço (rolamentos) de 0,029m de diâmetro (Sauter), com o SRRI a 34,78rpm e ar a 4,04kg/min .....	92
Figura 5.1 -	Temperatura (a) e queda de pressão (b) do ar (2,51kg/min), em função do tempo, na operação do SRRI a 33,0rpm, com esferas de cerâmica de 0,02m de diâmetro .....	95
Figura 5.2 -	Produção de levedura em pó em função do tempo de operação. SRRI a 33,0rpm, esferas de cerâmica de diâmetro 0,02m, alimentação contínua da pasta e ar a 170°C .....	96
Figura 5.3 -	Umidade da levedura em pó em função do tempo de operação. SRRI a 33,0rpm, esferas de cerâmica de diâmetro 0,02m, alimentação contínua da pasta e ar a 170°C .....	97
Figura 5.4 -	Umidade da levedura em pó em função do tempo de operação. SRRI com inertes de cerâmica. Alimentação contínua da pasta com 74,04% de umidade; ar a 170°C (a) e 140°C (b) .....	99
Figura 5.5 -	Temperaturas (a) e queda de pressão (b) do ar em função do tempo de operação. SRRI com inertes de cerâmica. Alimentação intermitente da pasta e ar a 170°C .....	101
Figura 5.6 -	Produção de levedura em pó em função do tempo de operação. SRRI com inertes de cerâmica, alimentação intermitente da pasta e ar a 170°C: (a) sedimentador; (b) ciclone .....	102

Figura 5.7 - Umidade da levedura em pó em função do tempo de operação. SRRI com inertes de cerâmica; alimentação intermitente da pasta; ar a 170°C e $t_a=4,5\text{min}$ . . . . .	103
Figura 5.8 - Umidade do pó em função do tempo de operação. SRRI com inertes de cerâmica. Alimentação intermitente da pasta; ar (170°C); $t_a=6,0\text{min}$ . . . . .	104
Figura 5.9 - Umidade final da levedura (pó) em função do tempo de operação do SRRI com inertes de aço. Ar a 170°C e pasta de levedura alimentada continuamente, com umidade inicial de: (a) 73,84% e (b) 74,84% . . . . .	107
Figura 5.10 - Queda de pressão (a) e temperaturas (b) do ar em função do tempo de operação. SRRI com inertes de aço; alimentação da pasta intermitente; $t_a=3,0\text{min}$ e $t_p=5,0\text{min}$ (ensaio A) . . . . .	110
Figura 5.11 - Produção de levedura (pó) em função do tempo de operação. SRRI com inertes de aço. Alimentação intermitente da pasta e ar a 170°C: (a) sedimentador; (b) ciclone . . . . .	112
Figura 5.12 - Umidade da levedura em forma de pó em função do tempo de operação. SRRI com leito de aço. Alimentação intermitente da pasta; ar (170°C); ( $t_a=4,5\text{min}$ ) . . . . .	113
Figura 5.13 - Temperatura do ar na primeira (a) e segunda (b) câmara, em função do tempo de medida. Ar a 4,04kg/min e 170°C . . . . .	117
Figura 5.14 - Temperatura do ar na terceira (a) e quarta (b) câmara, em função do tempo de medida. Ar a 4,04kg/min e 170°C . . . . .	118
Figura 5.15 - Temperatura do ar (4,48kg/min) na direção do comprimento do SRRI, no ponto médio entre o nível do leito e a parede do secador . . . . .	119
Figura 5.16 - Temperatura do leito na primeira câmara, durante alimentação (a) e parada (b), em função do tempo de medida . . . . .	121
Figura 5.17 - Temperatura do leito na segunda câmara, durante alimentação (a) e parada (b), em função do tempo de medida . . . . .	122
Figura 5.18 - Temperatura do leito na terceira câmara, durante alimentação (a) e parada (b), em função do tempo de medida . . . . .	123
Figura 5.19 - Temperatura do leito na quarta câmara, durante alimentação (a) e parada (b), em função do tempo de medida . . . . .	124
Figura 5.20 - Temperatura na direção axial do SRRI, com termopares posicionados a 3,0cm de profundidade no leito de inertes . . . . .	125

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	- Modelos reológicos para pastas (STRUMILLO et alii, 1983) . . . . .	04
Tabela 2.2	- Secadores de materiais pastosos com as respectivas apresentações físicas do produto final (FREIRE, 1992) . . . . .	06
Tabela 2.3	- Dados de secagem para secadores de película horizontais e verticais (STRUMILLO et alii, 1983) . . . . .	20
Tabela 3.1	- Umidade absoluta do ar a várias velocidades (pressão barométrica de 91,91kPa) . . . . .	48
Tabela 4.1	- Velocidade de rotação (rpm) do cilindro em função da inclinação ( $\alpha$ ), largura (L) e do número de aletas (esferas de polietileno, ocupando o volume correspondente a $z=0,08m$ ) . . . . .	60
Tabela 4.2	- Comprimento do jato em função da taxa mássica da levedura pastosa com 23,18% de sólidos . . . . .	66
Tabela 4.3	- Dados do estudo da distribuição da levedura termolisada (25,72% de sólidos) pelo interior do SRRI, com corpo interno nas posições de 0°, 90° e 180°, com ar a 34,07°C . . . . .	68
Tabela 4.4	- Jateamento de levedura termolisada com teor de sólidos de 25,89% e taxa de 5,08kg/h (contínua) em função da temperatura do ar com alimentação de 6,04kg/min, com o corpo interno do cilindro a 180°C . . . . .	71
Tabela 4.5	- Relação do adimensional da força de gravidade com o da força de arrasto para as esferas do leito . . . . .	85
Tabela 5.1	- Valores médios relativos aos ensaios inicial (A) e repetido (B). Ar a 4,04kg/min e levedura a 4,48kg/h . . . . .	109
Tabela 5.2	- Produção de levedura em pó nas etapas de parada e alimentação (ensaio A) . . . . .	111
Tabela 5.3	- Valores da umidade do ar efluente do SRRI ( $Y_f$ ), para o	

	ensaio inicial (A), com ar a 0,75m/s, nas etapas de alimentação e parada .....	115
Tabela 5.4	- Temperatura do ar (4,48kg/min) nas câmaras do secador .....	119
Tabela 5.5	- Temperaturas do leito nas câmaras do SRRI .....	120
Tabela 5.6	- Perdas de levedura em pó nos ensaios A e B .....	127
Tabela 5.7	- Valores das variáveis da equação [5.3] para os ensaios A e B .....	128
Tabela 5.8	- Componentes da energia gasta na secagem da levedura no SRRI .....	130
Tabela 5.9	- Energias específicas para secadores de levedura termolisada .....	132

## NOMENCLATURA

$a_r$	ângulo de rolagem	rd
$c$	concentração mássica de sólidos	%
$c_f$	coeficiente de fricção das partículas	
$C_p$	calor específico	J/kg°C
$D$	diâmetro	m
$d$	diâmetro do corpo inerte	m
$E$	energia por unidade de tempo	kW
$F$	força	N
$g$	aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
$g_c$	fator de proporcionalidade (igual a 1 )	N.s <sup>2</sup> /kg.m
$h$	coeficiente de transferência de calor	W/m <sup>2</sup> K
	<i>holdup</i> da aleta	m <sup>3</sup> /m
$H_o$	altura do leito estático	m
$I$	entalpia do ar de secagem	kJ
$k$	número de variáveis independentes; constante de proporcionalidade	
	condutividade térmica	W/m°C
	índice de consistência	N.s <sup>n</sup> /m <sup>2</sup>
$k_e$	coeficiente de utilização de energia	
$L$	comprimento da aleta	m
$L'$	comprimento da ponta da aleta	m
$m$	massa	g
$m$	número de testes experimentais repetidos	
$\dot{m}$	taxa mássica	kg/min
$N$	número de medidas experimentais	
$n$	velocidade de rotação	rpm
	número de testes experimentais	
	índice da lei de potência	
$N_a$	número de aletas	
$n_v$	número de voltas	
$P$	pressão	N/m <sup>2</sup>

q	taxa de calor	W
R	raio do cilindro do secador	m
r	raio da esfera inerte	m
S	área de contato ar-esfera (arraste)	m <sup>2</sup>
	soma dos quadrados dos resíduos	
T	temperatura	°C
t	tempo	min
u	velocidade linear	m/s
	coeficiente de atrito	
v	volume	m <sup>3</sup>
X	umidade do material	kg água/kg material seco
x	desvio da medida relativo ao valor médio	
X <sub>c</sub>	variável independente codificada	
x <sub>i</sub>	medida experimental	
x <sub>m</sub>	média aritmética das medidas	
x <sub>p</sub>	fração mássica das partículas	
Y	umidade absoluta do ar	kg água/kg ar seco
z	comprimento representativo do volume do leito de inertes, dado pela distância vertical entre a base do cilindro e o nível do leito	m
w	velocidade angular	rd/s

#### LETRAS GREGAS

α	ângulo da vertical com o segmento entre os centros do inerte e cilindro	rd
	coeficiente de descarga da placa de orifício	
	difusividade térmica	m <sup>2</sup> /s
α'	ângulo da haste da aleta com tangente à circunferência do cilindro	rd
ε	erro da medida de uma grandeza	
ξ	relação entre tempos totais de alimentação e parada	
η	eficiência do motor = (energia útil)/(energia recebida)	
γ	ângulo da haste da aleta com a linha que une o centro do cilindro à intersecção da haste com a ponta da aleta;	rd
	taxa de cisalhamento	1/s

$\Delta h_v$	calor latente de vaporização	J/kg
$\iota$	incerteza de uma grandeza medida	
$\nu$	viscosidade cinemática	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	massa específica	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	desvio padrão das medidas	
$\tau$	tensão de cisalhamento	N/m <sup>2</sup>
$\theta$	ângulo entre a horizontal com o segmento ponta da aleta-centro do cilindro	rd
$\phi$	ângulo entre a horizontal com a superfície livre das partículas horizontal, ou ângulo de repouso	rd
$\Psi$	ângulo entre a haste e a ponta da aleta	rd
$\Omega$	torque do SRRI	J
$\mu$	viscosidade dinâmica	kg/(m.s)

### SUBSCRITOS E SOBRESCRITOS

a	ar úmido; arraste; alimentação; aquecimento do ar
ac	acúmulo de massa no volume de controle
as	ar seco
B	sistema de bombeamento
bs	bulbo seco
bu	bulbo úmido
c	valor crítico; ciclone; consumida
d	diâmetro
e	esfera, entrada
ev	evaporação
e'	esfera
f	final, frasco
g	gravidade
i	ínerte
l	levedura
m	material; valor médio; massa; metal
ms	material seco
n	rotação

$n_v$	número de voltas
$o$	valor inicial; entrada do SRRI
$op$	operação do secador
$p$	partícula; parada; pasta de levedura; padrão
$pe$	perdas
$po$	pó
$p_v$	parcial de vapor
$s$	secador; saturação, sedimentador; saída; soprador
$ss$	sólido seco
$t$	tempo; total
$T_s$	total seco
$T_u$	total úmido
$v$	voltas; vapor de água
$w$	água evaporada
1	entrada; área maior da placa de orifício; caracterização do diâmetro do corpo inerte
2	saída; área menor da placa de orifício; caracterização do diâmetro do corpo inerte;
'	base úmida; substância úmida

#### GRUPOS ADIMENSIONAIS

$Ar$	número de Arquimedes = $(d_p^3 \cdot g / \nu^2) \cdot (\rho_p - \rho_a) / \rho_a$
$Gu$	número de Gukhman = $(T_{bs} - T_{bu}) / T_{bs}$
$Nu$	número de Nusselt = $(h \cdot d_p) / k$
$Re$	número de Reynolds = $(u_s \cdot d_p) / \nu$
$\Pi_{acc}$	relação entre forças de arrasto nas esferas $e$ e $e'$ = $F_{ac} / F_{ac'} = D_e^2 / D_e'^2$
$\Pi_{gce}$	relação entre forças de gravidade nas esferas $e$ e $e'$ = $F_{gc} / F_{gc'} = m_e / m_e'$
$GA_{ce}$	relação entre os dimensionais $\Pi_{gce}$ e $\Pi_{acc}$ = $D_e / D_e'$
$Fo$	número de Fourier = $(\alpha \cdot t) / r^2$
$Bi$	número de Biot = $(h \cdot r) / k$

## RESUMO

Desenvolveu-se um secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) e realizaram-se ensaios de secagem de pasta de levedura termolisada proveniente da indústria do açúcar e do álcool. Foram realizados estudos referentes ao comportamento do leito de inertes, com relação à velocidade de rotação e aos parâmetros geométricos da parte interna do secador, como largura, espessura, número e inclinação das aletas longitudinais, utilizando-se filmagens para melhor visualização da dinâmica do leito de inertes, composto por esferas de polietileno e de cerâmica. Maximizou-se a taxa mássica do ar de secagem, avaliando-se a influência do escoamento do ar no arraste dos corpos inertes. Adequou-se a concentração de levedura termolisada à condição de pasta para alimentação no secador (25,0%, em massa), através de estudos reológicos que envolveram o jateamento e a distribuição da pasta sobre o leito de inertes. Na operação de secagem o leito de inertes compôs-se de esferas de cerâmica (diâmetro 0,02m, massa total de 22,0kg) e de aço (diâmetro de 0,03m, massa total de 53,0kg), que permitiram a realização de ensaios a taxas de ar mais altas (4,04kg/min). Primeiramente, a secagem foi estudada alimentando-se a pasta de levedura de modo contínuo (12,0kg/h) e, posteriormente, de modo intermitente (4,5kg/h, tempo de alimentação de 3,0min e de parada 5,0min) para aproveitamento do calor condutivo do leito. A qualidade do produto em forma de pó foi referenciada ao valor limite de 10,0% de umidade. O secador rotatório (diâmetro 0,25m e comprimento 0,65m) operou nas rotações de 33,00rpm (leito com esferas de cerâmica) e 34,78rpm (leito com esferas de aço) e o ar de secagem foi alimentado a 170°C. Quantificaram-se as temperaturas do ar e do leito de inertes, ao longo do cilindro de secagem. A avaliação energética do secador permitiu estimar a energia específica envolvida na operação de secagem e a eficiência térmica do secador, e sugeriu que cerca de 48,0% do calor necessário para a secagem era condutivo.

Palavras-chave: secador rotatório; secagem com inertes; levedura; pasta.

## ABSTRACT

A rotary dryer packed with inerts (SRRI) was developed and drying tests performed with thermolyzed yeast paste, used in the sugar industry. Studies of the bed behaviour as a function of rotation and geometrical parameters of the internal parts of the dryer, like the width, thickness, number and inclination of longitudinal flights, were based on film recording, made for a better visualization of the bed dynamics, composed by polyethylene and ceramic spheres. The drying air flowrate was maximized according to its influence on inerts draft. The yeast suspension concentration was adequated for a paste condition (25,0%, mass), with rheological studies concerning the jetting and the distribution of the paste around the inerts. In the actual drying tests, the inert bed was composed by ceramic spheres (diameter 0,02m, total weight 22,0kg) or steel balls (diameter 0,03m, total weight 53,0kg), which allowed a higher air flowrate (4,04kg/min). During the first runs, drying with a continuous paste feeding was considered. The main runs were evaluated with a semi-continuous mode (3,0min: 4,5kg/h; 5,0min: no feed), making use of the conductive heat of the inert bed. The dried product quality was assessed by its moisture level (< 10,0%). The rotary dryer (diameter 0,25m; length 0,65m) operated at 33,0rpm (ceramic spheres) and 34,78rpm (steel balls) and the drying air was fed at 170°C. The air and the inert packing temperature was quantified along the dryer. Energetic evaluations estimated the specific energy during drying and indicated that the conduction heat could be responsible for 48,0% of the total heat requirements.

Keywords: rotary dryer; drying in inert bed; yeast; pastelike materials.

# 1. INTRODUÇÃO

O trabalho aqui descrito consiste em mais uma etapa do desenvolvimento do secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) concebido no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia e com carta patente conferida pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (BURJAILI et alii, 1994). O equipamento, utilizável exclusivamente no processamento de materiais pastosos, foi inicialmente ensaiado com leite de soja, o que permitiu a realização do estudo de seu desempenho (BURJAILI et alii, 1987). Numa etapa posterior, em um trabalho combinado de pesquisa e extensão, vinculado à Copersucar/Usina Paredão, SP, foi projetado e construído um secador rotatório com recheio de inertes em escala ampliada para estudo de secagem de melaço de cana-de-açúcar (ÁLVARES, 1990; ÁLVARES et alii, 1990; ÁLVARES et alii, 1991a, 1991b; BURJAILI & FINZER, 1991). Em seguida, o equipamento foi utilizado no processamento de concentrado protéico foliar de *Cajanus cajan* Millsp (feijão guandu) em um trabalho conjunto com o Departamento de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Uberlândia (DANESI et alii, 1991). Realizaram-se estudos considerando-se o reciclo do ar de secagem efluente, processando-se melaço de cana-de-açúcar e sabão de borra de soja (BURJAILI et alii, 1992). Conduziram-se ensaios com milho verde, associando-se o estudo de desempenho do secador ao das propriedades organolépticas do produto obtido (FINZER et alii, 1992). Foram levantados dados do tempo de residência e da caracterização das partículas no secador e do consumo energético na operação de secagem (FINZER et alii, 1993). Ensaios de secagem com levedura termolisada foram conduzidos no secador rotatório com recheio de inertes com o objetivo de comparar o seu desempenho ao de outros tipos de secadores, como o secador de tambor (convencional) e o turbo secador (SANTOS et alii, 1992).

Os estudos acima relacionados foram caracterizados por uma abordagem predominantemente tecnológica do secador rotatório com recheio de inertes, com uma avaliação da operação do secador sob o ponto de vista de condições de processamento de um determinado produto. Neste trabalho, que é uma etapa natural na sequência e desenvolvimento do secador, procurou-se dar um tratamento com ênfase nos fenômenos físicos inerentes à operação do secador. Dentro desse princípio foram considerados os seguintes itens: a) otimização dos parâmetros operacionais que influenciam o desempenho do secador de geometria fixa: massa, tamanho e material constitutivo dos inertes, velocidade de rotação do secador; b) estudo da sistemática de alimentação e distribuição do material pastoso alimentado; c) análise das modalidades contínua e intermitente

de alimentação; d) estudo da influência do escoamento do ar no arraste dos inertes; e) verificação do comportamento térmico do leito e do ar de secagem ao longo do secador.

Nos ensaios de secagem processou-se levedura termolisada pastosa, proveniente da Indústria do Açúcar e do Alcool.

A utilização da técnica de filmagem nos ensaios experimentais foi essencial neste trabalho, tanto para os estudos em que se avaliou a dinâmica do sistema em consideração, quanto para o registro de medições simultâneas de grandezas em pontos distintos.

No CAPÍTULO 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica em que são considerados os materiais pastosos de uma maneira geral, e, em seguida, os tipos de equipamentos de secagem que processam tais materiais e/ou têm mecanismo de funcionamento semelhante ao do secador rotatório com recheio de inertes (SRRI).

O material pastoso e o equipamento utilizados nos ensaios são abordados no CAPÍTULO 3. Apresentam-se aspectos da construção e operação do secador e da instalação experimental complementar de secagem.

No CAPÍTULO 4 têm-se os estudos para a otimização do desempenho mecânico do secador. Considera-se a dinâmica e o arraste, pela ação do ar, do leito de inertes do secador para vários tamanhos e materiais constitutivos dos corpos inertes. Os estudos se estendem ao material pastoso, considerando-se sua preparação, distribuição e jateamento no leito de inertes do secador.

No CAPÍTULO 5 são apresentados e discutidos ensaios de secagem. Consideram-se os estudos do comportamento térmico do ar de secagem e do leito de inertes e os balanços mássicos e energéticos do sistema.

No CAPÍTULO 6 são apresentadas as conclusões finais.

Os valores medidos das diversas grandezas aqui apresentadas são indicados juntamente com os respectivos erros e/ou incertezas experimentais, cujos critérios de determinação e cálculos constam do APÊNDICE C.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MATERIAIS PASTOSOS

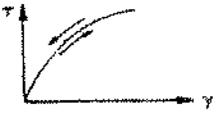
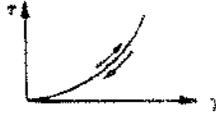
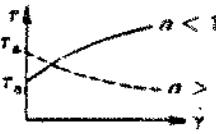
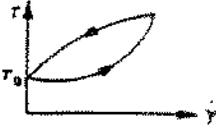
Estruturalmente, considera-se como material pastoso um sistema sólido-líquido constituído de partículas microscópicas ou coloidais dispersas em um líquido. Apresenta-se sob várias formas físicas, compreendendo pastas duras e fofas, lamas, suspensões, emulsões e soluções. Quando submetido a determinados processos térmicos, o material pastoso sofre modificações em suas propriedades físicas (suspensões líquidas passam de um estado altamente viscoso para uma forma de sólido friável). Essa transição pode resultar em considerável aderência do material às paredes do equipamento, formando-se aglomerados que requererão maior tempo para secagem (STRUMILLO et alii, 1983; FREIRE, 1992; ROOS & KAREL, 1991).

As propriedades reológicas do material pastoso são de fundamental importância na secagem, porque determinam seu comportamento durante o escoamento. Na Tabela 2.1 estão apresentados os modelos reológicos possíveis para materiais pastosos. Verifica-se um comportamento similar ao sistema reológico newtoniano quando o conteúdo de umidade do material pastoso é elevado, enquanto que, para baixos valores de umidade, ocorre uma tendência ao comportamento não-newtoniano (tixotropia). O conhecimento desses limites de comportamento da pasta é importante tanto para o projeto do sistema de alimentação quanto para a distribuição do material no secador (STRUMILLO et alii, 1983). Diversos tipos de sistemas de alimentação de materiais pastosos estão esquematizados na Figura 2.1.

Diversos materiais pastosos têm sido submetidos à operação de secagem, como, por exemplo: sangue animal, extratos vegetais, purê de banana, polpa de tomate, polpa de urucum, levedura, melaço de cana-de-açúcar, leite de soja, amido, farinha de mandioca, borra de café (FREIRE, 1992).

A levedura pastosa termolisada utilizada nos ensaios de secagem, apresentados neste trabalho, constou de um material que foi criteriosamente concentrado para garantir-lhe uma reologia de pasta, condição necessária para seu processamento no secador rotatório com recheio de inertes.

TABELA 2.1 Modelos reológicos para pastas (STRUMILLO et alii, 1983).

sistema reológico	$\tau=f(\dot{\gamma})$		viscosidade
	equação	diagrama	
fluido Newtoniano (1)	$\tau = k.\dot{\gamma}^n$ $n=1$		constante
fluido pseudoplástico (2)	$\tau = k.\dot{\gamma}^n$ $n < 1$		decrece com o aumento de $\dot{\gamma}$
fluido dilatante (3)	$\tau = k.\dot{\gamma}^n$ $n > 1$		crece com o aumento de $\dot{\gamma}$
corpo plástico (4)	$\tau - \tau_0 = k.\dot{\gamma}^n$		o escoamento ocorre quando $\tau > \tau_0$
fluido tixotrópico (5)	$\tau - \tau_0 = k.\dot{\gamma}^n$ $k, n = f(t)$		decrece com o aumento de $\dot{\gamma}$ e do tempo;
fluido reopético (6)	$\tau - \tau_0 = k.\dot{\gamma}^n$ $k, n = f(t)$		crece com o aumento de $\dot{\gamma}$ e do tempo, o escoamento ocorre para $\tau > \tau_0$

(1) água; soluções e suspensões aquosas com baixo teor de sólidos; (2) soluções de polímero; polímeros fundidos; suspensão de caulim com alto conteúdo de umidade; suspensão diluída de materiais granulares; (3) amido; pigmentos ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{BaSO}_3$ );  $\text{FeO}$  vermelho; tintas; sóis plásticos; soluções de polímero; (4) pastas duras; precipitados; suspensão de caulim com baixo teor de umidade; misturas líquidas de argila e cimento; (5) pastas de pigmentos, produtos orgânicos intermediários, lodo de carbonatação, suspensões de cerâmica; (6) detergente, sabão e agentes ativos em suspensão.

## 2. EQUIPAMENTOS DE SECAGEM

Neste item são apresentados os sistemas de secagem que processam materiais pastosos e/ou

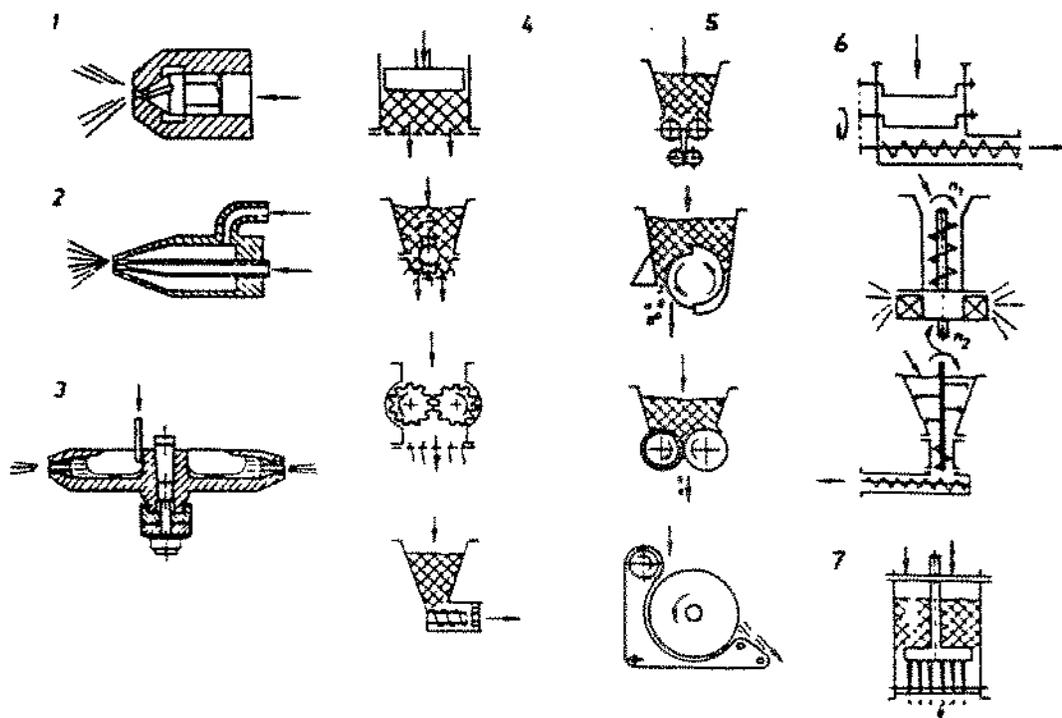


Figura 2.1 Sistemas alimentadores de pastas: 1- bocal com pressão; 2- bocal pneumático; 3 - atomizador rotatório; 4- extrusores; 5- compactadores; 6- rosca sem fim; 7- vibradores (STRUMILLO et alii, 1983).

de princípio de operação semelhante ao do secador rotatório com recheio de inertes (SRRI).

O SRRI pretende inserir-se entre as técnicas emergentes de secagem direcionadas para novas tecnologias, como ocorre na área de leitos fluidizados e desidratação via contato-sorção: secador vibrorotacional e leito vibrofluidizado com partículas inertes; leito pulsovibrofluidizado com relocação do fluxo gasoso; leito de jorro bidimensional e leito de jorro com turbilhonamento com partículas inertes; secador rotatório de contato direto de particulados; leito fluidizado ativo e *spray dryer* com sorção por contato (KUDRA, 1992).

Por causa de grandes variações nas características físicas dos materiais pastosos, não há um padrão de secador recomendado (FREIRE, 1992). Isso justifica a realização de uma investigação independente para cada material a ser processado (STRUMILLO et alii, 1983). Na Tabela 2.2 relacionam-se diversos tipos de secadores para materiais pastosos, classificando-se o produto final da operação de secagem.

Tabela 2.2 Secadores de materiais pastosos com as respectivas apresentações físicas do produto final (FREIRE, 1992).

pasta	secador	produto final
soluções/ emulsões	tambor	pós aglomerados
	<i>spray</i> com granulador	grânulos
	rotativo	pós granulados grosseiros
	<i>spray</i>	pós granulados grosseiros pós finamente dispersos
	jorro	
pastas duras	bandeja	pós aglomerados
	esteira	
	rotativo	
pastas (1)	esteira	pós aglomerados
	fluidizado; pneumático; jorro	grânulos; pós granulados grosseiros
pastas fofas/lodos (2)	bandeja; tambor	pós aglomerados
	rotativo	pós granulados grosseiros
	<i>spray</i> ; fluidizado; jorro	pós granulados grosseiros pós finamente dispersos
suspensões ou lamas bombeáveis (3)	tambor	pós aglomerados
	rotativo	pós granulados grosseiros
	<i>spray</i> ; jorro	pós granulados grosseiros pós finamente dispersos
	<i>spray</i> com granulador	grânulos

(1) Pastas com composição entre as duras e fofas/lodos;

(2) Pastas duras com alteração estrutural;

(3) Pastas derivadas das fofas/lodos por liquefação.

### 2.1 Secadores de Leite Fluidizado

A técnica de secagem em leite fluidizado é usada principalmente para materiais granulados. Também tem sido usada na secagem de materiais pastosos, incorporando-se inertes

na composição do leite e, particularmente, nos processos de secagem em que se obtêm alimentos instantâneos (SCHUBERT, 1993).

As pesquisas, que são limitadas e específicas nesta área, contrastam com o grande desenvolvimento e aplicação industrial dos secadores com leite fluidizado, pois o projeto desses equipamentos ainda é muito atrelado à arte e sustentado em conhecimentos empíricos (HOVMAND, 1987). A alta relação entre a massa de produto e o volume da câmara de secagem e a relativa simplicidade construtiva do equipamento são as principais vantagens deste tipo de secador (MROWIEC & CIESIELCZYK, 1977).

O método de secagem baseia-se na passagem de ar através do leite de material colocado sobre uma grade distribuidora de ar. O ar, quando escoar a baixas taxas, apenas percola o leite fixo de partículas. O aumento progressivo da taxa de ar expande o leite e, quando a força de arraste sobre as partículas iguala-se ao peso efetivo do leite, tem-se a velocidade crítica de fluidização ou velocidade mínima de fluidização. Neste estado o leite de partículas adquire propriedades similares às de fluidos, tendo um comportamento semelhante ao de um líquido ebuliente, caracterizando-se o fenômeno da fluidização (STRUMILLO & KUDRA, 1986). Com o aumento da taxa de escoamento do ar chega-se a uma condição de expansão do leite tal que ocorre arraste das partículas, sendo a velocidade correspondente chamada velocidade de arraste. Define-se o leite fluidizado como um sistema contendo partículas sólidas através das quais um fluido escoar com uma velocidade maior que a crítica de fluidização mas menor que a de arraste. Verifica-se uma fluidização adicional que consta da formação de bolhas de ar que coalescem rapidamente e ascendem no leite, causando mistura intensiva das partículas fluidizadas (HOVMAND, 1987).

Na Figura 2.2 estão esquematizados vários tipos de leite fluidizado: leite ebuliente (bolhas e partículas são de tamanhos aproximados); leite borbulhante (bolhas de tamanho significativamente superior ao tamanho das partículas, mas pequeno em relação às dimensões do recipiente); leite fracionado (bolhas ocupam praticamente toda a seção transversal do recipiente e o dividem em várias camadas que são arrastadas pelo fluido); leite classificado (as partículas são de vários tamanhos); leite com canais (formam-se canais verticais no leite) e leite de jorro (ocorre jorro de partículas a partir da canalização central do fluido).

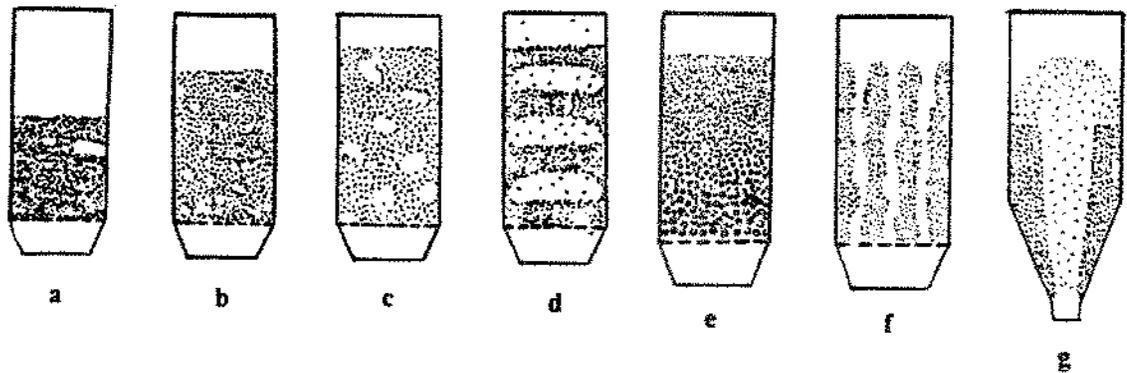


Figura 2.2 Leitos fluidizados: (a) denso, (b) ebuliente, (c) borbulhante, (d) fracionado, (e) classificado, (f) canalizado, (g) jorro (VANECEK & MARKVART, 1966).

#### A. Leito Pulsofluidizado com Relocação do Fluxo Gasoso

A técnica do leito fluidizado clássico, embora bem estabelecida industrialmente carece de novos projetos que eliminem certos problemas (KUDRA, 1992). Além da alta velocidade requerida do gás de entrada para fluidizar as partículas grandes, tem-se o escoamento localizado do gás. O gás relocado periodicamente oferece a possibilidade de tornar a fluidização uniforme e estável.

No leito pulsofluidizado com relocação do fluxo gasoso, ar quente escoava para um distribuidor rotatório que interrompe periodicamente a corrente de ar e a dirige para outras seções em uma câmara de gás situada abaixo da grade suporte de um secador de leito fluidizado padrão. O resultado é um leito mais agitado, com fluidização vigorosa. Em relação ao leito clássico, a queda de pressão é 7 a 12% menor e a velocidade mínima de fluidização 8 a 12% menor (KUDRA, 1992).

#### B. Leito de Jorro

O leito de jorro foi projetado originalmente para processamento de partículas cujos tamanhos impossibilitariam a fluidização no leito fluidizado convencional, requerendo, portanto, altas velocidades de entrada do gás (MATHUR & EPSTEIN, 1974). O leito de jorro permite processamento de partículas com diâmetro superior a 1mm, inviável no leito fluidizado

convencional (FREIRE, 1992).

O secador consiste de uma variante do leito fluidizado. O gás, ao invés de ser uniformemente distribuído pela seção transversal do leito, entra como um jato pelo centro de uma base cônica no recipiente, formando um canal preferencial que provoca o jorro das partículas. Ocorre a combinação de dois regimes hidrodinâmicos distintos: na parte central, o leito é diluído, com o gás escoando de modo concorrente com as partículas (transporte pneumático); na parte anular, o leito é denso, com a gás escoando de modo contra-corrente com as partículas (transporte com leito descendente). Esse fenômeno característico do leito de jorro provoca uma circulação das partículas. Esse regime de jorro, levando a um movimento cíclico e razoavelmente ordenado das partículas, resulta em alto grau de contato fluido-partículas e altas taxas de circulação dos sólidos, tornando possível a operação de secagem a temperaturas do gás superiores àquelas verificadas em um leito fluidizado padrão. Aplica-se, assim, à secagem de materiais termicamente sensíveis, como sementes de trigo e ervilha (HOVMAND, 1987), extratos vegetais farmacológicos (RÉ e FREIRE, 1987) e no recobrimento de comprimidos (ROCHA, 1992).

Quando o secador é utilizado para a secagem de materiais pastosos, as partículas sólidas são corpos inertes sobre os quais a alimentação é atomizada formando-se uma camada fina de material. Durante a circulação do leito, esta camada torna-se suficientemente seca e quebradiça, desprendendo-se dos inertes e sendo arrastada em forma de pó pelo ar de secagem (SCHNEIDER & BRIDGWATER, 1988). Os corpos inertes podem ser: partículas de PVC, de resina acrílica ou de vidro, utilizadas na secagem de solução de cloreto de sódio (SCHNEIDER & BRIDGWATER, 1988) e pasta de levedura (FREIRE & MORRIS, 1990; MORRIS & FREIRE, 1990); polietileno, teflon® e polipropileno, utilizadas na secagem de sangue animal (FREIRE, 1992; RÉ, 1986; RÉ & FREIRE, 1986). O diâmetro dos corpos inertes situa-se no intervalo de 2 a 4mm, e a densidade é de aproximadamente  $1330\text{kg/m}^3$  (SCHNEIDER & BRIDGWATER, 1988).

Uma desvantagem importante do leito de jorro é o fato da taxa de escoamento do ar ser determinada pela dinâmica do leito e não pela necessidade de transferência de calor e massa (FREIRE, 1992). Em consequência, são requeridas altas pressões e altas velocidades do gás de entrada, diminuindo a eficiência térmica do leito de jorro clássico (STRUMILLO et alii, 1983). Além disso, a ampliação de escala do leito de jorro é altamente não-linear, dificultando o projeto de equipamentos em escala industrial (KUDRA, 1992). Numerosas modificações têm sido

propostas no sentido de amenizar essas limitações do projeto convencional (STRUMILLO & KUDRA, 1986; KUDRA, 1992).

### C. Leito de Jorro Bidimensional

O leito de jorro bidimensional é uma forma modificada do leito de jorro convencional. Consta de uma câmara retangular vertical com uma base inclinada, sendo a espessura da câmara relativamente pequena quando comparada às outras dimensões. Em muitas instalações, duas placas verticais (*draft plates*), dispostas no interior da câmara, separam as regiões de transporte pneumático e de leito descendente. Isso torna a circulação dos sólidos estável e reduz a queda de pressão no leito (KUDRA, 1992), e a distribuição do tempo de residência é mais uniforme que a verificada no leito de jorro convencional (PALLAI & NÉMETH, 1987).

A ampliação de escala do secador com leito de jorro bidimensional pode ser realizada através da simples extensão do equipamento piloto ao longo da profundidade do leito (KUDRA, 1992).

### D. Leito Vibrofluidizado

Uma das limitações do leito fluidizado, a velocidade alta requerida para operação estável - que usualmente excede aquela ótima para secagem de pastas -, pode ser superada pelo uso de vibração mecânica de baixa frequência dentro do leito (KUDRA, 1992). O ar pode escoar a velocidades muito baixas que, por si só, não poderiam movimentar o leito. Ocorre o efeito redutor da vibração sobre a velocidade mínima de fluidização (FINZER & KIECKBUSCH, 1992). O uso de vibração adicional do leito fluidizado na secagem de pastas melhora a estrutura do leito e permite um uso econômico do agente de secagem, aumentando a taxa de secagem e prevenindo formação de aglomerados. A estrutura do leito, a intensidade e as características da fase misturada dependem da amplitude, frequência e forma da trajetória do movimento vibratório (MROWIEC & CIESIELCZYK, 1977).

Em ensaios de secagem de materiais pastosos (ovos, sangue animal, proteína de soja, caseína, levedura), utilizando-se um secador vibrofluidizado com inertes de teflon®, verificou-se

que, em relação ao *spray dryer*, houve redução de 50,0% no consumo de energia elétrica além de exigir apenas 1/5 de área útil e 1/6 da altura (Installation A1-FMU, informação técnica citada por KUDRA, 1992).

#### E. Leito Vibrojorado

Nos secadores vibrojorados o movimento das partículas é promovido pela vibração do suporte do leito, que pode ser conectado ao vaso de secagem por meio de uma membrana flexível ou por um conjunto pistão cilindro. O leito vibrojorado mostra uma tendência à uniformização da porosidade, mesmo quando o ar não o percola ou o faz a baixa velocidade. Observa-se que no jorro central a porosidade não é superior em 5% àquela do espaço anular, significando a ocorrência de escoamento em fase densa. No leito de jorro convencional a porosidade no jorro é alta, aproximando-se de 100%, imediatamente acima do orifício de entrada. A operação em fase densa do sistema vibrojorado apresenta vantagens em relação à operação que ocorre no leito convencional: aumento da capacidade de processamento por área instalada, redução do consumo de ar e aproveitamento maior da energia do ar de secagem, pois no leito convencional o ar abandona o leito ainda com alto potencial de secagem, devido ao baixo tempo de permanência no equipamento (FINZER, 1989).

#### 2.2 Secadores por Atomização (*Spray Dryer*)

O processo de secagem por atomização (*spray*) transforma um fluido bombeável em um produto desidratado, em uma única operação. O fluido é atomizado por meio de um disco rotatório ou um bocal, e o *spray* de gotículas contata imediatamente um gás aquecido (usualmente ar), realizando a secagem. A rápida evaporação resultante permite a utilização do processo para materiais termo-sensíveis, pois mantém baixa a temperatura das gotículas, mesmo com o agente de secagem a altas temperaturas (FILKOVÁ & MUJUMDAR, 1987).

Sistemas de secagem por atomização em uso evaporam até 30 t/h de umidade na operação com o ar de secagem admitido na faixa de 600 a 800°C, para materiais resistentes, e 150 a 250°C, para materiais sensíveis a efeitos térmicos. A alta produção que se consegue com um equipamento relativamente simples em operação contínua constitui uma das principais vantagens

do *spray dryer*, contrastando com o alto investimento inicial exigido em comparação com outros secadores contínuos (STRUMILLO et alii, 1983).

O *spray dryer* destaca-se, ao lado do secador com tambor *drum dryer*, no processamento industrial de materiais pastosos (HELDMAN, 1979). Utiliza-se para secar produtos farmacêuticos, alimentos, produtos químicos orgânicos e inorgânicos, detergentes, látex, plasma de sangue, cerâmicos (FILKOVÁ & MUJUMDAR, 1987). Inclui-se nos processos industriais de secagem preferidos para produção de alimentos instantâneos (café; leite; produtos de cacau, de amido; etc), geralmente acoplado a um leito fluidizado (SCHUBERT, 1993). São também empregados no processo convencional de secagem de levedura termolisada na indústria do açúcar e do álcool (COPERSUCAR, 1996).

### 2.3 Secadores Giratórios

São considerados secadores giratórios os secadores cuja carcaça consta de um cilindro disposto horizontalmente, ou com pequena inclinação, e que apresenta um movimento de rotação em torno de seu eixo.

#### A. Secadores de Tambor (*Drum Dryer*)

No *drum dryer* a secagem é realizada continuamente na superfície externa de um cilindro rotatório aquecido internamente. Uma camada fina de material é aplicada em um local e removida por raspagem, através de facas, em outro, após menos que uma revolução completa do cilindro. A transferência de calor para o material é, portanto, feita por condução. Na Figura 2.3 são mostrados diversos arranjos do *drum dryer*.

O *drum dryer* apresenta-se, normalmente, nas dimensões 0,6 a 3,0m (diâmetro) por 0,6 a 4,3m (comprimento) e rotação entre 1,0 e 10,0rpm (McCABE et alii, 1993).

O material alimentado no secador permanece, por um período de tempo de 6,0 a 8,0s, em contato com a superfície metálica aquecida, viabilizando o processamento para materiais termo-sensíveis. O coeficiente de transferência de calor é elevado (1200 a 2000W/m<sup>2</sup>.°C) e a capacidade de secagem varia de 5,0 a 50,0kg de material seco/m<sup>2</sup>h (McCABE et alii, 1993).

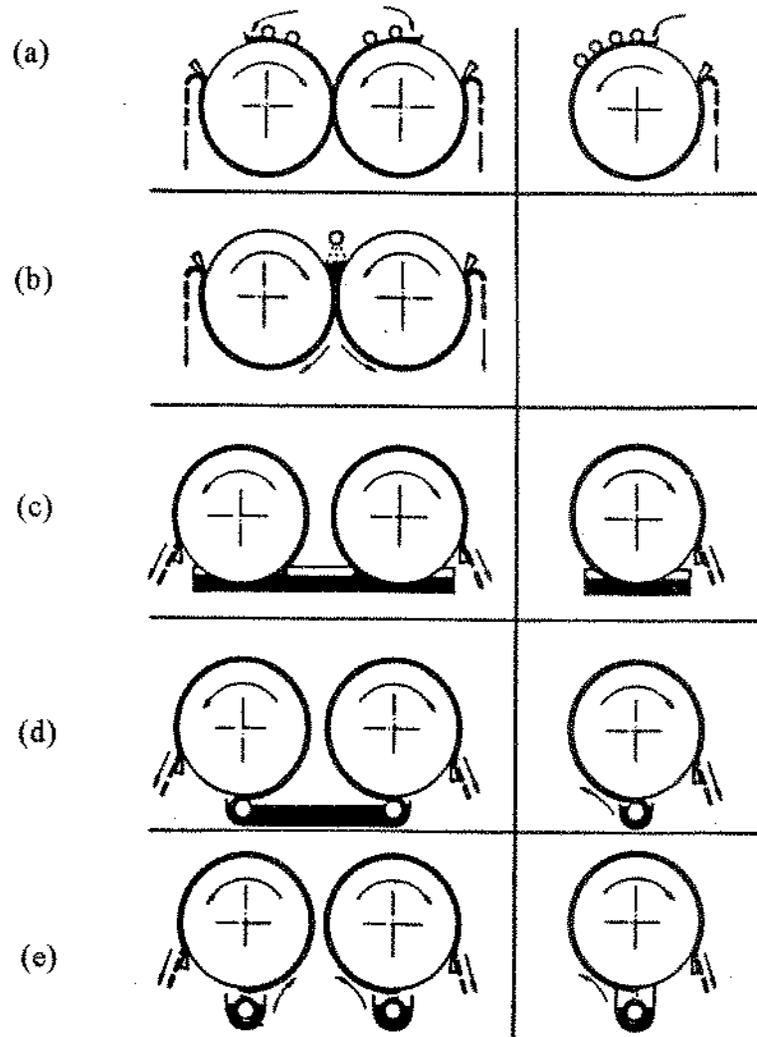


Figura 2.3. Tipos de *drum dryer* para fluidos: (a) pastosos; (b) viscosos; (c) e (d) pouco viscosos; (e) termicamente sensíveis (KEEY, 1975).

Como a camada de material sobre o cilindro é muito fina, a taxa de secagem não é governada pela difusão do vapor, mas envolve uma transformação de estado do soluto em adição à evaporação de água ou solvente.

A capacidade do secador também depende do grau de aderência do produto à superfície que, por sua vez, é função da viscosidade, tensão superficial e molhabilidade do material alimentado (MOORE, 1987).

Emprega-se o *drum dryer* no processamento de soluções diluídas ou concentradas e, sobretudo, de materiais pastosos, como purê de frutas e produtos de amido. É também utilizado no processo convencional de secagem de levedura termolisada na indústria do açúcar e do álcool (RHEINBOLDT ET ALII, 1987, COPERSUCAR, 1996). Segue o *spray dryer* no grau de importância industrial na secagem de materiais pastosos (HELDMAN, 1979).

## B. Secadores Rotativos

Nos secadores rotativos a carcaça cilíndrica pode ser horizontal ou levemente inclinada. A alimentação do material a ser processado é realizada por uma das extremidades do secador e o produto descarregado pela outra, voltada para o vértice do ângulo de inclinação do cilindro. Normalmente dispõem-se aletas no interior do cilindro para promover a movimentação do material da parte inferior para a superior da câmara, seguida da queda livre do mesmo (efeito cascata), de modo a intensificar a transferência de calor e massa no sistema. Um típico secador rotativo está esquematizado na Figura 2.4, juntamente com o efeito cascata das partículas sólidas.

O aquecimento do material pode ser realizado por contato direto com gases aquecidos (ar, gases de combustão) ou por vapor condensando em anéis concêntricos de tubos dispostos longitudinalmente na superfície interna da carcaça, como indicado na Figura 2.5. Em um arranjo mais sofisticado, foram utilizadas microondas no aquecimento (MARSAIOLI, 1991). Quando o gás e o sólido são alimentados de modo concorrente, o cilindro do secador pode ser horizontal ou inclinado, enquanto que para escoamentos em contra-corrente é invariavelmente inclinado (SHERRIT et alii, 1993).

A velocidade do ar e o tamanho das partículas do produto têm um papel fundamental sobre a taxa de arraste do material processado no secador. Mesmo pequenas mudanças dessas variáveis afetam significativamente o arraste (RAQUEL & JACOB, 1992).

Normalmente os secadores rotativos apresentam-se com comprimentos entre 2,0 e 9,0m e diâmetros entre 0,3 a 5,0m (KELLY, 1987). PERRY & GREEN (1984) indicam a relação comprimento/diâmetro desses equipamentos como 4 a 10. A rotação varia de 1,0 a 15,0rpm (KNEULE, 1966) e a inclinação de aproximadamente 2° (DOUGLAS et alii, 1992; ANDERSON & JACOB, 1992).

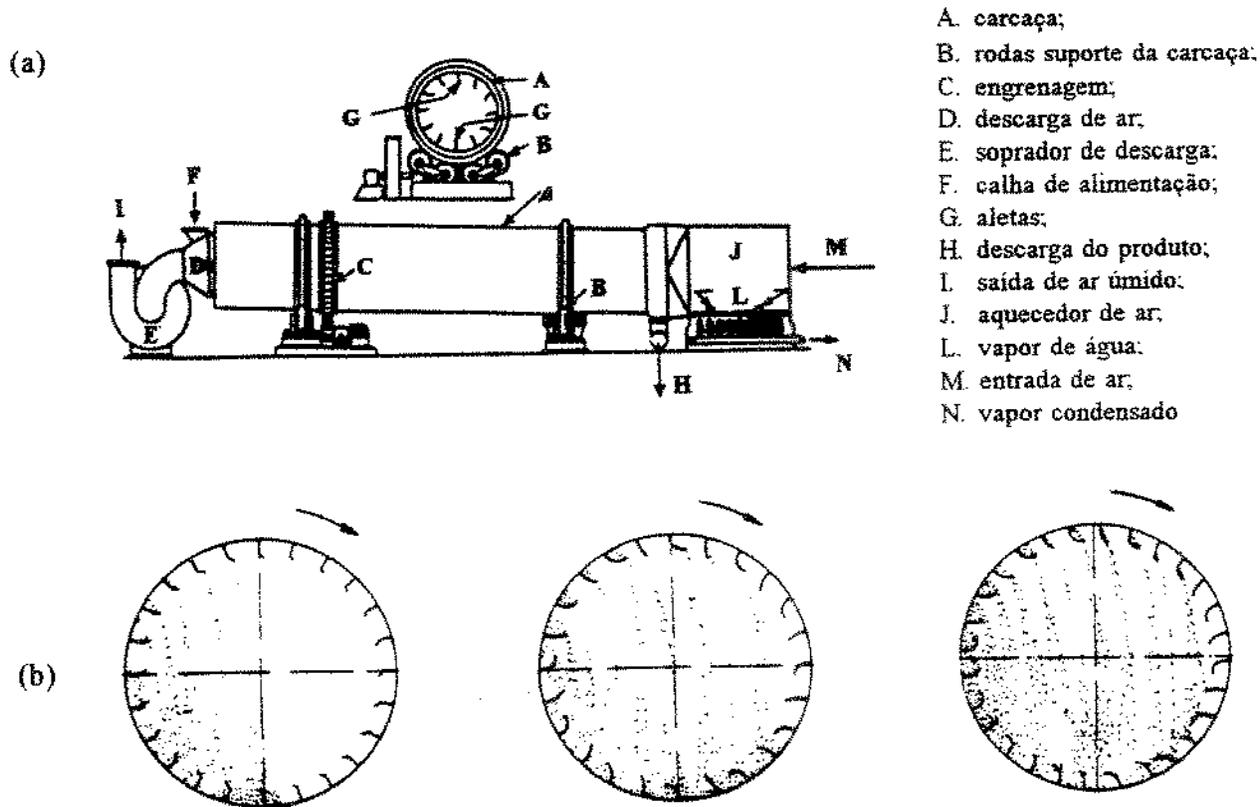


Figura 2.4. Secador rotativo (a); Efeito cascata das particulas sólidas em três posições sequenciais do secador (b) (BAKER, 1988).

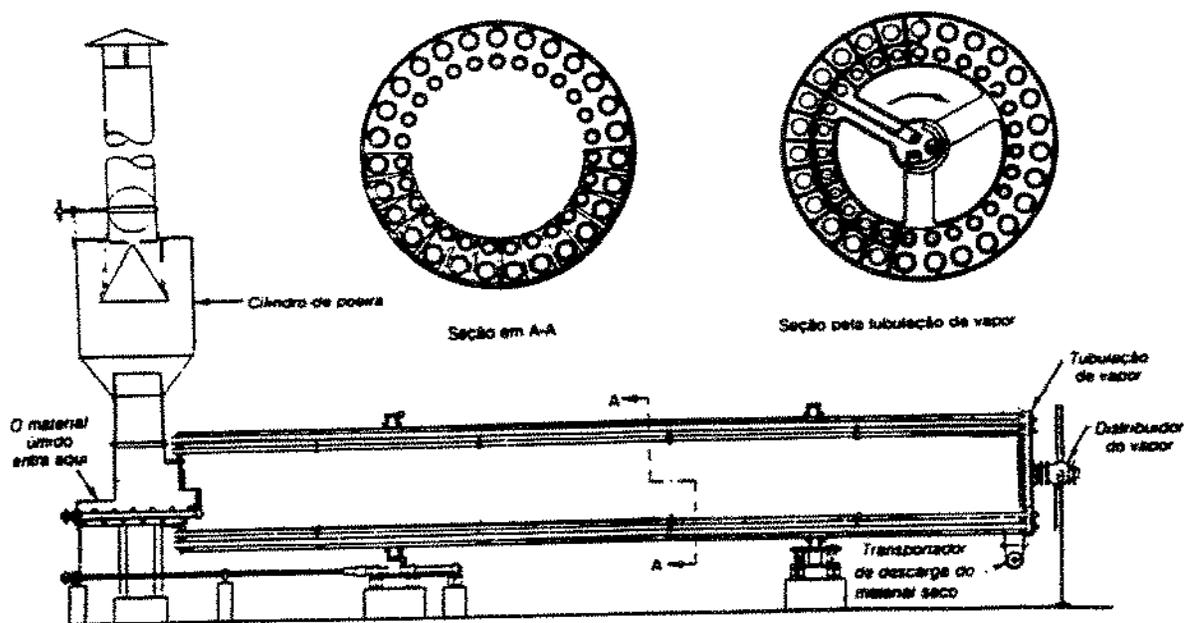


Figura 2.5. Secador rotativo com aquecimento indireto (PERRY & GREEN, 1984).

As variedades mais comuns de aletas são as radiais sem borda; as inclinadas de  $120^\circ$ ; as de ângulo reto e as circulares alongadas, como mostrado na Figura 2.6. Utilizam-se as aletas de ângulo reto para materiais de fácil escoamento; os materiais pegajosos requerem radiais sem borda; as aletas em forma espiral são empregadas para (a) alimentação do secador e para (b) acelerar o escoamento do material a partir da calha de alimentação. A combinação de vários tipos de aletas é um expediente empregado para materiais cujas características se modificam durante a secagem. Para um secador padrão, empregam-se aletas sem borda na primeira parte do comprimento do cilindro, aletas de  $45^\circ$  na segunda e  $90^\circ$  na terceira (PERRY & GREEN, 1984).

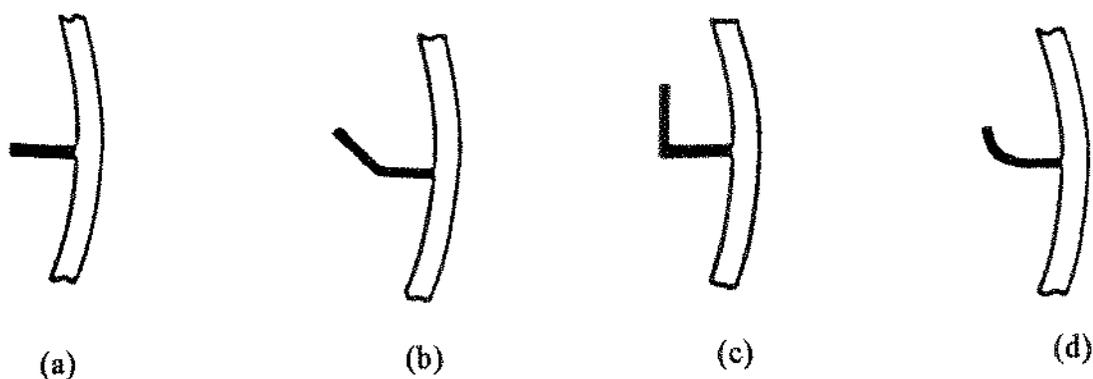


Figura 2.6. Perfis típicos de aletas para secadores rotativos: (a) retas; (b) de  $120^\circ$ ; (c) de ângulo reto; (d) circulares (BAKER, 1988).

Durante a operação do secador, em cada cascata, o material é capturado por uma aleta na parte inferior do cilindro e transportado para a parte superior. Quando o ângulo de repouso na aleta,  $\phi$  (formado pela superfície livre das partículas na aleta com a horizontal), torna-se superior ao de equilíbrio, o material é derramado pela borda da aleta para a parte inferior do cilindro, contatando os gases quentes em escoamento axial pelo cilindro. Os ângulos  $\phi$  e  $\theta$  (formado entre a horizontal e a ponta da aleta) e outros parâmetros geométricos das aletas são esquematizados na Figura 2.7, onde  $L$  e  $L'$  são os comprimentos da haste e ponta da aleta, respectivamente. Esses parâmetros são fundamentais para determinação da quantidade de material presente na aleta durante a operação em regime permanente (*holdup* das aletas), que, por sua vez, constitui elemento chave para o cálculo do tempo de residência do material no secador. BAKER (1988) verificou a influência da posição da aleta (ângulo  $\theta$ ) sobre a fração de *holdup* das aletas, como mostrado na Figura 2.8, onde  $h_0$  refere-se ao *holdup* para  $\theta = \theta_0$ , e  $\Psi$  ao ângulo entre os comprimentos da haste e da ponta da aleta. Constatou que tanto a velocidade de rotação do

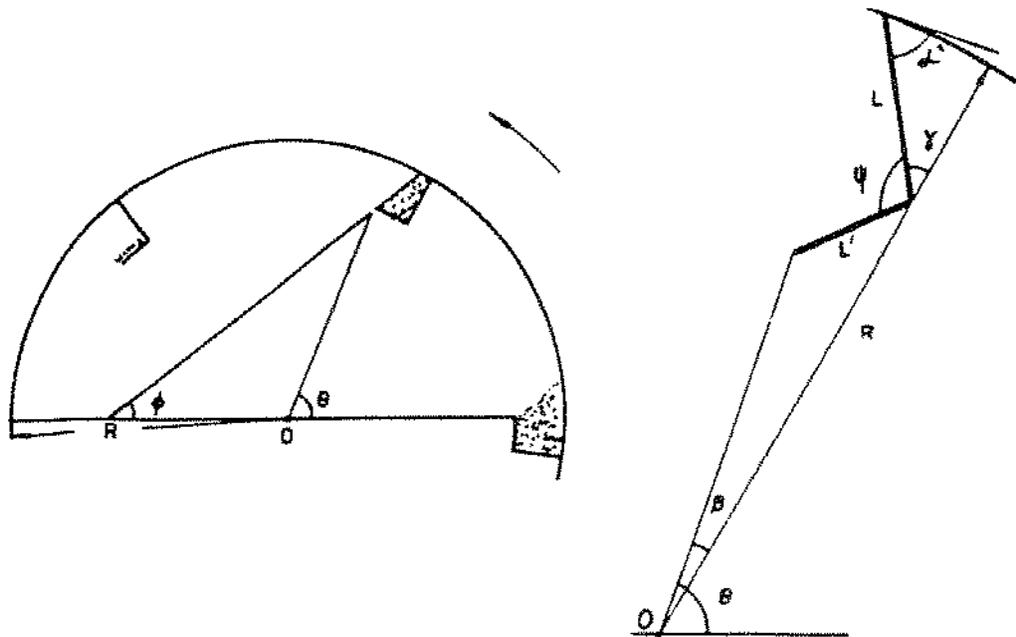


Figura 2.7. Parâmetros das aletas (BAKER, 1988).

cilindro quanto o coeficiente de fricção entre partículas tiveram efeitos relativamente pequenos sobre o perfil de distribuição do material.

A dinâmica ou movimento do material no secador deve-se à combinação dos efeitos cascata, deslizamento e rolagem das partículas. Do ponto de vista da transferência de calor e massa, quando o ar aquecido é o meio de transferência de calor, o efeito cascata é o mais importante, já que permite uma movimentação mais intensa do material em relação aos outros efeitos (KELLY, 1987). Em modelagens, consideram-se os tempos gastos pelas partículas durante o movimento da cascata e na fase densa, isto é, no fundo do cilindro e nas aletas (REAY, 1988).

Os secadores rotativos aplicam-se na indústria de cimento, fertilizantes, açúcar, milho, plásticos, concentrados minerais (KELLY, 1987; DOUGLAS et alii, 1992).

### C. Secadores com Película Agitada

Nos secadores rotatórios de película, empregados no processamento de materiais pastosos,

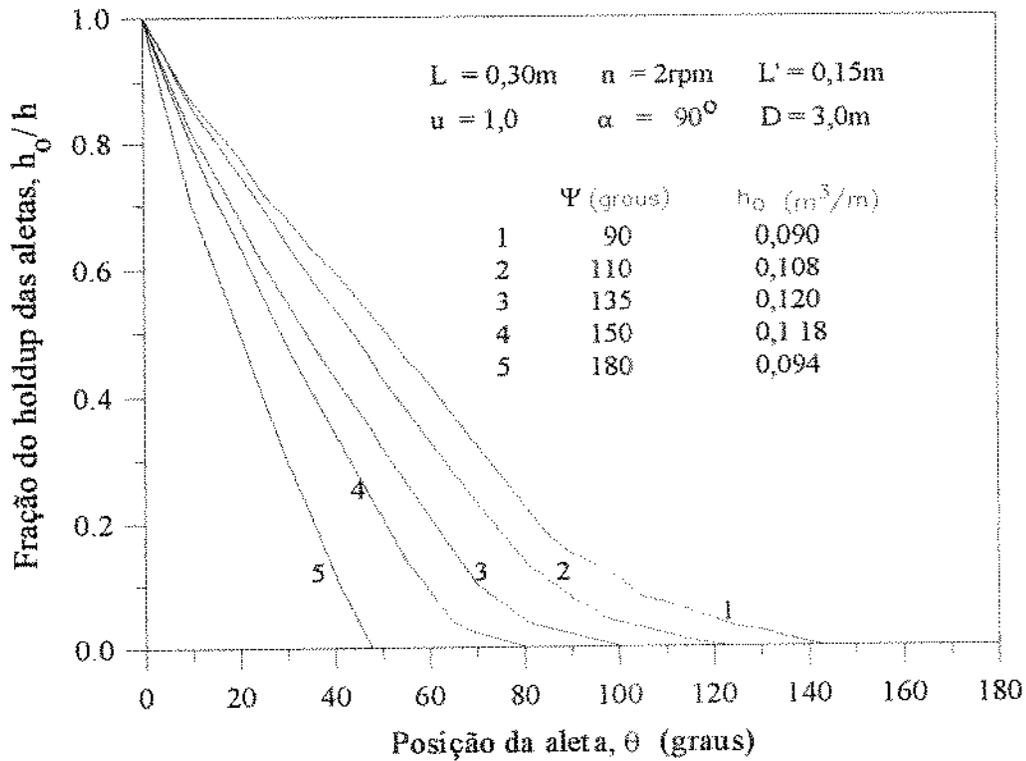


Figura 2.8. Relação entre *holdup* e posição da aleta para diversos valores do ângulo  $\Psi$  (BAKER,1988).

ocorre o desenvolvimento e a renovação da interface do material, seguindo-se a redução do tamanho das partículas produzidas. O período de secagem à taxa constante é prolongado e o processo de secagem é intensificado (STRUMILLO et alii, 1983). O material úmido alimentado é transformado mecanicamente em uma película fina e submetido a tratamento térmico via condução de calor. A película forma-se na superfície interna de um cilindro aquecido, dentro do qual há um rotor equipado com vários elementos. Esses elementos, além de distribuírem e transportarem o material ao longo do eixo do secador, moem o mesmo, evitando a formação de aglomerados no interior do equipamento. Usualmente, utilizam-se elementos de transporte e limpeza na parte inicial do secador, enquanto que na parte final empregam-se elementos de mistura e de moagem. Na Figura 2.9 são esquematizados três tipos de secadores de película com os respectivos componentes.

A velocidade de rotação destes secadores situa-se na faixa de 3,0 a 15,0rpm, com os equipamentos auxiliares (limpeza) entre 18,0 a 19,0rpm. A taxa de evaporação encontra-se por

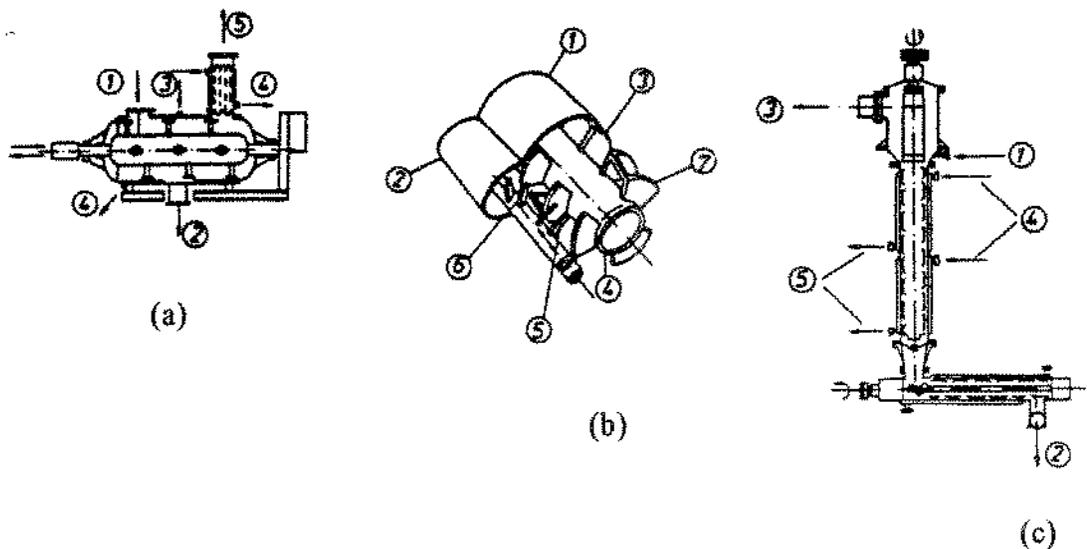


Figura 2.9. Secadores de película: (a) horizontal: 1-material, 2-produto; 3-vapor; 4-condensado; 5-umidade; (b) AP: 1-seção de secagem; 2-seção de lavagem; 3- discos; 4- seção de mistura; 5- facas; (c) combinado: 1- material; 2- produto; 3- umidade; 4- vapor; 5- condensado (MILLIOUD & ROUCH, 1973 e STOCKBURGER, 1976, citados por STRUMILLO, 1983).

volta de  $250,0\text{kg/m}^2\text{h}$ , sendo o consumo de energia mecânica muito baixo, aproximadamente igual a  $0,2\text{kW/kg}$  de umidade evaporada (STRUMILLO et alii, 1983). Nos sistemas combinados, em que o primeiro estágio (vertical) fornece o material pastoso que alimenta o segundo (horizontal), os fluxos de alimentação estão usualmente entre  $100$  e  $200\text{kg/m}^2\text{h}$ , cerca de 10 vezes superior ao verificado em secadores de tambor (*drum dryers*) (McCABE et alii, 1993).

A eficiência dos secadores de película é elevada, e há poucas perdas de material, pois pouco ou nenhum gás é utilizado na unidade. O custo do equipamento é relativamente alto, e a área disponível para troca de calor é limitada (McCABE et alii, 1993). Na Tabela 2.3 são apresentados dados de secagem para alguns materiais usados em secadores horizontais e verticais.

#### D. Turbo Secador (*Turbo Dryer*)

O *turbo dryer* consta de um cilindro horizontal fixo dentro do qual o material a ser seco

Tabela 2.3 Dados de secagem para secadores de película horizontais e verticais (STRUMILLO et alii, 1983).

produto	alimentação do material (kg/m <sup>2</sup> h)	umidade inicial e final (%)	produção do material (kg/h)	temperatura da parede (°C)
secador horizontal				
pigmento vermelho-água	20	15,0 a 0,3	-	180
polipropileno-heptano	125	5,0 a 0,4	-	115
água-tinta	50	30,0 a 0,1	-	180
sal orgânico-metanol	40	10,0 a 0,7	-	60
polímero-solvente orgânico	25	3,0 - 5,0 a 1,0	-	65
secador vertical				
hexametileno tetramina-água	150	75,0 a 0,7	40,0	180
hidróxido de níquel-água	40	70,0 a 5,0	12,0	140
benzoato de sódio-água-metanol	120	60,0 a 35,0	48,0	180
resina sintética-tolueno	70	50,0 a 3,0	35,0	200
pigmento-água	120	50,0 a 2,0	60,0	155
pigmento-cloro- benzeno	120 a 1160	80,0 a 9,0	120,0	180

é mecanicamente suspenso ao longo de um trajeto horizontal, submetendo-se a um fluxo de ar aquecido. A alimentação, concorrente com o ar aquecido, é realizada numa das extremidades do cilindro. A elevada turbulência do material úmido é obtida por um turbo agitador, que o mantém em centrifugação. Esta turbulência faz com que no *turbo dryer* ocorra a formação e renovação da película fina de material, verificado no secador de película. Vapor condensante percorre uma camisa coaxial, em volta do cilindro. Assim, o aquecimento se faz por convecção (ar aquecido) e por condução (vapor condensante). A separação das partículas sólidas obtidas é realizada num sistema ciclônico (VOMM TURBO TECNOLOGIA). Na Figura 2.10 tem-se uma instalação com o *turbo dryer*.

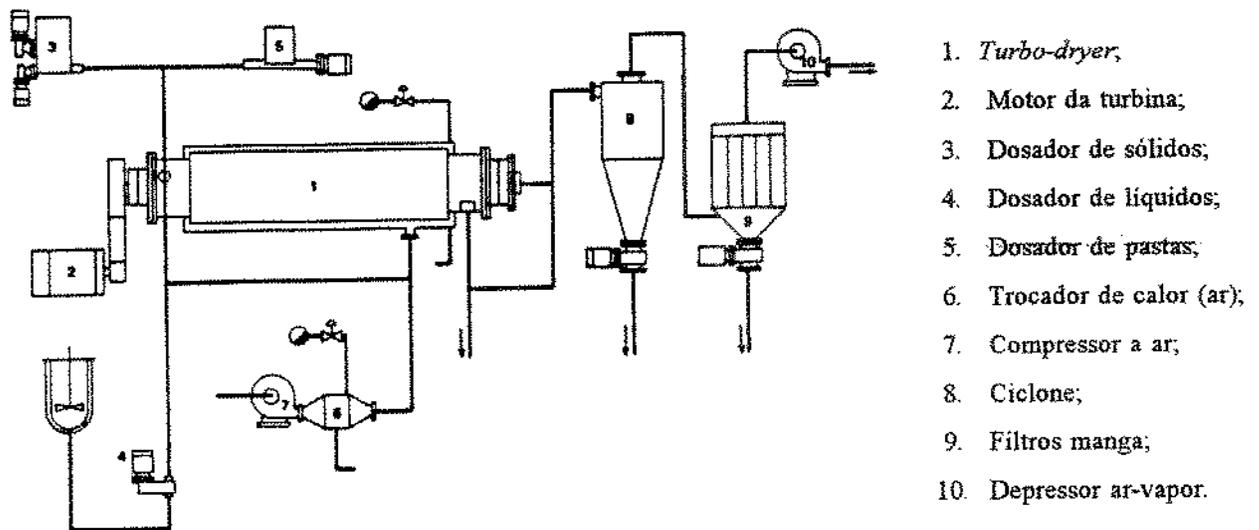


Figura 2.10 Instalação do *turbo dryer* (VOMM TURBO TECNOLOGIA).

O ar, ao contrário do que ocorre no secador com leito fluidizado, não tem a função de sustentação das partículas do material. Isto permite que a relação volumétrica ar-água evaporada seja pequena: 5 a 10. A energia gasta por massa de água evaporada encontra-se na faixa 3200 a 4200kJ/kg, com um rendimento de 60,0 a 65,0% (VOMM TURBO TECNOLOGIA).

O material úmido (alimentação) não precisa ser necessariamente fluido, o que é uma vantagem sobre o *spray dryer*. São processáveis materiais pastosos e massas viscosas não bombeáveis (VOMM TURBO TECNOLOGIA). No processamento de levedura termolisada foi verificado, em comparação ao processo convencional com secador de tambor, queda de aproximadamente 40% no consumo energético e aumento de aproximadamente seis vezes na capacidade de processamento. Além disso, tanto a mão-de-obra como a área para instalação requeridas foram reduzidas, substituindo-se uma rede de secadores de tambor por apenas um *turbo-dryer* de maior capacidade (RHEINBOLDT et alii, 1987; COPERSUCAR, 1996).

#### 2.4 Secadores com Operação via Contato-Sorção

Os sistemas contato-sorção fazem uso da transferência de calor condutiva, mais eficiente que a convectiva, justificando o uso de corpos inertes, como areia, bolas de aço, etc, que

contatam materiais úmidos. Quando se empregam corpos inertes higroscópicos, como sílica gel, bentonita, zeolita, chabazita ou materiais sintéticos de alta capacidade de sorção e resistência a choque mecânico, como alumina, juntam-se as vantagens da transferência de calor condutiva com a de massa por contato (KUDRA, 1992; RICHARD & RAGHAVAN, 1984; MROWIEC & CIESIELCZKY, 1977).

#### A. Secador de Contato com Partículas Inertes

O equipamento consta de duas câmaras cônicas coaxiais e horizontais, sendo que na interna são dispostas aletas, que revolvem os corpos inertes aquecidos no seu deslocamento longitudinal, de uma extremidade para a outra da câmara, como indicado na Figura 2.11. O material úmido é alimentado pelo espaço anelar entre as duas câmaras e escoam em contracorrente ao movimento dos inertes. Durante o percurso longitudinal, os inertes são aquecidos por gases e descarregados da extremidade da câmara, no espaço anelar. Os inertes, com calor sensível, misturam-se com o material no seu trajeto longitudinal, evaporando-lhe a umidade. O produto seco separa-se dos inertes por um sistema de peneiras posicionado na extremidade das câmaras; os inertes são realimentados no sistema (KUDRA, 1992).

O secador é termicamente eficiente e compacto: comprimento 12,0m; diâmetro 0,8m e velocidade angular 15,0 a 25,0rpm. Opera continuamente, secando materiais particulados, como

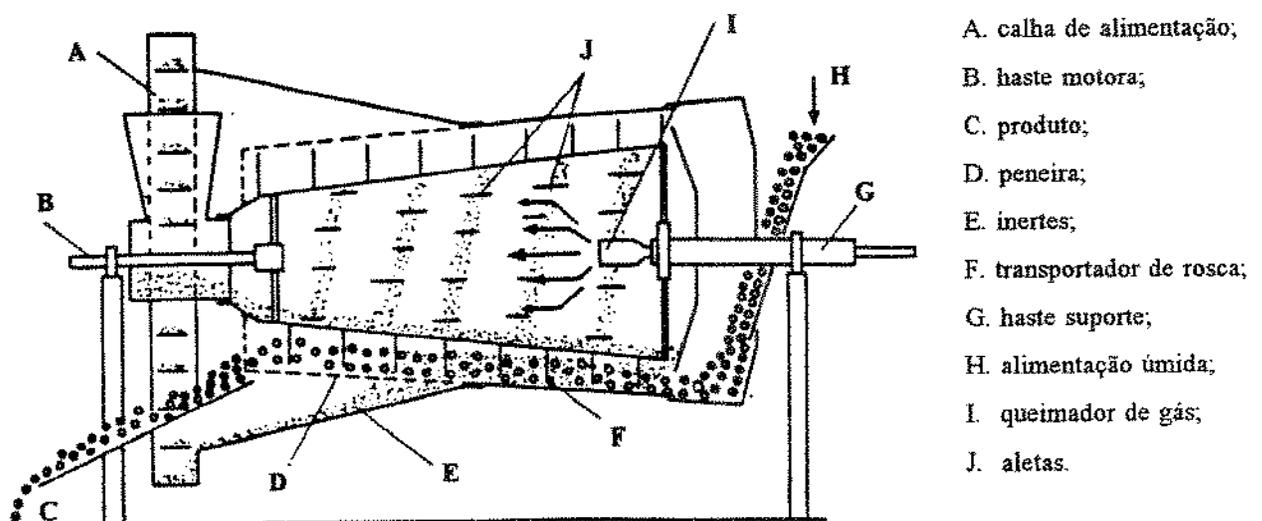


Figura 2.11 Secador de contato com inertes (KUDRA, 1992).

milho, utilizando areia como inertes, que entram pela seção de aquecimento a 100°C e pela seção de secagem na faixa de 200 a 300°C (PANNU & RAGHAVAN, 1987, citado por KUDRA, 1992).

### B. Leito Fluidizado Ativo

O leito ativo é composto de partículas altamente higroscópicas que transferem umidade indiretamente do material úmido alimentado para o ar fluidizante, que não se constitui em ar de secagem, já que o aquecimento do leito é realizado indiretamente por meio de trocadores de calor internos, a vapor ou elétricos, como esquematizado na Figura 2.12. O material úmido, em forma de placas, como couro, tecidos, etc, é imerso no leito ativo e a fluidização intensifica as transferências de calor e massa convectivas e de contato (material-sorvente, sorvente-sorvente e trocador de calor-sorvente) (KUDRA, 1992).

Para o caso específico do processamento de couro, a operação de secagem com o emprego do leito fluidizado ativo, comparada à operação com leito convectivo convencional, teve seu tempo de duração diminuído de 7h para 15 a 20min, redução de 30,0% no consumo de vapor e queda de 1/3 no custo de investimento (TECHNICAL INFORMATION, citada por KUDRA, 1992).

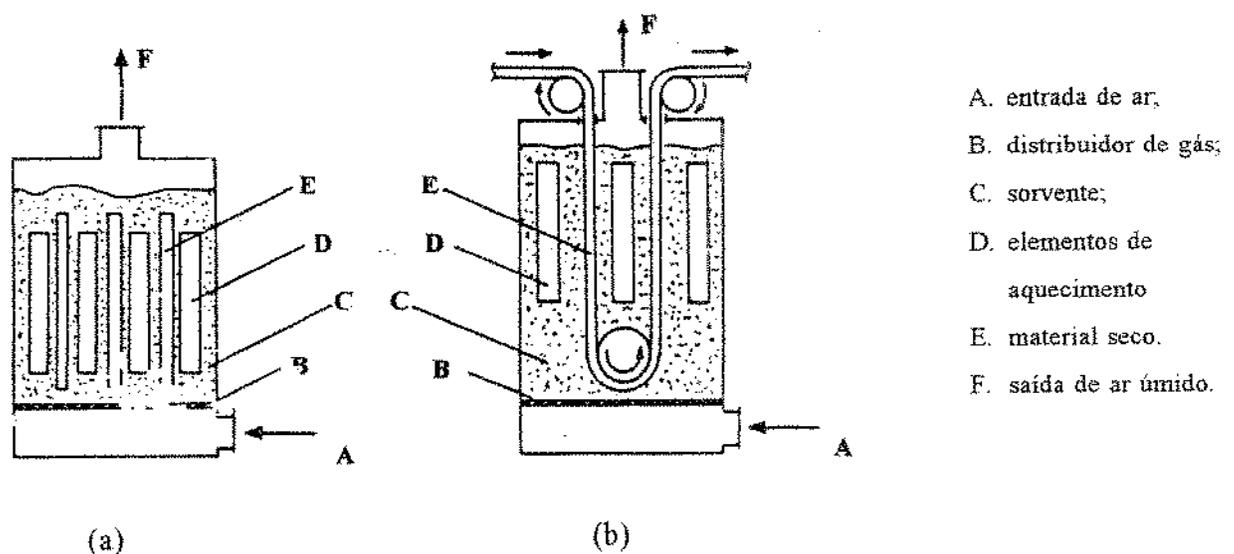


Figura 2.12. Secadores com leito fluidizado ativo: (a) processo em batelada; (b) processo contínuo (KUDRA, 1992).

### C. *Spray Dryer* com Sorção por Contato

O equipamento, mostrado na Figura 2.13, é um *spray dryer* convencional. A alimentação, normalmente produtos biológicos termosensíveis (antibióticos, enzimas, leveduras, aminoácidos), é feita juntamente com um sólido sorvente (serragem, carvão ativo, palha) (KUDRA, 1992).

O sólido sorvente, além de atuar como veículo de transporte do material, auxiliando a secagem, pode ser parte integrante do produto final. É o caso de alguns materiais, como farinha de trigo, amido, leite desnatado, caseína, flocos de milho, utilizados na secagem de produtos biológicos na indústria de alimentos, de fermentação e farmacêutica (TUTOVA & KUTS, 1987, citado por KUDRA, 1992).

Na secagem de células vivas para antibióticos, o uso de sorvente ativo resulta na queda da temperatura do material durante o processo, preservando-se de 98 a 100% da atividade biológica no estado líquido (TUTOVA & KUTS, 1987, citado por KUDRA, 1992).

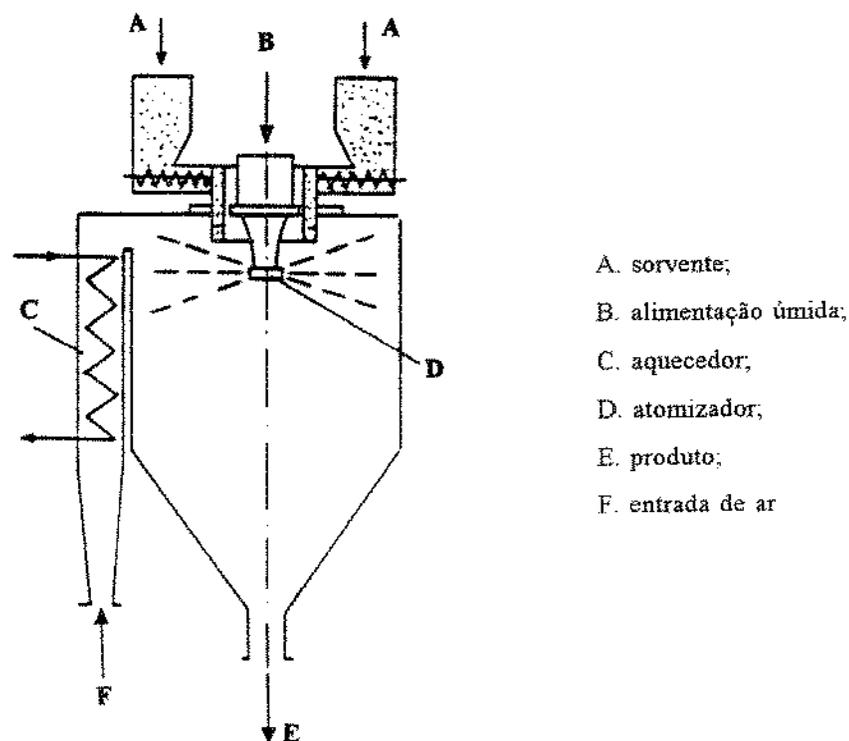


Figura 2.13 *Spray dryer* com sorção por contato (NAUKA & TEKHNIKA, 1990, citado por KUDRA, 1992).

## 3. SECAGEM COM CORPOS INERTES

Na secagem com corpos inertes, o material úmido é alimentado sobre os inertes, cobrindo-lhes a superfície com uma fina camada. Os inertes devem ter resistência térmica e mecânica, sendo a última de grande importância para evitar a contaminação do produto final (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

A evaporação da umidade implica a mudança das propriedades físicas do material, que passa do estado plastoelástico para o elástico quebradiço. O grande número de colisões entre os corpos e entre eles e as paredes do secador causa atrito no leito, resultando no desprendimento do material, em forma de pó (STRUMILLO et alii, 1983).

A operação em regime permanente ocorre quando a taxa de recobrimento dos inertes iguala-se à taxa de remoção do filme de material formado sobre a superfície deles (BARRETT & FANE, 1988).

Nos secadores com leito de inertes, o atrito e a secagem constituem o mecanismo do processo global. Quando a influência relativa do atrito é menor que a da secagem, isto é, a taxa de evaporação da umidade não é o fator de controle do processo, o leito de material úmido pode ser bloqueado, como no caso dos secadores de leito fluidizado (STRUMILLO et alii, 1983).

A renovação contínua do material que cobre os inertes requer que ele seja seco a um nível tal que se torne friável (BARRETT & FANE, 1988). A quantificação do processo como um todo, incluindo a secagem e o atrito, para um secador com leito fluidizado, foi sugerida através da Equação adimensional [2.1] (REGER et alii, 1967, citado por STRUMILLO et alii, 1983).

$$Nu_u = (-0,062 \cdot k_e + 0,17) \cdot Ar^{-0,438} \cdot Re^2 \cdot Gu^{0,61} \cdot \frac{d_p}{H_o} \quad [2.1]$$

$$(0,5 < Nu < 9,8; 0,62 < k_e < 2,22; 10^6 < Ar < 5 \cdot 10^6; 879 < Re < 1820; 0,1755 < Gu < 0)$$

onde:  $k_e$  : coeficiente de utilização de energia = (calor para evaporação da umidade)/(calor total consumido)

$$Ar : \text{número de Arquimedes } (Ar) = (d_p^3 \cdot g / v^2) \cdot (\rho_p - \rho_a) / \rho_a;$$

$R_e$  : número de Reynolds ( $R_e$ ) =  $u_s \cdot d_p / \nu$ ;

$G_u$  : número de Gukhman ( $G_u$ ) =  $(T_{bs} - T_{bu}) / T_{bs}$ .

$H_o$  : altura estática do leito;

$d_p$  : diâmetro da partícula.

No processamento de areia e bolas de ferro em secador rotativo (LANGRISH et alii, 1988) verificou-se que, para  $Re < 50$ , o número de Nusselt obtido concorda razoavelmente bem com o fornecido pela Equação [2.2] para leito fluidizado (KUNII & LEVENSPIEL, 1977). A canalização de gás que flui através das cascatas leva a baixos números de Nusselt, de modo similar ao *bypassing* das partículas na fase de bolha nos leitos fluidizados.

$$N_u = 0,03 \cdot R_e^{1/3} \quad [2.2]$$

Para números de Reynolds elevados as cortinas de partículas oferecem pequena resistência ao escoamento do ar de secagem, sendo o *bypassing* insignificante. As partículas se comportam como se estivessem isoladas, tornando-se razoável a aplicação da Equação [2.3] (RANZ & MARSHALL, 1962) para esferas isoladas suspensas em um gás (LANGRISH et alii, 1988; ALVAREZ & SHENE, 1994).

$$N_u = 2,0 + 0,6 \cdot R_e^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad [2.3]$$

Determinou-se um conteúdo crítico de umidade, representando a passagem do estado elastoplástico para o elástico quebradiço (GELPERIN & KOSTICYN, 1975, citado por STRUMILLO et alii, 1983). Para a maioria dos materiais estes valores encontram-se na faixa de 17,0 a 37,7%. Valores elevados significam facilidade de secagem, com condições hidrodinâmicas estáveis e altos valores de taxa de evaporação.

Para leito de jorro com inertes foi proposta a Equação [2.4] para cálculo da umidade do produto final (CSUKÁS et alii, 1976, citado por STRUMILLO et alii, 1983).

$$X_2 = X_1 \cdot \left[ 1 - \frac{(1 - e^{-\eta})}{\eta} \right]; \quad \eta = \frac{d_p \cdot \rho' \cdot X_1 \cdot \Delta h_v \cdot m_1'}{6 \cdot h \cdot (T_{2a} - T_{2m}) \cdot m_2' \cdot (1 + X_1)} \quad [2.4]$$

O parâmetro que mais influencia a umidade final do produto é a temperatura de saída do agente de secagem, não havendo efeito prático significativo da temperatura de entrada, da taxa de escoamento do ar de secagem e da massa de inertes no secador (MINCHEV et alii, 1969a,1969b e STRUMILLO et alii, 1977, citados por STRUMILLO et alii, 1983).

O tempo de secagem foi relacionado com a temperatura de saída do ar de secagem, em leito de jorro com inertes, em regime de batelada (Figura 2.14) (SCHNEIDER & BRIDGWATER, 1988). Os autores verificaram a predominância da operação à taxa de secagem constante. A temperatura do ar, após a alimentação, cai até a temperatura de saturação adiabática, e aí permanece durante quase todo o tempo de secagem, elevando-se repentinamente quando o leito torna-se seco. Os autores constataram que a realimentação de material úmido, antes da remoção do produto seco da batelada anterior, levava à desestabilização e ao rompimento do regime de jorro.

Na operação em regime permanente também ocorre aglomeração do leito, quando a taxa

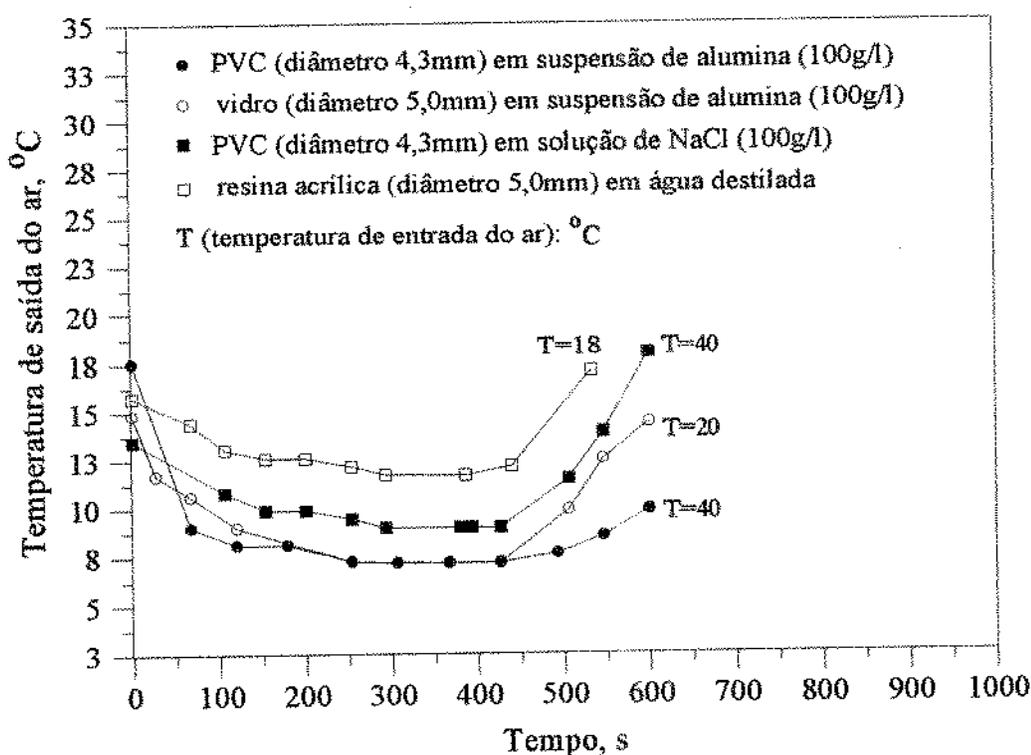


Figura 2.14. Temperatura de saída do ar de secagem em operação em regime de batelada para diversos tipos de inertes e materiais úmidos, em leito de jorro (SCHNEIDER & BRIDGWATER, 1988).

de alimentação do material excede determinado valor (STRUMILLO & KUDRA, 1986). A operação estável pode ser conseguida se a taxa de alimentação for menor ou igual à taxa de remoção do filme seco sobre os inertes (MARKOWSKI, 1992). No processamento de leite desnatado (10,0% de sólidos) em leito de jorro, verificou-se acúmulo de material em função do tempo de secagem para diversas taxas de alimentação, como mostrado na Figura 2.15 (BARRETT & FANE, 1988). O aumento da taxa de alimentação indicou a ocorrência do recobrimento dos inertes antes mesmo da remoção do filme de material seco, impossibilitando o estabelecimento do regime permanente. Os autores constataram que o aumento da taxa mássica do ar de secagem diminui o acúmulo de material por incrementar a transferência de calor e a energia de colisão dos inertes. Entretanto, 50,0% de aumento nesta taxa não foi suficiente para estabelecer a operação em regime permanente, como indicado na Figura 2.16. A utilização de placa defletora para aumentar a energia de colisão no leito permitiu que se atingisse o regime permanente, indicando que a taxa de remoção do filme, e não a taxa de secagem, é o fator de controle do processo.

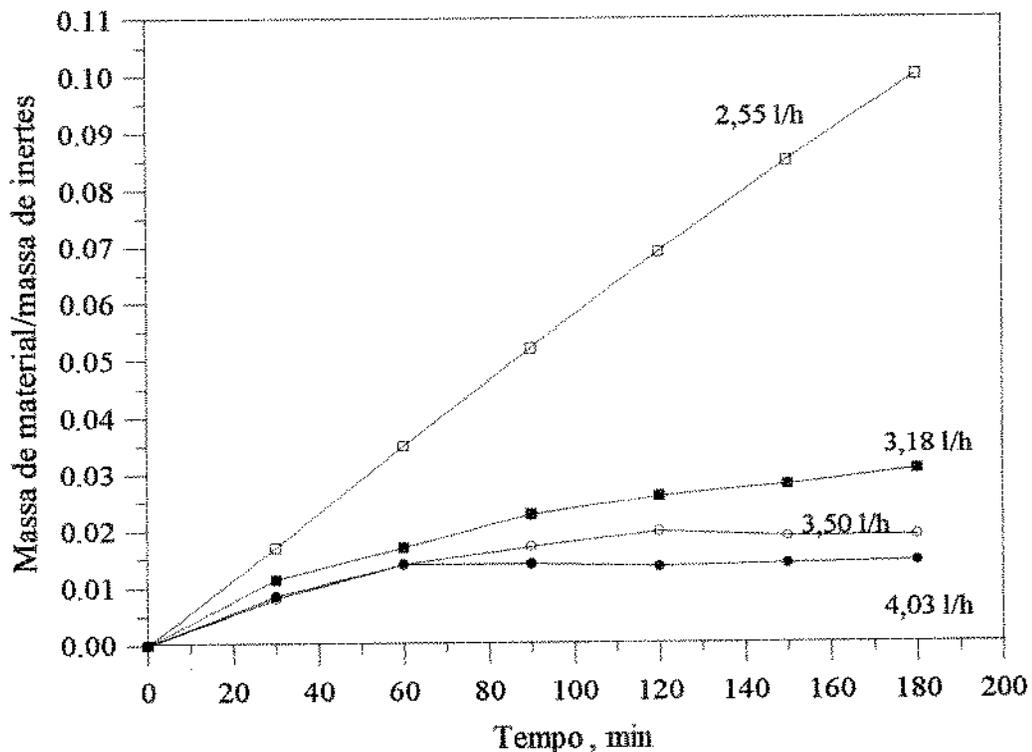


Figura 2.15. Efeito do aumento da taxa de alimentação sobre o acúmulo de leite sólido no leito de inertes, em leito de jorro (ar a 100°C e a 5,9 a 6,2kg/min; altura do leito de 0,33m) (BARRETT & FANE, 1988).

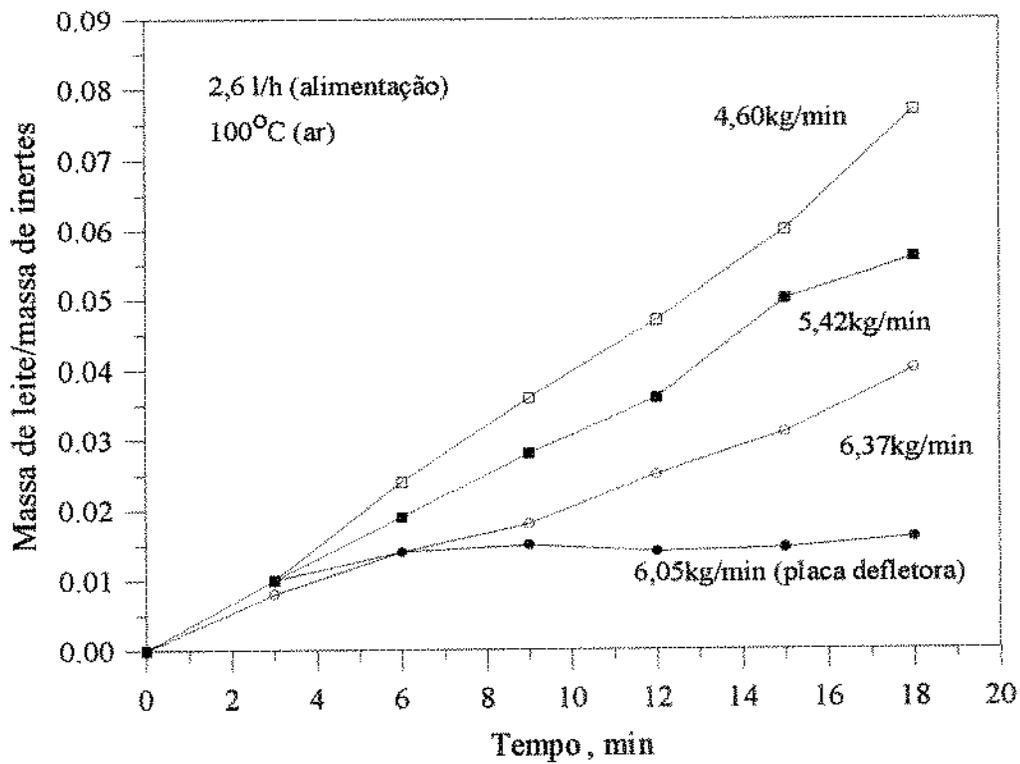


Figura 2.16. Leito de jorro com altura de 0,33m. Efeito da taxa de escoamento do ar sobre o acúmulo de sólidos nos inertes. (BARRET & FANE, 1988).

A Figura 2.17 mostra que a taxa do material da superfície dos inertes varia significativamente para diferentes tipos de pastas, indicando que o material determina a friabilidade intrínseca do filme.

Na secagem com corpos inertes, o local da alimentação do material pastoso está intimamente atrelado aos mecanismos de transferência de calor e massa. No leito de jorro, por exemplo, a alimentação realizada na base do leito permite que o material pastoso contate tanto o ar, à sua mais alta temperatura, quanto os inertes aquecidos após seu escoamento anular, verificando-se a transferência de calor condutiva-convectiva combinadas (MARKOWSKI, 1992).

#### 4. CONSIDERAÇÕES SOBRE MOAGEM

A abordagem que segue justifica-se pelo fato do mecanismo do processo global na operação do secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) incluir, ao lado da secagem, a operação de moagem, através de corpos inertes presentes no interior do equipamento.

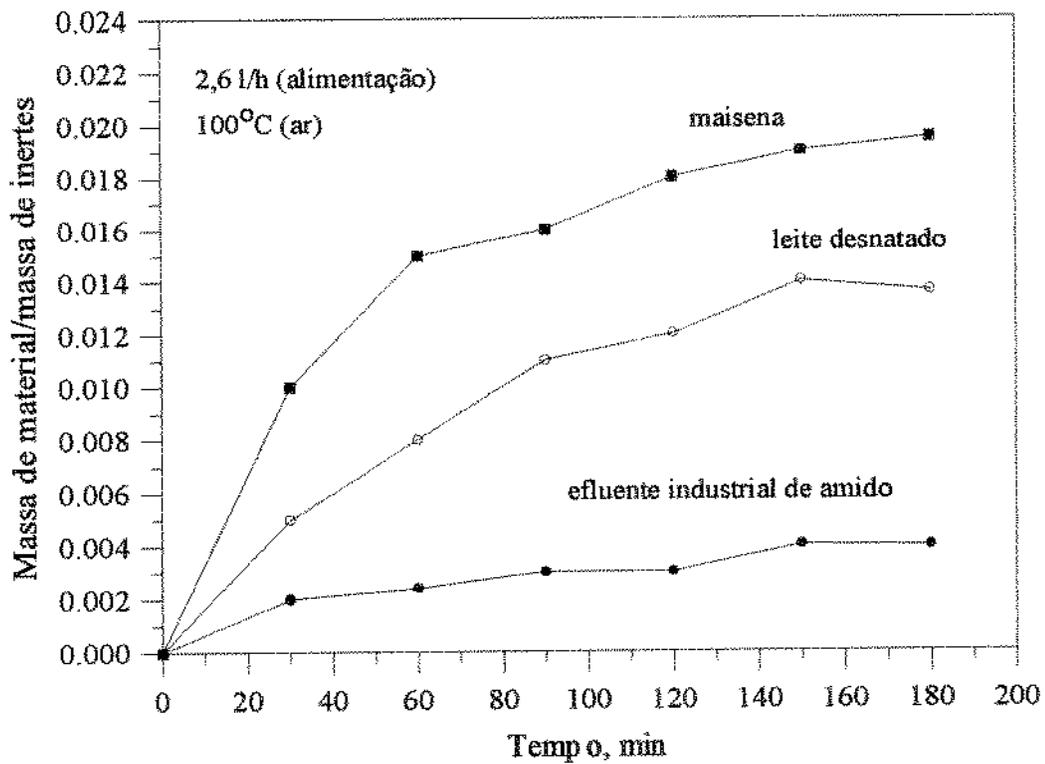


Figura 2.17. Leito de jorro com altura de 0,33m. Efeito do tipo de material alimentado sobre o acúmulo de sólidos nos inertes (BARRET & FANE, 1988).

Os sistemas de moagem comumente utilizam-se de quatro modos de redução dos tamanhos das partículas sólidas: compressão, impacto, atrito ou corte (McCABE et alii, 1993).

Dos equipamentos de moagem existentes, o moinho de bolas (Figura 2.18) é o que mais corresponde, operacionalmente, à etapa de moagem no SRRI.

Nos moinhos de bolas o comprimento e o diâmetro da carcaça estão na razão 1:1 a 1:6, e são ocupados por esferas de aço ou cerâmica resistentes ao desgaste. As esferas de maior diâmetro produzem partículas maiores que as de diâmetro menor (HIXON et alii, 1990).

A carcaça do moinho, ocupada em cerca de metade de seu volume pelo leito de bolas (25 a 125mm de diâmetro), gira vagarosamente (na faixa de 16 a 35rpm) em torno do seu eixo horizontal. Com o moinho em rotação, a força centrífuga mantém o contato bolas-bolas e bolas-parede, ao longo do movimento ascendente do leito. Durante esta etapa, ocorre uma ação de moagem por atrito, via rolagem e raspagem provocadas pelas bolas. Entretanto, a moagem mais

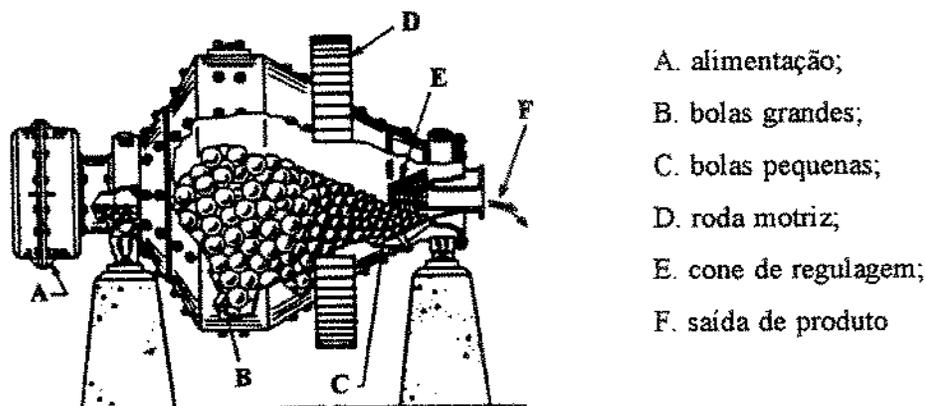


Figura 2.18. Moinho de bolas tipo cônico (McCABE et alii, 1985)

intensa é verificada na zona de impacto, onde as bolas, em queda livre, atingem a parte inferior do moinho (McCABE et alii, 1993; PERRY & GREEN, 1984).

A velocidade do moinho é limitada por um valor - velocidade crítica - em que praticamente não se verifica moagem. As bolas se mantêm junto à parede do equipamento durante sua rotação, impossibilitando-se-lhes o movimento de queda livre. Entretanto, a capacidade de moagem é diretamente proporcional à velocidade, já que ela determina a altura a que as bolas são levadas antes da queda. A perda do contato das bolas periféricas com a parede do moinho depende do balanço entre as forças da gravidade,  $m_b \cdot g/g_c$ , e centrífuga,  $m_b \cdot (R-r) \cdot \omega^2/g_c$  (Figura 2.19), onde:  $m_b$  é a massa da bola;  $r$  e  $R$  são os raios do moinho e da bola;  $\omega = 2\pi \cdot n$ , sendo  $n$  a velocidade (rpm). O componente centrípeta da força da gravidade,  $(m_b \cdot g/g_c) \cdot \cos \alpha$ , oposto à força centrífuga, cresce à medida que o ângulo  $\alpha$  diminui e, a menos que a velocidade crítica,  $n_c$ , seja excedida, atinge-se um ponto em que as forças se igualam e a bola cai. O ângulo representativo dessa condição obtém-se igualando-se as forças centrífuga e centrípeta, dado pela Equação [2.3]. A velocidade crítica, obtida da Equação [2.3], com  $\alpha=0$ , é dada pela Equação [2.4].

Moinhos operam com velocidades em torno de 60 a 80% da crítica, com os menores valores na moagem de materiais úmidos em suspensões viscosas (PERRY & GREEN, 1984).

$$\cos(\alpha) = \frac{4\pi^2 \cdot n^2 \cdot (R - r)}{g} \quad [2.3]$$

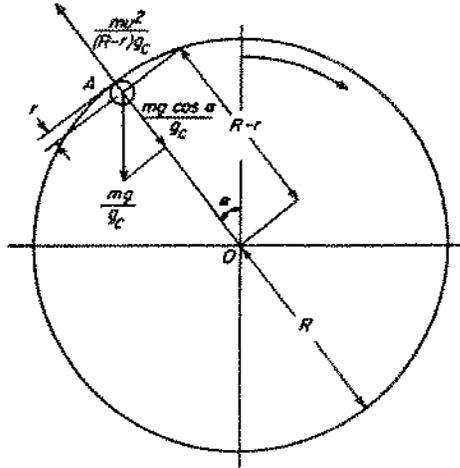


Figura 2.19. Forças agindo sobre uma bola em um moinho de bolas (McCABE et alii, 1985).

$$n_c = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \frac{g}{(R - r)} \right]^{0,5} \quad [2.4]$$

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SECADOR ROTATÓRIO COM RECHEIO DE INERTES

O secador rotatório com recheio de inertes (SRRI) consta de um cilindro horizontal em cujo interior dispõem-se aletas longitudinais, chicanas transversais e esferas de material inerte. As aletas e as chicanas formam um corpo único, que é fixado ao cilindro; as esferas constituem um leito de inertes, que ocupa parte do volume do cilindro. A alimentação é realizada de modo concorrente com o ar de secagem, através da extremidade do secador ou por janelas dispostas na superfície lateral do cilindro. A rotação do cilindro, juntamente com a ação das aletas, provoca o revolvimento dos inertes, que têm as superfícies cobertas com fina película do material pastoso alimentado, que, assim, fica exposto ao ar de secagem. Na outra extremidade do cilindro, o material desidratado, moído ao longo do comprimento do secador, é separado do ar de secagem por um ciclone. Em cada uma das extremidades do cilindro há uma placa metálica perfurada para manter os corpos inertes dentro do equipamento e permitir o escoamento do ar de secagem e do material seco em forma de pó.

O equipamento, portanto, é um secador giratório que faz uso dos efeitos *cascata* e *rolagem* presentes nos secadores rotativos, aproveitando o calor convectivo do ar de secagem (BAKER, 1988). Adicionalmente, utiliza-se do princípio da secagem via contato (KUDRA, 1992), à medida que os corpos inertes, aquecidos pelo ar de secagem, transferem calor condutivo ao material pastoso que os reveste, como ocorre na secagem em leito de jorro diluído (*jet-spouted bed*) (MARKOWSKI, 1992).

O desenvolvimento e a renovação da interface gás-sólido, característica dos secadores de película (STRUMILLO et alii, 1983), também ocorre no SRRI: seco o material que reveste os inertes, a camada endurecida de revestimento é destruída e, em consequência, a superfície dos inertes, reaquecida, é exposta, novamente, ao material úmido alimentado. Esta renovação está atrelada à moagem do material, devido não só ao atrito provocado pela rolagem inerte-inerte e inerte-superfície interior do cilindro, mas também à ação de impacto dos inertes, em consequência do efeito cascata das partículas, como ocorre nos moinhos de bola (McCABE et alii, 1993). A operação de moagem, combinando atrito e impacto (inerte-inerte, inerte-aleta,

inerte-chicana e inerte-parede), elimina os inconvenientes da aderência e aglomeração tão comuns nos secadores de materiais pastosos (STRUMILLO et alii, 1983).

A operação mista do SRRI, englobando a secagem por contato e por convecção e a moagem, torna o mecanismo do processo consistindo de duas fases: cinética do processo de secagem e cinética de moagem (atrito e impacto), o que é comum a todos os tipos de secadores com corpos inertes. Entretanto, a grande influência do componente impacto constitui peculiaridade do SRRI.

Uma outra especificidade do SRRI é o fato do ar de secagem não ter a função de movimentar o leito de inertes, o que é realizado pelo cilindro aletado em rotação. Isso confere ao ar aquecido as funções exclusivas de secagem do material pastoso e de arraste do material em pó produzido. O resultado final é economia energética, pois a energia para aquecimento do ar é a parcela mais importante do balanço energético de um processo de secagem (KEEY, 1978).

## 2. SECADOR EXPERIMENTAL

Nos experimentos foram empregados dois tipos de secadores rotatórios com recheio de inertes: a versão inicial, que foi utilizada em trabalhos anteriores, já publicados, relacionados na introdução; o secador definitivo, desenvolvido durante a presente pesquisa e utilizado nos ensaios de secagem analisados neste trabalho. Estudos da dinâmica do leito de inertes conduzidos com o secador inicial, abordados no Capítulo IV, mostraram a necessidade de substanciais modificações para aprimorar o movimento dos inertes, o que levou à construção do definitivo.

### 2.1 Secador Inicial

O primeiro secador rotatório com recheio de inertes com o qual se trabalhou está esquematizado na Figura 3.1. Na Figura 3.2 são apresentadas duas fotografias do mesmo.

Seguem-se as especificações dos seus componentes:

- cilindro de secagem: diâmetros de 0,254m e 0,248m; comprimento de 0,65m; material: aço inoxidável 304;

- engrenagem do cilindro (coroa): diâmetro de 0,34m;
- aletas longitudinais: contínuas e ocupando toda a extensão do cilindro; comprimento 0.1m (L); espessura 0.0032m; tipo reta; ângulo haste-tangente ( $\alpha'$ ): 60°; quantidade: 4; material: aço 304;

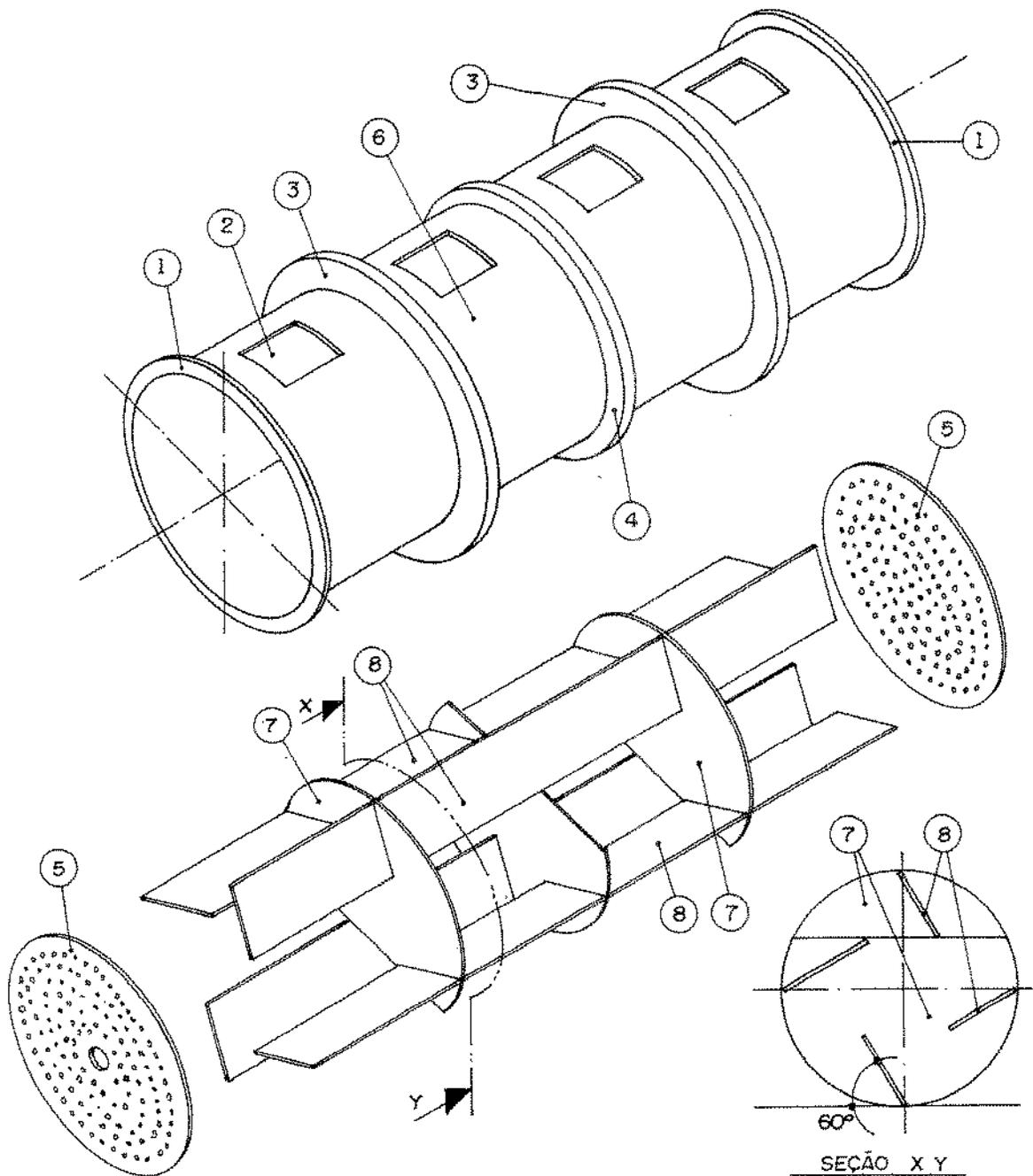


Figura 3.1. Secador rotatório com recheio de inertes (inicial): 1-flanges de acoplamento; 2-janelas de inspeção e acesso; 3-anéis de sustentação; 4-engrenagem; 5-placas perfuradas; 6-cilindro de secagem; 7-chicanas; 8-aletas.

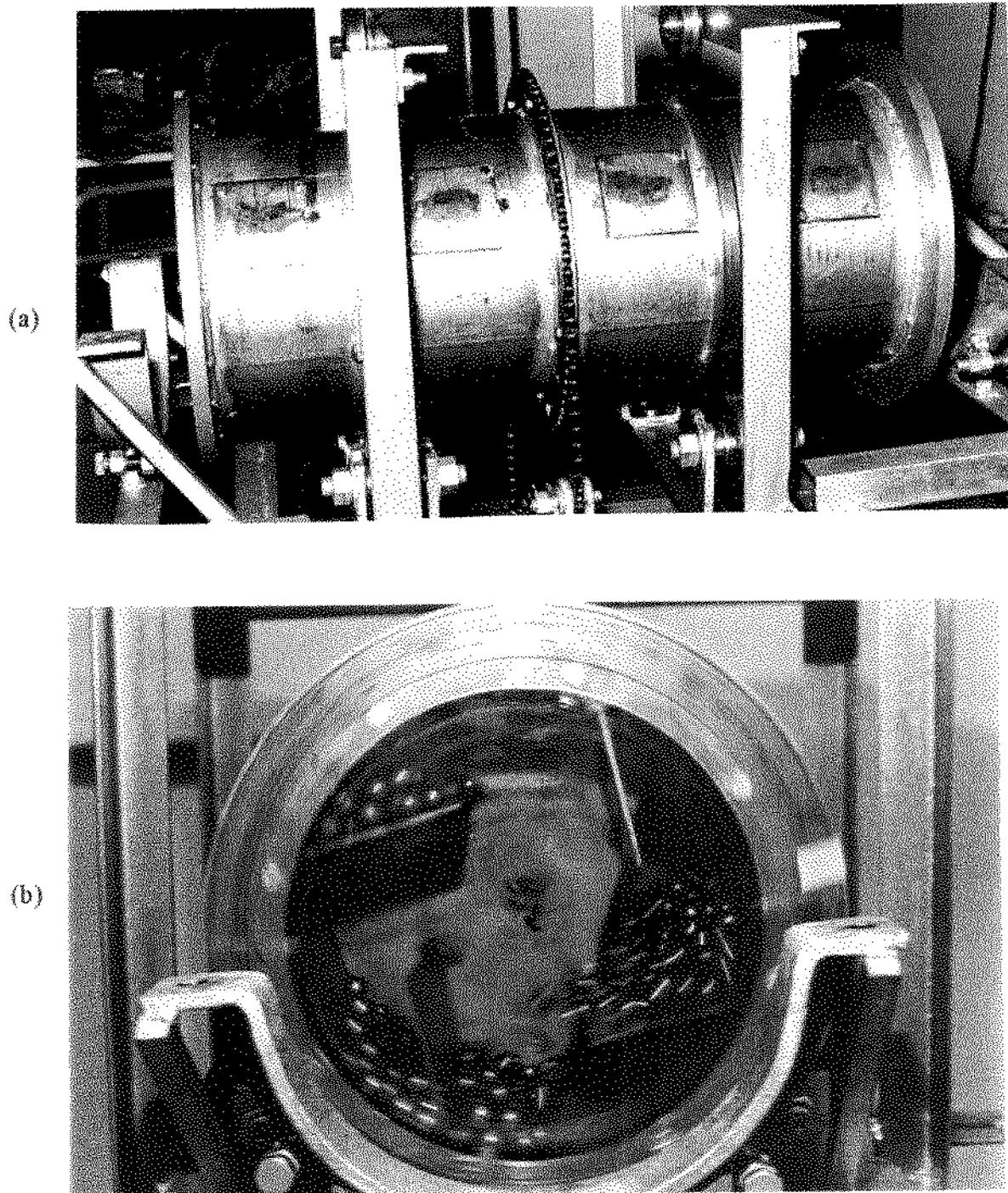


FIGURA 3.2. Vistas do secador rotatório com recheio de inertes: (a) cilindro de secagem; (b) conjunto aletas-chicanas.

- chicanas transversais: igualmente espaçadas com corte alternado; espessura de 0,0032m; corte de 30%, relativo ao diâmetro; quantidade: 3; material: aço inoxidável 304;
- placas perfuradas: diâmetro de 0,254m; espessura de 0,003m; furos de diâmetro 0,0065m e

- espaçamento de 0,002m; quantidade: 2; material: aço inoxidável 304;
- câmaras de secagem: cada quarta parte do cilindro, sendo duas compreendidas entre duas chicanas e duas entre uma chicana e uma placa perfurada;
  - janelas de inspeção: em número de quatro, com dimensões 0,045 x 0,045m;
  - leito de inertes: esferas metálicas (aço AISI 5200) de 0,0193m de diâmetro de Sauter (Álvares, 1990);  $\rho = 7869,0\text{kg/m}^3$  ( $\rho = 425,13\text{kg/m}^3$ ),  $k = 13,8\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ; carga (massa total) igual a 50,74kg, correspondendo a  $z=0,1016\text{m}$  (distância entre a base do cilindro e o nível do leito).

A placa perfurada, fixada na extremidade do cilindro voltada para a entrada do ar de secagem, apresenta um orifício central de 0,011m de diâmetro. Um tronco de cone (altura de 0,03m; diâmetros de 0,05m e 0,011m) é soldado concentricamente à placa, de modo a permitir que o duto de recalque da bomba de alimentação do material úmido adentre a câmara de secagem em 0,03m da espessura do tronco. A peça cônica protege o duto de alimentação da ação de impacto dos corpos inertes que compõe o leito de secagem, quando da operação do secador. Nos trabalhos anteriores, listados na introdução, não se fez uso deste sistema, pois a alimentação das pastas era realizada em bateladas, pelas janelas da superfície do cilindro de secagem (ÁLVARES, 1990).

As chicanas são soldadas nas aletas, formando-se um conjunto único, que é fixado internamente ao cilindro por parafusos distribuídos pela superfície lateral do mesmo (Figura 3.2b). As placas perfuradas (Figura 3.3a) são presas também por meio de parafusos nos flanges soldados na superfície lateral do cilindro, nas suas extremidades (Figura 3.3b). Estes flanges alojam anéis de plástico (Figura 3.3b), que permitem o acoplamento da parte móvel (SRRI) com as partes fixas da instalação de secagem e o movimento de rotação do cilindro, dificultando a ocorrência de vazamentos. Esses anéis são de Teflon® (politetrafluoretileno) e têm as dimensões: espessura 0,01m; diâmetros 0,335 e 0,290m.

O SRRI é mantido na posição horizontal, sobre uma bancada de sustentação, por meio de anéis metálicos soldados à superfície lateral do cilindro. Estes anéis apóiam-se, individualmente, em dois rolamentos presos à bancada, de forma a sustentar o cilindro sem lhe impedir o movimento de rotação (Figura 3.3b).

Uma coroa (engrenagem do cilindro) está soldada entre os dois anéis de sustentação para

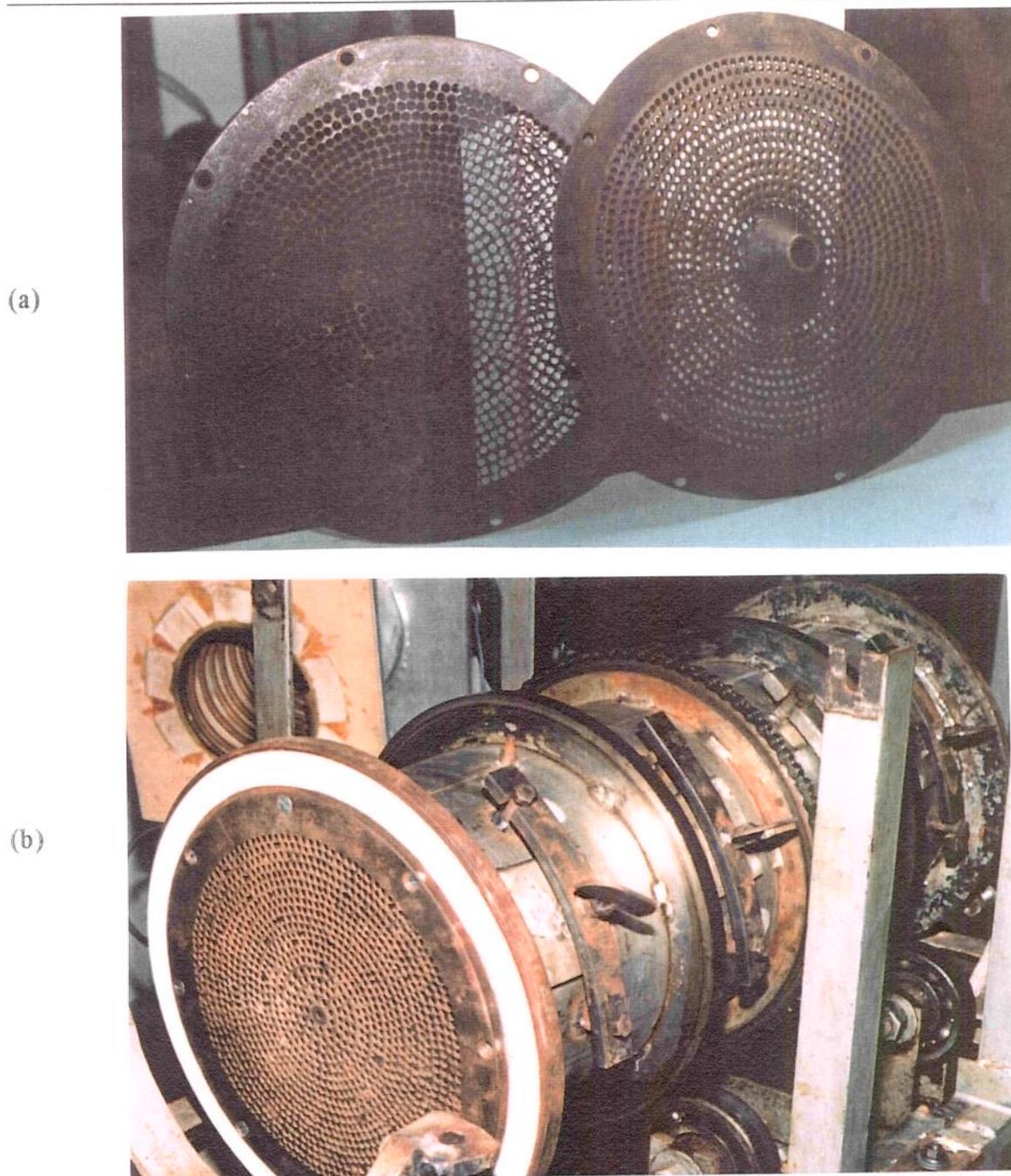


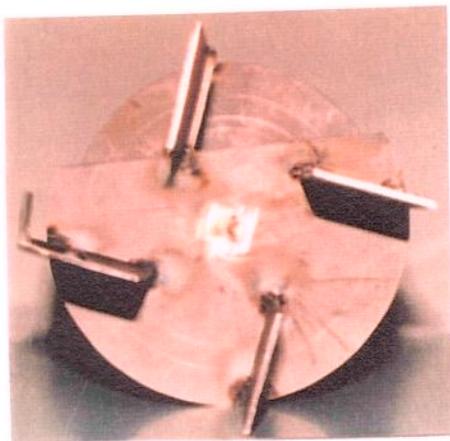
Figura 3.3. Vistas das placas perfuradas (a) e do flange de alojamento com anel de junção (b).

o acoplamento do sistema motor, que promoverá a rotação do SRRI (Figura 3.3a).

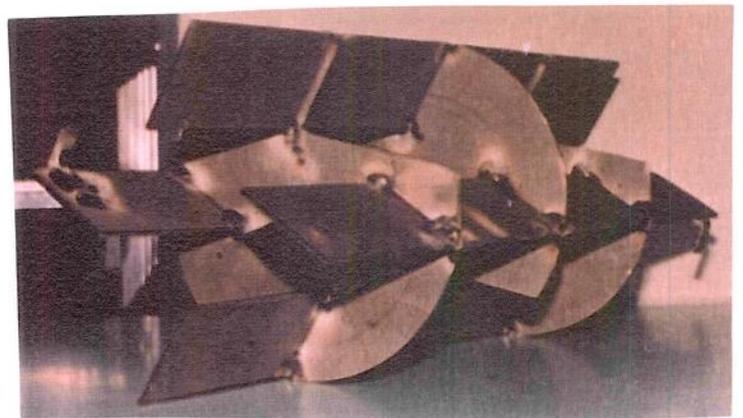
Na superfície lateral externa do cilindro há quatro janelas (0,045m x 0,045m) distribuídas longitudinalmente (Figura 3.2a e 3.3b). Além de serem um meio alternativo de alimentação (batelada) do material pastoso, permitem a coleta do material desidratado ao longo do comprimento do secador.

## 2.2 Secador Definitivo

O SRRI definitivo é uma adaptação do inicial com modificações no seu corpo interno, resultando o conjunto mostrado na Figura 3.4. O corpo interno foi fixado ao cilindro apenas por dois parafusos, um em cada uma das extremidades de aletas alternadas, diminuindo o número de furos na superfície lateral do cilindro. Empregou-se aço inoxidável 304 com espessura 0,005m, superior à utilizada no corpo do secador inicial. Isto para prevenir abaulamentos, verificados na versão inicial, causados pela ação de impacto dos corpos inertes durante a operação do secador.



(a)



(b)

Figura 3.4. Vistas frontal (a) e transversal (b) do corpo interno do secador com 4 aletas de 70° com largura de 0,075m.

A placa perfurada, voltada para a alimentação da pasta, passou a apresentar uma região sem furos, correspondendo a uma coroa circular a partir de sua circunferência externa. A razão do emprego desta área sem furos foi conter o material pastoso alimentado no secador durante a operação de secagem, prevenindo vazamentos na junção do cilindro giratório com o sistema de alimentação de ar. A outra placa não necessitou da área sem furos, para facilitar o arraste do produto em pó pelo ar em escoamento. As placas com os anéis de vedação, que permitiram as junções do cilindro com a instalação, são mostradas na Figura 3.5.

Seguem-se as especificações do secador definitivo:

- cilindro de secagem: diâmetros 0,254m e 0,248m; comprimento 0,65m; aço inoxidável 304;

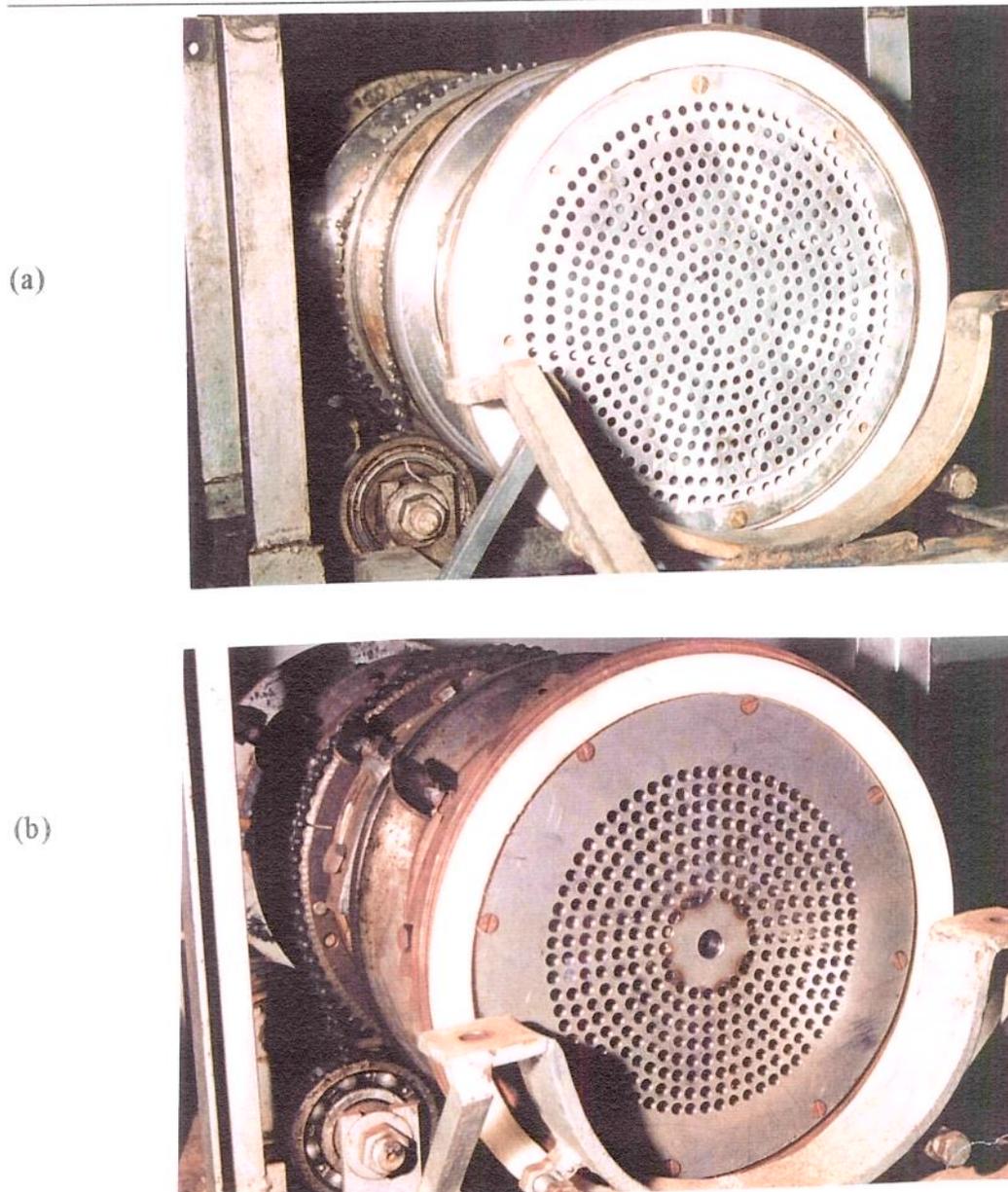


Figura 3.5. Vistas dos flanges de alojamento com anel de junção e das placas perfuradas com coroa circular com furos (a) e sem furos (b).

- engrenagem motora do cilindro (coroa): diâmetro de 0,34m;
- aletas longitudinais: contínuas e ocupando todo a extensão do cilindro; comprimento (L) de 0,076m; espessura de 0,005m; tipo reta; ângulo haste e tangente ( $\alpha'$ ) de 70°; quantidade: 4; material: aço inoxidável 304;
- chicanas transversais: igualmente espaçadas; corte alternado; espessura igual a 0,005m; corte: 30%, relativo ao diâmetro; quantidade:3; aço inox 304;
- placas perfuradas: diâmetro 0,284m; espessura 0,003m; orifícios com diâmetro 0,0065m e com

- 0,002m de espaçamento; coroa circular de 0,04m (largura); material: aço inoxidável 304;
- câmaras de secagem: cada quarta parte do cilindro, sendo duas compreendidas entre duas chicanas e duas entre uma chicana e uma placa perfurada;
  - janelas de inspeção: em número de quatro, com dimensões 0,045 x 0,045m;
  - leito de inertes (três leitos): (1) esferas de cerâmica com massa específica (26°C) igual a 3539,47kg/m<sup>3</sup> (APÊNDICE B) ( $\rho=65,64\text{kg/m}^3$  (APÊNDICE C.10)),  $k=12,56\text{W/m}^\circ\text{C}$  e dureza 80,0RC (NGK, 1993): 1a) esferas de 0,02m de diâmetro nominal (APÊNDICE A): carga de 22,149kg ( $\epsilon=0,035\%$ , APÊNDICE E;  $\rho=1,3 \cdot 10^{-5}\text{kg}$ , APÊNDICE C.8); volume dado por  $z=0,105\text{m}$  ( $\rho=0,05 \cdot 10^{-2}\text{m}$  (APÊNDICE C.4)); (1b) esferas de diâmetro nominal 0,03m (APÊNDICE A): carga de 24,363kg ( $\epsilon=0,035\%$ , APÊNDICE E;  $\rho=1,3 \cdot 10^{-5}\text{kg}$ , APÊNDICE C),  $z=0,12\text{m}$  ( $\rho=0,05 \cdot 10^{-2}\text{m}$  (APÊNDICE C)); (1c) esferas de diâmetro nominal 0,04m (APÊNDICE A): carga 24,124kg ( $\epsilon=0,035\%$ , APÊNDICE E;  $\rho=1,3 \cdot 10^{-5}\text{kg}$ , APÊNDICE C.8),  $z=0,12\text{m}$  ( $\rho=0,05 \cdot 10^{-2}\text{m}$  (APÊNDICE C.4));
  - (2) esferas de aço (moinhos de bola): diâmetro de Sauter de 0,0313m (APÊNDICE A),  $\rho=1,0 \cdot 10^{-5}\text{m}$  (APÊNDICE C.3); dureza 60-64RC (MAGOTTEAUX, 1995); carga 53,269kg ( $\epsilon=0,035\%$ , APÊNDICE E;  $\rho=1,3 \cdot 10^{-2}\text{kg}$ , APÊNDICE C.8),  $z=0,125\text{m}$  ( $\rho=0,05 \cdot 10^{-2}\text{m}$ , APÊNDICE C.4); composição (%): C-2,7; Cr-19,3; Mn-0,5; Si-0,5 (MAGOTTEAUX, 1995);  $\rho=7673,4\text{kg/m}^3$  (APÊNDICE B) com  $\rho=53,84\text{kg/m}^3$  (APÊNDICE C.10);
  - (3) esferas de aço (rolamentos): diâmetro de Sauter 0,0290m (APÊNDICE A),  $\rho=2,79 \cdot 10^{-6}\text{m}$  (APÊNDICE C.3); dureza 60,0 a 64,0RC;  $\rho=7830,0\text{kg/m}^3$  (NSK, 1995);  $k=40,0\text{W/m}^\circ\text{C}$  e  $c_p=0,46\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$  (HOLMAN, 1983); carga igual a 57,30kg ( $\epsilon=0,035\%$ , APÊNDICE E;  $\rho=1,3 \cdot 10^{-2}\text{kg}$ , APÊNDICE C.8);  $z=0,125\text{m}$  ( $\rho=5 \cdot 10^{-4}\text{m}$ , APÊNDICE C4); composição (aço SAE52100) (%): C:0,95-1,10; Cr:1,30-1,60; Mn<0,05; Si:0,15-0,35; P<0,025; S<0,025; Mo<0,08 (NSK, 1995);
  - anéis de vedação: espessura de 0,01m; diâmetro externo de 0,335 e interno de 0,290m; material: policarbonato.

### 3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL COMPLEMENTAR

Na Figura 3.6 apresenta-se uma foto e na Figura 3.7 um esquema da instalação complementar. Consta dos sistemas de alimentação, escoamento e aquecimento do ar; dos psicrômetros; do sistema de separação e coleta do pó produzido; do sistema motor com redutor

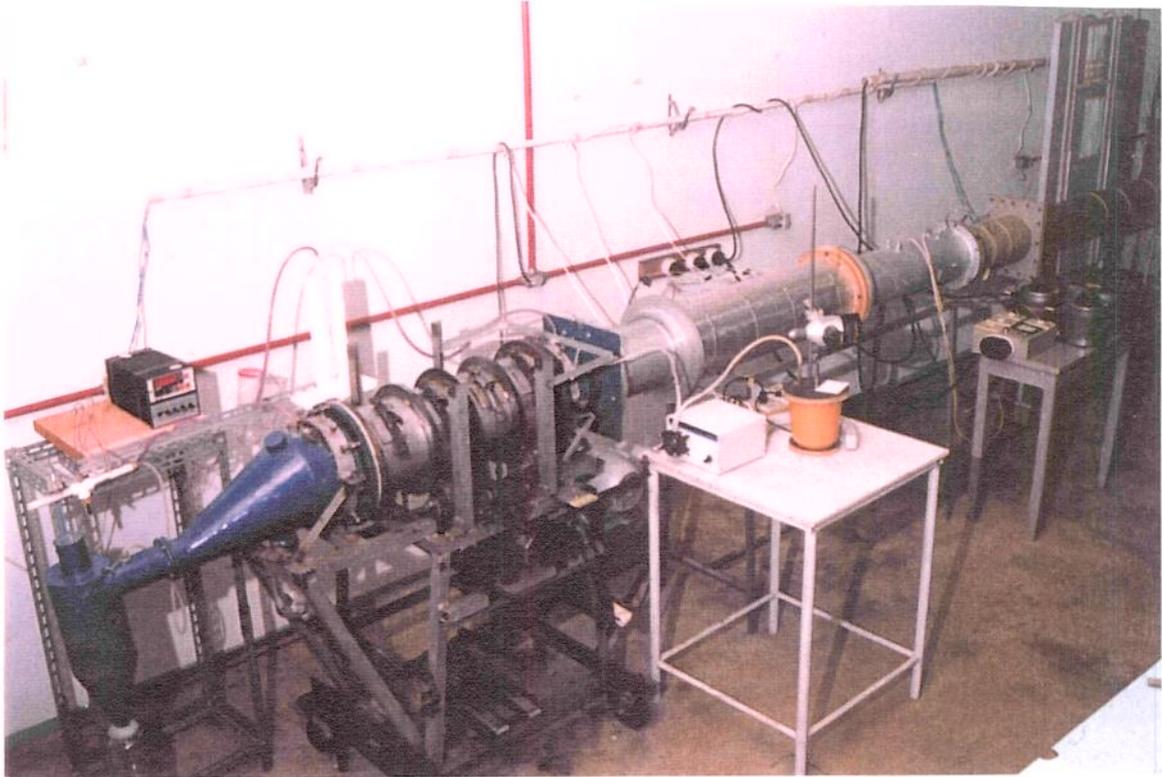
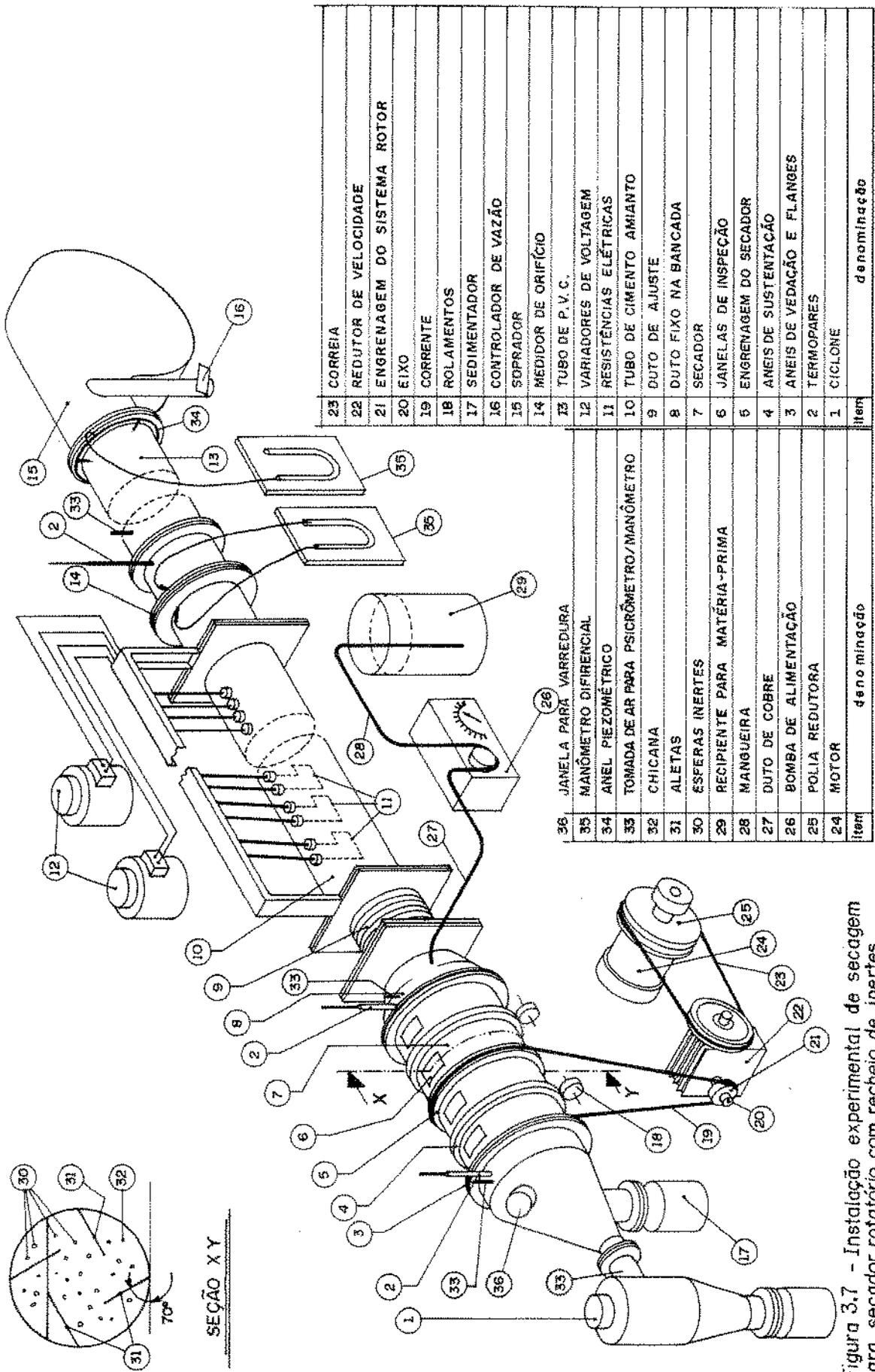


Figura 3.6. Foto da instalação completa de secagem para secador rotatório com recheio de inertes.

de velocidade acoplado ao SRRJ e do sistema de bombeamento e alimentação da pasta.

### 3.1 Sistema de Aquecimento e Escoamento de Ar

O sistema de aquecimento e escoamento do ar de secagem é composto de um soprador acoplado a um tubo de PVC seguido de outro de cimento amianto com resistências elétricas instaladas em seu interior (Figura 3.8). A taxa de escoamento do ar é determinada por um medidor de orifício calibrado e executado segundo OWER e PANKHURST (1977) (APÊNDICE E). O controle desta taxa é realizado manualmente, por modificação da seção transversal do duto de sucção e/ou por uma válvula a jusante do soprador, que elimina parte do ar para a atmosfera. A queda de pressão no medidor de orifício é quantificada por um manômetro diferencial em U, e a temperatura do ar, a jusante e a montante da placa, detectada por termopares. A pressão do ar na saída do soprador é medida por meio de um anel piezométrico, com três tomadas de pressão. O controle da energia dissipada nas resistências elétricas é efetuado por variadores de voltagem.



Item	denominação
23	CORREIA
22	REDUTOR DE VELOCIDADE
21	ENGRENAGEM DO SISTEMA ROTOR
20	EIXO
19	CORRENTE
18	ROLAMENTOS
17	SEDIMENTADOR
16	CONTROLADOR DE VAZÃO
15	SOPRADOR
14	MEDIDOR DE ORIFÍCIO
13	TUBO DE P. V. C.
12	VARIADORES DE VOLTAGEM
11	RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS
10	TUBO DE CIMENTO AMIANTO
9	DUTO DE AJUSTE
8	DUTO FIXO NA BANCADA
7	SECADOR
6	JANELAS DE INSPEÇÃO
6	ENGRENAGEM DO SECADOR
4	ANEIS DE SUSTENTAÇÃO
3	ANEIS DE VEDAÇÃO E FLANGES
2	TERMOPIRES
1	CILÓNE

Item	denominação
36	JANELA PARA VARREDURA
35	MANÔMETRO DIFERENCIAL
34	ANEL PIEZOMÉTRICO
33	TOMADA DE AR PARA PSICRÔMETRO/MANÔMETRO
32	CHICANA
31	ALETAS
30	ESFERAS INERTES
29	RECIPIENTE PARA MATÉRIA-PRIMA
28	MANGUEIRA
27	DUTO DE COBRE
26	BOMBA DE ALIMENTAÇÃO
25	POLIA REDUTORA
24	MOTOR

Figura 3.7 - Instalação experimental de secagem para secador rotatório com recheio de inertes.

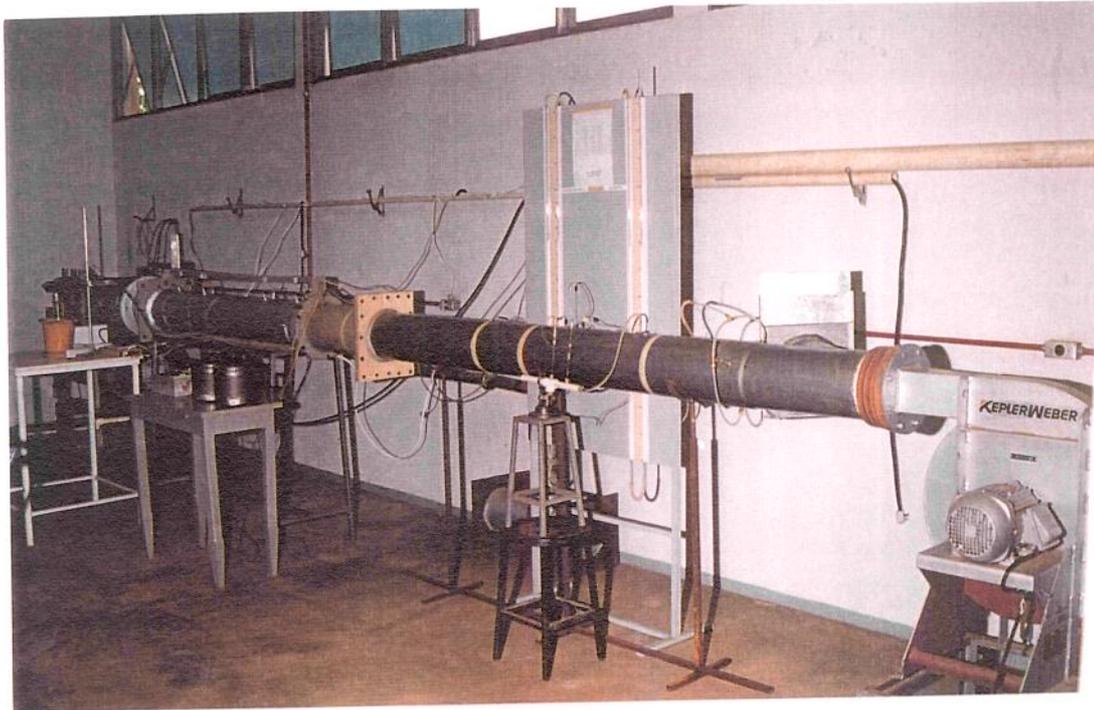


Figura 3.8. Vista do sistema de aquecimento e escoamento de ar.

Esse sistema é acoplado ao SRRI por meio de dois pequenos dutos: um fixo à bancada do SRRI, cuja função é comprimir o anel de vedação no secador, permitindo-lhe a rotação sem a ocorrência de vazamentos; outro de ajuste, com dois anéis vedantes (*O' rings*), um em cada uma de suas extremidades, nas superfícies externas, e com sede nos respectivos flanges (Figura 3.9). Este arranjo deve compensar oscilações mecânicas do conjunto, evitando o desajuste do SRRI ao duto fixo, o que provocaria vazamento de material. O sistema permite, ainda, que o secador, junto com o duto fixo, seja desacoplado da instalação, sem o comprometimento do ajuste inicial de ambos. Esse detalhe é importante, pois associa a vantagem de se prevenirem vazamentos com um princípio fundamental do projeto sanitário de equipamentos processadores de alimentos, qual seja o de favorecer a limpeza dos mesmos (MILLEVILLE & GELBER, 1965).

As especificações dos componentes do sistema são dadas a seguir:

- soprador centrífugo: taxa volumétrica  $1188\text{m}^3/\text{h}$ ; potência  $2,3\text{kW}$ ; pressão  $3,95\text{m.c.a.}$ , fabricante Kepler Weber; motor de  $3\text{kW}$ ,  $220/380\text{V}$ ,  $60\text{Hz}$ ,  $3500\text{rpm}$ , fabricante Weg Motores
- manômetro diferencial: tipo U; escala em mm de água;
- duto de amianto: diâmetro  $0,2\text{m}$ ; espessura  $0,014\text{m}$ ; comprimento  $1,58\text{m}$ ;

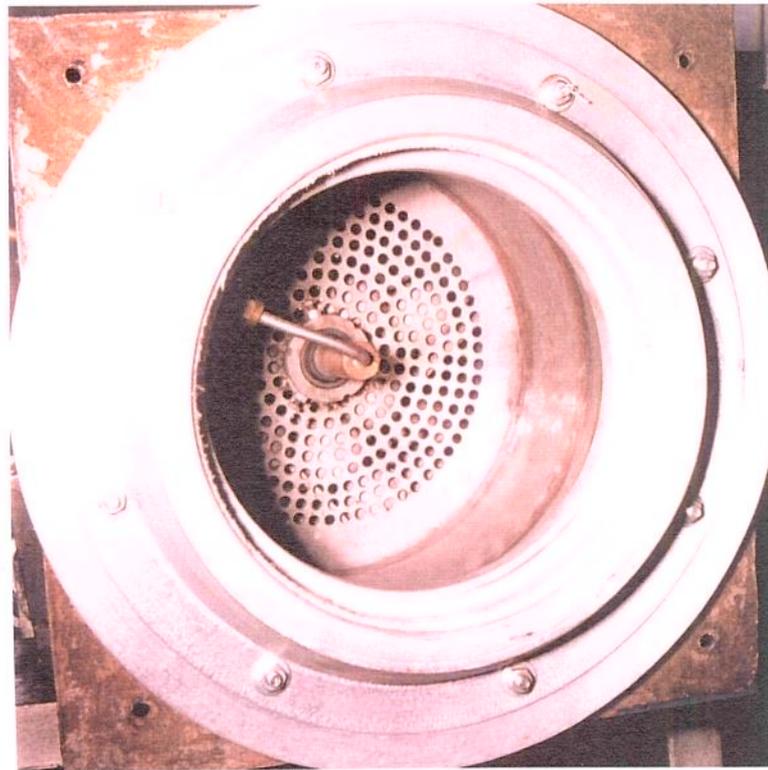


Figura 3.9. Vista do *O' ring* no flange do duto de ajuste.

- duto de PVC: diâmetro 0,2m; comprimento 2,0m;
- resistências elétricas (fio níquel-cromo):  $2,1\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ , comprimento 13m, diâmetro 0,001m, quantidade 6;
- variadores de voltagem: corrente 6,3A (2) e 12,0A (1), voltagem 220V;
- termopares: tipo T com indicador microprocessado série J; fabricante ECIL S/A;
- duto de ajuste: comprimento 0,3m; diâmetro interno 0,2m; espessura 0,014m; anéis de vedação de amianto, espessura 0,0085m, diâmetro interno de 0,2m;
- duto fixo na bancada: diâmetro 0,254m; comprimento 0,2m.

### 3.2 Psicrômetros

Para a determinação das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar de secagem nas saídas do soprador e do secador foram construídos dois psicrômetros (Figura 3.10) (DAVIS, 1968; ROCHA & FARIA, 1992). O sistema consta de dois dutos de PVC conectados às ramificações colineares de uma conexão tipo "T", também de PVC. Na outra ramificação é

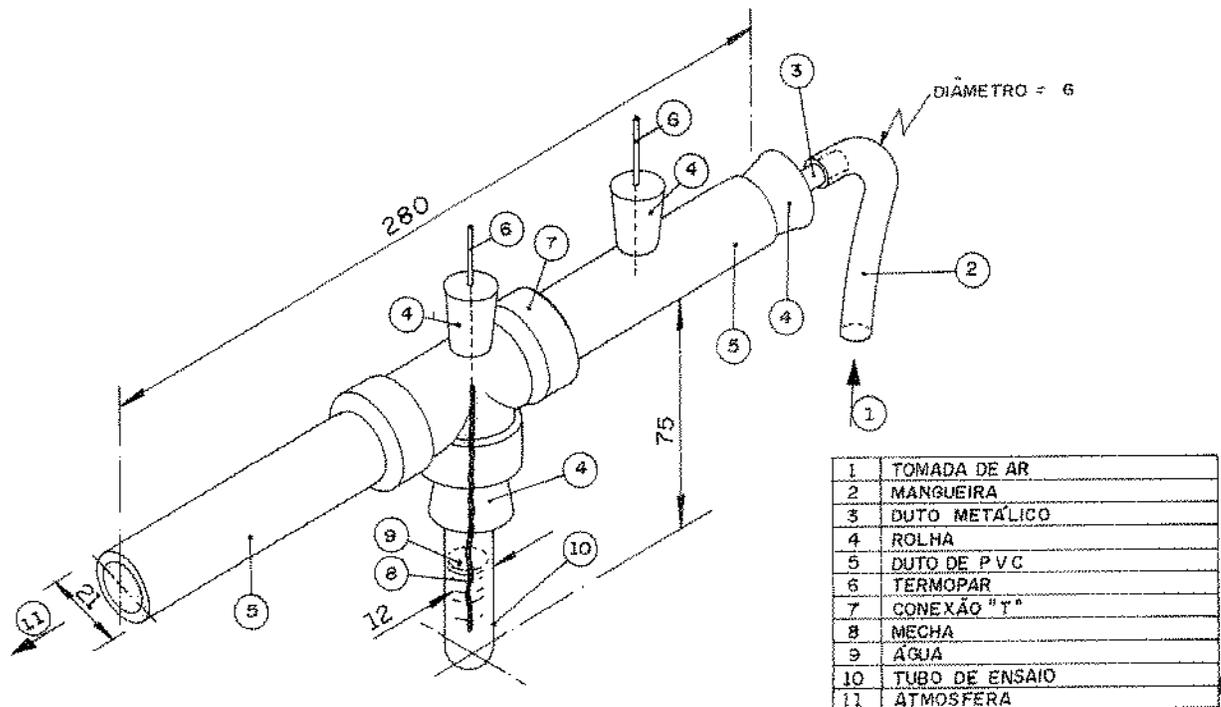


Figura 3.10. Psicrômetro (ROCHA & FARIA, 1992).

acoplada uma rolha com um orifício na direção axial ocupado por um tubo de ensaio. No ponto médio da superfície de um dos dutos e na posição diametralmente oposta à ramificação da rolha há orifícios para colocação de um termopar em cada um deles. Dentro do tubo de ensaio, uma mecha que envolve o termopar da conexão "T" é mantida mergulhada em água, permitindo a determinação da temperatura de bulbo úmido do ar. Por meio do outro termopar posicionado no duto determina-se a temperatura de bulbo seco do ar. A extremidade do duto com o termopar apresenta um conjunto rolha-duto metálico para acoplamento de uma mangueira de borracha que é conectada ao local de tomada do ar (saídas do soprador ou do SRRI). A outra extremidade é aberta à atmosfera e ajustada para permitir que o ar escoe a uma velocidade determinada, medida por meio de um anemômetro de fio quente acoplável ao psicrômetro, no local onde se posiciona o tubo de ensaio para a tomada da temperatura de bulbo úmido do ar. A mangueira de borracha é dotada de uma válvula que permite a passagem do ar pelo psicrômetro apenas durante a medição das temperaturas.

A umidade absoluta do ar,  $Y_u$  (kg água/kg ar seco), foi determinada por meio do programa

computacional PC1 (APÊNDICE I), utilizando-se da Equação [3.1] (DĂSCĂLESCU, 1964).

$$Y_a = 0,622 \frac{P_{pv}}{P_t - P_{pv}} \quad [3.1]$$

onde:  $Y_a$  é a umidade absoluta do ar (kg água/kg ar seco);

$P_t$  é a pressão total (kPa);

$P_{pv}$  é a pressão parcial do vapor de água (kPa), dada pela equaçã [3.2] (DĂSCĂLESCU, 1964).

$$P_{pv} = P_s - H \cdot P_t \cdot (T_{bs} - T_{bu}) \quad [3.2]$$

onde:  $P_{pv}$  é a pressão parcial do vapor de água (kPa);

$P_s$  (kPa) é a pressão de saturação da água a  $T_{bu}$ , dada pela Equação [3.3] (WEXLER & HYLAND, 1980, citado em ASHRAE, 1985), para T entre 0 e 200°C, com  $T_{bu}$  em K;

$T_{bs}$  e  $T_{bu}$  são as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido (K), medidas no psicrômetro;

$P_t$  é a pressão total (kPa);

H é uma constante, dada pela Equação [3.4] (DĂSCĂLESCU, 1964), sendo  $v_a$  a velocidade do ar (m/s), medida via anemômetro de fio quente (Datametrics; 100VT-9110; 0 a 6000ft/min; Davis Instruments).

$$P_s = 10^{-3} \cdot \exp(1,3914993 - 5800,2206 T_{bu}^{-1} - 0,04860239 T_{bu} + 0,41764768 \cdot 10^{-4} T_{bu}^2 - 0,14452093 \cdot 10^{-7} T_{bu}^3 + 6,5459673 \ln T_{bu}) \quad [3.3]$$

$$H = (65 + \frac{6,75}{v_a}) \cdot 10^{-5} \quad [3.4]$$

A fim de avaliar a precisão desse sistema determinou-se a umidade relativa do ar ambiente medindo-se as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido a várias velocidades do ar. Os resultados são mostrados na Tabela 3.1. Verifica-se que a umidade absoluta do ar mantém-se

Tabela 3.1 Umidade absoluta do ar a várias velocidades (pressão barométrica de 91,98kPa).

$v_a$ (m/s)	$T_{bu}$ (°C)	$T_{bs}$ (°C)	H (.10 <sup>4</sup> )	$P_s$ (kPa)	$P_{pv}$ (kPa)	$Y_a$ (kg ág./ kg as)
0,254	21,7	29,9	9,15	2,60	1,91	0,013
0,330	21,5	31,2	8,54	2,56	1,80	0,012
0,406	21,3	30,1	8,16	2,54	1,89	0,013
0,508	21,0	29,6	7,82	2,50	1,88	0,012
0,635	21,0	30,1	7,56	2,49	1,86	0,012
0,762	20,9	30,8	7,38	2,48	1,81	0,012
6,604	20,5	31,2	6,60	2,40	1,75	0,012

praticamente invariável, o que confere confiabilidade às equações mencionadas.

As temperaturas de bulbo seco e úmido do ar a 6,6m/s — portanto dentro da faixa 4,0 a 10,0m/s para eliminação de erros devido à radiação térmica (DĂSCĂLESCU, 1964) — foram empregadas para a determinação da umidade absoluta em carta psicrométrica (ASHRAE, 1981), obtendo-se o valor de 0,011kg de água/kg de ar seco.

### 3.3 Sistema de Separação e Coleta de Pó

O sistema de separação ar-pó produzido e de coleta do pó compõe-se de um duto em cuja base, imediatamente após o flange de saída do SRRI, há um coletor por gravidade (sedimentador, Figura 3.11) das partículas com granulometria grande. O sedimentador consta de um frasco de vidro (0,08m de diâmetro por 0,16m de comprimento) rosqueado a um duto metálico (0,05m de comprimento) soldado na base da tubulação, a 0,10m do anel de acoplamento ao SRRI. Na extremidade desse duto, um ciclone separa as partículas de menor granulometria do ar de secagem, que é lançado para a atmosfera. O material em forma de pó é coletado na base do ciclone por um frasco de vidro rosqueado, idêntico ao sedimentador.

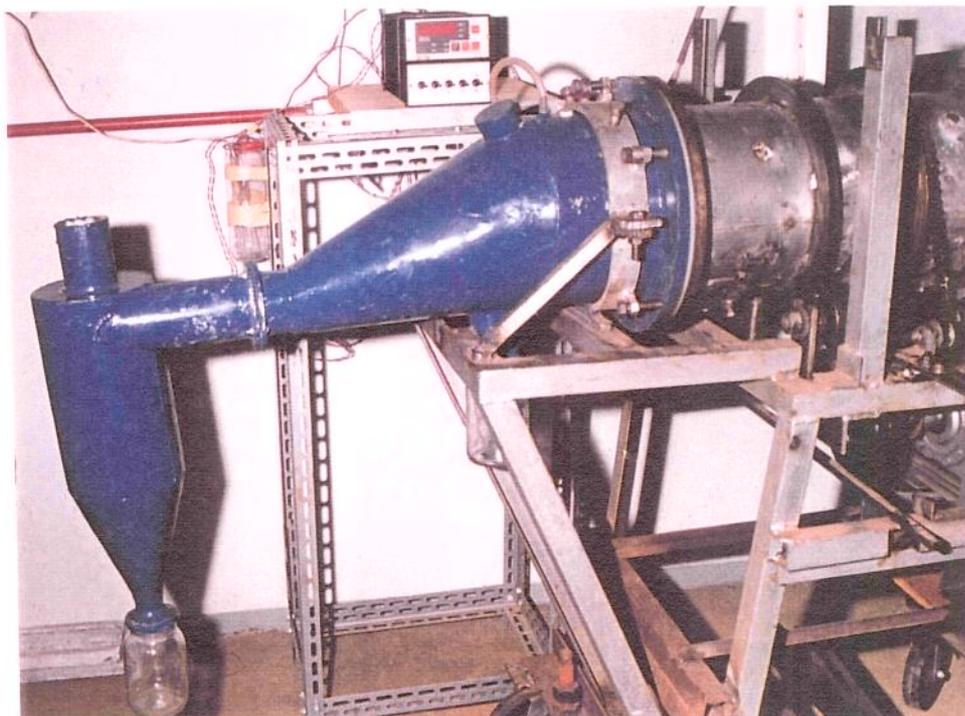


Figura 3.11. Vista do sistema de separação e coleta.

Na extremidade oposta à do ciclone foi colocado um flange de alojamento e compressão do anel plástico de vedação, que previne a ocorrência de vazamentos na junção do sistema de coleta e separação com o secador. Na parte superior do duto (detalhe no Item 36 da Figura 3.7) tem-se a abertura para varredura, fechada com rolha. Essa janela permite, durante a operação de secagem, a introdução de uma vassoura para movimentar o pó que se deposita entre o sedimentador e o ciclone em direção ao sedimentador.

#### 3.4 Sistema Motor

A rotação do SRRÍ é realizada por um sistema motor, que utiliza uma corrente metálica interligando duas engrenagens. Uma delas (coroa) é fixada na superfície externa do SRRÍ, na seção média longitudinal do cilindro e a outra (pinhão) é acoplada ao eixo do sistema motor, como mostrado na Figura 3.12.

Seguem-se as especificações do sistema:

- motor elétrico: 4 polos; potência 745,7W; 220/330V; 1730rpm; fabricante Weg Motores Ltda;

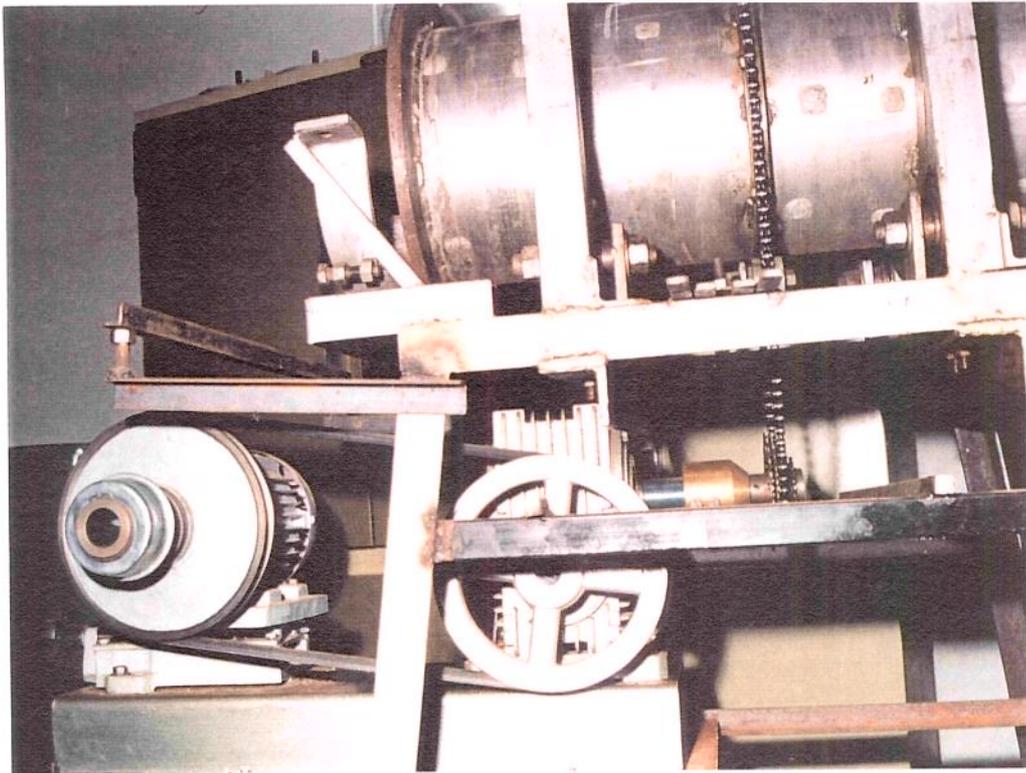


Figura 3.12. Vista do sistema motor acoplado ao SRRI.

- Variador de velocidade: sistema de polias com redutor 1:25 (redução final 35 a 70rpm);
- engrenagem (pinhão): diâmetro 0,16m.

### 3.5 Sistema de Alimentação

Na Figura 3.13 tem-se uma foto do sistema de alimentação do material pastoso. O material é alimentado à câmara de secagem do SRRI por meio de uma bomba peristáltica. O duto de sucção da bomba é acoplado a um duto metálico do recipiente de alimentação que, por sua vez, dispõe de um sistema contínuo de agitação mecânica para manter a pasta homogeneizada. O duto de recalque da bomba consta de uma mangueira acoplada a um tubo metálico. Esse tubo metálico é posicionado no centro da placa perfurada que compõe o cilindro de secagem, adentrando-o por um comprimento igual à espessura do tronco de cone (0,03m) soldado à referida placa (Figura 3.14). O duto metálico termina com um diâmetro menor na sua extremidade (bico alimentador), suficiente para que a pasta seja alimentada no leito de inertes em forma de um pequeno jato, evitando escorrimento de material sobre a placa metálica e aumentando a área de distribuição da pasta no leito de inertes. O movimento de rotação da placa, em torno do eixo do duto de

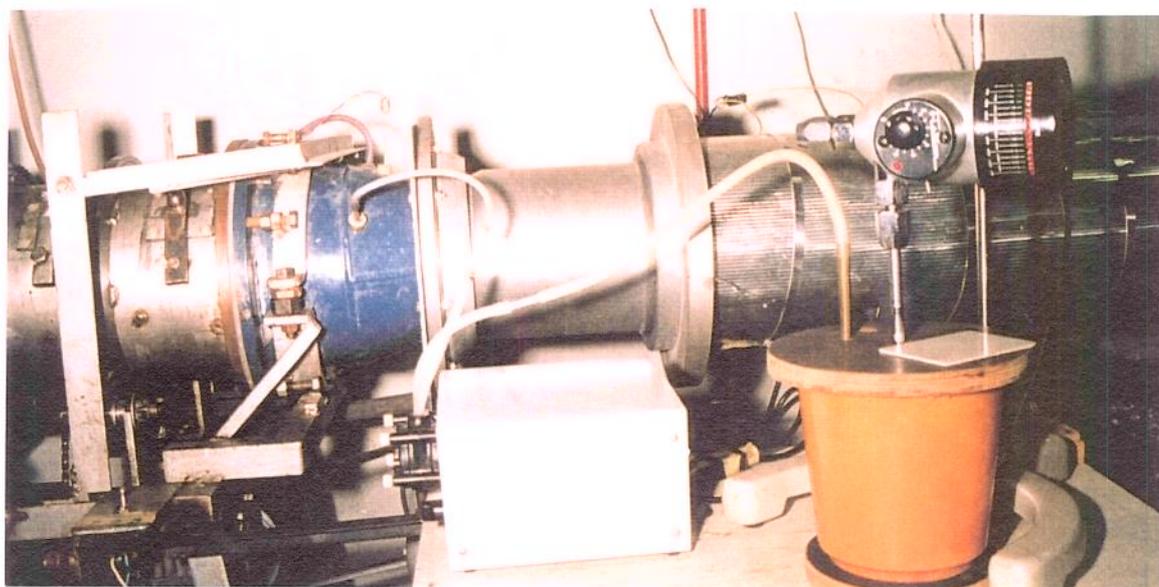


Figura 3.13. Vista do sistema de alimentação do material pastoso.

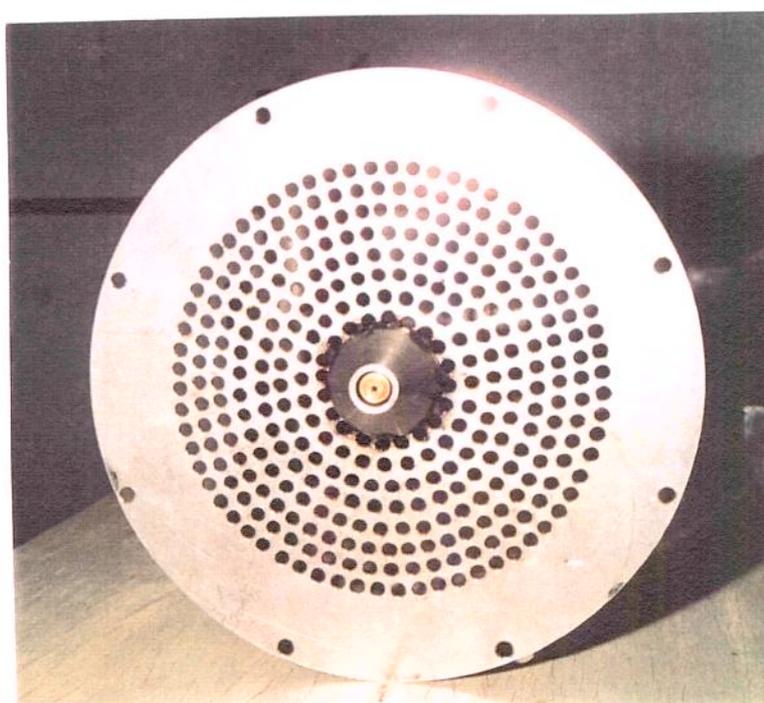


Figura 3.14. Vista do tronco de cone-placa perfurada e duto de alimentação.

alimentação, é permitido por meio de uma rótula com sede afixada na base do tronco de cone (Figura 3.15). A taxa do material pastoso alimentado pela bomba é função do conjunto rotor mangueira empregado, como especificado nos componentes do sistema de alimentação, abaixo:

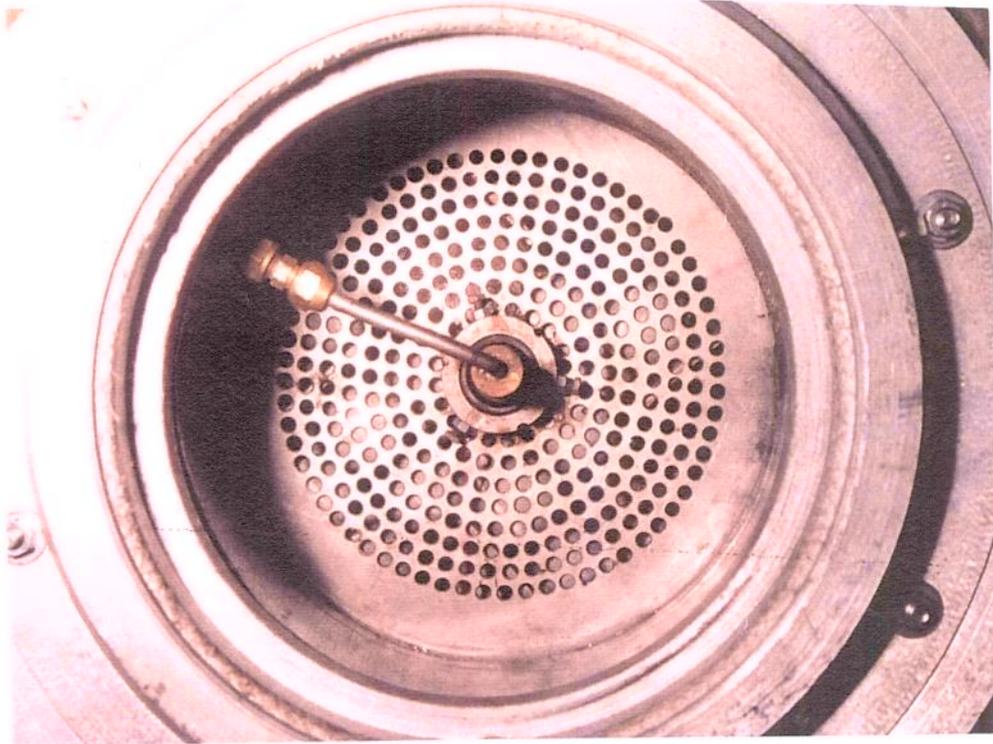


Figura 3.15. Vista do tubo metálico de alimentação com o sistema de rótula com sede na base do tronco de cone, conectado ao duto da bomba.

- bomba: masterflex, modelo no. 7553-60; 115VAC; 50/60Hz; rotação de 1 a 100rpm; fabricante Cole-Parmer Instrument; rotor 7015-52; fabricante Cole-Parmer Instrument Company;
- mangueira de silicone: temperatura tolerável de  $-62^{\circ}\text{C}$  a  $260^{\circ}\text{C}$ ; diâmetro interno 0,0048m; comprimento 0,50m (recalque) e 0,40m (sucção);
- duto metálico (aço inoxidável); diâmetro 0,004m; comprimento 0,35m; bico alimentador com diâmetro de 0,002 m;
- tanque de alimentação: volume de  $0.003\text{m}^3$  com agitação mecânica.

#### 4. MATERIAL PASTOSO PARA ALIMENTAÇÃO

O material pastoso utilizado nos ensaios de secagem foi levedura termolisada proveniente da indústria de álcool etílico. Esse material consiste na levedura, utilizada nas dornas de fermentação, submetida a tratamento térmico que lhe destrói a atividade enzimática (termólise). Na usina de álcool etílico realiza-se a centrifugação para separar a levedura da mistura alcoólica proveniente das dornas de fermentação. A fração em excesso, que constitui o resíduo do processo

(uma parte da levedura retorna às domas), é submetida a aquecimento em um recipiente com serpentina dentro da qual escoar vapor de água, de modo a desativar-lhe a atividade enzimática, caracterizando-se, assim, a levedura termolisada (RHEINBOLDT ET ALII, 1987).

Trabalhos anteriores (SANTOS et alii, 1992) realizados com o SRRI, processando levedura termolisada, mostraram que seu teor de sólidos é de fácil manipulação, o que permitiu adequá-la ao estado pastoso conveniente para alimentação no SRRI. Além disso, existe grande interesse industrial na obtenção da levedura em forma de pó (COPERSUCAR, 1996). Ocorre que, como outros grupos de microorganismos (algas, bactérias, cogumelos), a levedura constitui importante fonte de proteínas e, portanto, apresenta alto valor nutritivo, de modo que suas células desidratadas aplicam-se na alimentação animal e humana (TAEYMANS & LENGES, 1984).

## 5. OPERAÇÃO DO SISTEMA DE SECAGEM

A operação do sistema, na secagem de levedura termolisada pastosa, é realizada sequencialmente, conforme as seguintes etapas: a) movimentação do secador na rotação selecionada nos testes de dinâmica do leito; b) escoamento do ar de secagem a determinadas temperatura e taxa mássica; c) alimentação do material pastoso, após estabelecido o regime permanente térmico e hidrodinâmico do ar de secagem; d) coleta do material produzido em forma de pó no sedimentador e no ciclone.

Por se tratar de um equipamento processador de produtos alimentícios, o SRRI foi construído de forma a apresentar características sanitárias (MILLEVILLE & GELBER, 1965). Periodicamente, entre interrupções da operação de secagem e com o cilindro sob rotação, fazia-se escoar pelo secador ar aquecido, juntamente com água injetada através do duto da alimentação.

Alternativamente, o conjunto secador-duto fixo (Figura 3.7) poderia ser desconectado facilmente do sistema de escoamento e aquecimento do ar, tendo-se, assim, acesso a seu interior para limpeza.

## 4. OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DO SECADOR

O objetivo desse estudo foi, primeiramente, determinar a velocidade de rotação do SRRI correspondente à melhor distribuição radial dos inertes; em segundo lugar, definir a taxa mássica limite do ar, verificando a condição limite aceitável de arraste dos inertes quando expostos ao ar em escoamento através do secador. Foram utilizados três tipos de leito de inertes: leito com esferas de polietileno, de cerâmica e de aço.

### 1. DINÂMICA DO LEITO DE INERTES NO SECADOR INICIAL

O estudo da dinâmica do leito do secador inicial constou da observação do movimento dos inertes de aço, considerando-se os efeitos rolagem e cascata e o deslocamento longitudinal. Utilizou-se o cilindro de secagem com as placas de metal perfuradas substituídas por placas de acrílico, de modo a ser possível a visualização do movimento dos inertes.

Manteve-se o leito heterogêneo de inertes utilizado nos trabalhos já conduzidos no SRRI, ou seja, esferas de aço AISI 5200 de diâmetro médio igual a 0,0193m (ÁLVARES, 1990), leito com carga de 50,74kg correspondente a 40,0% do diâmetro do cilindro.

A rotação do cilindro foi variada por meio de um sistema motor que será descrito na abordagem do secador definitivo. A velocidade foi obtida pelo quociente entre um determinado número de voltas ( $n_v$ ), acompanhando uma marcação no cilindro, e o tempo requerido, conforme a Equação [4.1]. Foram empregadas velocidades de rotação de 8,99rpm; 12,21rpm; 21,39rpm; 26,09rpm; 31,74rpm ( $v=0,0168$ rpm, APÊNDICE C.1).

$$n = n_v / t \quad [4.1]$$

Verificou-se, através das placas de acrílico, que os inertes não apresentaram movimento longitudinal.

No intervalo de rotação mencionado, observou-se um comportamento do leito de inertes na seção transversal do cilindro como mostrado na Figura 4.1. Constatou-se um ângulo de rolagem,

a, (Figura 4.1a), a partir do qual os inertes começaram a se deslocar num movimento de rolagem das partículas, umas sobre as outras. Observou-se, também, um ângulo de repouso,  $\phi$ , como nos secadores rotativos, a partir do qual iniciava-se a queda dos inertes, caracterizando o efeito cascata. Na faixa de rotações empregada verificou-se a predominância do efeito rolagem sobre o cascata. Porém, o aumento da velocidade de rotação do cilindro era acompanhado do aumento do ângulo de rolagem,  $a_r$ . Isto sugeriu que velocidades mais elevadas, acima de 31,7rpm, certamente provocariam a intensificação do efeito cascata, aumentando a área de exposição dos inertes. Entretanto, velocidades de rotação elevadas provocariam um aumento tanto no desgaste do equipamento quanto no consumo energético para movimentá-lo.

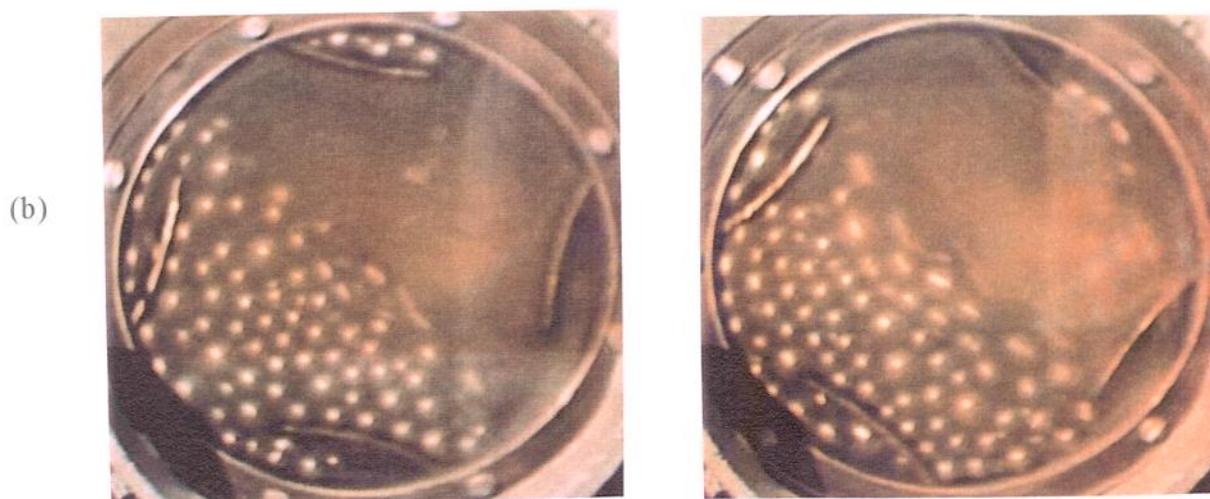
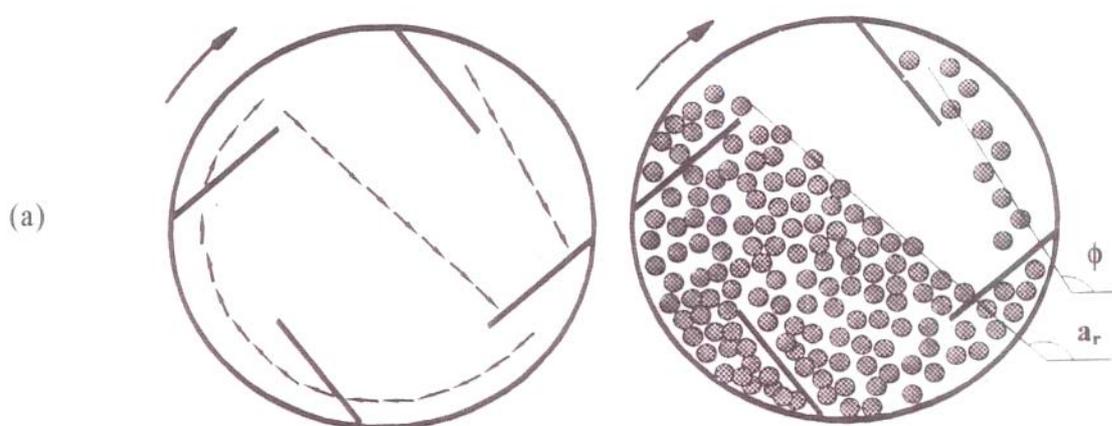


Figura 4.1. Movimentação das partículas do leito: (a) esquema da trajetória dos inertes; (b) Vistas para duas posições do cilindro a 31,7rpm.

Concluiu-se que, preferencialmente ao aumento da rotação do cilindro, o secador deveria ter seu interior (conjunto chicanas-aletas-inertes) modificado, de modo a produzir uma combinação adequada, mesmo a baixas rotações, dos efeitos cascata e rolagem dos inertes. Essa combinação resultaria em uma dinâmica do leito que conciliasse rolagem e cascata, com as partículas ocupando todos os quadrantes da seção transversal do cilindro. Isto permitiria um aproveitamento eficiente da área dos inertes tanto para a troca de calor quanto para recobrimento do material pastoso, quando da operação de secagem do equipamento.

Partiu-se, assim, para o estudo da dinâmica do leito em função da rotação do cilindro, utilizando-se um secador modelo, com facilidades para a variação dos parâmetros geométricos do corpo interno do secador.

## 2. ESTUDO DA DINÂMICA DO LEITO DE INERTES

Construiu-se uma instalação, mostrada na Figura 4.2, composta de um "secador" modelo e um sistema motor com variador de velocidade. Neste estudo não houve movimentação de ar pelo leito de inertes. O modelo era composto de: (a) um cilindro de PVC, cloreto de polivinil,

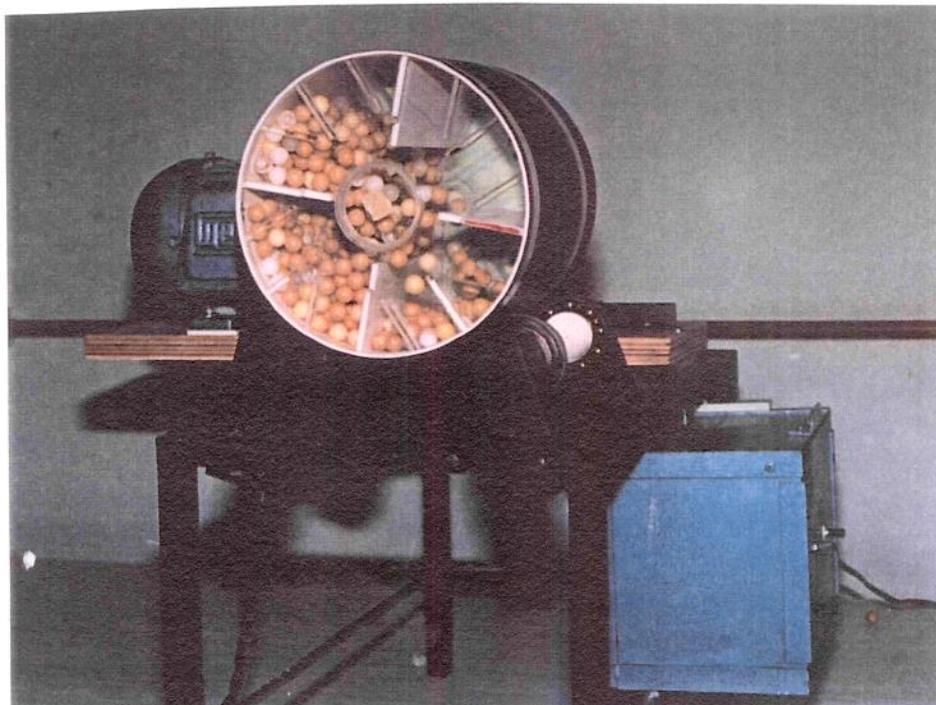


Figura 4.2. Vista da instalação do secador rotatório modelo.

e (b) um corpo interno constituído por duas placas (uma de acrílico e a outra de PVC, ambas com encaixes) e um conjunto de aletas de PVC. As extremidades das aletas adentravam os respectivos encaixes das placas, de modo a compor o corpo interno do modelo, como mostrado na Figura 4.3. Esses encaixes permitiram que o corpo interno fosse montado com diversos arranjos, podendo-se variar tanto o número quanto a inclinação das aletas.

Seguem-se as especificações dos referidos componentes:

- cilindro: diâmetro de 0,195m; comprimento de 0,2m; material: PVC;
- aletas: comprimento de 0,195m; largura: 0,039; 0,049 e 0,059m; quantidade: 3, 4, 6 e 8; inclinação: 110°; 70° e 90°; material: PVC;
- placas de acrílico e de PVC: espessura de 0,01m; diâmetro de 0,195m;
- sistema motor: potência de 0,5cv; rotação de 1710rpm; frequência de 60Hz; variador eletrônico de velocidade; linha Microhertz, variação conjunta de tensão/frequência, com torque constante.

Uma vez estabelecido o arranjo do corpo interno do sistema, este era introduzido no cilindro, juntamente com os corpos inertes. O cilindro acoplava-se ao sistema motor e a movimentação do leito, em função da rotação (sentido horário) do cilindro, era observada via placa de acrílico e registrada com uma filmadora marca JVC, modelo GR-M51UM. Quantificava-se o tempo gasto (medido por meio de um cronômetro digital com resolução de centésimo de

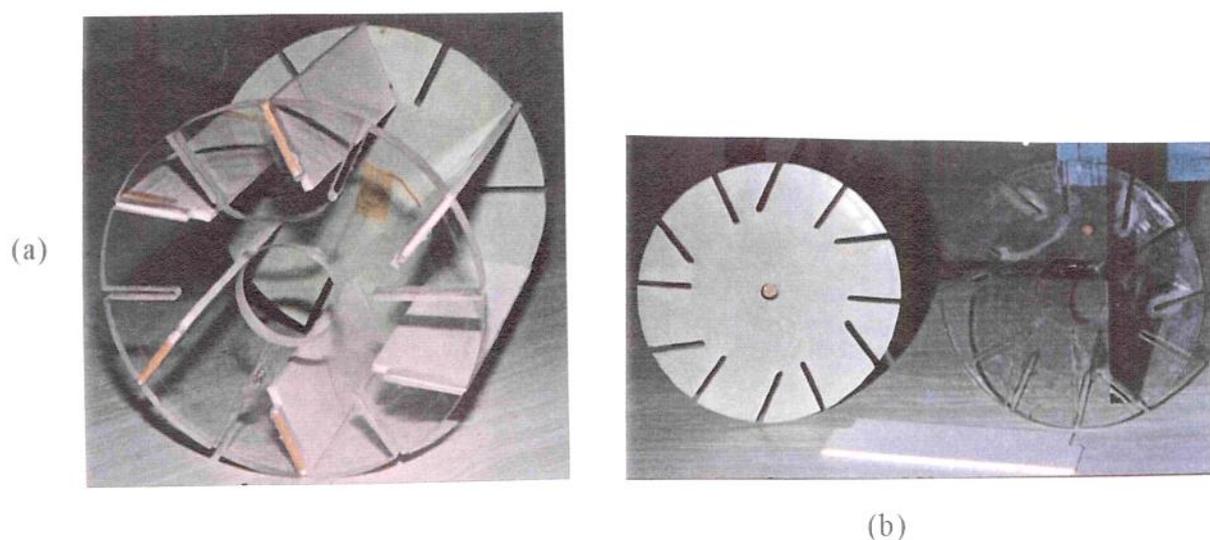


Figura 4.3. Corpo interno (a) e placas e aleta (b) do secador rotatório modelo.

segundos) até a ocorrência de um determinado número de voltas do cilindro.

Todas as conclusões desse estudo basearam-se na visualização das referidas filmagens geradas, particularmente através do recurso de câmaras lenta e rápida, que permitiu a realização de observações pormenorizadas da trajetória das partículas do leito ao longo da seção transversal do cilindro.

Os ensaios foram realizados em duas etapas. Inicialmente, utilizaram-se inertes de polietileno e, posteriormente, de cerâmica, para averiguação da influência da massa específica das partículas na movimentação do leito.

#### A. Ensaios com Inertes de Polietileno

Nesta etapa, os ensaios foram realizados sob as seguintes condições de operação: (a) leito de inertes: volume, representado por  $z$  (distância da base do cilindro até o nível dos inertes) com os valores: 0,05m, 0,08m e 0,115m; diâmetro das esferas de polietileno: 0,0117m (APÊNDICE A) ( $\tau=5,0 \cdot 10^{-6}$ m, APÊNDICE C.2);  $\rho=160,0\text{kg/m}^3$  (APÊNDICE B) ( $\tau=8,55\text{kg/m}^3$ , APÊNDICE C.10); (b) corpo interno do cilindro: arranjos com 3, 4, 6 e 8 aletas, com comprimentos de 0,039; 0,049 e 0,059m ( $\tau=5,0 \cdot 10^{-4}$ m, APÊNDICE C.4) e inclinações de 110, 70 e 90° ( $\tau=0,5^\circ$ , APÊNDICE C.5).

Para todas as combinações das condições operacionais dadas acima, foram realizados ensaios com pelo menos quatro rotações diferentes (varreu-se uma faixa entre 10,0 a 90,0rpm), de modo a se poderem observar diversas movimentações do leito de inertes. Confirmou-se a situação de predomínio da rolagem das partículas inertes (baixas rotações), seguindo-se do efeito cascata progressivo, à medida que a velocidade de rotação aumentava e, finalmente, a tendência - e em alguns casos a consumação - da centrifugação do leito, quando as rotações eram muito elevadas.

Foram também constatadas as combinações rolagem e cascata, com varredura (ocupação contínua da seção transversal do cilindro em rotação) dos corpos inertes nos dois primeiros quadrantes da seção transversal do cilindro, caracterizando a dinâmica satisfatória do leito de inertes.

Um item adicional para uma dinâmica adequada do sistema foi a necessidade de se manter livre a região próxima ao eixo do cilindro, ou seja, sem obstrução pelas cascatas ou pela rolagem das partículas. Desta maneira seria facilitado o necessário jateamento da alimentação do material pastoso aumentando a região atingida, quando da operação do secador.

A operação do equipamento com o volume do leito de inertes caracterizado pelo comprimento "z" mencionado, visou a referenciar a carga do leito com relação à dos moinhos de bola, que é de cerca de 50,0% do volume interno (McCABE et alii, 1993). Assim, utilizaram-se leitos com volumes: ligeiramente superior ( $z=0,115\text{m}$ ), ligeiramente inferior ( $z=0,08\text{m}$ ) e consideravelmente inferior (0,05) à metade do volume do cilindro. Concluiu-se que o volume correspondente ao  $z=0,08\text{m}$  caracterizou o leito com melhor dinâmica. O leito com  $z=0,115\text{m}$  apresentou uma dinâmica em que predominou a rolagem das partículas, mesmo a rotações elevadas; o leito com  $z=0,05\text{m}$ , embora favorecendo o efeito cascata, permitiu a ocorrência de muitos vazios na seção transversal do cilindro, o que comprometeria a área do leito disponível tanto para a recobrimento da alimentação quanto para a transferência de calor, na operação de secagem do equipamento.

As velocidades de rotação nas quais se obtiveram as melhores movimentações do leito de inertes são apresentadas na TABELA 4.1, para diferentes arranjos geométricos do interior do cilindro com leito constituído de esferas de polietileno. Essas velocidades, embora conduzam às melhores movimentações do leito para cada arranjo, não necessariamente representam condições de dinâmica satisfatória.

A avaliação da dinâmica do leito revelou que o aumento da rotação do cilindro melhorava o comportamento geral do sistema. Nessa condição, para aletas de  $110^\circ$  e  $90^\circ$  e largura de  $0,039\text{m}$ , os níveis de velocidades de rotação empregados foram elevados, relativamente aos comumente utilizados em secadores rotativos, que são aproximadamente iguais a  $15,0\text{rpm}$  (STRUMILLO et alii, 1983), conforme pode ser observado na Tabela 4.1.

Os níveis de velocidade necessários, ainda que altos, decresceram, quando aletas mais largas foram empregadas. Os valores obtidos com aletas de  $0,049\text{m}$  e  $0,059\text{m}$  também foram lançados na Tabela 4.1. Para as mesmas 8 aletas de  $110^\circ$ , nas condições mencionadas, o aumento de L para  $0,049\text{m}$  requereu uma velocidade de  $72,9\text{rpm}$ , menor que a anterior; para 8 aletas de  $90^\circ$ , a

TABELA 4.1. Velocidades de rotação (rpm) do cilindro em função da inclinação ( $\alpha$ ), largura (L) e do número de aletas (esferas de polietileno, leito com  $z=0,08m$ ).

ângulo da aleta $\alpha$ (°)	largura da aleta L (m)	rotação do cilindro (rpm)			
		8 aletas	6 aletas	4 aletas	3 aletas
110	0,039	76,6	-	-	-
	0,049	72,9	-	-	-
	0,059	-	-	-	-
90	0,039	65,5	64,7	71,2	72,6
	0,049	54,9	50,2	65,2	68,2
	0,059	55,7	55,6	55,5	55,5
70	0,039	36,6	31,0	38,6	-
	0,049	29,9	29,8	32,7	41,2
	0,059	-	31,0	31,7	37,7

velocidade necessária também diminuiu, sendo 54,9rpm. O aumento da largura das aletas elevou o *holdup* de esferas, melhorando a distribuição das mesmas ao longo da seção transversal do cilindro, particularmente na região correspondente ao primeiro quadrante. Verificou-se, porém, que esse aumento da largura das aletas, por causa da consequente diminuição da distância entre as extremidades das aletas contíguas, favorecia a retenção das esferas no espaço entre aletas. Em consequência, reduziu-se o efeito cascata das partículas. Esta sobrecarga de partículas poderia levar a uma possível aglutinação do leito pastoso, durante a operação de secagem. Por outro lado, ficou implícita a existência de um limite mínimo para a largura das aletas, que permite a manutenção de espaços vazios na seção transversal do cilindro. Esta condição é contornável com o uso de velocidades de rotação mais altas, como pode ser verificado na Tabela 4.1, para 3 aletas.

O número de aletas influenciou significativamente a dinâmica das partículas. O uso de

muitas aletas tendeu a agravar a sobrecarga de partículas no espaço entre aletas, principalmente quando combinadas com larguras grandes. Um número pequeno de aletas provocou uma incidência acentuada de espaços vazios na seção transversal do cilindro, principalmente no primeiro e quarto quadrantes, exigindo a elevação das velocidades requeridas para revolver o leito.

A queda nos níveis de velocidade adequados a uma dinâmica satisfatória foi também verificada quando a inclinação das aletas foi reduzida, como indicado na Tabela 4.1. Nota-se que as velocidades em torno de 55,0 a 65,0rpm caem para 30,0 a 37,0rpm, quando o ângulo das aletas passa de 90 para 70°. Este efeito, certamente, é devido ao aumento do tempo de retenção das partículas nas aletas, em consequência do decréscimo na inclinação das mesmas, de modo que os inertes puderam alcançar o primeiro quadrante do cilindro.

A visualização dos filmes dos ensaios da dinâmica do leito revelou que dois dos trinta arranjos geométricos utilizados produziram movimentações satisfatórias no leito. Estes dois arranjos são: (a) 4 aletas, largura de 0,059m, inclinação de 70° e  $z=0,08m$ , com o cilindro movimentando-se a 31,7rpm; (b) 6 aletas, largura de 0,039m, inclinação de 70° e leito com  $z=0,08m$ , com o cilindro movimentando-se a 31,0rpm. Selecionou-se o arranjo (a) como o melhor, sobretudo porque se observou uma varredura contínua das partículas ao longo dos dois primeiros quadrantes da seção transversal do cilindro, como mostra a Figura 4.4. Além disso, uma menor quantidade de aletas (4) estabelece um maior volume disponível para o leito, permitindo que ele seja composto de maior número de inertes. Isto é de grande valia na operação do SRRI, pois, além de incrementar a área do leito para recebimento da alimentação e troca térmica com o ar, diminui a área total do conjunto aletas-chicanas, potencialmente retentora de material.

#### B. Ensaíos com Inertes de Cerâmica

A fim de avaliar a influência da massa específica das partículas sobre a dinâmica do recheio substituíram-se as esferas de polietileno por esferas de cerâmica de 0,02m de diâmetro.

Com base nos resultados com esferas de polietileno utilizaram-se arranjos do interior do cilindro com 6 e 4 aletas, inclinações de 90 e 70°, larguras de 0,039m, 0,049m e 0,059m, e

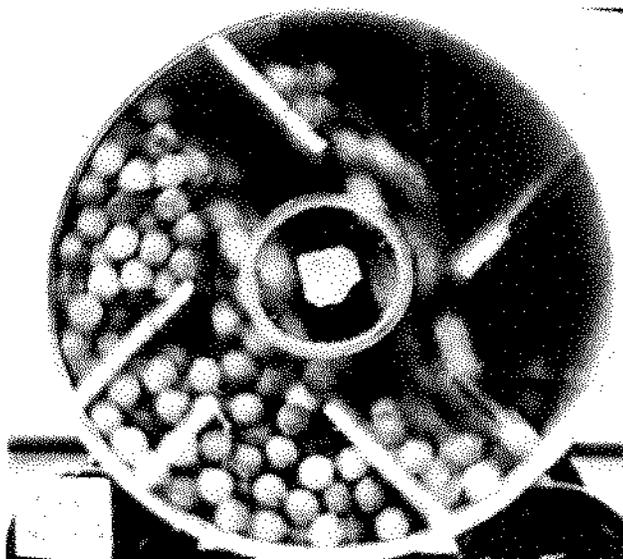


Figura 4.4. Vista da distribuição do leito de esferas de polietileno: cilindro à velocidade de 31,7rpm; 4 aletas de 70° com 0,059m de largura e leito com  $z=0,08m$ .

volume do leito correspondente ao comprimento  $z=0,08m$ . Consideraram-se três níveis de referência de velocidade de rotação do cilindro, aproximadamente iguais a 10,0rpm, 20,0rpm e 30,0rpm. Esse último valor tinha sido estabelecido como valor limite na operação do secador rotatório com recheio de inertes definitivo, para prevenir a ocorrência tanto de desgaste quanto de consumo energético elevados do equipamento.

As filmagens geradas do leito em movimento indicaram a ocorrência de varredura com distribuição não uniforme das partículas na seção transversal do cilindro. Para os arranjos com aletas de 90°, porém, mesmo nas velocidades da ordem da máxima (30,0rpm), observaram-se muitos vazios na seção transversal do cilindro, particularmente no primeiro quadrante. Isso confirmou a má capacidade das aletas desses arranjos em reter partículas, impossibilitando a ocorrência de cascatas no primeiro quadrante.

Nos ensaios com as aletas de 70°, constatou-se o transporte de partículas até o primeiro quadrante, favorecido pela menor inclinação das aletas.

As mesmas observações feitas nos ensaios com recheio de polietileno são aplicáveis, em relação à largura das aletas. Os melhores resultados foram obtidos com 6 aletas de 0,049m ou

4 aletas de 0,059m, inclinadas de 70°.

Quanto ao número de aletas, os melhores resultados foram: (a) arranjo com 6 aletas e cilindro com velocidade de rotação de 31,2rpm; (b) arranjo com 4 aletas e velocidade de rotação de 33,0rpm.

O teste com o arranjo de 4 aletas inclinadas de 70°, largura de 0,059m, volume do leito equivalente a  $z=0,08m$  e velocidade de rotação do cilindro de 33,0rpm produziu uma movimentação considerada a mais próxima da que se definiu como dinâmica satisfatória do leito (Figura 4.5). Ocorreu uma distribuição das partículas por toda seção transversal do cilindro: rolagem no segundo quadrante e cascata no primeiro; adiantamento da varredura das partículas na seção transversal do cilindro, a partir do segundo quadrante; transporte de partículas até o primeiro quadrante, devido ao menor ângulo das aletas. Observou-se, ainda, uma liberação intermitente dos inertes da região axial do cilindro, muito importante, como mencionado, para a alimentação do material pastoso, quando da operação do secador.

### 3. GEOMETRIA E CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO SECADOR DEFINITIVO

Com base nos resultados dos estudos da dinâmica do leito de inertes estabeleceu-se



Figura 4.5. Vistas da distribuição do leito de esferas de cerâmica para duas posições do cilindro a 33,0rpm, com 4 aletas de 70° e 0,059m de largura, e leito com  $z=0,08m$ .

a velocidade de rotação do secador definitivo em 33,0rpm. O arranjo do corpo interno do leito do SRRI foi determinado como descrito a seguir.

Por similaridade geométrica entre o secador modelo e o definitivo determinou-se que o definitivo deveria ter aletas com 0,075m de largura e os estudos da dinâmica do leito recomendam inclinações de 70°, mantendo-se o número de 4 aletas no corpo interno do SRRI.

Num primeiro momento, optou-se pela substituição das esferas de aço utilizadas no SRRI inicial por esferas de cerâmica. A menor massa dessas esferas diminui os gastos energéticos para movimentação do cilindro de secagem e o desgaste dos componentes internos do secador. Com base em estudos a serem relatados posteriormente, esferas de aço tornaram a ser utilizadas nos ensaios definitivos.

O diâmetro das esferas de cerâmica utilizado também deveria ser estabelecido pela similaridade geométrica (0,025m), porém, como as esferas disponíveis eram de diâmetros de 0,02m, 0,03m e 0,04m, optou-se pela utilização das de 0,02m. Esse leito, ainda, deveria ter um volume representado pelo comprimento  $z$  igual a 41,0% (0,08/0,195) do diâmetro do SRRI (0,248m), ou seja,  $0,248 \cdot 0,41 = 0,101$ m. Este valor foi ligeiramente modificado para 0,0105m com base nos testes de dinâmica posteriormente realizados com o secador definitivo.

#### 4. PREPARAÇÃO DA LEVEDURA PASTOSA

A suspensão de levedura, proveniente da indústria do açúcar e álcool como subproduto da etapa de fermentação, com um teor de sólidos igual a 10,7%, apresentou-se bastante fluida. Esse nível de fluidez mostrou-se inadequado como uma pasta modelo para a alimentação no SRRI, pois facilitava o escorrimento da solução pelo leito de inertes, de modo a comprometer o necessário recobrimento dos mesmos. Na verdade, este nível de fluidez (viscosidade) descaracteriza a natureza pastosa requerida do material a ser processado no SRRI. Procedeu-se, por isso, à concentração da suspensão da levedura, por gravidade: a suspensão foi posta em um recipiente do qual, após um período de repouso, retirava-se parte do líquido sobrenadante até se obter a concentração que se considerou adequada. Transferia-se a suspensão concentrada de levedura obtida para um outro recipiente com vedação, de modo a evitar seu contato com o ar ambiente, prevenindo sua deterioração. A pasta era homogeneizada, por meio de agitação

mecânica manual, antes de sua colocação no tanque de alimentação.

A concentração adequada deve permitir um jateamento da pasta, quando bombeada para o SRRI a uma determinada faixa referencial de taxa mássica (1,0 a 10,0kg/h). Esta faixa foi estabelecida com base nos resultados dos estudos de secagem de levedura com o SRRI em operação semicontínua (SANTOS et alii, 1993). Para permitir a visualização do referido jateamento e poder determinar esta concentração da levedura, a placa perfurada do SRRI com o duto de alimentação foi desacoplada do mesmo e ligada à bomba peristáltica. Utilizou-se a bomba peristáltica com rotor modelo 7015-52 e mangueira de diâmetro interno igual a 0,0048m (número 6411-115). A placa foi posicionada verticalmente tal como no SRRI. A levedura foi bombeada a várias concentrações, quantificando-se, para cada taxa mássica, o comprimento do jato do material, por meio de uma régua. Os melhores resultados ocorreram na concentração de aproximadamente 25,0%. Valores maiores de concentração anularam o efeito jato, que era recuperado à medida que se diluía a alimentação pastosa. Além disso, com concentrações maiores verificou-se escorrimento do material pela placa perfurada, quando se utilizaram baixas taxas de alimentação. Na Tabela 4.2 apresentam-se os comprimentos dos jatos em função das taxas mássicas da levedura pastosa concentrada (25,0% de sólidos).

Estudos de reologia da pasta de levedura indicaram uma viscosidade aparente aproximadamente igual a 200cP (APÊNDICE J).

#### 5. JATEAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DA LEVEDURA NO SRRI

Uma vez estabelecida a concentração referencial adequada da levedura para alimentação no SRRI (25,0%, massa), partiu-se para a avaliação, baseada em visualização com filmagens, da distribuição da alimentação pelo interior do SRRI, tanto no leito de inertes quanto no conjunto aletas-chicanas-parede, considerando-se a influência do escoamento do ar de secagem.

A capacidade do secador é função da umidade do pó produzido. Estudos prévios de secagem de levedura termolisada no SRRI em operação em batelada indicaram que a alimentação do material pelas duas primeiras câmaras do cilindro de secagem conciliou aumento de capacidade de secagem do equipamento com umidade satisfatória do material produzido (Santos et alii, 1993). Na operação em regime contínuo é necessário obter um jateamento da alimentação

Tabela 4.2 Comprimento do jato em função da taxa mássica da levedura com 25,0% de sólidos.

taxa de alimentação (kg/h)	comprimento do jato (cm)
13,87	22,0 a 25,0
12,68	20,0 a 23,0
11,31	12,0 a 15,0
10,06	13,5 a 15,0
9,18	7,5 a 8,0
6,79	7,0 a 7,5
4,83	3,0 a 4,5
abaixo de 4,83	0

de modo que o material pastoso cubra uma área considerável do leito, no sentido axial do cilindro e não se acumule na primeira câmara, evitando a ocorrência de vazamentos na conexão do cilindro com a parte fixa da instalação.

A fim de melhor avaliar a distribuição da alimentação projetou-se e construiu-se um SRRI com cilindro de acrílico e corpo interno com aletas de alumínio e chicanas de PVC. A utilização do acrílico objetivou permitir a visualização e a realização de filmagens; o alumínio e o PVC justificam-se pela disponibilidade de material construtivo. O leito de inertes constituiu-se de esferas de cerâmica com dimensões e massa idênticas àquelas utilizadas no SRRI de aço inoxidável. O conjunto cilindro-corpo interno do secador de acrílico também teve todas as suas dimensões idênticas às do SRRI de aço inoxidável. Esta medida visou à reprodução de condições de processo tão próximas quanto possível daquelas da operação de secagem, particularmente as relativas às perdas de carga do ar em escoamento, as quais certamente teriam influência na distribuição da alimentação.

Todo o conjunto foi, então, acoplado aos sistemas de aquecimento e alimentação de ar e coleta de pó. Na Figura 4.6 tem-se uma vista da instalação de secagem com o cilindro de acrílico

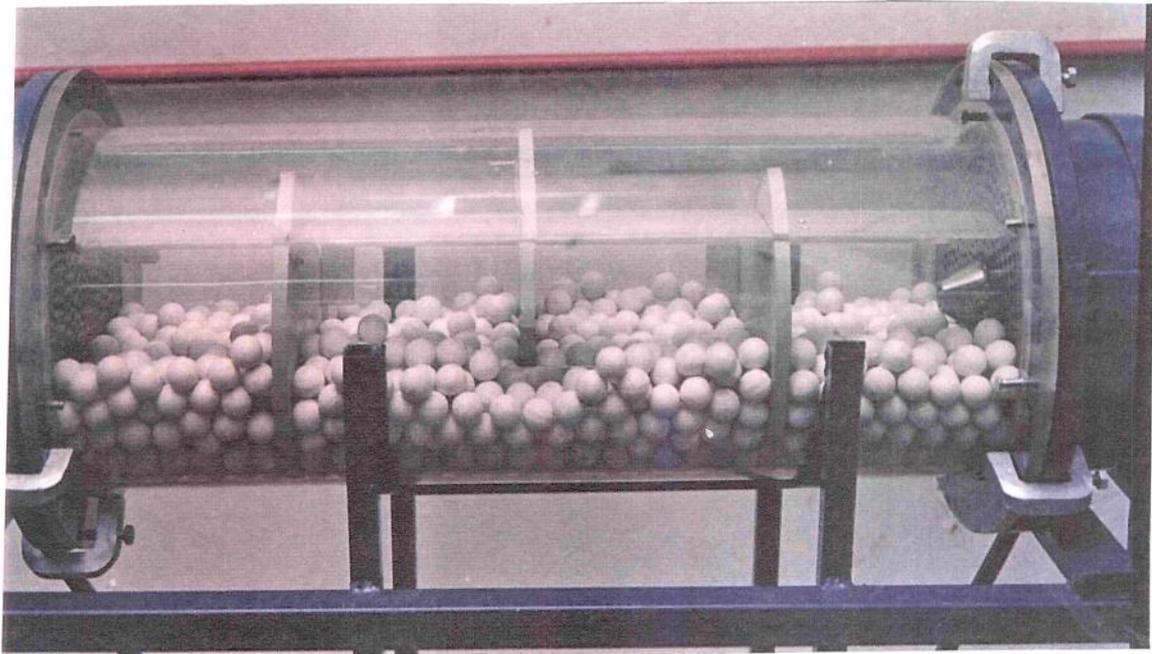


Figura 4.6. Instalação de secagem com cilindro de acrílico

utilizado nos testes de distribuição da alimentação.

Optou-se por manter o cilindro sem rotação, pois este movimento danificaria a superfície acrílica, comprometendo-lhe a necessária transparência. O efeito da rotação do cilindro foi, em parte, reproduzido, variando-se o posicionamento do corpo interno do cilindro (conjunto aletas-chicanas), que ocupou os ângulos de 0, 90 e 180°, correspondendo 0° à posição em que a chicana próxima à extremidade do duto alimentador obrigava a passagem de ar pela parte inferior do cilindro. Essa posição correspondeu à de maior perda de carga para o ar, já que ele deveria percolar o leito de inertes para escoar pelo cilindro. Os ângulos de 90 e 180° representam as posições correspondentes às perdas de carga intermediária e mínima para o ar.

Alimentou-se, sequencialmente, o "ar de secagem" à temperatura ambiente de 34,1°C e o material pastoso, ambos a taxas mássicas determinadas. Planejou-se a realização de ensaios empregando-se uma taxa inicial mínima de levedura igual a 5,0kg/h, que era aumentada para 7,5 e 10kg/h, valor limite utilizado em testes anteriores de secagem de levedura no SRRI operando em regime de batelada (SANTOS et alii, 1993). Para a taxa mássica do ar considerou-se a faixa de 1,0kg/min a 6,0kg/min, com base naqueles estudos, quando se utilizou ar a 3,8kg/min. Para

cada uma das combinações dessas taxas de ar e levedura, o corpo interno do cilindro ocupou as três posições dadas pelos ângulos de 0, 90 e 180°.

Os ensaios indicaram que o posicionamento do corpo interno do cilindro não provocou mudança significativa no jateamento da pasta, no intervalo de taxas mássicas empregado. Em todos os ensaios constatou-se a existência de um efeito pulsante do jato de levedura. Os resultados são mostrados na Tabela 4.3. Verifica-se que o jateamento da levedura não foi influenciado pela taxa mássica do ar até o nível de 3,69kg/min (ensaios 1 a 4). Acima deste valor há um crescimento do comprimento do jato com o aumento da taxa mássica da levedura (ensaios 5 a 9), tendo-se observado uma tendência gradativa à flutuação do jato pastoso, sem, contudo, caracterizar-se a atomização, mesmo à maior taxa (ensaio 9). Na Figura 4.7 são apresentadas fotografias do jateamento da pasta, podendo-se observar os efeitos pulsante e de flutuação.

Tabela 4.3. Dados da distribuição da levedura termolisada (25,72% de sólidos) pelo interior do SRRI, com corpo interno nas posições de 0°, 90° e 180°, com ar a 34,1°C.

ensaio	levedura, kg/h	ar, kg/min	jato, cm
1	5,08	1,18	5,1 a 6,3
2	5,08	2,16	5,1 a 6,3
3	5,08	3,69	5,1 a 6,3
4	4,94	3,69	4,9 a 6,1
5	4,94	4,77	5,4 a 6,9
6	4,94	6,18	6,8 a 8,3
7	4,94	6,51	6,9 a 8,5
8	4,94	6,75	7,5 a 9,0
9	4,94	7,01	7,7 a 9,3
10	7,39	1,18	6,0 a 7,5
11	10,54	1,18	9,0 a 12,0



Figura 4.7. Fotografias do jateamento da levedura: (a) efeito pulsante (ar a 3,69kg/min); (b) efeito de flutuação do jato (ar a 6,18kg/min).

Os ensaios 10 e 11 são indicativos do aumento do alcance do jato da pasta em decorrência da elevação da taxa mássica da levedura. Optou-se pelo uso da menor taxa (5,0kg/h), com a qual se realizaram os ensaios 1 a 9, por caracterizar a condição mais favorável à influência do ar.

Com o corpo interno na posição  $0^\circ$ , observou-se percolação do material pelo leito de inertes, o que resultou na formação de uma poça do mesmo na parte inferior do cilindro. A pasta atingiu a segunda câmara e a placa perfurada na extremidade do cilindro. O cilindro foi, então, girado

até a posição correspondente a  $90^\circ$ , o que provocou a distribuição da pasta da poça mencionada sobre as esferas do leito e sobre a superfície interna do cilindro nas duas primeiras câmaras (Figura 4.8a). Somente após um período em torno de 1h constatou-se que a levedura distribuída pelas paredes do cilindro começava a se desprender deslocando-se para o ciclone pela ação do ar ( $34,1^\circ\text{C}$ ) em escoamento, como mostrado na Figura 4.8b. Finalmente, girou-se o cilindro para

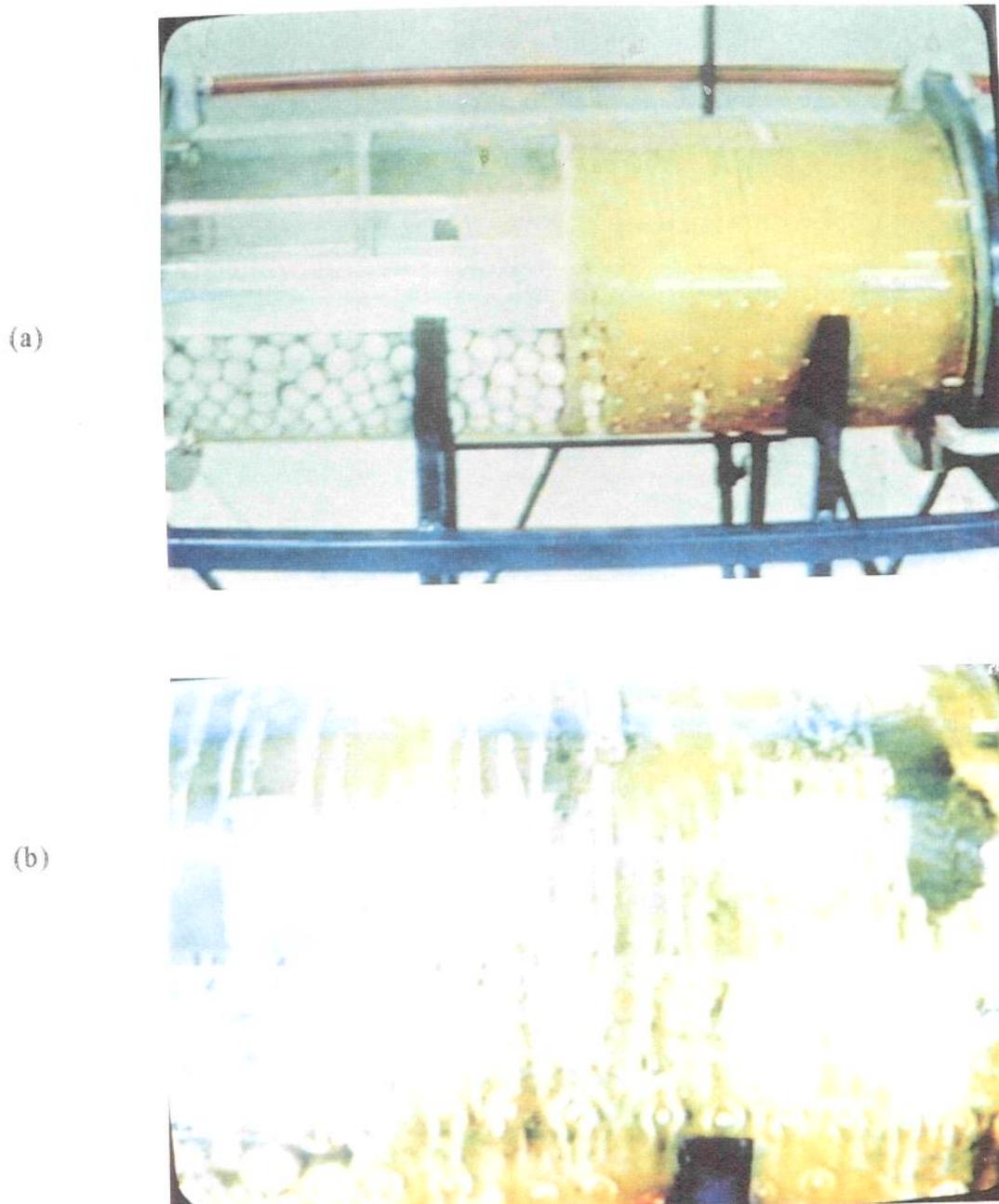


Figura 4.8. (a) Distribuição e (b) desprendimento da levedura.

a posição correspondente a 180°C, verificando-se que a superfície interna do cilindro continuava "molhada" pela pasta da poça, com limites bem definidos com a área da levedura "seca" em desprendimento. Observou-se, também, que as áreas superficiais das duas últimas câmaras apresentavam-se chapiscadas de levedura, ocorrendo o mesmo com as esferas destas regiões. Por outro lado, as superfícies e esferas da região com levedura "seca" permaneciam limpas.

A instalação com o cilindro de acrílico também foi utilizada para avaliar o efeito da temperatura do ar no aquecimento da pasta com conseqüente redução de sua viscosidade. Mediu-se o comprimento do jato sob temperatura do ar de até 160°C. O cilindro foi refrigerado com água à temperatura ambiente para protegê-lo da ação térmica do ar. As taxas mássicas de ar e levedura foram, respectivamente, a máxima (6,0kg/min) e a mínima (5,0kg/h), representando as condições mais severas. Os ensaios foram realizados alimentando-se continuamente a levedura. Na Tabela 4.4 são indicados os resultados obtidos do comprimento dos jatos de pasta em função da temperatura do ar. Observa-se que não houve influência significativa da temperatura do ar sobre o jateamento da pasta.

Uma série de ensaios foi realizada para avaliação das condições de jateamento em função

Tabela 4.4 Jateamento de levedura termolisada com teor de sólidos de 25,89% e taxa de 5,08kg/h (contínua) em função da temperatura do ar com alimentação de 6,04kg/min, com o corpo interno do cilindro a 180°.

ensaio	Temperatura do ar, °C	comprimento do jato, cm
1	57,3	6,5 a 7,3
2	80,1	6,3 a 7,5
3	103,8	7,2 a 8,1
4	116,2	6,8 a 8,1
5	137,3	6,7 a 8,2
6	155,2	6,8 a 8,1
7	160,0	7,0 a 8,1

da temperatura do ar e do tempo de parada da alimentação. Níveis de temperatura de 80,9°C, 101,3°C, 125,7°C e 153,4°C; tempos de parada de alimentação de 2,0 , 4,0, e 6,0min e taxas mássicas de levedura de 5,08kg/h, 7,52kg/h e 10,54kg/h foram utilizados. Constatou-se que, após o tempo de parada da alimentação, o jateamento foi dificultado pela concentração da pasta de levedura que permanecia no interior do bico alimentador. Esse problema era contornado por meio de uma breve interrupção da alimentação, comprimindo-se manualmente a mangueira de recalque da bomba. Quando esse expediente não mais surtia efeito, era necessário proceder à limpeza do bico por uma raspagem rápida. Espera-se que na operação de secagem com o SRRI o leito de inertes em movimento realize essa raspagem.

Em resumo, esse estudo revelou que a pasta de levedura é introduzida no cilindro em forma de um jato e que o escoamento do ar pode afetar a dinâmica do jato. Nos níveis utilizados de taxa mássica do ar, porém, não se verificou atomização da pasta. Isso resultou na percolação da pasta pelo leito de inertes, obtendo-se considerável área molhada. Espera-se, portanto, na operação de secagem com o SRRI definitivo, uma distribuição de levedura pelo leito equivalente à obtida quando se alimentou o material pelas duas primeiras janelas do cilindro, na operação em regime de bateladas (SANTOS et alii, 1993). Essa dinâmica de distribuição da pasta permitirá que o SRRI funcione conforme o princípio de operação de secagem com corpos inertes (STRUMILLO & KUDRA, 1986) e via contato-sorção (KUDRA, 1992). Com alimentação intermitente da pasta, alternativa à modalidade de alimentação contínua, o movimento dos inertes terá a função adicional de manter o bico alimentador livre de levedura seca no período de interrupção da alimentação.

#### 6. DINÂMICA E ARRASTE DOS INERTES DE CERÂMICA

Para testar o funcionamento dos seus componentes, o SRRI foi posto em rotação (33,0rpm) com ar escoando a 7,53kg/min, por um período de tempo de 5min. Interrompendo-se a rotação do SRRI e o escoamento do ar, constatou-se, após abertura das janelas do secador, que tinha ocorrido arraste das esferas do leito de secagem. A quarta e a terceira câmaras estavam literalmente repletas de esferas, ao passo que a primeira e a segunda apresentavam quantidades significativamente inferiores. Essa constatação levou à realização de estudos de arraste dos corpos inertes. Utilizaram-se, além das esferas do leito de 0,02m de diâmetro, esferas mais pesadas, de

0,03 e 0,04m de diâmetro. O objetivo foi estabelecer os limites máximos de taxas de escoamento do ar. A partir dessa constatação experimental, passou-se a considerar o diâmetro das esferas de cerâmica como uma variável importante neste trabalho, já que esferas de diâmetros maiores poderiam permitir o escoamento do ar a taxas mássicas mais altas, dependendo da relação entre as forças de arrasto e gravidade associadas a cada esfera. O aumento da taxa do ar é interessante à medida que incrementa trocas de calor e massa na operação de secagem.

#### 6.1 Influência da Força de Arraste do Ar

Este estudo objetiva prever, através da análise dimensional, o comportamento dos três leitos (esferas de 0,02, 0,03 e 0,04m de diâmetro) quanto ao arraste pelo ar, de modo a orientar a especificação dos corpos inertes que deverão compor o leito.

A força resultante agindo sobre uma esfera é dada pela combinação entre a força da gravidade e a de arrasto do ar. Quando o diâmetro da esfera é aumentado, há um incremento tanto na força da gravidade, devido ao aumento da massa, como na de arrasto, devido ao aumento da área superficial da esfera. Assim, as relações entre as massas e entre as áreas de contato de esferas diferentes representam as relações entre as forças da gravidade e de arrasto que agem sobre elas, como indicado pelas Equações [4.2] e [4.3]. A relação entre essas equações é dada pela Equação [4.4], que indica o peso relativo de cada adimensional, de modo a orientar a especificação dos inertes que permitam a utilização de taxas de ar mais elevadas.

$$\Pi_{gee'} = \frac{F_{ge}}{F_{ge'}} = \frac{m_e}{m_{e'}} \quad [4.2]$$

onde:  $\Pi_{gee'}$  : adimensional relacionando as forças de gravidade entre as esferas "e" e "e";  
 $F_{ge}, F_{ge'}$  : forças da gravidade sobre a esfera "e" e "e'", dadas por  $m_e \cdot g$  e  $m_{e'} \cdot g$ , respectivamente; m: massa da esfera.

$$\Pi_{aee'} = \frac{F_{ae}}{F_{ae'}} = \frac{S_e}{S_{e'}} = \frac{D_e^2}{D_{e'}^2} \quad [4.3]$$

onde:  $F_{ae}, F_{ae'}$  : forças de arraste nas esferas "e" e "e'", dadas pela Equação [4.3a] (FOX &

MACDONALD, 1981; McCABE et alii, 1993):

$$F_{ae} = \frac{C_D \cdot \rho \cdot S_e \cdot v^2}{2} \quad [4.3a]$$

onde:  $C_D$  : coeficiente de arrasto (BENSON, 1991);

$\rho$  : massa específica do ar;

$v$  : velocidade do ar;

$S_e$  : área do círculo de diâmetro  $D_e$  (FOX & McDONALD, 1981).

$$GA_{ee'} = \frac{\Pi_{gee'}}{\Pi_{aee'}} = \frac{m_e \cdot D_{e'}^2}{m_{e'} \cdot D_e^2} = \frac{D_e}{D_{e'}} \quad [4.4]$$

onde:  $GA_{ee'}$  : relação do adimensional das forças de gravidade com o das forças de arrasto para esferas "e" e "e'";

$\Pi_{gee'}$  : adimensional relacionando forças de gravidade entre esferas "e" e "e'";

$\Pi_{aee'}$  : adimensional relacionando forças de arraste entre esferas "e" e "e'".

Aplicando-se as Equações [4.2], [4.3] e [4.4], para as esferas de 0,02, 0,03 e 0,04m de diâmetro, têm-se as expressões [4.5], [4.6] e [4.7], que indicam um comportamento, em termos do arraste do inertes, de cada um dos leitos de esferas de 0,03 e 0,04m, em relação ao leito de esferas de 0,02m de diâmetro. Utilizou-se o leito com inertes de 0,02m como referência porque nele se verificou primeiramente a ocorrência de arraste e por apresentar a maior área.

$$\Pi_{a32} = \frac{S_3}{S_2} = \frac{D_3^2}{D_2^2} = \frac{0,03^2}{0,02^2} = 2,25 \quad [4.5a]$$

$$\Pi_{g32} = \frac{m_3}{m_2} = \frac{44,73 \cdot 10^{-3}}{18,90 \cdot 10^{-3}} = 2,36 \quad [4.5b]$$

$$\Pi_{a42} = \frac{S_4}{S_2} = \frac{D_4^2}{D_2^2} = \frac{0,04^2}{0,02^2} = 4,00 \quad [4.6a]$$

$$\Pi_{g42} = \frac{m_4}{m_2} = \frac{129,22 \cdot 10^{-3}}{18,90 \cdot 10^{-3}} = 6,83 \quad [4.6b]$$

$$GA_{32} = \frac{\Pi_{g32}}{\Pi_{a32}} = \frac{2,36}{2,25} = 1,04 \quad [4.7a]$$

$$GA_{42} = \frac{\Pi_{g42}}{\Pi_{a42}} = \frac{6,83}{4,00} = 1,70 \quad [4.7b]$$

Nota-se que as esferas de 0,02 e 0,03m de diâmetro teriam um comportamento bastante semelhante, já que as relações das forças de gravidade, 2,25 (Equação [4.5a]), e de arrasto, 2,36 (Equação [4.5b]) são muito próximas, iguais a 1,04, como indicado pela equação [4.7a]. Isso indica que o aumento no diâmetro das esferas, de 0,02 para 0,03m, não implicaria em elevação significativa da taxa de ar.

Com respeito às esferas de 0,04m as relações mencionadas são significativamente distintas: 4,00 (Equação [4.6a]) para as forças da gravidade e 6,83 (Equação [4.6b]) para as forças de arrasto. A relação entre os adimensionais é igual a 1,70, como indicado na Equação [4.7b]. Esta análise prevê, portanto, que a predominância da força da gravidade sobre a de arraste deverá permitir um escoamento de ar a uma taxa significativamente maior à correspondente ao leito com esferas de 0,02m de diâmetro.

Este estudo, portanto, sugeriu que o leito com esferas de 0,03m de diâmetro deveria ser descartado, e que o leito com esferas de 0,04m poderia permitir que o ar escoasse a uma taxa mássica mais apropriada. Entretanto, esses resultados foram considerados apenas como indicativos, de modo a não se eliminar definitivamente o leito com esferas de 0,03m, que, como os outros leitos, submeteu-se a ensaios experimentais de arraste.

Os ensaios de arraste com os três leitos foram precedidos por estudos respectivos de dinâmica. Ocorreu que, como o dimensionamento do SRRI (geometria do corpo interno e velocidade de rotação) foi baseado nos estudos da dinâmica do leito de esferas de 0,02m de diâmetro, foi necessária a realização de novos estudos, com inertes de 0,03 e 0,04m de diâmetro.

## 6.2 Estudo da Dinâmica dos Leitos de Inertes com Diâmetros de 0,03 e 0,04m

Visto que o corpo interno definitivo do SRRI já tinha sido construído, conforme relato no Capítulo 3, consideraram-se apenas a rotação e o volume do leito das esferas como variáveis passíveis de ajuste.

Estabeleceu-se que o volume do leito seria determinado por um compromisso entre um valor mais alto, para compensar a diminuição da área superficial do leito decorrente do aumento do diâmetro das esferas, mas com limites, para não obstruir o jateamento da pasta de levedura, quando da operação do secador.

As movimentações de cada um dos dois leitos, em função de diversas velocidades do cilindro, foram registradas em filmes. Para o leito com inertes de 0,03m de diâmetro utilizaram-se velocidades do cilindro iguais a 27,71rpm, 31,07rpm, 33,14rpm, 34,98rpm, 35,29rpm, 36,69rpm e 36,97rpm e alturas representativas do volume do leito (z) de 0,115m, 0,120m e 1,125m. Para o leito com inertes de 0,04m de diâmetro as velocidades do cilindro foram 29,49rpm, 34,62rpm, 36,71rpm, 38,71rpm, 40,32rpm, 41,89rpm e 46,15rpm, e as alturas do leito (z) 0,115 e 0,120m.

A visualização do movimento permitiu concluir que os leitos não podem ter uma altura representativa do volume superior a 0,12m. Acima deste valor ocorria obstrução da região de jateamento da alimentação e falhas na formação de cascatas dos inertes, descaracterizando uma dinâmica satisfatória do leito. Essa altura limite corresponde a uma massa de leito igual a 24,36kg, para as esferas de 0,033m, e 24,12kg, para as esferas de 0,04m.

Para o cilindro a 36,69rpm (leito com inertes de 0,03m de diâmetro) e a 40,32rpm (leito com inertes de 0,04m) verificou-se uma boa combinação dos efeitos cascata e rolagem dos inertes, sem se comprometer o jateamento da alimentação pastosa. Na Figura 4.9 apresentam-se as vistas correspondentes às dinâmicas consideradas satisfatórias para os leitos estudados.

## 6.3 Estudo do Arraste dos Inertes

Foram conduzidos testes com os três leitos de esferas para estabelecer-se a máxima taxa de ar (taxa limite) em que não ocorria arraste das esferas. Após intervalos definidos de tempo

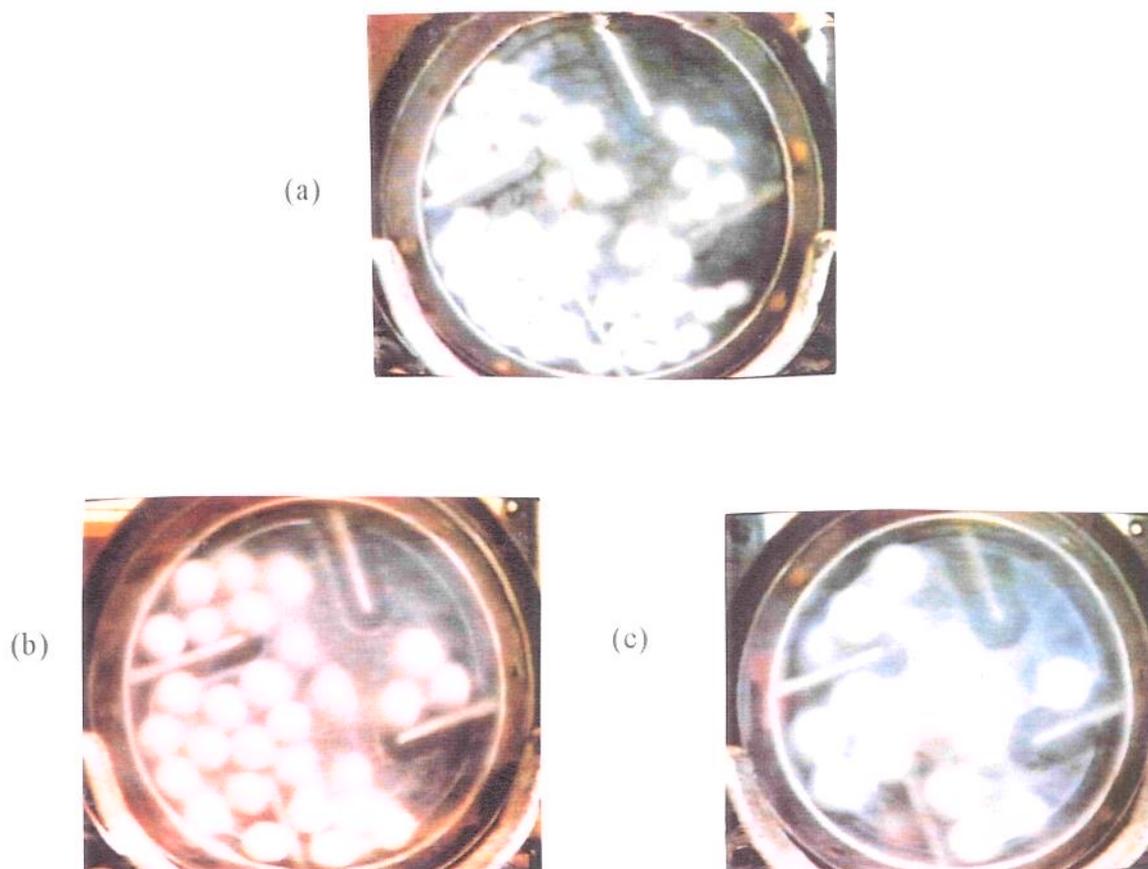


Figura 4.9. Vistas das dinâmicas satisfatórias do leito de inertes com diâmetro: (a) 0,02m (cilindro a 33,00rpm e  $z=0,105\text{m}$ ); (b) 0,03m (cilindro a 36,69 rpm e  $z=0,120\text{m}$ ); (c) 0,04m (cilindro a 40,32rpm e  $z=0,120\text{m}$ ).

de operação interrompiam-se a rotação e o escoamento do ar, e media-se o nível do leito de inertes (distância vertical entre a parede do cilindro e o leito) em cada uma das quatro câmaras de secagem do SRRI, em três posições diferentes. A média aritmética destas três medidas em cada câmara foi tomada como critério de avaliação do arraste dos inertes. Em todos os testes, nos dez minutos finais de operação, o escoamento de ar era interrompido, mantendo-se o cilindro em rotação.

#### A. Esferas de 0,02m de Diâmetro

Nas Figuras 4.10 e 4.11 têm-se os resultados dos ensaios com esferas de diâmetro 0,02m. As quatro curvas de cada figura referem-se ao arraste das esferas nas quatro câmaras do cilindro

e o afastamento entre as curvas denota o grau do arraste dos inertes pelo ar em escoamento.

Na Figura 4.10, que representa condições operacionais em que houve arraste acentuado, observa-se que na primeira e quarta câmaras ocorreram as maiores variações dos níveis de leito (aumento na primeira e redução na quarta), ao passo que na segunda e terceira câmaras houve tendência de manutenção destes níveis. Com taxa de ar de aproximadamente 2,51kg/min observou-se variação na altura do leito da ordem de 2,0cm (Figura 4.11a). Com taxas menores ainda, 1,96kg/min (Figura 4.11b), praticamente não se constatou uma tendência de arraste definida. Como condição de operação, portanto, considerou-se o arraste provocado na taxa de 2,51kg/min aceitável, e essa taxa foi definida como limite para os inertes de 2.0cm de diâmetro.

Em todas as figuras, principalmente na Figura 4.10, representativa de arraste mais acentuado, nota-se o nível do leito tendendo a um valor constante. Porém, houve recuperação do nível inicial quando o escoamento do ar foi interrompido, entre 60 a 70min de operação, indicando a não influência da geometria do corpo interno do SRRI no arraste dos inertes.

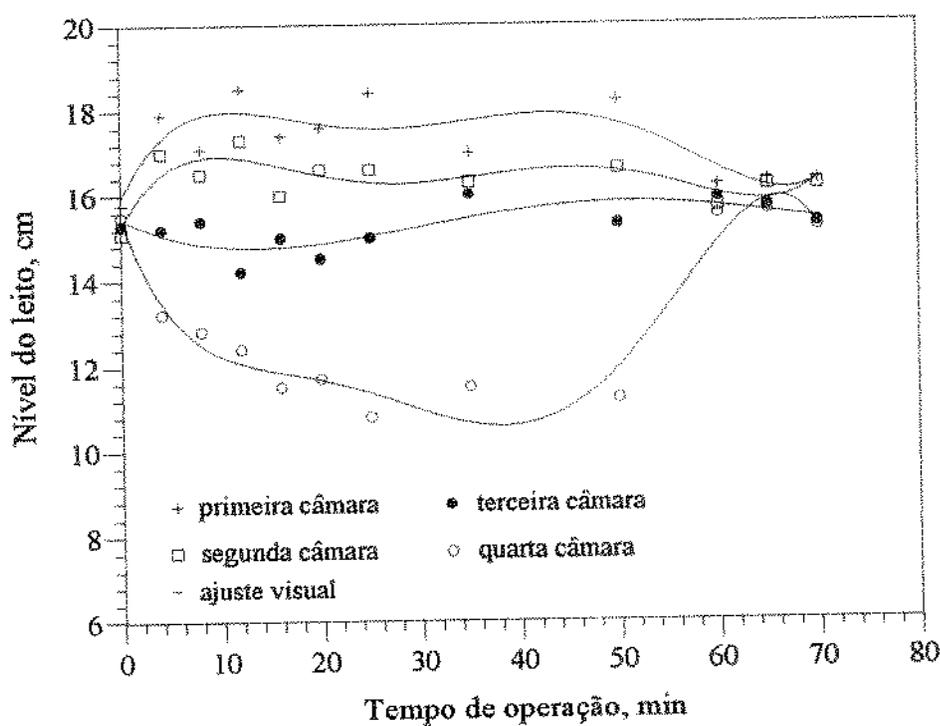


Figura 4.10 Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de cerâmica de diâmetro 0,02m e SRRI a 33,0rpm e ar a 2,96kg/min.

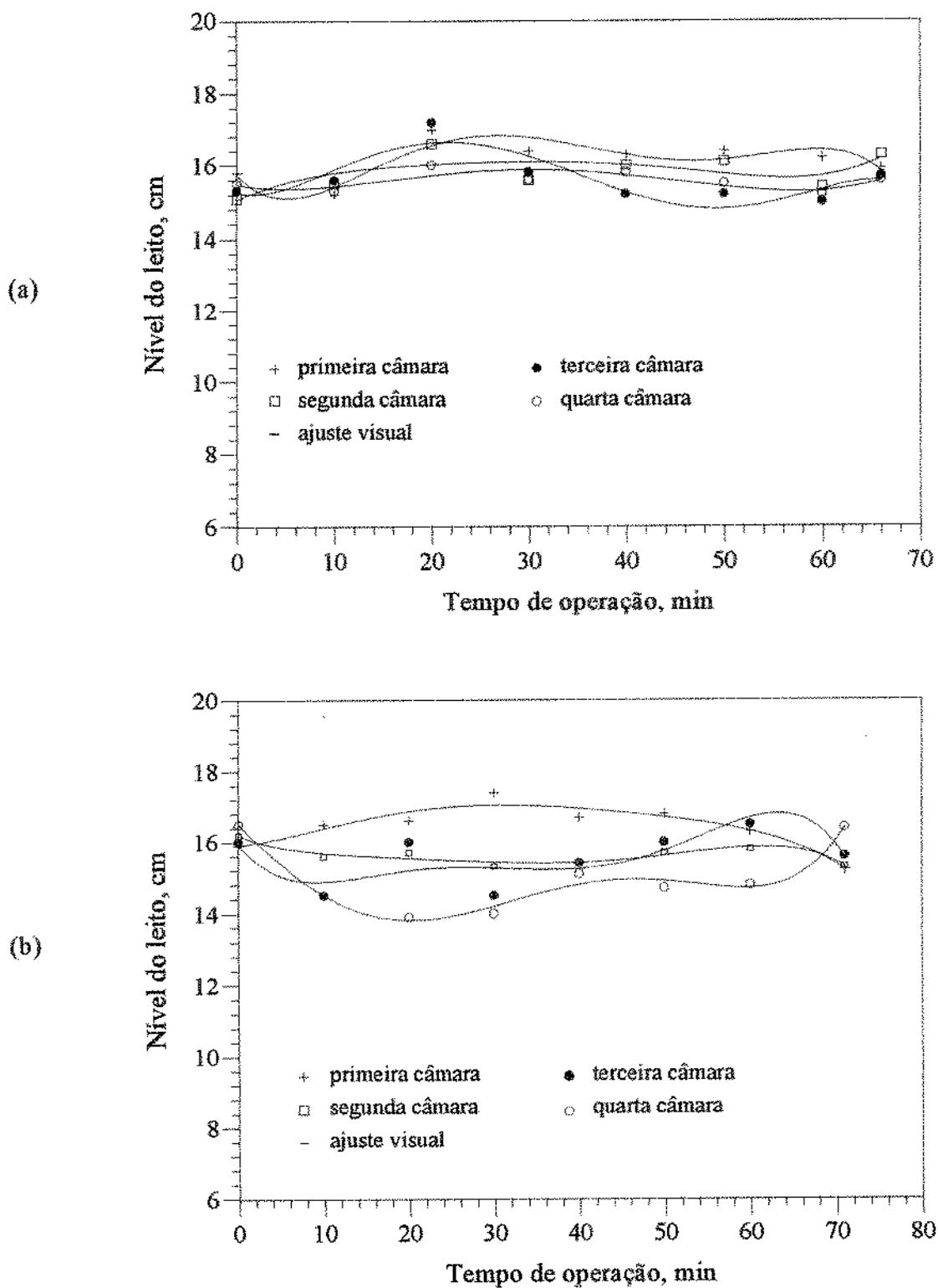


Figura 4.11. Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de cerâmica de diâmetro igual a 0,02m, com o SRRI a 33,0rpm e o ar a: 2,51kg/min (a) e 1,96kg/min (b).

### B. Esferas de 0,03m de Diâmetro

Nas Figuras 4.12 e 4.13 mostram-se os resultados, podendo-se notar a ocorrência de um comportamento análogo ao relatado no item anterior.

Considerou-se a taxa mássica limite do ar como 2,70kg/min (Figura 4.13). Constatou-se que o leito, embora com esferas de diâmetro superior a 0,02m, não apresentou aumento significativo da taxa mássica limite do ar, ou seja, 7,57% superior aos 2,51kg/min do leito com esferas de 0,02m. Isso demonstra que, como sugerido nos estudos do arraste (Seção 4.6.1), o comportamento do leito com inertes de 0,03m foi análogo ao do verificado com o leito de inertes de 0,02m.

### C. Esferas de 0,04m de Diâmetro

Com o objetivo de verificar que a geometria do corpo interno do secador associada à forma dos inertes (rigorosamente não esférica, APÊNDICE A) não teria influência na movimentação axial dos mesmos, o cilindro foi posto em rotação sem escoamento de ar. Os resultados são dados na Figura 4.14, e indicam que não houve deslocamento axial do leito.

Um ensaio realizado com ar a 5,01kg/min indicou, após apenas 10,0min de operação, que a primeira câmara estava vazia e a quarta toda ocupada pelos inertes. Ensaio realizado a menores taxas de ar (Figura 4.15) permitiram definir o valor limite de 3,08kg/min para o leito de inertes de 0,04m de diâmetro.

Assim, o aumento no diâmetro dos inertes do leito de secagem resultou em um incremento de 22,70% na taxa de escoamento do ar: 2,51kg/min (esferas de 0,02m) contra 3,08kg/min (esferas de 0,04m).

Conclusivamente, os leitos com inertes de 0,03m e 0,04m implicaram pequenos incrementos na taxa limite do ar (2,70kg/min, para esferas de 0,03m; 3,08kg/min, para esferas de 0,04m), relativamente àquela verificada com o leito de esferas de 0,02m (2,51kg/min). Tais incrementos (7,57%, esferas de 0,03m; 22,7%, esferas de 0,04m) foram considerados insatisfatórios com base no critério adotado. Segundo esse critério, a perda de área de troca (causada pelo aumento do diâmetro dos inertes) deveria ser compensada por um incremento

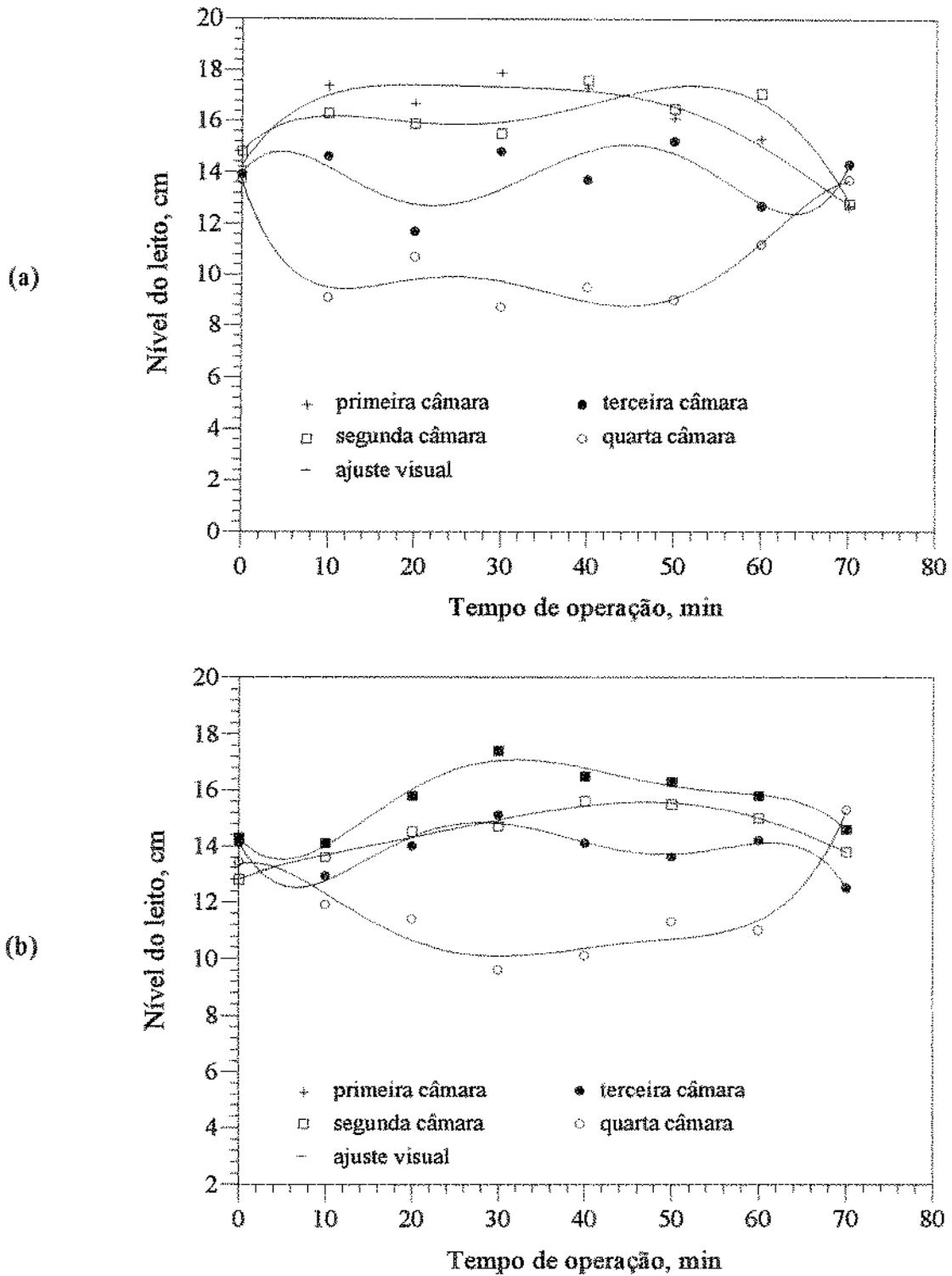


Figura 4.12. Nível leito nas câmaras, em função do tempo de peração, para esferas de diâmetro igual a 0,03m, com o SRRI à rotação de 36,69rpm e o ar a: 3,22kg/min (a) e 2,82kg/min (b).

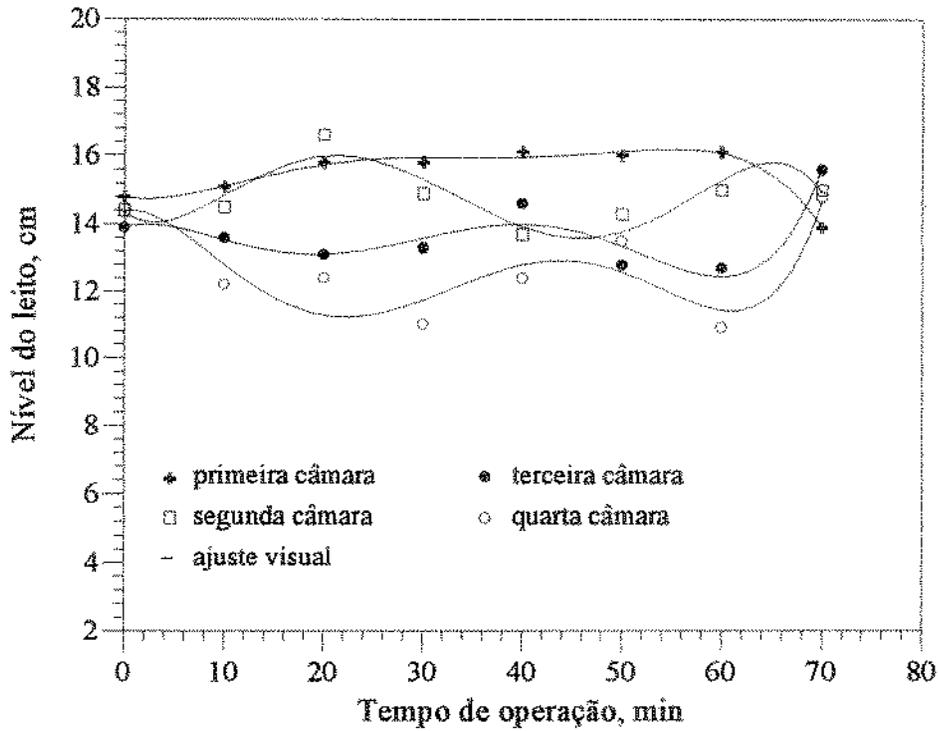


Figura 4.13. Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de cerâmica de diâmetro igual a 0,03m, com SRRI a 36,69rpm e ar a 2,70kg/min.

significativo, que não houve, na taxa de ar de secagem, o que se refletiria em aumento de transferência de calor e massa entre o leito e o ar de secagem. Esse aumento referenciou-se à taxa de 3,80kg/min, utilizada em ensaios de secagem com alimentação de levedura em bateladas no SRRI (SANTOS et alii, 1992), em que se obteve pó de levedura com umidade de aproximadamente 5,0%.

## 7. DINÂMICA E ARRASTE DE INERTES DE AÇO

Inicialmente utilizaram-se esferas de aço de moinhos de bolas, com base em pesquisa feita junto à indústria de cimento (COMPANHIA MINAS OESTE DE CIMENTO, 1995). Em um segundo momento, foram empregadas esferas de aço de rolamentos mecânicos.

### 7.1 Simulação da Influência da Força de Arraste do Ar

Para especificar um diâmetro das esferas de aço para compor o leito foi empregada a

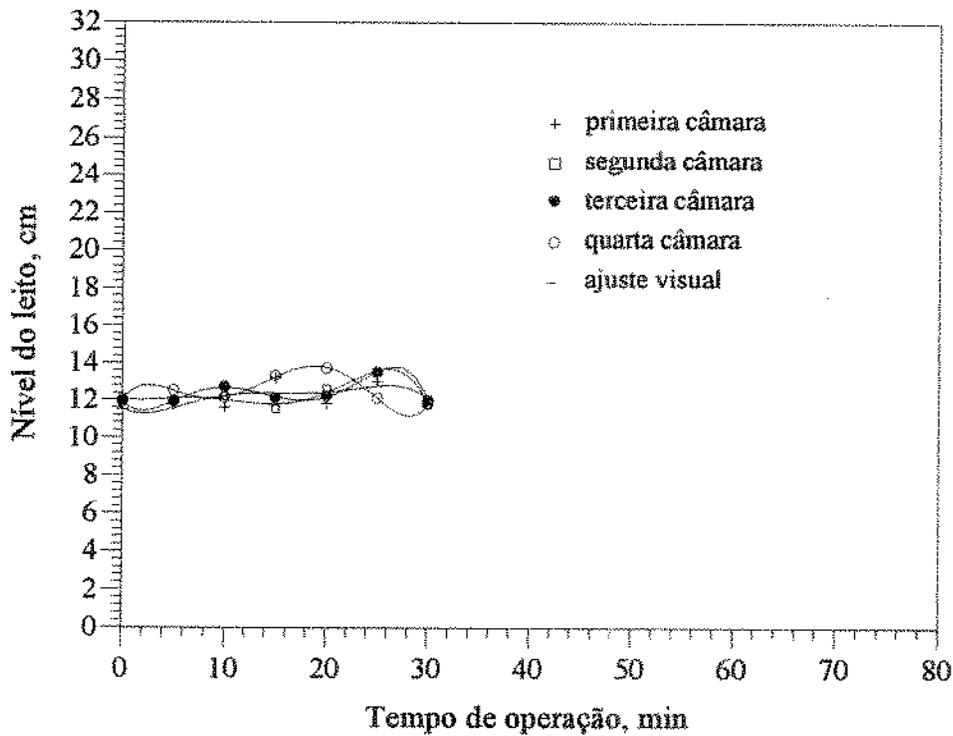


Figura 4.14. Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de diâmetro 0,04m, SRRI a 40,32rpm, sem escoamento de ar.

Equação [4.4], com a esfera "e" considerada como a de aço e a esfera "e'" como a de cerâmica de diâmetro 0,02m. O adimensional foi referenciado à esfera de cerâmica de 0,02m pelas mesmas razões assinaladas no Seção 4.6.1. Com as devidas substituições a Equação [4.4] resulta na Equação [4.8].

$$GA_{m2} = \frac{\Pi_{gm2}}{\Pi_{am2}} = \frac{m_m \cdot D_2^2}{m_2 \cdot D_m^2} = 0,2116 \cdot \frac{m_m}{D_m^2} \quad [4.8]$$

onde:  $m_m$  : massa da esfera de metal (g);

$D_m$  : diâmetro da esfera de metal (cm).

Na Tabela 4.5 apresentam-se valores da massa de esferas de aço de diversos diâmetros e os respectivos valores de  $GA_{m2}$ , obtidos através da Equação (4.8). Os valores de  $GA_{m2}$  para as esferas de cerâmica foram obtidos das Equações (4.7a) e (4.7b), e são mostrados como referência para a avaliação do arrasto das esferas de aço. As esferas de aço e de cerâmica indicadas foram

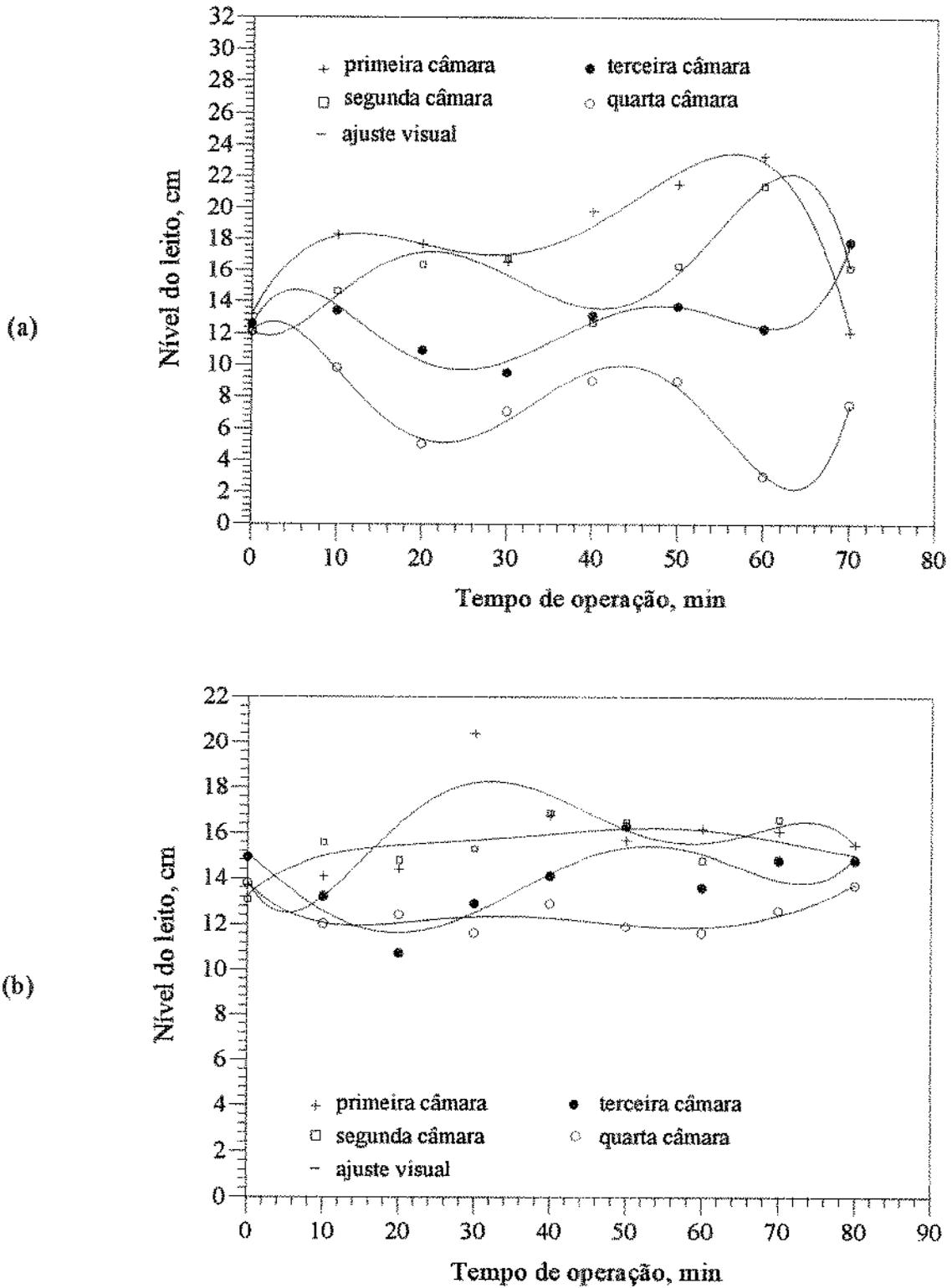


Figura 4.15. Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de diâmetro 0,04m, SRRI a 40,32rpm e ar a: 3,88kg/min (a) e 3,08kg/min (b).

Tabela 4.5. Relação do adimensional da força de gravidade com o da força de arrasto para as esferas do leito.

material	diâmetro.10 <sup>2</sup> (m)	massa.10 <sup>3</sup> (kg)	GA
cerâmica*	2,00	18,90	1,00
	3,00	44,73	1,04
	4,00	129,22	1,70
aço (esferas de rolamentos mecânicos)**	1,35	9,94	1,15
	2,07	35,61	1,75
	2,38	54,81	2,04
	2,54	66,63	2,18
	2,70	79,87	2,32
	2,85	94,75	2,46
	3,00	11,56	2,62
	3,17	129,79	2,73
aço (esferas de moinhos)***	2,90	100,43	2,52
	3,00	110,22	2,59
	3,20	126,80	2,62

\* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 87,0%; ágata e cerâmica comum (NGK, 1993).

\*\* aço SAE-52100: C: 0,09 - 1,05%; Cr: 1,40 - 1,65; Si: 0,15 - 0,35%; Mn: 0,25 - 0,35%; P < 0,03%; S < 0,025% (NSK, 1995).

\*\*\* C: 2,7%; Cr: 19,3%; Mn: 0,5%; Si: 0,5% (MAGOTTEAUX, 1995).

pesadas em balança analítica. Os valores de GA para as esferas de aço de 0,020m (1,75) e para as de cerâmica de 0,040m (1,70) indicam que elas teriam um mesmo comportamento, em termos do arraste pelo ar. Como para as esferas de cerâmica de 0,04m mediu-se uma taxa limite do ar

de 3,08kg/min, optou-se, aqui, pelo emprego de esferas de aço de 0,03m de diâmetro médio ( $\tau=6,28 \cdot 10^{-6}m$ ) (APÊNDICES A e C.3.2) na expectativa da referida taxa limite atingir um valor em torno dos 3,80kg/min. A utilização de esferas com diâmetros elevados deve ser considerada com restrições. Além de provocar a diminuição da área ativa do leito, o aumento do diâmetro das esferas implica a elevação da massa do mesmo, o que pode sobrecarregar o sistema motor e acarretar danos ao corpo interno do cilindro na operação do sistema.

## 7.2 Esferas de Moinhos de Bolas

A interação com a indústria de cimento (COMPANHIA MINAS OESTE DE CIMENTO, 1995), em que se empregam corpos moedores esféricos de aço nos moinhos de bola, e a informação do fabricante desses corpos (MAGOTTEAUX, 1995), indicaram que os mesmos poderiam ser empregados no SRRI.

### A. Estudo da Dinâmica dos Inertes

Previamente à determinação da taxa limite do ar para o leito com inertes de aço de diâmetro nominal de 0,03m (diâmetro de Sauter de 0,0311m, APÊNDICE A.3) procedeu-se à realização dos testes de dinâmica do leito com esses inertes. Isso para a determinação da velocidade de rotação do cilindro do SRRI para o novo leito de inertes. O SRRI foi desacoplado da instalação de secagem, substituindo-se a placa metálica perfurada, voltada para o sistema de aquecimento e escoamento de ar, por uma placa de acrílico, o que possibilitou a visualização e a filmagem do movimento do leito quando posto em rotação o SRRI.

Utilizou-se o volume de leito representado por  $z=0,125m$ , com base nos estudos de dinâmica dos inertes (Seção 4.6.2). A esse volume correspondeu a massa de esferas de 53,269kg.

Quanto às velocidade de rotação do cilindro foram utilizados os valores 31,21rpm; 31,62rpm; 33,50rpm; 35,88rpm e 38,88rpm.

Os resultados das visualizações dos filmes indicaram que a dinâmica satisfatória do leito foi caracterizada com o cilindro a 31,62rpm, com volume de leito dado por  $z=0,125m$ . Na Figura 4.16 tem-se uma foto da referida dinâmica e uma outra do leito sem movimentação.

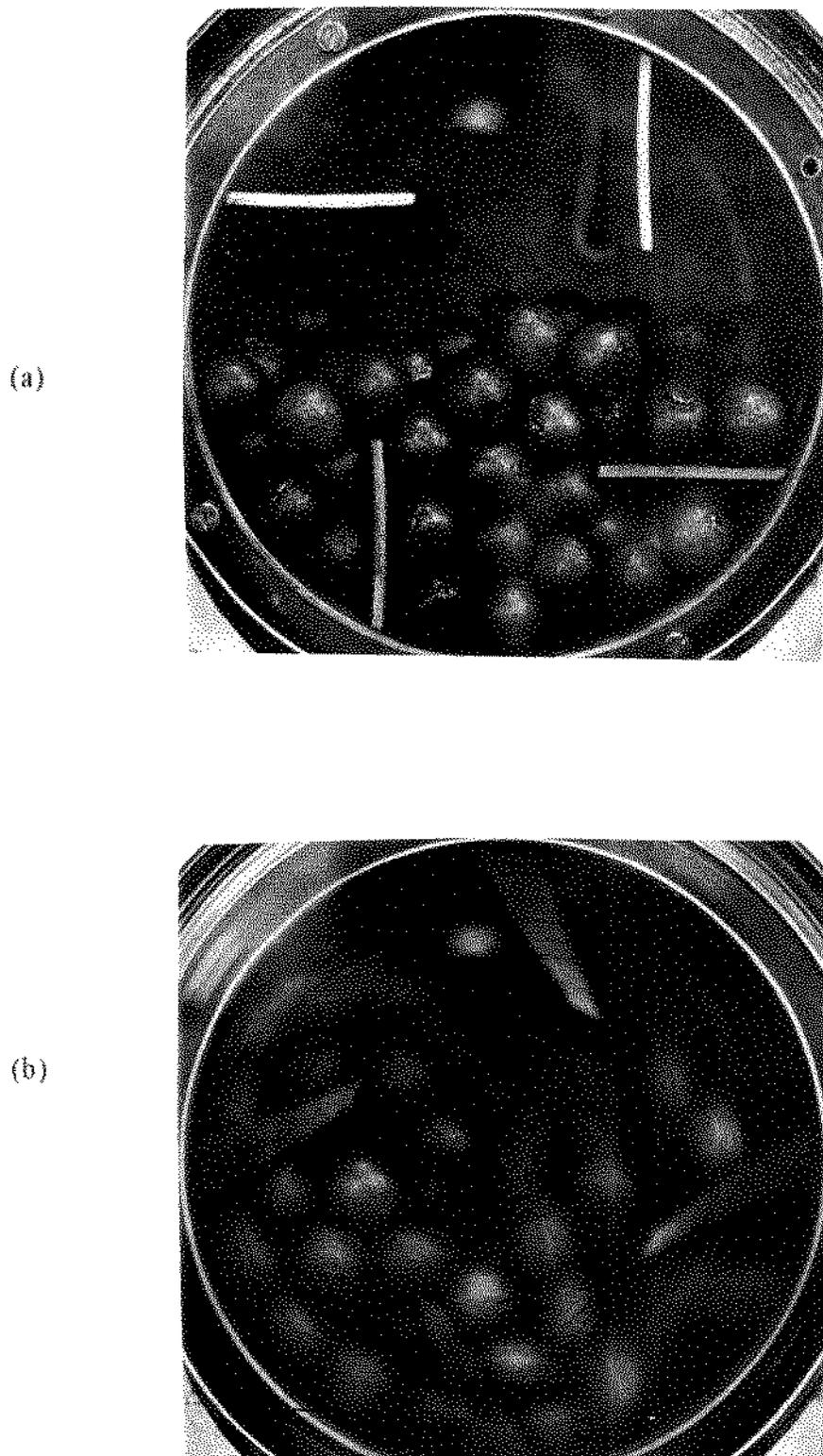


Figura 4.16. Leito de esferas de aço (moinhos) com diâmetro de Sauter 0,0311m, altura  $z=0,0125\text{m}$ : (a) vista sem movimentação; (b) vista da dinâmica satisfatória (cilindro a 31,62rpm).

### B. Estudo do Arraste dos Inertes

Nas Figuras 4.17 e 4.18 são apresentados os resultados dos experimentos, que mostram a variação do nível de inertes em cada câmara do SRRI, em função do tempo de operação do sistema. O grau de superposição do conjunto de curvas é o critério adotado como indicativo do arraste dos inertes pelo ar em escoamento. Com base nesse critério, observando-se as figuras, considerou-se que as curvas da Figura 4.18 representam a condição satisfatória de operação do sistema, tendo-se assim, a taxa limite do ar de secagem igual a 4,14kg/min, com o SRRI à rotação de 31,62rpm.

### C. Desgaste dos Inertes

Durante os testes de dinâmica do leito, verificou-se a ocorrência de material metálico (pó) nos coletores do ciclone e do sedimentador. Essa constatação causou surpresa, já que a resolução de se utilizarem as esferas de aço baseou-se em informação técnica do fabricante das mesmas (MAGOTTEAUX, 1995). Especificamente no coletor do ciclone, o material consistia literalmente de um pó muito escuro, identificado como metálico apenas após ter sido submetido a um campo magnético por meio de imã. No tempo total de operação empregado nos testes de dinâmica e arraste dos inertes com o secador rotatório, igual a 3,67h, foram coletadas as massas de 0,25kg no ciclone e 0,06kg no sedimentador, resultando, portanto, um desgaste total de 0,31kg.

Como esses níveis elevados de desgaste, além de proporcionarem um ambiente insalubre de trabalho, fatalmente comprometeriam os resultados de secagem da levedura termolisada (qualidade do pó; balanço de massa; leito de "inertes" com partículas de metal; etc), concluiu-se que o referido leito deveria ser descartado.

### 7.3 Esferas de Rolamentos Mecânicos

A inadequação do leito com esferas de aço utilizadas em moinhos de bolas, como relatado no item anterior, suscitou o emprego de esferas de aço de rolamentos mecânicos, visto que as mesmas já compuseram o leito do SRRI em trabalhos anteriores (ÁLVARES, 1990), não se tendo então verificado desgaste das mesmas.

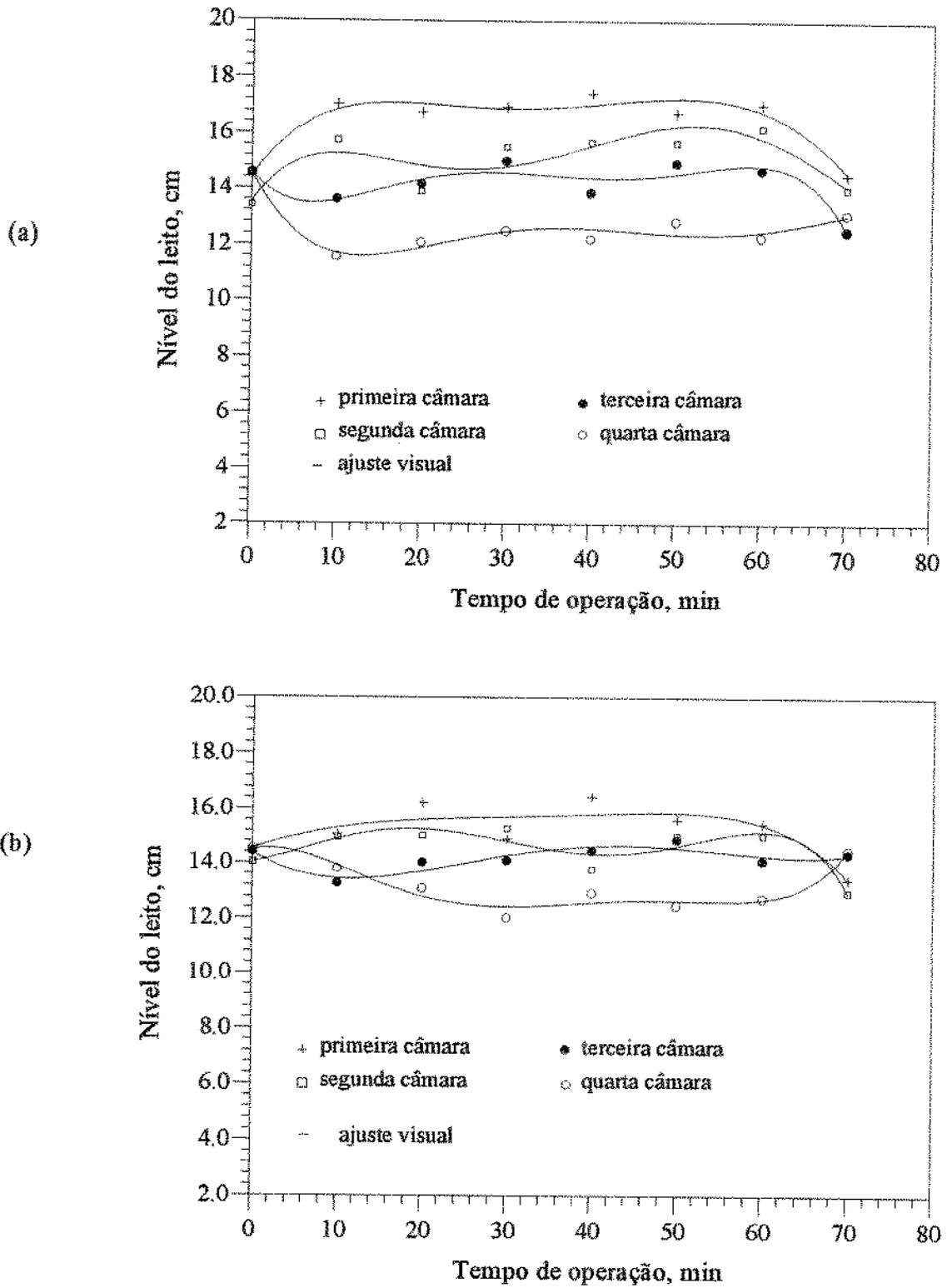


Figura 4.17. Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação. Esferas de aço de moinhos com diâmetro de Sauter 0,0311m, cilindro a 31,62rpm e ar a: 4,67kg/min (a) e 4,14kg/min (b).

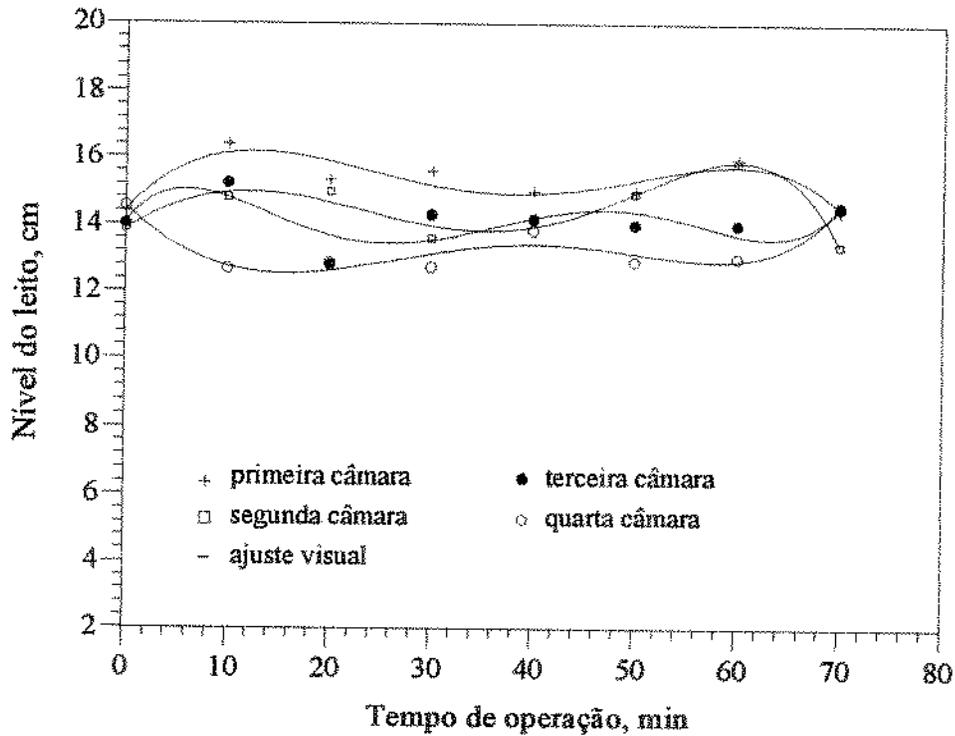


Figura 4.18. Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de aço de moinhos com diâmetro de Sauter 0,0311m. Cilindro a 31,62rpm e ar a 3,22kg/min.

Com base nos estudos de simulação do arraste dos inertes pelo ar de secagem (Tabela 4.5), sustentados agora pelos resultados dos estudos de arraste abordados no item anterior, concluiu-se que se deveriam empregar esferas de diâmetro aproximadamente igual a 0,03m.

O trabalho de busca cobriu um espectro de fornecedores que envolveu desde as empresas de ferro-velho até fabricantes de rolamentos mecânicos, passando por indústrias de diversos ramos, com a contribuição marcante da indústria do açúcar e álcool.

A disponibilidade das esferas conseguidas ditou a composição do leito, não se tendo aberto mão, contudo, do rigor de se referenciar os diâmetros ao valor de 0,03m. O leito, desta forma, compôs-se de esferas com diâmetros de 0,0270m; 0,0285m; 0,030m e 0,0317m, com um diâmetro de Sauter 0,029m (APÊNDICE A).

Definida a dimensão dos inertes, partiu-se para os estudos de dinâmica e arraste. Utilizou-se uma altura representativa de volume de leito igual a 0,125m, já empregada para o leito das

esferas de moinhos, com base nos estudos abordados na Seção 4.6.2, a que correspondeu a massa de 50,3032kg do leito.

##### A. Estudo da Dinâmica dos Inertes

Como no caso das esferas de moinhos, antes de fixar a taxa limite do ar de secagem, determinou-se a velocidade de rotação do cilindro que implicou uma dinâmica satisfatória do leito de inertes.

A velocidade de rotação foi determinada através da visualização das filmagens do leito realizadas em diversas rotações, com a mesma metodologia utilizada para as esferas de moinhos. Fizeram-se testes com as rotações 24,04rpm, 25,18rpm, 28,16rpm, 30,97rpm, 31,26rpm, 31,88rpm, 33,72rpm, 34,78rpm e 38,58rpm. A rotação escolhida, conforme critério já abordado (Seção 4.2), foi a de 34,78rpm.

##### B. Estudo do Arraste dos Inertes

Procedeu-se da mesma maneira que nos estudos do arraste dos outros leitos.

Como os estudos de arraste com as esferas de moinho de 0,031m (diâmetro de Sauter) não indicaram ocorrência de arraste dos inertes a uma taxa de ar de 3,92kg/min (valor próximo dos 3,80kg/min referenciais), tomou-se essa taxa como referência para estudo do arraste das esferas de aço de rolamentos, já que os diâmetros e as massas específicas dos dois tipos de esferas são da mesma ordem de grandeza.

Os experimentos foram conduzidos com o ar a uma taxa mássica de 4,04kg/min. Na Figura 4.19 são apresentados os resultados dos ensaios, que mostram a variação do nível de inertes em cada câmara do SRRI, em função do tempo de operação do sistema. Nota-se que o grau de compactação das curvas denota que a taxa de ar com que se realizaram os testes não indicou arraste apreciável das esferas do leito.

Ensaio de arraste com o ar a 4,54kg/min confirmaram um arraste significativo das esferas, tendo-se observado a última câmara do SRRI repleta de inertes (nível de 0,078m) em contraste

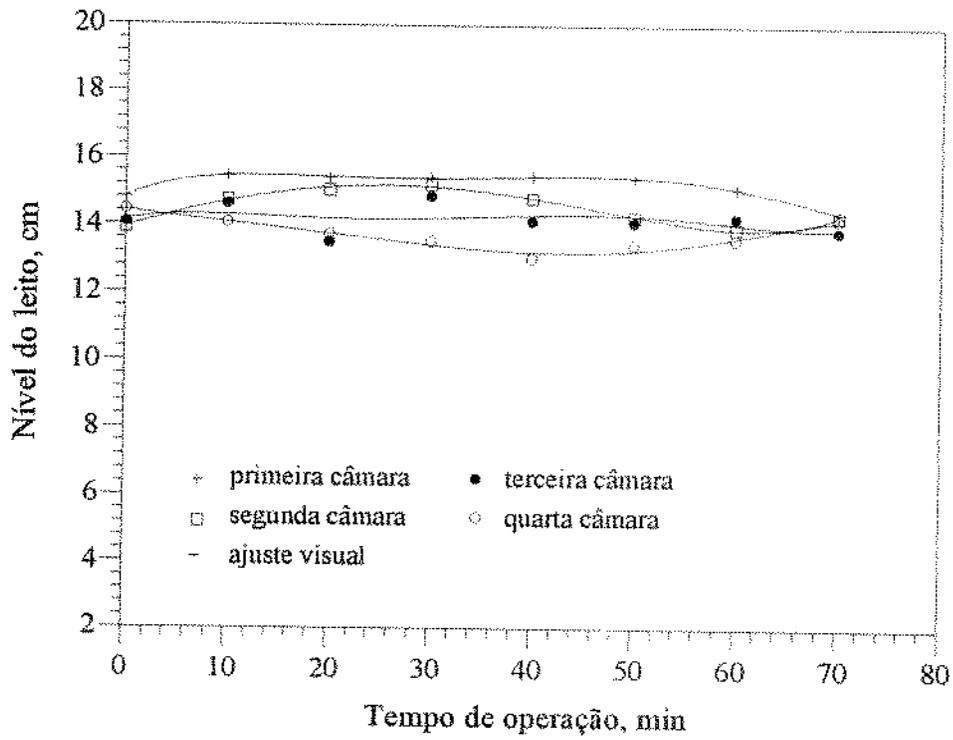


Figura 4.19. Nível do leito nas câmaras, em função do tempo de operação, para esferas de aço (rolamentos) de 0,029m de diâmetro (Sauter), com o SRRI a 34,78rpm e ar a 4,04kg/min.

com a primeira (nível de 0,180m), para um tempo de operação de apenas 2,0min.

Considerou-se, assim, a taxa de ar de 4,04kg/min como representativa da condição de arraste tolerável do leito de inertes, e, portanto, a de trabalho.

## 5. ENSAIOS DE SECAGEM

O objetivo dos ensaios de secagem, que constaram do processamento de levedura termolizada alimentada no SRRI, foi a otimização da capacidade de processamento do secador em função da temperatura e da taxa mássica do ar de secagem, e da taxa mássica de alimentação da levedura pastosa.

Ensaio com dois sistemas distintos de alimentação da pasta de levedura foram realizados: alimentação contínua e alimentação intermitente. Em ambos os sistemas o SRRI foi mantido em rotação contínua, o ar em escoamento ininterrupto e foram empregados dois tipos de leito, de acordo com os estudos de arraste (Seções 4.6.3 e 4.7.3): esferas de cerâmica de diâmetro 0,02m (SRRI a 33,00rpm) e o outro com esferas de aço de diâmetro 0,03m (SRRI a 34,78rpm).

A capacidade de processamento de material pelo SRRI e a qualidade do pó produzido, caracterizada pela sua umidade, constituíram os fatores referenciais limitantes das três variáveis mencionadas. Valores de umidade dentro da faixa 8,0 a 10,0% foram considerados como satisfatórios para comparação, por exemplo, com a secagem de levedura termolizada em turbo secador e secador de tambor, em que foram obtidas umidades do pó da ordem de 8,0% e 12,0%, respectivamente (RHEINBOLDT et alii, 1987). Conforme levantamento apresentado no APÊNDICE M, umidades da ordem de 10,0% correspondem a uma atividade de água entre 0,3 e 0,4, um nível que tem sido recomendado para armazenamento de produtos alimentícios (LEUNG, 1986). Com relação à levedura termolizada, umidades inferiores a 10,0% previnem a proliferação de microrganismos e retardam, ou mesmo detêm, a ocorrência de reações enzimáticas de degradação comprometedoras da qualidade do produto (TAEYME & LENGES, 1984; COPERSUCAR, 1995). Além da umidade do produto, outras variáveis - cor, teor protéico ou de vitaminas - poderiam também ser utilizadas como fatores limitantes das variáveis do processo, particularmente pelos esperados efeitos térmicos de mudança de coloração, desnaturação de proteínas (BOBBIO & BOBBIO, 1989) e degradação de proteínas do material produzido.

Os seguintes valores referenciais para as variáveis independentes foram utilizados: temperatura máxima do ar de secagem de 170°C, valor imposto pela capacidade do sistema de aquecimento de ar; taxas mássicas do ar de 2,51kg/min, esferas de 0,02m de diâmetro (Seção 4.6.3) e 4,04kg/min, esferas de diâmetro 0,03m (Seção 4.7.3); taxa mássica de alimentação da

levedura pastosa na faixa 5,0 a 10,0kg/h, baseada nos estudos de escoamento da pasta (Seção 4.5) e de secagem de levedura termolizada no SRRI em regime semicontínuo (SANTOS et alii, 1993).

## 1. SECAGEM COM INERTES DE CERÂMICA DE DIÂMETRO 0,02m

### 1.1 Alimentação Contínua de Levedura

Para avaliar a capacidade do SRRI de secar levedura alimentada continuamente, realizou-se um ensaio nas seguintes condições operacionais: ar a 135°C ( $t=0,19^\circ\text{C}$ , APÊNDICE C.12) e 2,51kg/min ( $t=0,045\text{kg}/\text{min}$ , APÊNDICE C.16); levedura com umidade 74,04% ( $t=2,55 \cdot 10^{-4}\%$ , APÊNDICE C.11) a 4,97kg/h ( $t=0,087\text{kg}/\text{h}$ , APÊNDICE C.17). A taxa de levedura é a mínima e a do ar é a máxima, predeterminadas para o leito com esferas de 0,02m e o secador a 33,0rpm, caracterizando a condição operacional hidrodinâmica mais favorável à obtenção de um produto com qualidade, isto é, com umidade da ordem de 8,0 a 10,0%. Contudo, no decorrer do ensaio, observou-se uma persistente condensação de umidade na superfície do coletor do sedimentador, indícios de uma operação insatisfatória, confirmada quando da determinação da umidade do produto, superior a 10,0%.

Após o final do ensaio, observou-se, pela janela de inspeção da primeira câmara do SRRI, a existência de um aglomerado de levedura sobre o leito de inertes, bem abaixo do bico alimentador. Ele consistia de um sólido em forma de elipsóide (semi-eixos 0,055 e 0,025m) com exterior esponjoso e interior semi-úmido.

Um outro ensaio, então, foi programado, mantendo-se o ar a 2,51kg/min e a levedura a 4,97kg/h, mas elevando-se a temperatura do ar para 170°C (maior valor admissível).

Os resultados experimentais da temperatura na entrada e em duas posições na saída, e a perda de pressão do ar no SRRI são mostrados nas Figuras 5.1 e 5.2. Verifica-se que, a partir de 35min, as temperaturas mantêm-se invariáveis com o tempo de operação, em torno de 70°C na saída do secador e 65°C na saída do ciclone, caracterizando o regime térmico permanente. A curva referente à variação de pressão sugere que o leito de inertes vai gradativamente acumulando massa de levedura, que parece tender à estabilidade (2,306cm de água) também no tempo de operação de 35,0min.

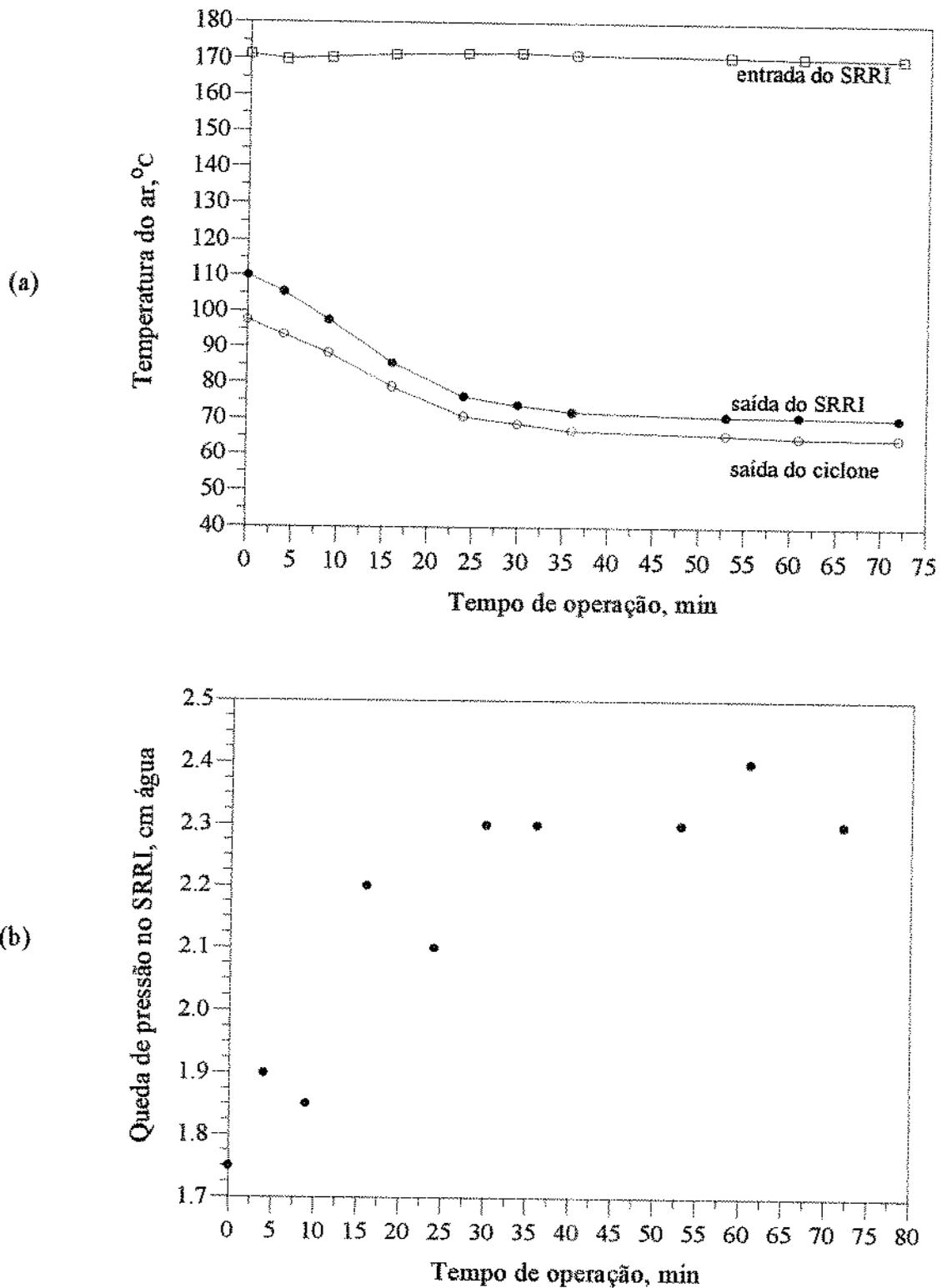


Figura 5.1. Temperatura (a) e queda de pressão (b) do ar ( $2,51\text{kg}/\text{min}$ ), em função do tempo, na operação contínua do SRR a  $33,0\text{rpm}$ . Esferas de cerâmica de  $0,02\text{m}$  de diâmetro.

A produção de levedura em forma de pó no sedimentador, ciclone e total, em função do tempo de operação, a partir da alimentação da levedura pastosa, é apresentada na Figura 5.2. Nota-se que a taxa de pó no ciclone é da ordem de 0,21kg/h (3,5g/min), e, no sedimentador, 0,84kg/h (14,0g/min), sendo, portanto, 1,05kg/h (17,5g/min) a produção total de levedura em pó. Os pontos experimentais da Figura 5.2 também sugerem que, a partir de um valor próximo de 35min, o sistema parece tender a entrar em regime.

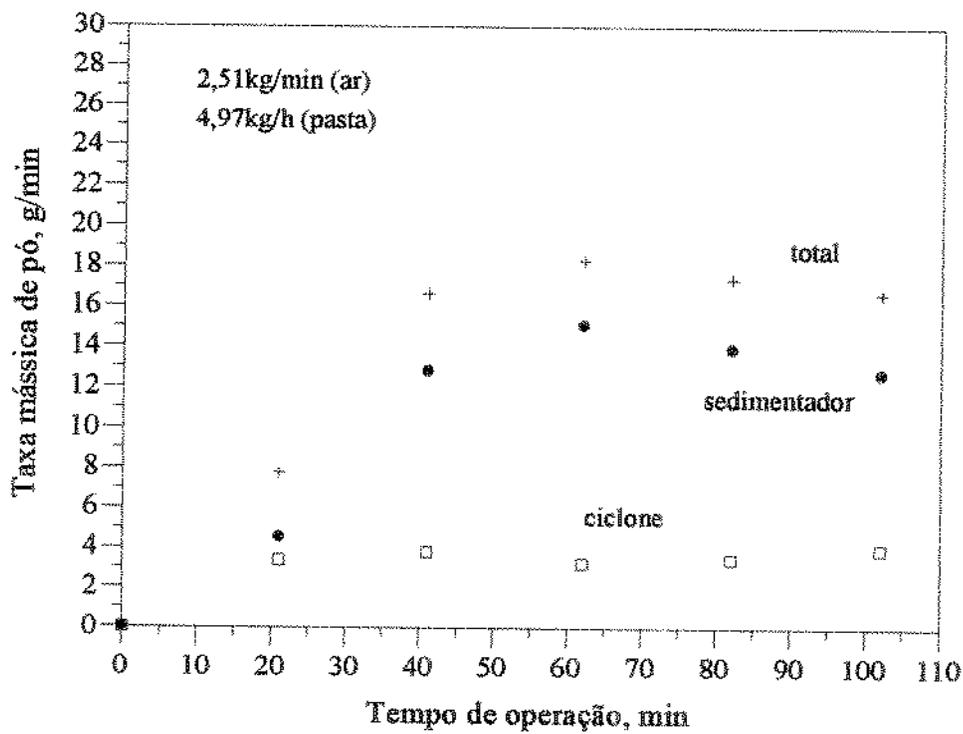


Figura 5.2. Produção de levedura em pó em função do tempo de operação. SRRI a 33,0rpm, esferas de cerâmica de diâmetro 0,02m, alimentação contínua da pasta e ar a 170°C.

A variação de umidade do pó coletado no ciclone e no sedimentador é apresentada na Figura 5.3. Nota-se que, embora o pó coletado do ciclone tenha umidade em torno de 10,0%, no sedimentador mostrou-se alta (15,0 a 20,0%).

Uma inspeção da primeira câmara do SRRI no final do ensaio novamente revelou a existência de uma massa sólida de levedura sobre o leito, como verificado no primeiro ensaio.

A umidade elevada do pó produzido e a massa sólida observada no leito de inertes indicaram ser insatisfatória a operação de secagem realizada nas condições operacionais do

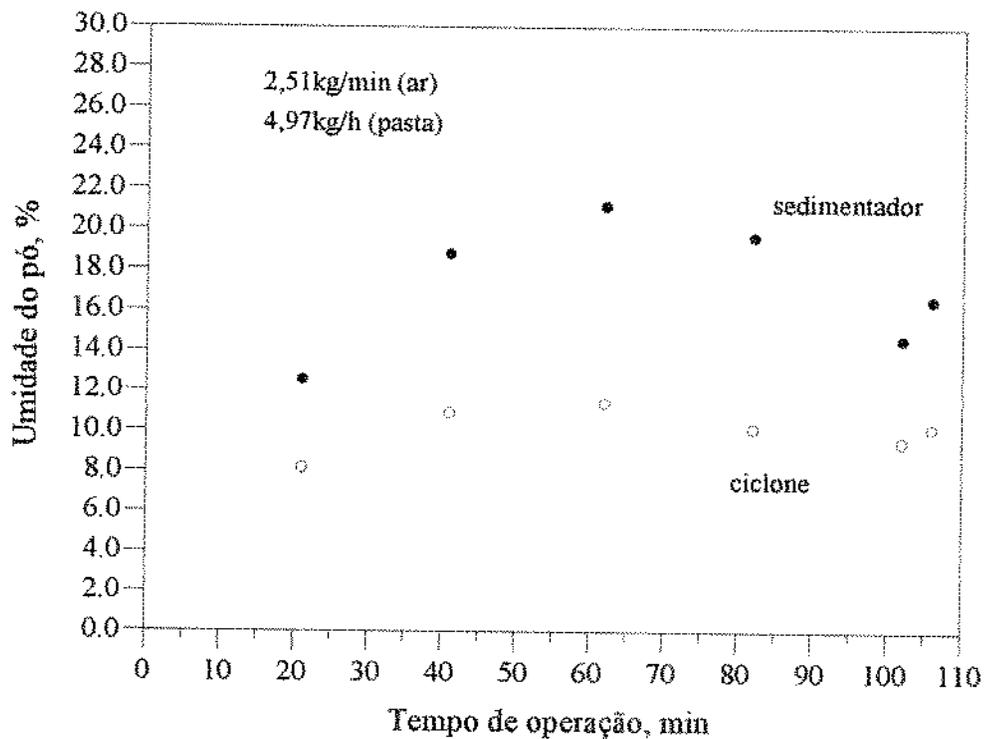


Figura 5.3. Umidade da levedura em pó em função do tempo de operação. SRRI a 33,0rpm, esferas de cerâmica de diâmetro 0,02m, alimentação contínua da pasta e ar a 170°C.

ensaio. Como estas variáveis já representam a condição operacional limite mais favorável à diminuição da umidade do produto, os ensaios de secagem com alimentação contínua de levedura pastosa com leito de inertes de 0,02m de diâmetro foram considerados esgotados.

Considerou-se então a alternativa de utilização deste leito, isto é, a operação com alimentação intermitente da pasta de levedura.

## 1.2 Alimentação Intermitente de Levedura

A expectativa de melhores resultados com alimentação intermitente de levedura está fundamentada na utilização de energia térmica acumulada nas esferas, nos períodos sem alimentação, e que se transmitiria por condução à película de levedura formada sobre os inertes (KUDRA, 1992).

Estabelecidos os regimes térmico e hidrodinâmico mantinha-se uma alimentação da pasta

por um período de tempo definido, chamado tempo da etapa de alimentação,  $t_a$ . Em seguida, interrompia-se a alimentação por outro período predefinido, o tempo da etapa de parada,  $t_p$ . Esse processo era repetido sequencialmente. No decorrer do ensaio o escoamento do ar de secagem e o movimento de rotação do SRRI não eram interrompidos.

Ensaio preliminares com alimentação intermitente de levedura foram programados para a determinação dos valores dos tempos de alimentação ( $t_a$ ) e de parada ( $t_p$ ) com que se produzisse levedura em pó com umidade dentro da faixa recomendada (8,0 a 10,0%).

A taxa mássica do ar de secagem foi mantida em 2,51kg/min, e dois níveis de temperatura do ar foram testados: 140°C e 170°C. Quanto à alimentação da levedura pastosa (74,04% de umidade), como a mesma era interrompida sistematicamente (etapas de parada), a taxa mássica de bombeamento não correspondia à taxa mássica efetiva de alimentação. Correlacionam-se essas variáveis na Equação (G.5) do APÊNDICE G. Utilizou-se a taxa de bombeamento de 11,97kg/h, capacidade máxima da bomba, para prevenir uma provável obstrução do duto alimentador pela pasta nele retida durante as paradas e exposta ao ar aquecido.

O tempo de alimentação foi definido por um pré-ensaio, com alimentação contínua da pasta e monitoramento da umidade do pó obtido, a cada minuto. Os resultados, apresentados na Figura 5.4a, foram obtidos com ar a 170°C e considerando como tempo zero o início do jateamento da pasta no SRRI, já em regime hidrodinâmico e térmico. Observa-se que, com cerca de 3,0min de operação, a umidade do produto é ligeiramente superior a 10,0%, o valor definido como adequado. Fixou-se, portanto, por segurança,  $t_a=2,5$ min.

Quando esse mesmo ensaio foi repetido para o ar a 140°C, mantendo-se as taxas do ar e da pasta, obtiveram-se resultados menos favoráveis, apresentados na Figura 5.4b. Pela figura observa-se que, já nos primeiros minutos de operação, a umidade do produto se situava em torno de 12,0%.

Foram programados, então, dois ensaios completos de secagem com  $t_a=2,5$ min, com a bomba à vazão 11,97kg/h de levedura, e ar a 170°C e 2,51kg/min. O primeiro com tempo de parada ( $t_p$ ) de 4,5min, e o segundo de 6,0min. No primeiro, alimentando-se levedura à taxa mássica de 4,27kg/h ( $t_a=2,5$ min e  $t_p=4,5$ min, APÊNDICE G), obteve-se um pó com umidade

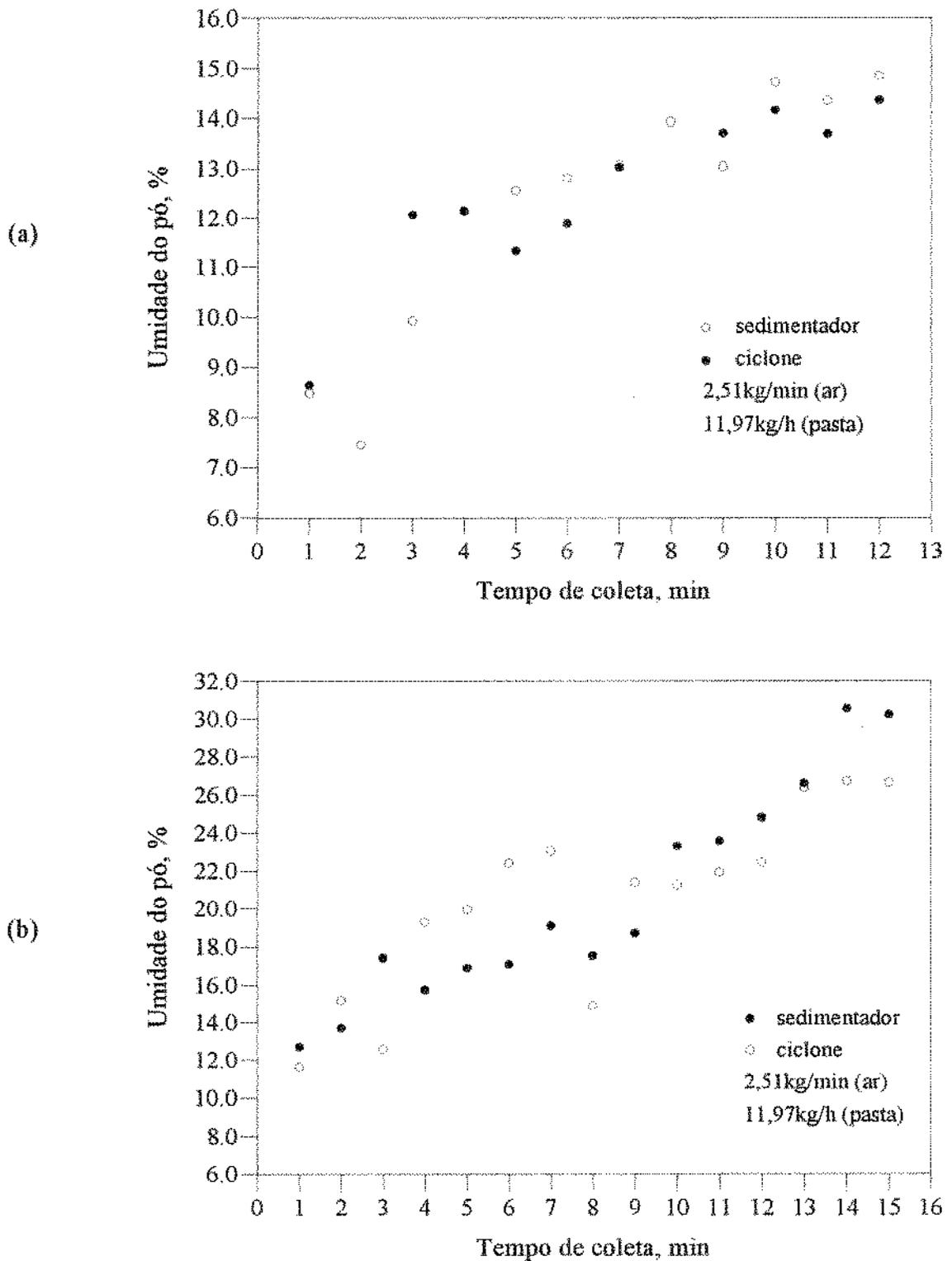


Figura 5.4. Umidade da levedura em pó em função do tempo de operação contínua. SRRI com inertes de cerâmica. Alimentação contínua da pasta com 74,04% de umidade; ar a 170°C (a) e a 140°C (b).

ligeiramente acima da faixa recomendada. Ao se proceder à realização do segundo ensaio, foi verificado que o duto alimentador, mesmo com limpeza mecânica realizada por meio de um arame, durante as etapas de parada, apresentou entupimento, a ponto de impedir a alimentação da pasta. Diante do agravamento do problema de entupimento do duto alimentador, já abordado (Seção 4.5), e do fato das umidades do pó obtido no primeiro ensaio estarem próximas da faixa satisfatória, considerou-se o mesmo como que representativo das condições operacionais ótimas. Os dados experimentais relativos a esse ensaio são mostrados nas Figuras 5.5 a 5.8 e analisados a seguir.

A Figura 5.5 apresenta as temperaturas na entrada e saída do SRRI e na saída do ciclone, e a queda de pressão no SRRI, durante seu tempo de operação. A temperatura média de entrada resulta em  $170,0^{\circ}\text{C}$  ( $\tau=0,63^{\circ}\text{C}$ , APÊNDICE C.12). Nota-se que, a partir de 15min, estabeleceu-se o regime térmico permanente, com as temperaturas médias nas saídas do secador e do ciclone, iguais a  $95,1^{\circ}\text{C}$  ( $\tau=0,71^{\circ}\text{C}$ , APÊNDICE C.12) e  $85,6^{\circ}\text{C}$  ( $\tau=0,62^{\circ}\text{C}$ , APÊNDICE C.12), respectivamente. As oscilações que se notam nas curvas representativas das temperaturas devem-se aos abalos térmicos e hidrodinâmicos causados após cada etapa de alimentação e parada, quando é aberta a janela para varredura do pó que se deposita entre o sedimentador e o ciclone (Figura 3.7, Item 36), sendo varrido para o sedimentador. Ocorre que parte do material em pó produzido não é depositado no sedimentador e nem atinge o ciclone. A queda de pressão no SRRI manteve-se dentro do intervalo 16,0 a 16,3cm de água, indicando um comportamento dinâmico estável do leito de inertes, independentemente das etapas de alimentação (inertes com a massa da pasta) e de parada (inertes gradativamente livres da levedura). A queda de pressão média foi 16,15cm de água, com incerteza de 0,03cm de água (APÊNDICE C.13).

Na Figura 5.6 são dadas as produções (taxas mássicas) de levedura em pó no ciclone e no sedimentador em função do tempo de operação. Nota-se que com o tempo de 15,0min estabeleceu-se o regime permanente de operação para ambas as curvas (alimentação e parada). A taxa mássica média total de pó no sedimentador é  $0,295\text{kg/h}$  ( $\tau=0,037\text{kg/h}$ , APÊNDICE C.14), com  $0,226\text{kg/h}$  ( $\tau=0,021\text{kg/h}$ , APÊNDICE C.14) nas paradas e  $0,067\text{kg/h}$  ( $\tau=0,017\text{kg/h}$ , APÊNDICE C.14) nas alimentações. No ciclone tem-se a taxa mássica média total de  $0,353\text{kg/h}$  ( $\tau=0,037\text{kg/h}$ , APÊNDICE C.14), com  $0,269\text{kg/h}$  ( $\tau=0,027\text{kg/h}$ , APÊNDICE C.14) nas paradas e  $0,083\text{kg/h}$  ( $\tau=0,017\text{kg/h}$ , APÊNDICE C.14) nas alimentações.

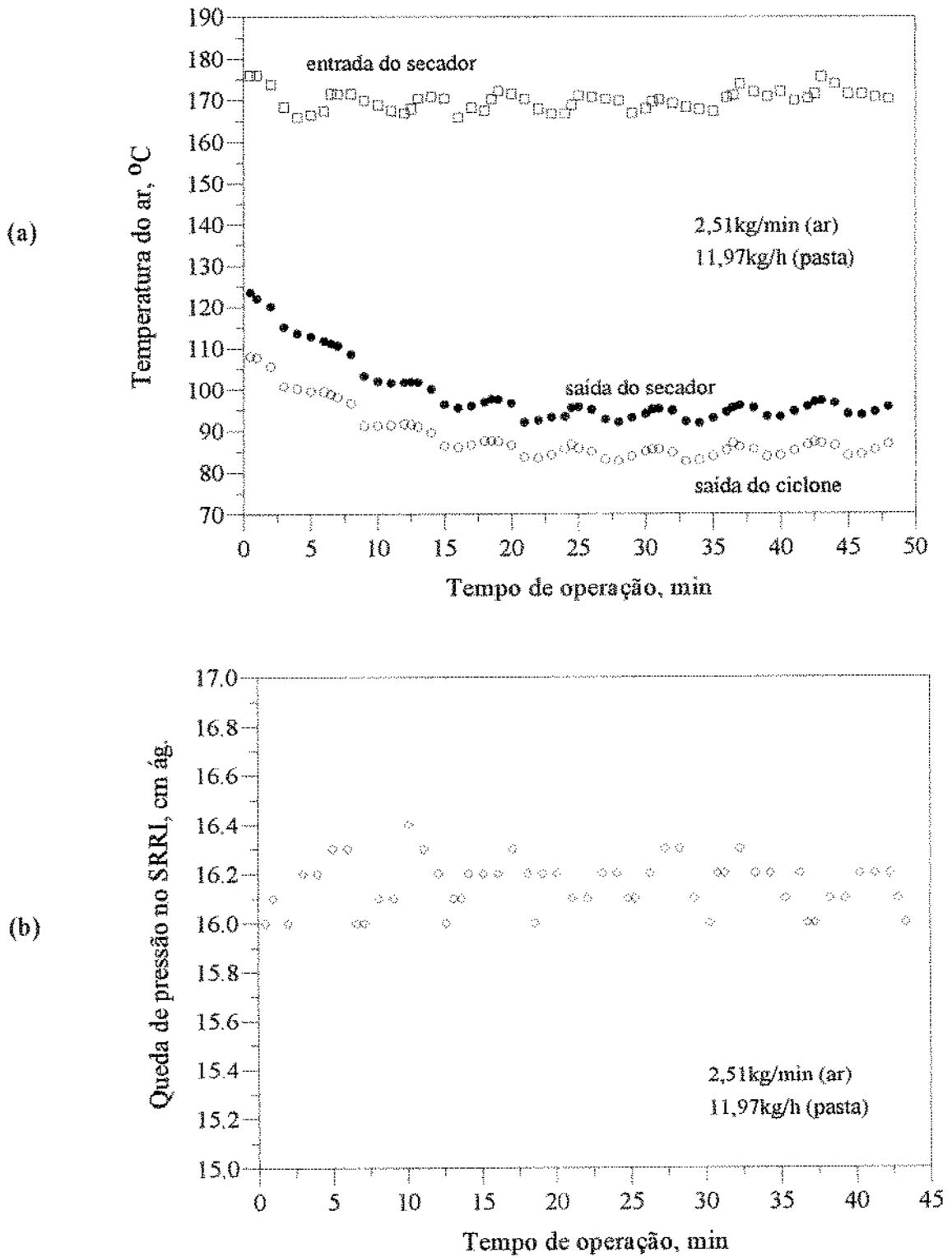


Figura 5.5. Temperaturas (a) e queda de pressão (b) do ar em função do tempo de operação. SRRI com inertes de cerâmica. Alimentação intermitente da pasta e ar a 170°C.

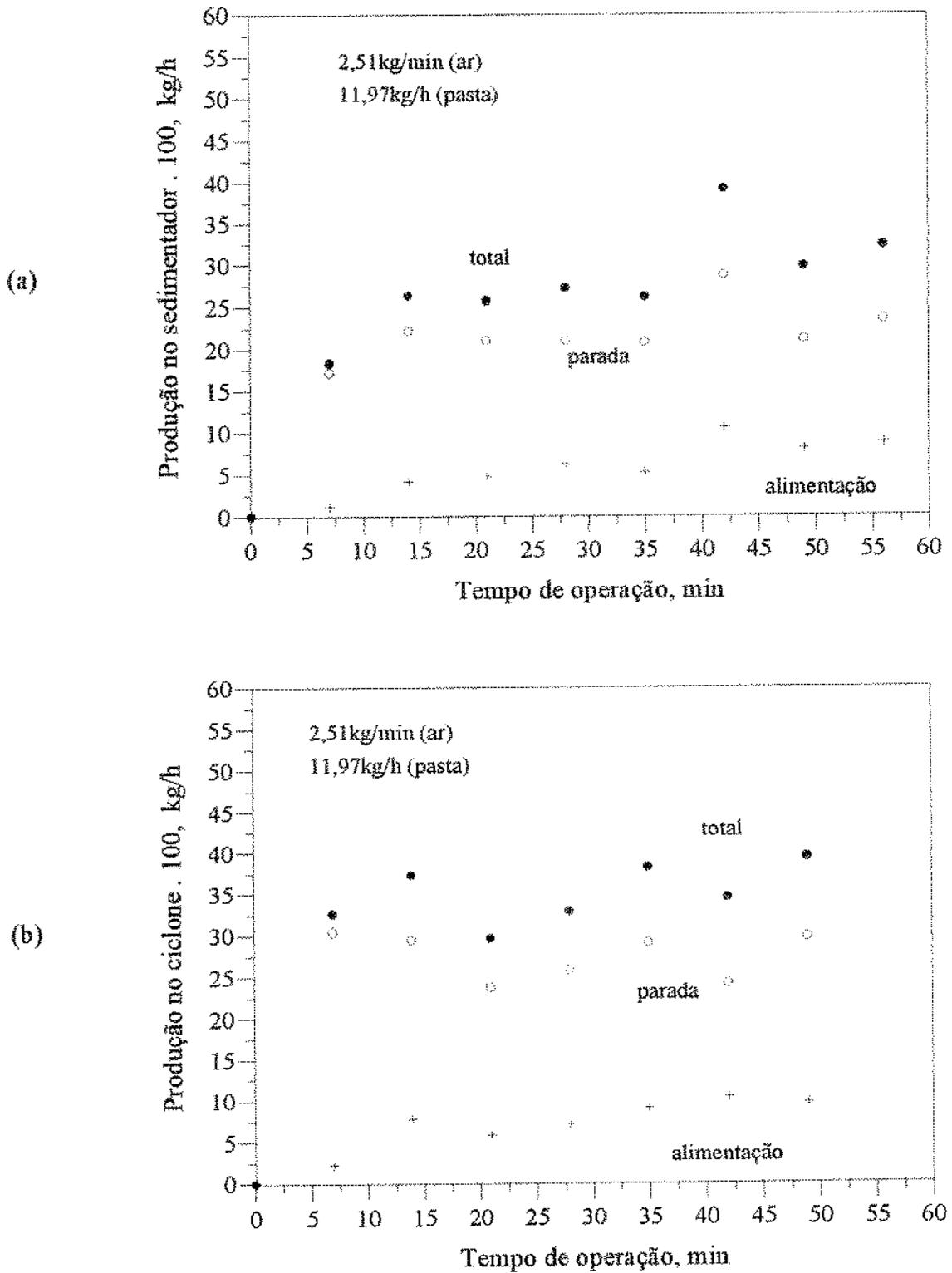


Figura 5.6. Produção de levedura em pó em função do tempo de operação. SRRI com inertes de cerâmica, alimentação intermitente da pasta e ar a 170°C: (a) sedimentador; (b) ciclone.

Assim, a produção total no ciclone mostra-se em torno de 20,0% superior àquela no sedimentador, indicando a predominância de pó com uma granulometria fina. A maior produção nas etapas de parada deve-se à facilidade de desprendimento do material seco no leito de inertes, pela ação de arraste do ar em escoamento. Tal desprendimento foi dificultado nas etapas de alimentação, devido à distribuição da levedura pastosa sobre o leito com inertes misturado à levedura em forma de pó, o que explica a queda de produção nas etapas de alimentação da levedura pastosa.

A variação de umidade do material em pó é apresentada na Figura 5.7, com os valores médios (APÊNDICE C.15): 9,89% ( $\sigma=0,965\%$ ) no ciclone e 11,89% ( $\sigma=0,957\%$ ) no sedimentador, a partir do regime permanente de operação (15,0min).

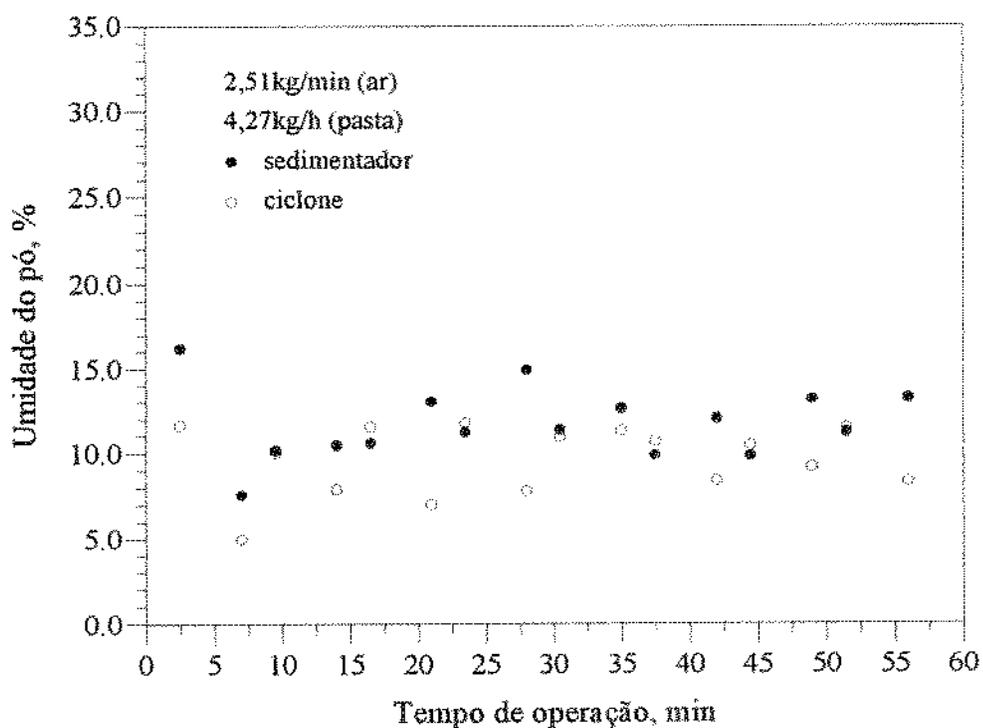


Figura 5.7. Umidade da levedura (pó) com o tempo de operação. SRRJ com inertes de cerâmica; alimentação intermitente da pasta; ar a 170°C e  $t_a=4,5$ min.

#### A. Influência do Tempo de Parada

Para demonstrar a influência do tempo de parada na umidade do produto são apresentados

na Figura 5.8 valores da umidade do pó de levedura referentes ao segundo ensaio mencionado, quando foi empregado um tempo de parada de 6,0min. Esses dados foram obtidos até o tempo de operação de 20min, quando o sistema de alimentação ainda não tinha apresentado os problemas de entupimento, como discutido nas Seções 4.5 e 5.1.2. Embora com poucos pontos experimentais, a figura mostra uma tendência de diminuição da umidade do pó, em relação à obtida no primeiro ensaio. Isso confirma que a influência do calor condutivo das esferas para a pasta é significativa. Entretanto, o aumento do tempo de parada traz como desvantagem a diminuição da taxa mássica alimentada no secador.

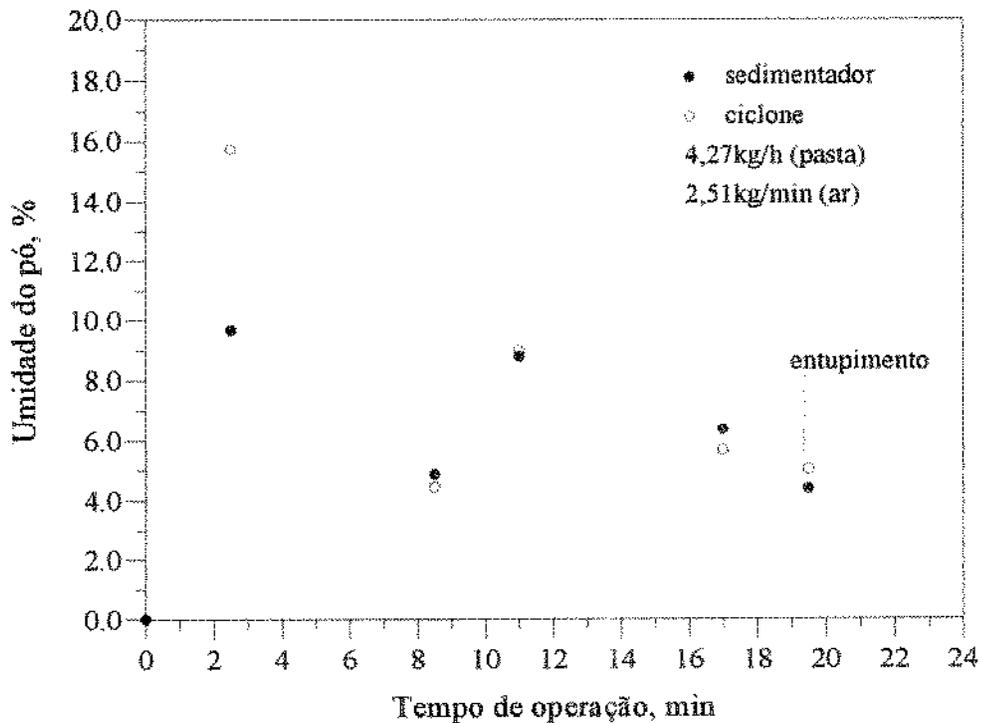


Figura 5.8. Umidade do pó em função do tempo de operação. SRRRI com inertes de cerâmica. Alimentação intermitente da pasta; ar a 170°C e  $t_a=6,0$ min.

#### B. Balanço de Massa (Sólidos)

O balanço de massa foi realizado no volume de controle "SRRRI com sistema de separação e coleta de pó" (Figura 3.7). A equação da continuidade, aplicada ao volume de controle, gera a Equação [5.1] (STRUMILLO & KUDRA, 1986), na qual o primeiro membro refere-se à taxa

de pó nas correntes de entrada e o segundo à corrente de saída do volume de controle.

$$\dot{m}_p \cdot (1 - X'_p) = \dot{m}_s \cdot (1 - X'_s) + \dot{m}_c \cdot (1 - X'_c) + \dot{m}_{pe} \cdot (1 - X'_{pe}) \quad [5.1]$$

- onde:  $\dot{m}_p$  : taxa mássica da pasta alimentada (kg/h);  
 $X'_p$  : umidade inicial da pasta alimentada (kg de água/kg material úmido);  
 $\dot{m}_s$  : taxa mássica de pó no sedimentador (kg/h);  
 $X'_s$  : umidade do pó no sedimentador ((kg de água/kg material úmido);  
 $\dot{m}_c$  : taxa mássica de pó no ciclone (kg/h);  
 $X'_c$  : umidade do pó no ciclone ((kg de água/kg material úmido);  
 $\dot{m}_{pe}$  : taxa mássica do pó perdido na extremidade do SRR (Item 3 da Figura 3.7) e no ar efluente do ciclone (kg/h).  
 $X'_{pe}$  : umidade do pó perdido (kg de água/kg material úmido);

Os valores experimentais medidos e calculados são dados abaixo:

$$\begin{aligned} \dot{m}_p &= 4,27\text{kg/h (bomba à vazão de 11,97kg/h) e } X'_p = 74,04\% \\ \dot{m}_s &= 0,295\text{kg/h; } \dot{m}_c = 0,353\text{kg/h (Figura 5.6b);} \\ X'_s &= 12,50\% \quad \text{e} \quad X'_c = 10,50\% \quad \text{(Figura 5.7)} \\ X'_{pe} &\approx X'_c = 10,50\% \end{aligned}$$

A Equação [5.1], com os valores acima, fornece o valor das perdas ( $\dot{m}_{pe}$ ) como 0,597kg/h, ou 48,34% do total do pó produzido ( $\dot{m}_c + \dot{m}_s + \dot{m}_{pe} = 1,235\text{kg/h}$ ). A massa correspondente às perdas ocorridas pela extremidade do SRR (junção parte fixa/parte móvel, veja Figura 3.7, Item 3) foi coletada periodicamente do piso do laboratório, quantificando-se 0,327kg no período de tempo de 56min (tempo total de operação). Resultou, portanto, a taxa mássica de 0,3504kg/h. Como as perdas incluem a massa arrastada pelo ar efluente do ciclone, esta parcela das perdas equivale à  $0,597 - 0,350 = 0,247\text{kg/h}$ , ou 20,0% do total de pó produzido.

Conclusivamente, mesmo à máxima temperatura e máxima taxa de ar, não foi possível a obtenção de levedura em pó ao nível de umidade adequado (inferior a 10,0%). Os resultados mostraram, assim, a necessidade da utilização de inertes que permitam a operação de secagem a uma taxa de ar mais elevada, incrementando a transferência de calor e massa para a obtenção

de um produto com umidade adequada. Desse modo, o leito com esferas de cerâmica foi abandonado, partindo-se para a realização de estudos para emprego de esferas metálicas.

## 2. SECAGEM COM INERTES DE AÇO

O procedimento foi semelhante ao adotado nos ensaios com inertes de cerâmica, procurando-se a otimização da capacidade de processamento do secador.

A taxa mássica limite do ar passou a ser 4,04kg/min ( $\dot{m}=0,045\text{kg/h}$ , APÊNDICE C.16), cerca de 60,0% superior à empregada com inertes cerâmicos, mantendo-se a vazão da bomba de alimentação nos 11,97kg/h ( $\dot{m}=0,087\text{kg/h}$ , APÊNDICE C.17) e a temperatura do ar em 170°C.

O sistema de alimentação empregado desde o início dos ensaios foi o intermitente, uma vez que a alimentação contínua mostrou-se inadequada na operação do SRRI, como indicado nos estudos de secagem com leito de inertes de cerâmica. Os tempos de alimentação,  $t_a$ , e de parada,  $t_p$ , inerentes ao sistema de alimentação intermitente, constituíram as variáveis a serem determinadas nos ensaios de secagem.

A fim de evitar os problemas de entupimentos do duto alimentador da pasta, que ocorreram nos experimentos com leito de cerâmica, procurou-se diminuir a troca de energia térmica entre o ar de secagem e a pasta escoando no interior do duto. Um tubo de cobre ( $0,47 \cdot 10^{-2}\text{m}$  de diâmetro; 5,0m de comprimento) foi enrolado em forma helicoidal sobre o duto, ao longo de todo o seu comprimento. Como fluido de refrigeração utilizou-se água à temperatura ambiente (25°C).

Os ensaios também foram realizados com pasta de levedura com umidade inicial da ordem de 74,0%, a fim de se poderem comparar os resultados com os obtidos com inertes de cerâmica.

### 2.1 Determinação do Tempo de Alimentação ( $t_a$ )

Determinou-se o tempo de alimentação da pasta,  $t_a$ , alimentando-se continuamente a levedura e coletando-se o pó produzido em intervalos de tempo de operação de 1,0min. As umidades das amostras do pó foram determinadas e a relação entre elas e os tempos de alimentação representa-se na Figura 5.9, para dois níveis de umidade inicial da pasta. Observa-se

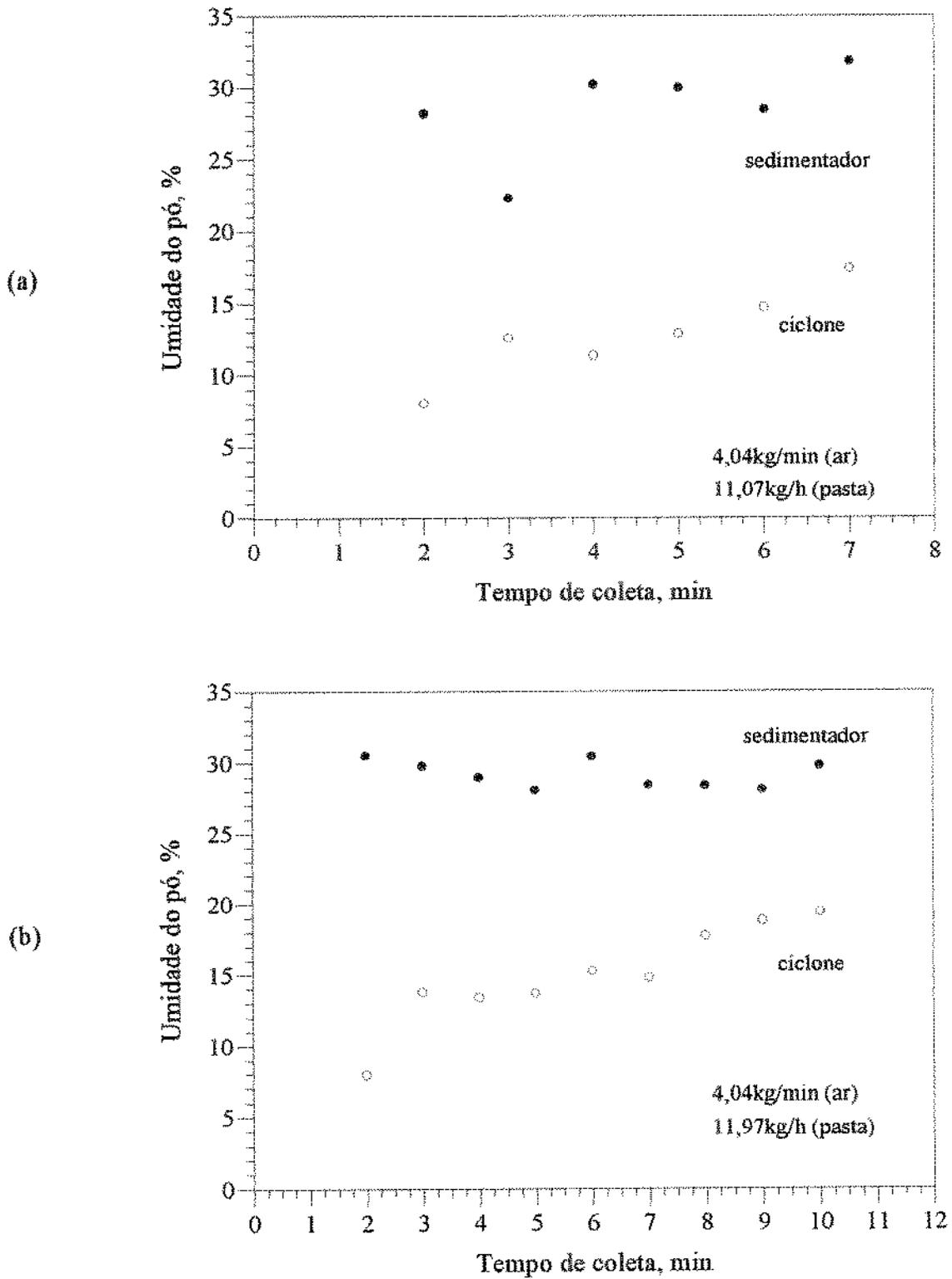


Figura 5.9. Umidade final da levedura (pó) em função do tempo de operação com inertes de aço. Ar a 170°C e pasta de levedura alimentada continuamente, com umidade inicial de: (a) 73,84% e (b) 74,84%.

que, nos dois ensaios, o tempo de alimentação correspondente à umidade do pó de 10% é de 3min (curvas relativas ao ciclone). Esse tempo considerou-se o de alimentação ( $t_a$ ), determinando-se com referência à curva do ciclone, pois nele a massa de material coletada é significativamente superior à coletada no sedimentador, onde o pó apresenta granulometria maior que a do ciclone.

Diferentemente do comportamento verificado na secagem com leito de cerâmica (Figura 5.4a), nota-se, na Figura 5.9, diferença significativa entre as umidades do pó no ciclone e no sedimentador. Isso indica que o aumento da taxa do ar de secagem intensificou o arraste de material, diminuindo-lhe o tempo de residência no secador. Como no sedimentador coletam-se partículas com granulometria maior, a umidade correspondente é superior.

## 2.2 Ensaio de Secagem

Uma vez fixado o tempo de alimentação em 3,0min, adotou-se um tempo de parada de 5,0min. Esse valor foi fixado após alguns ensaios exploratórios que o indicaram ser um tempo adequado para a produção de pó com cerca de 10,0% de umidade. Além disso, com 5,0min de parada a taxa global de alimentação é muito próxima da obtida nos ensaios com inertes de cerâmica. A vazão da bomba de pasta foi de 11,97kg/h, e o ciclo completo fornece uma taxa de alimentação da pasta de 4,48kg/h (umidade 74,14%), conforme Equação [G.6], APÊNDICE G.

Foram realizados dois ensaios completos de secagem com ar a 170°C,  $t_a=3,0\text{min}$  e  $t_p=5,0\text{min}$ . Os resultados do primeiro ensaio (Ensaio A) são apresentados e analisados em detalhes a seguir. No segundo ensaio (Ensaio B) os resultados reproduziram muito bem as condições obtidas no primeiro, e estão apresentados no APÊNDICE C (C.12 a C.15). As médias dos valores relativos aos Ensaio A e B estão apresentadas na Tabela 5.1.

Na Figura 5.10a tem-se a queda de pressão no SRRI. Observa-se um valor médio de 18,28cm de água ( $\tau=0,09\text{cm}$  de água, APÊNDICE C.13), indicando um comportamento dinâmico estável do leito, independentemente das etapas de alimentação (inertes com levedura pastosa) e de parada (inertes gradativamente livres da levedura). No leito de cerâmica, em que se mediu uma variação em torno de 16,15cm de água, houve aumento gradativo na queda de pressão.

Na Figura 5.10b apresentam-se as temperaturas do ar na entrada e na saída do secador

Tabela 5.1. Valores médios relativos aos ensaios inicial (A) e repetido (B). Ar a 4,04kg/min e levedura a 4,48kg/h (concentração de 74,14% de sólidos).

variável	Ensaio A	Ensaio B	valores médios
Tentrada do ar (°C)	170,0	170,4	170,2
Tsaída do ar do SRRRI (°C)	74,4	72,3	73,3
T <sub>bu</sub> saída do SRRRI (°C)	29,8*	25,9**	27,8
Tsaída do ar do ciclone (°C)	68,8	67,8	68,3
queda de pressão no leito (cm ág.)	18,28	-	18,28
produção no sedimentador (kg/h)	0,451	0,392	0,421
produção no ciclone (kg/h)	0,649	0,690	0,669
umidade no sedimentador (%)	17,59	17,61	17,60
umidade no ciclone (%)	9,36	10,62	9,99
umidade inicial da pasta (%)	74,14	73,75	73,94

\* 30,8°C (alimentações) e 28,7°C (paradas); \*\* 25,7°C (alimentações) e 26,0°C (paradas)

e na saída do ciclone, durante os tempos de parada e de alimentação. A temperatura de entrada do ar foi igual a 170,0°C ( $t=0,26^\circ\text{C}$ , APÊNDICE C.12). Observa-se que, a partir de um tempo de operação da ordem de 20min, estabelece-se o regime térmico permanente, com as temperaturas na saída do secador em torno de 74,4°C ( $t=0,63^\circ\text{C}$ , APÊNDICE C.12) e na saída do ciclone de 68,7°C ( $t=0,54^\circ\text{C}$ , APÊNDICE C.13). As oscilações que se notam nas curvas das temperaturas são reflexos dos abalos térmicos e hidrodinâmicos causados após cada etapa (alimentação e parada), quando era aberta a janela para varredura do pó depositado entre o sedimentador e o ciclone (Figura 3.7, Item 36), também observado nos ensaios com leito de cerâmica. Os pontos de mínimo representam as situações de janela aberta, pois a queda de pressão gerada provocava o aumento da taxa de ar e a conseqüente diminuição da temperatura. Em relação ao leito de cerâmica, essas temperaturas diminuíram, pois lá se verificaram 95,1 e 85,6°C (Figura 5.5), indicando que com o leito de aço houve um maior aproveitamento de energia para a secagem.

A defasagem entre a temperatura de bulbo úmido ( $T_{bu}=27,8^\circ\text{C}$ , Tabela 5.1) e a temperatura

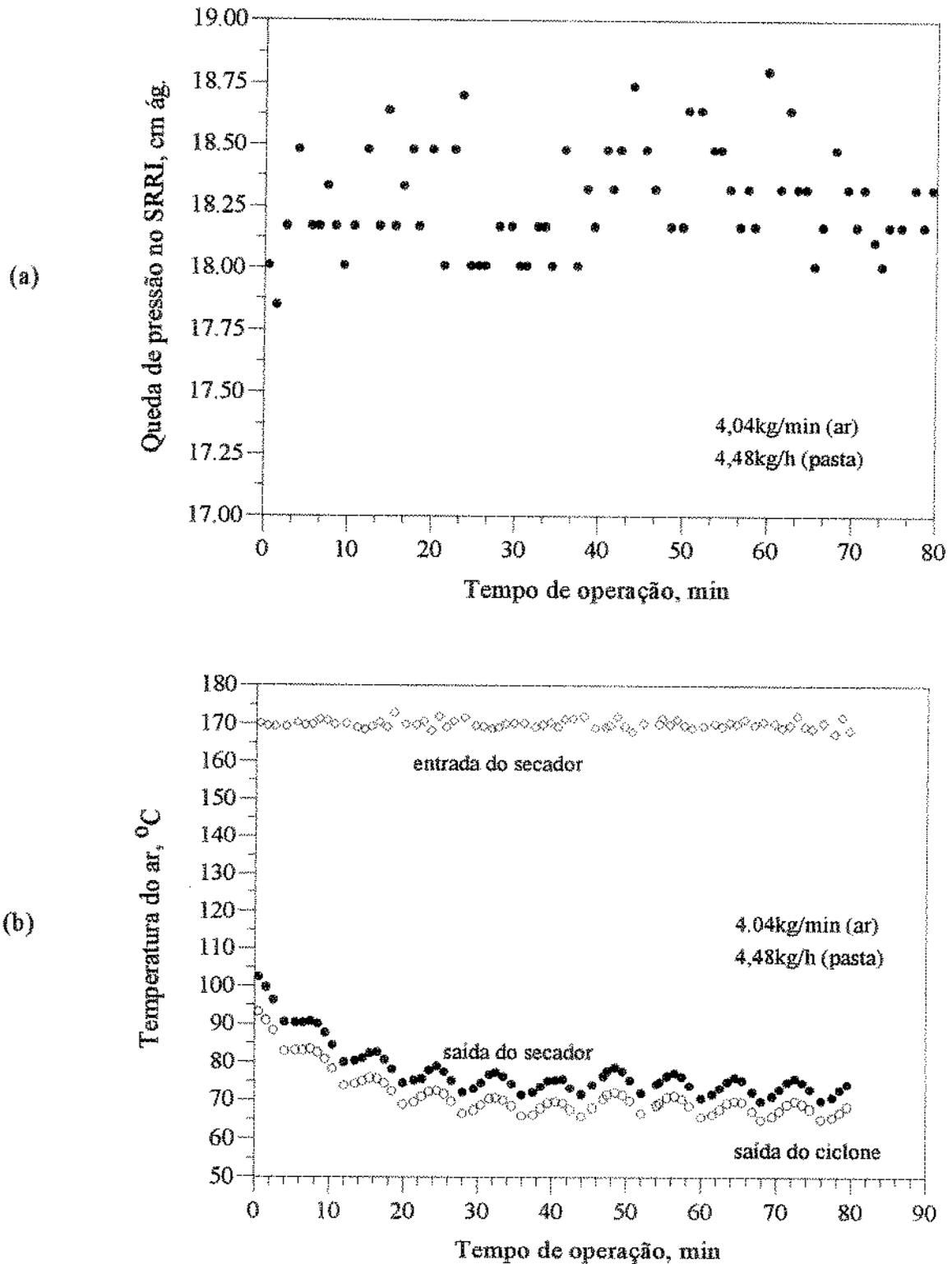


Figura 5.10. Queda de pressão (a) e das Temperaturas (b) do ar em função do tempo de operação. SRRI com recheio de aço e com alimentação intermitente da pasta;  $t_a=3,0\text{min}$  e  $t_p=5,0\text{min}$  (Ensaio A).

na saída do SRRI (74,4°C) indica que o ar de secagem não atingiu o estado de saturação, mesmo nas etapas de alimentação. Não se verificou, assim, um comportamento térmico análogo ao indicado na Figura 2.14, na operação de secagem em leito de jorro. Aqui também não houve desestabilização do leito, como visualmente constatado durante a operação do SRRI.

Na Figura 5.11 são dadas as produções (taxas mássicas) de levedura em pó no ciclone e no sedimentador em função do tempo de operação. Cada taxa foi calculada dividindo-se o total medido em cada par alimentação/parada pelo tempo de 8min (soma do tempo de alimentação, 3,0min, com o de parada, 5,0min). As curvas indicam que com o tempo de 20min estabeleceu-se o regime permanente de operação para a produção, durante a alimentação e parada, no sedimentador (Figura 5.11a) e no ciclone (Figura 5.11b). Os valores de equilíbrio das taxas mássicas de pó são apresentados na Tabela 5.2. Verifica-se que a produção total no ciclone, 0,649kg/h ( $\tau=0,044$ kg/h, APÊNDICE C.14), é em torno de 44,0% superior à produção no sedimentador, 0,451kg/h ( $\tau=0,060$ kg/h, (APÊNDICE C.14), indicando a predominância de material em pó com uma granulometria fina.

Na Figura 5.12 é apresentada a umidade do pó em função de tempo de operação, para a pasta com umidade de 74,14%. Nota-se considerável defasagem entre os valores das umidades dos pós coletados no ciclone e no sedimentador, o que indica maior arraste do material, devido ao aumento na taxa mássica do ar de secagem, que arrasta as partículas mais leves e secas. As umidades médias são: 9,36% ( $\tau=0,723$ %, APÊNDICE C.15) no ciclone e 17,59% ( $\tau=0,793$ %) no sedimentador. A umidade do pó coletado no ciclone é da mesma ordem da obtida com leito de cerâmica. No sedimentador, porém, o leito de inertes de cerâmica produziu umidades da ordem de 11,9%, portanto mais vantajoso do que o produto obtido aqui. Em compensação, a produção

Tabela 5.2. Produção de levedura em pó nas etapas de parada e alimentação (Ensaio A).

etapa da operação desecagem	produção média de levedura em pó (kg/h)	
	sedimentador	ciclone
alimentação	0,097	0,115
parada	0,353	0,534
total	0,451	0,649

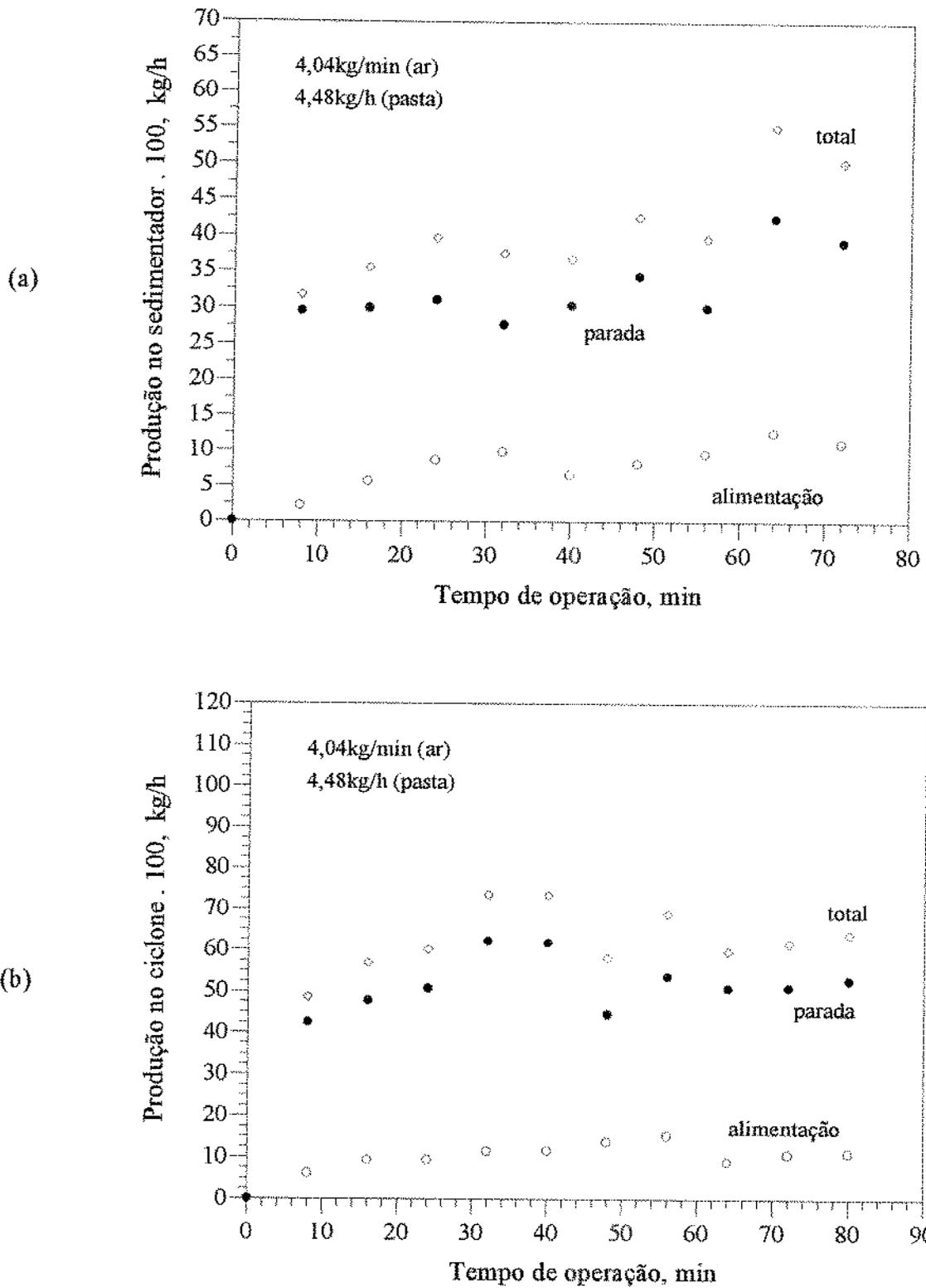


Figura 5.11. Produção de levedura (pó) em função do tempo de operação. SRRI com inertes de aço. Alimentação intermitente da pasta e ar a 170°C : (a) sedimentador; (b) ciclone.

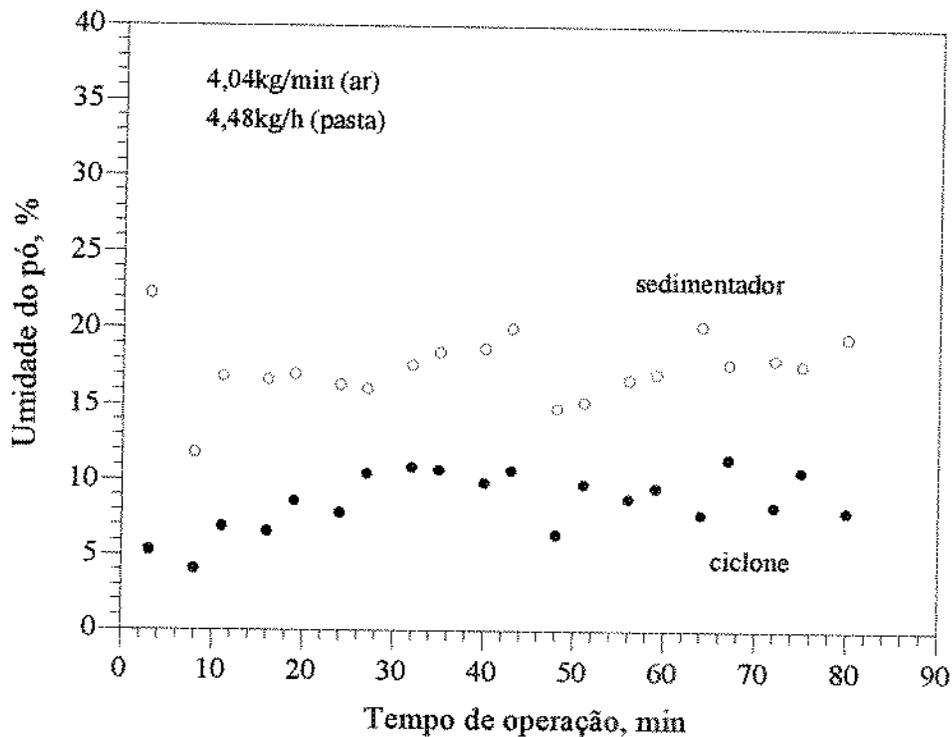


Figura 5.12. Umidade da levedura em forma de pó em função do tempo de operação. SRRI com leito de aço. Alimentação intermitente da pasta de levedura; ar a 170°C;  $t_p = 5,0\text{min}$ .

com leito de aço foi 53,0% superior à obtida com leito de cerâmica. Em uma instalação industrial o material coletado no sedimentador, com umidade acima de 10,0%, poderia ser reprocessado em outros secadores de custo operacional baixo.

O pó obtido foi submetido a uma análise granulométrica, obtendo-se os diâmetros médios (Sauter) das partículas:  $2,047 \cdot 10^{-2}\text{mm}$  (ciclone) e  $6,051 \cdot 10^{-2}\text{mm}$  (sedimentador) (APÊNDICE L).

Ensaio com tempos de parada superiores a 5,0min certamente levariam a uma queda da umidade do pó do sedimentador, mas implicariam uma queda da taxa de alimentação da pasta no secador, diminuindo-lhe a capacidade.

Foram também feitos ensaios com um tempo de alimentação de 3,5min e tempos de parada de 5,0min e 6,0min. Os resultados, entretanto, não foram satisfatórios, pois a umidade do pó recolhido no ciclone era bem superior a 10,0%. Houve aumento da taxa de acúmulo da pasta

de levedura no leito, caracterizando o fenômeno do recobrimento dos inertes antes mesmo da remoção da levedura seca, como constatado também na operação de secagem de leite em leito de jorro com corpos inertes (Figura 2.15)

Para o equipamento desenvolvido neste trabalho, o tempo de alimentação de 3,0min, portanto, é o limite para a operacionalidade do sistema.

Visualizações do leito de inertes realizadas nas etapas da secagem, através das janelas de inspeção, indicaram que praticamente não houve *holdup* de levedura nas aletas, embora tenha sido observada pequena quantidade de material pastoso na primeira câmara do SRRI, durante as alimentações. Por outro lado, os inertes recobertos de levedura apresentaram *holdup* nas aletas, como sugere a dinâmica do leito (Figura 4.16). Esse comportamento é semelhante ao representado na curva 5 da Figura 2.8, relativa a  $\Psi=180^\circ\text{C}$  para secadores rotativos, correspondente ao ângulo das aletas do SRRI.

A constatação da ausência de aglomeração de levedura no leito reflete a sua friabilidade, analogamente à verificação em secagem em leito de jorro com inertes (Figura 2.17).

### 2.3 Umidade do Ar na Entrada e Saída do SRRI

As umidades do ar foram calculadas em função das temperaturas de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) e úmido ( $T_{bu}$ ), e da velocidade do ar ( $v_a$ ). Dois psicrômetros (Seção 3.3.2) foram posicionados antes e depois do SRRI, nos locais representados pelo Item 33 na Figura 3.7.

As velocidades foram medidas empregando-se um anemômetro de fio quente, posicionado no ponto de medida dos termopares. Os valores obtidos foram 0,92m/s ( $\tau=0,01\text{m/s}$ , APÊNDICE C.19) para o ar ambiente, e 0,75m/s ( $\tau=0,01\text{m/s}$ , APÊNDICE C.19) para o ar efluente do SRRI.

As temperaturas foram tomadas durante os ensaios inicial e repetido, em função do tempo de operação, durante as etapas de alimentação e parada e com o sistema em regime permanente.

As umidades foram determinadas por meio da utilização do programa computacional PC1 (APÊNDICE I), em que foram empregadas as equações [3.1] a [3.4].

Para o ensaio inicial (A) o valor da umidade do ar de entrada no SRRI foi 0,013kg de água/kg de ar seco ( $v=0,0014$ kg de água/kg de ar seco, APÊNDICE C.20). No ensaio repetido (B) foi 0,015kg de água/kg de ar seco. Esses valores se mantiveram durante os ensaios.

A variação da umidade do ar efluente, durante o Ensaio A, está indicada na Tabela 5.3. Os valores calculados mostram uma pequena variação durante cada etapa. As médias são: 0,030kg de água/kg ar seco (alimentações) e 0,026kg de água/kg ar seco (paradas).

A temperatura média do ar na saída do secador é igual a 73,3°C (Tabela 5.1). Considerando-se uma umidade média do ar de 0,028kg água/kg ar seco (0,030 e 0,026kg água/kg ar seco, alimentações e paradas) tem-se a umidade relativa igual a 11,07%, obtida por meio da

Tabela 5.3. Valores da umidade do ar efluente do SRRI ( $Y_f$ ), para o ensaio inicial (A), com o ar a 0,75m/s, nas etapas de alimentação e parada.

tempo de cada etapa (min)	etapa (A <sub>i</sub> ,P <sub>i</sub> )*	$Y_f$ (kg água/kg ar seco)
a l i m e n t a ç õ e s		
1,78	A6	0,029
2,25	A5	0,032
2,50	A9	0,030
2,80	A8	0,030
p a r a d a s		
2,50	P7	0,027
3,20	P9	0,028
3,50	P6	0,025
4,25	P4	0,025

\*A: alimentação; P: parada; i: número cronológico da etapa

Equação [5.2] (STRUMILLO, 1986), com a pressão de saturação a  $T_{bs}$  ( $P_s$ ) igual a 35,77kPa (REYNOLDS, 1979) e a pressão total ( $P_t$ ) igual a 91,98kPa.

$$\varphi = \frac{Y \cdot P_t}{P_s \cdot (0,622 + Y)} \quad [5.2]$$

A isoterma de adsorção GAB (APÊNDICE M) indica que, nessas condições, a umidade de equilíbrio da levedura seria 0,075kg água/kg material seco ou 0,07kg água/kg material úmido (7,0%). Esse valor está de acordo com os indicados na literatura para garantia da qualidade do produto (TAEYMES & LENGES, 1984; COPERSUCAR, 1995). A umidade em torno de 10,0% obtida no SRRI apresenta-se no limite aceitável na indústria (COPERSUCAR, 1995), mas indica também que as condições na saída do secador estão bem afastadas de um equilíbrio termodinâmico entre fases.

#### 2.4 Variação da Temperatura do Ar ao longo do Eixo do SRRI

Estabelecido o regime permanente de operação do sistema, realizaram-se medidas das temperaturas do ar em cada uma das quatro câmaras do SRRI. As mesmas condições operacionais do ensaio de secagem otimizado foram mantidas (ar a 4,04kg/h e 170°C); porém, por razões práticas, não foi alimentada a levedura pastosa durante todo o ensaio e a rotação do secador foi interrompida apenas durante o registro das temperaturas. As temperaturas foram tomadas por meio de quatro termopares tipo T, cada um em uma câmara do SRRI e com a respectiva extremidade do sensor posicionada a 6,45cm acima do nível do leito (no ponto médio entre esse nível e a parede do cilindro do SRRI) e no ponto médio do comprimento de cada câmara.

O registro das medidas das temperaturas fez-se por meio da filmagem dos *displays* de quatro indicadores digitais de temperatura (marca ECIL S/A, com microprocessador, série J), sendo cada um deles acoplado a um dos quatro termopares introduzidos nas câmaras do SRRI.

Nas Figuras 5.13 e 5.14 estão representados os valores da variação das temperaturas após a introdução dos termopares. Observa-se que, após 35s, as temperaturas mostraram-se invariáveis. Com esse valor calculou-se a temperatura média para cada ensaio realizado, e a média das médias foi considerada como a temperatura na câmara. Na Tabela 5.4 são apresentados os resultados.

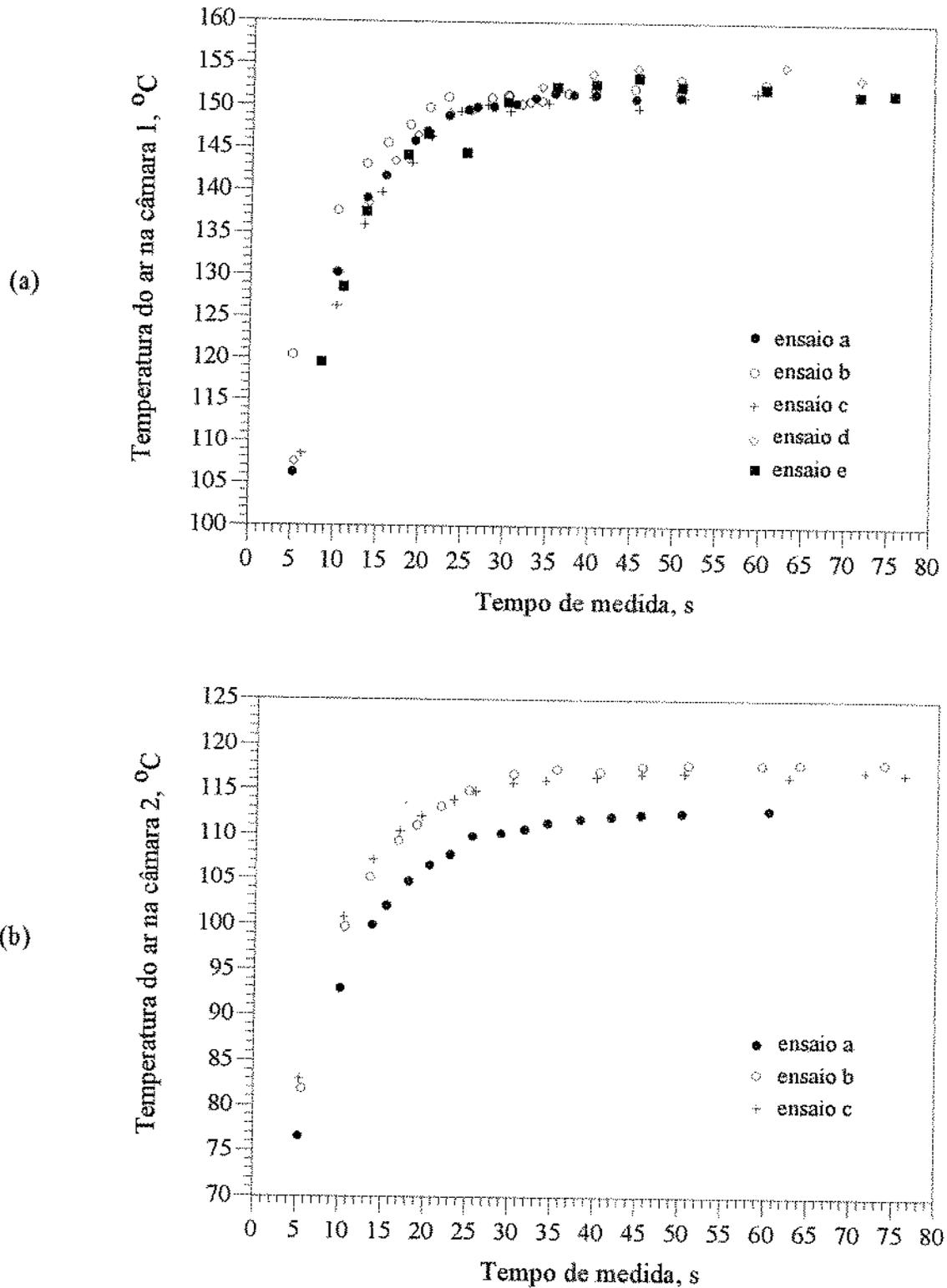


Figura 5.13. Temperatura do ar na primeira (a) e na segunda (b) câmara, em função do tempo de medida. Ar a 4,04kg/min e 170°C.

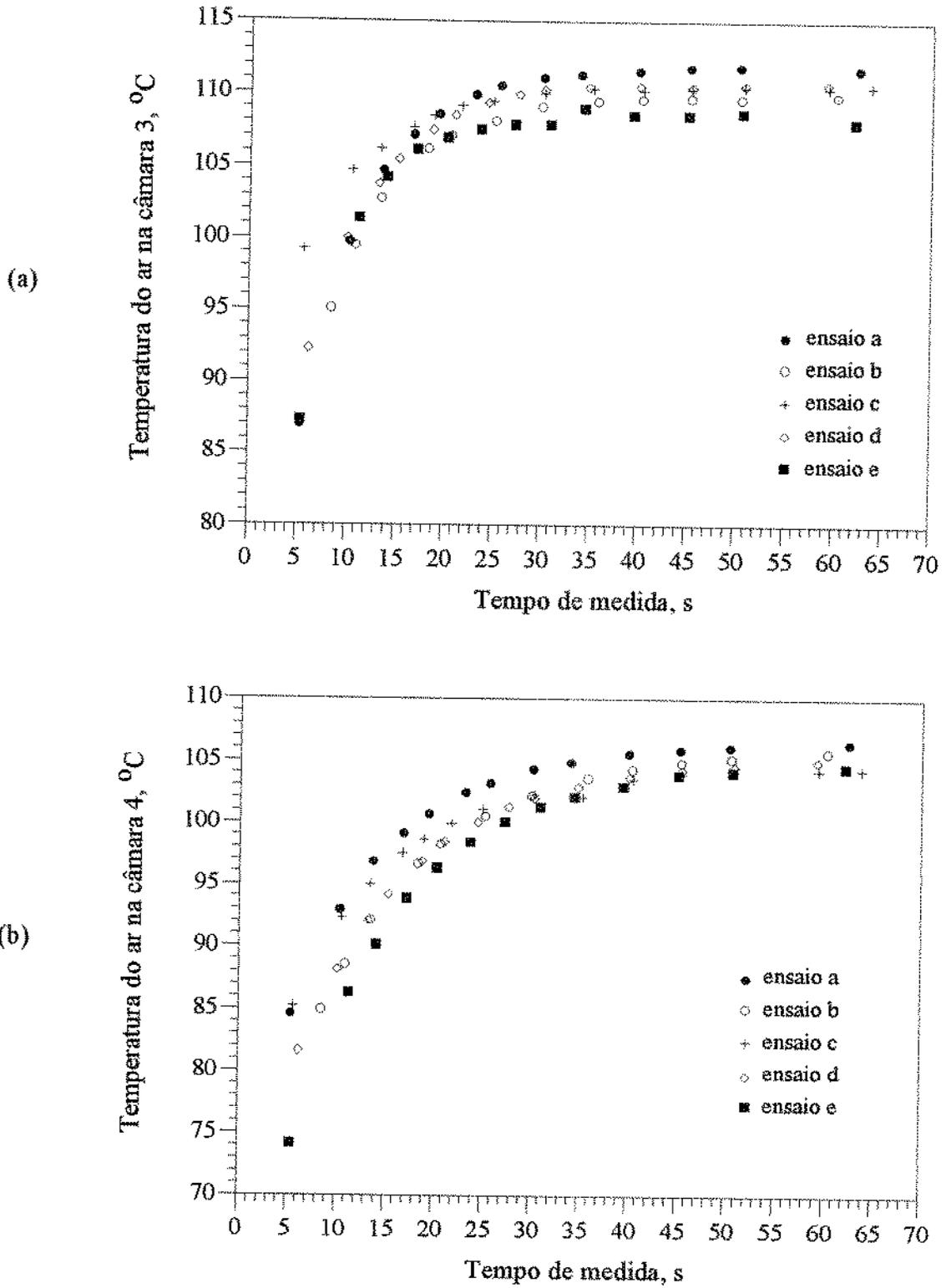


Figura 5.14. Temperatura do ar na terceira (a) e na quarta câmara (b), em função do tempo de medida. Ar a 4,04kg/min e 170°C.

A variação da temperatura do ar ao longo do eixo do secador é apresentada na Figura 5.15. Os pontos B, C, D e E representam os locais correspondentes às tomadas de temperatura nas câmaras de secagem do SRRI. O ponto A representa o local de tomada da temperatura de entrada do ar, situando-se a 9,0cm da extremidade do secador.

Tabela 5.4. Temperatura do ar à taxa de 4,04kg/min nas câmaras de secagem.

grandeza medida	câmara do SRRI, a partir da extremidade de alimentação			
	primeira	segunda	terceira	quarta
temperatura (°C)	152,3 (±0,36)*	155,6 (±0,24)*	110,2 (±0,13)*	104,8 (±0,33)*

\*APÊNDICE C.12

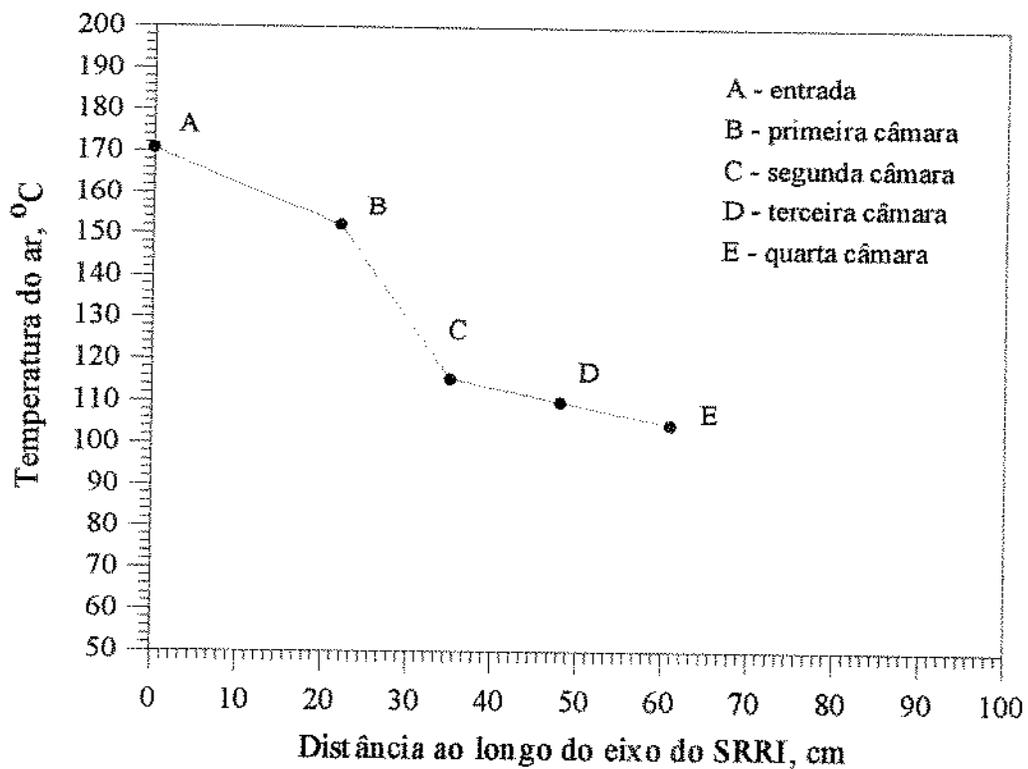


Figura 5.15. Temperatura do ar a 4,04kg/min, na direção do comprimento do SRRI, no ponto médio entre o nível do leito e a parede do secador.

## 2.5 Variação da Temperatura do Leito de Inertes ao longo do Eixo do SRRI

Para a avaliação da temperatura do leito de inertes seria necessária uma junta rotativa para as conexões de termopares. Entretanto, devido à grande inércia térmica do material desse recheio, foi possível obter uma boa estimativa da mesma, utilizando-se método semelhante ao descrito para a determinação das temperaturas do ar. Esperou-se a estabilização da operação do SRRI (ar a 4,04kg/min,  $t_s=3,0$ min e  $t_p=5,0$ min) para então serem interrompidas a alimentação, a rotação e o fluxo de ar. As janelas eram abertas e os termopares introduzidos simultaneamente no leito, a uma profundidade aproximada de 3,0cm do seu nível (direção vertical) e no ponto médio do comprimento da câmara (direção axial). As temperaturas eram registradas filmado-se os *displays* de quatro indicadores de temperatura, cada um acoplado a um termopar. O intervalo de tempo entre a parada do secador e a introdução dos termopares no leito era de 5 a 10s. Após cada registro de temperaturas, o SRRI era completamente limpo para uma nova determinação. As medidas foram realizadas no tempo médio e final de cada etapa de alimentação e de parada.

Nas Figuras 5.16 a 5.19 está representada a variação da temperatura do leito em cada câmara em função do tempo de medida. A partir do tempo em que as temperaturas mostraram-se invariáveis, calculou-se a temperatura média para cada ensaio realizado e a média das médias ( $T_m$ ) foi considerada como a temperatura do leito na câmara. Os cálculos acham-se no APÊNDICE C.18, e os resultados são indicados na Tabela 5.5. Observe-se que as incertezas nas

Tabela 5.5. Temperaturas do leito nas câmaras do SRRI (APÊNDICE C.18).

câmara do SRRI	temperatura do leito (°C)			
	alimentação		parada	
	meio	final	meio	final
1	58,9 ( $\pm 0,35$ )	47,5 ( $\pm 0,36$ )	60,9 ( $\pm 0,50$ )	79,6 ( $\pm 0,93$ )
2	75,1 ( $\pm 0,49$ )	67,1 ( $\pm 0,30$ )	60,8 ( $\pm 0,70$ )	80,7 ( $\pm 0,47$ )
3	75,2 ( $\pm 0,25$ )	74,5 ( $\pm 0,80$ )	66,0 ( $\pm 0,18$ )	75,8 ( $\pm 0,25$ )
4	77,6 ( $\pm 0,09$ )	77,2 ( $\pm 0,58$ )	73,4 ( $\pm 0,30$ )	74,5 ( $\pm 0,26$ )

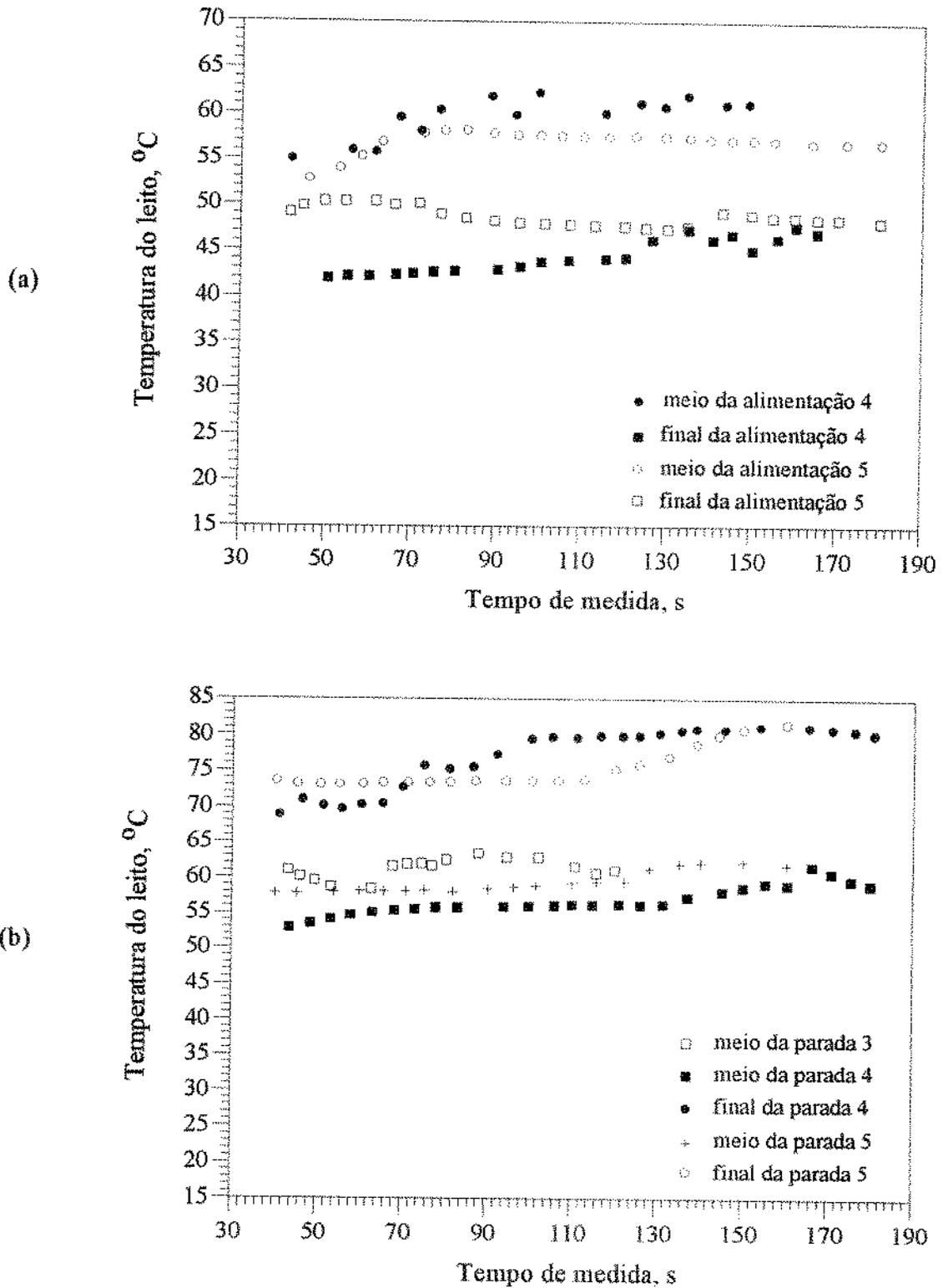


Figura 5.16. Temperatura do leite na primeira câmara, durante alimentação (a) e parada (b), em função do tempo de medida.

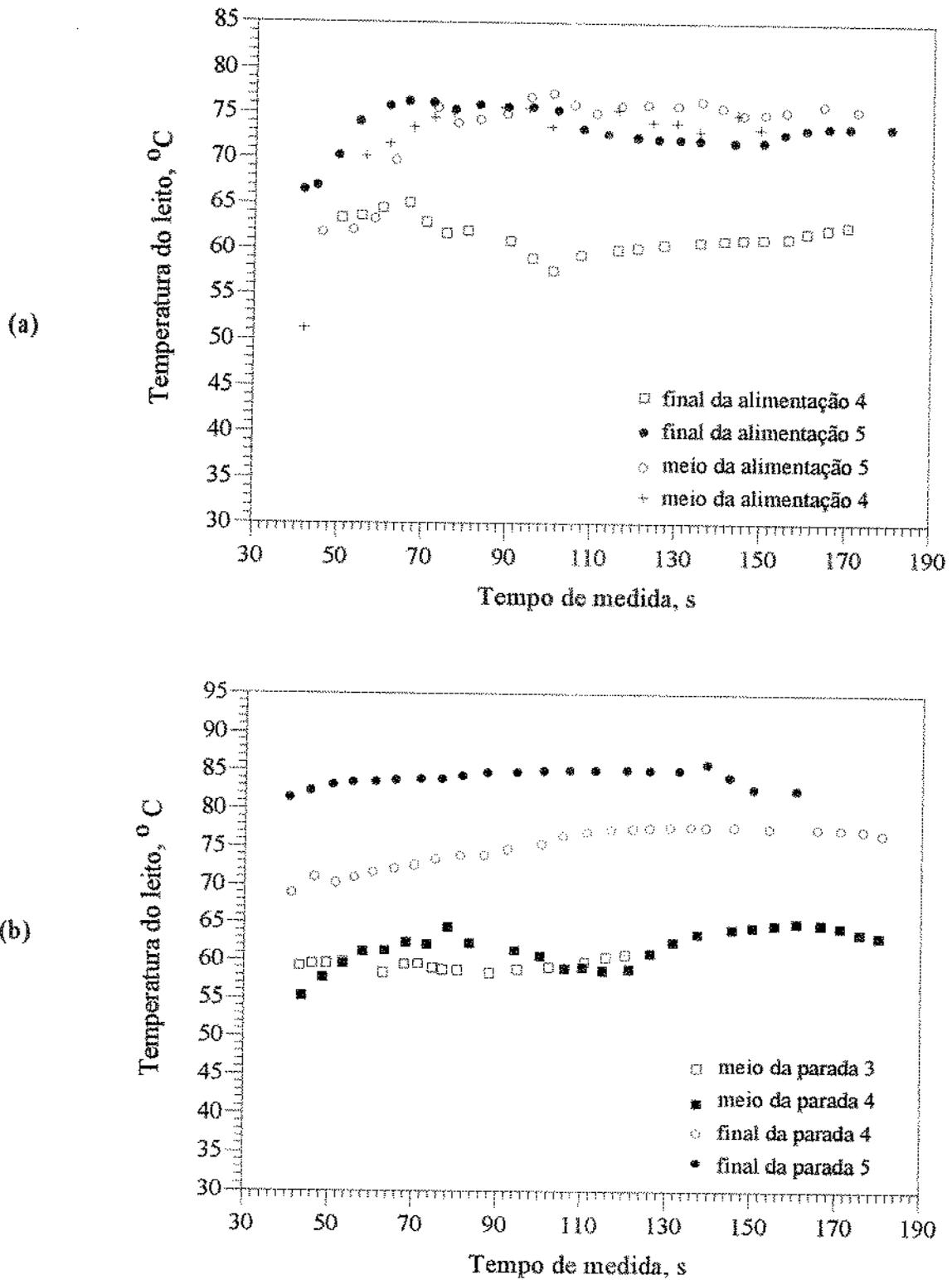


Figura 5.17. Temperatura do leite na segunda câmara, durante alimentação (a) e parada (b), em função do tempo de medida.

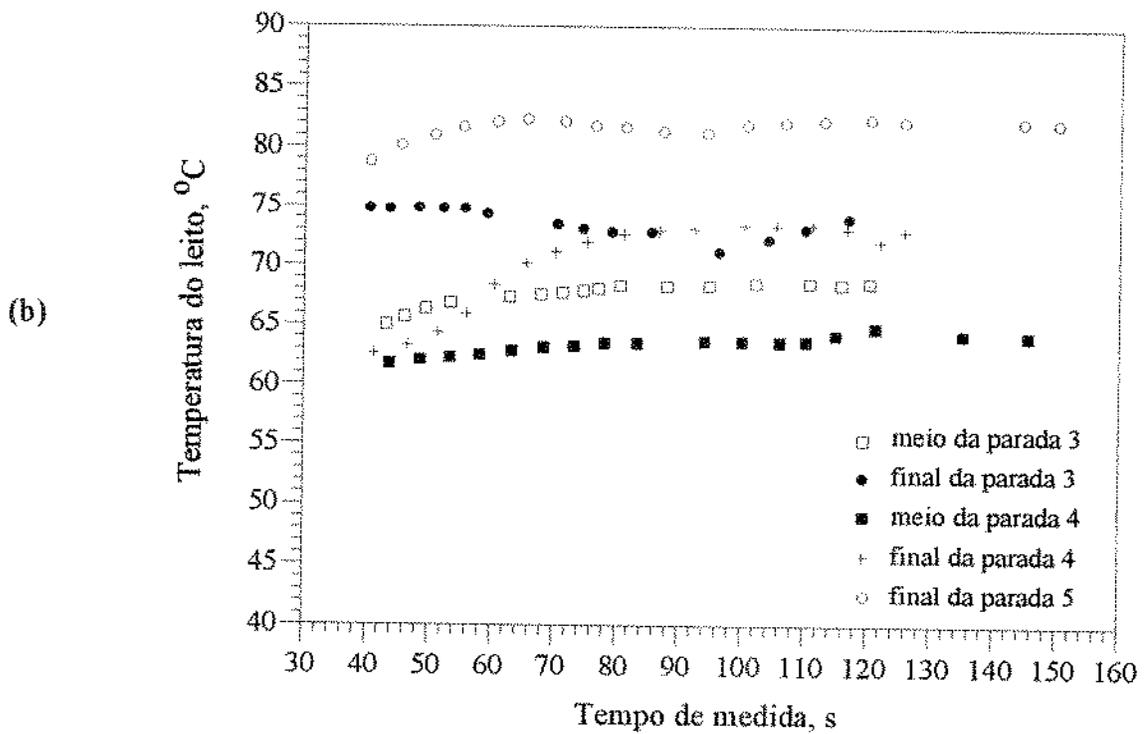
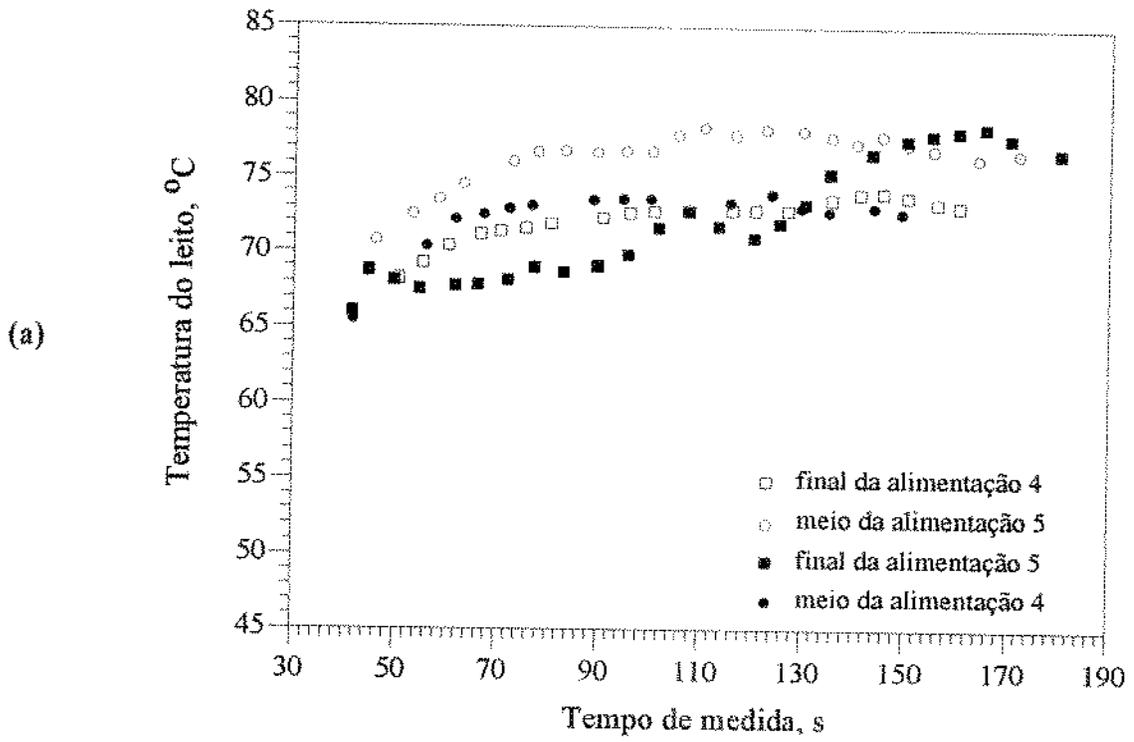


Figura 5.18. Temperatura do leite na terceira câmara, durante alimentação (a) e parada (b), em função do tempo de medida.

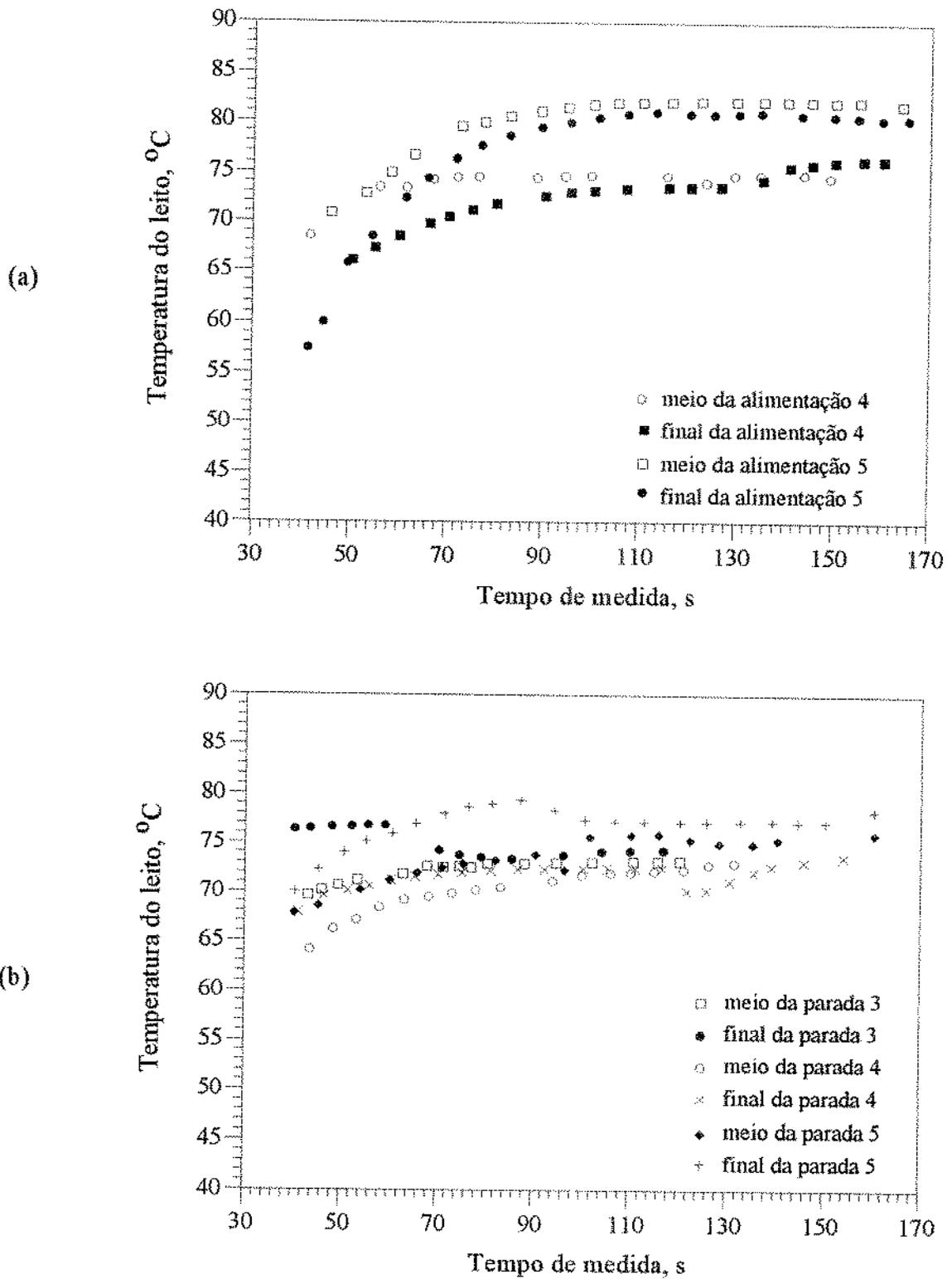


Figura 5.19. Temperatura do leito na quarta câmara, durante alimentação (a) e parada (b), em função do tempo de medida.

medidas são elevadas, refletindo o grau de dificuldade dessas medições.

Um aspecto que chama a atenção nos dados da Figura 5.5 é o abaixamento da temperatura durante a etapa de alimentação. Isso é mais evidente na primeira câmara, onde, no início do período de alimentação, a temperatura está a  $80^{\circ}\text{C}$  (correspondendo ao fim do período de parada) e, então, em 3min, diminui para  $47,5^{\circ}\text{C}$ , devido à alimentação da pasta, que entra a  $29,3^{\circ}\text{C}$ . Fica patente que, nesse período, o aquecimento condutivo é predominante e o processo é identificável como uma evaporação rápida e não uma secagem de um líquido, que tende a se manter próximo da temperatura de bulbo úmido.

Na Figura 5.20 é apresentada a variação da temperatura do leito ao longo do eixo do SRRI, incluindo-se a temperatura de entrada do ar. Os pontos B, C, D e E representam os locais correspondentes às tomadas de temperatura nas câmaras. O ponto A representa o local de tomada da temperatura do ar considerada de entrada, situando-se a 9,0cm da extremidade do secador. A dispersão dos valores de temperatura diminuiu no sentido de B para E, indicando que o efeito

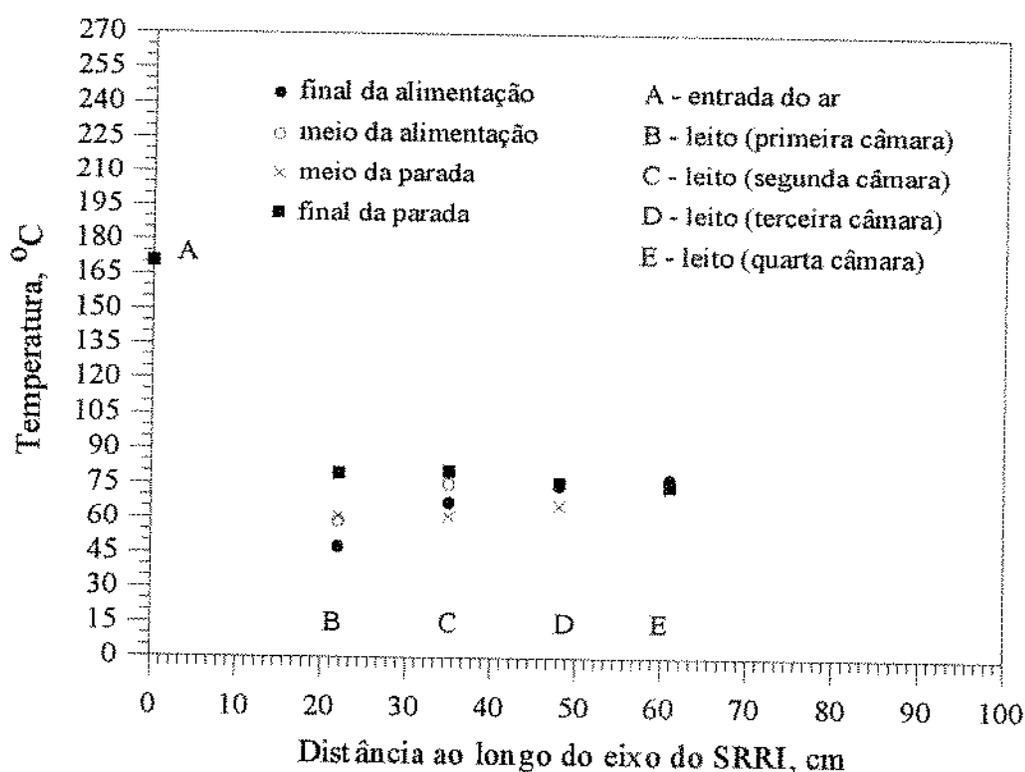


Figura 5.20. Temperatura na direção axial do SRRI, com termopares posicionados a 3,0cm de profundidade no leito de inertes.

da aglutinação do leite, intenso na primeira câmara (local da alimentação), diminui ao longo do eixo do secador, desfavorecendo a variação da temperatura em cada local, em função da etapa. Esse efeito também influencia o comportamento térmico do leite em cada etapa. Nas alimentações a temperatura aumenta no sentido crescente das câmaras; nas paradas, onde a aglutinação perde seu efeito ao longo do secador, o gradiente de temperatura diminui (meio da parada), tornando-se negativo (final da parada).

O leite de inertes era inspecionado em cada uma das quatro câmaras, após as medidas da temperatura. Constatou-se que o arraste natural das esferas praticamente inexistia nas etapas de alimentação, recuperando-se nas de parada, indicando a influência da pasta alimentada na aglutinação do leite. A avaliação do recobrimento das esferas pela levedura, observado visualmente e através de filmagem permitiu constatar que: (a) etapa de alimentação (meio e final): existência de camada com espessura irregular, não superior a 1,0cm na primeira câmara e menor nas demais, sendo mínima na terceira e quarta câmaras; (b) etapa de parada (meio e final): ocorrência de recobrimento levemente irregular na primeira câmara, e as demais quase sem material.

Os resultados, apresentados na Tabela 5.5, e as observações visuais permitiram uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na secagem, como será abordado na Seção 5.2.7.

## 2.6 Balanço de Massa (Sólidos)

O balanço de massa de sólidos foi realizado no volume de controle "SRRI com sistema de separação" (Figura 3.7), dado pela Equação [5.1]. Foram utilizadas as médias dos valores de cada variável relativas aos ensaios de secagem A e B (ver Tabela 5.1). Considerou-se que o material perdido tem a mesma umidade do coletado no ciclone, mas é provável que seja mais seco e, portanto, mais facilmente arrastável pelo ar. Os resultados são apresentados na Tabela 5.6. Nota-se que a porcentagem das perdas de material em pó, em relação à produção total ( $m_c + m_s + m_{pe}$ ), foi aproximadamente 17,9%. Nos ensaios observou-se a ocorrência acentuada de vazamentos de pó na junção da extremidade do secador com a parte fixa da instalação voltada para o sistema de separação e coleta (Figura 3.7).

Tabela 5.6. Perdas de levedura em pó nos ensaios inicial (A) e repetido (B).

ensaio	perdas (kg/h)	produção total (kg/h)	perdas (%)
A (inicial)	0,219 ( $t=6,8\%$ )*	1,319	16,60
B (repetido)	0,257 ( $t=4,8\%$ )*	1,339	19,19

\* APÊNDICE C.14

## 2.7 Balanço de Massa (Água)

A água evaporada é calculável pela Equação [5.3], balanço de água nos sólidos, em que o somatório inclui as produções de levedura em pó no ciclone e no sedimentador e as perdas

$$\dot{m}_{ev} = (\dot{m}_p \cdot X_p')_{entrada} - \sum (\dot{m}_{sól.} \cdot X_{sól.}')_{saída} \quad [5.3]$$

- onde:  $\dot{m}_{ev}$  : taxa mássica de água evaporada (kg/h);  
 $X_p'$  : umidade da pasta (kg de água/kg material úmido);  
 $\dot{m}_p$  : taxa mássica de pasta alimentada (kg/h);  
 $\dot{m}_{sól.}$  : taxa mássica de pó (kg/h);  
 $X_{sól.}'$  : umidade do pó (kg de água/kg material úmido).

(STRUMILLO & KUDRA, 1986). Na Tabela 5.7 são apresentados os valores das variáveis relativas ao ensaio inicial (A) e ao ensaio repetido (B). Aplicados na Equação [5.3] os valores das variáveis correspondentes ao Ensaio A fornecem a taxa mássica de água evaporada como 3,16kg/h.

## 2.8 Avaliação Energética do SRRI

### A. Energia específica

A energia consumida por unidade de tempo e de massa de água evaporada na secagem, energia específica ( $E_E$ ), é calculada pela Equação [5.4]. A parcela correspondente ao bombeamento da pasta é desprezível.

Tabela 5.7. Valores das variáveis da Equações [5.3] para os Ensaio A e B.

variável	Ensaio A	Ensaio B
$\dot{m}_p$ (kg/h) (entrada)	4,48	4,48
$X'_p$ (%) (entrada)	74,14	73,75
$\dot{m}_{sól.}$ (kg/h) (saída)	0,451 (sedimentador) 0,649 (ciclone)	0,392 (sedimentador) 0,690 (ciclone)
$X'_{sól.}$ (%) (saída)	17,59 (sedimentador) 9,36 (ciclone)	17,61 (sedimentador) 10,62 (ciclone)
$\dot{m}'_{sól.}$ (kg/h) (perdas)	0,219	0,244
$X'_{sól.}$ (%) (perdas)	9,37	10,62

$$E_E = \frac{\text{energia consumida}}{\text{taxa de evaporação}} = \frac{E_S + E_R + E_A}{\dot{m}_{ev}} = \frac{E_S + E_R + E_A}{\frac{3,16}{3600}} \quad [5.4]$$

- onde:  $E_s$  : energia por unidade de tempo requerida para movimentar o ar (kW);  
 $E_R$  : energia por unidade de tempo requerida para rotação do SRRI (kW);  
 $E_A$  : energia requerida por unidade de tempo para aquecimento do ar até 170,0°C (kW);  
 $\dot{m}_{ev}$  : taxa de evaporação = 3,16kg/h.

#### A.1 Energia no Soprador ( $E_S$ )

A energia do soprador é a necessária para fazer escoar o ar de secagem à taxa de 4,04kg/min, utilizada nos ensaios de secagem. Devido a um desvio na saída do soprador, para controle da vazão de ar (Item 16, Figura 3.7), o sistema de secagem utilizou apenas parte do ar admitido pelo soprador. Assim, a energia efetivamente utilizada foi diferente da consumida da rede elétrica. Sua determinação foi realizada aplicando-se a equação de Bernoulli (FOX & McDONALD, 1981) entre a entrada do soprador e a sua saída — na seção onde se instalou o anel piezométrico (Item 34, Figura 3.7) —, obtendo-se a Equação [5.5].

$$\frac{\eta \cdot E_s \cdot 3600}{\dot{m}_a} + \frac{P_e}{\rho} = \frac{P_s}{\rho} + \frac{v_s^2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot g_c} \quad [5.5]$$

onde:  $\eta$  : eficiência do motor = 0,1808 (APÊNDICE H), com  $\iota=0,006$  (APÊNDICE C.22);

$E_s$  : energia por unidade de tempo recebida (kW);

$\dot{m}_a$  : taxa mássica de ar: 242,40kg de ar/h;

$P_e$  : pressão na entrada do soprador (kPa) =  $P_{am} = 91,98\text{kPa}$ ;

$\rho$  : massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ ) = 0,88 ( $T=37,4^\circ\text{C}$ );

$P_s$  : pressão na saída do soprador (kPa) =  $91,98 + 1,36 = 93,34\text{kPa}$ ;

$v_s$  : velocidade do ar na saída do soprador= $3,84\text{m/s}$  ( $4,04\text{kg/min}$ ; diâmetro  $0,0254\text{m}$ ).

O valor calculado da energia efetivamente utilizada, em um segundo, para movimentar o ar através do SRRI foi  $0,58\text{kW}$  ( $\iota=0,003\text{kW}$ , APÊNDICE C.23).

### A.2 Energia para Rotação do SRRI ( $E_R$ )

Calculou-se a energia por segundo para a rotação ( $E_R$ ) por meio da lei de Ohm. Foram medidas a voltagem (V) e a corrente elétrica (I) consumidas pelo motor acoplado ao SRRI, obtendo-se os valores médios  $228,36\text{V}$  e  $6,195\text{A}$  (APÊNDICE C.21), resultando  $E_R = 1,41\text{kW}$  ( $\iota = 0,02\text{kW}$ , APÊNDICE C.21).

### A.3 Energia para Aquecimento do Ar ( $E_A$ )

A energia necessária para aumentar a entalpia do ar foi calculada pela Equação [5.6].

$$E_A = \frac{\dot{m}_{as} \cdot (I_2 - I_1)}{3600} \quad [5.6]$$

onde:  $E_A$  : energia por segundo recebida pelo ar para elevar sua entalpia de  $I_1$  para  $I_2$  (kW);

$I_1$  : entalpia do ar na entrada do trocador de calor (kJ/kg ar seco);

$I_2$  : entalpia do ar na entrada do SRRI (kJ/kg ar seco);

$\dot{m}_{ar}$  : taxa mássica de ar seco = 238,93kg ar seco/h.

As entalpias são obtidas em função da temperatura (T) e da umidade do ar a essa temperatura (Y), e são dadas pela Equação [5.7] (STRUMILLO & KUDRA, 1986). Com os valores de  $T_1 = 37,4^\circ\text{C}$  e  $Y_1 = 0,014\text{kg}$  de água/kg de ar seco a equação fornece  $I_1 = 73,71\text{kJ/kg}$  de ar seco ( $i = 3,65\text{kJ/kg}$  de ar seco, APÊNDICE C.24); e  $I_2 = 210,42\text{kJ/kg}$  de ar seco, com  $T_2 = 170,0^\circ\text{C}$  e  $Y_2 = Y_1 = 0,014\text{kg}$  água/kg de ar seco. Substituindo-se os valores acima na Equação (5.6) tem-se  $E_A = 9,08\text{kW}$  ( $i = 0,35\text{kW}$ , APÊNDICE C.25).

$$I = 1,0058 \cdot T + (2500,8 + 1,860 \cdot T) \cdot Y \quad [5.7]$$

Na Tabela 5.8 apresentam-se os componentes da energia utilizada na operação de secagem. Observa-se que a parcela da energia relativa à movimentação do ar de secagem através do sistema é relativamente desprezível, e a parcela correspondente ao aquecimento do ar tem a maior contribuição.

Tabela 5.8. Componentes da energia gasta na secagem da levedura no SRRI.

componente	energia (kW)
escoamento do ar através do SRRI	0,58
rotação do SRRI	1,41
aquecimento do ar de secagem	9,08

A Equação [5.4], com os valores das energias determinados nos itens A.1, A.2 e A.3, acima, fornece a energia específica  $E_e = 12611,39\text{kJ}/(\text{kg}$  água evaporada) ( $i = 4,19\text{kJ/kg}$  ar seco, APÊNDICE C.26). Esse valor é extremamente elevado e, na realidade, está prejudicado pelas perdas de calor ao ambiente, por convecção e radiação, pelas superfícies não isoladas do secador.

Uma estimativa dessas perdas pode ser obtida considerando-se a variação de entalpia do ar no secador em equilíbrio térmico, antes da alimentação da pasta (tempo de operação igual a zero, Figura 5.10b) para a obtenção de um coeficiente efetivo de transferência de calor, U, dado

pela Equação [5.8] (INCROPERA & WITT, 1990), que fornece o valor de 33,0W/°C .

$$Q = \dot{m}_a \cdot c_p \cdot (T_{a1} - T_{a2}) = UA \cdot \frac{(T_{a1} - T_\infty) - (T_{a2} - T_\infty)}{\ln \frac{T_{a1} - T_\infty}{T_{a2} - T_\infty}} \quad [5.8]$$

onde:  $\dot{m}_a$  : taxa mássica de ar = 4,04kg/min=0,0673kg/s;

$c_p$  : calor específico do ar = 1,00kJ/kg°C;

$T_{a1}$  : temperatura do ar na entrada do SRRI=170°C (Figura 5.10);

$T_{a2}$  : temperatura do ar na saída do SRRI=104°C (Figura 5.10);

$T_\infty$  : temperatura do ar ambiente=30°C;

$U$  : coeficiente efetivo de troca térmica (W/m<sup>2</sup>°C);

$A$  : área de troca térmica = 1,3m<sup>2</sup>.

Considerando-se que o valor desse parâmetro mantém-se constante durante o processo de secagem, e sabendo-se que a temperatura do ar de saída é agora 74,4°C, pode-se estimar a energia perdida pelas paredes do cilindro. Reaplicando-se a Equação [5.8], obtém o valor de 3,38kW.

Um isolamento adequado permitirá, com relativa facilidade, que 90% dessa energia não se dissipe para o ambiente, através da superfície do cilindro. Assim, a energia específica para o SRRI isolado, operando intermitentemente, é estimada em 9560,88kJ/kg água evaporada.

A energia específica verificada no SRRI é superior a de outros tipos de secadores em que se processou levedura termolizada. Na Tabela 5.9 são apresentadas as energias específicas envolvidas na secagem de levedura termolizada processada no SRRI com alimentação por bateladas (a rotação era interrompida para alimentações) (SANTOS et alii, 1993); no SRRI com alimentação intermitente, sem e com isolamento térmico; em *spray dryer*, em secador de tambor e em turbo secador (COPERSUCAR, 1996; RHEINBOLDT et alii, 1987). Adequar o sistema de bombeamento e jateamento à alimentação de uma pasta mais concentrada, da ordem da utilizada no SRRI com alimentação por bateladas (30,0% de sólidos), certamente diminuirá esta energia. Além disso, a queda da área de transferência de calor, devido ao aumento do diâmetro das esferas poderá ser compensada elevando-se o tempo de residência do material no secador, por meio da diminuição da abertura das chicanas ou do aumento do comprimento do secador.

Tabela 5.9. Energias específicas na secagem de levedura termolizada.

tipo de secador utilizado na secagem de levedura termolizada	energia específica.10 <sup>-4</sup> (kJ/kg água evaporada)
<i>spray dryer</i>	0,88*
secador de tambor	0,71*
turbo secador	0,53*
SRRI - alimentação por batelada	0,65**
SRRI - alimentação intermitente, sem isolamento térmico	1,26
SRRI - alimentação intermitente, com isolamento térmico	0,95

\* COPERSUCAR, 1996.

\*\* Tempo morto (sem secagem) (SANTOS et alii, 1993) de 2min e pasta com 30,0% de sólidos.

#### B. Energia Mínima Necessária

Para a evaporação de 3,16kg/h de água, a partir de uma alimentação com 74,14% de umidade e a 29,3°C (APÊNDICE J), é necessário, em termos termodinâmicos, apenas a energia de aquecimento e a de evaporação. Considerando-se que os vapores e o pó saiam a 74,4°C (Figura 5.10), pode-se considerar que a energia gasta corresponde ao aquecimento de toda a pasta alimentada até essa temperatura, quando então se processa a evaporação. O calor específico da pasta de levedura pode ser calculado pela equação de Dickerson (TOLEDO, 1980) e corresponde a 3,53kJ/kg°C, e o calor latente de evaporação da água (74,4°C) é 2320kJ/kg (REYNOLDS, 1979). Desta maneira, aplicando-se a Equação [5.9], tem-se a energia mínima igual a 2,23kW.

$$Q_{mínimo} = \dot{m}_p \cdot c_p \cdot (T_s - T_a) + \dot{m}_{ev} \cdot \Delta H_v = 2,23 \text{ kW} \quad [5.9]$$

onde:  $\dot{m}_p$  : taxa mássica da pasta alimentada = 4,48kg/h;

$c_p$  : calor específico da pasta alimentada = 3,53kJ/kg°C;

$T_s$  : temperatura do pó na saída do SRRI = 74,4°C;

$T_a$  : temperatura da pasta na entrada do secador = 29,9°C (APÊNDICE J);

$\dot{m}_{ev}$ : taxa mássica de evaporação = 3,16kg/h;

$\Delta H_v$  : calor latente de vaporização da água (74,4°C) = 2320kJ/kg

## 2.9 Análise do Comportamento do Secador

Os processos de transferência de calor e de massa dentro do secador envolvem vários mecanismos em paralelo e etapas em série. Os dados levantados neste trabalho são insuficientes para uma modelagem da cinética de secagem. Os valores obtidos, apresentados na Tabela 5.5, juntamente com os balanços de massa e energia, possibilitam, entretanto, o lançamento de bases racionais para qualificação da operação sob o ponto de vista da transferência de calor, e com isso a preparação de trabalhos futuros que conduzam a uma modelagem mais realista.

A dificuldade básica para a compreensão dos mecanismos envolvidos é conseguir separar a contribuição da condução de calor (do recheio e das paredes, aletas e chicanas do secador) na energia necessária para a secagem.

Os valores na Tabela 5.5 e as observações visuais deixam claro que as câmaras 3 e 4 têm contribuição marginal na transferência de calor. Elas parecem necessárias apenas à transferência de massa, para dar o acabamento necessário na demorada etapa final de secagem.

O processo de transferência de calor está concentrado na primeira câmara, com reflexos na segunda. Para efeitos de transferência de calor, portanto, apenas as duas primeiras câmaras serão consideradas.

### A. Calor Condutivo

A base de cálculo para a contribuição do calor condutivo são os extremos de temperatura observados nas câmaras 1 e 2, no transcorrer da secagem. É preciso, entretanto, avaliar a resposta térmica das esferas. No período de parada, o aquecimento é promovido por convecção. Uma estimativa do coeficiente de transferência de calor por convecção, na situação mais favorável (velocidade superficial do ar entre as chicanas na posição do equador), dado pela Equação [2.3], correlação de RANZ e MARSHALL para esferas isoladas, indica  $h=58\text{W/m}^2\text{K}$ . Com as

propriedades térmicas do material da esfera ( $k_m = 40\text{W/m.K}$ ;  $r = 0,015\text{m}$ ), pode-se então prever um número mínimo de Biot ( $Bi=h.r/(k_m)$ ) de 0,022, indicativo de que a resistência interna à transferência de calor não é predominante, e que, nesse caso, a temperatura do sólido é uniforme e igual à de equilíbrio do leito (Tabela 5.5). Essa é certamente a situação no fim da etapa de parada.

Na etapa de alimentação, o leito de sólido recebe uma cobertura de pasta que se mantém a uma temperatura mais baixa, devido à evaporação, esfriando as esferas. O número de Biot eleva-se consideravelmente e é provável que surjam gradientes de temperatura no sólido. Entretanto, o número de Fourier ( $Fo=\alpha.t_p/r^2$ ), para três minutos de contato ( $t_p=3\text{min}$ ), difusividade térmica da esfera ( $\alpha$ ) de  $11.10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$  e raio da esfera ( $r$ ) de  $0,015\text{m}$ , é aproximadamente igual a 9,0. Os gráficos de Heissler para esferas (INCROPERA & WITT, 1990) indicam que esse valor é suficientemente alto para permitir que a temperatura do centro da esfera se aproxime em menos de 1% da temperatura de equilíbrio, quando o número de Biot é 0,17 ou superior. Essa, portanto, deve ser a situação no final da etapa de alimentação.

Dentro da precisão das medidas, portanto, é perfeitamente aceitável considerar que toda a esfera esteja em equilíbrio térmico com as temperaturas medidas no leito (Tabela 5.5). O calor capacitivo cedido pelas esferas, em 8min (ciclo completo), é calculado por meio da Equação [5.10], obtendo-se cerca de 210kJ (na câmara 1) e 90kJ (na câmara 2), totalizando-se, assim, aproximadamente 300kJ em 8min.

$$Q_{\text{esferas}} = m_e \cdot c_p \cdot (T_{fp} - T_{fa}) \quad [5.10]$$

onde:  $m_e$  : massa das esferas por câmara = (massa do leito)/4 =  $57,3/4 = 14,3\text{kg}$

$c_p$  : calor específico do material da esfera (aço) =  $0,46\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ ;

$T_{fp}$  : temperatura no final da parada =  $79,6^\circ\text{C}$  (câmara 1);  $80,72^\circ\text{C}$  (câmara 2);

$T_{fa}$  : temperatura no final da alimentação =  $47,5^\circ\text{C}$  (câmara 1);  $67,1^\circ\text{C}$  (câmara 2);

No início da alimentação, durante a rotação do cilindro, partes da parede metálica, aletas e chicanas ficam temporariamente em contato com a poça de produto que se forma na primeira câmara, recebendo o calor capacitivo. Em princípio, poderiam ser considerados ciclos de

esfriamento e aquecimento com período de 60/33 segundos (tempo para uma volta do cilindro). A Figura 4.8, entretanto, deixa claro que há considerável cobertura das partes metálicas pela levedura, sobretudo enquanto existir a poça, amortecendo assim o efeito aquecimento-esfriamento.

Parece mais lógico supor, portanto, que em um ciclo de 8min as partes metálicas da primeira e segunda câmaras cederam apenas uma vez o calor capacitivo para a alimentação. Considerando-se as mesmas variações de temperatura utilizadas no cálculo para as esferas e uma equibração térmica, calculou-se um calor capacitivo de 199kJ que pode ser cedido por essas partes metálicas para o produto. As paredes externas perdem também calor para o ambiente e, portanto, o valor de 199kJ deve ser considerado como limite máximo.

A contribuição total da capacitância térmica das partes metálicas pode chegar, portanto, a  $(300+199)/(8.60) = 1,08\text{kW}$ . Esse valor é da ordem de 48% da energia mínima necessária para a secagem (Seção 5.2.8.B).

#### B. Calor Convectivo

O modelo mais simples para a transferência de calor por convecção é a lei do resfriamento de Newton (INCROPERA & WITT, 1990), dada pela equação [5.11]. Os três parâmetros da

$$Q_{convecção} = h_{efetivo} \cdot A_{total} \cdot \Delta T \quad [5.11]$$

equação, entretanto, são de difícil determinação. Admitindo-se que a pasta de levedura cobre todas as esferas e grande parte das paredes e aletas, tem-se uma área total de  $11,0\text{m}^2$  ( $5,9\text{m}^2$  das superfícies das esferas e  $5,1\text{m}^2$  das paredes internas e aletas). Considerando-se, novamente, que nas primeiras câmaras ocorre a maior parte da transferência de calor, tem-se uma área total efetiva de  $5,5\text{m}^2$ .

A diferença entre a temperatura do ar e da superfície do produto varia ao longo do secador e também depende da etapa do processo (alimentação ou parada). No ar, a temperatura de saída oscila conforme indicado na Figura 5.10, e, considerando-se que a carga térmica se concentra nas duas primeiras câmaras, pode-se admitir que a temperatura do ar decresce desde  $170^\circ\text{C}$ , na entrada da primeira câmara, até cerca de  $80^\circ\text{C}$ , ao deixar a segunda câmara.

Para a estimativa da temperatura da superfície do produto é preciso novamente fazer uso da Tabela 5.5. Os dados disponíveis permitem apenas realizar uma análise concentrada e simplista. A temperatura média do primeiro estágio é 62°C e, no segundo, 71°C. Utilizando-se, para a diferença de temperatura da Equação [5.11], a média logarítmica das temperaturas externas, tem-se  $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ .

Se a convecção for responsável pela complementação da energia útil necessária, isto é, 52% do calor mínimo (48% devem-se à condução de calor), tem-se, pela Equação [5.11],  $h_{\text{efetivo}}$  aproximadamente igual a 30W/m<sup>2</sup>C, valor da ordem de grandeza dos coeficientes encontrados para escoamento turbulento sobre superfícies não aerodinâmicas (PERRY & GREEN, 1984).

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Uma avaliação do SRRI existente no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia permitiu a identificação de parâmetros críticos de desenho e de operação que conduziram a modificações substanciais no projeto do mesmo, assim como no seu modo de funcionamento.

As conclusões mais importantes são listadas abaixo.

### 1. Quanto à Operação do SRRI

- a) A operação de secagem é viável com o SRRI em rotação ininterrupta e o ar de secagem em escoamento contínuo, devendo, entretanto, a alimentação da pasta de levedura ser intermitente.
- b) O aproveitamento do calor condutivo do leito de inertes foi fundamental para viabilizar a operação de secagem da levedura.
- c) O jateamento da alimentação é condicionante da distribuição homogênea da pasta pelo leito de inertes, induzindo, via percolação do leito, que a pasta atinja a segunda câmara de secagem do cilindro do secador.
- d) O escoamento da pasta mostrou-se sensível à temperatura, tendo mesmo sido interrompido pelo endurecimento da levedura no interior do duto de alimentação, quando exposto ao ar a 170°C.
- e) Os testes de secagem indicaram ser inviável a operação de secagem com alimentação contínua da pasta de levedura, devido à aglomeração constatada do leito, o que levou ao acúmulo de levedura semi-úmida na primeira câmara, após o final da secagem e a um produto com umidade alta.
- f) A alimentação intermitente da pasta de levedura, com aproveitamento do calor condutivo do leito de inertes, verificou-se ser indicada para a operação do SRRI, pois não se observou a ocorrência de aglomeração e acúmulo de massa no secador. Os valores recomendados da umidade

do produto em pó puderam ser atingidos.

g) A umidade do material em pó produzido é bastante sensível à concentração da pasta alimentada no secador, bem como ao tempo durante o qual é realizada a alimentação ( $t_p$ ).

h) A aglutinação dos inertes na primeira câmara dificultou a regeneração térmica do leito. Aumentar o comprimento do SRRI atenuaria esse inconveniente além de propiciar aumento no tempo de residência do material. O resultado seria a obtenção de um pó menos úmido, melhorando o desempenho do sistema.

## 2. Quanto ao Recheio de Inertes do SRRI

a) Os estudos da dinâmica dos inertes indicaram que a altura representativa do volume do leito deve ser considerada inversamente proporcional à viscosidade aparente do material pastoso, para que a aglomeração natural dos inertes seja compensada por uma movimentação intensificada do leito.

b) Verificou-se a existência de arraste dos inertes pelo ar em escoamento pelo secador, deixando as primeiras câmaras praticamente sem inertes e, as últimas, repletas deles. Para cada tipo de leito há uma taxa limite para o ar, acima da qual o arraste é crítico.

c) Os desgastes dos inertes, tanto de cerâmica quanto de aço utilizados em rolamentos mecânicos, foram inferiores às respectivas incertezas de medidas. Quanto aos inertes de aço empregados em moinhos de bola, observou-se desgaste visível logo no início da operação, o que descartou seu uso.

d) O leito com inertes de aço mostrou-se mais danoso ao corpo interno do SRRI que o leito de cerâmica, cuja massa foi inferior àquela (metade). Esses danos constaram de pequenas deformações das aletas e chicanas e maior solicitação do sistema motor do SRRI, quando do uso do leito metálico.

e) Não houve movimentação dos inertes, no sentido crescente das câmaras do cilindro em rotação, quando interrompido o escoamento do ar, o que indicou que a geometria do corpo interno do secador não contribuía para o arraste dos inertes.

### 3. Quanto ao Desenho do SRRI

a) Os testes de arraste com esferas de vários diâmetros (0,02, 0,03 e 0,04m) indicaram que o corte das chicanas associado à dimensão dos inertes atenuou o efeito arraste pelo ar, devido à dificuldade de passagem dos inertes de uma câmara para outra à medida que o diâmetro era aumentado.

b) O SRRI apresentou diversos problemas operacionais diretamente associados à sua natureza rotativa: 1) desgaste dos anéis de vedação com sobrecarga do sistema motor de rotação; 2) vazamentos nas suas conexões com a instalação; 3) barulho excessivo em decorrência do impacto dos inertes com as superfícies metálicas do SRRI.

### 4. Quanto à Avaliação Energética

a) Apesar de ter sido obtida uma energia específica superior à verificada em outros secadores (cerca de 10% superior à correspondente ao *spray dryer*), constatou-se que é possível operar o SRRI em regime intermitente.

b) Essa energia pode ser reduzida com o emprego de levedura mais concentrada, o que exigirá a utilização de um sistema de bombeamento e jateamento adequado.

c) A condução de calor teve uma contribuição igual a 48,0% da energia mínima necessária para a secagem.

Devido a limitações do corpo interno do SRRI já existente, a otimização deixou de considerar vários parâmetros. Para um trabalho mais completo, são apresentadas as recomendações seguintes.

1) Para a obtenção de um produto em pó com umidades menores que 10,0% há a alternativa do aumento da taxa limite do ar de secagem, e o conseqüente arraste dos inertes pode ser compensado pela inclinação do secador.

2) Alternativamente à elevação da taxa do ar, para aumento do tempo de residência do material

no SRRI, as chicanas podem ser substituídas por superfícies metálicas circulares com furos.

3) Modificação das conexões da parte móvel com a fixa da instalação para diminuição das perdas de material em pó.

4) Isolar termicamente o cilindro de secagem para diminuir a queda de temperatura ao longo do SRRI, de modo a aumentar-lhe a capacidade térmica regenerativa inerente à sua operação.

5) Aumentar o comprimento do secador ou acoplar um segundo estágio de secagem (secador pneumático) para completar a secagem.

# APÊNDICE A - DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO DOS INERTES

Os diâmetros médios e desvios padrão foram obtidos através das Equações [A.1] e [A.2].

$$x_m = \frac{1}{N} \sum x_i \quad [A.1]$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_m)^2}{N-1}} \quad [A.2]$$

onde:  $x_m$  : valor médio;  
 $x_i$  : valor medido;  
 $N$  : número de medidas;  
 $\sigma$  : desvio padrão.

Para leitos heterogêneos, como o de esferas de aço-liga, utilizou-se o diâmetro médio de superfície (Sauter),  $d_{ms}$ , dado pela Equação [A.3] (McCABE et alii, 1993).

$$d_{ms} = \frac{1}{\sum \frac{x_p}{d_{mi}}} \quad [A.3]$$

onde:  $d_{ms}$  : diâmetro médio de superfície (diâmetro médio de uma partícula com superfície específica representativa do conjunto de partículas);  
 $x_p$  : fração mássica das partículas;  
 $d_{mi}$  : média aritmética dos diâmetros.

## A.1 Inertes de polietileno

Vinte esferas do leito foram medidas com um paquímetro (resolução  $10^{-5}m$ ), e os valores obtidos estão apresentados na Tabela A.1. As Equações [A.1] e [A.2], com dados da Tabela, fornecem um diâmetro médio igual a 0,01172 m e um desvio padrão igual a 0,002715m.

Tabela A.1 Medidas (N) de diâmetro das esferas de polietileno (d).

N	d (cm)	N	d (cm)	N	d (cm)	N	d (cm)
1	13,10	6	12,35	11	12,20	16	12,40
2	12,50	7	12,30	12	12,30	17	12,40
3	11,40	8	12,15	13	12,20	18	12,45
4	12,50	9	12,30	14	11,35	19	12,20
5	12,40	10	13,10	15	12,40	20	12,20

### A.2 Inertes de cerâmica

Esses inertes, não sendo rigorosamente esferas, tiveram seu tamanho caracterizado por um diâmetro médio (d) dado como a média entre dois diâmetros medidos em direções perpendiculares,  $d_1$  e  $d_2$ . Na Tabelas A.2, A.3 e A.4 apresentam-se as medidas desses diâmetros e dos diâmetros médios para cada tamanho de esfera, obtidos através da Equação [A.1]. As

Tabela A.2 Dimensões características das esferas de cerâmica de diâmetro nominal 0,02 m.

esfera	$d_1$ (cm)	$d_2$ (cm)	d (cm)	esfera	$d_1$ (cm)	$d_2$ (cm)	d (cm)
1	2,190	2,155	2,172	11	2,110	2,135	2,122
2	2,145	2,185	2,165	12	2,110	2,160	2,135
3	2,115	2,150	2,132	13	2,070	2,111	2,090
4	2,135	2,175	2,155	14	2,080	2,140	2,110
5	2,115	2,155	2,135	15	2,070	2,115	2,092
6	2,130	2,180	2,155	16	2,090	2,170	2,130
7	2,105	2,160	2,132	17	2,160	2,140	2,150
8	2,090	2,130	2,110	18	2,110	2,150	2,130
9	2,090	2,130	2,110	19	2,080	2,145	2,112
10	2,135	2,070	2,102	20	2,130	2,170	2,150

Tabela A.3 Dimensões características das esferas de cerâmica de diâmetro nominal 0,03m.

esfera	d <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	d (cm)	esfera	d <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	d (cm)
1	2,820	2,920	2,870	11	2,965	3,045	3,045
2	2,950	3,000	2,975	12	2,800	2,880	2,840
3	2,805	2,815	2,810	13	2,840	2,920	2,880
4	2,910	2,950	2,930	14	2,940	2,960	2,950
5	3,020	2,970	2,995	15	2,855	2,960	2,907
6	2,930	2,980	2,955	16	2,915	3,000	2,957
7	2,940	3,000	2,970	17	2,950	2,990	2,970
8	2,890	2,970	2,930	18	2,840	2,980	2,910
9	2,870	2,950	2,910	19	2,910	2,970	2,940
10	2,880	2,920	2,900	20	2,800	2,850	2,825

Tabela A.4 Dimensões características das esferas de cerâmica de diâmetro nominal 0,04m.

esfera	d <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	d (cm)	esfera	d <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	d (cm)
1	4,070	4,090	4,080	11	4,070	4,120	4,095
2	4,030	4,050	4,040	12	4,100	4,110	4,105
3	4,080	4,040	4,060	13	4,100	4,040	4,070
4	4,080	4,040	4,060	14	4,040	4,000	4,020
5	4,130	4,100	4,115	15	4,060	4,040	4,050
6	4,100	4,160	4,130	16	4,150	4,070	4,110
7	4,130	4,100	4,115	17	4,030	4,010	4,020
8	4,040	4,140	4,090	18	4,080	4,040	4,060
9	4,100	4,070	4,085	19	4,080	4,020	4,050
10	4,090	4,100	4,095	20	4,100	4,100	4,100

médias aritméticas dos diâmetros médios e desvios padrão foram obtidos utilizando-se os dados tabelados, resultando:  $d_m = 0,02129\text{m}$ ,  $\sigma = 2,3 \cdot 10^{-4}\text{m}$  (esferas de 0,02m);  $d_m = 0,02923\text{m}$ ,  $\sigma = 5,810^{-4}\text{m}$  (esferas de 0,03m);  $d_m = 0,04077\text{m}$ ,  $\sigma = 3,18 \cdot 10^{-4}\text{m}$  (esferas de 0,04m).

### A.3 Esferas de aço (moinhos)

Estas esferas foram adquiridas do fabricante (MAGOTTEAUX, 1995), fornecedor para a indústria de cimento, com diâmetro nominal 0,03m, com massa individual de aproximadamente 0,111kg. Medidas realizadas nas esferas indicaram que o diâmetro delas variava de 0,0028m a 0,0032m, e as massas entre 0,097kg e 0,134kg. Essa heterogeneidade levou à utilização do diâmetro de Sauter, Equação [A.3], como representativo do diâmetro das esferas.

Os inertes não eram esféricos, com um pequeno anel separando os dois hemisférios. Por essa razão, para cada esfera, foram medidos o diâmetro desse anel ( $d_2$ ) e o do plano perpendicular a ele ( $d_1$ ). Considerou-se a média aritmética entre tais diâmetros ( $d$ ), como mais um parâmetro da esfera. Nas Tabelas A.5 a A.7 são apresentados esses valores para vinte esferas de cada um dos três intervalos de  $d_1$  (m) verificados nos inertes :  $0,0028 \leq d_1 < 0,0029$ ;  $0,0029 \leq d_1 < 0,003$

Tabela A.5 Dimensões das esferas de aço (moinhos) de diâmetro nominal 0,03m, no intervalo  $2,800 \leq d_1 < 2,900$ .

esfera	$d_1$ (cm)	$d_2$ (cm)	$d$ (cm)	esfera	$d_1$ (cm)	$d_2$ (cm)	$d$ (cm)
1	2,830	2,870	2,850	11	2,810	2,940	2,875
2	2,820	2,965	2,892	12	2,815	2,960	2,887
3	2,850	3,110	2,980	13	2,800	2,940	2,870
4	2,810	2,950	2,880	14	2,810	2,980	2,895
5	2,820	2,980	2,900	15	2,800	2,930	2,865
6	2,820	2,980	2,900	16	2,835	2,960	2,897
7	2,825	2,880	2,852	17	2,860	2,940	2,900
8	2,825	2,960	2,892	18	2,865	2,960	2,912
9	2,880	2,990	2,935	19	2,890	3,160	3,025
10	2,835	2,915	2,875	20	2,830	2,940	2,885

Tabela A.6 Dimensões das esferas de aço de moinhos de diâmetro nominal 0,03m, no intervalo  $2,900 \leq d_1 < 3,240$ .

esfera	$d_1$ (cm)	$d_2$ (cm)	$d$ (cm)	esfera	$d_1$ (cm)	$d_2$ (cm)	$d$ (cm)
1	2,940	3,075	3,007	11	2,930	3,050	2,990
2	2,940	3,050	2,995	12	2,910	3,050	2,980
3	2,905	3,075	2,990	13	2,900	3,055	2,977
4	2,990	3,100	3,045	14	2,960	3,060	3,010
5	2,950	3,085	3,017	15	2,960	3,130	3,045
6	2,980	3,100	3,040	16	2,940	3,120	3,030
7	2,910	3,050	2,980	17	2,940	3,070	3,005
8	2,975	3,100	3,037	18	2,950	3,080	3,015
9	2,970	3,120	3,045	19	2,940	3,025	2,982
10	2,925	3,075	3,000	20	2,995	3,080	3,037

Tabela A.7 Dimensões das esferas de aço liga de moinhos de diâmetro nominal 0,03m, no intervalo  $3,000 \leq d_1 < 3,200$ .

esfera	$d_1$ (cm)	$d_2$ (cm)	$d$ (cm)	esfera	$d_1$ (cm)	$d_2$ (cm)	$d$ (cm)
1	3,200	3,350	3,275	11	3,200	3,375	3,287
2	3,100	3,075	3,087	12	3,075	3,160	3,117
3	3,060	3,185	3,122	13	3,195	3,350	3,272
4	3,050	3,150	3,100	14	3,240	3,330	3,285
5	3,240	3,375	3,307	15	3,185	3,455	3,320
6	3,110	3,235	3,172	16	3,170	3,395	3,282
7	3,185	3,355	3,270	17	3,170	3,270	3,220
8	3,075	3,200	3,137	18	3,200	3,290	3,245
9	3,150	3,280	3,215	19	3,060	3,100	3,080
10	3,085	3,185	3,135	20	3,185	3,410	3,297

e  $0,003 \leq d_1 < 0,0032$ . Com os dados de cada tabela e com as Equações [A.1] e [A.3] são determinadas as médias dos diâmetros médios ( $d$ ) das esferas em cada intervalo e os

respectivos desvios padrão. Essas médias dos  $d$ 's foram consideradas como sendo os  $d_m$ 's da Equação [A.3] (veja equações dadas abaixo).

$$d_m = 2,898 \cdot 10^{-2}m, (\sigma = 0,041 \cdot 10^{-4}m) : 2,80 \cdot 10^{-2}m \leq d_1 < 2,90 \cdot 10^{-2}m$$

$$d_m = 3,010 \cdot 10^{-2}m, (\sigma = 0,023 \cdot 10^{-4}m) : 2,90 \cdot 10^{-2}m \leq d_1 < 3,00 \cdot 10^{-2}m$$

$$d_m = 3,211 \cdot 10^{-2}m, (\sigma = 0,082 \cdot 10^{-4}m) : 3,00 \cdot 10^{-2}m \leq d_1 < 3,29 \cdot 10^{-2}m$$

Cada fração mássica das esferas,  $x_i$ , da Equação [A.3], em cada intervalo de diâmetro, é dada por  $m_i/53,26$ , sendo 53,26 a massa total das esferas do leito e  $m_i$  a massa total das esferas relativa a cada intervalo de diâmetros (Tabela A.8).

Tabela A.8 Dados para caracterização do leito de inertes de esferas de aço (moinhos).

intervalo dos diâmetros (cm)	massa das esferas, $m_i$ (kg)	fração mássica, $x_i$
$2,8 \leq d_1 < 2,9$	7,71	0,1447
$2,9 \leq d_1 < 3,0$	12,21	0,2293
$3,0 \leq d_1 < 3,2$	33,24	0,6260
<b>totais</b>	<b>53,26</b>	<b>1,0000</b>

Os dados da Tabela A.7 com os valores dos diâmetros das Equações [A.4], [A.5] e [A.6] aplicados na Equação [A.3] fornecem um diâmetro médio de Sauter,  $d_{ms}$ , igual a  $3,114 \cdot 10^{-2}m$  ( $t=10^{-5}m$  (APÊNDICE C.3)).

#### A.4 Esferas de aço (rolamentos)

Estas esferas foram doadas pela indústria do açúcar e álcool, apresentando-se no intervalo de diâmetro de 0,027m a 0,0317m, com massas individuais na faixa de 0,079kg a 129,79kg. Essa heterogeneidade no leito obrigou novamente a utilização do diâmetro de Sauter.

Esses inertes mostraram-se rigorosamente esféricos, não se verificando, através de paquímetro, diferenças de diâmetro em uma mesma esfera.

Medidas feitas em todas as esferas do leito mostraram que as mesmas enquadraram-se em um dos quatro grupos de diâmetros seguintes: 0,0270m; 0,0285m; 0,030m e 0,0317m.

As massas e frações mássicas de cada um dos quatro grupos são mostrados na Tabela A.9.

Os dados da Tabela A.9 aplicados na Equação [A.3] fornecem um diâmetro médio de Sauter,  $d_{ms}$ , igual a  $2,907.10^{-2}m$  ( $i=0,2.10^{-5}m$ , APÊNDICE C.3).

Tabela A.9 Dados para caracterização do leito de esferas de aço (rolamentos).

diâmetros.10 <sup>2</sup> (m)	massa (m, kg)	fração mássica (x <sub>i</sub> , %)
2,70	15,98	27,90
2,85	19,25	33,59
3,00	4,24	7,41
3,17	17,82	31,10
<b>totais</b>	<b>57,30</b>	<b>100,00</b>

## APÊNDICE B - DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS INERTES

As densidades das partículas de polietileno, de cerâmica e de aço foram calculadas aplicando-se a Equação [B.1], onde  $m$  e  $v$  são a massa e o volume da partícula, determinados experimentalmente.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad [B.1]$$

### B.1 Determinação das massas

Coletaram-se dez esferas do leito, em pontos a diferentes níveis, medindo-se as respectivas massas com uma balança com resolução de 0,0001kg. Procedeu-se assim para cada tipo de leito. Os valores são apresentados nas Tabelas B.1, B.2, B.3 e B.4, respectivamente para as esferas de aço de rolamentos mecânicos, de polietileno, de cerâmica e aço de corpos moedores utilizados em moinhos de bola (indústria do cimento).

### B.2 Determinação dos volumes

Os volumes das esferas foram dados pela variação volumétrica de água destilada (álcool etílico comercial, no caso de esferas de polietileno, por causa da densidade ser inferior à da água) colocada em uma proveta, após a introdução de uma determinada esfera.

Nas Tabelas B.1, B.2, B.3 e B.4 são mostrados os volumes medidos das esferas utilizadas nos leitos de inertes.

As massas específicas de cada um dos tipos de esfera, dadas pela Equação [B.1] empregando-se os dados das tabelas, são apresentadas nas últimas colunas das mesmas. Aplicando-se a Equação [A.1] para os valores calculados das massas específicas, para cada tipo de esfera, obtêm-se os valores médios respectivos, determinados através das Equações [B.2], [B.3], [B.4] e [B.5].

$$\rho_{\text{aço}} = 7869,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad [\text{B.2}]$$

$$\rho_{\text{polietileno}} = 160,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad [\text{B.3}]$$

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 3539,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad [\text{B.4}]$$

$$\rho_{\text{aço liga}} = 7673,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad [\text{B.5}]$$

Tabela B.1 Massa específica de esferas de aço liga do SRRI inicial (rolamentos mecânicos).

esfera	massa (g)	volume (ml)	densidade (kg/m <sup>3</sup> )	esfera	massa (g)	volume (ml)	densidade (kg/m <sup>3</sup> )
1	13,745	1,8	7636,1	6	28,109	3,9	7207,7
2	16,246	2,0	7736,5	7	28,186	3,5	8053,3
3	13,791	1,6	8620,6	8	39,740	5,3	7498,2
4	11,812	1,4	8437,7	9	35,561	4,5	7902,6
5	28,035	3,6	7787,6	10	44,517	5,7	7810,0

Tabela B.2 Massa específica de esferas de polietileno.

esfera	m (g)	V (ml)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	esfera	m (g)	V (ml)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	0,910	6,1	149,2	6	0,898	6,0	148,4
2	1,141	6,0	190,1	7	1,210	6,2	195,2
3	0,922	5,8	158,9	8	0,910	6,0	151,6
4	0,906	6,0	151,1	9	0,910	6,0	151,7
5	0,904	6,0	150,7	10	0,909	5,9	154,0

Tabela B.3 Massa específica de esferas de cerâmica de 0,02m de diâmetro.

esfera	m (g)	V (ml)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	esfera	m (g)	V (ml)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	18,985	5,10	3772,5	6	17,953	4,60	3902,8
2	18,926	5,95	3180,8	7	19,846	5,70	3481,9
3	18,894	5,30	3564,9	8	19,554	5,60	3491,8
4	17,946	5,30	3386,1	9	18,336	5,10	3595,4
5	18,177	5,25	3462,3	10	18,752	5,20	3606,2

Tabela B.4 Massa específica de esferas de aço liga (moinhos).

esfera	m (g)	V (ml)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	esfera	m (g)	V (ml)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	115,90	14,9	7778,5	6	115,11	16,1	7149,9
2	112,98	14,5	7792,1	7	134,03	17,3	7747,8
3	129,12	16,6	7778,8	8	132,93	17,8	7468,2
4	118,57	15,1	7852,7	9	132,17	17,2	7684,4
5	132,25	16,7	7919,6	10	133,09	17,6	7562,4

# APÊNDICE C - INCERTEZA NAS MEDIDAS EXPERIMENTAIS

INTRODUÇÃO .....	152
C.1 Rotação do cilindro .....	154
C.2 Diâmetro dos inertes .....	155
C.3 Diâmetro médio de Sauter dos inertes de aço .....	155
C.4 Altura z do leito, largura e comprimento das aletas .....	159
C.5 Inclinação das aletas .....	159
C.6 Massa do leito para estudo do desgaste .....	159
C.7 Massa do leito de inertes .....	162
C.8 Massa do inerte .....	162
C.9 Volume do corpo inerte .....	163
C.10 Massa específica .....	163
C.11 Umidade da levedura .....	163
C.12 Temperaturas do ar .....	164
C.13 Pressão no SRRI .....	168
C.14 Produção (taxa mássica de pó) .....	168
C.15 Umidade do pó .....	172
C.16 Taxa mássica do ar .....	175
C.17 Taxa mássica da pasta de levedura .....	175
C.18 Temperatura do leito de aço .....	175
C.19 Velocidade do ar .....	179
C.20 Umidade do ar .....	180
C.21 Energia do motor do SRRI .....	182
C.22 Eficiência do motor do soprador .....	182
C.23 Energia do motor do soprador .....	183
C.24 Entalpia do ar .....	183
C.25 Energia para aquecimento do ar .....	184
C.26 Energia específica .....	184

## INTRODUÇÃO

Erros ocorrem em todo tipo de experimento, não importando o grau de cuidado adotado na sua execução (HOLMAN, 1989). Através da utilização de instrumento padrão determina-se um fator de correção para as medidas feitas com um instrumento comum, corrigindo o que se chama erro sistemático da medida experimental. Tais erros são provocados por histerese, uso de padrões mal aferidos, não-linearidade da escala, etc, mantendo-se com o mesmo valor, não importando o número de repetições das leituras. A este tipo de erro está associado o conceito de exatidão de uma medida (HENNIES et alii, 1989).

Por outro lado, há o erro aleatório ou estatístico, que varia de uma medida para a seguinte, ambas realizadas em condições idênticas. Deve-se às flutuações ambientais, à paralaxe de leitura, à não linearidade ou distorção na impressão da escala, à resolução que requeira estimativa, etc (HENNIES et alii, 1989). Ele está vinculado ao conceito de precisão (discrepância máxima de uma medida em relação ao valor médio de um grupo de medidas realizadas), indicando a habilidade do instrumento de medida de reproduzir uma certa leitura com dada exatidão (HOLMAN, 1989).

A determinação do erro estatístico por um modo mais realístico que o da precisão é conduzida mediante um critério baseado em análise estatística dos dados experimentais, o que assegura um grau de confiabilidade na sua obtenção. A base de qualquer análise estatística é o fato de todos os dados estarem sujeitos a probabilidade de erros (PETERS & TIMMERHAUS, 1993). O erro estatístico, ao contrário do erro sistemático, pode ser reduzido por reiteração das medidas experimentais, decrescendo, em geral, de forma proporcional a  $1/N^{0.5}$ , onde N é o número de medidas (HENNIES et alii, 1989).

Sabe-se que, para um grupo de dados obtido sob condições experimentais controladas, como no caso das medidas sujeitas ao erro estatístico, as medidas realizadas seguem uma distribuição Gaussiana ou distribuição Normal, que é dada pela Equação [C.1] (HOLMAN, 1989):

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[ -x^2 / (2\sigma^2) \right] \quad [C.1]$$

onde:  $p(x)$  é a probabilidade;  $x$  é o desvio da média, igual a  $x_i - x_m$ ;  $\sigma$  é o padrão, dado pela Equação [A.2], em que  $x_i$  é uma medida experimental e  $x_m$  é a média aritmética das medidas experimentais, dada pela Equação [A.1], e  $N$  o número delas.

A probabilidade da ocorrência de determinado fenômeno depende de  $\sigma$ , que estabelece, de acordo com a curva de distribuição de Gauss ( $p(x)$  em função de  $\sigma$ ), o espalhamento das medidas em relação ao valor da média aritmética delas. Holman (1989) apresenta a relação entre esse espalhamento e as probabilidades dos resultados das medidas caírem dentro do desvio especificado. Para um espalhamento igual a  $\sigma$  tem-se uma probabilidade de 68,27%; para  $2\sigma$ , 95,45% e para  $3\sigma$ , 99,73%. Esses percentuais, portanto, significam o nível de probabilidade estatística dos espalhamentos respectivos das medidas, estabelecendo-lhes o nível de precisão.

A utilização do termo incerteza experimental no lugar de erro experimental é recomendada porque a magnitude do erro é sempre incerta (HOLMAN, 1989). Convém assinalar que, rigorosamente, o erro revela a discrepância de uma medida com base nas leituras em instrumento padrão, estando ligado ao conceito de exatidão. A incerteza, porém, consta da discrepância dada em relação a um referencial não necessariamente padronizado. Adota-se, aqui, o rigor da terminologia. A incerteza experimental aparece junto ao valor medido das grandezas aqui apresentadas, de modo a evidenciar-lhes o nível de discrepância, garantindo-lhes um grau de confiabilidade.

Considera-se, para o cálculo das incertezas das grandezas experimentais medidas, um nível de probabilidade conservador, igual a  $2\sigma$ , que é usualmente adotado para minimização do erro estatístico (PETERS & TIMMERHAUS, 1993). A expressão [C.2], dada por Holman (1989), permite a quantificação da incerteza,  $\iota$ , em função deste nível de probabilidade considerado. Nota-se que a incerteza,  $\iota$ , além do desvio padrão,  $\sigma$ , é função do número de medidas experimentais realizadas,  $N$ , como mencionado anteriormente.

$$\iota = \frac{2\sigma}{\sqrt{N}} \quad [C.2]$$

Para uma grandeza  $R$  qualquer, cujo valor tenha uma relação de dependência com os valores de outras grandezas, isto é  $R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , a incerteza de sua medida se propaga

pelo efeito das incertezas das variáveis independentes. Assim, a incerteza de  $R$ ,  $\iota_R$ , é dada em função das incertezas das variáveis independentes, dadas por  $\iota_1, \iota_2, \iota_3, \dots, \iota_n$ , conforme Equação [C.3] (KLINE & MCCLINTOCK, 1953, citado por HOLMAN, 1989).

$$\iota^2_R = \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot \iota_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot \iota_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot \iota_n \right)^2 \quad [C.3]$$

### C.1 Rotação do cilindro ( $\iota_n$ )

De acordo com a Equação [C.3], a incerteza  $\iota_n$  é dada pela Equação [C.4], onde:  $\iota_n$ ,  $\iota_t$  e  $\iota_{n_v}$  são as incertezas nas medidas da rotação, do tempo e do número de voltas;  $n$  o número de voltas dadas num tempo  $t$ .

$$\iota^2_n = \left( \frac{\partial n}{\partial t} \cdot \iota_t \right)^2 + \left( \frac{\partial n}{\partial n_v} \cdot \iota_{n_v} \right)^2 \quad [C.4]$$

As incertezas são obtidas por meio da Equação [C.2], em função dos respectivos desvios padrão e dos números de medidas experimentais. Como o número de voltas,  $n_v$ , é obtido por meio da visualização de uma marca no cilindro, considerou-se, aos níveis de rotação utilizados, o desvio padrão correspondente desprezível, anulando-se a incerteza  $\iota_{n_v}$ .

Para a determinação da incerteza na medida do tempo,  $\iota_t$ , foram realizadas dez medidas ( $N=10$ ) do tempo requerido para ser dado o número de voltas correspondente à maior velocidade de rotação (33,0rpm), veja Tabela C.2. Tem-se, assim, que a média aritmética das medidas do tempo,  $t_m$ , é 0,32429min, e o desvio padrão,  $\sigma$ , igual a 0,00081min, com base nas Equações [A.1] e [A.2].

Substituindo-se os valores, acima determinados, na Equação [C.2], tem-se que a incerteza na medida do tempo é dada por  $\iota_t = 2 \cdot (0,81 \cdot 10^{-3} / (10^{0,5})) = 0,00051$ min. Esse valor da incerteza  $\iota_t$ , por ter sido obtido à maior velocidade de rotação do secador, representa o uso de um critério conservador de cálculo, isto é, considerou-se a condição experimental suscetível ao maior erro experimental da medida realizada, cuja incerteza, portanto, apresenta um coeficiente de segurança elevado.

Tabela C.2 Tempo medido requerido em cada teste para o cilindro dar dez voltas ( $n=33,0\text{rpm}$ ).

medida (N)	tempo, t (min)	$(t_i - t_m)/\sigma$	medida (N)	tempo, t (min)	$(t_i - t_m)/\sigma$
1	0,3258	1,86	6	0,3246	1,86
2	0,3235	0,97	7	0,3246	0,97
3	0,3236	0,85	8	0,3248	0,85
4	0,3238	0,60	9	0,3230	0,60
5	0,3246	0,38	10	0,3246	0,38

O valor da derivada é obtido pela derivação da Equação [4.1], resultando  $-n\sqrt{t}$ . Novamente, adotando-se um critério conservador,  $n$  é dado pela máxima velocidade de rotação do cilindro (33,0rpm), e  $t$  pelo menor valor medido (0,3235min), o que resulta em um valor da derivada igual a 315,33rpm/min.

Finalmente, aplicando-se a Equação [C.4] com os respectivos valores das variáveis, tem-se que a incerteza na medida da rotação do cilindro é igual a  $v_n = (315,33 \cdot 0,00051) = 0,1608\text{rpm}$ .

## C.2 Diâmetro dos inertes

Para o cálculo desta incerteza foram efetuadas dez medidas de uma única esfera, por meio de um paquímetro com resolução  $10^{-5}\text{m}$ . Como as dez medidas realizadas não apresentaram diferença entre si, foi adotado um critério conservador de determinação da incerteza, considerando-a igual à metade da resolução da escala do paquímetro (HENNIES et alii, 1989), isto é  $5 \cdot 10^{-6}\text{m}$ .

## C.3 Diâmetro médio (Sauter) dos inertes de aço

### C.3.1 Esferas de moinhos

As Equações [A.3] e [C.3] combinadas geram a Equação [C.5].

$$\begin{aligned}
 \iota_{d_{ms}}^2 = & \left( \frac{\partial d_{ms}}{\partial m_1} \cdot \iota_{m1} \right)^2 + \left( \frac{\partial d_{ms}}{\partial m_T} \cdot \iota_{mT} \right)^2 + \left( \frac{\partial d_{ms}}{\partial d_1} \cdot \iota_{d1} \right)^2 + \left( \frac{\partial d_{ms}}{\partial m_2} \cdot \iota_{m2} \right)^2 \\
 & + \left( \frac{\partial d_{ms}}{\partial d_2} \cdot \iota_{d2} \right)^2 + \left( \frac{\partial d_{ms}}{\partial m_3} \cdot \iota_{m3} \right)^2 + \left( \frac{\partial d_{ms}}{\partial d_3} \cdot \iota_{d3} \right)^2 \quad [C.5]
 \end{aligned}$$

onde:  $m_1, m_2$  e  $m_3$  : massa de inertes com diâmetro  $d_1, d_2$  e  $d_3$  (Tabela A.8);

$m_T$  : massa total do leito =  $m_1 + m_2 + m_3$ ;

$\iota_{mi}$  e  $\iota_{di}$  : incertezas das massas e diâmetros (Seções C.2 e C.8).

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_1} = \frac{\frac{-1}{m_T \cdot d_1}}{\left( \frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} \right)^2} = -0,0628$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_T} = \frac{-\left( \frac{m_1}{d_1 \cdot m_T^2} + \frac{m_2}{d_2 \cdot m_T^2} + \frac{m_3}{d_3 \cdot m_T^2} \right)}{\left( \frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} \right)^2} = -0,0060$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial d_1} = \frac{\frac{-m_1}{m_T \cdot d_1^2}}{\left( \frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} \right)^2} = -0,1671$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial d_2} = \frac{\frac{-m_2}{m_T \cdot d_2^2}}{\left( \frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} \right)^2} = -0,2438$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_2} = \frac{\frac{-1}{m_T \cdot d_2}}{\left( \frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} \right)^2} = -0,0605$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_3} = \frac{\frac{-1}{m_T \cdot d_3}}{\left(\frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3}\right)^2} = -0,0563$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial d_3} = \frac{\frac{-m_3}{m_T \cdot d_3^2}}{\left(\frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3}\right)^2} = -1,8781$$

Substituindo-se esses valores acima na Equação [C.5], com  $v_{mi} = 5 \cdot 10^{-6} \text{g}$  (Seção C.8) e  $v_{di} = 5 \cdot 10^{-6} \text{m}$  (Seção C.2), tem-se que a incerteza  $v_{dms}$  é igual a  $10^{-5} \text{m}$ .

### C.3.2 Esferas de rolamentos

As Equações [A.3] e [C.3] combinadas geram a Equação [C.6], abaixo.

$$v_{dms}^2 = \left(\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_1} \cdot v_{m1}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_T} \cdot v_{mT}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{ms}}{\partial d_1} \cdot v_{d1}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_2} \cdot v_{m2}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{ms}}{\partial d_2} \cdot v_{d2}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_3} \cdot v_{m3}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{ms}}{\partial d_3} \cdot v_{d3}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_4} \cdot v_{m4}\right)^2 + \left(\frac{\partial d_{ms}}{\partial d_4} \cdot v_{d4}\right)^2 \quad [C.6]$$

onde:  $m_1, m_2, m_3$  e  $m_4$  : massas de inertes, diâmetros  $d_1, d_2, d_3$  e  $d_4$  (Tabela A.9);  
 $m_T$  : massa total do leito =  $m_1 + m_2 + m_3 + m_4$ ;  
 $v_{mi}$  e  $v_{di}$  : incertezas das massas e diâmetros.

As derivadas parciais são obtidas utilizando-se a Equação [A.3] e dadas abaixo, com os valores das suas variáveis, determinados anteriormente, como:  $m_1=15,98\text{g}$ ;  $m_2=19,25\text{g}$ ;  $m_3=4,25\text{g}$ ;  $m_4=17,82\text{g}$  e  $m_T=57,30\text{g}$ ;  $d_1=2,700\text{cm}$ ;  $d_2=2,850\text{cm}$ ;  $d_3=3,00\text{cm}$  e  $d_4=3,170\text{cm}$  (da Tabela A.9).

Substituindo-se na Equação [C.5] os valores obtidos abaixo, com os valores de  $v_{mi} = 5 \cdot 10^{-6} \text{g}$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_1} = \frac{\frac{-1}{m_T \cdot d_1}}{\left(\frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} + \frac{m_4}{m_T \cdot d_4}\right)^2} = -0,0546$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_T} = \frac{-\left(\frac{m_1}{d_1 \cdot m_T^2} + \frac{m_2}{d_2 \cdot m_T^2} + \frac{m_3}{d_3 \cdot m_T^2} + \frac{m_4}{d_4 \cdot m_T^2}\right)}{\left(\frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} + \frac{m_4}{m_T \cdot d_4}\right)^2} = -0,0507$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial d_1} = \frac{\frac{-m_1}{m_T \cdot d_1^2}}{\left(\frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} + \frac{m_4}{m_T \cdot d_4}\right)^2} = -0,3232$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_2} = \frac{\frac{-1}{m_T \cdot d_2}}{\left(\frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} + \frac{m_4}{m_T \cdot d_4}\right)^2} = -0,0517$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial d_2} = \frac{\frac{-m_2}{m_T \cdot d_2^2}}{\left(\frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} + \frac{m_4}{m_T \cdot d_4}\right)^2} = -0,3495$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_3} = \frac{\frac{-1}{m_T \cdot d_3}}{\left(\frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} + \frac{m_4}{m_T \cdot d_4}\right)^2} = -0,0491$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial d_3} = \frac{\frac{-m_3}{m_T \cdot d_3^2}}{\left(\frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} + \frac{m_4}{m_T \cdot d_4}\right)^2} = -0,0696$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial m_4} = \frac{\frac{-1}{m_T \cdot d_4}}{\left( \frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} + \frac{m_4}{m_T \cdot d_4} \right)^2} = -0,0465$$

$$\frac{\partial d_{ms}}{\partial d_4} = \frac{\frac{-m_4}{m_T \cdot d_4^2}}{\left( \frac{m_1}{m_T \cdot d_1} + \frac{m_2}{m_T \cdot d_2} + \frac{m_3}{m_T \cdot d_3} + \frac{m_4}{m_T \cdot d_4} \right)^2} = -0,2615$$

(Seção C.8) e  $\iota_{di} = 5 \cdot 10^{-6} \text{m}$  (Seção C.2), tem-se que a incerteza  $\iota_{dms}$  é igual a  $2,25 \cdot 10^{-6} \text{m}$ .

#### C.4 Altura z do leito, largura e comprimento das aletas

Essas medidas foram feitas com uma régua com resolução igual a 0,001m. A incerteza foi considerada como sendo igual à metade desse valor, como mencionado anteriormente, isto é,  $5 \cdot 10^{-4} \text{m}$ .

#### C.5 Inclinação das aletas

Utilizou-se para a medida da inclinação das aletas um transferidor com resolução igual a 1°, considerando-se a incerteza correspondente como a metade desse valor (HENNIES et alii, 1989), isto é 0,5°.

#### C.6 Massa do leito para estudo do desgaste ( $\iota_m$ )

##### C.6.1 Inertes de cerâmica

As massas de três grupos de esferas (0,02, 0,03 e 0,04m de diâmetro) foram determinadas em balança analítica (resolução  $10^{-5} \text{g}$ ) (Tabelas C.3 e C.4).

Utilizando-se as Equações [A.1], [A.2] e [C.2], com os dados das Tabelas C.3 e C.4 determinam-se os valores apresentados na Tabela C.5.

Tabela C.3 Massas individuais de vinte esferas (cerâmica) sem uso de diâmetro nominal 0,02 m.

esfera	massa (g)	esfera	massa (kg)
1	19,6039	11	18,0103
2	19,2583	12	19,2379
3	18,1205	13	18,8081
4	19,0757	14	19,0728
5	19,1020	15	18,8479
6	19,1282	16	18,1962
7	19,9533	17	18,8216
8	20,0155	18	18,8334
9	19,5712	19	18,5180
10	18,8111	20	18,0316

Tabela C.4 Massas de 20 esferas (cerâmica), sem uso, de diâmetros nominais de 0,03 e 0,04m.

esfera	massas, g d=0,03m	massas, g d=0,04m	esfera	massas, g d=0,03m	massas, g d=0,04m
1	37,2651	126,08	11	46,2359	128,89
2	47,0407	125,08	12	49,3425	124,49
3	48,1740	126,77	13	45,3717	129,60
4	45,7471	125,67	14	44,0753	129,94
5	46,5056	129,46	15	46,9946	125,35
6	45,5156	134,19	16	46,7958	129,55
7	45,9946	126,62	17	48,4118	124,56
8	50,7569	129,34	18	46,9436	124,80
9	42,7213	124,08	19	49,8863	123,23
10	43,3081	124,08	20	46,8352	131,42

Tabela C.5. Incertezas das massas das esferas para N=20.

dados relativos à massa das esferas	diâmetro das esferas de cerâmica, m		
	0,02	0,03	0,04
massa média (g)	18,95	46,1	127,19
desvio padrão (g)	0,58	2,91	2,91
incerteza (g)	0,26	1,30	1,30

C.6.2 Inertes de aço (rolamentos)

Com as Equações [A.1], [A.2] e [C.2] e os dados da Tabela C.6 foram determinadas a massa média ( $111,3832 \cdot 10^{-3} \text{kg}$ ),  $\sigma=5,505 \cdot 10^{-4} \text{kg}$  e a incerteza  $\iota_m=2,679 \cdot 10^{-4} \text{kg}$ , para N=38.

Tabela C.6 Massas de 38 esferas sem uso, de aço (rolamentos), com diâmetro 0,03m.

esfera	massa (g)	esfera	massa (g)	esfera	massa (g)
1	111.5517	14	111.6545	27	111.5578
2	111.5694	15	109.8040	28	111.5608
3	111.6447	16	111.5440	29	111.5628
4	111.5614	17	111.5626	30	111.5611
5	111.5748	18	111.5700	31	111.5708
6	111.6412	19	111.5463	32	111.5644
7	111.5601	20	111.5625	33	111.5591
8	109.8037	21	111.5527	34	111.5694
9	111.5740	22	111.5551	35	111.5619
10	111.5600	23	111.5677	36	111.5643
11	111.5605	24	109.7933	37	111.5555
12	111.5621	25	111.5728	38	111.5608
13	109.8023	26	111.5630	-	-

C.7 Massa do leito de inertes ( $i_m$ )

As massas iniciais dos leitos, 22,14993kg (esferas de cerâmica de diâmetro nominal 0,02m), 22,149kg (esferas de cerâmica de diâmetro nominal 0,03m), 24,363kg (esferas de cerâmica de diâmetro nominal 0,04m), 53,3679kg (esferas de aço de moinhos, com 0,031m de diâmetro de Sauter e 57,3032kg (esferas de aço de rolamentos, com 0,029 de diâmetro de Sauter) foram pesadas em uma balança digital (não analítica) com resolução de  $10^{-4}$ kg. Considerou-se a incerteza da massa do leito de esferas de cerâmica de 0,02m de diâmetro como representativa das incertezas das massas dos outros dois leitos, do leito com esferas de aço de moinhos e daquele com esferas de rolamentos. Foram realizadas várias medidas de uma massa fixa menor do leito, e os resultados são apresentadas na Tabela C.7.

As Equações [A.1], [A.2], com os dados da tabela fornecem uma massa média de 1,8494kg e  $\sigma=2,0 \cdot 10^{-5}$ kg. Com estes valores com  $N=10$  obtém-se (Equação [C.2]) a incerteza  $1,3 \cdot 10^{-5}$ kg.

Tabela C.7 Medidas de uma massa fixa de uma amostra do leito constituído por esferas de cerâmica com diâmetro nominal igual a 0,02m.

medida (N)	massa (kg)	medida (N)	massa (kg)
1	1,84944	6	1,84945
2	1,84945	7	1,84940
3	1,84946	8	1,84941
4	1,84943	9	1,84941
5	1,84943	10	1,84944

C.8 Incerteza na medida da massa do inerte ( $i_p$ )

Utilizou-se uma balança analítica (resolução  $10^{-5}$ g). Como não se verificou diferença perceptível nas várias medidas da massa de uma mesma esfera, considerou-se a incerteza como

a metade da resolução da escala da balança, ou seja,  $5 \cdot 10^{-6}$ g.

### C.9 Volume do corpo inerte ( $v$ )

Várias medidas de um mesmo volume, realizadas na bureta empregada na determinação do volume das esferas (APÊNDICE B.2), não revelaram diferenças perceptíveis. Isto induziu a adoção da referida incerteza como sendo metade da resolução da escala da bureta, isto é, 0,1ml.

### C.10 Massa específica dos inertes ( $\rho$ )

De acordo com as Equações [B.1] e [C.4],  $\rho$  é dada pela Equação [C.7] abaixo. Os valores de  $V$  e  $m$  são médios, dados no Apêndice B; as incertezas são dadas nos Seções C.8 e C.9. Na Tabela C.8 apresentam-se os resultados para os inertes.

$$\rho_p^2 = \left( \frac{1}{V} \cdot \rho_m \right)^2 + \left( \frac{-m}{V^2} \cdot \rho_v \right)^2 \quad [C.7]$$

Tabela C.8 Incerteza da massa específica dos diversos inertes.

variável	material constitutivo do inerte			
	aço (rolamento)*	polietileno	cerâmica	aço (moinho)
$m$ (g)	13,74	0,91	18,95	11,29
$v$ (ml)	1,80	6,10	5,40	14,50
$\rho_m$ (g)	0,05	0,05	0,05	0,05
$\rho_v$ (ml)	0,10	0,10	0,10	0,10
$\rho_p$ (kg/m <sup>3</sup> )	425,13	8,55	65,64	53,84

\*SRRI inicial

### C.11 Umidade da levedura

Utilizando-se as Equações [C.3] e [D.2] tem-se que a incerteza na medida da umidade

da levedura é dada pela Equação [C.8] abaixo. As incertezas na Equação [C.8] foram consideradas iguais a  $5 \cdot 10^{-6}g$  (Seção C.8). As derivadas foram obtidas utilizando-se a Equação

$$v_{X'}^2 = \left( \frac{\partial X'}{\partial m_{Tu}} \cdot v_{m_{Tu}} \right)^2 + \left( \frac{\partial X'}{\partial m_{Ts}} \cdot v_{m_{Ts}} \right)^2 + \left( \frac{\partial X'}{\partial m_f} \cdot v_{m_f} \right)^2 \quad [C.8]$$

[D.2], sendo dadas abaixo, com os valores das suas variáveis substituídos por um conjunto de dados característico, dado por:  $m_{Tu}=34,6770g$ ;  $m_{Ts}=34,4736g$ ;  $m_f=32,6563g$  e  $X'=10,0658\%$ . Após as substituições dos valores na Equação [C.8], tem-se  $v_{X'}= 2,55 \cdot 10^{-4}\%$ .

$$\frac{\partial X'}{\partial m_{Tu}} = \frac{m_{Ts} - m_f}{(m_{Tu} - m_f)^2} = 0,4450g^{-1}$$

$$\frac{\partial X'}{\partial m_{Ts}} = \frac{-1}{(m_{Tu} - m_f)^2} = -0,2449g^{-1}$$

$$\frac{\partial X'}{\partial m_f} = \frac{m_{Tu} - m_{Ts}}{(m_{Tu} - m_f)^2} = 0,0498g^{-1}$$

## C.12 Temperaturas do ar

### C.12.1 Leito com esferas de cerâmica

Os dados constam da Figura 5.5, a partir do estabelecimento do regime permanente, isto é, 15,0min. As Equações [A.1], [A.2] e [C.2] fornecem os valores médios, os desvios padrão e as incertezas, respectivamente (Tabela C.9).

### C.12.2 Leito com esferas de aço

#### - Temperaturas externas ao SRRI

Os dados constam da Figura 5.5a (Ensaio A) e Figura C.1 (Ensaio B, repetição), a partir do estabelecimento do regime permanente, isto é, 20,0min. As Equações [A.1], [A.2] e [C.2]

Tabela C.9 Dados para cálculo da incerteza nas temperaturas do ar para o leito de cerâmica.

variável*	N	valor médio (°C)	desvio padrão (°C)	incerteza (°C)
$T_e$	56	170,1	2,38	0,63
$T_s$	42	95,1	2,30	0,71
$T_c$	42	85,6	2,02	0,62

\*  $T_e$  e  $T_s$ : entrada e saída do SRRI;  $T_c$ : saída do ciclone.

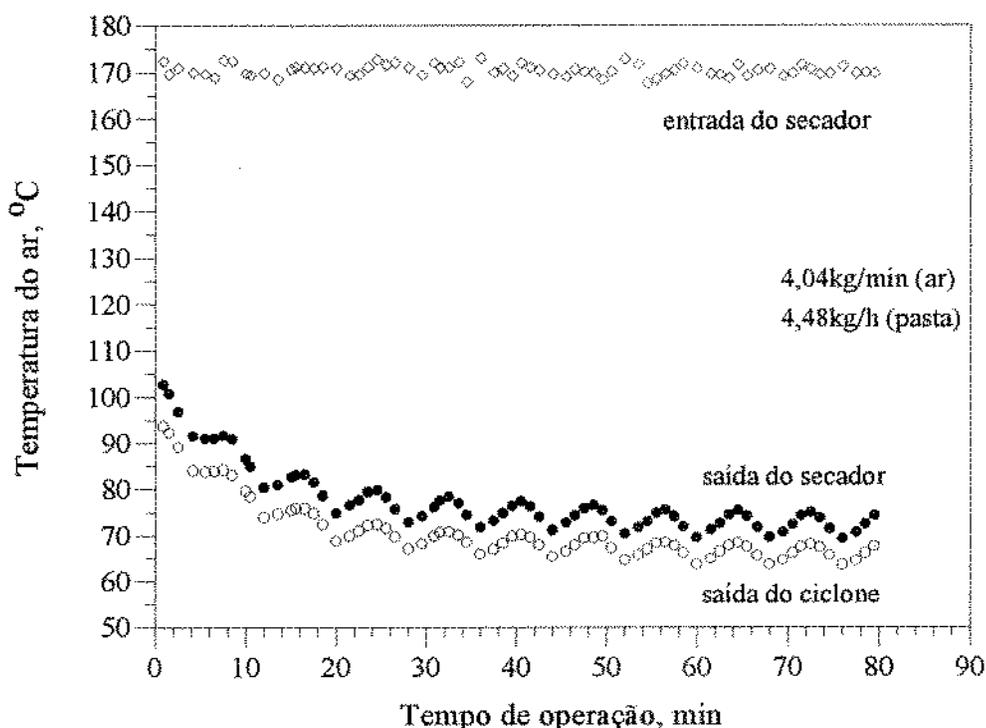


Figura C.1 Temperaturas do ar em função do tempo de operação. SRRI com recheio de aço e alimentação intermitente da pasta ( $t_a=3,0\text{min}$  e  $t_p=5,0\text{min}$ ) (Ensaio B).

fornecem os valores médios, os desvios padrão e as incertezas, respectivamente. Na Tabela C.10 têm-se os valores obtidos para cada variável. Com os dois valores médios de cada temperatura (um de cada ensaio) são determinadas as médias:  $T_e=170,19^\circ\text{C}$ ;  $T_s=73,23^\circ\text{C}$  e  $T_c=68,24^\circ\text{C}$ . As incertezas são calculadas por meio da equação [C.3], com as incertezas de cada termo dadas na Tabela C.10. As derivadas parciais são dadas pela média, como abaixo. Substituindo o valor das derivadas e o das incertezas tem-se que a incerteza na temperatura de entrada  $T_e$  é  $\iota_{T_e}=0,19^\circ\text{C}$ .

Tabela C.10 Dados para cálculo da incerteza na medida das temperaturas do ar de secagem para leito de inertes contituído por esferas de aço para o Ensaio A e sua repetição (Ensaio B).

variável*	N	valor médio (°C)	desvio padrão (°C)	incerteza (°C)
e n s a i o A				
T <sub>e</sub>	70	170,0	1,07	0,26
T <sub>s</sub>	53	74,4	2,29	0,63
T <sub>c</sub>	53	68,8	1,97	0,54
e n s a i o B				
T <sub>e</sub>	69	170,4	1,21	0,29
T <sub>s</sub>	53	72,2	2,53	0,69
T <sub>c</sub>	53	67,8	2,24	0,61

\* T<sub>e</sub> e T<sub>s</sub>: entrada e saída do SRRI; T<sub>c</sub>: saída do ciclone.

$$T_e = \frac{T_e \text{ (teste inicial)} + T_e \text{ (teste repetido)}}{2}$$

$$\frac{\partial T_e \text{ (teste inicial)}}{\partial T_e} = \frac{\partial T_e \text{ (teste repetido)}}{\partial T_e} = 0,5$$

Analogamente, as outras incertezas são:  $v_{T_s}=0,46^\circ\text{C}$  e  $v_{T_c}=0,41^\circ\text{C}$ .

- Temperaturas internas ao SRRI

Os dados constam das Figuras 5.13 e 5.14, tomados a partir do estabelecimento regime permanente, em torno de 35s. As Equações [A.1], [A.2] e [C.2] fornecem os valores médios (T<sub>m</sub>), os desvios padrão (σ) e as incertezas (v), respectivamente (ver Tabela C.11). As médias desses valores fornecem as temperaturas em cada câmara. As incertezas são obtidas pela equação [C.3], com as derivadas calculadas das expressões das médias e as incertezas da Tabela C.11.

Tabela C.11 Dados das temperaturas relativos aos ensaios repetitivos.

variável medida	ensaio realizado				
	a	b	c	d	e
<b>PRIMEIRA CÂMARA</b>					
N	5	5	7	10	7
T <sub>m</sub> (°C)	151,4	152,1	151,5	154,0	152,4
σ (°C)	0,25	0,46	1,15	0,77	0,62
ι (°C)	0,33	0,61	1,30	0,73	0,70
<b>SEGUNDA CÂMARA</b>					
N	4	7	9	-	-
T <sub>m</sub> (°C)	112,4	117,7	116,7	-	-
σ (°C)	0,32	0,35	0,33	-	-
ι (°C)	0,48	0,39	0,33	-	-
<b>TERCEIRA CÂMARA</b>					
N	9	6	7	6	6
T <sub>m</sub> (°C)	111,9	109,8	110,5	110,5	108,2
σ (°C)	0,21	0,25	0,28	0,08	0,33
ι (°C)	0,21	0,30	0,32	0,10	0,40
<b>QUARTA CÂMARA</b>					
N	6	5	6	6	4
T <sub>m</sub> (°C)	106,1	105,2	104,1	104,6	103,8
σ (°C)	0,42	0,67	0,34	0,60	0,67
ι (°C)	0,51	0,82	0,42	0,74	1,00

$$T_{\text{câmara1}} = \frac{151,4 + 152,1 + 151,5 + 154,0 + 152,4}{5} = 152,3^{\circ}\text{C} \quad (\iota = 0,36^{\circ}\text{C})$$

$$T_{câmara2} = \frac{1112,4+1117,7+1116,7}{3} = 115,6^{\circ}C \quad (\iota = 0,24^{\circ}C)$$

$$T_{câmara3} = \frac{111,9+109,8+110,5+110,5+108,2}{5} = 110,2^{\circ}C \quad (\iota=0,13^{\circ}C)$$

$$T_{câmara4} = \frac{106,1+105,2+104,1+104,6+103,8}{5} = 104,8^{\circ}C \quad (\iota=0,33^{\circ}C)$$

### C.13 Queda de pressão no SRRI

#### C.13.1 Leito de esferas de cerâmica

Os dados na Figura 5.5b (N=51) com as Equações [A.1], [A.2] e [C.2] fornecem: média de 16,5cm de água; desvio padrão de 0,10cm de água e a incerteza 0,03cm de água.

#### C.13.2 Leito de esferas de aço

Os dados presentes na Figura 5.10a (N=52) juntamente com as Equações [A.1], [A.2] e [C.2] fornecem: média de 18,28cm de água; desvio padrão de 0,21cm de água e a incerteza 0,09cm de água.

### C.14 Produção (taxa mássica de pó)

#### C.14.1 Leito de esferas de cerâmica

Os dados são obtidos da Figura 5.6, a partir do estabelecimento do regime permanente, isto é, 15min. As Equações [A.1], [A.2] e [C.2] fornecem os valores médios, os desvios padrão e as incertezas, respectivamente. Na Tabela C.12 são apresentados os valores obtidos para cada variável, tanto para o sedimentador quanto para o ciclone.

Tabela C.12 Dados para cálculo da incerteza na medida das taxas mássicas de pó relativas ao sedimentador e ao ciclone.

etapa	N	valor médio (kg/h)	desvio padrão (kg/h)	incerteza (kg/h)
<b>s e d i m e n t a d o r</b>				
alimentação	7	0,067	0,023	0,017
parada	7	0,226	0,028	0,021
total	7	0,295	0,049	0,037
<b>c i c l o n e</b>				
alimentação	6	0,083	0,0282	0,017
parada	6	0,269	0,0277	0,027
total	6	0,353	0,0350	0,037

#### C.14.2 Leito de esferas de aço

- Ensaios inicial (A) e repetido (B)

Procedeu-se como no item anterior. Nas Tabelas C.13 e C.14 têm-se os valores obtidos para cada variável, com base nas Figura 5.11 (Ensaio A) e da Figura C.2 (Ensaio B), a partir do regime permanente de operação(25,0 e 24,0min). Em relação às perdas de levedura em forma de pó, a incerteza é dada por  $(0,044/0,649).100 = 6,8\%$  (Ensaio A) e  $(0,033/0,690).100 = 4,8\%$  (Ensaio B).

- Valores médios entre os ensaios inicial e repetido

Com cada par dos valores médios no ciclone e sedimentador, são determinadas as médias: 0,669kg/h no o ciclone e 0,421kg/h no sedimentador. As incertezas são calculadas por meio da Equação [C.3], com a incerteza de cada termo dada na Tabela C.13 e C14. As derivadas

Tabela C.13 Dados relativos às taxas mássicas de pó para o Ensaio A.

etapa	N	valor médio (kg/h)	desvio padrão (kg/h)	incerteza (kg/h)
s e d i m e n t a d o r				
alimentação	8	0,097	0,019	0,013
parada	8	0,353	0,070	0,049
total	8	0,451	0,086	0,060
c i c l o n e				
alimentação	8	0,115	0,020	0,014
parada	8	0,534	0,060	0,042
total	8	0,649	0,062	0,044

Tabela C.14 Dados relativos às taxas mássicas de pó para o Ensaio B.

etapa	N	valor médio (kg/h)	desvio padrão (kg/h)	incerteza (kg/h)
s e d i m e n t a d o r				
alimentação	8	0,081	0,017	0,012
parada	8	0,311	0,049	0,035
total	8	0,392	0,061	0,043
c i c l o n e				
alimentação	8	0,129	0,017	0,012
parada	8	0,561	0,043	0,030
total	8	0,690	0,047	0,033

baseiam-se na expressão da média e são dadas a seguir. Para o sedimentador e para o ciclone os valores das derivadas são os mesmos. Substituindo o valor das derivadas e o das incertezas tem-se que a incerteza na taxa mássica no ciclone é 0,027kg/h e, no sedimentador, 0,037kg/h. Quanto às perdas, o valor médio é dado do mesmo modo utilizado para o ciclone e sedimentador, igual

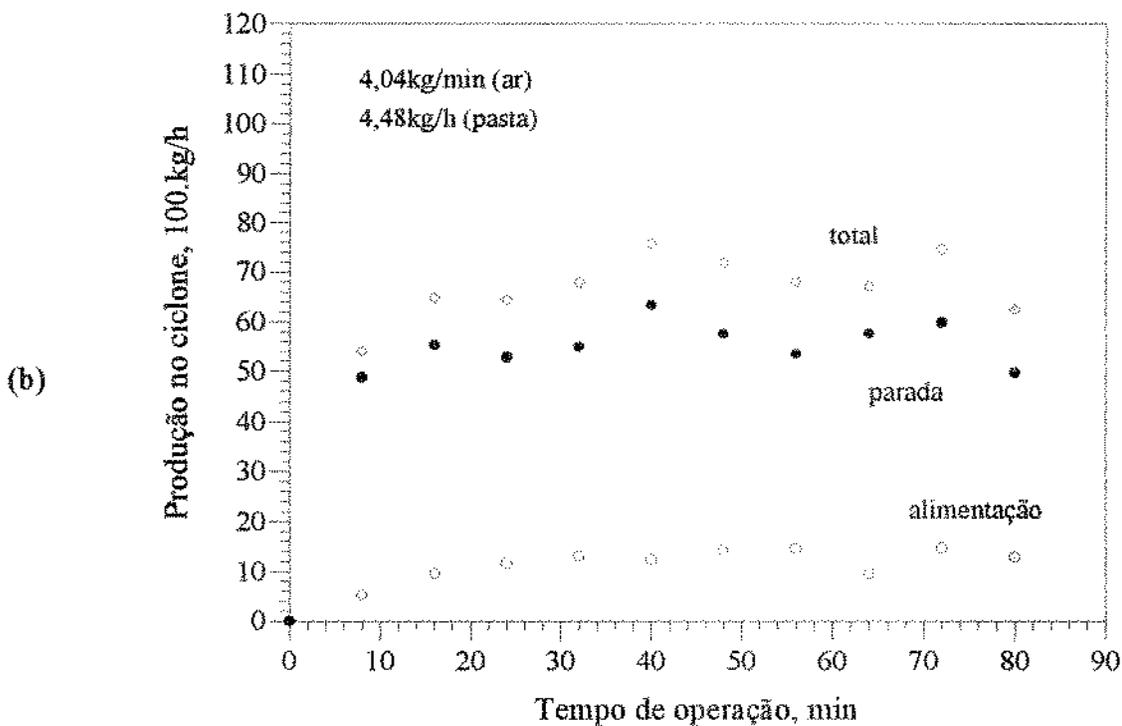
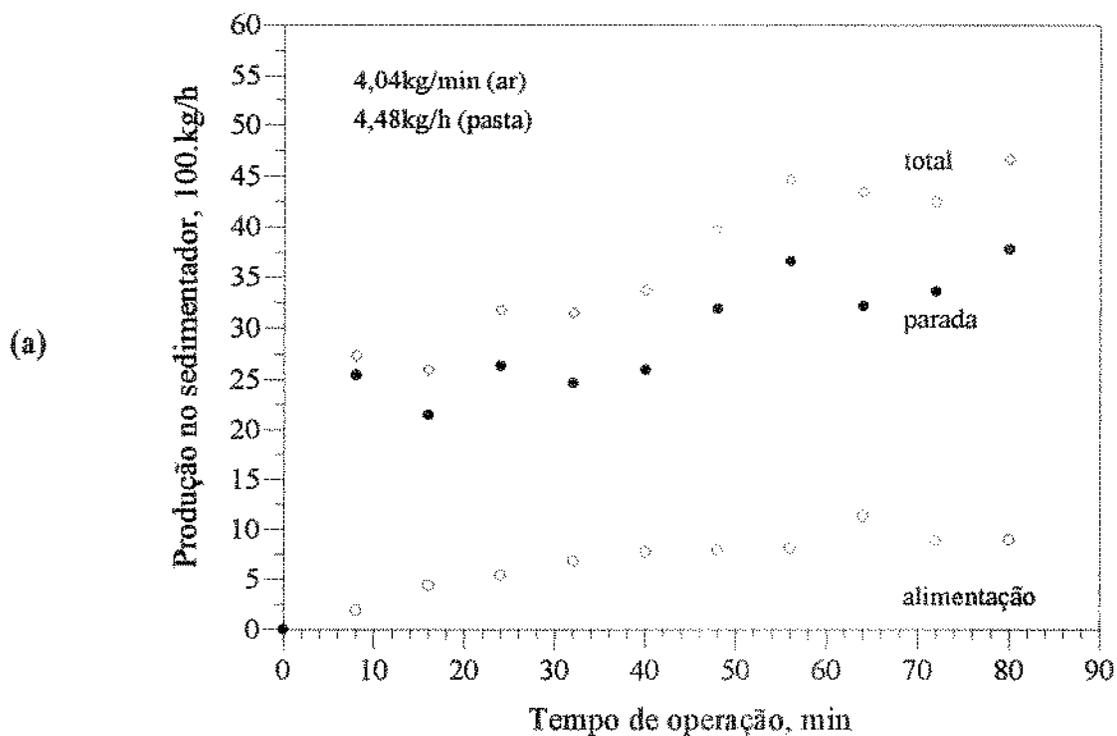


Figura C.2 Produção de levedura em pó em função do tempo de operação. SRRI com recheio de aço e alimentação intermitente da pasta ( $t_a=3,0\text{min}$  e  $t_p=5,0\text{min}$ ) (Ensaio B).

$$\dot{m}_{ciclone} = \frac{\dot{m}_{ciclone (ensaio A)} + \dot{m}_{ciclone (ensaio B)}}{2}$$

$$\frac{\partial \dot{m}_{ciclone}}{\partial \dot{m}_{ciclone(ensaio A)}} = \frac{\partial \dot{m}_{ciclone}}{\partial \dot{m}_{ciclone (ensaio B)}} = 0,5$$

à média aritmética entre os resultados obtidos nos dois testes: 0,231kg/h. A incerteza é obtida aplicando-se a Equação [C.3] com as derivadas parciais iguais a 0,5 (obtido acima), resultando 0,009kg/h.

### C.15 Umidade do pó

#### C.15.1 Leito de cerâmica

Os dados constam da Figura 5.7, a partir do regime permanente, isto é, 15,0min. As Equações [A.1], [A.2] e [C.2] dão os valores médios, desvios padrão e as incertezas. Na Tabela C.15 têm-se os valores obtidos para cada variável.

Tabela C.15 Dados para cálculo da incerteza na medida das umidades do pó.

etapa	N	valor médio (%)	desvio padrão (%)	incerteza (%)
s e d i m e n t a d o r				
alimentação	6	10,67	0,636	0,519
parada	5	13,36	0,886	0,792
total	11	11,89	1,587	0,957
c i c l o n e				
alimentação	6	11,13	0,540	0,440
parada	6	8,65	1,340	1,094
total	12	9,89	1,672	0,965

C.15.2 Leito de esferas de aço

- Ensaios inicial (A) e repetido (B)

Nas Tabelas C.16 e C.17 apresentam-se os dados, com base nas Figuras 5.12 (Ensaio A) e C.3 (Ensaio B), a partir do estabelecimento do regime permanente (20,0min).

- Valores médios entre os ensaios inicial (A) e repetido (B)

Com cada par dos valores médios no ciclone e no sedimentador, são determinadas as médias: 9,99% (ciclone) e 17,60% sedimentador). As incertezas são calculadas por meio da equação [C.3], com os valores de cada termo dados nas Tabelas C.16 e C.17. As derivadas baseiam-se na expressão da média, como dado abaixo. Para o sedimentador e ciclone as derivadas são as mesmas. Substituindo-se o valor das derivadas e o das incertezas tem-se que as incertezas na taxa resultam 0,57% (no ciclone) e 0,50% (no sedimentador).

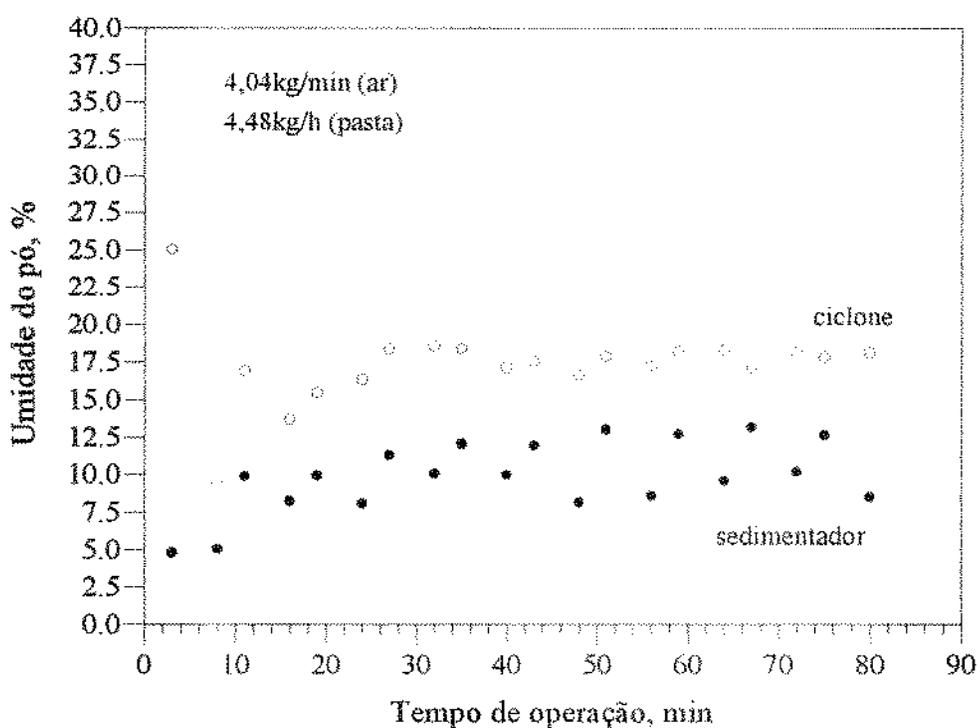


Figura C.3 Umidade da levedura (pó) em função do tempo de operação. Leito de aço e alimentação intermitente da pasta ( $t_a=3,0\text{min}$  e  $t_p=5,0\text{min}$ ). Ar a  $170^\circ\text{C}$  (Ensaio B).

Tabela C.16 Dados relativos às umidades do pó para o Ensaio A.

etapa	N	valor médio (%)	desvio padrão (%)	incerteza (%)
s e d i m e n t a d o r				
alimentação	8	17,42	1,466	1,036
parada	8	17,76	1,784	1,261
total	16	17,59	1,587	0,793
c i c l o n e				
alimentação	8	10,25	0,894	0,632
parada	8	8,48	1,383	0,978
total	16	9,36	1,446	0,723

Tabela C.17 Dados relativos às umidades do pó para o Ensaio B.

etapa	N	valor médio (%)	desvio padrão (%)	incerteza (%)
s e d i m e n t a d o r				
alimentação	8	17,63	0,970	0,686
parada	8	17,59	0,847	0,599
total	16	17,61	0,880	0,440
c i c l o n e				
alimentação	8	12,11	1,083	0,765
parada	8	9,14	0,907	0,641
total	16	10,62	1,812	0,906

$$X'_{ciclone} = \frac{X'_{ciclone (ensaio A)} + X'_{ciclone (ensaio B)}}{2}$$

$$\frac{\partial X'_{ciclone}}{\partial X'_{ciclone (ensaio A)}} = \frac{\partial X'_{ciclone}}{\partial X'_{ciclone (ensaio B)}} = 0,5$$

#### C.16 Taxa mássica do ar

A Equação [E.4], com  $T=30+273=303K$  e  $\alpha=0,6$  (OWER & PANKHURST, 1977), fornece, com a Equação [C.3], a equação abaixo. O valor de  $v_{\Delta h}$  foi considerado como metade da resolução da escala do manômetro (HENNIES et alii, 1989), isto é, 0,05cm. A derivada foi obtida por meio da Equação [E.4], substituindo-se  $\Delta h$  por 2,1cm (valor médio verificado nos ensaios com leito de aço). Obtém-se, após as substituições na Equação abaixo,  $v_{m_{ar}} = 0,045\text{kg/min}$ .

$$v_{m_{ar}} = \frac{\partial \dot{m}_{ar}}{\partial \Delta h} \cdot v_{\Delta h}$$

#### C.17 Taxa mássica da pasta de levedura

A taxa foi calculada relacionando-se a massa medida coletada do recalque da bomba com o tempo de coleta. Calcularam-se três taxas (12,03; 12,01 e 11,89kg/h), obtendo-se um desvio padrão igual a 0,075kg/h (da Equação [A.2]), e uma incerteza de 0,087kg/h (da Equação [C.2]).

#### C.18 Temperatura do leito de aço

Nas Tabelas C.18 e C.19 têm-se os valores para cada variável, durante as alimentações e paradas, obtidos das Figuras 5.16 a 5.19, a partir do regime. Ensaios relativos a um mesmo tempo de medida de uma mesma etapa consideraram-se como repetitivos. As Equações (A.1), (A.2) e (C.2) dão as médias, os desvios padrão e as incertezas. A média das médias ( $T_m$ 's, das tabelas), para o meio ou final de cada etapa (alimentação ou parada), foi considerada como a respectiva temperatura do leito. A incerteza desse valor foi calculada por meio da Equação [C.3], com as derivadas calculadas das expressões das médias e as incertezas da Tabela C.18 e C. 19, como

Tabela C.18 Dados relativos às temperaturas do leito de inertes correspondentes às etapas de alimentação.

variável	etapa da alimentação *					
	M3	M4	M5	F3	F4	F5
<b>PRIMEIRA CÂMARA</b>						
N	-	12	9	-	7	8
T <sub>m</sub>	-	60,7	57,1	-	46,5	48,5
σ	-	1,18	0,19	-	0,84	0,49
ι	-	0,68	0,13	-	0,63	0,34
<b>SEGUNDA CÂMARA</b>						
N	-	11	12	-	10	11
T <sub>m</sub>	-	74,5	75,7	-	61,5	72,6
σ	-	0,92	1,38	-	0,68	0,70
ι	-	0,55	0,79	-	0,43	0,42
<b>TERCEIRA CÂMARA</b>						
N	-	11	10	-	13	11
T <sub>m</sub>	-	73,2	77,3	-	73,2	75,9
σ	-	0,38	0,70	-	0,49	2,65
ι	-	0,23	0,44	-	0,27	1,59
<b>QUARTA CÂMARA</b>						
N	-	11	12	-	11	18
T <sub>m</sub>	-	74,5	80,6	-	74,7	79,6
σ	-	0,21	0,23	-	1,32	1,84
ι	-	0,12	0,13	-	0,79	0,86

\* M<sub>i</sub>, F<sub>i</sub>: medidas realizadas, respectivamente, na metade (1,5min) e no final (3,0min) da etapa i da alimentação, a partir do início da secagem.

Tabela C.19 Dados relativos às temperaturas do leito de inertes correspondentes às etapas de parada.

variável	etapa da parada*					
	M3	M4	M5	F3	F4	F5
<b>PRIMEIRA CÂMARA</b>						
N	7	9	6	-	8	7
T <sub>m</sub>	62,1	59,3	61,5	-	80,8	78,5
σ	1,02	1,31	1,17	-	0,30	2,46
ι	0,77	0,87	0,95	-	0,21	1,86
<b>SEGUNDA CÂMARA</b>						
N	7	16	-	-	10	9
T <sub>m</sub>	59,4	62,3	-	-	77,5	83,9
σ	0,92	2,43	-	-	0,30	1,38
ι	0,69	1,21	-	-	0,19	0,92
<b>TERCEIRA CÂMARA</b>						
N	11	9	-	8	11	17
T <sub>m</sub>	68,2	63,8	-	72,9	72,8	81,9
σ	0,36	0,46	-	0,85	0,73	0,32
ι	0,21	0,30	-	0,60	0,44	0,15
<b>QUARTA CÂMARA</b>						
N	11	8	9	8	14	13
T <sub>m</sub>	72,8	72,4	74,9	73,9	72,0	77,7
σ	0,27	0,58	1,17	0,35	1,13	0,77
ι	0,16	0,41	0,78	0,24	0,60	0,42

\* M<sub>i</sub>, F<sub>i</sub>: medidas realizadas, respectivamente, na metade (1,5min) e no final (5,0min) da etapa i da parada, a partir do início da secagem.

representado nas expressões a seguir.

- alimentações:

$$(T_{câmara1})_{meio} = \frac{57,1+60,7}{2} = 58,9^{\circ}C \quad (\iota=0,35^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara1})_{final} = \frac{46,5+48,5}{2} = 47,5^{\circ}C \quad (\iota=0,36^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara2})_{meio} = \frac{74,5+75,7}{2} = 75,1^{\circ}C \quad (\iota = 0,49^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara2})_{final} = \frac{61,5+72,6}{2} = 67,1^{\circ}C \quad (\iota=0,30^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara3})_{meio} = \frac{73,2+77,3}{2} = 75,2^{\circ}C \quad (\iota=0,25^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara3})_{final} = \frac{73,2+75,9}{2} = 74,5^{\circ}C \quad (\iota=0,80^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara4})_{meio} = \frac{74,5+80,6}{2} = 77,6^{\circ}C \quad (\iota=0,09^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara4})_{final} = \frac{74,7+79,6}{2} = 77,1^{\circ}C \quad (\iota=0,58^{\circ}C)$$

- paradas:

$$(T_{câmara1})_{meio} = \frac{62,1+61,5+59,3}{3} = 60,9^{\circ}C \quad (\iota=0,50^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara1})_{final} = \frac{80,8+78,5}{2} = 79,6^{\circ}C \quad (\iota=0,93^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara2})_{meio} = \frac{59,4+62,3}{2} = 60,8^{\circ}C \quad (\iota=0,70^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara2})_{final} = \frac{77,5+83,9}{2} = 80,7^{\circ}C \quad (\iota=0,47^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara3})_{meio} = \frac{68,2+63,8}{2} = 66,0^{\circ}C \quad (\iota=0,18^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara3})_{final} = \frac{72,9+72,8+81,9}{3} = 75,9^{\circ}C \quad (\iota=0,25^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara4})_{meio} = \frac{72,8+72,4+74,9}{3} = 73,4^{\circ}C \quad (\iota=0,30^{\circ}C)$$

$$(T_{câmara4})_{final} = \frac{73,9+72,0+77,7}{3} = 74,5^{\circ}C \quad (\iota=0,26^{\circ}C)$$

### C.19 Velocidade do ar

Na Tabela C.20 têm-se as medidas da velocidade do ar nos pontos de tomada de ar (Item 33, Figura 3.7), antes do aquecedor (ar influente) é na saída do SRRI (ar efluente). Os valores médios, desvios padrão e incertezas foram determinados com esses dez dados (N=10) aplicados nas Equações [A.1], [A.2] e [C.2], obtendo-se as velocidades médias de 0,92m/s ( $\sigma=0,02m/s$  e  $\iota=0,01m/s$ ), para o ar ambiente; 0,75m/s ( $\sigma=0,02m/s$  e  $\iota=0,01m/s$ ), para o ar efluente.

Tabela C.20 Velocidades do ar antes do trocador de calor (influyente) e efluente do SRRI.

ensaio	velocidade do ar (m/s)		ensaio	velocidade do ar (m/s)	
	influyente	efluente		influyente	efluente
1	0,94	0,73	6	0,89	0,73
2	0,91	0,78	7	0,94	0,73
3	0,94	0,76	8	0,91	0,73
4	0,89	0,73	9	0,94	0,76
5	0,91	0,78	10	0,91	0,76

C.20 Umidade do ar

C.20.1 Ar ambiente

Na Tabela C.21 são dadas medidas relativas ao ar que admitido no aquecedor (ar influente). Com esses valores da Tabela C.21 nas equações [A.1], [A.2] e [C.2] têm-se os resultados abaixo.

$$\begin{aligned} (T_{bs})_{m\u00e9dia} &= 25,4^{\circ}\text{C}, \sigma=1,91^{\circ}\text{C} \text{ e } \iota=2,70^{\circ}\text{C} \text{ (para } N=2\text{)}; \\ (T_{bu})_{m\u00e9dia} &= 21,1^{\circ}\text{C}, \sigma=0,68^{\circ}\text{C} \text{ e } \iota=0,96^{\circ}\text{C} \text{ (para } N=2\text{)}; \\ (P_s)_{m\u00e9dia} &= 2,52\text{kPa}, \sigma=0,08\text{kPa} \text{ e } \iota=0,09^{\circ}\text{C} \text{ (para } N=3\text{)}; \\ (P_{pv})_{m\u00e9dia} &= 2,52\text{kPa}, \sigma=0,17\text{kPa} \text{ e } \iota=0,19^{\circ}\text{C} \text{ (para } N=3\text{)}; \\ H &= 7,23 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Tabela C.21 Medidas relativas ao ar que entra no aquecedor (ar influente).

ensaio	$T_{bs}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{bu}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$Y_a$ (kg \u00e1g./ kg ar seco)	$P_s$ (kPa)	$P_{pv}$ (kPa)	$H \cdot 10^4$
inicial	30,9	21,4	0,013	2,55	1,92	7,23
repetido	24,1	20,6	0,015	2,43	2,20	7,23
	26,8	21,6	0,015	2,58	2,24	7,23

Das Equa\u00e7\u00f5es [3.1] e [C.3] tem-se que a incerteza da umidade do ar \u00e9 dada pela Equa\u00e7\u00e3o [C.9], com a derivada obtida da [3.2] e com  $P_t=91,98\text{kPa}$  (press\u00e3o total local) e  $P_{pv}=2,12\text{kPa}$  (obtida acima). A incerteza na medida de  $P_{pv}$  \u00e9 dada pelas Equa\u00e7\u00f5es [3.2] e [C.3], resultando a Equa\u00e7\u00e3o [C.10], cujas parcelas s\u00e3o obtidas da Equa\u00e7\u00e3o [3.2], dados a seguir.

$$\iota_{Y_{ar}} = \left( \frac{\partial Y_{ar}}{\partial P_{pv}} \cdot \iota_{P_{pv}} \right) = 0,622 \cdot \frac{P_t}{P_t - P_{pv}} \cdot \iota_{P_{pv}} = 7,08 \cdot 10^{-3} \cdot \iota_{P_{pv}} \quad [\text{C.9}]$$

$$v_{P_{pv}}^2 = \left( \frac{\partial P_{pv}}{\partial P_s} \cdot v_{P_s} \right)^2 + \left( \frac{\partial P_{pv}}{\partial H} \cdot v_H \right)^2 + \left( \frac{\partial P_{pv}}{\partial T_{bs}} \cdot v_{T_{bs}} \right)^2 + \left( \frac{\partial P_{pv}}{\partial T_{bu}} \cdot v_{T_{bu}} \right)^2 \quad [C.10]$$

$$-\frac{\partial P_{pv}}{\partial T_{bu}} = \frac{\partial P_{pv}}{\partial T_{bs}} = -H \cdot P_t = -7,23 \cdot 10^4 \cdot 91,98 = -0,066$$

$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial P_s} = 1 ; v_{T_{bs}} = 2,70^\circ C ; v_{T_{bu}} = 0,96^\circ C$$

$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial H} = -P_t \cdot (T_{bs} - T_{bu}) = -91,98 \cdot (25,42 - 21,10) = -397,35$$

A incerteza na medida do H é dada pelas Equações [C.3] e [3.4], resultando:

$$v_H = \frac{\partial H}{\partial V_{ar}} \cdot v_{V_{ar}} = \frac{10^{-5} \cdot 6,75}{V_{ar}^2} \cdot v_{V_{ar}} = \frac{10^{-5} \cdot 6,75}{0,92^2} \cdot 0,01 = 7,97 \cdot 10^{-7}$$

A incerteza na medida de  $P_s$  dá-se combinando as Equações [C.3] com [3.3], com os valores de  $P_s$ ,  $T_{bu}$  e  $v_{T_{bu}}$  dados acima:

$$v_{P_s} = \frac{\partial P_s}{\partial T_{bu}} \cdot v_{T_{bu}} = \left( \frac{5800,22}{T_{bu}^2} - 0,04860 + 0,000082 \cdot T_{bu} - \right.$$

$$\left. 0,000432 \cdot T_{bu} + \frac{6,54}{T_{bu}} \right) \cdot v_{T_{bu}} \cdot \frac{P_s}{1000} = 0,089$$

Substituindo-se, na Equação [C.10], os valores calculados, tem-se  $v_{P_{pv}} = 0,2071$  que, na Equação [C.9], resulta  $v_y = 0,0014$ kg de água/kg de ar seco.

#### C.20.2 Ar efluente

A incerteza na medida da umidade do ar efluente foi considerada como a mesma do ar ambiente (seção anterior), já que as variáveis e o método de medida foram os mesmos.

C.21 Energia do motor do SRRI ( $E_R$ )

Realizaram-se medidas da corrente elétrica e da voltagem na rede elétrica, para o SRRI em rotação. Os resultados são mostrados na Tabela C.22. Com a Equação [A.1] obtêm-se as médias

Tabela C.22 Dados de corrente e voltagem no motor do SRRI.

I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)
6,25	229	6,25	228	6,25	229
6,00	229	6,00	227	6,30	229
6,40	228	6,00	228	6,25	-
6,25	229	6,00	228	-	-

de 6,195A, 228,36V e  $E=V.I.10^{-3}=1,41\text{kW}$ . Da Equação [A.2] e [C.2] têm-se os desvios-padrão e incertezas como:  $\sigma=0,142\text{A}$  e  $\iota_I=0,09\text{A}$ ;  $\sigma=0,674\text{V}$  e  $\iota_V=0,406\text{V}$ . A energia do motor obtém-se pelo produto  $V.I.10^{-3}$ , de onde resulta a equação abaixo da incerteza, com base na Equação [C.3]. Com as devidas substituições tem-se  $\iota_E=0,02\text{kW}$ .

$$\iota_E^2 = \left( \frac{\partial E}{\partial V} \cdot \iota_V \right)^2 + \left( \frac{\partial E}{\partial I} \cdot \iota_I \right)^2 = (I \cdot 10^{-3} \cdot \iota_V)^2 + (V \cdot 10^{-3} \cdot \iota_I)^2$$

C.22 Eficiência do motor do soprador

As Equações [C.3] e [H.1] fornecem a Equação [C.11], de onde se obtém  $\iota_\eta=0,006$ . As derivadas são obtidas da Equação [H.1], com os valores das variáveis dados na Equação [5.5] e nas Seções C.13, C.16, C.19 e C.21.

$$\iota_\eta^2 = \left( \frac{\partial \eta}{\partial E} \cdot \iota_E \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial \Delta P} \cdot \iota_{\Delta P} \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial v_s} \cdot \iota_{v_s} \right)^2 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial \dot{m}_a} \cdot \iota_{\dot{m}_a} \right)^2 \quad [C.11]$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial E} = - \left( \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{v_s^2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot g_c} \right) \frac{\dot{m}_a}{60 \cdot E^2}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \Delta P} = \frac{\dot{m}_a}{\rho \cdot E \cdot 60} \quad ; \quad \frac{\partial \eta}{\partial v_s} = \frac{2 \cdot \dot{m}_a \cdot v_s \cdot 10^{-3}}{E \cdot 60 \cdot 2 \cdot g_c}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \dot{m}_a} = \left( \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{v_s^2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot g_c} \right) \cdot \frac{1}{60 \cdot E}$$

### C.23 Energia do motor do soprador

As Equações [C.3] e [5.5] fornecem a Equação [C.12], de onde se obtém  $\iota=0,003\text{kW}$ . As derivadas são obtidas da Equação [5.6], com os valores das variáveis dados nessa mesma equação e nas Seções C.13, C.16, C.19, C.21 e C.22.

$$\iota_{E_s}^2 = \left( \frac{\partial E_s}{\partial \eta} \cdot \iota_\eta \right)^2 + \left( \frac{\partial E_s}{\partial \Delta P} \cdot \iota_{\Delta P} \right)^2 + \left( \frac{\partial E_s}{\partial v_s} \cdot \iota_{v_s} \right)^2 + \left( \frac{\partial E_s}{\partial \dot{m}_a} \cdot \iota_{\dot{m}_a} \right)^2 \quad [\text{C.12}]$$

$$\frac{\partial E_s}{\partial \eta} = - \left( \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{v_s^2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot g_c} \right) \frac{\dot{m}_a}{3600 \cdot \eta^2}$$

$$\frac{\partial E_s}{\partial \Delta P} = \frac{\dot{m}_a}{\rho \cdot \eta \cdot 3600} \quad ; \quad \frac{\partial E_s}{\partial v_s} = \frac{2 \cdot \dot{m}_a \cdot v_s \cdot 10^{-3}}{\eta \cdot 3600 \cdot 2 \cdot g_c}$$

$$\frac{\partial E_s}{\partial \dot{m}_a} = \left( \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{v_s^2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot g_c} \right) \frac{1}{3600 \cdot \eta}$$

### C.24 Entalpia do ar

As Equações [C.3] e [5.7] fornecem a equação [C.14], de onde se obtém  $\iota_1=3,65\text{kJ}/(\text{kg ar seco})$  e  $\iota_2=3,65\text{kJ}/(\text{kg ar seco})$ . As derivadas são obtidas da Equação [5.7], com os valores dados nas Seções C.12 e C.20.

$$\iota_I^2 = \left( \frac{\partial I}{\partial T} \cdot \iota_T \right)^2 + \left( \frac{\partial I}{\partial Y} \cdot \iota_Y \right)^2 \quad [\text{C.14}]$$

$$\frac{\partial I}{\partial T} = 1,0058 + 1,860Y \quad ; \quad \frac{\partial I}{\partial Y} = 1,860T + 2500,8$$

C.25 Energia para aquecimento do ar

As Equações [C.3] e [5.7] fornecem a Equação [C.13], de onde se obtém  $\iota=0,35\text{kW}$ . As derivadas são obtidas da Equação [5.7], com os valores das variáveis dados nas Equações [5.7] e [5.8] e nas Seções C.16 e C.24.

$$\iota_A^2 = \left( \frac{\partial E}{\partial \dot{m}_{as}} \cdot \iota_{\dot{m}_{as}} \right)^2 + \left( \frac{\partial E}{\partial I_1} \cdot \iota_{I_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial E}{\partial I_2} \cdot \iota_{I_2} \right)^2 \quad [C.13]$$

$$\frac{\partial E}{\partial \dot{m}_{as}} = \frac{I_2 - I_1}{3600} \quad ; \quad \frac{\partial E}{\partial I_1} = -\frac{\dot{m}_{as}}{3600} \quad ; \quad \frac{\partial E}{\partial I_2} = \frac{\dot{m}_{as}}{3600}$$

C.26 Energia específica

As Equações [C.3] e [5.4] fornecem a Equação [C.14], de onde se obtém  $\iota=4,19\text{kJ}/(\text{kg ar seco})$ . As derivadas são obtidas da Equação [5.4], com os valores das variáveis dados na Equação [5.4] e nas Seções C.21, C.25, C.23.

$$\iota_{E_E}^2 = \left( \frac{\partial E_E}{\partial E_S} \cdot \iota_{E_S} \right)^2 + \left( \frac{\partial E_E}{\partial E_R} \cdot \iota_{E_R} \right)^2 + \left( \frac{\partial E_E}{\partial E_A} \cdot \iota_{E_A} \right)^2 \quad [C.14]$$

$$\frac{\partial E_E}{\partial E_S} = \frac{\partial E_E}{\partial E_R} = \frac{\partial E_E}{\partial E_A} = \frac{3600}{3,16}$$

## APÊNDICE D - DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DA LEVEDURA

O teor de umidade da levedura ( $X'$ , dado em kg de água/kg de material úmido) - em forma pastosa ou de pó - foi determinado por meio da Equação [D.1]. As massas indicadas foram medidas utilizando-se uma balança analítica com resolução de 0,00001g.

$$X' = \frac{m_{Tu} - m_{Ts}}{m_{Tu} - m_f} \quad [D.1]$$

onde:  $m_{Tu}$  : massa total úmida, isto é, massa do material úmido somada à do frasco;  
 $m_{Ts}$  : massa total seca, isto é, massa do material seco (pesada após 24h em estufa a 105°C) somada à do frasco;  
 $m_f$  : massa do frasco.

# APÊNDICE E - CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

## E.1 Balança digital

Utilizou-se uma balança analítica como o instrumento padrão. As diversas massas obtidas em ambas as balanças estão apresentadas na Tabela E.1, de onde, por regressão linear, obtém-se a expressão [E.1]. O erro percentual ( $\varepsilon$ ) de uma determinada massa  $m_d$  determina-se pela Equação [E.2].

Tabela E.1 Medidas de uma mesma massa obtidas nas balanças digital ( $m_d$ ) e analítica ( $m_a$ ).

$m_d$ (g)	$m_a$ (g)	$m_d$ (g)	$m_a$ (g)
125,66	125,6726	1017,63	1017,7712
256,73	256,7548	1535,37	1535,4831
520,33	520,4109	2066,95	2067,2137

$$m_a = 1,0002m_d + 0,0035 \quad [E.1]$$

$$\varepsilon = \frac{(m_a - m_d)}{m_d} \cdot 100 \quad [E.2]$$

### E.1.1 Erro na medida da massa da carga do leito de inertes de cerâmica ( $\varepsilon_m$ )

A massa medida ( $m_b$ ), igual a 22,14993kg, substituída na Equação [E.1], fornece  $m_a = 22,15785$ kg. Estes valores na Equação [E.2] resultam no erro de 0,035%, como calculado abaixo. Ainda que obtido por extrapolação das massa  $m_a$  e  $m_d$ , esse erro tem caráter conservador, já que corresponde à maior massa que a balança digital pode medir (2,0kg, aproximadamente). É igual a 0,012%, calculado por meio da Equação [E.1] com o último par ( $m_a, m_d$ ) da Tabela E.1.

$$\varepsilon = \frac{(22,15785 - 22,14993)}{22,14993} \cdot 100 = 0,035\%$$

## E.2 Termopares

Como instrumento padrão para calibração dos termopares foram utilizados termômetros de bulbo de mercúrio com carta de aferição.

A instalação de calibragem dos termopares compôs-se de um *becker* posicionado dentro de uma manta de aquecimento acoplada a um variador de voltagem. Como fluidos de aquecimento utilizaram-se água destilada, óleo para transformadores elétricos ou glicerina. Uma vez estabelecido o regime permanente do sistema anotavam-se cinco valores de cada uma das temperaturas fornecidas por cada um dos sete termopares e o valor dado pelo termômetro padrão.

Na Tabela E.1 são apresentados os valores médios de cada medida juntamente com o respectivo valor padrão. Os ajustes destes dados fornecem as correlações apresentadas abaixo.

Tabela E.1 Temperaturas medidas em termopares e em termômetro padrão (Tp).

Tp (°C)	temperaturas medidas nos termopares (°C)						
	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>
25,0	25,5	25,5	25,6	25,5	25,5	25,7	25,7
27,4	28,7	28,9	29,0	29,0	28,8	28,6	28,6
39,5	41,1	41,3	41,4	41,3	41,1	41,0	41,2
46,5	47,8	48,1	48,1	48,1	47,9	47,6	47,8
53,0	54,3	54,8	54,9	54,8	54,6	54,4	54,5
62,0	63,8	64,0	64,0	63,9	63,8	63,5	63,6
67,5	69,3	69,4	69,4	69,3	69,1	68,7	69,0
81,1	82,5	82,7	82,8	82,8	82,5	82,1	82,5
83,0	84,6	85,0	85,3	85,0	84,5	83,8	84,5
97,0	99,0	99,4	99,0	99,0	98,8	99,0	99,2
113,6	115,4	115,7	115,4	115,5	115,2	115,2	115,3
122,0	123,9	124,3	124,0	124,1	123,8	123,9	124,0
142,6	144,2	144,7	144,3	144,3	144,1	144,3	144,4
166,7	169,3	169,7	169,3	169,5	169,1	169,1	169,3

onde T é a temperatura medida por um dos sete termopares e  $T_i$  ( $i=1,2,3,4,5,6,7$ ) é o valor correspondente corrigido.

$$T_1 = 0,9431 + 1.0084.T$$

$$T_2 = 1,0778 + 1.0103.T$$

$$T_3 = 1,3255 + 1.0065.T$$

$$T_4 = 1,1535 + 1.0084.T$$

$$T_5 = 1,0708 + 1.0063.T$$

$$T_6 = 0,7812 + 1.0080.T$$

$$T_7 = 0,8920 + 1.0090.T$$

### E.3 Medidor de orifício

Utilizou-se uma placa de orifício construída e instalada conforme os padrões recomendados por OWER & PANKHURST (1977). As suas dimensões principais são: diâmetro externo ( $d_1$ )=0,20m e diâmetro interno ( $d_2$ )=0,08m.

Empregou-se, para determinação da taxa mássica, a equação de uso prático (OWER & PANKHURST, 1977), cuja forma é dada por [E.3].

$$\dot{m}_a = 0,0573 \xi \alpha a_2 \sqrt{\frac{1}{(1-m^2)} (h_1-h_2) \frac{b}{T}} \quad [E.3]$$

- onde:  $\dot{m}_a$  : taxa mássica do ar, kg/min;  
 $\xi$  : fator de compressibilidade do ar, igual a 1 para baixas pressões;  
 $\alpha$  : coeficiente de descarga, relação entre a taxa real e a teórica;  
 $a_2$  : área da seção transversal do orifício da placa, 50,26cm<sup>2</sup>;  
 $a_1$  : área da seção transversal externa da placa, 314,15cm<sup>2</sup>;  
 $m$  :  $(a_2/a_1)=(d_2/d_1)^2=0,16$ ;  
 $h_1-h_2$  : queda de pressão no orifício, cm H<sub>2</sub>O;  
 $T$  : temperatura do ar a montante do orifício, K;  
 $b$  : Pressão barométrica (698mmHg, em Uberlândia).

A Equação [E.3], com os valores das variáveis substituídas, é reduzida à Equação [E.4].

$$\dot{m}_a = 77,08 \alpha \sqrt{\frac{(h_1 - h_2)}{T}} \quad [E.4]$$

A calibração do medidor de orifício foi realizada por ÁLVARES (1990), empregando-se um Tubo de Venturi, cuja equação de calibração é dada por [E.5], varrendo-se uma faixa de taxa volumétrica do ar de secagem igual a 1,52 a 5,30m<sup>3</sup>/min.

$$\dot{V}_a = 1,047 \sqrt{\frac{T(h_1 - h_2)}{P}} \quad [E.5]$$

onde:  $\dot{V}_a$  : taxa volumétrica do ar, m<sup>3</sup>/min;  
 T : temperatura a montante do orifício, K;  
 $h_1 - h_2$  : queda de pressão no orifício, cmH<sub>2</sub>O;  
 P : pressão atmosférica, mmHg.

Os valores de  $\alpha$  obtidos por meio das Equações [E.4] e [E.5] são dados, em função do número de Reynolds, na Figura E.1. O ajuste desses dados fornece a Equação [E.6], abaixo.

$$\alpha = 1,73 (\text{Log}R_e)^3 - 24,04 (\text{Log}R_e)^2 + 111,4 (\text{Log}R_e) - 171,6 \quad [E.6]$$

A velocidade do ar é dada por  $v = \dot{m}_a / (\rho_a \cdot a_2)$ ;  $\rho_a$  é a sua massa específica. Substituída na Equação [E.4] tem-se a Equação [E.7].

$$v_a = 255,6005 \cdot \frac{\alpha}{\rho_a} \cdot \sqrt{\frac{(h_1 - h_2)}{T}} \quad [E.7]$$

onde:  $v_a$  (m/s);  $\rho_a$  (kg/m<sup>3</sup>);  $h_1 - h_2$  (cm de água) e T (K).

Com as Equações [E.6] e [E.7], de modo iterativo, determina-se o coeficiente de descarga,  $\alpha$ , e a taxa mássica do ar. Utilizou-se o programa computacional PC2, mostrado no APÊNDICE I, para a obtenção da taxa mássica em função da queda de pressão no orifício, para uma determinada temperatura do ar.

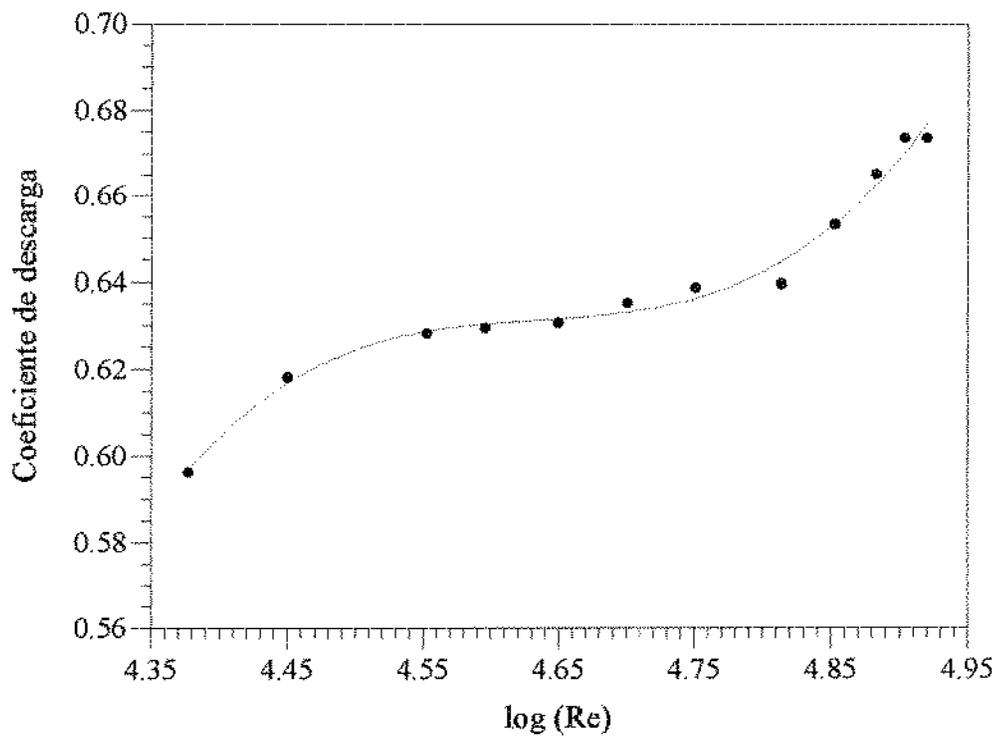


Figura E.1 Coeficiente de descarga,  $\alpha$ , em função do número de Reynolds,  $Re = (v_2 d_2)/\nu$  (ÁLVARES, 1990).

## APÊNDICE F - DESGASTE DOS CORPOS INERTES

A medida do desgaste dos corpos de cerâmica foi efetuada comparando-se as massas de um mesmo número de esferas antes e após o uso. As massas foram medidas por meio de balança analítica com resolução de 0,0001kg.

### F.1 Inertes de cerâmica

Para diminuir a imprecisão das medidas de massa adotaram-se números elevados de esferas, já que partículas diferentes não apresentaram massas iguais, como indicado anteriormente nas Tabelas C.3 e C4.

A amostra com as esferas do leito de inertes, escolhidas ao acaso (o mesmo número em cada câmara), teve sua massa e o correspondente tempo de utilização medidos periodicamente. As pesagens foram precedidas de limpeza e secagem em estufa. Na Tabela F.1 estão apresentados os resultados destas medidas. A massa das esferas sem uso é a correspondente ao tempo igual a zero, isto é, 1,88079kg, 3,46758kg e 6,38022kg, para as esferas de 0,02, 0,03 e 0,04m, respectivamente.

Os dados da tabela indicam que, independentemente do diâmetro da esfera, os desgastes quantificados (valores assinalados com asterisco) são inferiores aos valores das incertezas das medidas das massas de cada leito. O irreal e aparente "ganho" de massa dos leitos de esferas de 0,03m e 0,04m de diâmetro explica-se pelo valor relativamente grande das incertezas das medidas das massas dos respectivos leitos (veja APÊNDICE C.6).

Embora não se tenha quantificado desgaste significativo, verificou-se, visualmente, que algumas esferas apresentavam algum desgaste.

### F.2 Inertes de aço (moinhos)

A ocorrência de desgaste das esferas de aço (moinhos) foi constatada pela observação da presença de material metálico nos coletores do ciclone e do sedimentador. No tempo de operação do secador, de 3,67h, empregado nos testes de dinâmica e de arraste dos inertes, coletaram-se as

Tabela F.1 Massa das esferas de cerâmica do leito de inertes com diâmetros nominais 0,02m ( $\tau=1,37\%$ ); 0,03m ( $\tau=2,82\%$ ) e 0,04m ( $\tau=1,02\%$ ), em função do tempo de operação do secador.

tempo de operação (h)	massa de esferas do leito (kg)		
	diâmetro de 0,02m (100 esferas)	diâmetro de 0,03m (75 esferas)	diâmetro de 0,04m (50 esferas)
0	1,88079 (0%)*	3,46758 (0%)*	6,38022 (0%)*
7,74	-	-	6,40871 (0,44%)*
10,10	-	3,56170 (2,71%)*	-
17,91	1,87462 (0,33%)*	-	-
25,95	1,86626 (0,77%)*	-	-

\* Variação da massa em relação à massa inicial.

massas de  $6,48 \cdot 10^{-2}$ kg (sedimentador) e  $25,2 \cdot 10^{-2}$ kg (ciclone), totalizando  $31,7 \cdot 10^{-2}$ kg de desgaste dos inertes, ou seja, 0,6% da massa total do leito (56,3679kg).

### F.3 Inertes de aço (rolamentos)

A medida do desgaste das esferas fez-se, comparando-se, antes e após o uso no secador, a massa das trinta e oito esferas de diâmetro 0,03m (Tabela C.5) que compuseram o leito. Dos três leitos utilizados neste trabalho, este foi o que se submeteu ao maior tempo de uso: 38,53h. Após esse tempo, a massa das esferas foram medidas, posteriormente à limpeza e à secagem em estufa das mesmas. Resultou uma variação de massa 0,6953g, ou seja 0,016% da massa inicial (4,2325kg), portanto menor que a incerteza de 0,24% (Seção C.6.2).

## APÊNDICE G - ALIMENTAÇÃO INTERMITENTE DA LEVEDURA (VAZÕES)

Como na modalidade de alimentação intermitente da levedura pastosa têm-se períodos em que o material tem seu bombeamento interrompido (parada), a vazão de bombeamento não corresponde à taxa mássica efetiva de alimentação do material. O tempo a que se refere a taxa mássica de alimentação (kg/h) é o relativo ao tempo de operação total (alimentações e paradas), e não, apenas, ao tempo relativo às alimentações. Segue dedução da equação que correlaciona essas variáveis.

$$m_p = \frac{\dot{m}_B \cdot t_{aT}}{60} \quad [G.1]$$

onde :  $m_p$  : massa da pasta alimentada durante o teste, ou seja, durante o tempo total de operação (kg);  
 $\dot{m}_B$  : vazão do sistema de bombeamento (kg/h);  
 $t_{aT}$  : tempo de alimentação total (min).

$$\dot{m}_p = \frac{m_p}{t_{op}} \quad [G.2]$$

onde:  $\dot{m}_p$  : taxa mássica de pasta alimentada durante o teste, ou seja durante o tempo total de operação (kg/h);  
 $t_{op}$  : tempo total de operação (min), dado pela Equação [G.3], onde  $t_{aT}$  é o tempo total das alimentações e  $t_{pT}$  é o tempo total das paradas.  
 $t_{op} = t_{aT} + t_{pT}$  [G.3]

O tempo de alimentação total ( $t_{aT}$ ) é igual ao produto do tempo de duração de cada alimentação ( $t_a$ ) pelo número delas ( $n_a$ ), do mesmo modo que o tempo de parada total ( $t_{pT}$ ) é igual ao produto do tempo de duração de cada parada ( $t_p$ ) pelo número delas ( $n_p$ ). Assim, a relação entre esses tempos pode ser dada pela Equação [G.4].

$$\frac{t_{aT}}{t_{pT}} = \frac{t_a}{t_p} \cdot \frac{n_a}{n_p} = \xi \quad [G.4]$$

Combinando-se as Equações [G.1], [G.2] e [G.3] e dividindo-se o resultado por  $t_{pT}$  tem-se a relação entre a vazão do sistema de bombeamento e a taxa mássica de levedura pastosa alimentada no secador, dada pela Equação [G.5]. Para os testes em que  $n_a=n_p$ , a Equação [G.5] transforma-se na Equação [G.6].

$$\dot{m}_p = \dot{m}_B \cdot \frac{\xi}{\xi + 1} \quad [G.5]$$

onde:  $\dot{m}_p$  : taxa mássica de pasta alimentada durante o ensaio, ou seja durante o tempo total de operação (kg/h);  
 $\dot{m}_B$  : vazão do sistema de bombeamento (kg/h);  
 $t_p$  : tempo de duração de cada parada (min);  
 $t_a$  : tempo de duração de cada alimentação (min).

$$\dot{m}_p = \dot{m}_B \cdot \frac{1}{\frac{t_p}{t_a} + 1} \quad [G.6]$$

## APÊNDICE H - EFICIÊNCIA DO MOTOR DO SOPRADOR

A eficiência foi determinada utilizando-se a Figura H.1 com o valor da taxa do ar igual a 4,04kg/min, utilizada nos testes de secagem, resultando o valor de 0,1085. A Figura H.1 foi traçada com base na equação de Bernoulli (FOX & MACDONALD, 1981) aplicada na entrada e saída do soprador, resultando a Equação [H.1]. Variou-se a perda de carga na saída do SRRI, medindo-se as variáveis da Equação [H.1], como mostrado na Tabela H.1.

$$\frac{\eta \cdot E \cdot 60}{\dot{m}_a} + \frac{P_e}{\rho} = \frac{P_s}{\rho} + \frac{v_s^2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot g_c} \quad [H.1]$$

onde:  $\eta$  : eficiência do motor;

$E$  :  $E_{\text{rede elétrica}} = V \cdot I \cdot 10^{-3}$  (kW), sendo V a voltagem (V) e I a corrente elétrica (A) medidas na rede elétrica, com um multímetro;

$P_e$  : pressão na entrada do soprador (kPa) =  $P_{\text{atm}} = 91,98\text{kPa}$ ;

$\rho$  : massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ ) = 0,88 ( $T=37,4^\circ\text{C}$ );

$P_s$  : pressão na saída do soprador (kPa), medida no anel piezométrico, em função da taxa de ar;

$v_s$  : velocidade do ar na saída do soprador, dada pelas Equações [E.6] e [E.7] e do diâmetro do duto (0,254m), m/s;

$\dot{m}_a$  : taxa mássica do ar kg/min.

Tabela H.1 Dados para determinação da eficiência do motor ( $\eta$ ).

$P_s - P_e$ , cm ág.	E kW	$\dot{m}_a$ kg/min	$\eta$ %	$P_s - P_e$ cm ág.	E kW	$\dot{m}_a$ kg/min	$\eta$ %
39,25	1,61	3,22	14,59	39,00	1,61	4,19	18,88
39,25	1,64	3,40	15,13	38,80	1,63	4,78	21,18
39,20	1,64	3,70	16,45	38,60	1,64	5,20	22,79

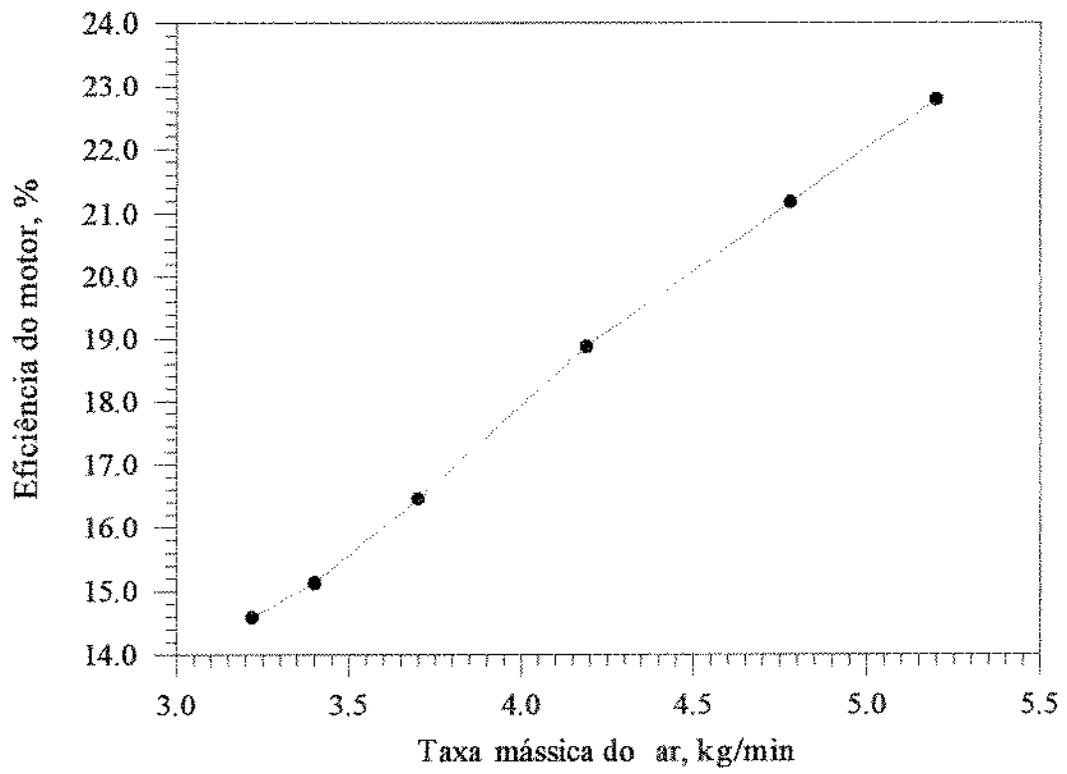


Figura H.1 Eficiência motor ( $\eta$ ) em função da taxa mássica do ar ( $m_a$ ).

# APÊNDICE I - PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

## I.1 PROGRAMA PC1 - Determinação da umidade absoluta do ar ( $Y_a$ , kg água/kg ar seco)

c Programa umidade.for (tese): determinação da umidade  
c absoluta do ar,  $Y_a$  (kg água/kg ar seco)

c Variáveis: temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ , C);  
c temperatura de bulbo úmido ( $T_{bu}$ , C); velocidade do  
c ar ( $v_a$ , m/s);  $H$ , constante; pressão total ( $P_t$ , kPa);  
c pressão parcial do vapor ( $P_{pv}$ , kPa); pressão de  
c saturação ( $P_s$ , kPa); umidade absoluta do ar ( $Y_a$ ,  
c kg de água/kg ar seco);

Real  $T_{bs}$ ,  $T_{bu}$ ,  $v_a$ ,  $H$ ,  $P_t$ ,  $P_{pv}$ ,  $P_s$ ,  $Y_a$

OPEN (UNIT = 2, FILE = 'DADOS.DAT')

WRITE (\*,\*) 'T<sub>bs</sub> (C)'

READ (\*,\*)  $T_{bs}$

WRITE (\*,\*) 'T<sub>bu</sub> (C)'

READ (\*,\*)  $T_{bu}$

WRITE (\*,\*) 'v<sub>a</sub> (m/s)'

READ (\*,\*)  $v_a$

WRITE (\*,\*) 'P<sub>t</sub> (kPa)'

READ (\*,\*)  $P_t$

$T_{bs}=T_{bs}+273$

$T_{bu}=T_{bu}+273$

$P_s=0.001*\exp(1.3914993-5800.2206/T_{bu}-0.04860239*T_{bu}+$   
&0.41764768\*0.0001\*T<sub>bu</sub>\*T<sub>bu</sub>-0.14452093\*0.0000001\*T<sub>bu</sub>\*T<sub>bu</sub>\*  
&T<sub>bu</sub>+6.5459673\*log(T<sub>bu</sub>))

$H=(65+6.75/v_a)*0.00001$

$P_{pv}=P_s-H*P_t*(T_{bs}-T_{bu})$

$Y_a=0.622*P_{pv}/(P_t-P_{pv})$

WRITE (1,\*)  $T_{bs}$

WRITE (\*,\*)  $T_{bs}$

WRITE (2,\*)  $T_{bs}$

WRITE (1,\*)  $T_{bu}$

```
WRITE (*,*) Tbu  
WRITE (2,*) Tbu  
WRITE (1,*) va  
WRITE (*,*) va  
WRITE (2,*) va  
WRITE (1,*) Ya  
WRITE (*,*) Ya  
WRITE (2,*) Ya  
WRITE (1,*) Ps  
WRITE (*,*) Ps  
WRITE (2,*) Ps  
WRITE (1,*) Ppv  
WRITE (*,*) Ppv  
WRITE (2,*) Ppv  
WRITE (1,*) H  
WRITE (*,*) H  
WRITE (2,*) H  
STOP  
END
```

L2 PROGRAMA PC2 - Determinação do coeficiente de descarga para a placa de orifício. Taxa mássica do ar em função da queda de pressão no orifício para uma determinada temperatura.

```

c Programa alfa2.for (tese): determinação do coeficiente de descarga (A)
c Ar: temperatura inicial (T, C); densidade (ro, kg/m3); taxa (m, kg/min)
c viscosidade (mi, kg/(m.s)); velocidade no orifício v (m/s);
c queda de pressão no orifício H=h1-h2(cm de água); Reynolds (Re)
c Placa de orifício: diametro 0.08m
c de = distanciamento entre os alfas = (A-A1)/A = 0.001
REAL A(500), Re(500), H(500), v(500), A1(500), i, B, de, D, E,
&H1, m(500), C, F, ro, mi, T
OPEN (UNIT = 2, FILE = 'DADOS.DAT')
c Deve-se entrar com valores de A(1) e H1) que não impliquem
c em "run time". Fixou-se o A(i) e variou-se o H(i):
H(1) = 0.5
A(1) = 0.67
de = 0.001
WRITE (*,*) 'T (C)'
READ (*,*) T
WRITE (1,*) T
WRITE (*,*) T
WRITE (2,*) T
i=1
10 ro = 1.2614 - 0.004225*(T - 7)
v(i) = 255.6005*A(i)/ro*(H(i)/(T+273))**0.5
m(i) = ro*v(i)*0.30156
mi = 0.000017503 + 0.000000048*(t-7)
Re(i) = ro*v(i)*0.08/mi
B = LOG10(Re(i))
F = 1.72887*B**3 - 24.0378*B**2 + 111.425*B - 171.565
A1(i) = ABS(F)
D = (A(i)-A1(i))/A(i)
E = ABS(D)

```

```
IF (E.GE.de) THEN
  C=ABS(AI(i))
  i=i+1
  j=i-1
  A(i) = C
  H(i) = H(j)
  GO TO 10
ELSE
  WRITE (1,*) H(i), m(i), AI(i)
  WRITE (*,*) H(i), m(i), AI(i)
  WRITE (2,*) H(i), m(i), AI(i)
  HI = H(i) + 0.1
  IF (HI.LE.3.1) THEN
    i=1
    H(i) = HI
    GO TO 10
  ELSE
    IF (T.GE.25) THEN
      GO TO 30
    ELSE
      i = 1
      A(1) = 0.67
      H(1) = 0.5
      T = T + 0.1
      WRITE (1,*) T
      WRITE (*,*) T
      WRITE (2,*) T
      GO TO 10
    END IF
  END IF
END IF
30  CLOSE (2)
STOP
END
```

## APÊNDICE J - REOLOGIA DA PASTA DE LEVEDURA

Uma pasta de levedura com umidade de 73,75% foi utilizada para os estudos reológicos. Empregou-se um viscosímetro rotacional (LEWIS, 1990), marca Brookfield, modelo DV-III, corpo giratório (*spindle*) tipo placa-cone CP52.

Os testes foram conduzidos a várias temperaturas: 26,1° (temperatura da pasta no tanque de alimentação da bomba); 29,3°C (temperatura da pasta na entrada do secador) e 45,0°C.

Na Figura J.1 apresentam-se as velocidades de rotação empregadas do corpo (*spindle*). Na Figura J.2 representam-se a viscosidade e a tensão cisalhante em função da taxa de deformação.

Em todas as temperaturas nota-se um comportamento pseudoplástico até um determinado nível de cisalhamento (em torno de 60rpm ou  $120s^{-1}$ ). Além desse nível, a pasta comporta-se como fluido newtoniano, com viscosidade aparente em torno de 200cP. À temperatura de 45,0°C, porém, verifica-se uma tendência ao comportamento dilatante.

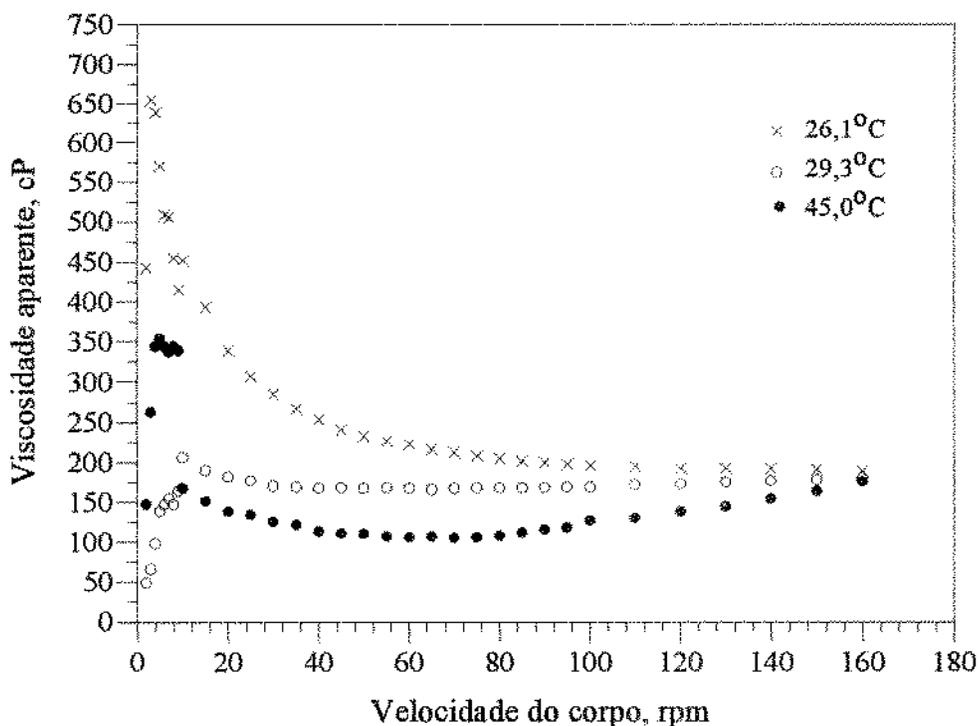


Figura J.1 Viscosidade da pasta em função da rotação do corpo girante cone-placa.

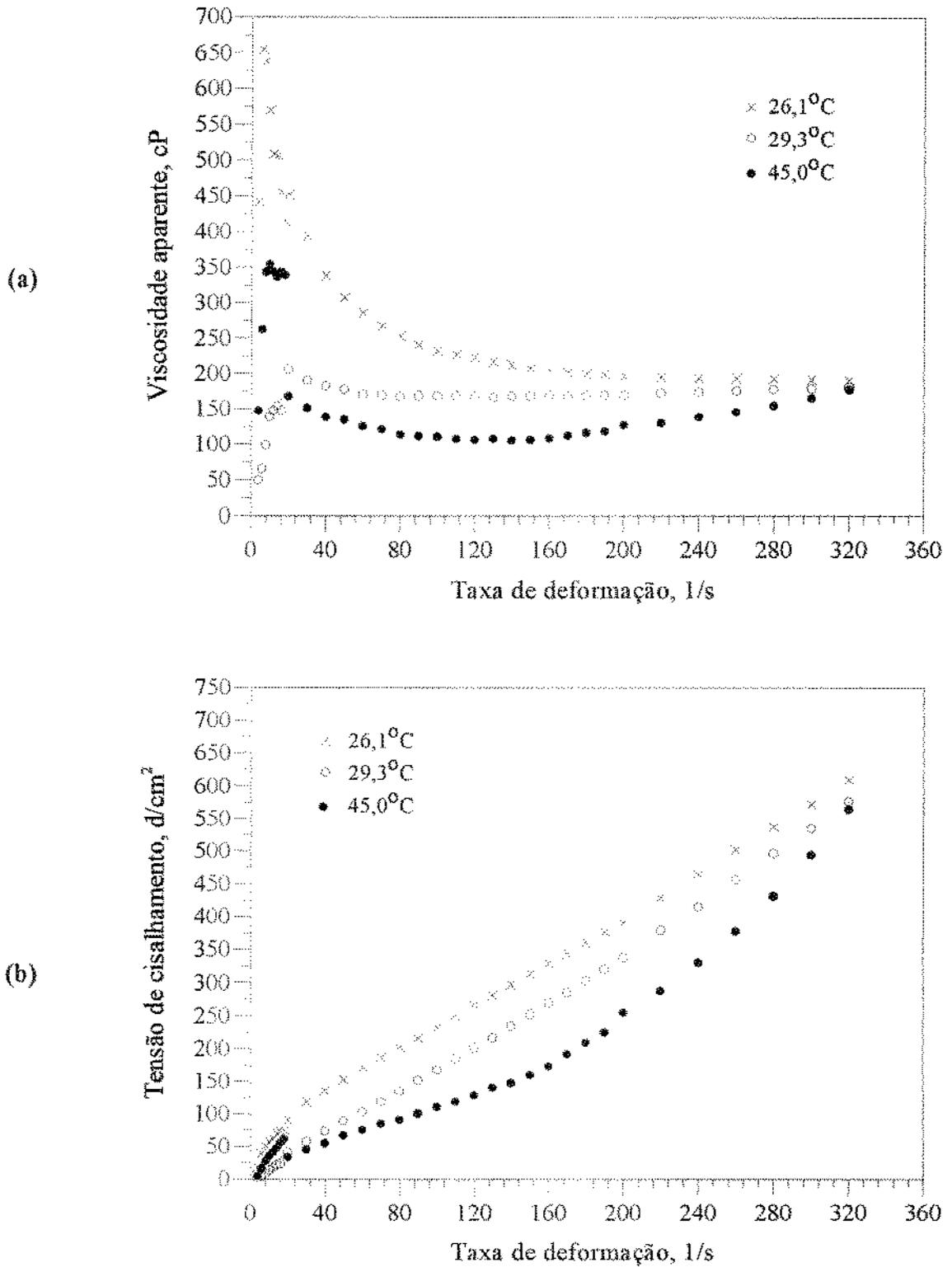


Figura J.2 Viscosidade da pasta (a) e tensão de cisalhamento (b) em função da taxa de deformação.

## APÊNDICE L - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO PÓ DE LEVEDURA

Utilizaram-se peneiras da série Tyler 20.25, com malhas na faixa: 4 a 400 (ciclone) e 4 a 170 (sedimentador) (BROWN et alii, 1965 e FOUST et alii, 1982). A relação entre cada diâmetro médio (média entre o diâmetro da peneira pela qual passou o pó e o da subseqüente em que ficou retido) em função da fração mássica retida entre as duas peneiras é dada na Figura L.1 (ciclone) e Figura L.2 (sedimentador). A movimentação das peneiras deu-se por vibração, durante o intervalo de tempo de 20,0min (FOUST et alii, 1982).

Os diâmetros médios de Sauter, dados pela equação [A.3], com os respectivos valores tirados das Figuras L.1 e L.2, resultaram nos valores de  $2,047 \cdot 10^{-2}$ mm no ciclone e  $6,051 \cdot 10^{-2}$ mm no sedimentador.

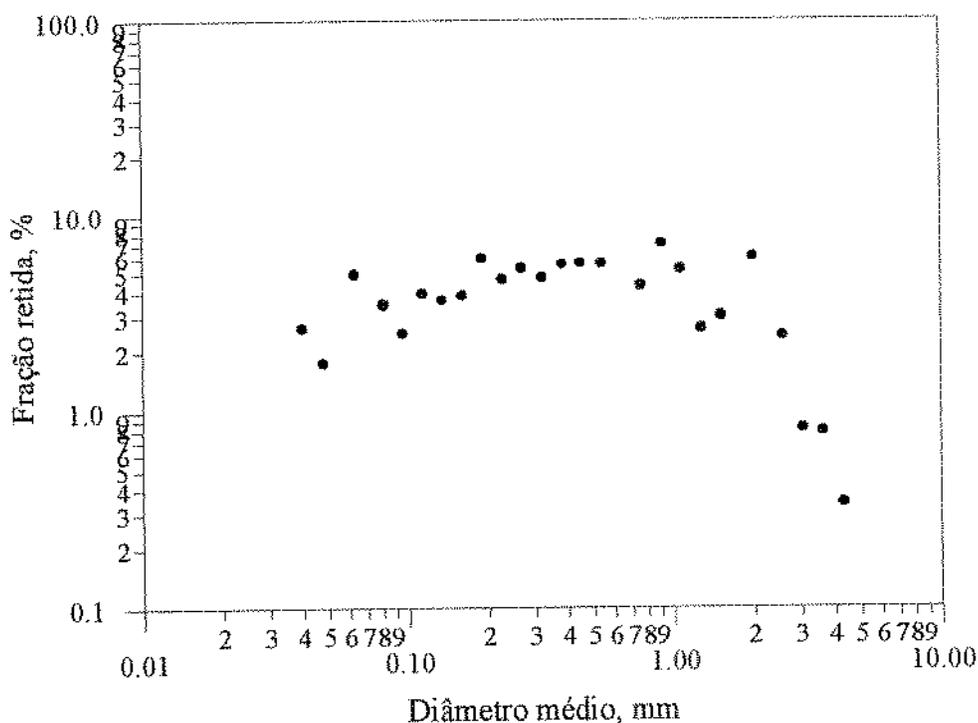


Figura L.1 Fração mássica retida de levedura em pó em função do diâmetro médio das partículas coletadas no ciclone.

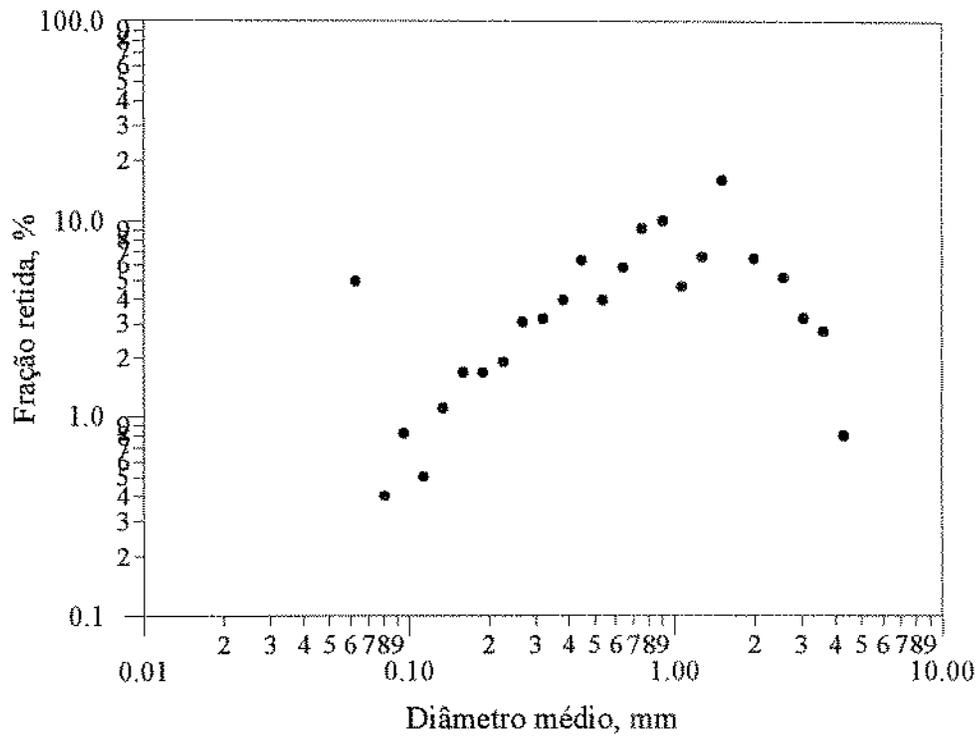


Figura L.2 Fração mássica retida de levedura em pó em função do diâmetro médio das partículas coletadas no sedimentador.

## APÊNDICE M - ISOTERMA DE ADSORÇÃO DE UMIDADE

A umidade tem grande importância na estabilidade de alimentos secos, já que pode agir como solvente para reações químicas, microbiológicas e enzimáticas.

A atividade de água,  $a_w$ , é a medida da disponibilidade da água para participar dessas reações (LEWIS, 1990). É definida, para uma determinada temperatura, pela Equação [M.1] (LABUZA, 1975). A pressão  $P_o$  depende da quantidade de água e de sais, da temperatura e da

$$a_w = \frac{P}{P_o} = \frac{UR}{100} \quad (M.1)$$

composição do alimento. Componentes de alimentos, como sais e açúcares são mais efetivos na queda da pressão de vapor da água que moléculas grandes, como amido e proteínas. Assim, duas amostras de um material com conteúdos de umidade aproximados podem não exercer a mesma pressão de vapor, mesmo tendo a mesma atividade de água (LEWIS, 1987).

A água apresenta-se nos alimentos, basicamente, nas formas ligada e livre. A água ligada está associada a grupos químicos, não sendo disponível para reações químicas e para atuar como solvente. A água livre é que está disponível para movimentação e solubilização de sais e açúcares, reações químicas e crescimento microbiano. Valores de  $a_w$  menores que 0,2 indicam água fortemente ligada; para  $0,2 < a_w < 0,7$  há quantidade significativa de água livre; para  $0,7 < a_w < 1,0$  a maioria da água está livre (BROCKWAY, 1989). Com mais rigor, a classificação deve considerar graus de ligação da água presente no produto, conforme mostrado na Tabela M.1.

Uma vez no estado de equilíbrio, a umidade relativa do ar iguala-se à atividade de água do produto, denominando-se umidade relativa de equilíbrio. Nessa condição o produto nem recebe umidade da atmosfera nem cede umidade a ela. As isotermas de adsorção, curvas que relacionam a umidade de equilíbrio ( $a_w$ ) com o teor de água do material, permitem conhecer as condições ambientais do ar de estocagem que garantam a integridade biológica do produto.

As isotermas para o pó de levedura foram obtidas na temperatura 25°C, com amostras variando de 5,0 a 10,0g, obtidas nos ensaios com o SRRI. As amostras (em triplicata) foram postas em dessecadores com umidade relativa controlada, criadas por soluções saturadas de sais

Tabela M.1 Graus de ligação da água em alimentos e matéria viva (FENNEMA, 1976).

atividade e descrição da água	$a_w$ (%)	ação
completa: água pura	100	-
levemente reduzida: água fisicamente entranhada na matriz do tecido	80-90	crescimento microbiano; atividade enzimática; reações hidrolíticas e oxidativas; escurecimento browniano
muito reduzida: pontes de hidrogênio água-soluto e nas camadas adjacentes ao soluto	25-80	escurecimento não enzimático; atividade enzimática; reações hidrolíticas e oxidativas
altamente reduzida: água em hidratos; adsorção da água na monocamada; pontes de hidrogênio íon-água e ligação água-dipolo hidrogênio	0-25	ótima estabilidade para autoxidação

a 25°C: NaOH, LiCl, CH<sub>3</sub>COOK, MgCl<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaBr, NaCl, KCl, BaCl<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Após o equilíbrio ter sido atingido (acima de 40dias) foi determinado o conteúdo de umidade da pasta de levedura. As amostras permaneceram em estufa durante 24h e à temperatura de 110°C.

Determinada a isoterma de sorção, partiu-se para o ajuste dos dados à equação de GAB (MAROULIS et alii, 1988).

Realizou-se a regressão linear via dois pacotes: EUREKA, que utiliza o método de passos descendentes; e o SAS (LUCCAS, 1996). A equação de GAB (Guggenhen-Anderson-de Boer), Equação [M.2] (SCHÄR & RÜEGG, 1985), ajustou melhor os dados experimentais.

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)} \quad [M.2]$$

onde:  $X$  : umidade do material (base seca)

$X_m$  : umidade do material na monocamada (base seca);

$C$  : constante de Guggenheim (relação entre as energias de interação água - alimento);

$K$  : constante (relação entre energias de interação das múltiplas camadas de água);

$a_w$  : atividade de água (base seca).

Os resultados obtidos do ajuste do modelo de GAB à isoterma experimental, utilizando o pacote EUREKA, são dados na tabela M.2. Na Figura M.1 são apresentados os resultados obtidos do modelo e experimentalmente.

Tabela M.2 Parâmetros da equação de GAB, equação (M.1), juntamente com os desvios-padrão assintóticos ( $\delta$ ) e a soma dos quadrados dos resíduos (S) obtidos via SAS.

$X_m$	$\delta X_m$	$C$	$\delta C$	$K$	$\delta K$	S
0,05704	0,00217	5168,74	0	0,9558	0,00288	0,00018

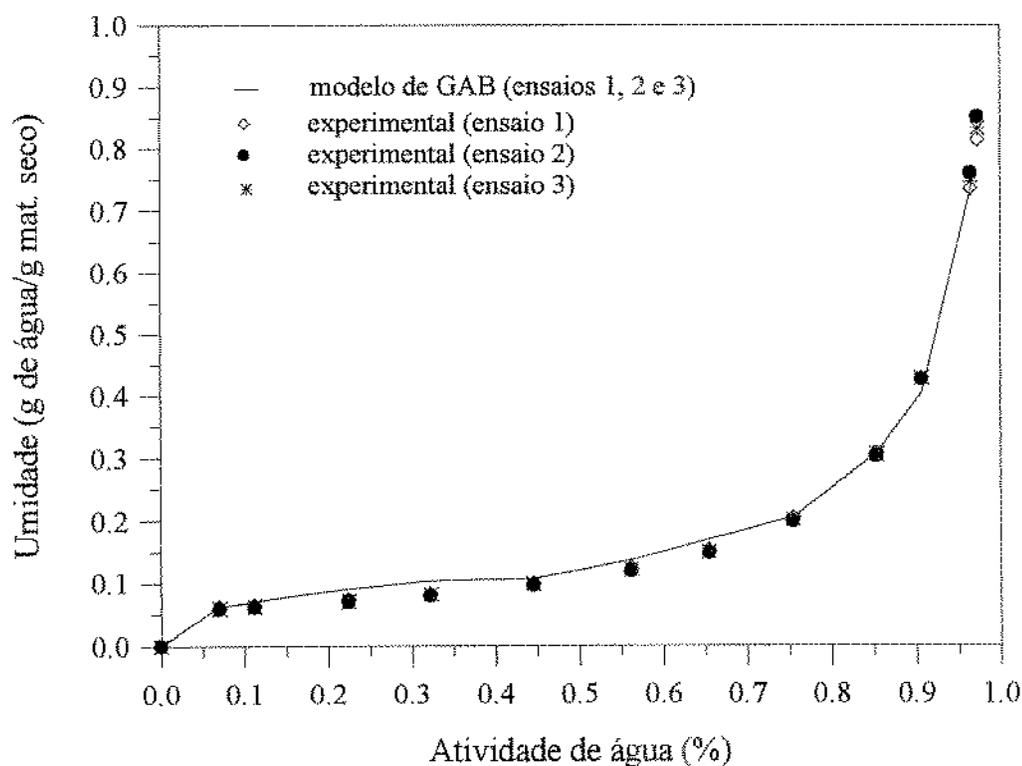


Figura M.1 Ajuste do modelo de GAB à isoterma de sorção de levedura a 25°C.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁLVARES, C.M. *Secagem de melão de cana-de-açúcar em secador rotatório com recheio de inertes*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG, 1990. 122p.
- ÁLVARES, C.M.; BURJAILI, M.M.; FINZER, J.R. Secador rotatório com recheio de inertes: II-Estudos iniciais de secagem de melão de cana-de-açúcar. *Anais do III Encontro Nacional de Ciências Térmicas*, Itapema, SC, v.1, p. 533-536, 1990.
- ÁLVARES, C.M.; FINZER, J.R.; BURJAILI, M.M. Rotary dryer with bed of inertes: IV- Heat and mass transfer in sugar cane molasses drying. *Anais do IV Congresso Latinoamericano de Calor y Massa*, La Serena-Chile, p. 109, 1991a.
- ÁLVARES, C.M.; FINZER, J.R.; BURJAILI, M.M. Secador rotatório com recheio de inertes: III- Influência de parâmetros operacionais. *Anais do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, São Paulo, SP, p. 241-244, 1991b.
- ALVAREZ, P.I.; SHENE, C. Experimental determination of volumetric heat transfer coefficient in rotary dryer. *Drying Technology*, v. 12 (7), p. 1605-1627, 1994.
- ANDERSON, R.C., JACOB, V.K. Entrainment from an industrial rotary dryer. *Drying 92*. MUJUMDAR, A.S. (ed.). Elsevier Science Publishers B.V., p. 1249-1257, 1992.
- ASHRAE PSYCHROMETRIC CHART. *ASHRAE Inc.* New York, n. 05, p. 546, 1981.
- ASHRAE. *Brochure on psychrometry*. ASHRAE Inc. New York, 1977.
- ASHRAE. *Handbook of fundamentals*, ASHRAE Inc. New York, 1985. 15 p.
- BAKER, C.G.J. The design of flights in cascating rotary dryers. *Drying Technology*, v. 6, n. 4, p. 631-654, 1988.

- BARRETT, N.; FANE, A. Drying liquid materials in a spouted bed. *Anais do 6<sup>th</sup> International Drying Symposium*, Montreal, Canadá, op. 107-112, 1988.
- BENSON, H. *University physics*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1991. 926 p.
- BOBBIO, F.O.; BOBBIO, P.O. *Introdução à química de alimentos*. Livraria Varela. São Paulo, 1989. 223 p.
- BROCKWAY, B. Applications to confectionary products. In: *HARDMAN, T.M. Water and fluid quality*. Elsevier Applied Science. London, cap. 9, p. 305-324, 1989.
- BROWN, G. G. e outros. *Operaciones básicas de la Ingeniería Química*. Editorial Marin S/A. Nicaragua, 1965. 629 p.
- BURJAILI, M.M.; FINZER, J.R.D. Desempenho de um secador rotatório com recheio de inertes na secagem de dispersões. *Anais do XIX Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos*, Campinas, SP, p. 556-567, 1991.
- BURJAILI, M.M.; FINZER, J.R.D.; LIMAVERDE, J.R. *Secador rotatório com recheio de inertes*. Int. Cl. A63B 11/00. BR n. PI8804812. 14 set. 1988; 29 mar. 1994. *Revista da Propriedade Industrial*, Rio de Janeiro, RJ, n. 1217, p. 36, 29 mar., 1994.
- BURJAILI, M.M.; FINZER, J.R.D.; KIECKBUSCH, T.G.; LIMAVERDE, J.R. Reciclo do ar de secagem em secador rotatório com recheio de inertes. *Anais do IV Encontro Nacional de Ciências Térmicas*, Rio de Janeiro, RJ, p.157-160, 1992.
- BURJAILI, M.M.; LIMAVERDE, J.R.; FINZER, J.R. Secador rotatório com recheio de inertes: I- Desempenho do equipamento. *Anais do XV Encontro Nacional Sobre Escoamento em Meios Porosos*, Uberlândia, MG, p. 493-499, 1987.
- COMPANHIA MINAS OESTE DE CIMENTO, *Comunicação pessoal*, Nova Ponte, MG, 1995.

- COPERSUCAR, *Comunicação pessoal*, Piracicaba, 1995.
- COPERSUCAR, *Comunicação pessoal*, Piracicaba, 1996.
- CSUKAS, B.; PATAKI, K.; ORMOS, Z. Heat and mass transfer in dispersed systems. *Anais do 5<sup>th</sup> All-Union heat and mass transfer conf.*, v. 6, p. 178-187, 1976.
- DANESI, E.D.G.; FARIA, A.R.; ESPINDOLA, F.S.; BURJAILI, M.M.; FINZER, J.R. Avanço no processamento e análise de concentrado protéico foliar de *Cajanus cajan* Millsp. *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos*, São Paulo, SP, p. 131, 1991.
- DĂSCĂLESCU, A. *Le séchage et ses applications industrielles*. Éditions Meridiane, Paris, 1964. 534 p.
- DAVIS, J.C. The dry and wet-bulb psychrometer. *Humidity measurement at the meeting of ASHRAE*. ASHRAE, Columbus-Ohio, p. 6-17, 1968.
- DOUGLAS, P.L., KWADE, A., LEE, P.L., MALLICK, S.K., WHALEY, M.G. Modelling, simulation & control of rotary sugar dryers. *Drying 92*. MUJUMDAR, A.S. (ed.). Elsevier Science Publishers B.V., p. 1928-1939, 1992.
- EMTECO - EMPREENDIMENTOS TÉCNICOS E COMERCIAIS LTDA, Catálogo.
- FENNEMA, O.R. *Principles of food science, Part I - Food chemistry*. Marcel Dekker Inc. New York. 1976, 789p.
- FILKOVÁ, I., MUJUMDAR, A.S. Industrial spray drying systems. *Handbook of industrial drying*. MUJUNDAR, A.S. (ed.). Editora Marcel Dekker, New York, p. 243-290, 1987.
- FINZER, J.R.D. *Desenvolvimento de um secador de leite vibro-jorrado*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 1989. 258p.

- FINZER, J.R.; BURJAILI, M.M.; LIMAVERDE, J.R.; KIECKBUSCH, T.G. Produção de milho verde em pó desidratando-se os grãos ou a pasta do material. *Anais do XX Encontro Nacional Sobre Escoamento em Meios Porosos*, São Carlos, SP, p.543-554, 1992.
- FINZER, J.R.; BURJAILI, M.M.; LIMAVERDE, J.R. Alternativa tecnológica de secagem de materiais pastosos - secador rotatório com recheio de inertes. *Ciência e Engenharia*, Uberlândia, MG, v. 2, n. 2, p. 97-120, 1993.
- FINZER, J.R.D.; KIECKBUSCH, T.G. Secagem em sistemas com vibração. *Tópicos especiais em secagem*. v.1. FREIRE, J.T.; SARTORI, D.J.M. (ed). UFSCar, São Carlos, SP, p. 87-127, 1992.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, W.C.; MAUS, C.W.; ANDERSEN, L.B. Princípios das operações unitárias. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ, 1982. 670 p.
- FOX, R.W.; McDONALD, A.T. *Introdução à mecânica dos fluidos*. Guanabara Dois. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ, 1981. 562 p.
- FREIRE, J.T. Secagem de pastas em leito de jorro. *Tópicos especiais em secagem*. v.1. FREIRE, J.T.; SARTORI, D.J.M. (ed.). UFSCar, São Carlos, SP, p. 41-85, 1992.
- FREIRE, J.T.; MORRIS, J.A. Drying of yeast paste in a spouted bed dryer. *Anais do 10<sup>th</sup> International Congress of Chemical Engineering, Chemical Equipment Design and Automation*, Praga-Tchecoslováquia, p. 1609-1616, 1990.
- GELPERIN, N.I.; KOSTICYN, B.A. *Khim. Prom. Moscow*. v. 10, p. 58, 1975.
- HENNIES, C.G.; GUIMARÃES, W.O.N.; ROVERSI, J.A. *Problemas experimentais em física*. v. 1, Editora da Unicamp. Campinas, SP, 1989. 221p.
- HELDMAN, D.R. *Food process engineering*. A.V.I. Publishing Company. Westport, 1979. 401p.

- HIKON, L., PRIOR, M., PREM,H., CLEEF, J.V. Sizing materials by crushing and grinding. *Chemical Engineering*. p. 94-103, 1990.
- HOLMAN, J.P. *Transferência de calor*. McGraw-Hill, São Paulo, SP, 1981. 639 p.
- HOLMAN, J.P. *Experimental methods for engineers*. McGraw-Hill, Singapura, 1989. 514 p.
- HOVMAND, S. Fluidized bed drying. *Hanbook of industrial drying*. MUJUMDAR, A.S. (ed.). Editora Marcel Dekker. New York, p.166-225, 1987.
- INCROPERA, F.P.; WITT, D.P. de. *Introduction to heat transfer*. 2. ed. John Wiley & Sons Inc., New York, 1990, 824 p.
- INSTALLATION A1 - FMU. *Technical information*. NPO "MIR" (Scientific Industrial Association), 123308. Moscou, Marshal Zhukov Prospect 1.
- KEEY, R.B. *Introduction to industrial drying operations*. Pergamon Press. Oxford, 1975. 358 p.
- KELLY, J.J. Rotary drying. *Handbook of industrial drying*. MUJUMDAR, A.S. (ed.). Editora Marcel Dekker. New York, p. 133-153, 1987.
- KENT, A.C.; ROSEN, H.N. Measurement of humidity above temperature of 100°C with a double-wck wet bulb psychrometer. *Drying Technology*, v. 1 (1), p. 141-150, 1983.
- KLINE, S.J.; McCLINTOCK, F.A. Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mecanical Engineering*, p. 3, 1953.
- KNEULE, F. *El Secado*. Bilbao, Urmo, 1966. 414 p.
- KUDRA, T. Novel drying technologies for particulates, slurries and pastes. *Drying 92*. MUJUMDAR, A.S. (ed.). Elsevier Science Publishers B.V., p. 224-239, 1992.

- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. *Fluidization engineering*, Kreiger, New York, 1977. 534 p.
- LABUZA, T.P. Interpretation of sorption data in relation to the state of constituent water. *In Water relations in food*. DUCKWORTH, R.B. (ed.), Academic Press, New York, 1975.
- LANGRISH, T.A.G.; WHALIEY, P.B.; REAY, D.; BAHU, R.E. Heat transfer in cascading rotary dryers. *Anais do 6<sup>th</sup> International Drying Symposium*, Montreal-Canadá, op. 233-239, 1988.
- LEUNG, H.K. Water activities and other colligative properties of foods. *Physical and chemical properties of food*. OKOS, M.R. (ed.). ASAE, Michigan, p.138-185, 1986.
- LEWIS, M.J. *Physical properties of foods and food processing systems*. Ellis Horwood. New York, 1990. 465p.
- LUCAS, V. *Obtenção de fatias de banana desidratada crocante através de pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado*. Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 1996. 104p.
- McCABE, L.W.; SMITH, C.J.; HARRIOT, P. *Unit operations of chemical engineering*. McGraw-Hill. New York, 1993. 1130 p.
- MAGOTTEAUX DO BRASIL LTDA, *Comunicação pessoal*, 1995.
- MARKOWSKI, A.S. Drying characteristics in a jet-spouted bed dryer. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, p. 38-944, 1992.
- MAROULIS, Z.B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D. Application of the GAB model to the sorption isotherms for dried fruits. *Journal of Food Engineering*. v.7, p. 63-78, 1988.
- MARSAIOLI Jr, A. *Desenvolvimento de tecnologia de aplicação de microondas em secador cilíndrico-rotativo combinado com ar quente para produtos granulados*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 1991. 197p.

- MASTERS, K. *Spray drying*. Leonard Hill Books. London, 1979. 668 p.
- MATHUR, K.B., EPSTEIN, N. *Spouted bed*. Academic Press. New York, 1974. 304 p.
- MILLEVILLE, H.P.; GELBER, P. Sanitary design of food processing equipment. *Food processing's catalog*, p. 209-229, 1965.
- MILHOUD, A.; ROSH, M. Zur problematik der kontinuierlichen vakuumentrocknung. *Chem. Ing. Techn.*, v. 45, n. 6, p. 369-374, 1973.
- MINCHEV, A.D.; ROMANKOV, P.G.; RASHKOVSKAYA, N.B. *Zh. Prikl. Khim. Leningrad*. v. XLII, p. 1092, 1969a.
- MINCHEV, A.D.; ROMANKOV, P.G.; RASHKOVSKAYA, N.B. *Zh. Prikl. Khim. Leningrad*. v. XLII, p. 2150, 1969b.
- MOORE, J.G. Drum dryers. *Handbook of industrial drying*. MUJUMDAR, A.S. (ed.). Editora Marcel Dekker. New York, p. 227-242, 1987.
- MORRIS, J.A.; FREIRE, J.T. Rate of evaporation of water in a spouted bed: The effect of the ratio  $D/d$ , the temperature of the drying air and the ratio  $Q/Q_{ms}$  (continuous feed). *III Encontro Nacional de Ciências Térmicas*, Itapema, SC, p. 525-528, 1990.
- MROWIEC, M., CIESIELCZYK, W. Fluidized-bed dryers for paste materials. *International Chemical Engineering*, v. 17, n. 2, p. 373-379, 1977.
- NÉMETH, J., PALLAI, E., PETER, M., TOROS, R. Heat transfer in a novel type spouted bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. v. 3, n. 61, p. 406-410, 1983.
- NGK do Brasil S. A. Esferas e cilindros cerâmicos para moinhos. *Catálogo*. 1993.
- NSK ROLAMENTOS, Motion & Control NSK. *Catálogo Geral*, p. A 114, 1995.

- OWER, E.; PANKHURST, R.C. *The measurement of air flow*. Pergamon Press. Oxford, 1977. 363 p.
- PALLAI, E.; NÉMETH, J. Spouted bed. *Handbook of industrial drying*. MUJUMDAR, A.S. (ed.). Editora Marcel Dekker. New York, p. 419-460, 1987.
- PANNU, K.S.; RAGHAVAN, G.S.V. A continuous flow particulate medium grain processor. *Canadian Agricultural Engineering*. v. 3, n. 29, p. 39-43, 1987.
- PERRY, H.R., GREEN, D. *Perry's chemical engineers handbook*. McGraw-Hill. 4. ed. New York, 1984.
- PETERS, M.S.; TIMMERHAUS, K.D. *Plant design and economics for chemical engineers*. McGraw-Hill. New York, 1993. 910 p.
- RACHEL, C.A.; JACOB, K.V. Entrainment from industrial rotary dryer. *Drying 92*. MUJUMDAR, A.S. (ed). Elsevier Science Publishers B.V., p. 1248-1257, 1992.
- RANS, W.E.; MARSHALL, W.R. Evaporation from drops. *Chemical Eng. Progr.* v. 48, p. 141-146, 1962.
- RÉ, M.I. Secagem de sangue animal em leito de jorro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 1986, 73p.
- RÉ, M.I.; FREIRE, J.T. Secagem de sangue animal em leito de jorro. *Anais XIV Encontro Nacional Sobre Escoamentos em Meios Porosos*, Campinas, SP, p. 187-198, 1986.
- RÉ, M.I.; FREIRE, J.T. Secagem de Extratos Farmacológicos. *Anais do XV Encontro Nacional Sobre Escoamentos em Meios Porosos*, Uberlândia, MG, p. 399-406, 1987.
- REAY, D. Fluid flow, residence time simulation and efficiency in industrial dryers. *Anais do 6<sup>o</sup> International Drying Symposium*, Montreal, Canadá, v. 1, p. kl.1-kl.8, 1988.

- REGER, E.O.; ROMANKOV, P.G.; RASHKOVSKAYA, N.B. Zh. Prikl. Khim. Leningrad. v.6, p. 2276, 1967.
- REYNOLDS, W.C. *Thermodynamics properties in S.I.* Stanford CA, Department of Mechanical Engineering. Stanford University, 1979. 172p.
- RHEINBOLDT, P.H.H., LEIMER, K.H., ROSSELL, C.E.V. Sangria e secagem de levedura - processo CTC. *Boletim Técnico Copersucar*. n. 39, p. 8-12, 1987.
- RICHARD, P.; RAGHAVAN, G.S.V. Drying and processing by immersion in a heated particulate medium. *Advances in Drying*. v. 3. Mujumdar, A.S. (ed.). Hemisphere Publishing Corporation. Washington, p. 39-69, 1984.
- ROCHA, S.C.S. Secagem em sistemas com vibração. *Tópicos especiais em secagem*. v.1. FREIRE, J.T.; SARTORI, D.J.M. (ed). UFSCar, São Carlos, p. 87-127, 1992.
- ROCHA, S.C.S.; FARIA, L.J.G. A psychrometer for measurement of air humidity at high temperatures. *Drying 92*. p. 1768-1780, 1992.
- ROCHA, S.C.S. Recobrimento de comprimidos. *Tópicos especiais em secagem*. v.1. FREIRE, J.T.; SARTORI, D.J.M. (ed). UFSCar, São Carlos, SP, p. 296-329, 1992.
- ROCKLAND, L.B.; BEUCHAT, L.R. *Water activity: theory and application to food*. e Basel, Marcel Dekker Inc. New York, 1987. 404 p.
- ROOS, Y.; KAREL, M. Applying state diagrams to food processing and development. *Food Technology*, p. 66-70, 12, 1991.
- SANTANA, C.C.; ROCHA, S.C.S.; CREMASCO, M.A.; ATAÍDE, C.H. Recobrimento de Comprimidos em Leito de Jorro: Estudos Preliminares.
- SANTOS, V.M.; CAIXETA, A.O.; BURJAILI, M.M.; LIMAVERDE, J.R.; FINZER, J.R.D.

- Análise energética de secadores no processamento de levedura termolizada. *Anais do XXI Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos*, Ouro Preto, p. 533-544, 1993.
- SCHÄR, W.; RÜEGG, M. The evaluation of G.A.B. constants from water vapour sorption data. *Lebensm.-Wiss.-Technol.* v. 18, p. 225-229, 1985.
- SCHNEIDER, T., BRIDGWATER, J. Drying of solution and suspension in spouted beds. *Anais do 6<sup>th</sup> International Drying Symposium*, Montreal-Canadá, p. op. 113-117, 1988.
- SCHUBERT, H. Instantization of powdered food products. *International Chemical Engineering*, v. 33, n. 1, p. 28-45, 1993.
- SHERRITT, R.G.; CAPLE, R.; BEHIE, L.A.; MEHROTRA, A.K. The movement of solids through flighted rotating drums - Part II. *Model Formulation Journal of Chemical Engineering*, v. 71, p. 337-346, 1993.
- STOCKBURGER, D. Fortschritte und entwicklungstendenzen in der trocknungstechnik bei der trocknung formloser guter. *Chem. Ing. Techn.*, v. 48, n. 3, p. 199-205, 1973.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design*. Gordon and Breach Science Publication. New York, 1986. 448 p.
- STRUMILLO, C.; MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W. Modern developments in drying of pastelike materials. *Advances in Drying*, v.2, MUJUMDAR, A.S. (ed.). Editora McGraw Hill, p. 193-231, 1983.
- STRUMILLO, C.; MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W.; KASZUBA, W. *Inz. Apar. Chem.* v. 5, p. 16, 1977.
- TAEYMANS, D.; LENGES, J. Sechage de la biomasse. *Revue des Fermentations et des Industries Alimentaires*, v. 39, n. 2, p. 32-44, 1984.

TECHNICAL INFORMATION. Institute of Chemical Engineering. Warsaw Technical University, Varsóvia, Polônia.

TOLEDO, R.J. *Fundamentals of food process engineering*. AVI Publ. Co. Inc. Westport, 1980. 363 p.

TUTOVA, E.G.; KUTS,P.S. *Drying of microbiological products*. Agropromizdat, Moscou, 1987. 303 p.

VALDECIR, L. *Obtenção de fatias de banana desidratada crocantes através da pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado*. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual de Campinas, 1996. 104p.

VANECEK, C.; MARKVART, M. *Fluidized bed drying*. Leonard Hill, London, 1966. 195 p.

VOMM TURBO TECNOLOGIA. Turbo dryer. *Catálogo serial VOMM*. n. 27. São Paulo.

WEXLER, A.; GREENSPAN, L. *NBS Journal of Research*, 75 A, (3), 1971.