

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



**CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM
SECADOR VIBRO-FLUIDIZADO**

Breves

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Fernando Pedro Reis Brod e aprovada pela Comissão Julgadora em 22 de fevereiro de 1999. Campinas, 30 de março de 1999.

FERNANDO PEDRO REIS BROD
Engenheiro Agrícola

Prof. Dr. KIL JIN PARK
Orientador

Presidente da Banca

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Campinas - SP
Março de 1999

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**



CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM SECADOR VIBRO-FLUIDIZADO

FERNANDO PEDRO REIS BROD
Engenheiro Agrícola

Prof. Dr. KIL JIN PARK
Orientador

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Campinas - SP
Março de 1999

9912440

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	B784c
V.	E
TOPICO	BC 37 929
PROC	229/99
	X
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	17/06/99
N.º CPD	CM-00324228-6

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

B784c Brod, Fernando Pedro Reis
 Construção e teste de um secador vibro-fluidizado. /
 Fernando Pedro Reis Brod.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Kil Jin Park
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Secagem. 2. Cenoura. 3. Materiais granulados. 4.
 Vibração. 5. Fluidização. I. Park, Kil Jin. II.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Agrícola. III. Título.

"For hot, cold, moist and dry, four champions fierce
Strive here for mastery"

"Para o quente, o frio, o úmido e o seco, quatro campeões ferozes
Que lutam pelo poder."

Milton "Paradise lost", 1650 D.C.
Apud: Roger Brian Keey

Um caminho de pedras

mas um caminho meu

uma caminhada com amigos
amigos presentes sempre.

Uma conquista

um trabalho que se finda

e a alegria de muitos
juntos comigo
celebrando o momento.

A vocês, meus pais (Pedro e Celeste)
e irmãs (Ana e Emanuela)

que se fizeram presentes

mesmo ausentes

que se fizeram constantes

mesmo distantes

que me acompanharam

que me incentivaram.

É só um trabalho

um trabalho de muito trabalho

que se fez dissertação

e que dedico a cada um de vocês

e que agradeço a cada um de vocês.

Mais do que tudo

você foi a voz

que me fez seguir em frente

que me fez encontrar soluções

repetir experimentos

que me fez crer no posso, no quero,

que me fez tornar o sonho possível

e a dissertação real.

Obrigado, Kil! Valeu!

A você, José Carlos Job,

crença, mão forte e amiga,

impulso desde o primeiro instante.

A você, Luís Felipe,

que comigo dividiu o espaço.

A vocês, Evandro e Marcelus,

que também enfrentaram e venceram este desafio.

A vocês, Cleber, João, Roberto, Fábio e Flávio,

companheiros de tantos anos, amigos e camaradas

de tantas incertezas e certezas.

A vocês, Luiz, Leonardo e Alex,

que na moradia e no dia-a-dia

se tornaram meus irmãos.

A vocês, Oswaldo e Regina,

que me acolheram quando

precisava do carinho terno e fraterno.

A vocês, Fábio, Renato, Ricardo, Paulo e Rafael,

que se empenharam nos experimentos

estendendo os braços que me ajudaram.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP,

pela concessão da bolsa de mestrado.

À Fundação Banco do Brasil – FBB, pelo financiamento do projeto.

À Metalúrgica Metal Vibro, pela construção do equipamento.

À Ito Ovos, pela cessão de matéria prima e colaboração nos experimentos de secagem.

A Deus, em meu caminho.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS.....	i
LISTA DE FIGURAS	iii
NOMENCLATURA.....	vi
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
I: INTRODUÇÃO	1
II: OBJETIVOS	3
III: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS.....	4
3.2 PROPRIEDADES FLUIDODINÂMICAS	5
3.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS	7
3.3.1 <i>Condutividade térmica</i>	7
3.3.1.1 Método de regime permanente (estado estacionário).....	8
3.3.1.2 Método de regime transiente (estado não estacionário).....	8
3.3.2 <i>Coefficiente convectivo</i>	11
3.3.2.1 Agregado de particulares.....	12
3.3.2.2 Regime transiente.....	12
3.4 CONTEÚDO DE UMIDADE.....	14
3.5 ATIVIDADE DE ÁGUA	15
3.6 ISOTERMAS DE SORÇÃO	17
3.7 MODELOS DE ISOTERMAS.....	20
3.7.1 <i>Modelo de LANGMUIR</i>	21
3.7.2 <i>Modelo de BET (Brunauer, Emmet e Teller)</i>	21
3.7.3 <i>Modelo de BET linearizado</i>	22
3.7.4 <i>Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson e de Boer)</i>	22
3.7.5 <i>Modelo de HALSEY</i>	23
3.7.6 <i>Modelo de OSWIN</i>	24
3.7.7 <i>Modelo de PELEG</i>	24
3.8 SECAGEM.....	26
3.9 MECANISMOS DE MIGRAÇÃO DE UMIDADE	29
3.10 CURVAS DE SECAGEM.....	31
3.11 CINÉTICAS DE SECAGEM	36
3.11.1 <i>Periodo à taxa decrescente de secagem</i>	36
3.11.2 <i>Modelo de Page</i>	40
3.11.3 <i>Secagem da cenoura</i>	41
3.11.4 <i>Dados da literatura da casca de ovo</i>	43
3.12 ENERGIA DE ATIVAÇÃO.....	45
3.13 MÉTODOS DE SECAGEM	45
3.14 TIPOS DE SECADORES.....	45
3.15 PROJETO DE SECADORES	54
3.16 FLUIDIZAÇÃO	56
3.17 VIBRAÇÃO	58

3.18 VIBRO-FLUIDIZAÇÃO	66
3.18.1 <i>Parâmetros do regime vibro-fluidizado</i>	66
3.18.2 <i>Tipos de leito e de secadores vibro-fluidizados</i>	69
3.18.3 <i>Efeitos da vibração na secagem</i>	71
3.19 EXEMPLOS DA UTILIZAÇÃO DA VIBRO - FLUIDIZAÇÃO	75
IV: MATERIAL.....	94
4.1 PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL	94
4.2 PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE.....	94
4.3 PARA A DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO	94
4.4 PARA A DETERMINAÇÃO DA ESFERICIDADE	94
4.5 PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FLUIDODINÂMICAS	95
4.6 PARA A DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	95
4.7 PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO.....	96
4.8 PARA A DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE DE ÁGUA	96
4.9 PARA OS TESTES DE SECAGEM.....	97
4.10 SECADOR VIBRO-FLUIDIZADO	97
4.11 CAIXA DE RESISTÊNCIA.....	98
4.12 SISTEMA DE VENTILAÇÃO	98
4.13 QUADRO DE COMANDO DO CONTROLADOR DIGITAL.....	98
4.14 QUADRO GERAL DE COMANDO (QUADRO DE FORÇA)	99
4.15 QUADRO DE COMANDO DOS MOTOVIBRADORES	99
4.16 CENOURA.....	99
4.17 CASCA DE OVO.....	100
V: METODOLOGIA.....	101
5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS.....	101
5.1.1 <i>Densidade real</i>	101
5.1.2 <i>Densidade aparente</i>	101
5.1.3 <i>Determinação do diâmetro médio da partícula</i>	102
5.1.4 <i>Esfericidade</i>	102
5.2 PROPRIEDADES FLUIDODINÂMICAS DA CASCA DE OVO.....	104
5.2.1 <i>Perda de carga</i>	104
5.2.2 <i>Determinação da velocidade mínima de fluidização e de arraste</i>	105
5.2.3 <i>Equação de Ergun</i>	106
5.2.4 <i>Expansão do leito sólido</i>	106
5.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS	106
5.3.1 <i>Condutividade térmica</i>	106
5.3.2 <i>Coefficiente convectivo</i>	108
5.4 DETERMINAÇÃO DAS ISOTERMAS DE SORÇÃO PARA A CASCA DE OVO E PELE	109
5.5 SECAGEM.....	110
5.6 CINÉTICA DE SECAGEM DA CENOURA	112
5.7 CÁLCULO DAS DIFUSIVIDADES EFETIVAS PARA A CENOURA	112
5.8 CÁLCULO DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO PARA A CENOURA	113
5.9 MONTAGEM DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DO SECADOR VIBRO-FLUIDIZADO	113
5.10 MONTAGEM DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DO SECADOR VIBRO-FLUIDIZADO	118
5.11 MONTAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO E DE CONTROLE.....	121
5.12 DESCRIÇÃO DO SECADOR VIBRO-FLUIDIZADO.....	127
5.13 OBTENÇÃO DA PERDA DE CARGA NO SECADOR VIBRO-FLUIDIZADO	133

VI: RESULTADOS E DISCUSSÕES	137
6.1 TRATAMENTO DOS DADOS DE PERDA DE CARGA NA TELA DO SECADOR	137
6.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA A CENOURA	141
6.2.1 <i>Umidade de equilíbrio da cenoura</i>	141
6.2.2 <i>Cálculo do conteúdo adimensional de umidade</i>	142
6.2.3 <i>Cálculo da difusividade efetiva</i>	143
6.2.4 <i>Cálculo da energia de ativação</i>	144
6.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA A CASCA DE OVO	144
6.3.1 <i>Atividade de água à temperatura ambiente</i>	144
6.3.2 <i>Densidade real</i>	150
6.3.3 <i>Densidade aparente</i>	151
6.3.4 <i>Diâmetro médio da partícula</i>	152
6.3.5 <i>Espessura da casca de ovo</i>	153
6.3.6 <i>Esfericidade da casca de ovo</i>	154
6.3.7 <i>Dados do ar e água</i>	154
6.3.8 <i>Propriedades fluido-dinâmicas</i>	156
6.3.9 <i>Condutividade térmica</i>	161
6.3.10 <i>Transferência de calor</i>	163
6.4 DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM	171
6.5 INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE SECAGEM	175
VII: CONCLUSÕES	183
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	186
APÊNDICES	1
APÊNDICE 1: DADOS E RESULTADOS OBTIDOS EM DISQUETE	1
APÊNDICE 2: DESENHO DA BASE DE SUSTENTAÇÃO DO SECADOR	2
APÊNDICE 3: DESENHO DO CORPO INFERIOR DO SECADOR	3
APÊNDICE 4: DESENHO DO CORPO SUPERIOR DO SECADOR	4
APÊNDICE 5: DESENHO DO SECADOR COMPLETO	5
APÊNDICE 6: AUTORIZAÇÃO DA ITO OVOS PARA A UTILIZAÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS	6

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros estimados da equação de GAB para a cenoura..... 25

Tabela 2: Parâmetros da equação de Page para a cenoura..... 41

Tabela 3: Conteúdo de umidade da cenoura. 42

Tabela 4: Difusividades mássica para a cenoura em m²/s. 43

Tabela 5: Composição da casca de ovo extrusada..... 44

Tabela 6: Critérios para a classificação de secadores..... 46

Tabela 7: Métodos de transporte na secagem..... 48

Tabela 8: Dados das umidades relativas correspondentes aos sais utilizados..... 109

Tabela 9: Dimensionamento dos disjuntores. 122

Tabela 10: Dimensionamento dos condutores. 123

Tabela 11: Características do ar..... 139

Tabela 12: Cálculo do número de Reynolds e dados de perda de carga para a câmara 1..... 139

Tabela 13: Cálculo do número de Reynolds e dados de perda de carga para a câmara 2..... 139

Tabela 14: Cálculo do número de Reynolds e dados de perda de carga para a câmara 3..... 140

Tabela 15: Correlação entre a perda de carga ΔP (kPa) e a velocidade v (m/s)..... 140

Tabela 16: Cálculo da umidade de equilíbrio da cenoura. 142

Tabela 17: Difusividades efetivas para a cenoura utilizando o modelo unidirecional..... 143

Tabela 18: Difusividades efetivas para a cenoura utilizando o modelo tridirecional. 143

Tabela 19: Energia de ativação para a cenoura..... 144

Tabela 20: Umidade de equilíbrio para a pele a 25°C..... 145

Tabela 21: Umidade de equilíbrio para a casca a 25°C. 145

Tabela 22: Ajuste da umidade de equilíbrio da pele do ovo..... 146

Tabela 23: Ajuste da umidade de equilíbrio da casca do ovo. 147

Tabela 24: Densidade real para a casca de ovo. 150

Tabela 25: Densidade real para a pele de ovo. 150

Tabela 26: Densidade aparente para a casca de ovo..... 151

Tabela 27: Densidade aparente para a pele de ovo..... 151

Tabela 28: Média dos dados de determinação de diâmetro médio da casca do ovo..... 152

Tabela 29: Média dos dados de determinação de diâmetro médio da pele do ovo. 152

Tabela 30: Resultados da determinação de diâmetro médio – d_p 152

Tabela 31: Espessura média da casca de ovo..... 153

Tabela 32: Espessura da casca de ovo. 154

Tabela 33: Cálculo da esfericidade da casca de ovo..... 154

Tabela 34: Propriedades do ar e da água. 155

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 35: Área do tubo de vidro e do anemômetro.</i>	155
<i>Tabela 36: Propriedades físicas da casca de ovo.</i>	155
<i>Tabela 37: Dados de determinação da velocidade terminal.</i>	156
<i>Tabela 38: Testes com a equação de Ergun.</i>	158
<i>Tabela 39: Valores de condutividade térmica obtidos para a casca de ovo.</i>	163
<i>Tabela 40: Dados de vazão para as três corridas experimentais.</i>	164
<i>Tabela 41: Capacidade térmica da casca de ovo.</i>	164
<i>Tabela 42: Cálculo da área específica exposta da partícula.</i>	164
<i>Tabela 43: Verificação da correlação de coluna de recheio.</i>	167
<i>Tabela 44: Cálculo do coeficiente convectivo e do Biot utilizando o Transiente Newtoniano.</i>	170
<i>Tabela 45: Dados psicrométricos.</i>	172

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Velocidade relativa de reações em função da a atividade de água..... 17

Figura 2: Histerese das isotermas de sorção..... 19

Figura 3: Retenção de umidade..... 20

Figura 4: Diagrama do processo de secagem..... 27

Figura 5: Diagrama da migração de umidade no interior de um sólido..... 30

Figura 6: Curva de secagem exemplo..... 32

Figura 7: Classificação dos secadores baseada no método de operação..... 49

Figura 8: Classificação dos secadores baseada na forma física da alimentação..... 51

Figura 9: Classificação dos secadores baseada na escala de produção..... 52

Figura 10: Classificação dos secadores baseada em projetos especiais..... 53

Figura 11: Fluxograma para o projeto de secadores..... 55

Figura 12: Regimes de escoamento..... 56

Figura 13: Perda de carga versus velocidade do ar..... 57

Figura 14: Classificação dos equipamentos vibráteis de processamento..... 60

Figura 15: Movimento de um leito vibrátil modelado como um corpo plástico..... 62

Figura 16: Trajetória do leito e do vaso durante o período de vibração..... 63

Figura 17: Placa aquecedora imersa em um leito vibro-fluidizado..... 65

Figura 18: Secadores vibro-fluidizados com leitos horizontais..... 70

Figura 19: Curva de vibro-fluidização..... 71

Figura 20: Dependência hipotética da taxa de secagem com a aceleração vibracional..... 72

Figura 21: Instalação de secagem para partículas com ampla distribuição de tamanhos..... 75

Figura 22: Instalação de granulação de secagem..... 76

Figura 23: Esquema de montagem do secador vibro-fluidizado..... 77

Figura 24: Secador de leito vibro-fluidizado contínuo..... 78

Figura 25: Secador vibro-fluidizado (SVF) com energia radiativa e convectiva..... 79

Figura 26: Secador vibro-fluidizado..... 80

Figura 27: Secador vibro-fluidizado..... 81

Figura 28: Secador vibro-fluidizado..... 83

Figura 29: Sistema de secagem e limpeza de chá..... 85

Figura 30: Secador vibro-fluidizado em escala piloto..... 86

Figura 31: Sistema de fluxo vibro-fluidizado..... 87

Figura 32: Esquema para a obtenção de fotografias de alta resolução de leitos vibráteis..... 90

Figura 33: Fotografias com iluminação traseira de um leito vibrátil..... 91

Figura 34: Fotografias com iluminação superior de um leito vibrátil..... 92

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 35: Montagem para a observação de bolhas no leito.</i>	93
<i>Figura 36: Aparelho para a determinação da perda de carga e transferência de calor.</i>	104
<i>Figura 37: Esquema do sistema de medição da condutividade térmica.</i>	107
<i>Figura 38: Coifa montada na caixa de resistência</i>	113
<i>Figura 39: Dimensões das resistências elétricas.</i>	115
<i>Figura 40: Disposições das resistências.</i>	116
<i>Figura 41: conjunto resistências – caixa.</i>	116
<i>Figura 42: Conjunto resistências - caixa.</i>	117
<i>Figura 43: Caixa de resistência montada.</i>	117
<i>Figura 44: Conjunto ventilador – caixa de resistência</i>	118
<i>Figura 45: Ligação da manta de amianto ao secador.</i>	119
<i>Figura 46: Sistema de ventilação.</i>	120
<i>Figura 47: Vista posterior do sistema de ventilação.</i>	120
<i>Figura 48: Guilhotina de regulagem do fluxo de ar.</i>	121
<i>Figura 49: Esquema elétrico.</i>	124
<i>Figura 50: Quadro geral de força.</i>	125
<i>Figura 51: Controlador digital micro-processado de temperatura.</i>	126
<i>Figura 52: Quadros elétricos.</i>	127
<i>Figura 53: Detalhe da mola de vibração.</i>	128
<i>Figura 54: Detalhe da descarga do secador.</i>	129
<i>Figura 55: Detalhe da tela.</i>	130
<i>Figura 56: Moto-vibrador.</i>	131
<i>Figura 57: Posição dos excêntricos que permitem a menor frequência.</i>	131
<i>Figura 58: Posição dos excêntricos que permitem a maior frequência.</i>	132
<i>Figura 59: Secador vibro-fluidizado completo.</i>	132
<i>Figura 60: Agências patrocinadoras do secador vibro-fluidizado.</i>	133
<i>Figura 61: Posição das tomadas de pressão no secador.</i>	134
<i>Figura 62: Esquema de funcionamento do manômetro diferencial</i>	134
<i>Figura 63: Posições de medida da pressão dinâmica (tubo de Pitot).</i>	135
<i>Figura 64: Esquema de funcionamento do tubo de Pitot.</i>	135
<i>Figura 65: Perfil de pressões dinâmicas para a câmara 1.</i>	137
<i>Figura 66: Perfil de pressões dinâmicas para a câmara 2.</i>	138
<i>Figura 67: Perfil de pressões dinâmicas para a câmara 3.</i>	138
<i>Figura 68: Correlação entre a perda de carga e a velocidade do ar.</i>	141
<i>Figura 69: Conteúdo de umidade versus tempo.</i>	142
<i>Figura 70: Ajustes das equações de isotermas para a pele.</i>	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 71: Ajustes das equações de isotermas para a casca.....	148
Figura 72: Curvas de equilíbrio da casca e da pele ajustadas pelo modelo de PELEG.....	149
Figura 73: Curvas de equilíbrio só da casca ajustadas pelo modelo de PELEG.....	149
Figura 74: Distribuição da pele e casca de ovo retida nas peneiras.....	153
Figura 75: Curva de perda de carga versus a velocidade do ar.....	156
Figura 76: Logaritmo da perda de carga versus a velocidade do ar.....	157
Figura 77: Correlação descrita por AKAPO et al. (1989).....	159
Figura 78: Determinação do coeficiente $1/n$ da equação de DAVIES e RICHARDSON (1966).....	159
Figura 79: Correlação descrita por DAVIES e RICHARDSON (1966).....	160
Figura 80: Variação da temperatura em função do tempo para a casca de ovo.....	161
Figura 81: Variação da temperatura em função do logaritmo do tempo.....	162
Figura 82: Regressão linear dos dados de temperatura e do \ln do tempo.....	162
Figura 83: Perfil de temperaturas para a corrida de 35°C.....	165
Figura 84: Perfil de temperaturas para a corrida de 50°C.....	165
Figura 85: Perfil de temperaturas para a corrida de 60°C.....	166
Figura 86: Logaritmo da temperatura adimensionalizada para a corrida de 35°C.....	168
Figura 87: Logaritmo da temperatura adimensionalizada para a corrida de 50°C.....	168
Figura 88: Logaritmo da temperatura adimensionalizada para a corrida de 60°C.....	169
Figura 89: Esquema psicrométrico.....	173
Figura 90: Esquema do tratamento de ar.....	174
Figura 91: Entrada do local onde se instalou o sistema de secagem.....	175
Figura 92: Detalhe do sistema de tratamento do ar.....	176
Figura 93: Quadros elétricos de comando do sistema de secagem.....	177
Figura 94: Válvula reguladora de vapor.....	177
Figura 95: Detalhe da parte inferior do secador.....	178
Figura 96: Ventiladores.....	179
Figura 97: Vista do sistema de secagem.....	179
Figura 98: Moega de alimentação.....	180
Figura 99: Vista frontal da moega de alimentação.....	181

NOMENCLATURA

ΔP	perda de carga	[Pa]
$\Delta P/L$	Perda de carga por unidade de comprimento	[Pa/m]
A e B	coeficientes de ajuste (eq. 36 e 37)	-
A e n	coeficientes de ajuste (eq. 2)	-
A	amplitude da vibração (eq. 45, 46, 47 e 48)	[m]
A	constante da equação tipo Arrhenius (eq. 44)	-
a_w	atividade de água	-
B	pressão barométrica (eq. 68)	[kPa]
Bi	número de Biot	-
Bu	umidade em base úmida	[%]
Ce	constante de Euler	-
C, K e X_m	coeficientes de ajuste (eq. 31)	-
C e X_m	coeficientes de ajuste (eq. 28, 29 e 30)	-
C_0	coeficientes de ajuste (eq. 32)	-
C_p	capacidade térmica a pressão constante	[J/kg K]
c.v.	coeficiente de variação	[%]
d	diâmetro	[m]
desvio	desvio padrão	-
D	$D_{ef} / 4 L^2$	[1/s]
D_{ef}	difusividade efetiva	[m ² /s]
dp	diâmetro médio da partícula	[m]
dpi	média das aberturas das malhas entre duas peneiras adjacentes	[m]
E	coeficiente de colisão elástica	-
e	espessura	[m]
E_a	energia de ativação	[kJ/mol]
f	frequência de vibração	[1/s]
G e J	constantes do modelo de Page	-
g	aceleração da gravidade	[m/s ²]
\dot{G}_s	fluxo total de gás por área unitária	[kg/s m ²]
H	altura do leito (eq. 1 e 3)	[m]
h	coeficiente convectivo de transferência de calor	[W/m ² K]
H_1	calor de condensação do vapor de água	[J/mol]
H_m	calor de sorção da camada mono-molecular da água	[J/mol]
H_n	calor de sorção da camada multi-molecular da água	[J/mol]
Hv	entalpia de vaporização	[W/kg K]
I	corrente elétrica	[A]
I_e	energia específica da vibração	[m/s ²]
I_p	potência específica da vibração	[m/s ²]
j	razão entre o tempo ascendente e descendente da partícula	-
k	condutividade térmica	[W/m °C]
K_0	coeficientes de ajuste (eq. 33)	-
k_1 e k_2	coeficientes de ajuste (eq. 38)	-

NOMENCLATURA

K1, K2 e n	coeficientes de ajuste (eq. 3)	-
L	comprimento característico	[m]
m	coeficiente angular	-
$M_{amostra}$	massa do produto	[g]
$M_{conj.}$	massa do conjunto recipiente + amostra	[g]
$M_{recip.}$	massa do recipiente	[g]
$M_s.$	massa seca do produto	[kg]
N	umidade em base seca	[kg/kg]
n	número de camadas moleculares (eq. 29)	-
n	número de termos da série das equações 41 e 42.	-
n_1 e n_2	coeficientes de ajuste (eq. 38)	-
n_s	número moles do soluto	[mol]
Nu	número de Nusselt	-
n_w	número moles da água	[mol]
P	potência	[W]
P.f.	peso do material no final da secagem no secador	[g]
$P_{amos.}$	peso da amostra no decorrer da secagem	[g]
P_{final}	peso do final cadinho de alumínio mais a amostra de produto	[g]
P_{H_2O}	quantidade de água presente na amostra	[g]
$P_{inicial}$	peso inicial do cadinho de alumínio mais a amostra de produto	[g]
Pr	número de Prandtl	-
P_{tara}	peso tara do cadinho de papel de alumínio	[g]
P_v	pressão dinâmica do ar de secagem	[kPa]
P_w	pressão de água	[Pa]
P_{wa}	pressão parcial de vapor da água no ar	[Pa]
q	calor transmitido	[W]
Q	fluxo de calor por unidade de área	[W/m ²]
R^2	coeficiente de correlação	-
R	constante universal dos gases ideais	[J/mol K]
r	raio	[m]
Re	número de Reynolds	-
S	área	[m ²]
T	temperatura	[K]
t	tempo	[s]
T^*	temperatura adimensionalizada	-
u	velocidade do ar	[m/s]
U	tensão entre fases	[V]
Umíd.Abs	umidade absoluta do ar de secagem	[kg/kg]
Umidade _{bs}	umidade em base seca	[kg/kg]
Umidade _{bu}	umidade em base úmida	[%]
UFC	unidade formadora de colônia	-
U_{∞}	velocidade média intersticial	[m/s]
UR	umidade relativa	[%]
v	velocidade	[m/s]
V	volume	[m ³]

NOMENCLATURA

V_{final}	volume do produto mais água	[ml].
v_m	velocidade média da vibração	[m/s]
$Vol_{\text{recip.}}$	volume do recipiente	[ml].
\dot{V}	vazão volumétrica	[m ³ /s]
W	adimensional de umidade	-
X	conteúdo de umidade em base seca	[kg/kg]
\bar{X}	conteúdo médio de umidade	[kg/kg]
x_i	fração retida na peneira	-
X_s	fração molar do soluto (eq. 26)	[mol]
X_w	fração molar da água (eq. 27)	[mol]
y	coeficiente da atividade de água	-
z	direção da difusão	[m]

LETRAS GREGAS

ω	freqüência angular de vibração	[1/s]
Γ	intensidade de vibração (parâmetro de vibração)	-
ρ	densidade	[kg/m ³]
μ	viscosidade dinâmica	[Pa s]
ε	porosidade do material	-
ϕ	esfericidade	-
α	difusividade térmica	[m ² /s]
β	$\frac{r}{2\sqrt{\alpha\theta}}$	-
θ	Tempo de aquecimento da amostra	[s]

SUBSCRITOS

0	inicial
cr	crítico
eq	equilíbrio
uni	uma dimensão
três	três dimensões
p	partícula
m	média
mf	mínima de fluidização
mvf	incipiente de vibro-fluidização
(_v)	condições de vibração do leito
(_s)	leito estacionário
e	esfera
ap.	aparente
∞	ambiente
s	superfície do sólido
g	gás

RESUMO

O presente trabalho descreve a construção e teste de um secador vibro-fluidizado (SVF), patente industrial INPI n.º 9302443, construído pela empresa Metal Vibro Metalúrgica, com o auxílio da Fundação Banco do Brasil.

Foi construído um sistema de secagem vibro-fluidizada composto do secador e de um tratamento do ar. O tratamento do ar consiste de resfriamento e posterior aquecimento do ar ambiente. Este sistema foi utilizado para a obtenção de casca de ovo triturada com umidade abaixo de 1% (base seca) e um nível de contaminação abaixo de 10 UFC/g. A casca de ovo é um produto rico em cálcio que apresenta umidade e nível de contaminação altos após a separação da clara e gema.

Para dimensionar o sistema de secagem obteve-se a perda de carga no secador, dados de propriedades físicas (densidade real e aparente, diâmetro médio, espessura e esfericidade), propriedades térmicas (condutividade e coeficiente convectivo), propriedades fluidodinâmicas (perda de carga, velocidade mínima de fluidização e de arraste, e porosidade do leito) e cinética de secagem.

Para o estudo de cinética de secagem, a cenoura cortada em cubos foi utilizada para a determinação das difusividades efetivas devido à facilidade de obtenção de uma forma geométrica regular. E para os demais estudos, utilizou-se a casca de ovo.

ABSTRACT

This work describes the construction and examination of a vibro-fluidized dryer (VFD) - industrial patent n.º 9302443/INPI/Brazil, built by Metalúrgica Metal Vibro, with a financial support by Fundação Banco do Brasil.

A vibro-fluidized drying system was built and it is composed by the dryer and an air treatment equipment (with cooling and heating section). This system was used to obtain trituated eggshell with a moisture content below 1% (dry basis) and a contamination level below 10 UFC/g. The eggshell is a material rich in calcium, that has a high contamination level and high moisture content after the separation from the yolk and the white.

To design the drying system the physical properties (specific gravity, bulk density, average diameter, thickness and sphericity), thermal properties (conductivity and convective coefficients), fluid-dynamics properties (pressure drop, minimum fluidization velocity, terminal velocity and bed porosity) and drying kinetic were obtained.

Diced carrot was used to evaluate the effective diffusivities, due to facility to obtain a well-defined geometric form. On every other evaluation the eggshell was the subject.

I: INTRODUÇÃO

A secagem é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas nos mais diversos processos usados em indústrias agrícolas, cerâmicas, químicas, alimentícias, farmacêuticas, de papel e celulose, mineral e de polímeros. É também uma das operações mais complexas e menos entendida, devido à dificuldade e deficiência da descrição matemática dos fenômenos envolvidos de transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento no sólido. Assim a secagem é um conjunto de ciência, tecnologia e arte, ou seja, um *know-how* baseado em extensiva observação experimental e experiência operacional (MENON e MUJUMDAR, 1987).

As razões para a secagem são tantas quantos são os materiais que podem ser secos. KEEY (1978) descreve que um produto tem que estar capacitado para um processo subsequente ou para ser vendido. Assim, existem materiais que necessitam de uma determinada umidade para poderem ser prensados, moídos ou peletizados. Pós necessitam ser secos a baixos conteúdos de umidade, para permitir um armazenamento satisfatório. Custos de transportes também são reduzidos pela remoção de grande parte de água contida no produto. Vegetais desidratados são também utilizados em pratos rápidos (*fast food*) e caros (PAN et al., 1997 - a).

Para materiais termolábeis, que requerem tempos de residência curtos, altas taxas de secagem e baixas temperaturas de secagem, tais como: materiais granulares, pastas e pós; tanto para materiais farmacêuticos, biológicos e alimentares a secagem vibro-fluidizada é a mais adequada.

HOVMAND (1987) afirma que a secagem vibro-fluidizada também pode ser usada para sais inorgânicos, fertilizantes granulados, produtos de mineração ou quando há uma grande variedade de tamanhos de partículas.

Percebe-se a possibilidade da obtenção de inúmeras vantagens quando se alia o efeito mecânico da agitação do leito do secador com a ação pneumática do ar secante. O nível de vibração do leito determina os possíveis regimes operacionais para os diferentes materiais a serem secos. O efeito mecânico produzido por esta vibração, juntamente com as diferentes velocidades do ar de secagem (que é admitido perpendicularmente ao leito) possibilitam um ajuste operacional adequado em função das características físicas do material a ser seco. Por exemplo, sólidos úmidos necessitam de velocidades do ar mais altas para poderem flutuar no leito, em relação àquelas necessárias para sólidos mais secos. Sendo assim, para uma mesma frequência e amplitude de vibração do leito, é possível se alterar a velocidade do ar ao longo do leito a fim de se conseguir parâmetros ótimos de processo.

Foi construído um secador de leito vibro-fluidizado, conforme a reivindicação do privilégio deste equipamento depositado junto ao INPI (PI n 9302443), que conta com auxílio da Fundação Banco do Brasil para a sua construção e teste. Esta construção foi feita em conjunto com a empresa Metalúrgica Metal Vibro - Jundiaí/SP.

Para uma aplicação industrial direta do secador, um material particulado foi estudado: a casca de ovo triturada, que era descartada de uma empresa de quebra de ovos. Para tanto coletaram-se dados de propriedades físicas, térmicas e fluido-dinâmicas e da atividade de água do produto. Além do dimensionamento e montagem do equipamento na indústria.

II: OBJETIVOS

1. Construção, testes e funcionamento do secador vibro-fluidizado;
 2. Estudo das propriedades físicas, térmicas e fluidodinâmicas da casca de ovo;
 3. Teste de comportamento do secador vibro-fluidizado na secagem de um material biológico;
 4. Dimensionamento e instalação de um sistema de secagem para obtenção de casca de ovo com umidade e contaminação microbiológica baixas.
-

III: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

No estudo de sistemas porosos, é importante a determinação da densidade, que relaciona a massa com o volume de um corpo. As densidades que foram determinadas são de dois tipos: a densidade real e a densidade aparente. Define-se densidade real, como sendo a relação entre a massa da partícula e o volume que esta ocupa por si mesma, sem levar em consideração os espaços vazios que porventura existam entre estas. Já a densidade aparente também é uma relação entre massa e volume do sólido, porém, o volume analisado engloba os poros (MOSHENIN, 1986).

A determinação da densidade real pode ser feita através da picnometria utilizando-se fluidos de alta tensão superficial, como por exemplo o mercúrio. Caso fossem usados fluidos de baixa tensão superficial como a água, o fluido seria absorvido pelo material, o que modificaria o resultado correto. No entanto, o uso do mercúrio traz a inconveniência de sua toxidez, além da possibilidade de as partículas flutuarem, caso estas sejam menos densas. Outro fato é a possibilidade do fluido picnométrico não penetrar nos vazios entre as partículas devido a sua alta tensão superficial. Assim optou-se por utilizar outro material para a determinação da densidade. O material escolhido foi a água destilada, que além de não possuir os inconvenientes já descritos, é de fácil obtenção e permite repetições com precisão.

O valor da densidade aparente tem sua importância no conhecimento das grandezas físicas de massa e volume em que o material se acomoda. Além disso, aliado ao valor da densidade real, é possível a obtenção da porosidade do material, que indica a relação entre o próprio material e vazios que o compõem.

Os índices físicos de diâmetro médio ou diâmetro equivalente e da esfericidade estabelecem uma relação entre as dimensões da partícula e uma esfera.

A esfericidade indica quão esférica é a partícula em questão. Possui valor variável entre 0 e 1, sendo que, a medida que o índice tende para 1, mais a forma da partícula se aproxima de uma esfera.

O diâmetro médio indica o valor correspondente ao diâmetro que uma esfera teria com volume igual ao volume da partícula do sólido.

3.2 PROPRIEDADES FLUIDODINÂMICAS

Por propriedades fluidodinâmicas entende-se o estudo que engloba o comportamento de partículas em meios fluidos (sistema bifásico sólido-gás), envolvendo correlações das grandezas físicas da própria partícula e das características do meio em que esta se encontra, principalmente no tocante ao fluxo do fluido e a perda de carga.

O índice de velocidade mínima de fluidização corresponde ao valor mínimo da velocidade do fluido para que ocorra a fluidização do material, ou seja, é o valor mínimo para que a massa de partículas mantenha-se suspensa.

No estudo fluidodinâmico, a Equação de Ergun descrita abaixo estabelece relações de grandezas da partícula e do sistema bifásico em que ela está inserida (KUNII e LEVENSPIEL, 1969):

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

Outras duas correlações podem ser feitas envolvendo a velocidade do ar, a porosidade do leito do sólido e a altura da coluna de material:

A primeira correlação é descrita abaixo (AKAPO, KHONG e SIMPSON, 1989):

$$v = A \cdot \varepsilon^n \quad (2)$$

A segunda correlação é dada pela expressão (DAVIES e RICHARDSON, 1966):

$$\frac{1}{H} = K_1 + K_2 \cdot v^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

Além de poder ser obtida pela equação de Ergun, a porosidade pode também ser calculada através das equações abaixo, que são as equações da definição de porosidade.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap} \cdot H_{inicial}}{\rho_{real} \cdot H_{leitura}} \quad (4)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}} \quad (5)$$

3.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

3.3.1 Condutividade térmica

Um gradiente de temperatura por unidade de comprimento, dT/dx , entre duas superfícies promove um fluxo de calor (q) por unidade de tempo (t), através de uma área (S). A proporcionalidade desta relação é chamada de condutividade térmica, denominada por k .

$$q = -k \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

A condutividade térmica é o fator proporcional de fluxo de calor em regime permanente, ou seja, 1ª Lei de Fourier para condução de calor. A condutividade térmica de materiais sólidos varia com a temperatura, o material e teor de umidade. Sendo os materiais biológicos não homogêneos, com variabilidade na sua estrutura celular, composição química e conteúdo de ar, é esperada uma variação na condutividade térmica destes materiais. No processamento térmico de uma massa de materiais sólidos semelhantes, como solo, fertilizantes, sementes de grãos, silagem e forragem, frutas e vegetais, algodão, fumo, etc., bem como materiais fluidos, tais como alimentos líquidos, deve-se analisar a transferência de calor dentro de condições de partículas sólidas unitárias ou uma condição de partículas múltiplas em uma determinada quantidade de material (MOHSENIN, 1980).

Valores numéricos da condutividade térmica podem variar de acordo com a composição química, estrutura física, estado, densidade, temperatura e teor de umidade do material.

3.3.1.1 Método de regime permanente (estado estacionário)

No método de estado estacionário, a temperatura constante é mantida em cada superfície da amostra teste. A razão constante de fluxo de calor, obtida após o equilíbrio, é medida para uma dada área de cruzamento seccional a um gradiente de temperatura. Aplicando-se a 1ª Lei de Fourier de transferência de calor, a condutividade média pode ser calculada. Devido a sua simplicidade, este foi um dos primeiros métodos a serem utilizados para materiais biológicos (FREIRE, 1981).

Entre as desvantagens do método, podem ser apontadas: a inaplicação para produtos com umidade superior a 10%; a grande extensão de tempo requerida; a ocorrência de perdas de calor, e a ocorrência de erros devido ao contato do material com a resistência, (KAZARIAN e HALL, 1965; FREIRE, 1981).

Todos os métodos clássicos baseiam-se na suposição de que as amostras do material são homogêneas e isotrópicas, de forma que quando um ponto da amostra é aquecido, o fluxo de calor é igual em todas as regiões. Obviamente, nos casos em que a amostra consiste de um número de partículas granulares, a condução de calor em certas direções é mais favorável que em outras e portanto a amostra não é um sistema isotrópico (OTTEN, 1974).

3.3.1.2 Método de regime transiente (estado não estacionário)

Os métodos de estado estacionário, devido a suas desvantagens, têm sido substituídos por métodos de regime transiente. Quando os materiais agrícolas são perecíveis, o uso deste método é adotado devido à grande vantagem de requerer menor tempo de teste em comparação ao outro (FREIRE, 1981). Algumas dificuldades são associadas a este método, tais como: medida da

temperatura, localização dos termopares, transferência de calor convectiva em medições de propriedades térmicas em materiais granulares.

Entre os métodos de regime transiente o método da fonte linear de aquecimento é um dos mais relatados para materiais granulares e consiste em aquecer a massa de grãos, inicialmente com temperatura uniforme, através de uma fonte linear de calor de potência constante colocada ao longo do eixo central (KAZARIAN e HALL, 1965; CHANG, 1986; PARK, MURR e SALVADEGO, 1997).

O procedimento usual consiste em se aplicar um fluxo de calor constante da fonte para o material, inicialmente em equilíbrio, e medir a elevação de temperatura em algum ponto do material. As técnicas aplicadas sobre estes métodos são menos complicadas e mais simples que para métodos de estado estacionário. A precisão entretanto, não é tão grande para amostras secas, se comparada com os métodos de estado estacionário. Como muitos materiais agrícolas sujeitos a processos térmicos contém uma certa quantidade de umidade e ainda se faz presente o problema de migração de umidade, o método de estado transiente tem maiores vantagens que desvantagens para seu uso (MOHSENIN, 1980).

De um ponto qualquer até a fonte linear, a elevação de temperatura de T_1 até T_2 pode ser expressa por:

$$T = \frac{q}{2\pi k} \int_{\beta}^{\infty} \frac{\exp(-\beta^2) d\beta}{\beta} \quad (7)$$

NIX et al. (1967) apresenta a seguinte série para avaliar a integral da equação (7):

$$T = \frac{q}{2\pi k} \left[\frac{-Ce}{2} - \ln\beta + \frac{\beta^2}{2.1!} - \frac{\beta^4}{4.2!} + \frac{\beta^6}{6.3!} - \dots \right] \quad (8)$$

Para pequenos valores de r , isto é, $\beta < 0.16$, os termos da série da equação 8 podem ser aproximados com menos que 1% de erro para a seguinte equação (INGERSOLL, ZOBEL e INGERSOLL, 1954):

$$T = \frac{q}{2\pi k} \left[\ln\left(\frac{1}{\beta}\right) - \frac{Ce}{2} \right] \quad (9)$$

Se a equação (9) for calculada em um ponto próximo a fonte linear e entre os tempos t_1 e t_2 , a mudança de temperatura será:

$$T_2 - T_1 = \frac{q}{4\pi k} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (10)$$

Portanto, se a temperatura, tempo e potência da fonte são conhecidas, a condutividade térmica pode ser calculada a partir desta equação.

Esta teoria baseia-se na relação entre a condutividade térmica e a elevação da temperatura em um meio infinito homogêneo devido a uma fonte linear de aquecimento de potência constante. A determinação das propriedades térmicas de partículas pequenas, como grãos, devido ao seu tamanho e forma irregular, é feita assumindo-se contornos regulares como os de um cubo, cilindro ou esfera. A razão para isto é facilitar a utilização das equações de transferência de calor derivadas destas formas especiais (SHARMA e THOMPSON, 1973; FREIRE, 1981).

3.3.2 Coeficiente convectivo

A transferência de calor por convecção envolve a troca de energia entre uma superfície e um fluido adjacente. Uma distinção deve ser feita entre convecção forçada, onde um fluido é deslocado com a ajuda de ventiladores ou bombas, e convecção natural ou livre, onde o fluido aquecido ou resfriado próximo à superfície do sólido causa a circulação devido à diferença de densidades (WELTY, WICKS e WILSON, 1984).

A equação para a transferência de calor por convecção foi primeiramente expressa por Newton em 1701, e é referida como a Lei de resfriamento (ou de aquecimento) de Newton:

$$\frac{q}{S} = h \cdot \Delta T \quad (11)$$

O coeficiente de transferência de calor convectivo (h) é na realidade uma função complexa do escoamento do fluido, das propriedades térmicas do meio fluido e da geometria do sistema, além da sua dependência em relação à temperatura.

Três parâmetros muito importantes no estudo da transferência de calor por convecção são:

- **Número de Prandtl:** que é a razão entre difusividade molecular de quantidade de movimento pela difusividade molecular de calor.

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad (12)$$

- **Número de Nusselt:** que é a razão entre a resistência térmica condutiva e a resistência térmica convectiva do fluido.

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \quad (13)$$

➤ **Número de Reynolds:** que expressa o comportamento do escoamento do fluido.

$$Re = \frac{d \cdot \rho \cdot v}{\mu} \quad (14)$$

3.3.2.1 Agregado de partículas

KEEY (1992) definiu os seguintes parâmetros:

$$Nu_p = \frac{h \cdot d_p}{k_{ar}} \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (15)$$

$$Re_p = \frac{U_\infty \cdot L}{\nu} = \frac{(\rho_{ar} \cdot \dot{V}_{ar}) \cdot d_p}{\mu \cdot S \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{\dot{G}_s \cdot d_p}{\mu \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (16)$$

Utilizando destas definições para Nu_p e Re_p , WHITAKER (1972) correlacionou vários dados de transferência de calor de trabalhos de diversos pesquisadores em arranjos randômicos de esferas, cilindros e colunas de recheio comerciais da seguinte forma:

$$Nu_p = \left(0,5 \cdot Re_p^{1/2} + 0,2 \cdot Re_p^{2/3} \right) \cdot Pr^{1/3} \quad (17)$$

3.3.2.2 Regime transiente

Em processos transientes, nos quais a temperatura em um dado ponto varia com o tempo, a transferência de energia é diretamente relacionada com o gradiente de temperatura envolvendo um estado não estacionário de fluxo de energia (WELTY, WICKS e WILSON, 1969).

O modelo mais simples de processos de dependência do tempo é encontrado quando um corpo de condutividade térmica relativamente alta é submetido a uma variação brusca de

temperatura de suas redondezas. Se a condutividade térmica é alta, a resistência interna para a transferência de energia pode ser assumida como desprezível.

Considerando um objeto, inicialmente a uma temperatura uniforme T_0 , sujeito a um ambiente com uma temperatura T_∞ , onde $T_\infty > T_0$. A taxa de energia ganha do ambiente para um tempo $t > 0$ é dado por:

$$q = h \cdot S \cdot (T_\infty - T) \quad (18)$$

Desde que não haja resistência interna, esta temperatura será uniforme através do corpo.

O acúmulo de energia dentro do corpo é expresso como:

$$q = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} \quad (19)$$

Estas duas equações podem ser igualadas para resultar na equação diferencial geral para transiente Newtoniano:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h \cdot S \cdot (T_\infty - T)}{\rho \cdot C_p \cdot V} \quad (20)$$

Resolvendo esta equação para $T = T_0$ em $t = 0$:

$$T^* = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \exp\left(\frac{-h \cdot S \cdot t}{\rho \cdot C_p \cdot V}\right) \quad (21)$$

Para relacionar as resistências térmicas, o número de Biot pode ser definido:

$$Bi = \frac{h \cdot r_p}{k} \quad (22)$$

Que é a razão entre resistência interna condutiva para a transferência de calor e a resistência externa convectiva para a transferência de calor. Um valor grande de Bi indica que a resistência interna controla o processo e um valor pequeno indica que a resistência externa controla o processo. (WELTY, WICKS e WILSON, 1984). Para valores de Biot menores que 0,1 pode-se assumir que a resistência interna é desprezível.

3.4 CONTEÚDO DE UMIDADE

O conteúdo de umidade de um produto é a proporção direta entre a massa de água presente no material e a massa de matéria seca. O conteúdo de umidade é a quantidade de água, que pode ser removida do material sem alteração da estrutura molecular do sólido, e pode ser expressa de duas maneiras:

- Base Seca (Umidade_{bs}) – Em relação à massa seca do produto.

$$\text{Umidade}_{bs} = \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{final}} - P_{\text{tara}}} \quad (23)$$

- Base Úmida (Umidade_{bu}) - Em relação à massa total do produto.

$$\text{Umidade}_{bu} (\%) = 100 \cdot \frac{P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}}}{P_{\text{inicial}} - P_{\text{tara}}} \quad (24)$$

Os métodos de determinação de umidade podem ser classificados em diretos e indiretos (WEBER, 1995). Nos métodos diretos, a umidade de uma amostra é removida e a determinação é feita pela pesagem. Nos métodos indiretos, as determinações são feitas mensurando características físicas do material relacionadas ao teor de umidade. Por exemplo, medidores de

umidade que medem a resistência elétrica do produto e a relaciona com o teor de umidade do produto. Os métodos indiretos devem ser calibrados por um método direto oficial.

A determinação da umidade dos grãos (deterioráveis) pelo método de estufa é baseado na secagem de uma massa conhecida de grãos, calculando-se o teor de umidade mensurando a massa de água perdida no processo. (ASAE, 1991)

Para frutas e hortaliças (perecíveis) utilizam-se estufas à vácuo. A alta temperatura acelera uma série de reações químicas nas frutas e hortaliças que podem alterar a massa seca do produto, ou, que podem reter a umidade no produto, mascarando o conteúdo de umidade no produto. (AOAC, 1990)

3.5 ATIVIDADE DE ÁGUA

A água é um dos mais importantes componentes dos alimentos, afetando todas as suas propriedades físicas. A forma como a água afeta a natureza física e as propriedades dos alimentos é complicada devido à interação entre a água e o meio, o que envolve a estrutura física bem como a composição química dos diversos solutos incluindo polímeros e colóides ou partículas dispersas.

É possível estabelecer uma relação estreita entre o teor de água livre no alimento e sua conservação. O teor de água livre é expresso pela atividade de água (a_w) que é dada pela relação entre a pressão de vapor de água em equilíbrio sobre o alimento, e a pressão de vapor de água pura, à mesma temperatura (MOHSENIN, 1986). A atividade de água também pode ser entendida como a umidade relativa em equilíbrio com o produto na temperatura considerada.

$$a_w = y \cdot \frac{P_{wa}}{P_w} = \frac{\%UR}{100} \quad (25)$$

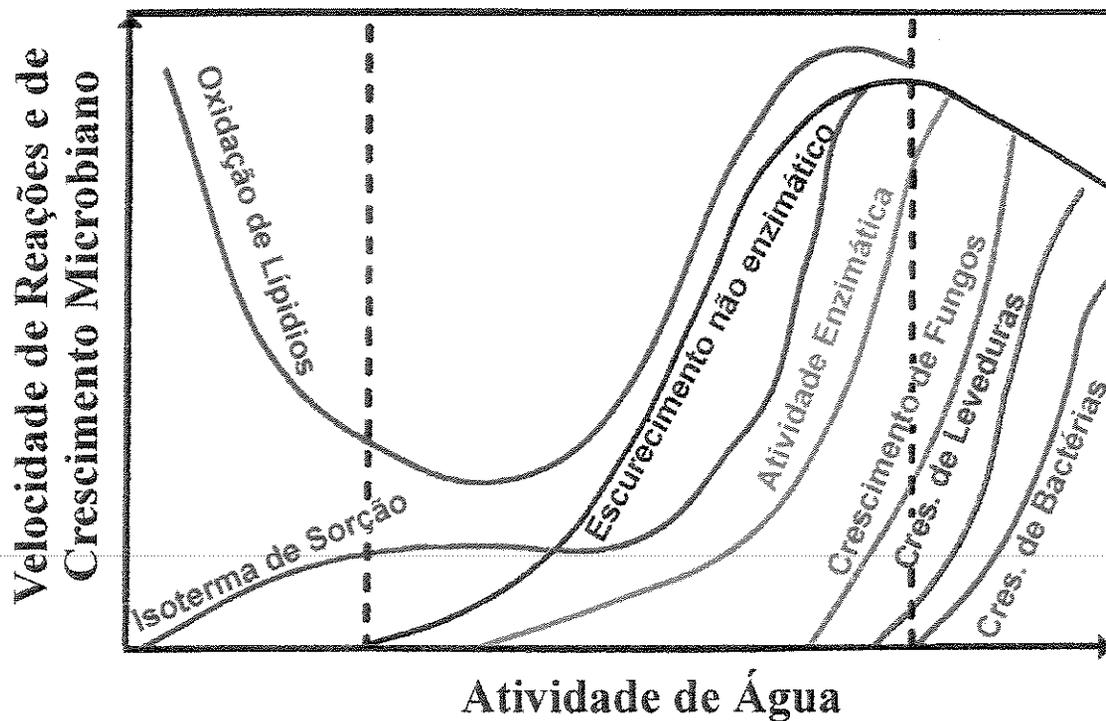
O estudo da curva de sorção fornece informações relevantes para adequação dos parâmetros de secagem. A determinação da atividade de água é uma das medidas mais importantes no processamento e na análise dos materiais biológicos, devido a sua importância no que diz respeito à qualidade e estabilidade. A afinidade existente entre a água e os outros componentes de um produto definem sua higroscopicidade que é muito marcante nos produtos e torna-se uma característica fundamental a influenciar os processos de manuseio, estocagem e consumo de materiais biológicos (TEIXEIRA NETO e QUAST, 1977).

De acordo com POMMERANZ (1985), a pressão exercida pela água livre dos materiais biológicos é próxima da pressão normal da água. O grau de abaixamento da pressão da água livre é relatada pela lei de Raoult:

$$X_s = \frac{n_s}{n_s + n_w} \quad (26)$$

$$X_w = 1 - X_s \quad (27)$$

O valor máximo de atividade de água é 1, para a água pura. Nos alimentos ricos em água (a_w acima de 0,90) podem formar soluções diluídas com os alimentos, servindo de substrato para reações químicas e desenvolvimento microbiano. Quando a a_w baixa entre 0,40 e 0,80 há uma aceleração das reações químicas pelo aumento da concentração dos substratos. Próximo a 0,60, cessa a atividade microbiana e para a_w inferior a 0,30 atinge-se a zona de adsorção primária, conforme indica a Figura 1.



Fonte: LABUZA (1968)

Figura 1: Velocidade relativa de reações em função da a atividade de água.

3.6 ISOTERMAS DE SORÇÃO

O estudo da atividade de água pode ser feito através das isotermas de sorção. Uma isoterma é uma curva que descreve, em uma umidade específica, a relação de equilíbrio de uma quantidade de água sorvida por componentes do material biológico e a pressão de vapor ou umidade relativa, a uma dada temperatura. Esta relação depende da composição química dos alimentos (gordura, amido, açúcar, proteínas, etc.).

Uma isoterma de sorção pode ser obtida em duas direções: a isoterma de adsorção é obtida quando um material completamente seco é colocado em ambientes com diversos incrementos de

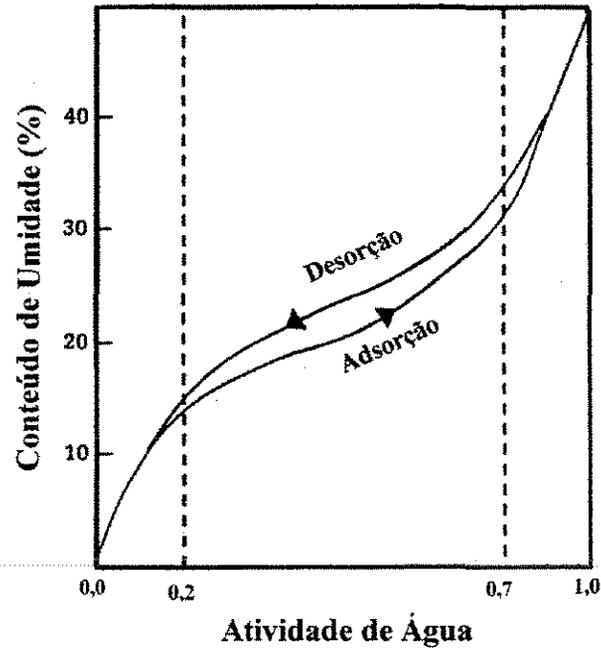
umidade relativa e são medidos os ganhos de peso do material devido à entrada de água; a isoterma de dessorção é obtida quando o material inicialmente úmido é colocado sob diversas condições ambientais sendo medidas as perdas de peso do material, devido a saída de água.

As isotermas de sorção podem ser divididas em três regiões, onde cada uma representa um mecanismo de sorção diferente. A primeira região está entre 0 e 35% de atividade de água, representa a adsorção na primeira camada de água ligada à superfície do material biológico. A energia de ligação depende da estrutura física da superfície, sua composição e propriedades da água. A segunda região localiza-se entre 35 e 60% de atividade de água, representa a adsorção nas camadas adicionais e é uma região de inflexão onde outras moléculas de água estão depositadas sobre a primeira camada. A mobilidade da água é restrita devido a forças atrativas com fase sólida. A terceira região representa a água condensada nos capilares do material seguida pela dissolução de materiais solúveis presentes (LOMAURO, BAKSHI e LABUZA, 1985 - b).

Os métodos experimentais utilizados para obtenção de curvas de sorção de materiais sólidos foram classificados por GÁL (1975).

Inúmeros gráficos de isotermas de materiais biológicos foram apresentados por IGLESIAS e CHIRIFE (1982). Através do método estático com soluções aquosas de ácido sulfúrico e soluções saturadas de sais, TEIXEIRA NETO e QUAST (1977) determinaram as isotermas de adsorção para 40 materiais biológicos.

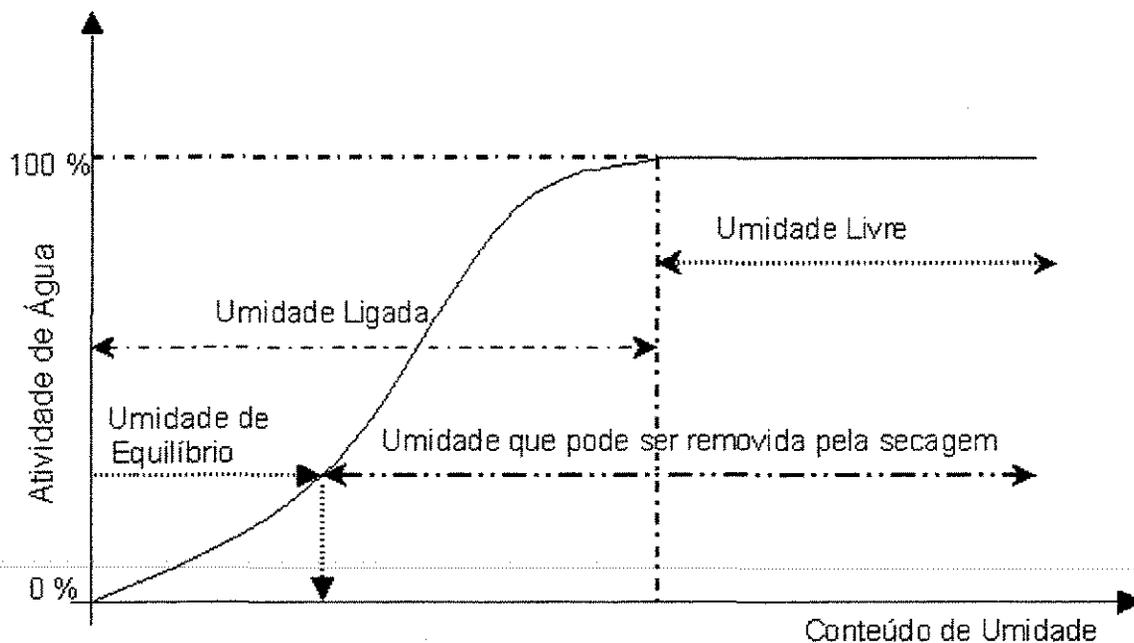
Para um produto, há uma diferença entre as isotermas de sorção quando determinadas durante a hidratação (adsorção) e quando determinadas durante a desidratação (dessorção). A esta diferença dá-se o nome de histerese (Figura 2):



Fonte: PARK e NOGUEIRA (1992)

Figura 2: Histerese das isotermas de sorção.

A diferença do conteúdo de umidade do material e do conteúdo de umidade de equilíbrio representa a força motriz para a secagem. A Figura 3 mostra a retenção de umidade em função de conteúdo de umidade *versus* atividade de água.



Fonte: PARK e NOGUEIRA (1992)

Figura 3: Retenção de umidade.

3.7 MODELOS DE ISOTERMAS

Pela facilidade de quantificação da isoterma, existem muitas equações empíricas que correlacionam os dados experimentais das isotermas de sorção de materiais biológicos. Para o caso das isotermas de grãos, as equações usuais são os polinômios de variados graus, sendo que para a maioria das isotermas, os polinômios de segundo grau têm demonstrado bons resultados (ALONSO, 1998).

Apesar das dificuldades apresentadas pelas equações teóricas, algumas considerações termodinâmicas são indispensáveis. Uma das importantes aplicações das equações de isotermas é a energia de ligação de água que é traduzida na energia de adsorção. A outra importante consideração é acerca dos valores de monocamada molecular de água, que indicam a relação

com as reações químicas que determinam a deterioração dos materiais biológicos, através das áreas expostas da matriz sólida.

Com o intuito de prever o comportamento das isotermas, diversos autores propuseram modelos de ajuste de isotermas de sorção. Estes modelos são úteis no conhecimento das características dos produto. Em sua maioria são modelos empíricos e serão discutidos a seguir.

3.7.1 Modelo de LANGMUIR

Termodinamicamente falando, a posição simplista ao considerar a condição de equilíbrio aplicada à água livre fornece a taxa de evaporação idêntica à taxa de condensação. Baseada nesta premissa, LANGMUIR (1918) propõe a equação:

$$\frac{X_{eq}}{X_m} = \frac{C \cdot a_w}{1 + C \cdot a_w} \quad (28)$$

3.7.2 Modelo de BET (Brunauer, Emmet e Teller)

Tecendo considerações da natureza química da umidade e ampliando o conceito de Langmuir, Brunauer, Emmet e Teller (BET) propõem, para camadas polimoleculares (PARK e NOGUEIRA, 1992):

$$X_{eq} = \frac{(X_m \cdot C \cdot a_w) \cdot (1 - (n+1) \cdot a_w^n + n \cdot a_w^{n+1})}{(1 - a_w) \cdot (1 + (C-1) \cdot a_w - C \cdot a_w^{n+1})} \quad (29)$$

Esta equação tem dois importantes casos especiais:

- Quando $n = 1$, ela fica reduzida à equação de Langmuir;
- Quando n tende a infinito, ela se reduz à equação de BET linearizada.

3.7.3 Modelo de BET linearizado

O modelo de BET linearizado (BRUNAUER, EMMET e TELLER, 1938) se baseia na suposição de que a água se adsorve em forma de camadas; a primeira se fixa por adsorção sobre pontos uniformemente localizados e as camadas seguintes se fixam entre si mediante pontes de hidrogênio. A equação geral da isoterma de BET, quando o número de camadas tende a um número infinito, pode ser escrita na seguinte forma:

$$\frac{a_w}{(1 - a_w) \cdot X_{eq}} = \frac{1}{X_m \cdot C} + \frac{a_w \cdot (C - 1)}{X_m \cdot C} \quad (30)$$

3.7.4 Modelo de GAB (Guggenheim, Anderson e de Boer)

Guggenheim, Anderson e de Boer estenderam as teorias de adsorção física de BET, resultando numa equação tripamétrica, que permite um melhor ajuste dos dados de sorção dos alimentos até a atividade de água de 0,9. A equação de GAB é escrita como (Van den BERG, 1984):

$$X_{eq} = \frac{X_m \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w) \cdot (1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)} \quad (31)$$

$$C = C_0 \exp\left(\frac{\Delta H_c}{RT}\right) \quad (32)$$

$$K = K_0 \exp\left(\frac{\Delta H_k}{RT}\right) \quad (33)$$

$$\Delta H_c = H_m - H_n \quad (34)$$

$$\Delta H_k = H_l - H_n \quad (35)$$

Onde C e K são constantes de adsorção relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subseqüentes, num dado sítio de sorção. Quando $K = 1$, a equação de GAB fica reduzida à equação de BET linearizada.

PARK e NOGUEIRA (1992) mostraram a conceituação do modelo de BET, concluindo que por apresentar três parâmetros a serem estimados (X_m , C e n) e sendo uma equação polinomial de grau maior que 2, dependendo do valor numérico de n estimado, o modelo de BET na sua forma original apresenta uma maior possibilidade de ajuste dos dados experimentais.

3.7.5 Modelo de HALSEY

HALSEY (1948) desenvolveu um modelo para a condensação das camadas a uma distância relativamente grande da superfície.

$$a_w = \exp\left(\frac{-A}{X_{eq} B}\right) \quad (36)$$

3.7.6 Modelo de OSWIN

O modelo baseia-se na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal. Apresenta algumas vantagens sobre os modelos cinéticos de BET e GAB: apenas duas constantes de fácil linearização. É um modelo empírico, definido como (CHINNAN e BEAUCHAT, 1985):

$$X_{eq} = A \cdot \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B \quad (37)$$

3.7.7 Modelo de PELEG

Modelo empírico de quatro parâmetros, tenta conjugar duas tendências em uma equação PELEG (1993).

$$X_{eq} = k_1 \cdot a_w^{n_1} + k_2 \cdot a_w^{n_2} \quad (38)$$

A restrição para esta equação é que $n_1 < 1$ e $n_2 > 1$.

WANG e BRENNAN (1991) determinaram experimentalmente dados de umidade de equilíbrio de absorção e dessorção de batata para quatro temperaturas; além dos modelos de BET e GAB, foram também utilizados os modelos de HALSEY e OSWIN para ajustar estes dados e avaliar as constantes destas equações matemáticas.

LOMAURO, BAKSHI e LABUZA (1985 - a) avaliaram 163 dados da literatura de isotermas de frutas, vegetais, produtos cárneos, condimentos, leite, café, oleaginosas, etc., utilizando três equações de dois parâmetros e uma equação de três parâmetros. Observaram que a

equação de três parâmetros, denominada equação de GAB, apresentou melhor ajuste de dados das isotermas do que as equações de dois parâmetros (Halsey, Oswin, Iglesias e Chirife).

Diferentes métodos estatísticos de obtenção dos parâmetros de BET utilizando dados de isotermas de batata foram analisados por TOUPIN, Le MAUGER e McGREGOR (1983). Eles concluíram que o método ponderado de regressão não linear, obtido pelo procedimento dos mínimos quadrados, apresentou resultados mais confiáveis devendo-se evitar a regressão linear para estimar os parâmetros.

MAROULIS et al. (1988) fizeram um ajuste de isotermas de adsorção de uva-passa, damasco, figos e ameixas secas com o modelo de GAB, concluindo que o método de regressão influencia os resultados do modelo e recomendou o uso da regressão não linear para estimar os parâmetros com melhor precisão.

A umidade de equilíbrio para a cenoura foi determinada por KIRANOUDIS et al. (1993) para três temperaturas (30, 45 e 60°C) e de 10 a 90% de atividade de água. A equação de GAB foi utilizada como modelo.

Os resultados estão mostrados na Tabela 1:

Tabela 1: Parâmetros estimados da equação de GAB para a cenoura.

Parâmetro	Valor
X_m (% base seca)	21,2
C_o ($\times 10^5$)	5,94
ΔH_c (kJ/mol)	28,9
k_0 ($\times 10^2$)	8,03
ΔH_k (kJ/mol)	5,49

Fonte: KIRANOUDIS et al. (1993)

LOMAURO, BAKSHI e LABUZA (1985 - a) também determinaram as equações de isotermas de sorção para várias frutas, vegetais e produtos de carne. As equações utilizadas foram as de Halsey, Oswin e GAB. Todos os parâmetros foram determinados utilizando apenas uma temperatura, que no caso da cenoura foi de 37°C. Os parâmetros da equação de Halsey para dessorção foram os seguintes: $A = 0,0965$ e $B = 0,8955$.

3.8 SECAGEM

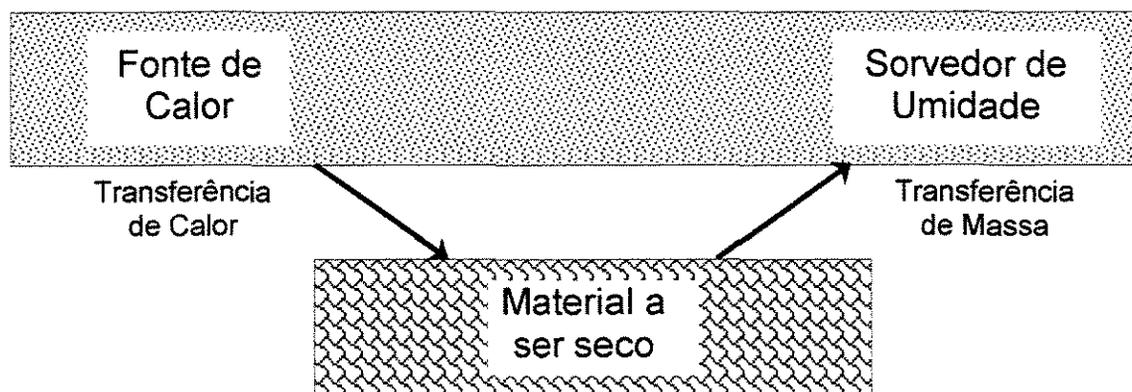
Segundo KEEY (1972), a secagem durante muitos séculos foi realizada com métodos totalmente sem técnica. Durante a Revolução Industrial na França foi descrita uma das primeiras técnicas de secagem de papel em folhas em uma sala com circulação de ar. Um século depois, outra técnica foi descrita em Londres na “Grande Exibição”, também para a secagem de papel em cilindros aquecidos. Leite consolidado e vegetais também eram secos através de um pequeno aquecimento. Fornos simples eram usados para a secagem de amido e porções de sal.

A partir daí uma série de novos métodos de secagem foi surgindo, devido à crescente necessidade de métodos mais eficientes e rápidos. Apesar desta evolução na arte da secagem, métodos complexos de secagem começaram a ser propostos só no fim do século passado, como, por exemplo, patentes de secador à radiação térmica e secador a vácuo. Estas inovações foram gradualmente sendo proliferadas e incorporadas pela indústria.

KEEY (1972) define a secagem como sendo a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido. A água presente no sólido é chamada de umidade.

Em seu outro livro, KEEY (1978) afirma que esta definição de secagem exclui a concentração de uma solução e a remoção mecânica de água por filtragem ou centrifugação. Exclui também métodos térmicos relacionados à destilação, tais como a desidratação azeotrópica de alguns líquidos orgânicos. Esta definição, contudo, nos leva a uma grande variedade de tipos de equipamentos, abrangendo desde simples fornos a grandes câmaras em que soluções de sólidos são vaporizadas contra uma corrente de ar quente formando um produto seco.

Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor d'água, formado a partir da superfície do material a ser seco, conforme indica a Figura 4 (PARK, 1998).



Fonte: ALONSO (1998)

Figura 4: Diagrama do processo de secagem.

É este processo de fornecimento de calor da fonte quente para o material úmido que promoverá a evaporação da água do material e em seguida a transferência de massa arrastará o vapor formado.

Do ponto de vista de fornecimento de calor, os mecanismos básicos de transferência de calor empregados indicam os possíveis equipamentos necessários. A retirada do vapor de água formado na superfície do material é analisada do ponto de vista de movimento do fluido (mecânica dos fluidos), indicando também os possíveis equipamentos para esta finalidade (PARK, 1987).

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

- Transferência de energia (comumente calor) do ambiente para evaporar a umidade superficial. Esta transferência depende de condições externas de temperatura, umidade do ar, fluxo e direção de ar, área de exposição do sólido (forma física) e pressão.
- Transferência de massa (umidade), do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo. O movimento interno da umidade no material sólido é função da natureza física do sólido, sua temperatura e conteúdo de umidade.

Os mecanismos de transferência interna de massa, durante a secagem de materiais biológicos, podem ser influenciados por dois fenômenos colaterais durante a secagem (PARK, 1998):

- Existência da contribuição do soluto durante a secagem. Por exemplo, o soluto como açúcar da ameixa encontra-se depositado na superfície durante a secagem, formando uma crosta que diminui a velocidade de secagem. Outro exemplo é uma experiência com a beterraba açucareira mostrando que a mesma seca mais rapidamente quando é desaçucarada antes da secagem.

- Os produtos biológicos são células vivas exibindo, portanto, um comportamento específico onde a célula é distendida pelo líquido contido nele e, em consequência, a parede celular é submetida à tensão e o líquido contido nela é submetido a compressão. Este fenômeno é conhecido como "turgor". Conforme procede a secagem, com a retirada de água, a pressão que o líquido exerce contra a parede celular diminui. Os fenômenos associados a esta diminuição de pressão são tratados como consequência do encolhimento do material. O fenômeno de encolhimento do material não causaria muito problema durante a secagem se não fossem os efeitos colaterais que os mesmos causam no material. Conforme o material encolhe durante a secagem, a superfície do material endurece (*case hardening*) por sofrer o impacto da secagem primeiramente, sendo assim o material deforma-se e fissa-se. Um exemplo seria a fissura durante a secagem do macarrão. Outro exemplo seria a fissura de arroz durante a secagem.

3.9 MECANISMOS DE MIGRAÇÃO DE UMIDADE

As considerações sobre como a água é transportada do interior do sólido à superfície fundamentam as teorias existentes na secagem (PARK, 1998).

O movimento de água do interior do material até a superfície é analisado pelos mecanismos de transferência de massa, que indicarão a dificuldade de secagem dos materiais. Durante a secagem, para que haja a evaporação de água da superfície do material ao ambiente, a água deve ser transportada do interior do sólido até a superfície. Representando em diagrama no interior do sólido, tem-se (Figura 5):



Fonte: ALONSO (1998)

Figura 5: Diagrama da migração de umidade no interior de um sólido.

Os mecanismos mais importantes são:

- Difusão líquida: ocorre devido à existência do gradiente de concentração;
- Difusão de vapor: ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura;
- Escoamento de líquido e de vapor: ocorrem devido à diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e alta temperatura.

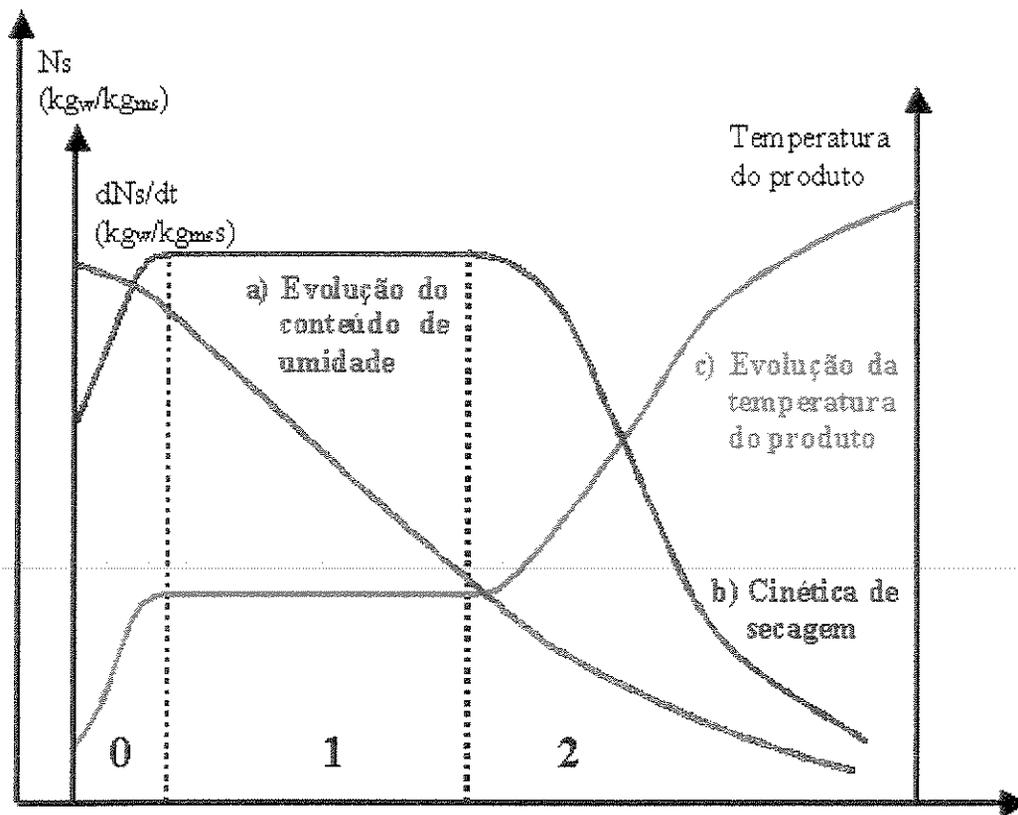
Todas estas considerações, tais como, conteúdo inicial de umidade do material, conteúdo final de umidade a que o material pode chegar (umidade de equilíbrio), como a água está relacionada com a estrutura do sólido e como o transporte da água é feito do interior à superfície do sólido durante a secagem, servem para fundamentar o fenômeno de secagem.

No entanto estamos longe de estabelecer uma única relação teórica que possibilite generalizações para tratamentos na secagem.

3.10 CURVAS DE SECAGEM

Os produtos biológicos são muito diferentes entre si, devido a sua forma, estrutura, composição e suas dimensões, além das condições de secagem serem muito diversas, de acordo com as propriedades do ar de secagem e a forma como se faz o contato ar-produto. Uma vez que o produto é colocado em contato com o ar quente, ocorre uma transferência do calor do ar ao produto sob o efeito da diferença de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de vapor para o ar. Uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água e a outra para elevar a temperatura do material (DAUDIN, 1983).

A evolução destas transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida esquematicamente em três períodos, mostrados na Figura 6, onde são apresentadas as curvas de evolução do teor de água do produto (N_s), de sua temperatura (T_s) e da velocidade de secagem (dN_s/dt), também chamada de cinética de secagem, ao longo do tempo, para um experimento utilizando ar de propriedades constantes (Figura 6).



Fonte: ALONSO (1998)

Figura 6: Curva de secagem exemplo.

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (umidade do produto, N_s , em base seca, em relação à evolução do tempo de secagem, t). É a curva obtida pesando o produto a cada intervalo de tempo pré-fixado durante a secagem sob determinadas condições.

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

Descrevendo os três períodos têm-se (DAUDIN, 1983):

Período 0 : Período de indução ou período de se entrar em regime operacional.

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

Período 1 : Período de taxa constante de secagem.

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

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

É bom ressaltar que para os materiais biológicos é difícil a existência deste período, pois as condições operacionais de secagem são tais que as resistências às transferências de massa encontram-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da

superfície ao ambiente seja bem superior à taxa de reposição de umidade do interior à superfície do material.

Período 2 : Período de taxa decrescente de secagem.

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

Apesar de alguns autores definirem o valor de teor de água do produto no ponto de transição entre os períodos 1 e 2 como sendo o teor de água crítico ($N_{s,cr}$), seria conveniente denominar este ponto como o ponto de inflexão de taxa constante à taxa decrescente de secagem, pois este ponto, longe de ser uma propriedade física do material, é um ponto que depende inclusive das condições operacionais de secagem.

Durante este período, a troca de calor não é mais compensada; conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Por todo este período o fator limitante é a migração interna de água. Esta redução da taxa (ou velocidade) de secagem é, às vezes, interpretada como uma diminuição da superfície molhada no período 2, mas a interpretação mais freqüente é pelo abaixamento da pressão parcial de vapor de água na superfície. No final deste período o produto estará em equilíbrio com o ar ($N_s = N_{s,eq}$) e a velocidade de secagem é nula.

Na secagem da maioria dos produtos biológicos, somente o período de secagem à taxa decrescente (período 2) está presente. SHERWOOD (1929 a e b), descrevendo a secagem do pescado, observou que o período 1 é muito mais curto do que aquele indicado para a categoria. SARAVACOS e CHARM (1962) e FORNELL, BIMBENET e ALMIN (1980) indicavam

também, curtos períodos 1 para os produtos alimentares, com a temperatura do produto evoluindo de sua temperatura inicial até a temperatura do ar, sem estabilizar na temperatura de bulbo úmido.

O período de secagem à taxa decrescente é, às vezes, dividido em dois ou três outros períodos. Entretanto para os produtos agrícolas e alimentares é bem difícil indicar com clareza as divisões nas curvas experimentais de secagem.

De acordo com STRUMILLO e KUDRA (1986) o período de taxa decrescente pode ser ainda dividido em duas fases:

- Primeira fase: a água livre (fase líquida) presente no interior do produto é contínua, sem a presença de ar, e ocupa todos os poros do produto. O movimento de água do interior para a superfície ocorre por capilaridade e este mecanismo controla a velocidade de secagem.
- Segunda fase: a remoção de água da superfície de evaporação provoca a entrada de ar no interior do produto o que dá origem a bolsas de ar que ficam dispersas na fase líquida dentro dos poros. Nesta fase o escoamento capilar ocorre apenas em alguns pontos localizados.

No decorrer do período de secagem à taxa decrescente (a única geralmente observada pelos produtos biológicos), é a migração interna da água que fixa a cinética de secagem. Os diferentes mecanismos que governam o movimento da água são: o movimento de água líquida sob efeito das forças de gravidade (desprezível na secagem de produtos biológicos); a migração capilar da água líquida sob a ação da tensão superficial; a difusão de água líquida sob o efeito de um gradiente de umidade segundo a Lei de Fick; a difusão de água líquida adsorvida sobre as superfícies internas dos poros vazios (somente para teores de água muito fracos); a difusão de vapor sob o efeito de um gradiente de pressão parcial de vapor de água; o escoamento de água

sob o efeito de uma diferença de pressão total entre o interior e o exterior de produtos alimentícios, e a migração de água líquida ou vapor sob o efeito de um gradiente de temperatura (PARK, 1998).

Estas transferências internas de massa são influenciadas por dois fenômenos particularmente importantes para os produtos biológicos: a migração dos solutos e a deformação do produto.

3.11 CINÉTICAS DE SECAGEM

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

3.11.1 Período à taxa decrescente de secagem

Este período é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios. A complexidade dos fenômenos da secagem conduz os pesquisadores a proporem numerosas teorias e múltiplas fórmulas empíricas para predizerem a taxa de secagem.

De acordo com CHIRIFE (1981), os principais mecanismos de transporte durante o período de taxa decrescente são: difusão líquida, escoamento capilar e difusão de vapor. Segundo KING (1968) a difusão de vapor é o mecanismo predominante durante a segunda fase deste período.

Migração de água por difusão

Esta teoria se apoia exclusivamente sobre a lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. Utilizando a lei de Fick, na equação de balanço de massa de água no interior do produto, vem:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \cdot \nabla X) \quad (39)$$

Esta forma de Fick é simplificada, já que ela despreza a interdifusão, mas esta hipótese é justificada, uma vez que a água migra dentro de uma matriz fixa.

Independentemente dos trabalhos sobre secagem, CRANK (1975) calculou um grande número de soluções da equação de difusão para condições iniciais e de contorno variadas. Entretanto, estas soluções se aplicam aos sólidos de formas geométricas simples (corpos semi-infinitos; placas, cilindros e esferas) e quando a difusividade é constante ou varia linearmente ou exponencialmente com a concentração de água. Para o caso de secagem em sistemas de coordenadas cartesianas, com direção unidirecional em uma placa de espessura $2L$:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (40)$$

A equação 40 com as seguintes condições iniciais e de contorno:

$t = 0$	$0 < z < L$	$X = X_0$
$t > 0$	$z = 0$	$\frac{\partial X}{\partial z} = 0$
$t > 0$	$z = L$	$X = X_{eq}$

E aplicando:

$$\bar{X} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L X(z, t) dz$$

Torna-se:

$$W_{\text{uni}} = \frac{\bar{X} - X_{\text{eq}}}{X_o - X_{\text{eq}}} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{ef}} \frac{t}{4L^2}\right] \quad (41)$$

Para três dimensões:

$$W_{\text{três}} = W_{\text{uni}}^3 = \left\{ \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 D_{\text{ef}} \frac{t}{4L^2}\right] \right\}^3 \quad (42)$$

Este modelo tem sido aplicado para ajustar dados de secagem de vários materiais biológicos. (SARAVACOS e CHARM, 1962; LABUZA e SIMON, 1970; KARATHANOS, VILLALOBOS e SARAVACOS, 1990; PARK, ALONSO e GODOI, 1996 e outros).

Algumas hipóteses têm de ser observadas para a aplicação deste modelo:

1. A difusividade de água é considerada constante;
2. O produto é considerado homogêneo;
3. As dimensões do produto permanecem constantes ao longo do tempo;
4. O movimento da água resulta de um gradiente do conteúdo de umidade na partícula;
5. A superfície do produto entra em equilíbrio imediatamente com o ar de secagem;
6. O conteúdo de umidade limite é o conteúdo de umidade de equilíbrio do produto.

O coeficiente de difusão (D_{ef}) é uma difusividade efetiva, que engloba os efeitos de todos os fenômenos podendo intervir sobre a migração da água, e seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais. A solução da equação de difusão utilizada é uma das mais simples e parece ser a principal razão de seu emprego.

A aplicação deste conceito é atribuída aos pesquisadores LEWIS (1921) e SHERWOOD (1929 a e b).

Para situações nas quais o coeficiente de difusão é dependente da concentração, Schober e Thijssen, citados por RIZVI (1986), desenvolveram um método de regime regular para cálculo da taxa de secagem. O período de regime regular foi definido como o tempo durante o processo de difusão transiente, no qual as mudanças de concentração com o tempo são tomadas em conta e o efeito da condição inicial sobre o processo é desprezado. Para aplicação deste método torna-se necessário o conhecimento da curva de regime regular para concentração da superfície constante e para a temperatura desejada.

Segundo RIZVI (1986), Bruin e Luyben utilizando este método calcularam com razoável precisão as curvas de secagem de diversos alimentos líquidos e sólidos.

Este método é baseado na suposição de que a transferência de calor possa ser desprezada e a secagem possa ser tratada como uma difusão puramente controlada pelo fenômeno de transferência de massa. Isto foi baseado em vários estudos experimentais que indicaram a existência de pequenos gradientes de temperaturas dentro dos alimentos durante o processo de secagem (CHIRIFE, 1981; SARAVACOS e CHARM, 1962; VACCAREZZA, LOMBARDI e CHIRIFE, 1974).

3.11.2 Modelo de Page

Page (apud: CHINNAN, 1984), propôs a seguinte equação para a descrever a secagem de milho. Posteriormente outros autores ampliaram seu uso para outros produtos.

$$W_{\text{Page}} = \frac{\bar{X} - X_{\text{eq}}}{X_0 - X_{\text{eq}}} = \exp(-G \cdot t^J) \quad (43)$$

Utilizando um forno de microondas com circulação de ar, PRABHANJAN, RAMASWAMY e RAGHAVAN (1995), estudaram a secagem de cenoura cortada em cubos de 12mm de aresta, conteúdo inicial de umidade de 87% e duas temperaturas de secagem (45 e 60°C). A umidade final foi determinada em uma estufa a vácuo a 70°C, por 24 horas. O conteúdo de umidade de equilíbrio utilizado foi de 4,9% em base seca, para ambas as temperaturas de 45 e 60°C (sem controle da umidade relativa). A equação empírica de Page foi utilizada como modelo.

Os parâmetros encontrados de acordo com o nível da potência do forno de microondas estão mostrados na Tabela 2 (onde t é em minutos):

Tabela 2: Parâmetros da equação de Page para a cenoura.

Condições de secagem		Parâmetros da equação de Page	
Temperatura do ar de entrada	Nível de Potência do microondas	j	G
45°C	0	0,6966	0,0382
	2	0,8985	0,0351
	4	0,9954	0,0475
60°C	0	0,7799	0,0438
	2	0,9545	0,0421
	4	1,0993	0,0433

Fonte: PRABHANJAN, RAMASWAMY e RAGHAVAN (1995)

3.11.3 Secagem da cenoura

Utilizando a cenoura como uma planta que representa muito bem toda a gama dos tubérculos, PAN et al. (1997 - a) realizaram uma série de experimentos de secagem da cenoura cortada em cubos em um secador vibro-fluidizado. As amostras foram cortadas em cubos de 12mm de aresta e em retângulos de 12mm de largura e 3, 6 e 9mm de altura. A umidade inicial foi determinada em uma estufa a ar forçado a 105°C por 48 horas, obtendo umidades com variação de 9 a 10,5 kg/kg em base seca.

DOMAGALA, WITULSKA e JANUS (1996) estudaram a cinética de secagem da cenoura em um secador industrial de cinco camadas de esteiras. A cenoura foi cortada em cubos de 10 e 14mm de aresta e em fatias de 3mm de espessura e diâmetro variando de 18,4 a 41,5mm. O conteúdo de massa seca inicial variou de 9,7 a 9,8%. O conteúdo médio de carotenóides foi de

135 mg/100 g de massa seca. Os resultados obtidos para uma temperatura do ar de secagem de 90°C, foram os seguintes:

Tabela 3: Conteúdo de umidade da cenoura.

Cenoura cortada em cubos de 10mm	Umidade base seca (kg/kg)
Inicial	9,30
Crítica	2,40
Final	0,10
Equilíbrio	0,05

Fonte: DOMAGALA, WITULSKA e JANUS (1996)

Para se avaliar a influência da direção da difusão na difusividade mássica média em cenouras, RUIZ-CABRERA et al. (1997) levantaram curvas de secagem para diferentes formas (fatias e cilindros) e três temperaturas (50, 60 e 70°C). A cenoura foi cortada em quatro diferentes formas: 1 – fatia de 1cm de espessura somente do miolo da cenoura; 2 – fatia de 1 cm de espessura da cenoura sem o miolo; 3 – cilindro de 7 cm de altura do miolo da cenoura e 4 – cilindro de 7cm de altura sem o miolo da cenoura. As formas 1 e 2 foram seladas nas faces laterais para garantir a difusão somente nas faces superior e inferior. E as formas 3 e 4 foram seladas nas faces superior e inferior para garantir a difusão somente pelas laterais. A umidade final foi determinada em uma estufa à vácuo a 70°C por 24 horas. Os resultados estão mostrados a seguir:

Tabela 4: Difusividades mássica para a cenoura em m²/s.

Limites	Forma 1	Forma 2	Forma 3	Forma 4
	D _{efzz} central	D _{efzz} anular	D _{efrr} central	D _{efrr} anular
Inferior	4,237 x 10 ⁻¹⁰	3,472 x 10 ⁻¹⁰	2,570 x 10 ⁻¹⁰	1,721 x 10 ⁻¹⁰
Superior	4,756 x 10 ⁻¹⁰	3,922 x 10 ⁻¹⁰	2,968 x 10 ⁻¹⁰	1,956 x 10 ⁻¹⁰

Fonte: RUIZ-CABRERA et al. (1997)

3.11.4 Dados da literatura da casca de ovo

Não foi encontrada nenhuma referência na literatura em relação à cinética de secagem e às isotermas de sorção para a casca de ovo. A maioria do material encontrado se relaciona mais ao ovo em si (composição da clara e da gema, influência da alimentação na produção de ovos, etc.) e à casca inteira do ovo, como por exemplo: curvas de tensão versus deformação, resistência à penetração, etc. O pouco material sobre a casca quebrada do ovo se reduz a sua utilização na ração avícola como fonte de cálcio.

Walton et al. (apud: SIM, AW-YONG e BRAGG, 1983) estimam que mais de 50 milhões de quilos de casca de ovo são produzidos por ano nos EUA e no Canadá, e a maioria desta produção é descartada sem nenhum processamento em aterros sanitários. Esta prática é cara e gera grandes problemas ambientais.

A casca de ovo é rica em cálcio e contém proteína associada com o resíduo da albumina, e pode ser utilizada na alimentação avícola. Contudo, significativo uso deste material não tem sido desenvolvido. As informações nutricionais da casca de ovo indicam que esta pode ter uma vantagem econômica sobre as outras fontes de cálcio. Este resíduo do ovo tem que ser seco e esterilizado antes do seu uso como alimento. Casca de ovo úmida, contendo 29% de umidade, foi

processada pela passagem através de um secador a tambor rotativo aquecido com gás natural a 180°C. A casca seca foi então moída em um moinho de martelos com uma peneira de 1mm de abertura. O produto final continha 98,9% de matéria seca, 36% de cálcio e 5,5% de proteína bruta. Esta casca foi utilizada como fonte de cálcio na ração de frangos de corte com resultados satisfatórios (SIM, AW-YONG e BRAGG, 1983).

FRONING e BERGQUIST (1989) sugeriram a utilização da extrusão em substituição à secagem em secadores a tambor rotativos. A casca de ovo era centrifugada para a remoção de clara aderida e moída em partículas de mesh 24. A casca de ovo moída era então esfriada a 1,7°C e então misturada a outros ingredientes na seguinte formulação: 70% de casca moída, 8% de clara, 5% de milho, 17% de farinha de soja e 0,15% de ácido propiônico. A seguir esta composição era então extrusada (com temperatura inicial da penúltima câmara de 127°C e final de 154°C) e embalada. A composição final da ração de casca de ovo extrusada foi a seguinte com a espessura da casca igual a 0,349 mm:

Tabela 5: Composição da casca de ovo extrusada.

Componente	Percentagem
Umidade	9,23 ± 0,53
Gordura bruta	0,70 ± 0,35
Proteína bruta	13,09 ± 0,76
Proteína digestível	10,44 ± 0,75
Extrato de nitrogênio livre	34,08 ± 5,16
Cinzas	37,43 ± 1,45
Cálcio	23,95 ± 0,20
Fósforo	0,24 ± 0,09

Fonte: FRONING e BERGQUIST (1989)

3.12 ENERGIA DE ATIVAÇÃO

A energia de ativação estimada é baseada na equação do tipo Arrhenius que relaciona as difusividades efetivas com as temperaturas de secagem:

$$\ln(D_{ef}) = \ln(A) - \frac{E_a}{R \cdot T} \quad (44)$$

3.13 MÉTODOS DE SECAGEM

Existem vários métodos que podem ser utilizados para fornecer calor para o material, assim é muito difícil classificar todos os métodos de secagem. Os mais importantes são descritos por STRUMILLO e KUDRA (1986) e KEEY (1978).

3.14 TIPOS DE SECADORES

Devido à grande variedade de tipos de produtos que devem ser secos por diferentes métodos, existe também uma variedade de projeto de secadores. Os critérios para se classificar os secadores são muitos, e segundo STRUMILLO e KUDRA (1986) podem ser assim divididos (Tabela 6):

Tabela 6: Critérios para a classificação de secadores.

Critério para a classificação	Exemplo do tipo do secador
Pressão no secador	Atmosférica ou vácuo
Método de operação	Contínua ou em batelada
Método de suprir o calor	Convecção, contato, infravermelho, dielétrico e sublimação.
Tipo do agente de secagem	Ar quente, vapor superaquecido, líquidos aquecidos e gases rejeitados.
Direção do fluxo de calor e sólidos	Co-corrente, contracorrente e fluxo cruzado.
Método do fluxo do agente de secagem	Livre ou forçado
Método do carregamento da umidade	Com agente externo de secagem, com gás inerte, com absorção química da umidade.
Forma do material úmido	Líquidos, granulares, pós, pastas, folhas, camadas finas, lama.
Tipo do fluxo do material (condição hidrodinâmica)	Regime estacionário, transiente ou disperso.
Escala de operação	De 10 kg/h até 100 ton/h
Construção do secador	Bandejas, túnel, esteira, tambor, rotatório, leito fluidizado e muitos outros.

Fonte: STRUMILLO e KUDRA (1986)

Além deste critério, devem-se considerar também o método de aquecimento do agente de secagem, a forma física da alimentação, se o produto seco é requerido em uma forma especial, se o material é tóxico ou termolábil, etc. O mesmo autor também afirma que usualmente os tipos de secadores podem ser divididos, basicamente, segundo o regime hidrodinâmico e o fluxo de material.

Secadores com regime hidrodinâmico não ativo podem ser assim divididos:

- **Secadores com leito estacionário**, nos quais o material pode ser considerado como estacionário enquanto o calor é fornecido e a água é removida.
- **Secadores com leito agitado**, nos quais o leito de partículas se move devido à gravidade e/ou forças mecânicas.

-
- **Secadores com leito de queda livre**, nos quais o leito ou as partículas individuais caem através do ar relativamente parado, devido a forças gravitacionais.

Secadores com regime hidrodinâmico ativo, nos quais a agitação do leito ou das partículas é causada por uma força hidrodinâmica exercida sobre as partículas por uma corrente de ar com uma velocidade apropriada. Exemplos destes secadores é mostrada a seguir:

- **Secadores com leito fluidizado**, nos quais a interação entre material a ser seco e a corrente de ar cria um leito fluidizado típico ou um leito de fluidização rápida (partículas secas são removidas pela corrente de ar devido à sua baixa densidade).
- **Secadores com leito agitado**, nos quais o material a ser seco é agitado mecanicamente no leito do secador através da rotação ou vibração do leito do secador ou através de um agitador propriamente dito.
- **Secadores com leito escoante**, onde as partículas do material que está sendo seco fluem juntamente com a corrente de ar.

KEEY (1978) divide os secadores segundo o meio de transporte do material (Tabela 7):

Tabela 7: Métodos de transporte na secagem.

Método	Secador típico	Material típico
Material estático	Secador de bandeja	Grande variedade de materiais
Material que cai por gravidade	Secador rotatório	Grânulos em queda livre
Material carregado em lâminas	Secador de rosca transportadora	Materiais úmidos, pastas
Material transportado em carrinhos	Secador túnel	Grande variedade de materiais
Material carregado sobre rolos	Secadores de cilindro aquecido	Teias finas, folhas e placas
Material carregado em esteiras	Secador de esteira	Grande variedade de materiais rígidos
Material vibrado em esteiras	Secador de esteira vibratória	Grânulos em queda livre
Material suspenso no ar	Secador de leito fluidizado	Grânulos
Material atirado através do ar	<i>Spray Dryer</i>	Soluções, materiais viscosos e pastas finas.

Fonte: KEEY (1978)

NONHEBEL e MOSS (1971) também classificam os secadores segundo o método de operação (Figura 7), a forma física da alimentação (Figura 8), a escala da operação (Figura 9) e projetos especiais (Figura 10):

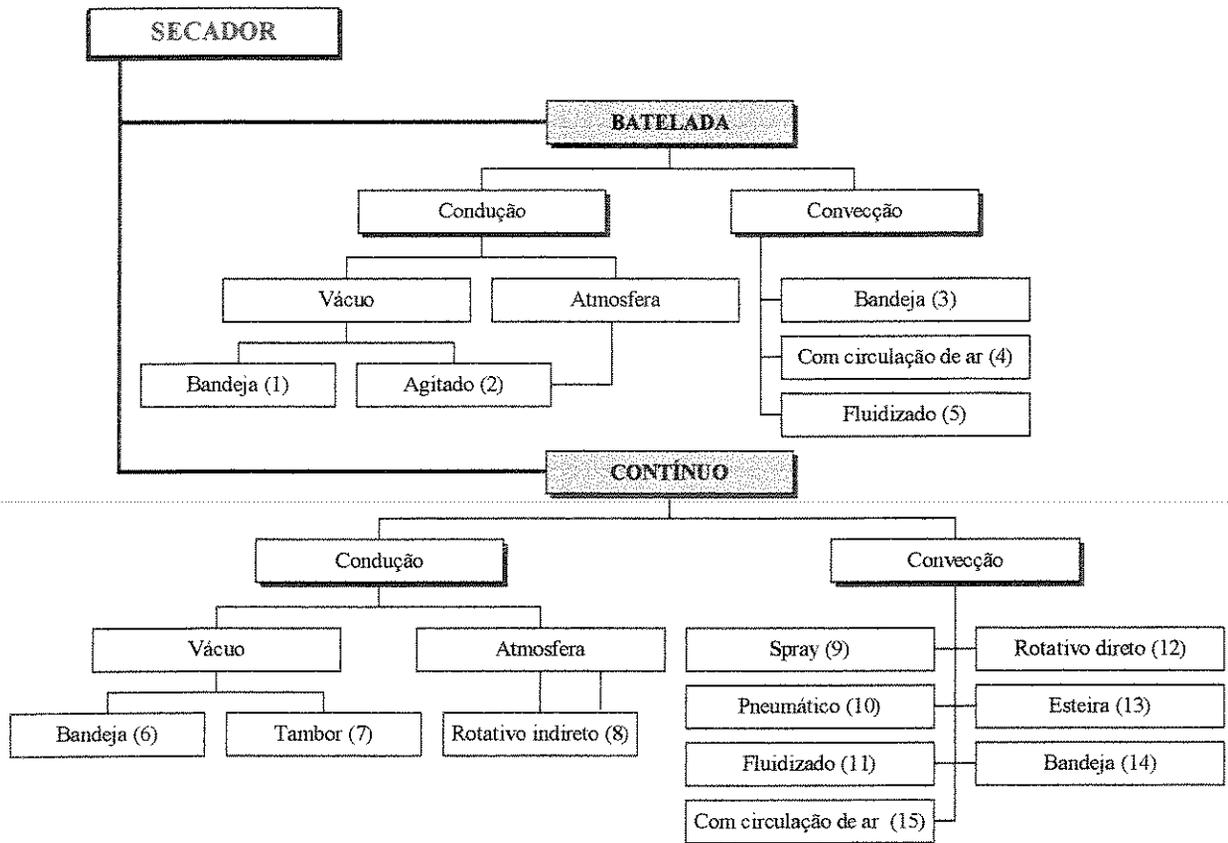


Figura 7: Classificação dos secadores baseada no método de operação.

A seguir estão discriminados os materiais específicos para cada secador da classificação anterior:

1. Pastas, pré-moldados, dura, granulares, fibrosos e folhas;
2. Líquidos, lama, pastas e granulares;
3. Pastas, pré-moldado, dura, granulares, fibrosos e folhas;
4. Pré-moldado, granulares e fibrosos;
5. Pré-moldado, granulares e fibrosos;
6. Lama e pastas;
7. Líquidos, lama, pastas e folhas;
8. Dura, granulares e fibrosos;
9. Líquidos, lama e pastas;
10. Pastas, pré-moldado, dura, granulares e fibrosos;
11. Pastas, pré-moldado, dura, granulares e fibrosos;
12. Granulares e fibrosos;
13. Pastas, pré-moldado, dura e folhas;
14. Pastas, pré-moldado, dura, granulares, fibrosos e folhas;
15. Pré-moldado, granulares e fibrosos.

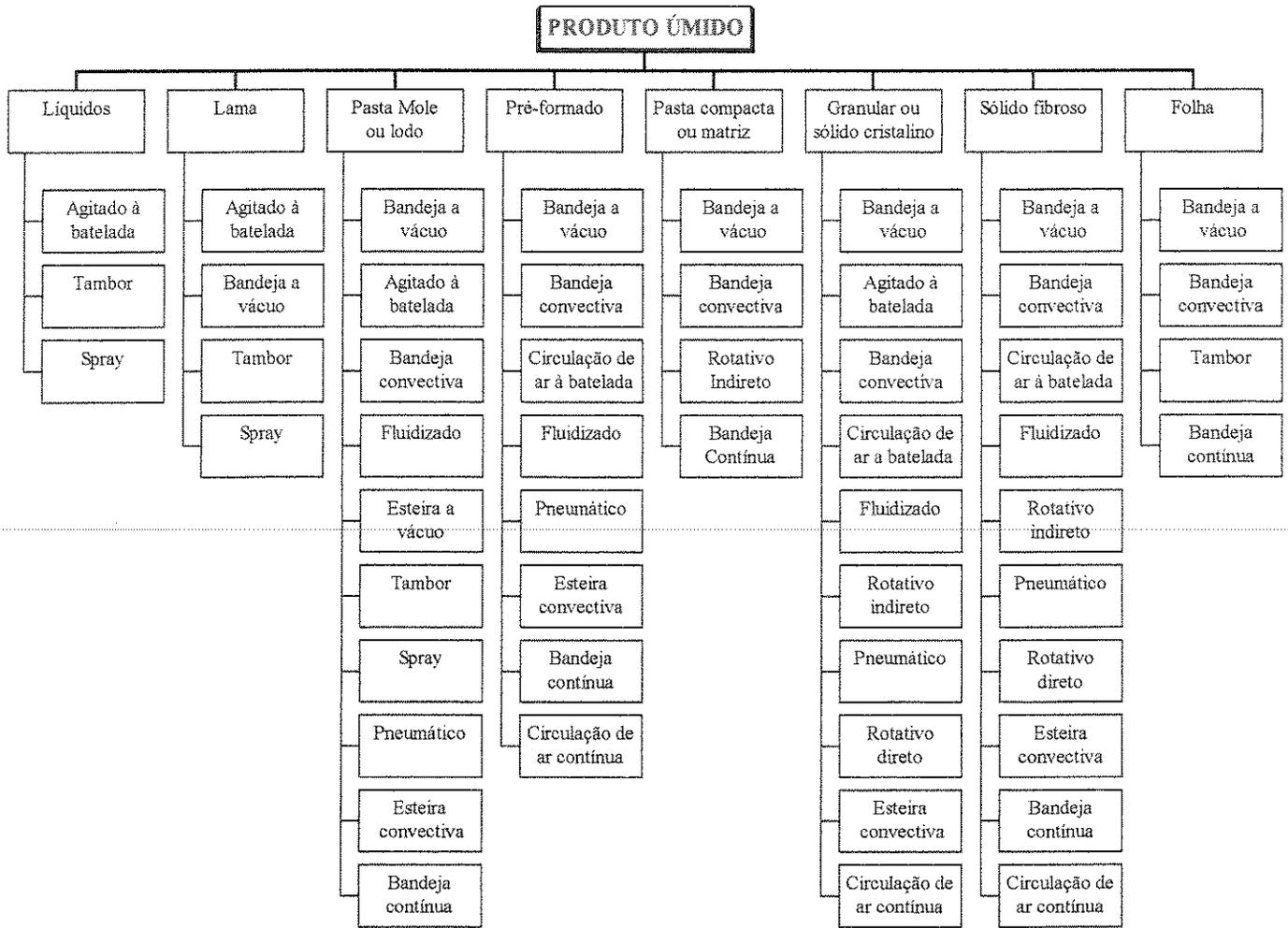


Figura 8: Classificação dos secadores baseada na forma física da alimentação.

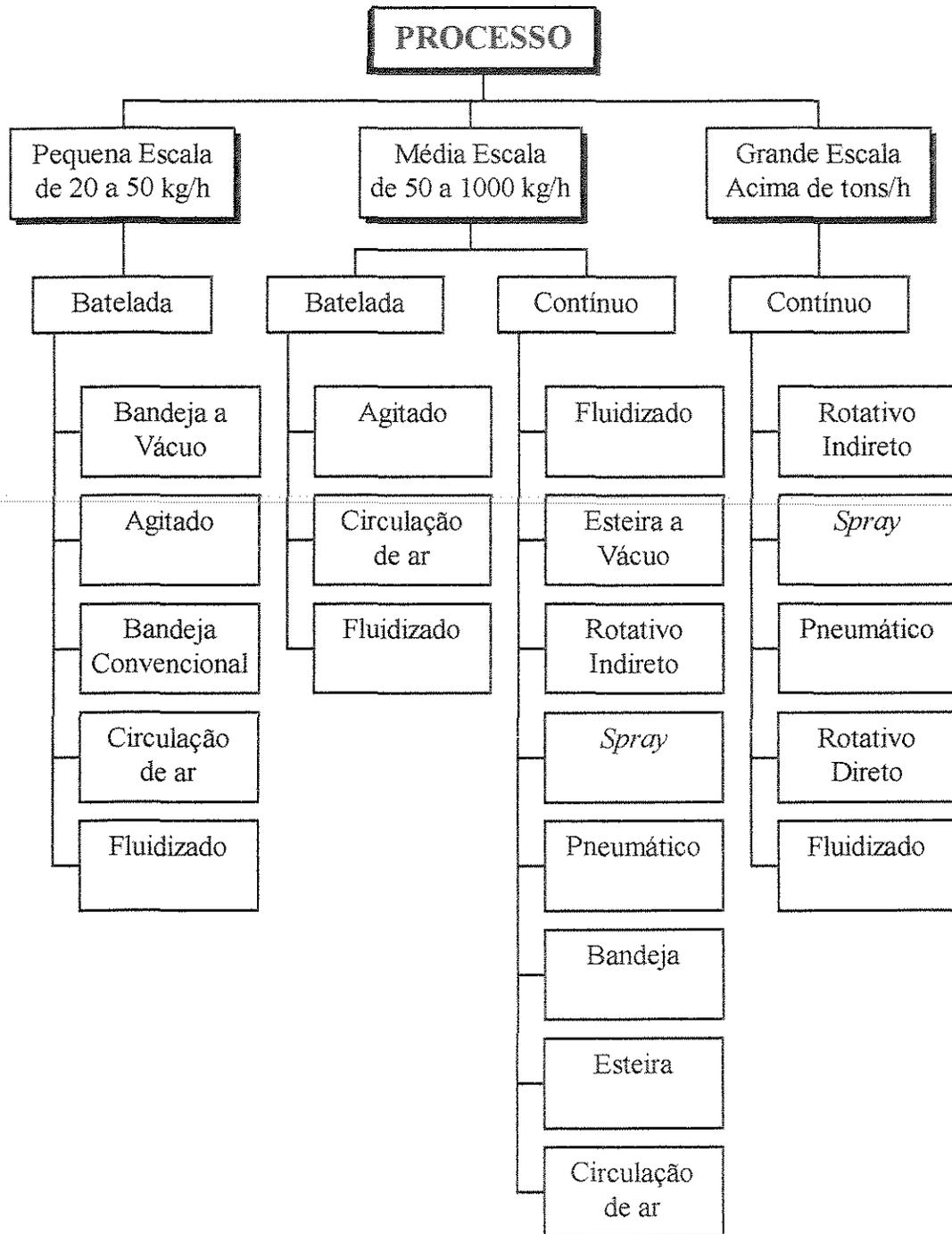


Figura 9: Classificação dos secadores baseada na escala de produção.

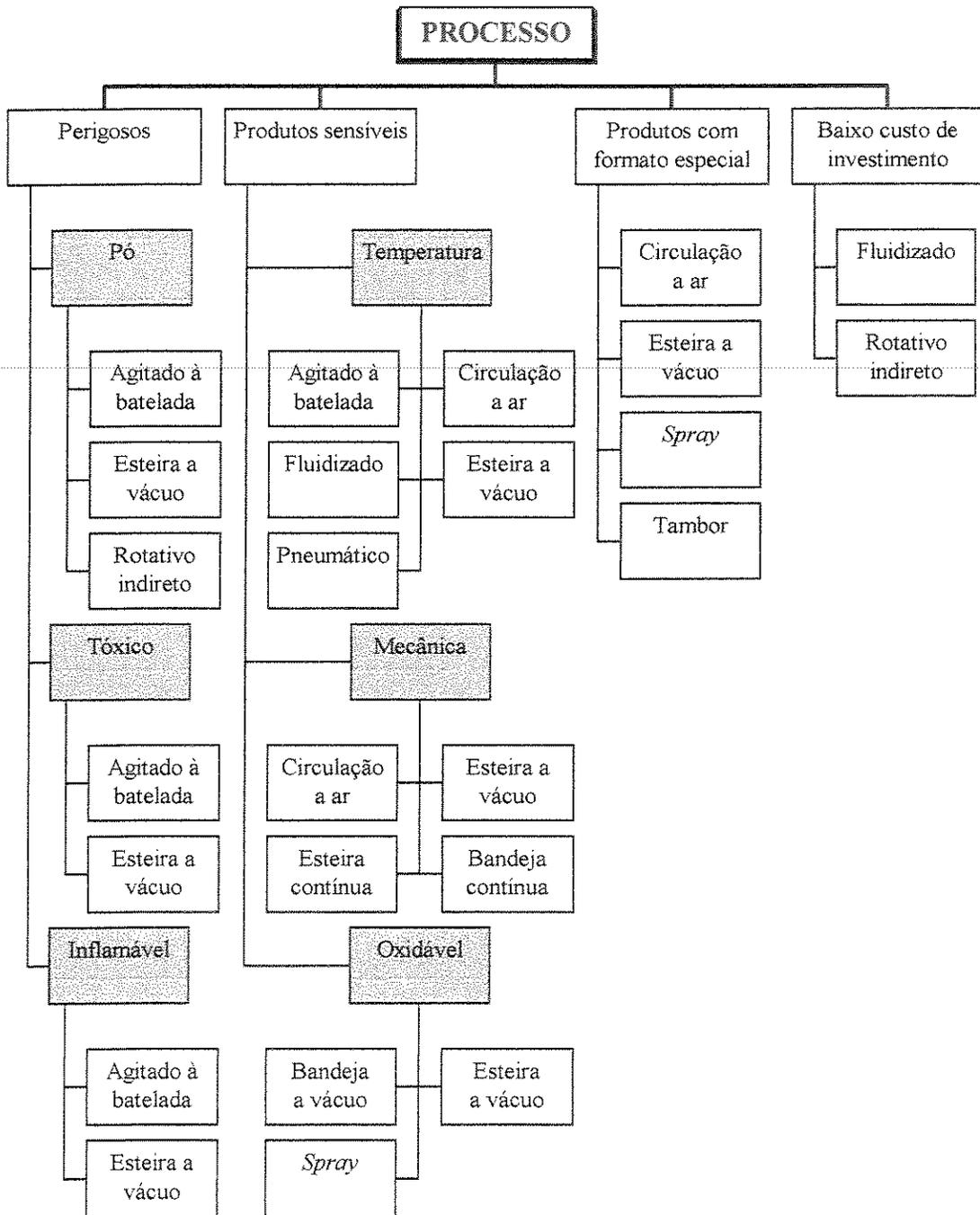


Figura 10: Classificação dos secadores baseada em projetos especiais.

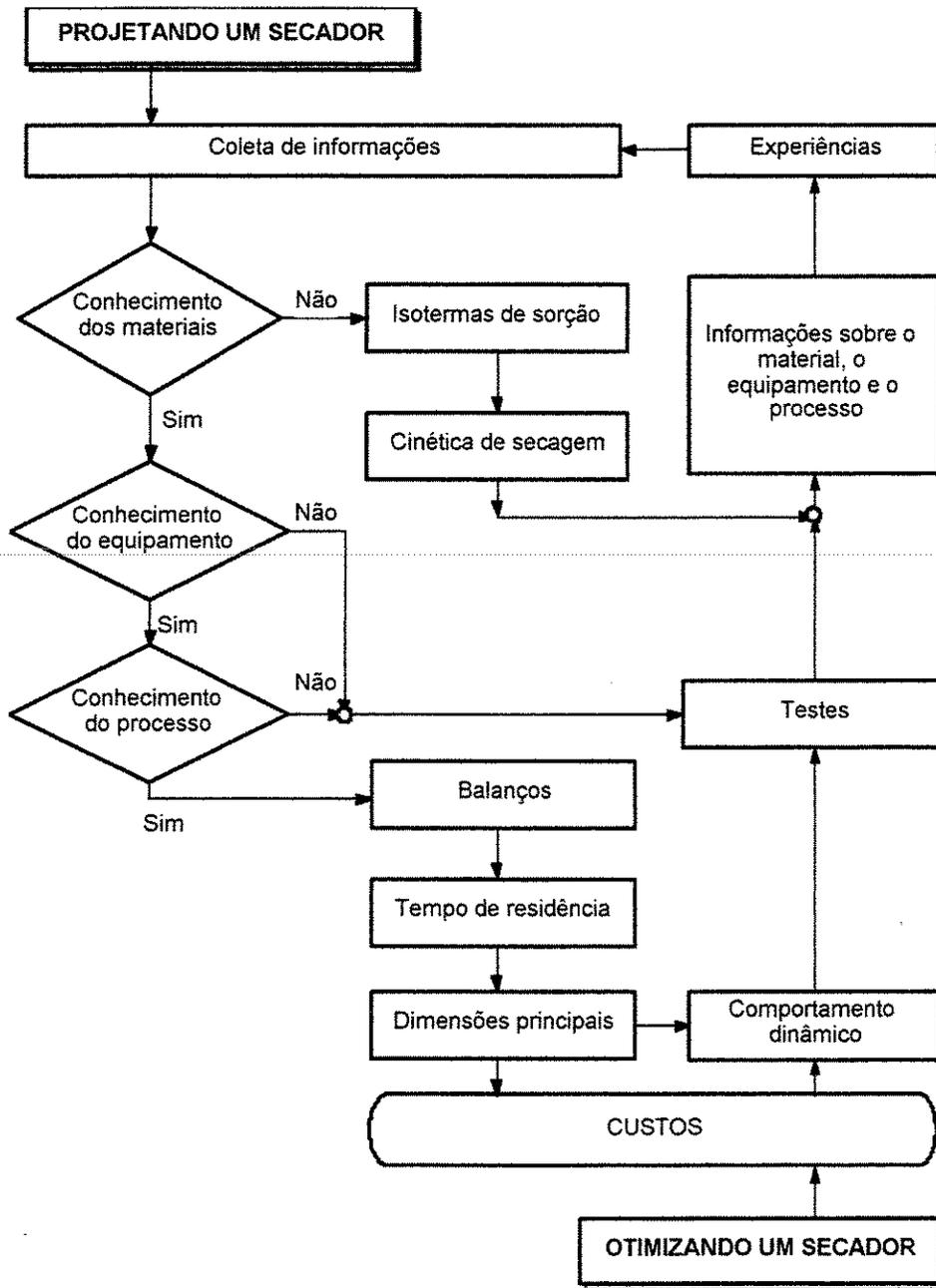
KIRANOUDIS et al. (1996) compararam três tipos básicos de secadores convectivos industriais: secador com esteira transportadora, secador em leito fluidizado e secador rotativo. Os objetivos do trabalho foram a determinação da estrutura, tamanho e características operacionais ótimas de cada secador, otimizando o custo anual de uma dada capacidade.

BAKER e LABABIDI (1998) desenvolveram um método para seleção de secadores baseado em sistemas *fuzzy expert*, onde primeiramente se entram com as variáveis principais de secagem (vazão de sólidos, batelada ou contínuo, forma de alimentação, tamanho das partículas, temperatura máxima de secagem, conteúdo de umidade...) e o sistema gera uma lista de tipos de secadores possíveis.

3.15 PROJETO DE SECADORES

Como pode ser observado existe mais de um tipo de secador adequado para um determinado produto, assim o engenheiro tem que escolher um secador que seja capaz de atingir as propriedades desejadas no produto final. Deste modo, a utilização de secadores em escala pequena ou laboratoriais é sempre uma boa alternativa para a escolha final do secador industrial, pois esses possibilitam a determinação das características de secagem do material que são requeridas para predizer o modo como a matéria prima irá secar em escala industrial (KEEY, 1978).

O fluxograma indicativo dos passos a serem seguidos no projeto de secadores está mostrado na Figura 11:



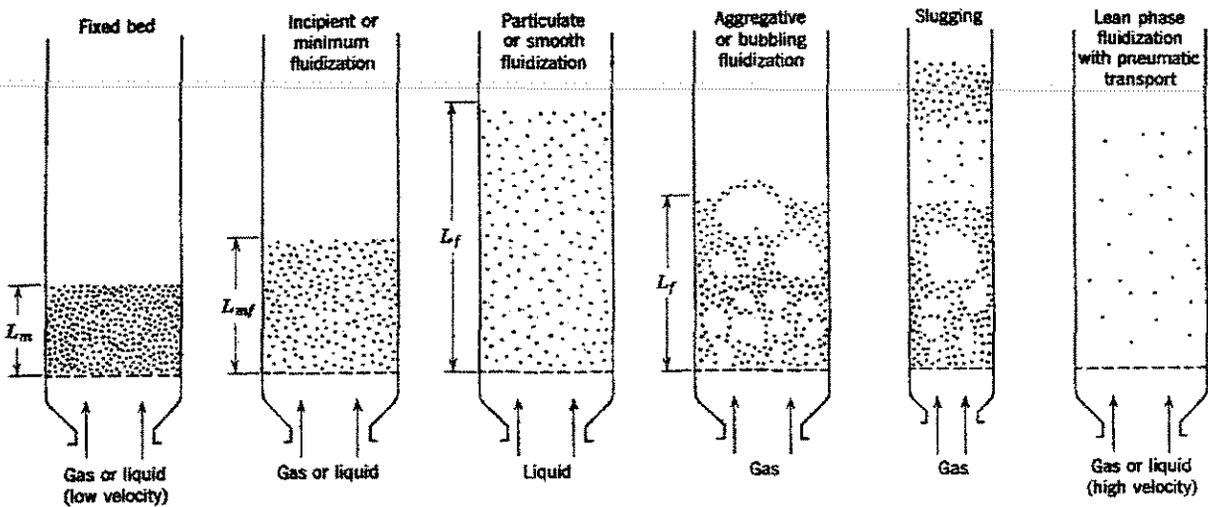
Fonte: KEEY, 1978

Figura 11: Fluxograma para o projeto de secadores.

3.16 FLUIDIZAÇÃO

Define-se o leito 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 (BURJAILI, 1996).

KUNII e LEVENSPIEL (1969) sugeriram os seguintes regimes de escoamento (Figura 12):



Fonte: KUNII e LEVENSPIEL (1969)

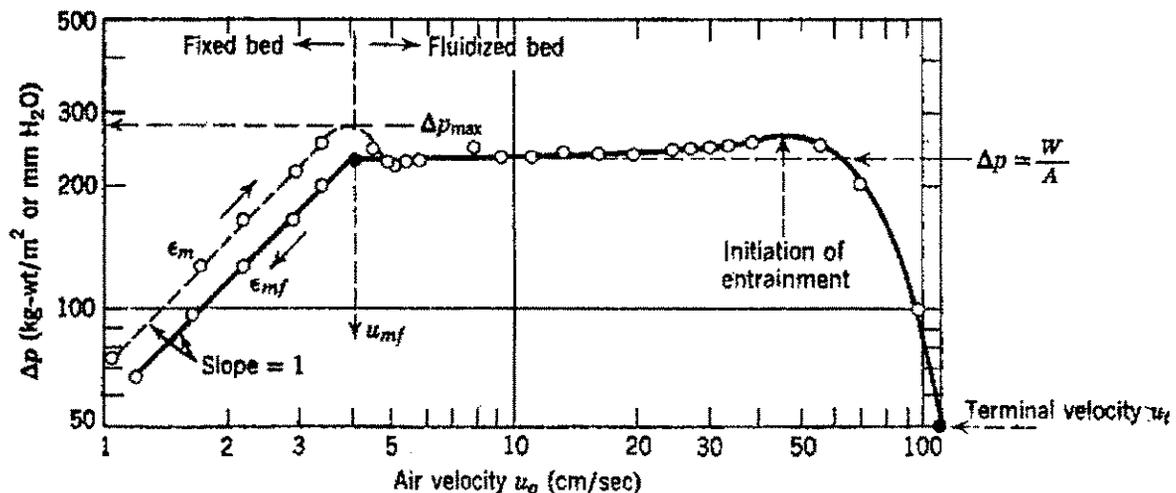
Figura 12: Regimes de escoamento

Quando um fluxo baixo de ar passa através de um leito com partículas, ocorre apenas um preenchimento do fluido nos espaços vazios do leito que permanece estático - *leito fixo*. A porosidade do leito não se modifica e a perda de pressão do fluido varia diretamente com a velocidade superficial do gás (Figura 12).

Quando um pequeno aumento do fluxo de ar movimenta apenas algumas partículas que vibram em regiões restritas tem-se o *leito expandido*.

Com um crescente aumento no fluxo de ar, todas as partículas são suspensas em um estado similar a de um fluido, tendo um comportamento semelhante ao de um líquido ebuliente. Neste ponto a força friccional entre as partículas e o fluido contrabalança o peso das partículas, o componente vertical da força de compressão entre partículas adjacentes desaparece e a perda de pressão através de uma seção do leito se iguala ao peso do fluido e das partículas nesta seção. Neste estado, o leito é considerado como fluidizado e é referido como um *leito fluidizado incipiente* ou um leito à *mínima fluidização*. A porosidade do leito aumenta e esta condição é caracterizada pela *velocidade crítica de fluidização* ou *velocidade mínima de fluidização* (u_{mf}) do ar e uma perda de pressão máxima.

Se após o início da fluidização, a velocidade do gás é reduzida para abaixo de u_{mf} , a queda de pressão novamente corresponde a de um leito fixo, mas de grandeza diferente (Figura 13).



Fonte: KUNII e LEVENSPIEL (1969)

Figura 13: Perda de carga versus velocidade do ar.

Com o aumento da taxa de escoamento do ar, chega-se a uma condição de expansão do leito, tal que ocorre arraste das partículas, sendo a velocidade correspondente chamada de *velocidade de arraste*.

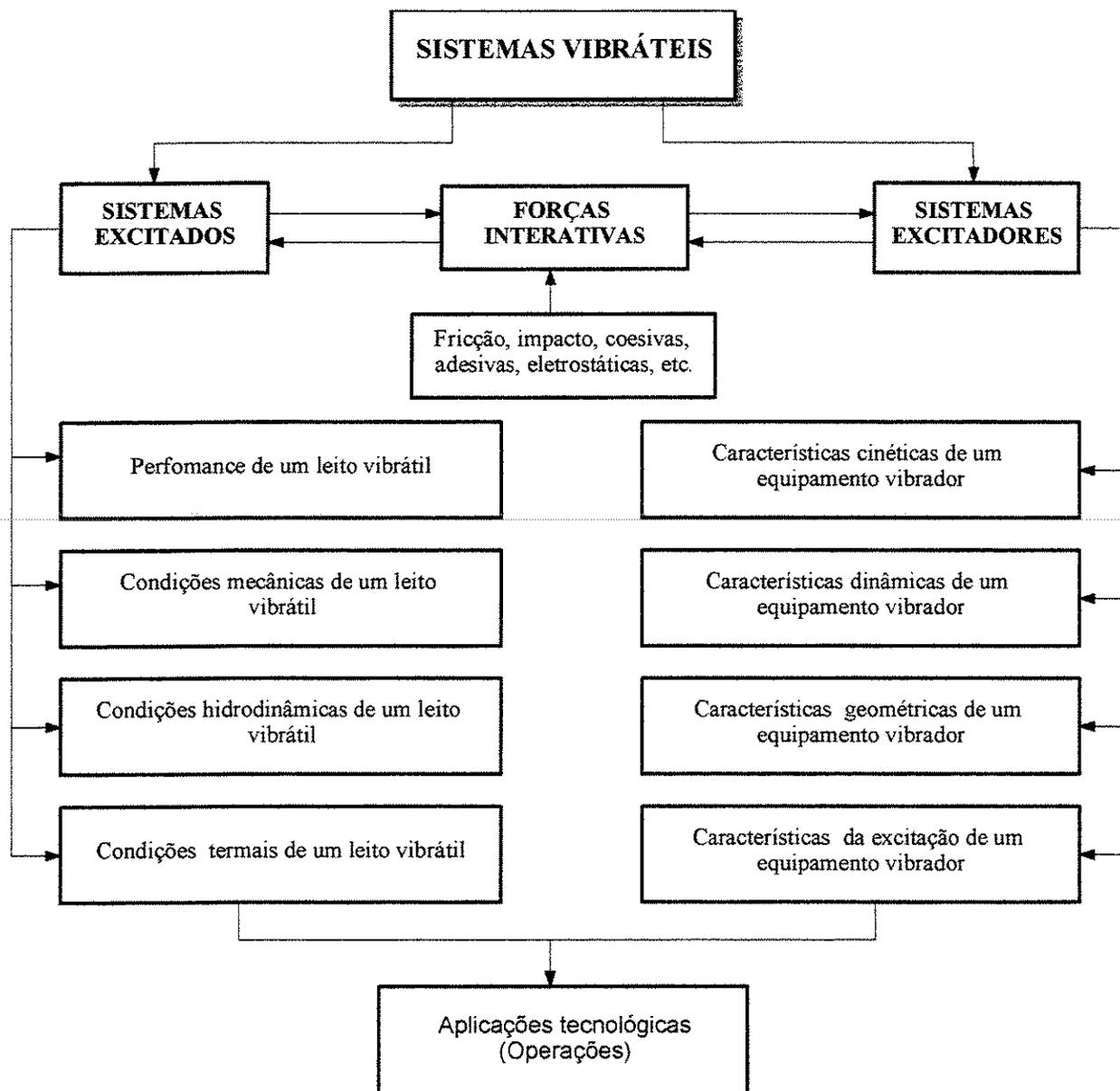
3.17 VIBRAÇÃO

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

O interesse na aplicação de vários tipos de vibração para intensificar a transferência de quantidade de movimento, calor e massa tem sido observado em várias áreas atualmente, principalmente na secagem de materiais granulares (STRUMILLO e KUDRA, 1986). Esta intensificação é baseada no:

- Aumento do valor dos coeficientes de transferência devido ao aumento da turbulência na camada limite: esta influência é positiva se o expoente do número de Reynolds nas equações adimensionais para o número de Sherwood ou Nusselt, for maior que a unidade, caso contrário, se o expoente for menor que a unidade um decréscimo na intensificação é observado;
- Aumento da área interfacial como resultado da reação da vibração na estrutura do leito.

MUJUMDAR e ERDÉSZ (1988) dividem as operações com equipamentos vibráteis em três grandes áreas: mecânica, térmica e operações químicas. Como exemplo de aplicações da vibração em operações mecânicas os autores citam: transporte de materiais (transportadores e alimentadores), separação de misturas, descarga de silos e moegas. No caso de operações térmicas, a secagem e resfriamento são as operações mais comuns em indústrias químicas e alimentares. O uso da vibração para a intensificação de reações químicas tem um grande potencial ainda não explorado. Um fluxograma da classificação de sistemas vibráteis é apresentado na Figura 14:



Fonte: MUJUMDAR e ERDÉSZ (1988).

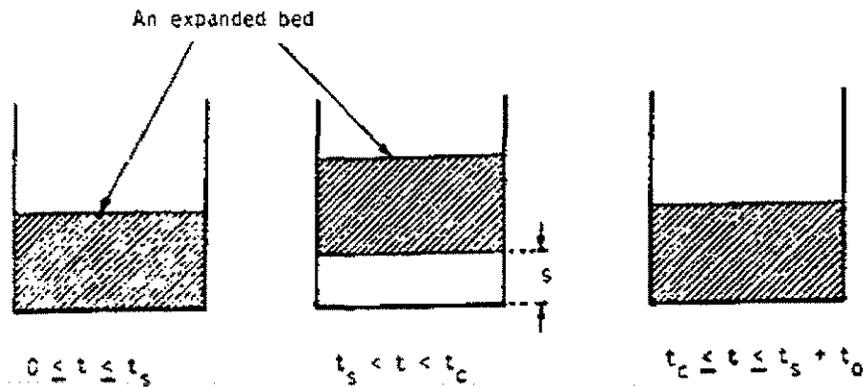
Figura 14: Classificação dos equipamentos vibráteis de processamento.

Os dispositivos geradores de ação vibratória são responsáveis pela movimentação das partículas e são denominados vibradores. Os diversos tipos estão classificados como se segue:

- **Vibrador mecânico de inércia**: a força de excitação é promovida pela rotação de massas desequilibradas;
- **Vibrador excêntrico**: produz forças de excitação intensas e de baixa frequência. A vibração é devida ao uso de excêntricos em seus eixos;
- **Vibrador pneumático ou hidráulico**: promove alta frequência de vibração. A vibração é ocasionada pelo movimento de um pistão acionado por um fluido;
- **Vibrador eletromagnético**: seguramente o melhor dispositivo para promover a vibração, além de produzir frequências altas, possui uma precisa regulagem de frequência;
- **Vibrador sonoro**: produz ondas sonoras quando o ar escoa num gerador de som.

Um conceito simplificado, mas usualmente aceito para os mecanismos de leitos vibráteis é a analogia de corpos plásticos (THOMAS et al., 1987). Considerando a situação onde uma pequena quantidade de partículas de sólidos grosseiros é colocada dentro de um vaso e sujeita a uma vibração senoidal externa: quando a componente vertical da aceleração vibracional excede a aceleração da gravidade, estas partículas saltam irregularmente e suas trajetórias são simplesmente aquelas de partículas individuais agindo independentemente uma das outras. Estas partículas também colidem com a base do vaso e umas com as outras em tempos randômicos. Se partículas são adicionadas para este leito, um ponto é alcançado quando as partículas começam a

se mover juntas. Um leito que se move como uma massa é visto periodicamente levantando para fora da base do vaso e caindo de volta para ele, conforme indica a Figura 15:



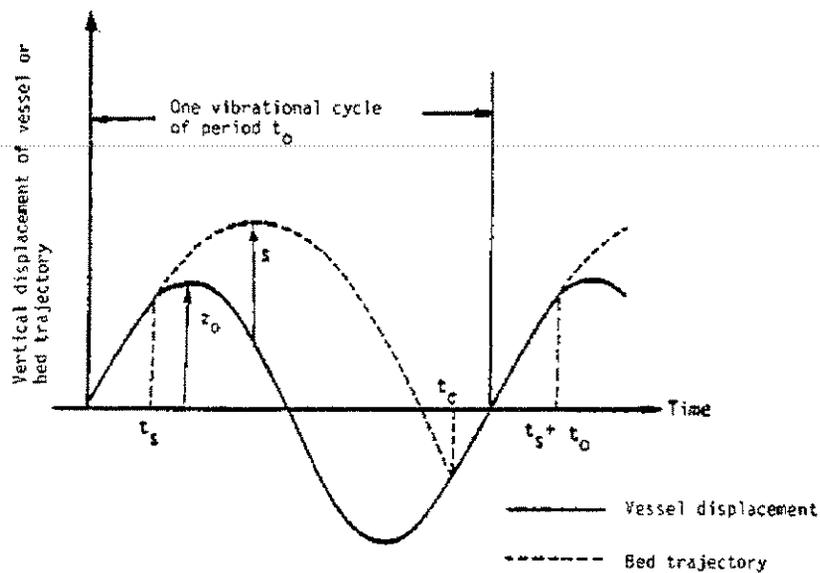
Fonte: THOMAS et al., 1987

Figura 15: Movimento de um leito vibrátil modelado como um corpo plástico.

GUTMAN (1976 - a) utiliza o conceito de um pistão poroso único de material para explicar o comportamento de um leito vibrátil de um material granular.

A Figura 16 ilustra o tempo t_s , no qual o leito é levantado da base do vaso depois que a aceleração do vaso cai para abaixo de $-9,81 \text{ m/s}^2$ ($-1g$). Como o leito se levanta, a diferença entre a aceleração do leito e do vaso cria uma perda de pressão abaixo do leito. Isto ocasiona um fluxo de ar, para baixo, através do leito, para a abertura formada entre a base do leito vibrátil e o teto do vaso vibratório, resultando também em uma expansão do leito. O leito, que está em queda livre, eventualmente atinge uma posição máxima relativa à base do vaso. Como o leito cai na direção da base do vaso, a pressão na abertura do teto aumenta, e o ar é eventualmente forçado para cima através do leito (THOMAS et al. 1987).

Em um instante seguinte, denotado por t_c , o leito e o vaso colidem. A mecânica da colisão de um corpo com outra massa rígida é determinada pelo coeficiente de restituição do corpo. Se este coeficiente é zero, a colisão é completamente plástica e não haverá ricochete. Observações através de ultra-rápidas fotografias afirmam que o leito não ricocheteia, sugerindo que a energia do impacto é dissipada para o leito.



Fonte: THOMAS et al., 1987

Figura 16: Trajetória do leito e do vaso durante o período de vibração.

Desde que o leito se move como uma massa e a colisão é plástica, ele pode ser modelado como um corpo plástico de um poro simples (THOMAS et al. 1987).

ERDÉSZ e MUJUMDAR (1989) estudaram a validade de um modelo fenomenológico de um sistema vibrátil baseado no conceito de um pistão poroso em um cilindro. A flutuação da porosidade do leito foi considerada assim como o ar possuindo uma compressibilidade média. O

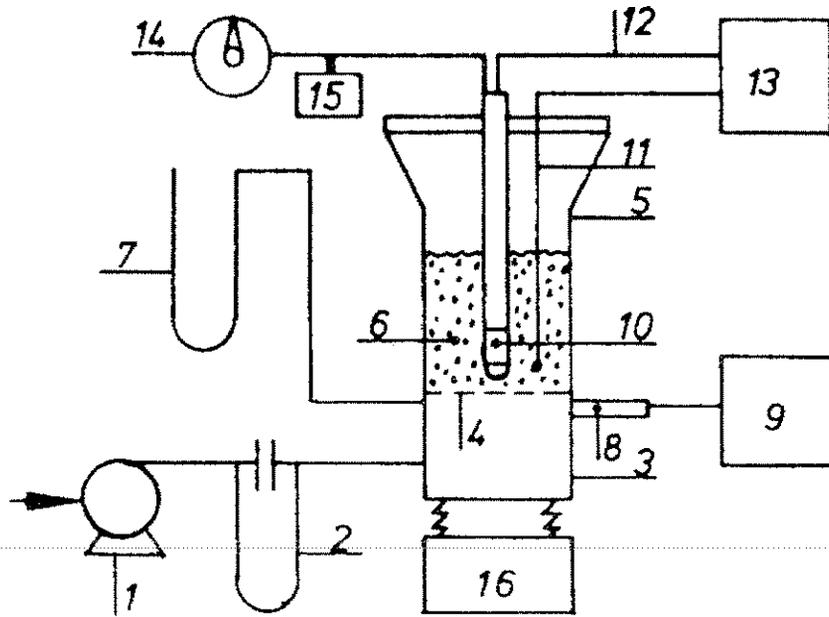
modelo mostrou um bom ajuste para os dados experimentais, possuindo uma grande sensibilidade para variações na permeabilidade do leito, ângulo de fase da flutuação da porosidade e a amplitude da vibração.

Kröll (apud: GUTMAN, 1976 - a) propôs um modelo para o comportamento de um leito vibrátil de materiais granulares: modelo de gás compressível, onde para a validação do mesmo, a porosidade do leito tem que ser constante, a fricção com a parede tem que ser desprezada e a colisão entre o leito e a base do vaso tem que ser inelástica instantânea.

GUTMAN (1976 - a), propôs uma melhoria do modelo proposto por Kröll incluindo o efeito da compressibilidade do ar.

GUTMAN (1976 - b), em outro artigo, estudou a transferência de calor e a dissipação de energia utilizando o modelo de gás compressível para uma placa vertical de aquecimento imersa em um leito vibrátil granular. Este modelo foi validado em um experimento com *glass ballotini* onde a taxa da energia dissipada de um leito vibrátil pode ser calculada através deste modelo de gás compressível. Para partículas grandes, o modelo indica que a maioria da energia é dissipada durante a colisão entre o leito e o vaso, enquanto que a pressão do ar gerada entre o leito influencia a energia dissipada para o leito de partículas finas.

RINGER e MUJUMDAR (1980) também estudaram a transferência de calor de uma superfície imersa. O uso desta técnica é interessante quando a taxa do fluxo de ar é limitada por requerimentos de processo e uma área adicional de transferência de calor é necessária para completar a desejada mudança termal. Determinou-se o coeficiente de transferência de calor (h) entre uma superfície vertical imersa em um leito vibro-fluidizado, conforme ilustra Figura 17:



Fonte: RINGER e MUJUNDAR (1980)

Figura 17: Placa aquecedora imersa em um leito vibro-fluidizado.

Onde: 1 = ventilador; 2 = medidor de orifício; 3 = *plenun*; 4 = placa perfurada; 5 = câmara de fluidização; 6 = leito vibro-fluidizado; 7 = manômetro para a perda de carga; 8 = transdutor de pressão; 9 = gravador da flutuação de pressão; 10 = cilindro aquecido imerso; 11, 12 = termopares; 13 = *data logger*; 14 = transformador; 15 = wattímetro; 16 = mecanismo vibratório.

3.18 VIBRO-FLUIDIZAÇÃO

Com os conceitos assim descritos, pode-se perceber a possibilidade da obtenção de inúmeras vantagens quando se alia o efeito mecânico da agitação do leito do secador com a ação pneumática do ar secante.

A secagem vibro-fluidizada é utilizada para materiais termolábeis, que requerem tempos de residência curtos, altas taxas de secagem e baixas temperaturas de secagem, tais como: materiais granulares, pastas e pós; tanto para materiais farmacêuticos, biológicos e alimentares (BORDE et al., 1996; HAN, MAI e GU, 1991).

O secador de leito vibro-fluidizado permite ainda determinar o tempo total de operação do equipamento, dependendo do processo e condições operacionais adotadas (características do material a ser seco, umidade inicial e final, propriedades termo-físicas). Sabe-se também, que a vibração do leito, sua inclinação e o insuflamento de ar são características importantes para a determinação do tempo de residência dos materiais durante o processo de secagem (MROWIEC e CIESIELCZYK, 1977).

3.18.1 Parâmetros do regime vibro-fluidizado

O principal parâmetro característico da excitação é a intensidade da energia vibracional gerando várias condições em sistemas excitados. Os seguintes parâmetros foram propostos para a caracterização e medição da intensidade da vibração (ERDÉSZ, 1990):

Potência específica da vibração:

$$I_p = A^2 \cdot f^3 \equiv A^2 \cdot \omega^3 \quad (45)$$

Onde: $\omega = 2\pi f$

Energia específica da vibração:

$$I_e = A \cdot f^2 \equiv A \cdot \omega^2 \quad (46)$$

Velocidade média da vibração:

$$v_m = A \cdot f \equiv A \cdot \omega \quad (47)$$

Razão adimensional da aceleração:

$$\Gamma = \frac{A \cdot \omega^2}{g} \quad (48)$$

No regime vibro-fluidizado o ar escoia a velocidades muito baixas e que, por si só não teria condições de movimentar as partículas do leito, ocorrendo o efeito redutor da vibração sobre a velocidade mínima de fluidização (u_{mf}) (FINZER e KIECKBUSCH, 1992) que passa a ser então denominada de velocidade incipiente de vibro-fluidização (u_{mvf}).

O estado vibro-fluidizado inicia-se quando a força gravitacional atuando sobre a partícula é exatamente equilibrada pela soma da força resistiva do gás e pela componente vertical da força gravitacional.

Na prática, a extensão da redução da vibração sobre a velocidade mínima de fluidização é menor do que prevê a equação seguinte devido ao amortecimento de vibração pela influência da altura do leito conforme descrita por GUPTA e MUJUMDAR (1980 – a). Existem também correlações empíricas para o cálculo da velocidade incipiente de vibro-fluidização.

GUPTA e MUJUMDAR (1980 - b) estudaram a aerodinâmica de um leito vibro-fluidizado vertical. As variáveis envolvidas foram: frequência, amplitude, altura do leito, tamanho da partícula, densidade da partícula, esfericidade da partícula e a presença de umidade superficial na partícula. Equações empíricas para a perda de carga e velocidade mínima de fluidização para o leito vibro-fluidizado foram propostas:

$$(\Delta P_{mf})_v = (\Delta P_{mf})_s \left(\frac{A\omega^2}{g} \right)^{-n} \quad (49)$$

Onde: $n = 0,15 + 19,6(d_p \rho_p)$

$$(u_{mf})_v = (u_{mf})_s \left[1 - \frac{1 + E}{2\pi j} \frac{A\omega^2}{g} \right] \quad (50)$$

Os autores concluíram que a vibração ajudou na fluidização de sólidos grudentos e aglomerados. Uma redução de 35 % na perda de carga foi observada como consequência da vibração. Uma diminuição na perda de carga foi conseguida em alturas do leito pequenas, altas frequências e grandes amplitudes de vibração, e para leitos com partículas grandes ou mais esféricas. A densidade da partícula não mostrou ser uma variável importante.

3.18.2 Tipos de leito e de secadores vibro-fluidizados

Baseados em observação visual, Bratu e Jinescu (apud: GUPTA e MUJUMDAR, 1980 -

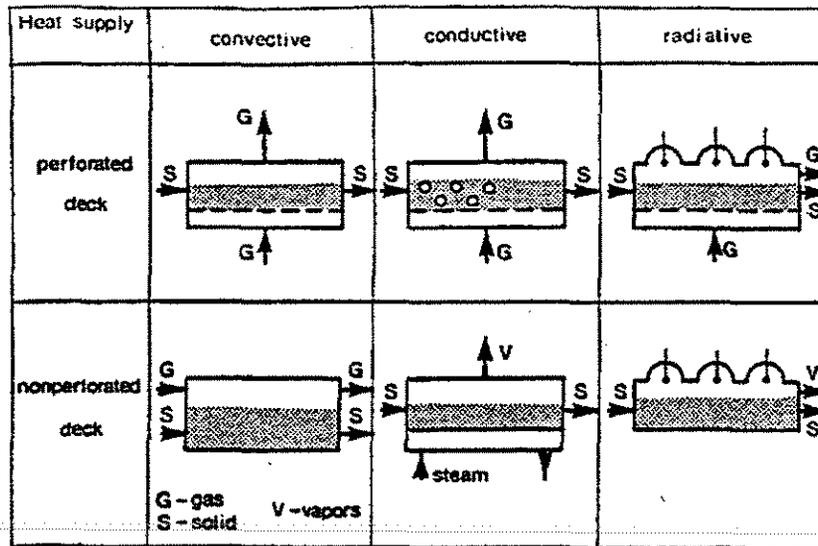
a) definiram três regimes operacionais de sistemas vibrados dependendo da magnitude da componente vertical da aceleração vibracional:

- **Leito vibrátil**: quando $A\omega^2/g < 1$, o leito se comporta como um leito fluidizado simples e a vibração somente aumenta a estabilidade e a homogeneidade do leito fluidizado;
- **Leito vibro-fluidizado**: quando $A\omega^2/g \approx 1$, o fluxo de ar e a vibração contribuem para a fluidização e o comportamento do leito é influenciado pela magnitude dos dois;
- **Leito fluidizado vibrado**: quando $A\omega^2/g > 1$, o leito é essencialmente influenciado por forças vibratórias, que tendem a suspender o leito durante a secagem.

Em escala industrial os tipos de secadores vibrados mais utilizados são:

- **Secadores contínuos com leitos posicionados na horizontal**, os quais são geometricamente simples e requerem pouca manutenção;
- **Secadores verticais**, que geralmente são construídos com múltiplas bandejas ou na forma espiral.

MUJUMDAR e ERDÉSZ (1988) descrevem os seguintes tipos de secadores vibro-fluidizados (Figura 18):



Fonte: MUJUMDAR e ERDÉSZ (1988)

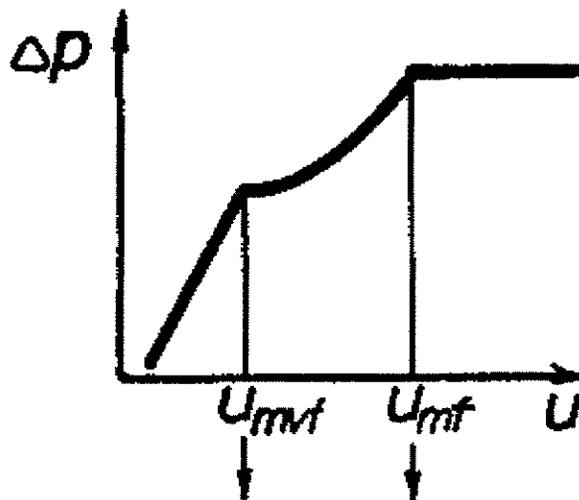
Figura 18: Secadores vibro-fluidizados com leitos horizontais.

As vantagens descritas pelos autores são muito importantes do ponto de vista da qualidade do produto final. Além de que as características do produto final (distribuição de tamanho, tamanho médio da partícula, dispersão do tamanho da partícula, etc.) podem ser facilmente controladas ajustando-se os parâmetros de vibração (amplitude e frequência).

3.18.3 Efeitos da vibração na secagem

Os dispositivos geradores de vibração são responsáveis pela totalidade do escoamento dos sólidos nos leitos vibrados e têm influência parcial nos leitos vibro-fluidizados. O escoamento dos sólidos pode ser controlado para que ocorra no regime pistonado, com um mínimo de dispersão de partículas na direção do escoamento.

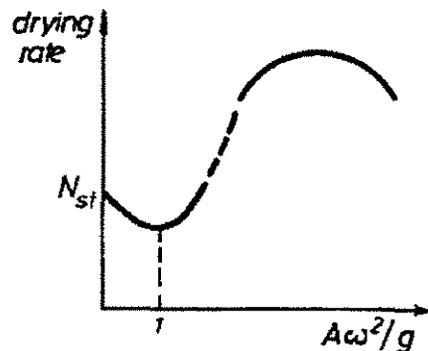
Quando um fluido passa através de um leito sujeito à vibração, após atingir uma velocidade chamada de velocidade incipiente de fluidização (u_{mf}), o estado de fluidização é alcançado (Figura 19). A vibração ajuda na transição de leito fixo para o fluidizado, e a extensão desta ajuda depende da aceleração vibracional.



Fonte: PAKOWSKI, MUJUMDAR e STRUMILLO (1984)

Figura 19: Curva de vibro-fluidização.

Um aumento da taxa de secagem pode ocorrer quando se agita um leito de secagem sob ação vibracional, dependendo das condições de operação, de parâmetros geométricos e das características físicas do leito. A influência da vibração sobre a taxa de secagem depende da faixa de velocidade do ar (u_g). Para $u_g < u_{mf}$, a influência é maior do que quando $u_g > u_{mf}$. Para $A\omega^2/g \gg 1$, o aumento de u_g acima de u_{mf} pode reduzir a taxa de secagem. Mantendo a velocidade do ar constante, a influência de $A\omega^2/g$, sobre a taxa de secagem pode ser representada na Figura 20 (PAKOWSKI, MUJUMDAR e STRUMILLO, 1984):



Fonte: PAKOWSKI, MUJUMDAR e STRUMILLO (1984)

Figura 20: Dependência hipotética da taxa de secagem com a aceleração vibracional.

Quando ocorre aumento da taxa de secagem, a mistura das partículas é mais intensa e ocorre desagregação de aglomerados (ERDÉSZ e MUJUMDAR, 1989). Os processos de transferência de calor e massa ocorrem em maior intensidade quando a operação é realizada em regime de ressonância (ERDÉSZ, 1990).

HASATANI, ITAYA e MIURA (1991), apresentando as vantagens de um leito fluidizado comum (estrutura simples, facilidade de operações em escala contínua, aumento da transferência de calor e massa entre as partículas e o ar quente, etc.), juntamente com as desvantagens (aumento do consumo de energia devido ao aumento do fluxo de ar e a dificuldade de fluidizar partículas aglomeradas), sugerem um secador vibro fluidizado que supera estas desvantagens desde que o secador não só seja usado para fluidizar partículas a baixas velocidades do ar, mas também para quebrar os aglomerados.

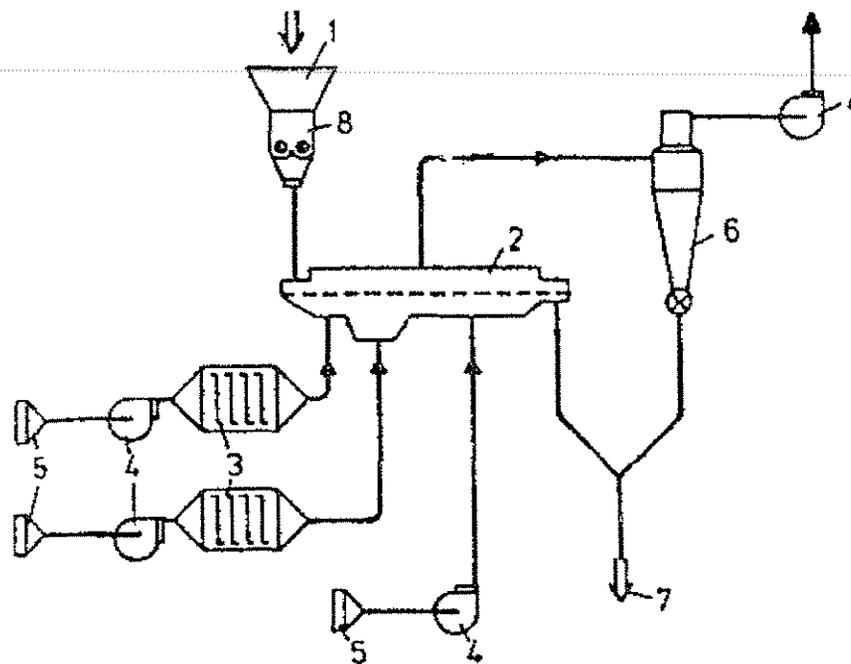
O uso de vibração em secadores apresenta outras vantagens sobre os leitos de jorro ou fluidizados convencionais:

- O ar pode escoar a velocidades muito baixas que, por si só, não poderiam movimentar o leito, ocorrendo o efeito redutor da vibração sobre a velocidade mínima de fluidização (KUDRA, 1992; FINZER e KIECKBUSCH, 1992);
- Menor perda de carga e facilidade de se atingir o regime *plug-flow* (DONG et al., 1991);
- A movimentação do leito devido à vibração reduz a resistência para a transferência de calor e massa, resultando em um aumento da umidade removida durante o período de taxa constante (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980);
- A vibração possibilita uma melhor distribuição do conteúdo de umidade das partículas no leito e a utilização de temperaturas menores do ar devido ao aumento da transferência de calor e massa (HASATANI, ITAYA E MIURA, 1991);

-
- A distribuição do tempo de residência das partículas é mais uniforme e a degradação térmica em regiões estagnadas pode ser evitada, além de resultar em tempos de secagem menores (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980);
 - Através da regulagem da amplitude e da frequência, consegue-se um fácil controle do tempo de residência (HAN, MAI e GU, 1991);
 - A vibração ajuda a manter melhores condições de secagem no período de secagem a taxa decrescente (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980);
-
- O movimento do material através do secador é mais suave, o que reduz o atrito entre as partículas, sendo portanto muito adequado ao tratamento de materiais frágeis (DANIELSEN e HOVMAND, 1980);
 - O secador serve ao mesmo tempo de transportador dos sólidos (DANIELSEN e HOVMAND, 1980);
 - Apesar da vibração, ocorre um menor consumo de potência total (DANIELSEN e HOVMAND, 1980), e, devido às menores massas vibratórias, as forças inerciais são reduzidas, ocorrendo uma economia de energia elétrica (MUJUMDAR e ERDÉSZ, 1988);
 - O uso da vibração também é uma solução para o caso em que o material possui uma distribuição que abrange toda a largura do leito, o leito é feito de um material corrosivo ou existem *by-passed* no leito de secagem (BAHU, 1994);
 - A fluidização pode ser alcançada para materiais coesos, aderentes e pastas, nos quais a simples fluidização seria difícil de atingir (MUJUMDAR e ERDÉSZ, 1988).

3.19 EXEMPLOS DA UTILIZAÇÃO DA VIBRO - FLUIDIZAÇÃO

A seguir, uma representação esquemática de uma instalação adequada para o processamento de materiais formados por partículas com ampla distribuição de tamanhos ou então que possuam resistência mecânica baixa, possibilitando a seleção de ar com velocidade pequena e um bom controle do tempo de residência das partículas (DANIELSEN e HOVMAND, 1980):

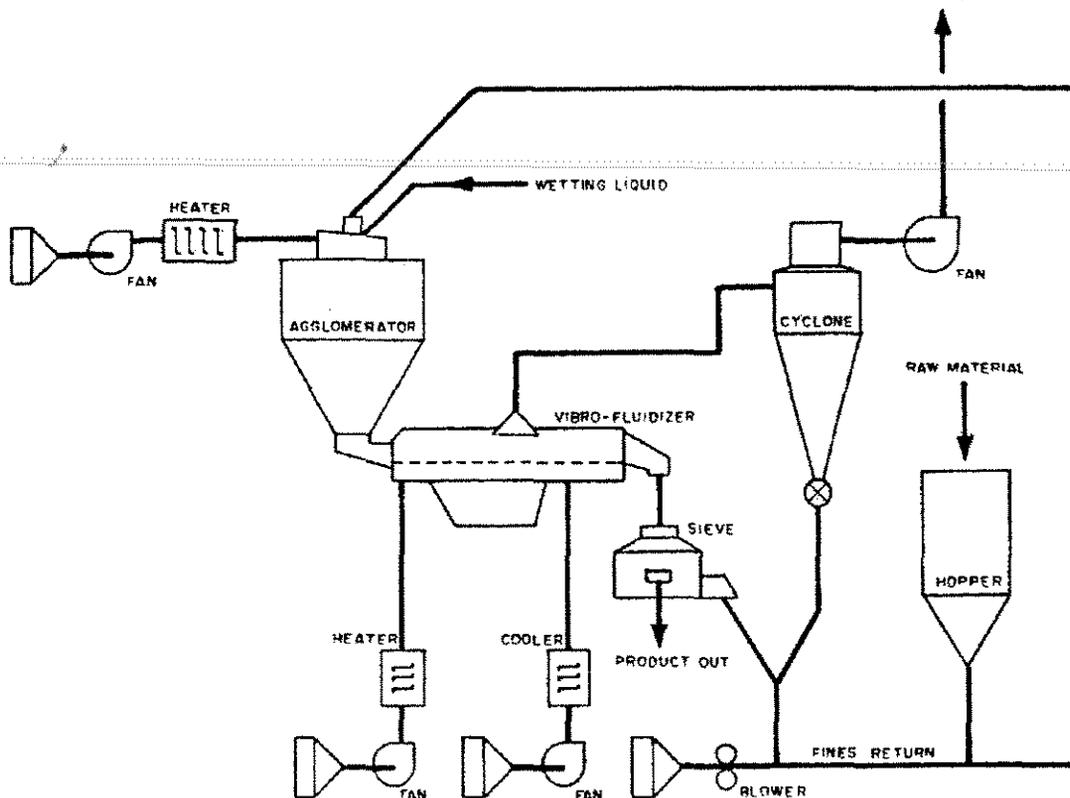


Fonte: DANIELSEN e HOVMAND (1980)

Figura 21: Instalação de secagem para partículas com ampla distribuição de tamanhos.

Onde: 1 = alimentador; 2 = vibro-fluidizador; 3 = aquecedor; 4 = ventilador; 5 = filtro de ar; 6 = ciclone; 7 = saída do produto; 8 = granulador.

Os leitos vibratórios são utilizados como eficientes granuladores-secadores, geralmente após um *spray-dryer* para que o produto tenha características de instantaneidade ao ser reconstituído (HOVMAND, 1987). Os leitos vibro-fluidizados são também utilizados em plantas industriais de aglomeração para a secagem de materiais úmidos que deixam o aglomerador (Figura 22):



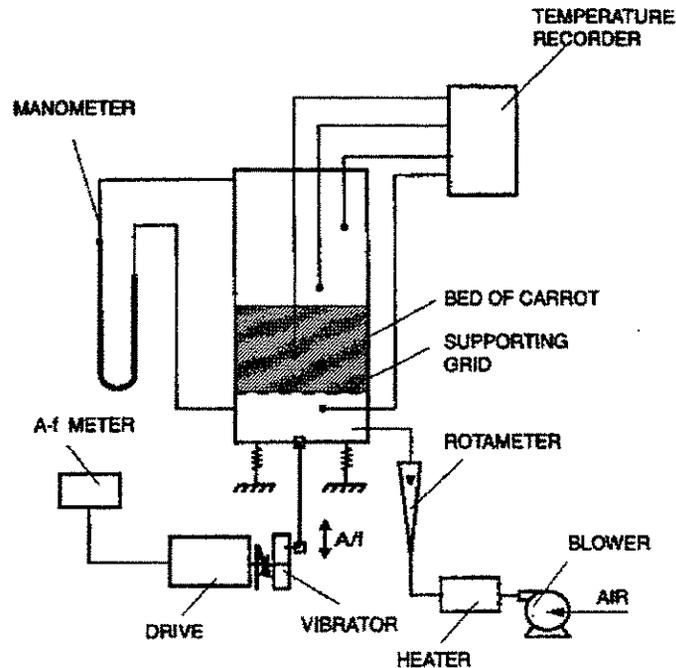
Fonte: HOVMAND (1987)

Figura 22: Instalação de granulação de secagem.

PAKOWSKI e MUJUMDAR (1980) estudaram o suprimento adicional de calor para um leito vibro-fluidizado com um cilindro horizontal aquecido. O material utilizado foi *glass ballotini* seco e úmido com glicerina, para a determinação do coeficiente de transferência de

calor. Observaram um aumento deste coeficiente devido à utilização de vibração e fluidização combinadas e uma redução deste quando há presença de umidade superficial nas partículas.

PAN et al. (1997 - a) mostraram que o secador vibro-fluidizado (SVF) vem se tornando uma técnica bastante competitiva atualmente, pois além de oferecer uma operação contínua sob pressão atmosférica, tempos de secagem menores e menor consumo de energia, mantêm ou melhoram o sabor e os nutrientes dos alimentos em comparação à secagem liofilizada (que tem a desvantagem do alto custo). Os autores utilizaram um secador vibro-fluidizado vertical (Figura 23) e cenouras cortadas em cubos para verificar o efeito da adição de um estágio de repouso (*tempering period*). Comprovaram o efeito redutor do *tempering* no tempo total de secagem e no consumo de energia total, além do SVF (secador vibro-fluidizado) oferecer um tempo de secagem muito menor comparado a um secador de bandejas.

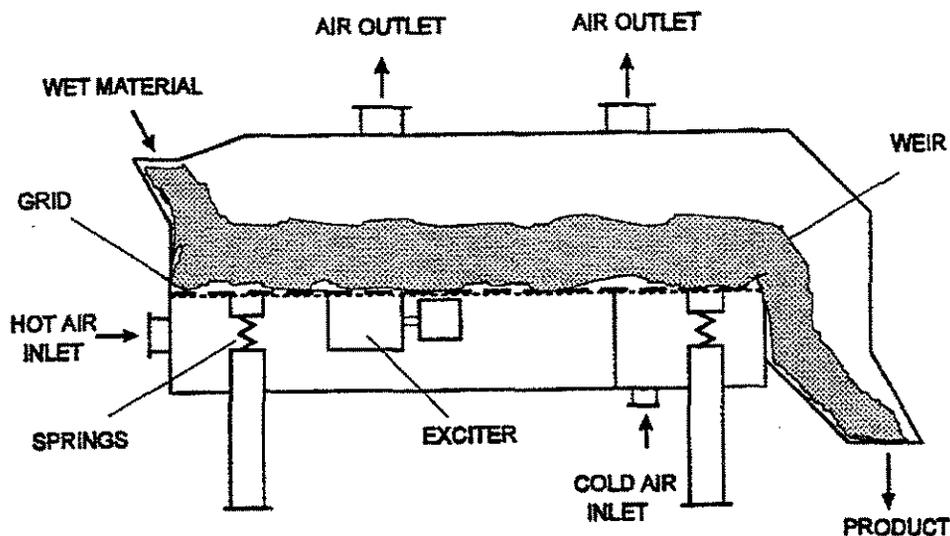


Fonte: PAN et al. (1997 - a)

Figura 23: Esquema de montagem do secador vibro-fluidizado.

Neste mesmo secador os autores (PAN et al., 1995) secaram uma suspensão de bactérias fotossintéticas em um leito contínuo e em batelada de partículas porosas inertes. Estas bactérias são importantes na decomposição de compostos orgânicos contribuindo assim para o controle da poluição ambiental. Infelizmente estas bactérias *in natura* não podem ser armazenadas por um período longo de tempo, necessitando portanto de um processo de estocagem que garanta a eficiência das mesmas. O método utilizado, em princípio, foi a secagem a vácuo e a liofilizada, mas que tinha o inconveniente do alto custo. Assim a secagem vibro-fluidizada foi utilizada e mostrou-se eficiente na secagem de materiais biológicos líquidos absorvidos em partículas porosas inertes.

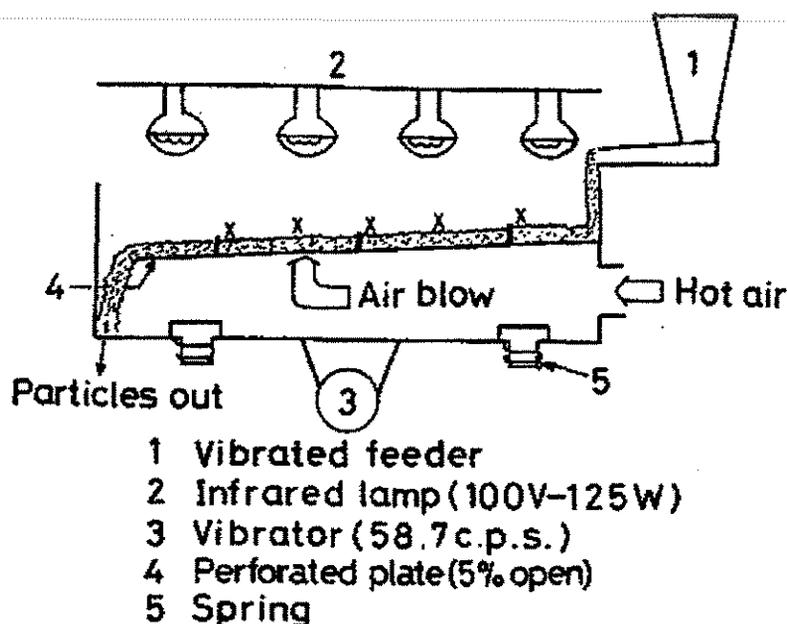
Em um outro trabalho PAN et al. (1997 - b) compararam a secagem de Moyu (planta herbácea chinesa) no SVF anterior (laboratorial), em um SVF horizontal (Figura 24) em escala, e em um secador de bandejas. A extrapolação dos dados laboratoriais para uma escala industrial foi comprovada e um secador de três estágios foi sugerida.



Fonte: PAN et al. (1997 - b)

Figura 24: Secador de leito vibro-fluidizado contínuo.

HASATANI, ITAYA e MIURA (1991) sugeriram um secador vibro fluidizado inclinado para uma melhor mistura das partículas na direção do comprimento do secador, além de oferecer as vantagens conhecidas de um secador vibro-fluidizado (estrutura simples, a operação contínua é fácil, a transferência de calor e massa entre as partículas é aumentada, redução da velocidade de fluidização, não formação de aglomerados e homogeneidade da umidade do produto). Uma fonte de energia radiativa foi utilizada como fonte extra de energia térmica e foi comprovado o aumento da taxa de secagem com este tipo de aparato (Figura 25).

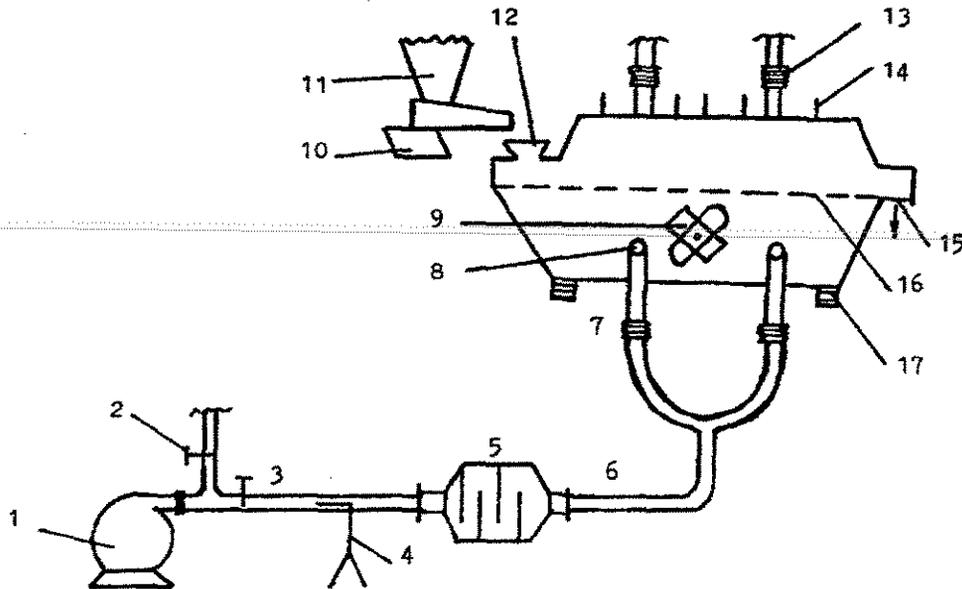


Fonte: HASATANI, ITAYA e MIURA (1991)

Figura 25: Secador vibro-fluidizado (SVF) com energia radiativa e convectiva.

Desde que o estudo hidrodinâmico em um SVF pode ser caracterizado pelo tempo médio de residência e pela distribuição do tempo de residência de um material particulado no leito, é de suma importância o estudo destes parâmetros já que estes influem no conteúdo de água e na

temperatura final do produto. HAN, MAI e GU (1991) verificaram o efeito da intensidade da vibração, do fluxo de ar, da vazão de sólidos, altura do leito e do tamanho das partículas no tempo de residência de trigo em um SVF (Figura 26). Comprovaram, também, o aumento da taxa de secagem constante com um aumento da vibração.

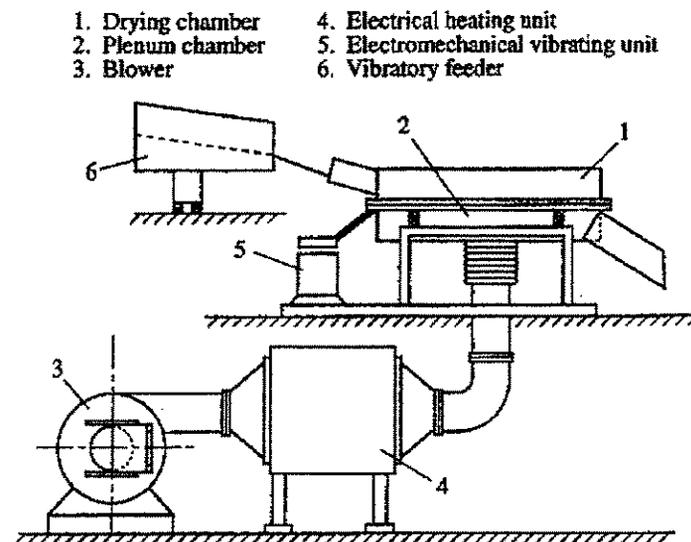


Fonte: HAN, MAY e GU (1991)

Figura 26: Secador vibro-fluidizado.

Onde: 1 = ventilador; 2 = *by pass*; 3 = válvula de controle; 4 = tubo de Pitot; 5 = aquecedor; 6 = termômetro; 7 = conexão flexível; 8 = entrada de ar quente; 9 = motor vibratório; 10 = alimentador vibratório; 11 = moega; 12 = entrada do produto úmido; 13 = ar de exaustão; 14 = tubo de amostra; 15 = saída de produto; 16 = placa distribuidora; 17 = molas.

RAMESH e SRINIVASA RAO (1996) estudaram a secagem de arroz cozido em um SVF. A escolha deste tipo de secador foi baseada na alta taxa de transferência de calor e massa e do menor tempo de residência. Sendo o produto adesivo, é essencial o uso de agentes de agitação e movimentação durante a secagem do arroz cozido, assim o SVF (Figura 27) foi utilizado por combinar o movimento vibratório com o íntimo contato da partícula com o gás. Neste estudo a equação de Page foi utilizada para representar a secagem em camada delgada e mostrou-se adequada para explicar a secagem no SVF. Os autores concluíram que os resultados, segundo a equação de Page, foram similares aos obtidos em camada delgada e o tempo de secagem pode ser facilmente determinado uma vez determinados os parâmetros de secagem da equação de Page e conhecendo o conteúdo de água inicial e final (desejado) do produto a uma dada temperatura.



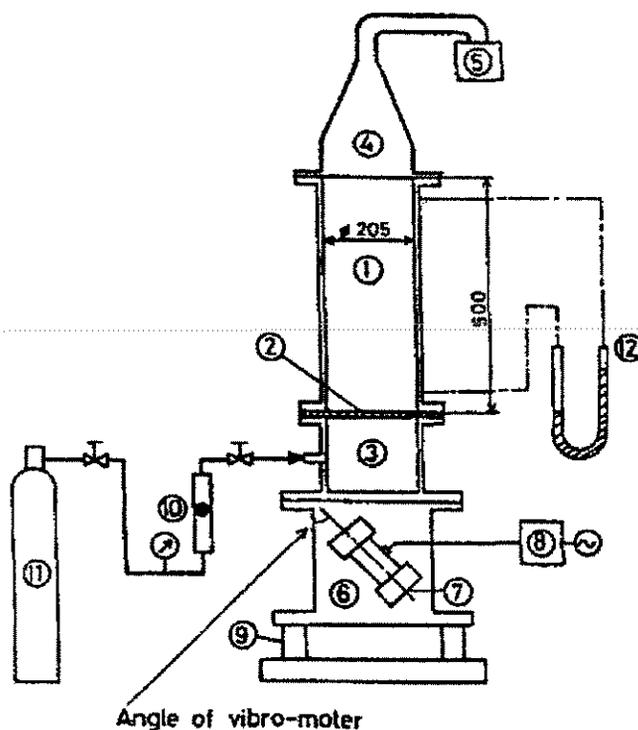
Fonte: RAMESH e SRINIVASA RAO (1996).

Figura 27: Secador vibro-fluidizado.

Utilizando este mesmo secador os autores também estudaram a aplicação de Redes Artificiais Neurais (RAN) para investigar a secagem do arroz cozido (RAMESH, KUMAR e SRINIVASA RAO, 1996). As RANs estão sendo utilizadas atualmente para resolver uma grande variedade de problemas em ciência e engenharia, dentre eles a resolução de problemas de secagem de produtos alimentares. Em oposição às técnicas de modelagem, como: transferência simultânea de calor e massa, modelos cinéticos, modelos difusionais, modelos de fase e análises de regressão, a RAN pode suportar mais de duas variáveis para predizer dois ou mais parâmetros de saída. Como conclusão a RAN mostrou ser uma ferramenta em potencial para desenvolver um modelo de determinação de parâmetros de processos, especialmente quando os modelos existentes não podem suportar mais do que duas variáveis.

MORI et al. (1991) desenvolveram um tipo especial de leito vibro fluidizado para partículas muito finas, onde a direção da vibração pode ser alterada mudando o ângulo em que o moto-vibrador está preso (Figura 28). Os autores também descrevem a dificuldade em se fluidizar partículas menores do que 10 a 30 μm devido ao fenômeno do *channeling*. Esta classe de partículas segundo Morooka (Aput: MORI et al., 1991), pode ser fluidizada em leitos fluidizados convencionais, pois elas se aglomeram em partículas secundárias maiores. Contudo, em colunas muito largas, não é fácil conseguir a fluidização destas partículas em todo o leito, e um aumento na velocidade do gás ocasiona uma separação a um extremo tal, que algumas partículas são perdidas. Assim os autores sugerem o uso de leitos vibro-fluidizados que satisfatoriamente conseguem atingir a fluidização de partículas muito finas com velocidades do ar baixas. No experimento, o nitrogênio foi usado como gás fluidizante para não ter a influência da umidade no processo. Como conclusão, os autores confirmaram a eficiência de um leito vibro-

fluidizado, na secagem de partículas muito finas com extrema dificuldade para fluidizar, e cada tipo de partícula tem sua própria frequência ótima de vibração para uma melhor fluidização.



Fonte: MORI et al. (1991).

Figura 28: Secador vibro-fluidizado

Onde: 1 = leito fluidizado; 2 = distribuidor; 3 = *plenum*; 4 = placa livre; 5 = filtro; 6 = bloco vibratório; 7 = motor vibratório; 8 = inversor; 9 = mola; 10 = flutuômetro; 11 = cilindro de N₂; 12 = manômetro.

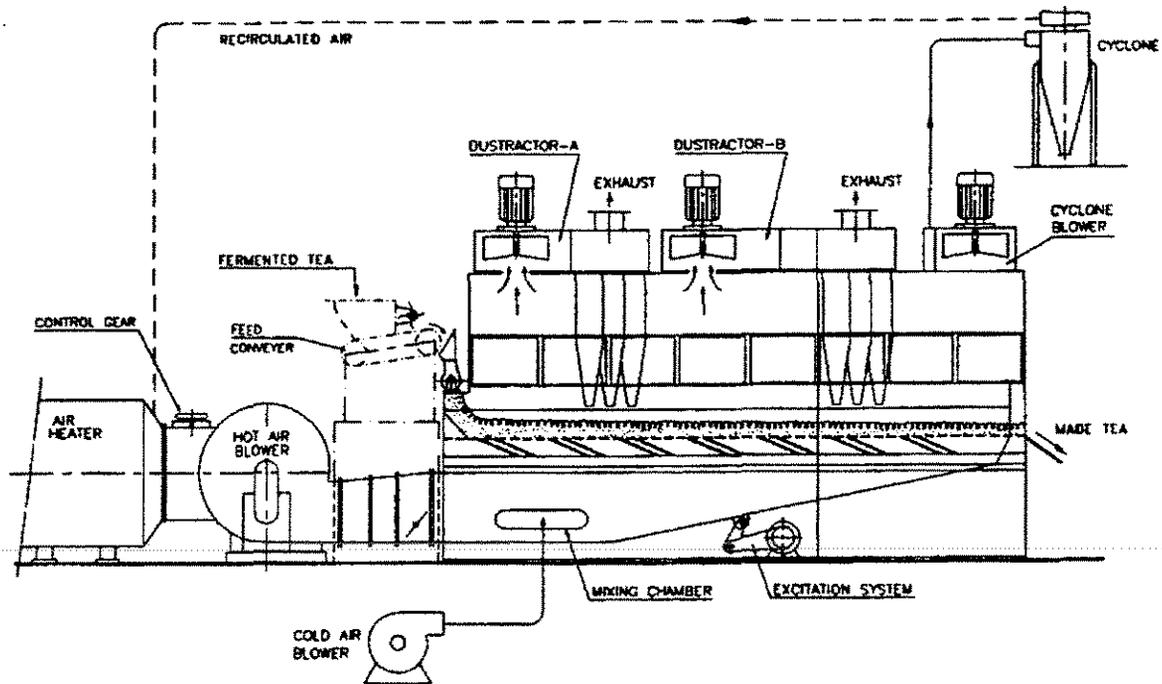
MARELLA, PATEL e SHAH (1997) afirmaram que a combinação de agitação mecânica, centrífuga e vibração com a fluidização para garantir melhorias no produto e economia de energia têm se tornado uma prática comum atualmente. A pesquisa em secagem em leitos fluidizados é baseada em tentativa e erro, e poucos modelos matemáticos são disponíveis na literatura. Assim, os autores propuseram um modelo matemático de remoção de umidade em um secador vibro-fluidizado com os diferentes parâmetros que afetam esta remoção. A caseína foi utilizada como material de estudo e a razão de umidade foi expressa como:

$$\frac{M_m}{M_o} = f\left(\frac{E_t}{S_b}, V_b, A_v, d_p, m_{pm}, m_{pd}, m_o, L, t\right) \quad (51)$$

Onde: M_m = conteúdo médio de umidade; M_o = conteúdo inicial de umidade (base seca); E_t = energia total do ar; S_b = área do leito; V_b = volume do leito; A_v = aceleração vibratória; d_p = diâmetro da partícula; m_{pm} = massa média do produto; m_{pd} = massa seca do produto; m_o = conteúdo inicial de umidade (kg); L = calor latente de vaporização; t = tempo.

O modelo mostrou uma correlação muito boa e pode ser utilizado para o projeto de sistemas de leitos fluidizados para a secagem da caseína.

SHAH e GOYEL (1995) desenvolveram um SVF para a secagem de chá. Além do desenvolvimento de um novo tipo de secador para a indústria de chá, os princípios de secagem em leito vibro-fluidizado foram utilizados para aumentar a qualidade do chá e aumentar a eficiência térmica do processo. O desenvolvimento de sistemas de limpeza de impurezas também foi estudado, já que a qualidade do chá está diretamente ligada a sua pureza (Figura 29).

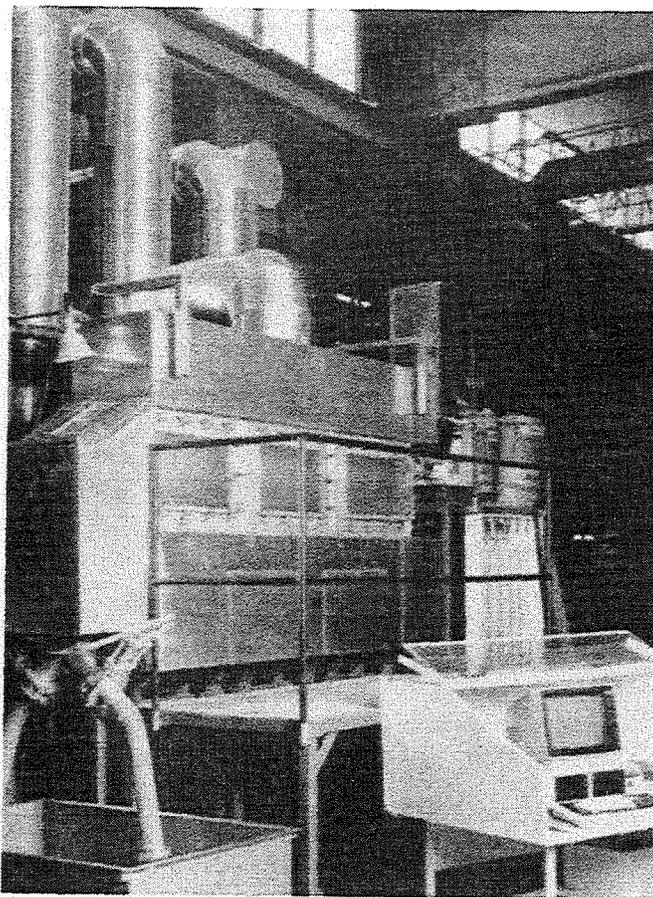


Fonte: SHAH e GOYEL (1995).

Figura 29: Sistema de secagem e limpeza de chá.

DONG et al. (1991), utilizando sílica gel, ácido cítrico e milho, comprovaram o efeito redutor da vibração na taxa de secagem durante o período de secagem a taxa decrescente. Na amplitude ótima dos parâmetros de vibração, o conteúdo de umidade crítica decresceu significativamente quando comparado à secagem em leitos fluidizados convencionais. O secador utilizado foi do mesmo esquema proposto por PAN et al. (1997 - a). A razão para o decréscimo do conteúdo crítico de umidade é devida a vibração quebrar o aglomerado de partículas e resultar em uma melhor fluidização e um aumento da área superficial para a secagem. Outro motivo se baseia no fato de que a vibração pode destruir parcialmente a capilaridade da água entre os poros e a matriz sólida, enquanto a viscosidade da água efetiva é reduzida devido à vibração.

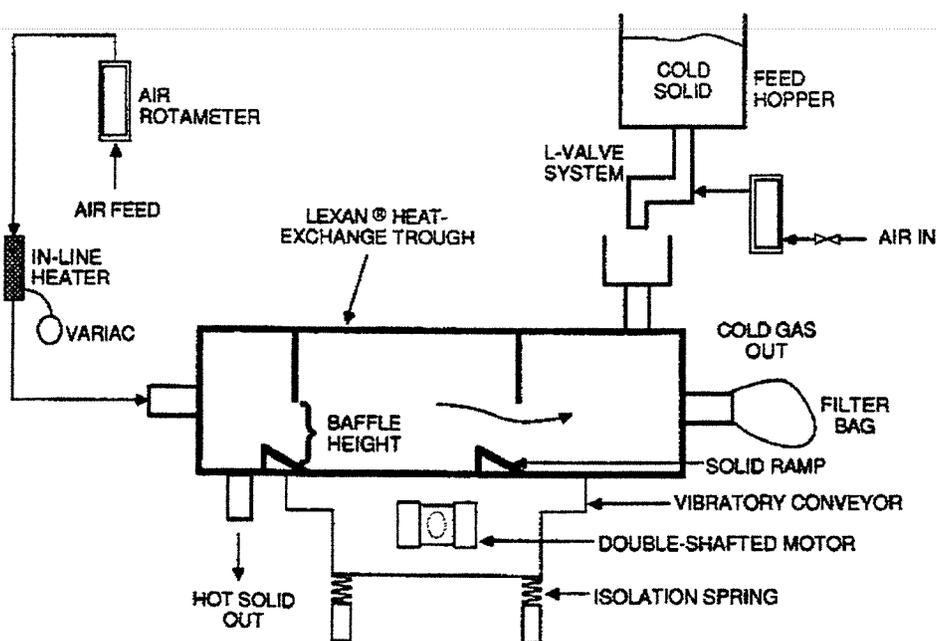
NILSSON e WIMMERSTEDT (1987) utilizaram um SVF horizontal (Figura 30) para desenvolver dois modelos de fluxo longitudinal baseados nas isotermas de sorção, cinética de secagem e nos dados de transporte do material. Quatro diferentes materiais foram utilizados nos experimentos: areia e penta-eritrol (não-higroscópicos), sódio formato (higroscópico) e apatita. O secador foi vibrado e os níveis de vibração foram encontrados para aumentar a mistura de sólidos e para reduzir o fenômeno de *channelling* no leito úmido. Os autores concluíram que ambos os modelos (dispersão e *plug flow* puro) se ajustaram muito bem aos dados experimentais, com a predição praticamente igual do comprimento do leito suficiente para atingir a umidade de saída do produto.



Fonte: NILSSON e WIMMERSTEDT (1987)

Figura 30: Secador vibro-fluidizado em escala piloto.

As técnicas de vibro-fluidização também podem ser utilizadas para outros fins além da secagem. CHEAH et al. (1988) investigaram seu uso em um trocador de calor devido a sua excelente característica de transferência condutiva de calor. O estudo baseou-se na avaliação de um processo de reaproveitamento da energia térmica de um gás quente de exaustão pelo contato direto deste gás com um leito vibro-fluidizado de sólidos em contra corrente (Figura 31). As variáveis estudadas neste trabalho foram: fluxo de gás, vazão de sólidos, altura e quantidade de defletores de gás e condições de vibração (ângulo de ataque, frequência e amplitude).



Fonte: CHEAH et al. (1988).

Figura 31: Sistema de fluxo vibro-fluidizado

JINESCU e BALABAN (1980) utilizaram um leito vibro-fluidizado vertical para o estudo da cinética de secagem de poliestireno com alto conteúdo de umidade. Uma equação empírica para a taxa de secagem foi obtida para o poliestireno em termos dos seguintes fatores: diâmetro

volumétrico das partículas, umidade livre inicial, índice de fluidização, razão entre a altura e o diâmetro da coluna, razão entre a aceleração vibracional e gravitacional, temperatura do agente de fluidização e natureza das partículas.

THOMAS et al. (1987) propuseram uma técnica de medida que utiliza um circuito digital baseado em um *loop* de fase travado para permitir visualizar, fotografar e medir o fenômeno de dependência de fase em sistemas cíclicos. Esta técnica elimina a necessidade de métodos caros e tediosos de cinematografia ultra-rápida. A técnica permite dados quantitativos acurados em fenômenos de dependência de fase cíclicos que ocorrem com sistemas com a mesma frequência da força vibracional. Foi utilizado um leito vibro-fluidizado ou vibrátil nos quais a fluidização ocorre somente pela vibração. Os mecanismos exatos de circulação de sólidos, forma do leito, transferência de calor e outras características com um longo período de tempo constante, são afetados por fenômenos de dependência de fase. O sistema proposto permite observar o leito em qualquer ângulo de fase para assim entender completamente os mecanismos em um leito vibrátil, além de possuir uma alta resolução com muitos detalhes.

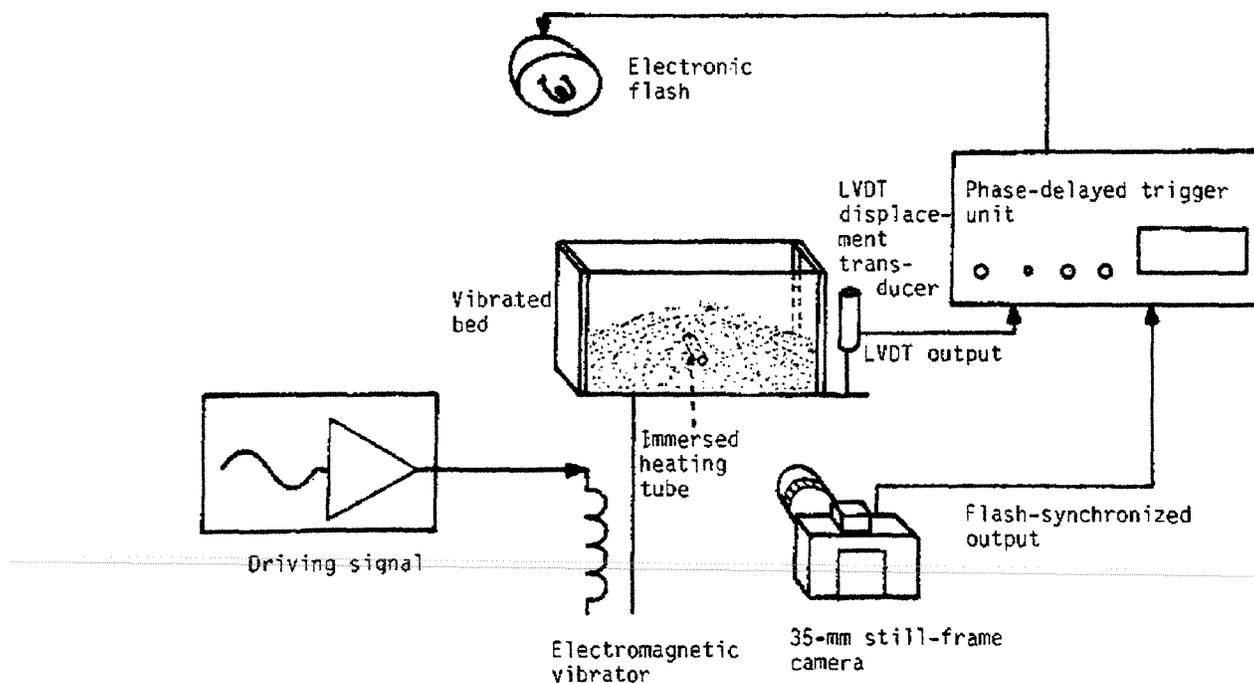
Características típicas de leitos vibráteis examinadas nesse estudo, tais como razão de expansão do leito, taxa de circulação de sólidos e coeficientes de transferência de calor entre superfície e leito, são quantidades temporais medianas, desde que elas são comumente medidas em um período de tempo que é longo, comparado com o período de vibração. Entretanto, tais quantidades são influenciadas por fenômenos de dependência de fase que ocorrem dentro de cada ciclo de vibração, por exemplo: a variação da pressão entre a base do leito e a base do compartimento (vaso). Os autores assim desenvolveram um método experimental que permitiu

observar, fotografar e medir fenômenos de dependência de fase em sistemas cíclicos como um leito vibrátil (vibro-fluidizado). Algumas destas características foram as seguintes:

- A variação do espaço ocupado pelo ar entre a base do leito e a base vibratória do compartimento (vaso), em particular, a natureza da formação e da quebra da bolha de ar;
- A presença e a variação de dependência de fase das partículas livres de bolhas de ar que envolvem uma superfície quente imersa horizontalmente na leito vibrátil;
- A natureza rarefeita ou expandida do topo da superfície do leito.

O método proposto usa um circuito eletrônico que detecta o ponto que corta o zero positivo do compartimento em cada ciclo de vibração (Figura 32). É possível observar o leito a um dado ângulo de fase iluminando o leito com uma luz estroboscópica que é continuamente disparada a cada ciclo por um pulso eletrônico. Este arranjo permite a observação contínua das características do leito em um particular ângulo de fase. Os dados cíclicos podem ser facilmente combinados com o movimento do compartimento vibratório. Exemplos de propriedade de dependência de fase de um leito vibrátil que podem ser medidos desta maneira são mostrados a seguir (Figura 32):

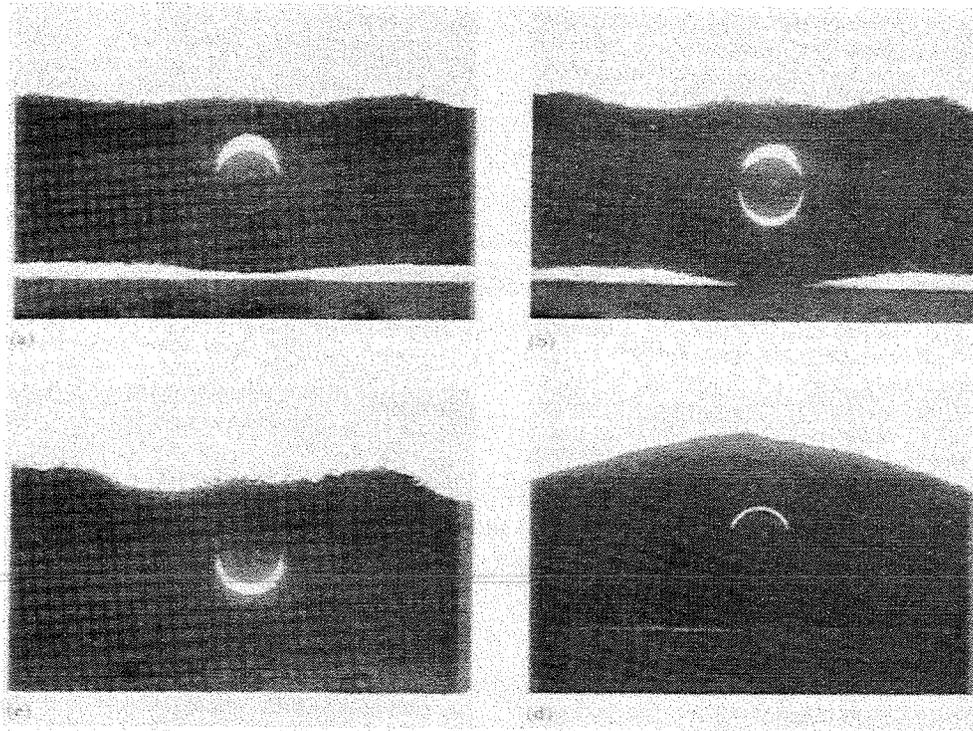
- A pressão entre a base do leito vibrátil e a base do compartimento vibrátil;
- A variação na porosidade do leito com o ângulo de fase.



Fonte: THOMAS et al. (1987)

Figura 32: Esquema para a obtenção de fotografias de alta resolução de leitos vibráteis.

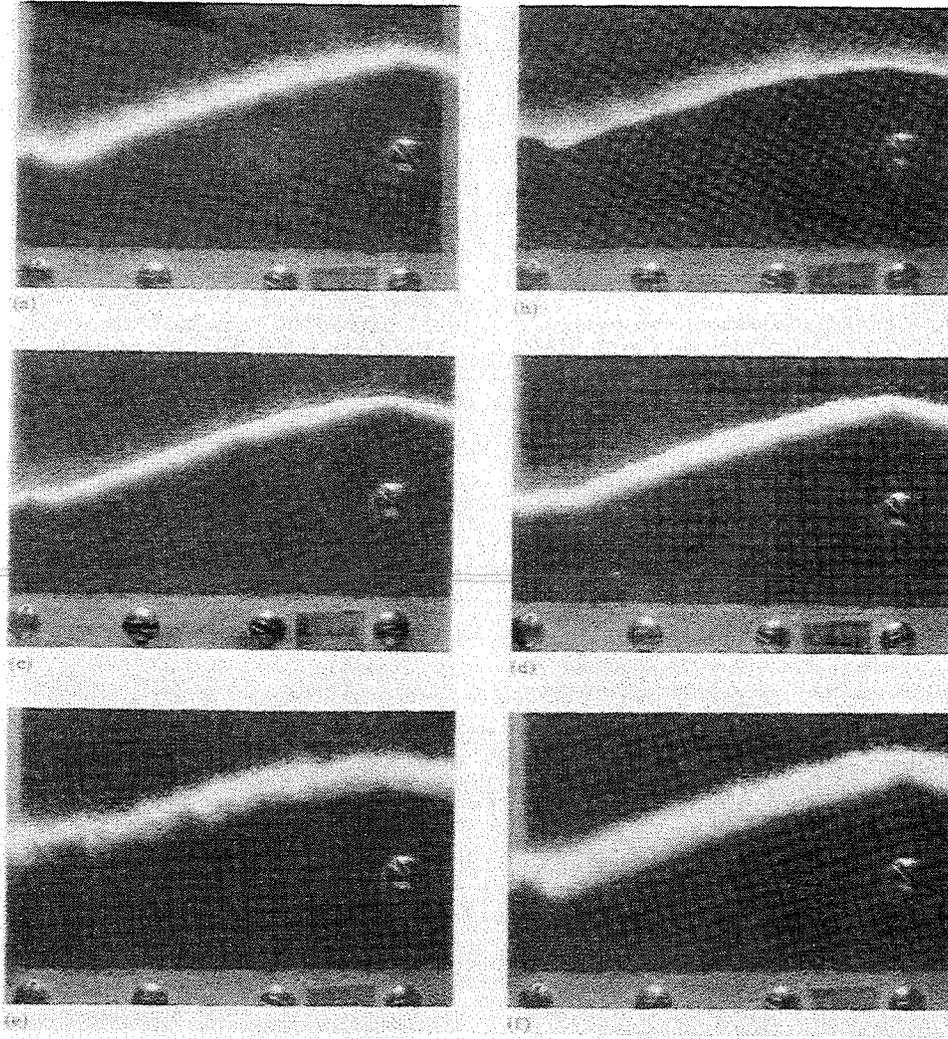
As fotografias da Figura 33 mostram o desenvolvimento de aberturas de ar, envoltas no tubo imerso de aquecimento, assim como entre o leito do sólido e a base do vaso em um leito vibrátil de *master beads*. Figura (a): partículas de diâmetro de 0,592 a 0,841mm, ângulo de fase 211°. Figura (b): partículas de diâmetro de 0,592 a 0,841mm, ângulo de fase 268°. Figura (c): partículas de diâmetro de 0,592 a 0,841mm, ângulo de fase 345°. Figura (d): partículas de diâmetro de 0,149 a 0,210mm, ângulo de fase 150°. Notam-se maiores aberturas de ar em partículas maiores.



Fonte: THOMAS et al. (1987)

Figura 33: Fotografias com iluminação traseira de um leito vibrátil.

Fotografias com iluminação superior mostrando a evolução da zona rarefeita no topo da superfície de um leito vibrátil de grânulos de vidro (diâmetro de 0,149 a 0,210mm) estão mostradas na Figura 34, onde na Figura (a): ângulo de fase de 15° ; Figura (b): ângulo de fase de 42° ; Figura (c): ângulo de fase de 82° ; Figura (d): ângulo de fase de 150° ; Figura (e): ângulo de fase de 15° ; Figura (f): ângulo de fase de 270° .

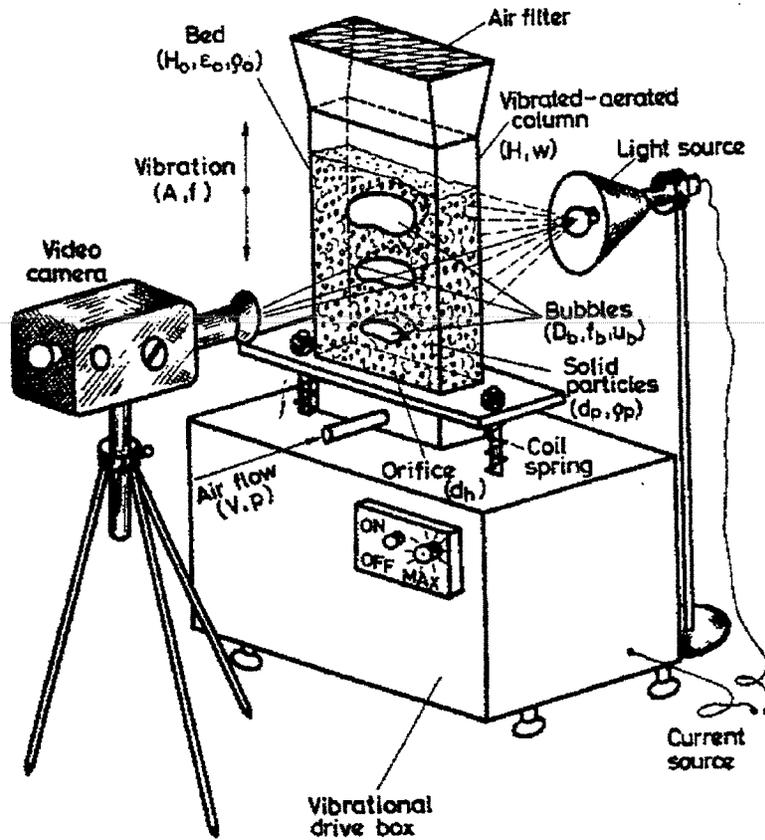


Fonte: THOMAS et al. (1987)

Figura 34: Fotografias com iluminação superior de um leito vibrátil.

ERDÉSZ (1990) resumiu os estudos hidrodinâmicos de leitos vibro-fluidizados. Características globais, como por exemplo, perda de carga, velocidade mínima de fluidização e porosidade do leito foram comparadas e as suas alterações são mostradas em termos da variação da intensidade da vibração. A hidrodinâmica foi mostrada em diagramas de Euler-Reynolds

sobre uma grande variedade de parâmetros de vibração. Formações de bolhas no leito foram estudadas, utilizando o aparato mostrado na Figura 35.



Fonte: ERDÉSZ, 1990

Figura 35: Montagem para a observação de bolhas no leito.

IV: MATERIAL

4.1 PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL

1. Água destilada;
2. Proveta graduada de 100ml, precisão de 0,5ml para a casca e pele;
3. Balança semi analítica, marca Scientech, modelo SL 3000, precisão de 0,01 g;
4. Casca e pele de ovo.

4.2 PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE

1. Proveta graduada de 50ml, precisão de 0,25ml para a casca e de 250ml, precisão de 1ml para a pele;
2. Balança semi analítica, marca Scientech, modelo SL 3000, precisão de 0,01 g;
3. Casca e pele de ovo.

4.3 PARA A DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO

1. Aparelho “Granutest”, marca PRODUTEST;
2. Peneiras de mesh 6 (3,36mm), 8 (2,38mm), 10 (1,68mm), 14 (1,19mm), 28 (0,59) e 48 (0,297mm) para a casca;
3. Peneiras de mesh 0,25” (6,35mm), 4 (4,76mm), 6 (3,36mm), 8 (2,38mm), 14 (1,19mm), 28 (0,59) e 48 (0,297mm) para a pele;
4. Balança semi analítica, marca Scientech, modelo SL 3000, precisão de 0,01 g.

4.4 PARA A DETERMINAÇÃO DA ESFERICIDADE

1. Micrômetro digital, precisão 0,001mm.

4.5 PARA A DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FLUIDODINÂMICAS

1. Aparelho para determinação da perda de carga e expansão do leito, composto de uma coluna de vidro temperado de 1,0m de altura e 0,144m de diâmetro interno, escala para a medida da altura do leito e seis tomadas de pressão sendo que só as duas primeiras foram utilizadas (distância entre as duas tomadas: 0,107m);
 2. Manômetro em “U” de coluna de água (para a medição da perda de carga);
 3. Anemômetro digital com escala em pés/min;
 4. Ventilador centrífugo marca ASTEN de 2200W;
 5. Inversor de frequência marca Siemens, modelo MicroMaster de 5cv (para o controle da velocidade do ar).
-

4.6 PARA A DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

1. Sonda constituída de uma base de PVC, uma agulha hipodérmica de aço, conectores, parafusos, fio de níquel-cromo de 0,08m de comprimento que promoverá o aquecimento e termopar ;
2. Fonte marca EMS de alimentação regulada digital de 30V/2A, com indicador de tensão e corrente;
3. Sistema de aquisição de dados (datalogger) marca Electronic Controls Design (ECD), modelo 5100 Logger Lab, de 40 canais;
4. Proveta graduada de 50ml para a acomodação do material;
5. Casca de ovo.

4.7 PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO

1. Aparelho para determinação da perda de carga e expansão do leito, composto de uma coluna de vidro temperado de 1,0m de altura e 0,144m de diâmetro interno e 26 termopares tipo T;
2. Sistema de aquisição de dados (*data logger*) marca Electronic Controls Design (ECD), modelo 5100 Logger Lab, de 40 canais;
3. Ventilador centrífugo marca ASTEN de 2200W;
4. Inversor de frequência marca Siemens, modelo MicroMaster de 5cv (para o controle da velocidade do ar);
5. Controlador de temperatura micro processado marca Contemp, modelo PXV 4;
6. Sensor de temperatura tipo PT 100, ligação a 3 fios;
7. Anemômetro digital marca AirFlow, com escala em pés/min.

4.8 PARA A DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE DE ÁGUA

1. Casca de ovo;
2. Balança analítica, marca Sartorius, modelo 2006 MP, precisão de 0,0001 g (utilizada para a determinação da massa seca);
3. Estufa a ar forçado, marca Fanem;
4. Cadinhos de papel de alumínio;
5. Dessecadores (potes Marina da Santa Marina);
6. Tripés de PVC;
7. Soluções salinas saturadas.

4.9 PARA OS TESTES DE SECAGEM

1. Tubo de Pitot (manômetro diferencial), marca Airflow, modelo Type 5 Test Set, escala utilizada de 0 a 2,5 kPa \pm 1 Pa;
2. Fatiador com cubos de 10 mm de aresta;
3. Cenoura *in natura*;
4. Balança semi analítica, marca Scientech, modelo SL 3000, precisão de 0,01 g (utilizada no primeiro experimento);
5. Balança semi analítica, marca AnD, modelo EK – 12 KG, 12000 g \pm 1 g (utilizada nos demais experimentos);
6. Balança analítica, marca Sartorius, modelo 2006 MP, precisão de 0,00001 g (utilizada para a determinação da massa seca);
7. Anemômetro digital de ventoinha, marca Airflow, modelo LCA 6000, precisão 0,01 m/s;
8. Termo-higrômetro OAKTON, marca Cole Parmer, modelo 37250-10, escala de -10°C a 50°C de temperatura e de 0% a 100% de umidade relativa;
9. Estufa a ar forçado, marca Fanem;
10. Cadinhos de papel de alumínio.

4.10 SECADOR VIBRO-FLUIDIZADO

1. 01 Secador de leite vibro-fluidizado em aço inox AISI 304, patente industrial INPI nº 9302443;
2. 01 Tela Pakscreens de abertura 0,125 mm;
3. 02 Moto vibradores de 1500 W cada.

4.11 CAIXA DE RESISTÊNCIA:

1. 10 peças – resistência tubular com aletas helicoidais – 1500 W – 220 V;
2. 04 peças - resistência tubular com aletas helicoidais – 1000 W – 220 V;
3. 02 peças - resistência tubular com aletas helicoidais – 500 W – 220 V;
4. 01 peça retangular de aço galvanizado para a caixa de resistência;
5. 02 coifas de aço galvanizado para a caixa de resistência;
6. Chapa (manta) de amianto vermelho de 5 mm para isolamento;
7. 04 cintas de barra de ferro chata SAE 1010/20 22,22x4,47 mm.

4.12 SISTEMA DE VENTILAÇÃO

1. Ventilador centrífugo;
2. Motor trifásico de 7,5 Hp;
3. Tubulação de aço de 150 mm de diâmetro;
4. Tubulação de PVC de 150 mm de diâmetro;
5. Redutor de 200 para 150 mm;
6. Cotovelos e “T”s de 150 mm de diâmetro;
7. Tecido de amianto branco para a conexão entre o secador e a tubulação de ar quente.

4.13 QUADRO DE COMANDO DO CONTROLADOR DIGITAL

1. 05 controladores de temperatura micro processados Contemp PXV 4 (só será utilizado um);
2. 01 disjuntor bipolar;
3. 01 sensor de temperatura tipo PT 100, ligação a 3 fios.

4.14 QUADRO GERAL DE COMANDO (QUADRO DE FORÇA)

1. 05 disjuntores termomagnéticos GE bipolar de 20 A;
2. 06 disjuntores termomagnéticos GE bipolar de 10 A;
3. 05 lâmpadas piloto tipo “olho de boi”;
4. 05 chaves “on – off”;
5. 01 quadro de força de 760x480x170 mm;
6. 04 contadores Telemecanique LC1 D2510;
7. 01 contator Telemecanique LC1 D0910;
8. 01 disjuntor termomagnético GE tripolar de 150 A;
9. Cabo elétrico 35 mm²;
10. Fio elétrico 6 mm², ligação entre o disjuntor de 150 A e os contadores;
11. Fio elétrico 4 mm², ligação entre os contadores e os disjuntores e entre os disjuntores e as resistências;
12. Fio elétrico, ligação entre comando do contator, chave “on – off” e lâmpada piloto;

4.15 QUADRO DE COMANDO DOS MOTOVIBRADORES

1. 01 lâmpada piloto tipo “olho de boi”;
2. 01 chave “on – off”;
3. 01 quadro de força de mm;
4. 01 contator Siemens 3TB42 – 12 A;

4.16 CENOURA

A cenoura (*Daucus carota* L.), uma raiz de grande aceitação no mercado, foi utilizada para os estudos de secagem. Apesar desta raiz não ser usualmente encontrada na forma de um vegetal seco, ela possui uma forma geométrica bem definida após o corte, facilitando os estudos de secagem. A cenoura foi utilizada em cubos com 10mm de aresta.

4.17 CASCA DE OVO

A casca de ovo triturada é um material biológico desuniforme, além de ser poroso e de difícil caracterização devido à sua forma geométrica irregular e tamanho de suas partículas.

Devido as suas propriedades físicas diferentes, o produto casca de ovo foi dividido em casca de ovo propriamente dita e pele. E assim procederam-se todos os estudos considerando os dois produtos em separado.

A casca foi cedida pela empresa Ito Ovos, sediada em Diadema - SP.

V: METODOLOGIA

5.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

5.1.1 *Densidade real*

A determinação foi feita utilizando a água destilada como fluido picnométrico, tomando-se três provetas graduadas de 100ml. Feito isso, coloca-se em cada uma destas 50 ml de água destilada. Em seguida, pesam-se três amostras de aproximadamente 25 g de produto, colocando-as nas provetas. Então, anota-se o volume final logo em seguida, determinando-se assim o volume de produto.

A densidade real é então obtida por:

$$\rho_{\text{real}} = \frac{M_{\text{amostra}}}{V_{\text{final}} - 50} \quad (52)$$

5.1.2 *Densidade aparente*

O método mais acurado para a determinação da densidade aparente é através da obtenção do volume conhecendo-se o peso e densidade do fluido picnométrico, mas no presente experimento, para facilitar a determinação, o volume será obtido através da leitura direta na proveta graduada.

Para a determinação da densidade aparente, necessita-se de um recipiente com volume conhecido. Esse recipiente é pesado isoladamente, obtendo-se o seu peso tara. Em seguida, coloca-se o produto em seu interior até a marca indicativa, sem que haja qualquer tipo de

compactação da amostra, de forma que ela fique o mais natural possível. Colocada a amostra, pesa-se o recipiente novamente.

A densidade aparente é dada pela expressão abaixo:

$$\rho_{\text{ap.}} = \frac{M_{\text{conj.}} - M_{\text{recip.}}}{\text{Vol. recip.}} \quad (53)$$

5.1.3 Determinação do diâmetro médio da partícula

O diâmetro médio da casa de ovo foi determinado, realizando-se peneiramento do material com peneiras de diâmetro conhecido. Determinou-se a fração mássica retida em cada peneira e calculou-se o diâmetro médio da casca e da pele.

Foram feitas três repetições, submetendo amostras a um peneiramento no aparelho GRANUTEST por 10 minutos a um nível 7 de vibração.

O diâmetro médio da partícula foi determinado de acordo com o descrito por KUNII e LEVENSPIEL (1969), sendo o seu valor calculado pela expressão:

$$d_p = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (54)$$

5.1.4 Esfericidade

A esfericidade é calculada segundo a fórmula abaixo, que corresponde à equação de definição (KUNII e LEVENSPIEL, 1969).

$$\phi = \left(\frac{\text{Superfície da esfera}}{\text{Superfície total da partícula}} \right)_{\text{Para um mesmo volume}} \quad (55)$$

Com o diâmetro médio determinado pelo método das peneiras determina-se a superfície total da partícula:

$$S_{\text{ptotal}} = \frac{\pi}{2} (d_p)^2 + \pi \cdot d_p \cdot e_p \quad (56)$$

A superfície de um lado da partícula é dada por:

$$S_p = \frac{\pi}{4} (d_p)^2 \quad (57)$$

Toma-se uma amostra aleatória de 30 partículas (casca de ovo triturada) e mede-se a sua espessura com a auxílio do micrômetro. Em seguida determina-se o volume da partícula:

$$V_p = S_p \cdot e_p \quad (58)$$

Com estes volume determina-se o raio da esfera equivalente:

$$r_e = \left(\frac{3 \cdot V_p}{4 \cdot \pi} \right)^{1/3} \quad (59)$$

E a superfície da esfera:

$$S_e = 4 \cdot \pi \cdot r_e^2 \quad (60)$$

Substituindo a superfície da esfera e da partícula na equação 55, encontra-se a esfericidade.

5.2 PROPRIEDADES FLUIDODINÂMICAS DA CASCA DE OVO

5.2.1 Perda de carga

Utilizando o tubo de vidro descrito no item 4.5 e mostrado na Figura 36, colocou-se aproximadamente 140 mm de coluna de material no tubo (suficiente para cobrir a segunda tomada de pressão, distanciada 0,107m da primeira). Ligou-se o ventilador e para várias velocidades mediu-se: a velocidade do ar na saída do aparelho com um anemômetro digital, a perda de carga no manômetro em “U” e a altura da coluna. Repetiu-se este experimento três vezes e a perda de carga era lida até a fluidização do material.

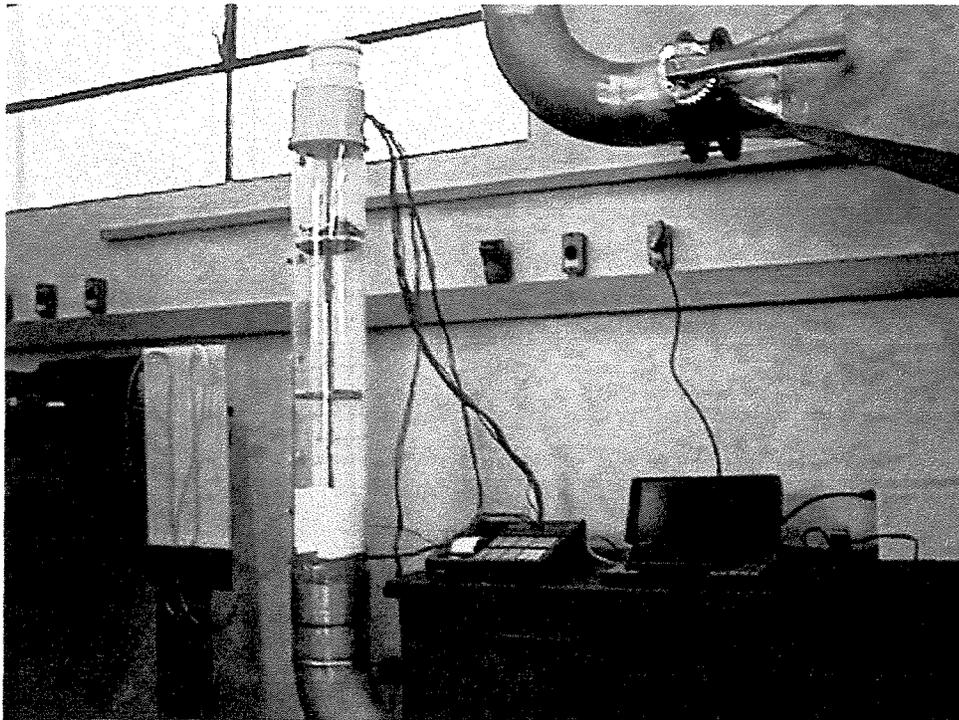


Figura 36: Aparelho para a determinação da perda de carga e transferência de calor.

Repetiu-se a leitura da velocidade três vezes para se obter uma média. Com este dado e tendo medido os diâmetros da boca do anemômetro e do aparelho, obtém-se o fluxo e velocidade do ar.

5.2.2 Determinação da velocidade mínima de fluidização e de arraste

Uma partícula em queda livre quando encontra um fluxo de ar ascendente fica sujeita a três forças: a força peso para baixo e as forças devido ao empuxo e à resistência do ar para cima. Quando essas três forças estiverem em equilíbrio, a velocidade da partícula será constante, denominada velocidade terminal.

Para esta determinação colocou-se uma pequena porção de amostra no tubo de vidro e variou-se a velocidade até se encontrar a mínima de fluidização e a de arraste do material.

A velocidade mínima de fluidização corresponde ao valor mínimo da velocidade para que ocorra a fluidização da matéria, ou seja, é o valor mínimo para que a massa de partículas mantenha-se suspensa.

A velocidade de arraste corresponde ao valor no qual as partículas se desprendem do leito, ou seja, é aproximadamente a velocidade de queda livre das partículas (KUNII e LEVENSPIEL, 1969).

5.2.3 Equação de Ergun

Para testar a validade da Equação de Ergun (equação 1), utilizaram-se os dados obtidos no tubo de vidro: a altura do leito, a velocidade do ar e a perda de carga por metro de coluna do leito.

Assim, calcula-se a porosidade pela Equação de Ergun (utilizando o software Mathematica) para cada um dos valores da altura do leito. Em paralelo, calcula-se a porosidade através da equação 4 e da equação 5.

5.2.4 Expansão do leito sólido

Duas correlações são feitas envolvendo a velocidade do ar, a porosidade do leito e a altura da coluna de material (equações 2 e 3). Na primeira correlação, os valores da velocidade são os obtidos pela Equação da vazão e pela área do tubo, enquanto que os valores da porosidade são os valores obtidos pela equação de Ergun (equação 1) utilizando as alturas H lidas correspondentes a cada ponto respectivo de tomada de velocidade.

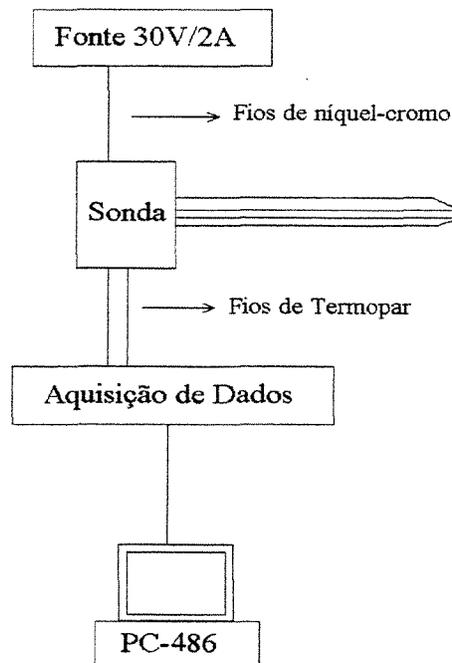
5.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

5.3.1 Condutividade térmica

Por se tratar de um material desagregado, foi necessário acondicionar o produto (casca de ovo) em algum frasco para que se obtenha um corpo de prova. Para tanto, utilizou-se uma proveta

graduada de 50ml, onde as amostras foram acondicionadas no momento da determinação experimental, tomando uma forma cilíndrica.

Utilizando o sistema de determinação de condutividade térmica mostrado a seguir, obtiveram-se os valores referentes ao produto estudado. As amostras foram acondicionadas na proveta e então inseriu-se a sonda, aguardando-se um determinado tempo até que a temperatura entrasse em equilíbrio. Neste momento, então, iniciou-se a determinação da condutividade, com os registros da variação da temperatura e tempo, a corrente e a tensão da fonte de alimentação que fornecem a potência da fonte de calor. Dividindo-se esta potência pelo comprimento do fio de resistência (0,16m), obteve-se o fator “q” da equação (10). Desta forma, utilizando-se esta equação, determinou-se o valor experimental da condutividade térmica para possibilitar o cálculo do número de Biot.



Fonte: PARK, MURR e SALVADEGO (1997)

Figura 37: Esquema do sistema de medição da condutividade térmica.

5.3.2 Coeficiente convectivo

Para a determinação do coeficiente convectivo foi utilizado o equipamento descrito anteriormente (para medir a perda de carga e transferência de calor), que consiste de um tubo de vidro temperado de 0,144m de diâmetro e 1m de altura; 26 termopares tipo T dispostos da seguinte maneira: seis radialmente na entrada do tubo, seis radialmente a 0,1m de altura (sólido), seis radialmente a 0,7m de altura (ar de saída) e oito longitudinalmente (0,04m entre eles atingindo uma altura total de 0,28m). Destes termopares somente foram utilizados os da entrada (medindo a temperatura do ar) e os dispostos longitudinalmente (medindo a temperatura do produto e do ar de saída).

A metodologia adotada foi a seguinte: ligava-se o sistema de aquecimento e ventilação e para uma dada vazão do ar (medida com o anemômetro) registravam-se as temperaturas dos termopares com o sistema de aquisição de dados (*Data logger*). Estes dados eram então transferidos para um micro computador para posterior análise.

Utilizando os dados de temperatura e as equações propostas anteriormente, determinou-se o coeficiente convectivo para coluna de recheio e transiente Newtoniano.

5.4 DETERMINAÇÃO DAS ISOTERMAS DE SORÇÃO PARA A CASCA DE OVO E PELE

Foi utilizado o método gravimétrico com registro contínuo de mudança de peso. Foram utilizados como recipientes, potes de vidro com fechamento hermético, da Santa Marina. Estes receberam soluções saturadas de sais que ofereciam ambientes com umidades relativas de 12 a 87%, em temperatura ambiente (controlada a aproximadamente 25°C), e tripés de PVC. Sobre estes tripés ficavam as amostras, colocadas em cadinhos de papel alumínio tarados em estufa de circulação forçada por duas horas à 105°C. Uma amostra de aproximadamente 10 g foi colocada diretamente dentro do cadinho.

Na Tabela 1, encontram-se listados os sais utilizados e as umidades relativas correspondentes, na temperatura ambiente.

Tabela 8: Dados das umidades relativas correspondentes aos sais utilizados.

<i>SAIS</i>	<i>UR %</i>
Cloreto de Lítio	12,0
Acetato de Potássio	22,7
Cloreto de Cálcio	32,0
Carbonato de Potássio	43,8
Brometo de Sódio	57,8
Nitrito de Sódio	64,3
Cloreto de Sódio	75,2
Cromato de Potássio	87,0

As pesagens periódicas das amostras foram feitas em uma balança analítica, até atingir peso constante, determinando-se assim a umidade de equilíbrio. O experimento foi realizado em triplicata. A umidade média de equilíbrio foi calculada em base seca (gramas de água por gramas de material seco).

As isotermas obtidas experimentalmente serão tratadas conforme os modelos apresentados na revisão bibliográfica.

5.5 SECAGEM

O produto utilizado para os testes de secagem foi a cenoura cortada em cubos de 10 mm de aresta. A escolha deste produto se deve ao fato desta matéria prima possuir um formato bem definido após a preparação e corte, facilitando o estudo do seu comportamento durante a secagem no secador vibro-fluidizado (BROD et al., 1998 - b).

Para os testes preliminares optou-se por utilizar duas temperaturas de secagem (50 e 60°C) e dois níveis de frequências diferentes, mantendo constante o fluxo de ar e a inclinação. A frequência mínima de vibração (mínima para o produto se deslocar pelo secador) foi encontrada após vários testes com o produto.

Primeiramente ligava-se o sistema de ventilação e, a seguir, regulava-se o controle de temperatura para a temperatura desejada (utilizando o número mínimo de resistências ligadas, controlando-as através dos disjuntores individuais.). Após esta etapa, ligavam-se os moto vibradores do secador (após regulá-los na frequência desejada) e prosseguia-se com a secagem (com o secador já em regime de trabalho).

Como se manteve constante a inclinação do secador, a frequência de vibração é que controlava a vazão de sólidos e conseqüentemente a taxa de secagem.

Colocava-se o produto no secador e iniciava-se o tempo. A metodologia utilizada foi a seguinte: a cada passagem de todo o produto pelo secador, este era retornado e a cada 3 (no teste

inicial) ou 5 passagens (no restante dos testes) toda a massa de produto era pesada e o tempo anotado. Anotava-se também a umidade relativa e temperatura ambiente (com um termohigrômetro), a velocidade do ar de saída do secador em cada câmara (com um anemômetro de ventoinha digital) e, nos testes finais, a perda de carga entre a entrada e a saída no secador com um tubo de Pitot.

Com o produto seco (após a secagem), procedeu-se a determinação da umidade na estufa a 105°C por 24 horas, determinando-se assim a umidade final em base seca (equação 22) e úmida (equação 23) e a seguir a massa seca do produto. Foram utilizados três cadinhos de alumínio por vez, obtendo em triplicata os resultados, e depois tirando-se uma média aritmética.

Com a umidade em relação ao produto seco calcula-se a massa seca do material pela fórmula:

$$Ms. = \frac{P.f.}{Umidade_{bs} + 1} \quad (61)$$

As curvas de secagem serão construídas com o conteúdo de umidade da cenoura no decorrer do tempo de secagem, indicando a marcha de decaimento do conteúdo de umidade do material. As experiências indicam que a secagem se processa com maior rapidez nos níveis altos de teor de umidade e torna-se mais difícil à medida que o produto vai ficando mais seco.

O teor de umidade será calculado de acordo com as fórmulas:

$$X = \frac{P_{amos} - Ms}{Ms} = \frac{P_{H_2O}}{Ms} \quad (62)$$

5.6 CINÉTICA DE SECAGEM DA CENOURA

O adimensional de umidade foi calculado segundo a seguinte fórmula:

$$W = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (63)$$

O conteúdo de umidade de equilíbrio para a cenoura foi calculado utilizando as isoterms de sorção propostas por LOMAURO, BAKSHI e LABUZA (1985 - a).

As curvas características de secagem foram então construídas com o Adimensional de Umidade (W) *versus* o tempo.

5.7 CÁLCULO DAS DIFUSIVIDADES EFETIVAS PARA A CENOURA

Para o cálculo da difusividade será utilizada a regressão não linear do pacote estatístico STATISTICA utilizando três termos da equação 41:

$$W_{uni} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ \left[\frac{1}{\exp(D \cdot \pi^2 \cdot t)} \right] + \left[\frac{1}{9 \cdot \exp(9 \cdot D \cdot \pi^2 \cdot t)} \right] + \left[\frac{1}{25 \cdot \exp(25 \cdot D \cdot \pi^2 \cdot t)} \right] \right\} \quad (64)$$

E da equação 42:

$$W_{três} = \frac{512}{\pi^6} \left\{ \left[\frac{1}{\exp(D \cdot \pi^2 \cdot t)} \right] + \left[\frac{1}{9 \cdot \exp(9 \cdot D \cdot \pi^2 \cdot t)} \right] + \left[\frac{1}{25 \cdot \exp(25 \cdot D \cdot \pi^2 \cdot t)} \right] \right\}^3 \quad (65)$$

Onde:

$$D = \frac{D_{ef}}{4L^2} \quad (66)$$

5.8 CÁLCULO DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO PARA A CENOURA

A energia de ativação será calculada através de uma regressão linear da equação do tipo Arrhenius. Serão utilizadas as difusividades calculadas e as respectivas temperaturas de secagem.

5.9 MONTAGEM DO SISTEMA DE AQUECIMENTO DO SECADOR VIBRO-FLUIDIZADO

O sistema de aquecimento é uma caixa de resistência constituída de uma caixa retangular de aço galvanizado (onde foram alojadas as resistências elétricas), duas coifas também de aço galvanizado (que fazem o acoplamento entre a caixa de resistência e a tubulação de 150 mm de diâmetro), uma manta de amianto vermelho (que fará o isolamento térmico), quatro cintas de barra de ferro chata SAE 1010/20 22,22x4,47 mm (que aumentarão a resistência da caixa), rebites (para fixação da caixa à cinta) e as resistências elétricas propriamente ditas.

Uma coifa montada na caixa está na Figura 38.

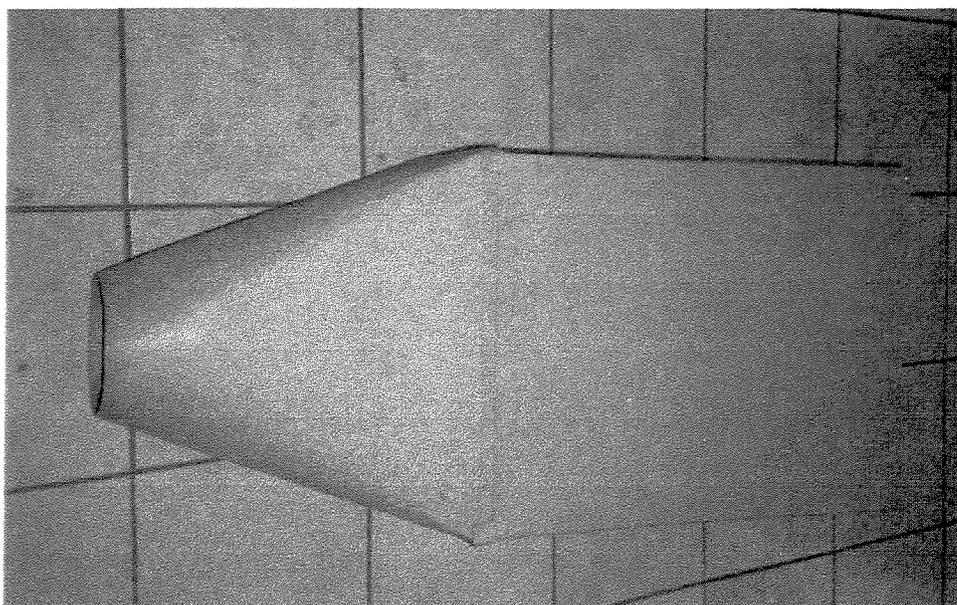


Figura 38: Coifa montada na caixa de resistência

Para a determinação da potência das resistências elétricas utilizou-se a seguinte fórmula:

$$q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (67)$$

Adotando uma velocidade máxima de 5,0 m/s dentro do secador e sendo a área livre da peneira igual a 0,137 m² (dado do fabricante) então o fluxo de ar será: 5,0 x 0,137 = 0,685 m³/s = 3466 m³/h. Com 1,0 kg/m³ de densidade do ar, a vazão mássica será de: 2466 kg/h. Para um gradiente máximo de temperatura de 60°C e C_p = 0,24 kcal/kg °C, a potência necessária será de: 35510,4 kcal/h = 41812,2 W. Utilizando um coeficiente de segurança de 1,5, a potência será de = 41812,2 x 1,5 = 62718,3 ≈ 60 kW.

Calculada a potência elétrica total necessária para o aquecimento do ar de secagem, partiu-se agora para a divisão desta potência total em três, pois serão utilizadas três caixas de resistências (uma para cada câmara do secador). Nesta primeira fase do experimento foi utilizada apenas uma caixa de resistência, já que não foi feita a divisão do ar de secagem.

Com a potência para cada caixa (20 kW), dividiu-se esta em blocos de 1500, 1000 e 500 W, pois assim permitia-se um ajuste mais fino e mais econômico da temperatura do ar. A escolha destas potências foi baseada em experiências anteriores e sugestões do fabricante. Optou-se também por utilizar duas resistências de 1000 W (10% da potência total) para fazer o controle da temperatura por um controlador digital.

A resistência elétrica utilizada foi feita pela empresa Camphermy Aquecimento Industrial Ltda., em forma de “U” com aletas helicoidais para melhor dissipação de calor. As dimensões das resistências estão indicadas na Figura 39:

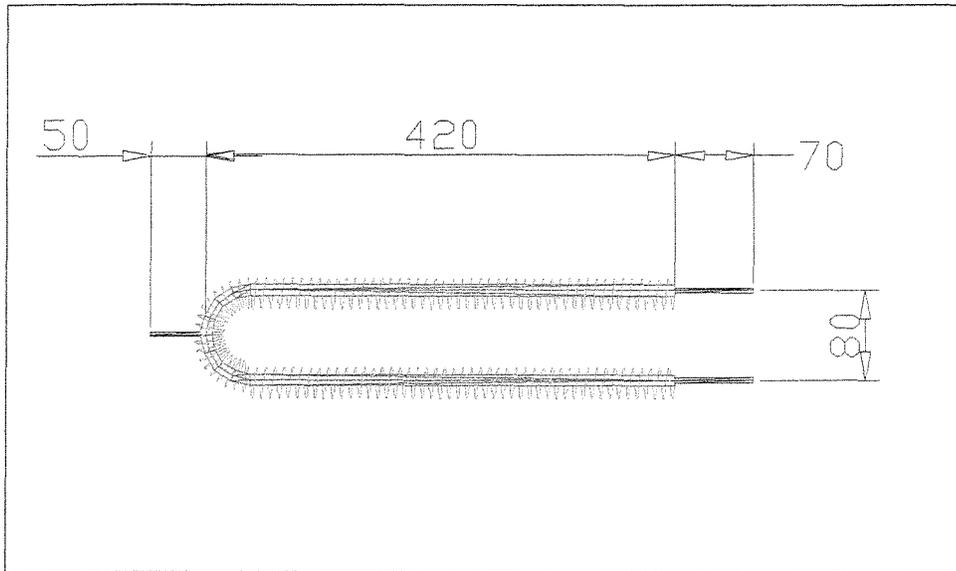


Figura 39: Dimensões das resistências elétricas.

Assim, totalizando 20 kW, temos: 10 resistências de 1500 W, 4 resistências de 1000 W (sendo duas controladas pelo controlador) e 2 resistências de 500 W. A disposição destas resistências está indicada na Figura 40 (onde 15 significa resistências de 1500 W, 10 resistências de 1000 W e 5 resistências de 500W). O conjunto formado pelas resistências e caixa é apresentado nas Figuras 40 e 41:

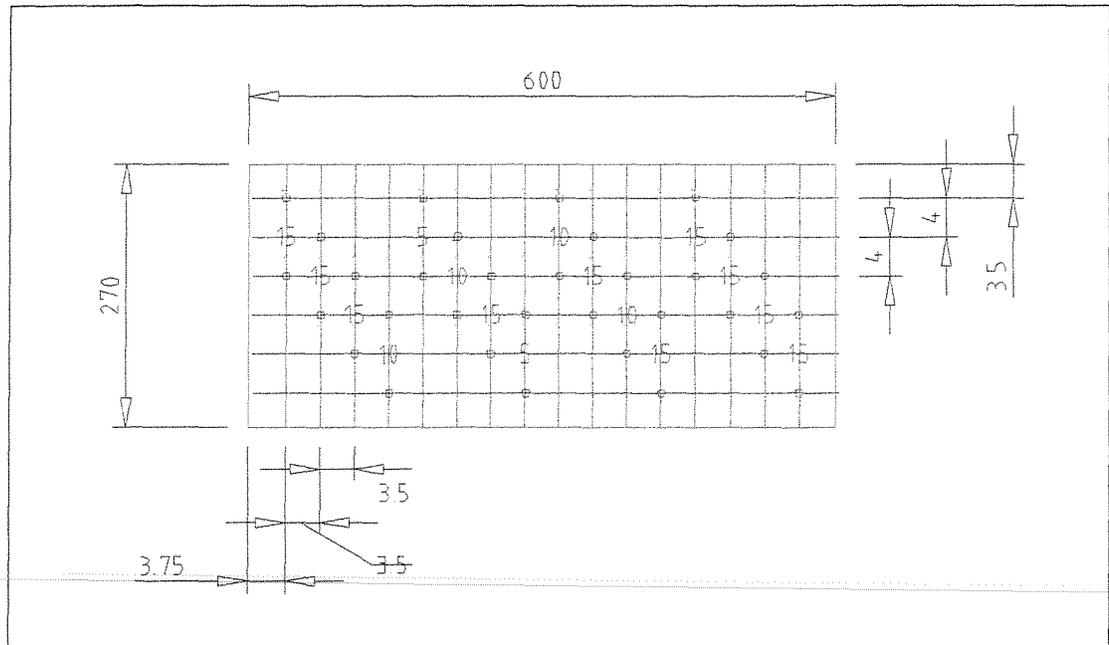


Figura 40: Disposições das resistências.

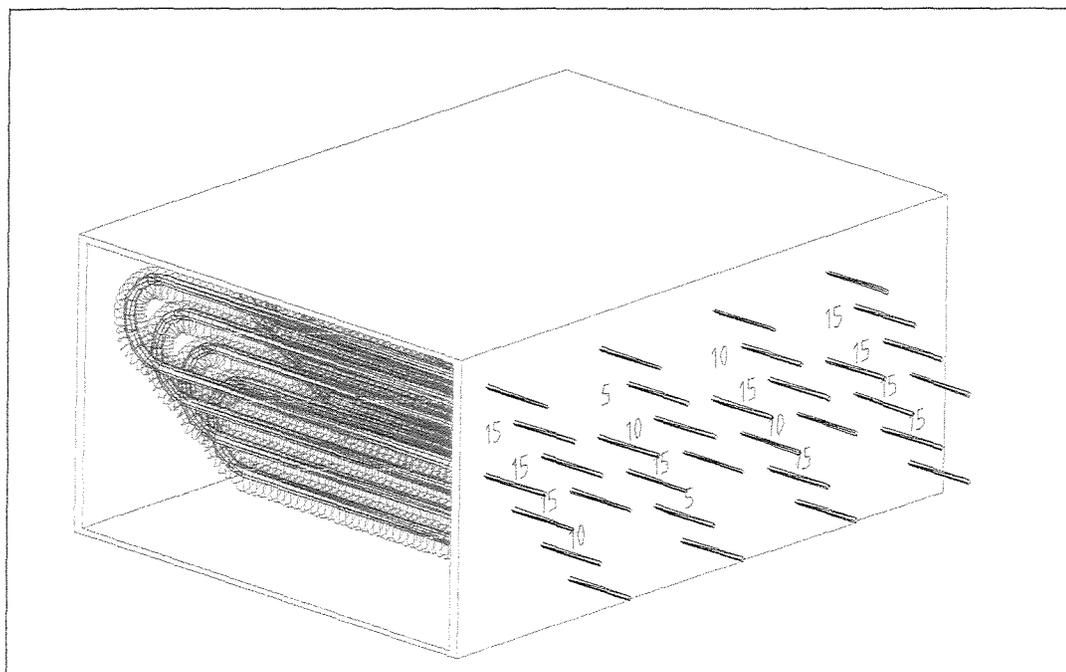


Figura 41: conjunto resistências – caixa.

Assim como na Figura 42.

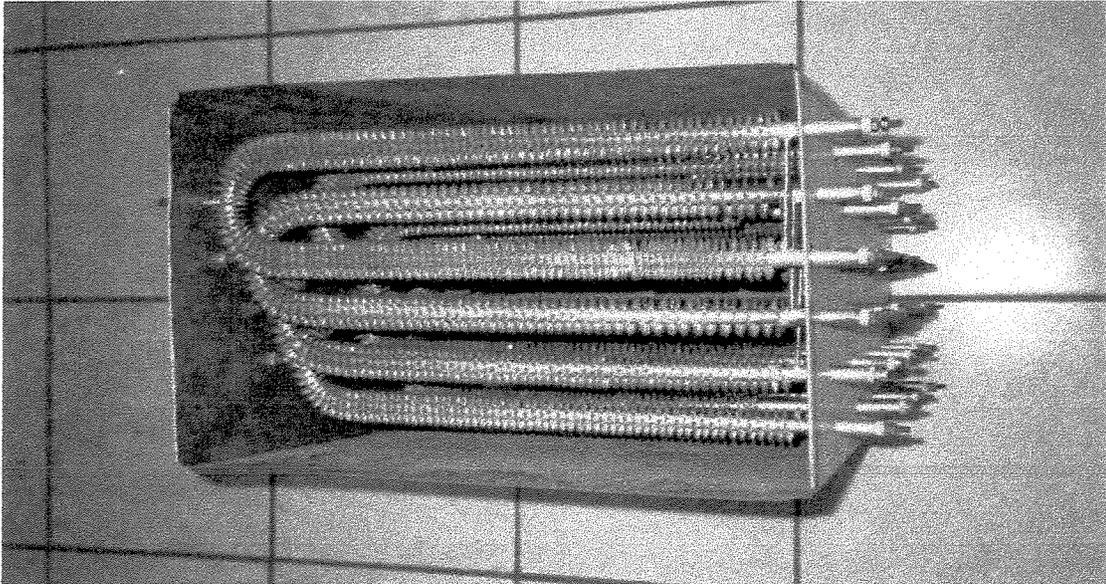


Figura 42: Conjunto resistências - caixa.

Todo o conjunto com as resistências, coifas, cintas de barra de ferro chata e a manta de amianto está indicado na Figura 43.

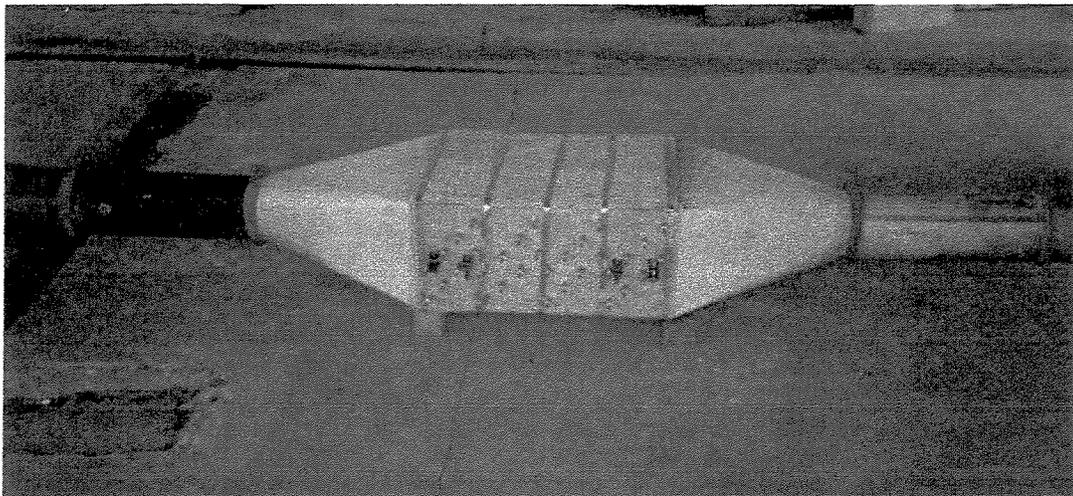


Figura 43: Caixa de resistência montada.

5.10 MONTAGEM DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DO SECADOR VIBRO-FLUIDIZADO

O sistema de ventilação compreende o motor trifásico de 7,5 Hp, o ventilador centrífugo, a tubulação de aço e de PVC, e o acoplamento com tecido de amianto.

O conjunto motor-ventilador foi ligado na caixa de resistência através de um tubo de aço de 150 mm de diâmetro, conforme indicado na Figura 44.



Figura 44: Conjunto ventilador – caixa de resistência.

Outro tubo de aço foi utilizado para a saída do ar da caixa de resistência. Este foi ligado a um tubo de PVC de 150 mm de diâmetro que, por sua vez, foi ligado à tubulação de PVC que direciona o ar de secagem para as três câmaras do secador.

Para o acoplamento desta tubulação ao secador foi utilizado um redutor de PVC de 200 para 150 mm (já que a entrada do secador possui um diâmetro de 200 mm) e uma manta de amianto branco. Esta manta é resistente ao calor e ao mesmo tempo é flexível, impedindo que a

vibração do secador fosse transferida para a tubulação de PVC, danificando-a. Como era necessário um material flexível e ao mesmo tempo resistente ao calor (já que se pretendia utilizar temperaturas altas), a manta de amianto branca foi a melhor solução encontrada. Toda a tubulação de PVC, segundo o próprio fabricante (Tigre), suporta até 75°C de temperatura. A ligação desta manta está indicada na Figura 45.

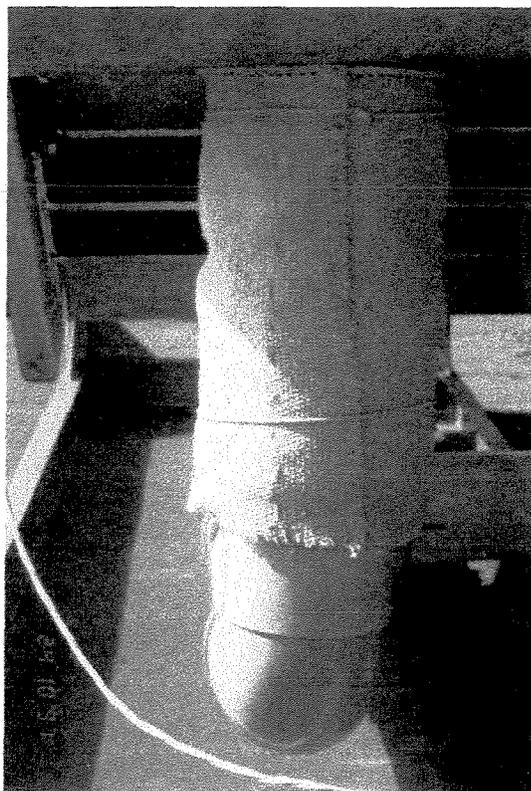


Figura 45: Ligação da manta de amianto ao secador.

Utilizaram-se também três pedaços de tubo de 200 mm de diâmetro na saída do ar do secador para que fossem colocados bocais de tomada de pressão. Todo o sistema de ventilação está indicado nas Figuras 46 e 47.

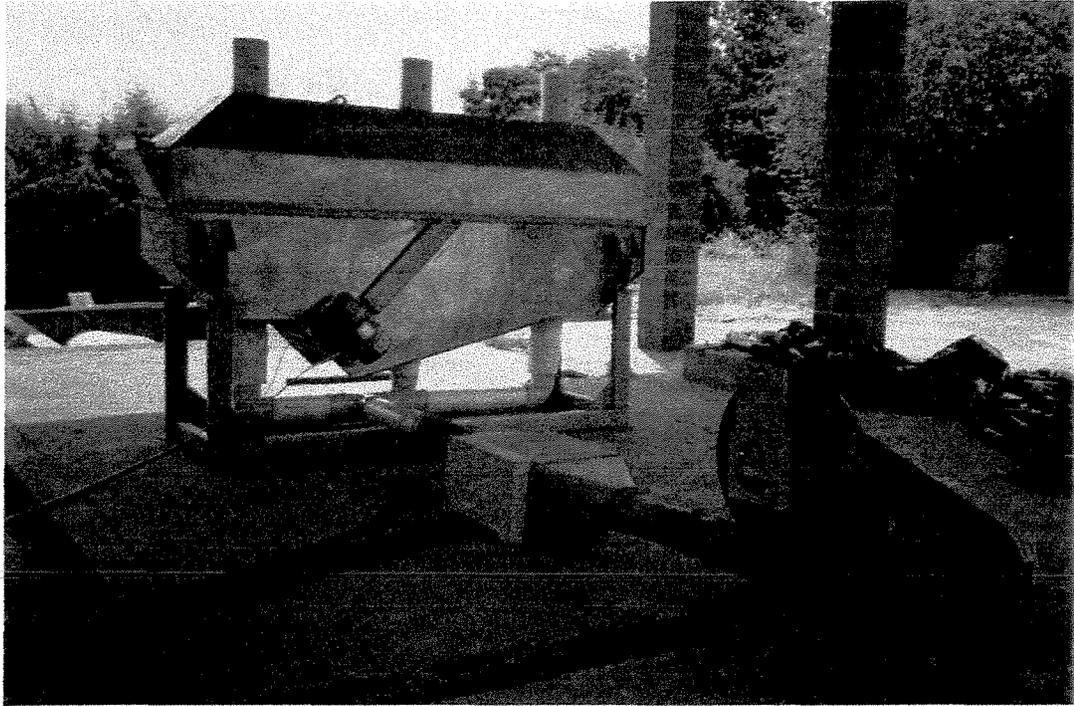


Figura 46: Sistema de ventilação.

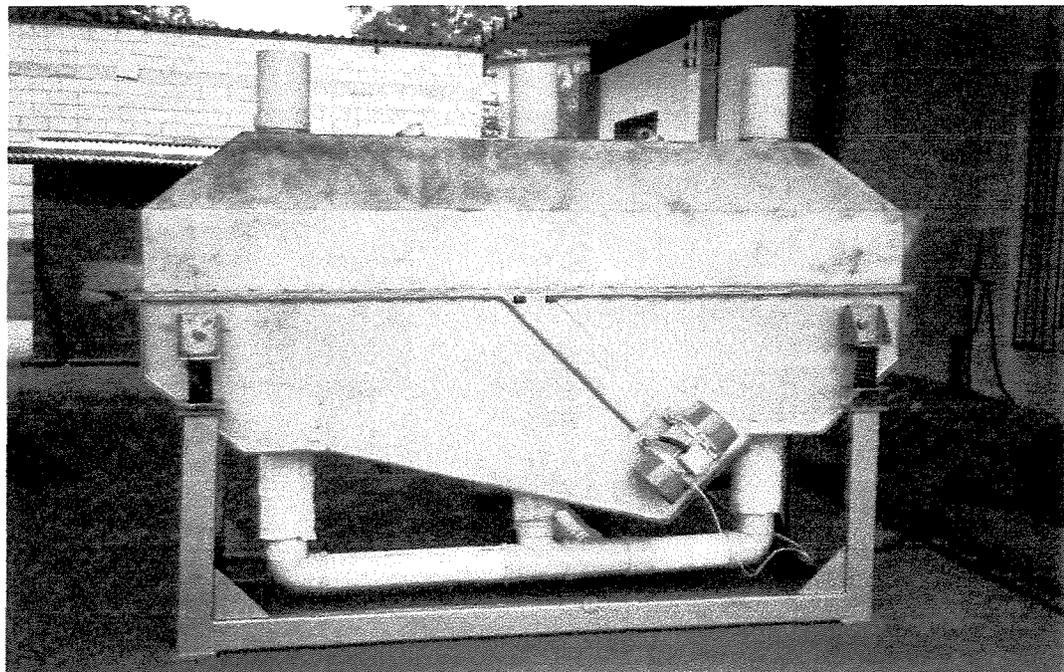


Figura 47: Vista posterior do sistema de ventilação.

Para a regulagem do fluxo de ar, foi utilizada uma guilhotina de madeira na entrada do ventilador que estrangulava ou permitia a passagem do fluxo de ar (Figura 48).

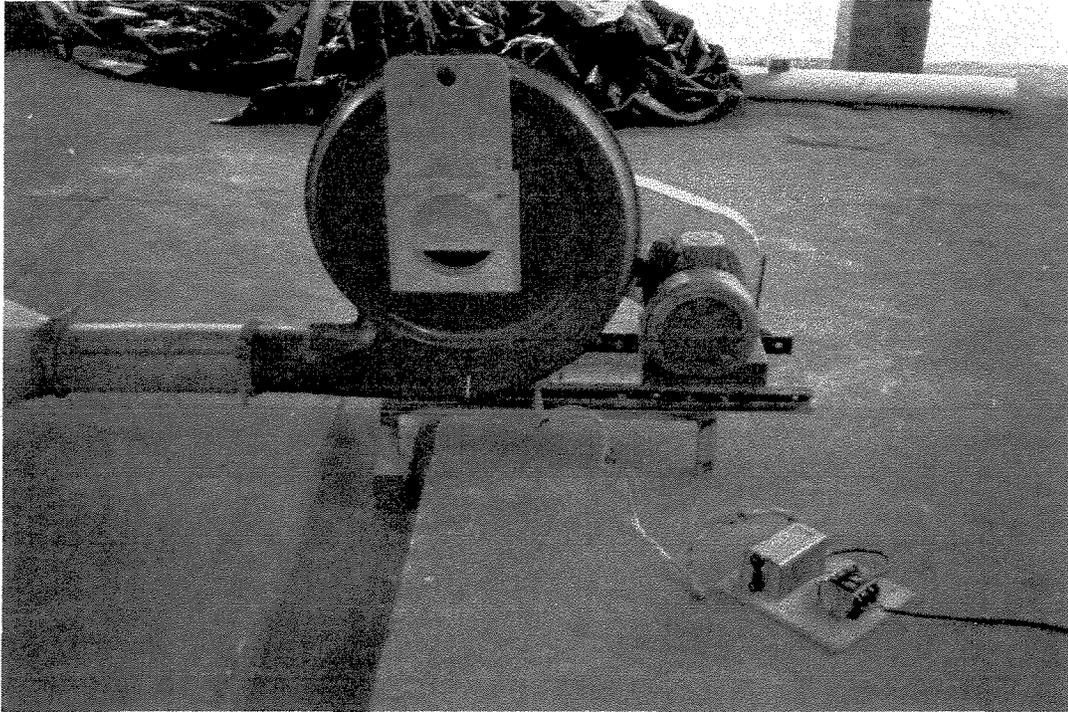


Figura 48: Guilhotina de regulagem do fluxo de ar.

5.11 MONTAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO E DE CONTROLE

O sistema elétrico constitui-se nos quadros de força do secador: um quadro geral onde foram instalados os disjuntores das resistências, um quadro para os moto-vibradores e um quadro para o controlador de temperatura.

No quadro geral existem cinco circuitos independentes: dois que controlam 8 resistências de 1500 W (sendo que estas resistências são controladas em pares, ou seja, duas destas resistências são controladas por um único disjuntor); um que controla duas resistências de 1000 W (acionado pelo controlador de temperatura); um que controla duas resistências de 1500 W

ligadas também em par, duas de 1000 W (independentes) e duas de 500 W (também independentes); e, por fim, um circuito que controla o motor do ventilador.

Optou-se por utilizar em cada circuito um contator que controlaria todos os disjuntores daquele circuito. Assim para um ajuste grosseiro pode-se controlar o contator e para um ajuste mais fino, os disjuntores individualmente.

Cada contator é controlado por uma chave *on - off*, sendo que a contator do circuito do ventilador controla as demais, ou seja, as chaves dos outros contatores estão ligadas em série com a saída do contator do ventilador. Esta montagem foi utilizada por segurança, pois se o ventilador for desligado, todos os outros circuitos também serão, evitando que haja um superaquecimento das resistências. Existem também lâmpadas piloto que indicam se o circuito está ligado ou não.

Os cálculos para o dimensionamento pelo critério da capacidade de corrente em cada circuito foram os seguintes (CREDER, 1995):

$$I = \frac{P}{U \cdot \text{Fator de potência}} \quad (68)$$

Com o valor da corrente calculado, partiu-se agora para o dimensionamento do diâmetro da fiação pelas Tabelas 4.4 e 4.6 de CREDER (1995).

Tabela 9: Dimensionamento dos disjuntores.

V =	220 V	Disjuntor		
P =	3000 W	I =	13,6 A	20A
P =	1000 W	I =	4,5 A	10A
P =	500 W	I =	2,3 A	10A
P =	20000 W	I =	90,9 A	125A

Tabela 10: Dimensionamento dos condutores.

	Potência	Corrente	Condutor
Circuito de	6000 W	I = 27,3 A	6 mm ²
	2000 W	I = 9,1 A	4 mm ²
Potência total	20000 W	I = 90,9 A	35 mm ²

O esquema elétrico está indicado na Figura 49:

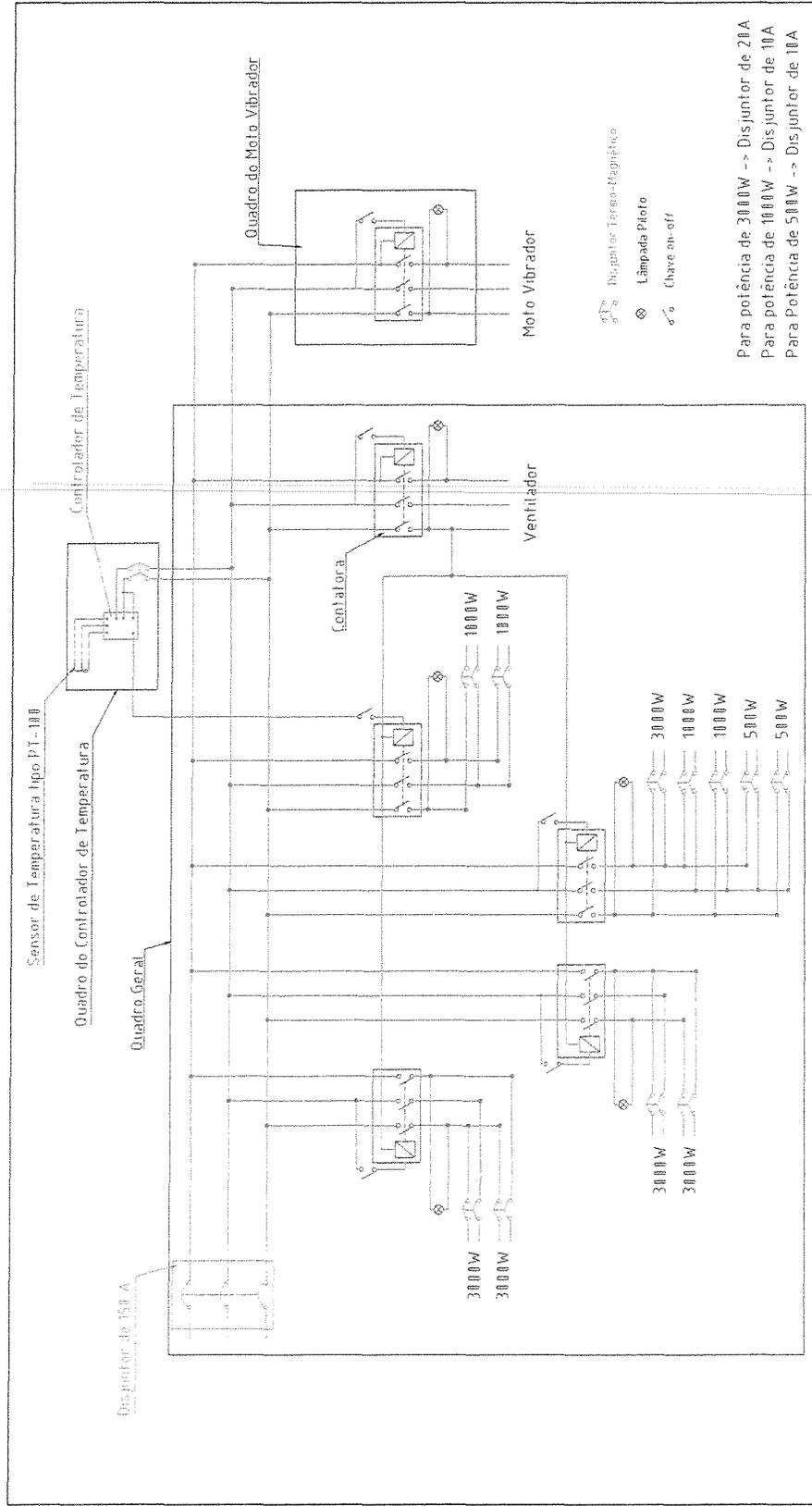


Figura 49: Esquema elétrico.

Na Figura 50 está o quadro geral, onde se observam o disjuntor de 150 A, os contatores, os disjuntores, lâmpada piloto e chaves *on- off*:

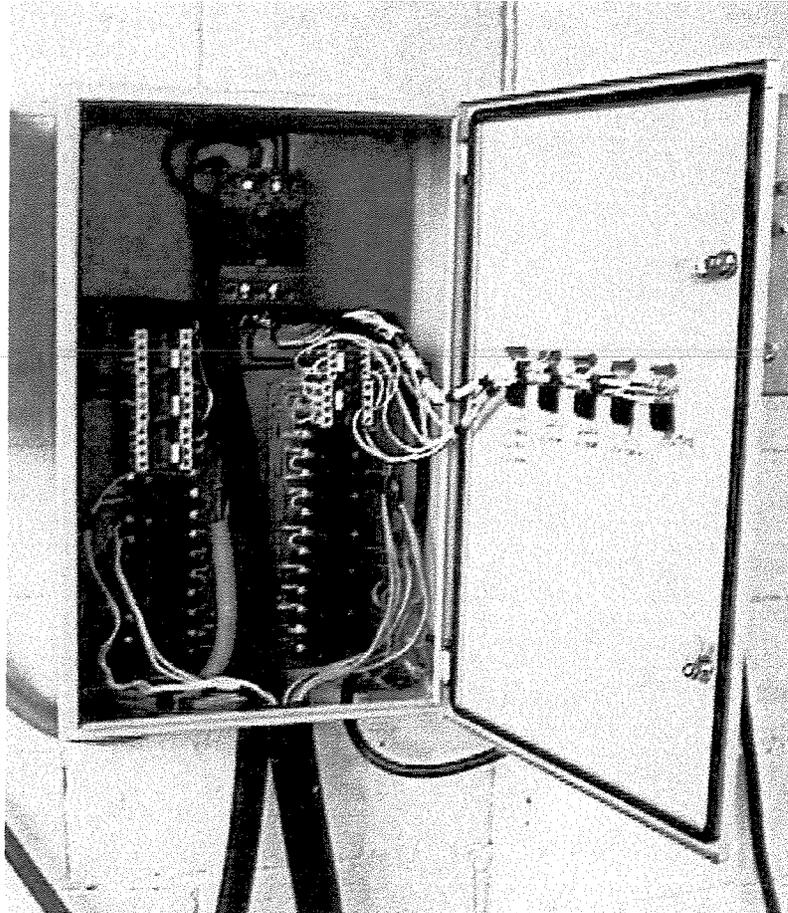


Figura 50: Quadro geral de força.

Para o quadro do moto-vibrador foi utilizado um contator, chave e lâmpada piloto. Este contator liga os dois moto-vibradores do secador, sendo que estes têm que ser ligados com rotação invertida, pois estão em eixos opostos, e ligados desta maneira, vibram no mesmo sentido.

No quadro do controlador, existem 5 controladores de temperatura micro-processados, sendo que para o secador só está sendo utilizado um. O sensor de temperatura é do tipo PT 100 ligado a três fios e colocado na tubulação de entrada do secador. Este controlador controla o circuito das duas resistências de 1000 W (conforme está indicado na Figura 49).

A Figura 51 mostra o detalhe do controlador.

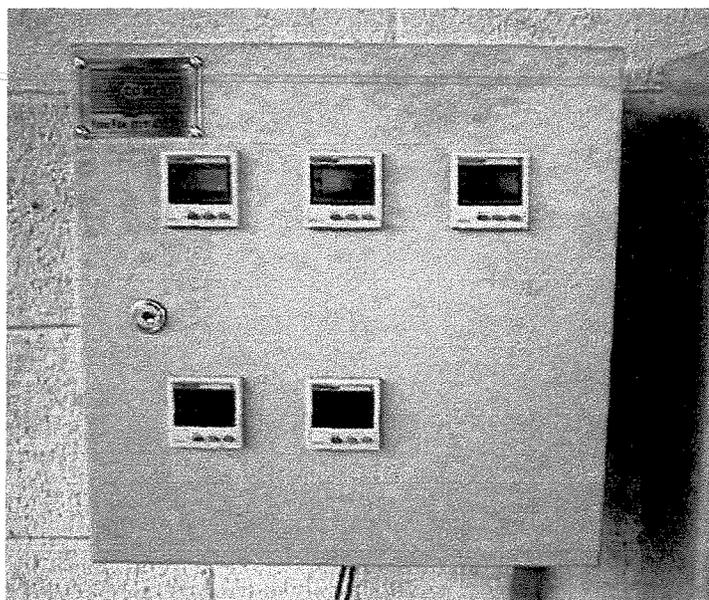


Figura 51: Controlador digital micro-processado de temperatura.

A disposição do conjunto elétrico está indicada na Figura 52, à esquerda existe o controlador digital micro-processado de temperatura; ao centro, o quadro geral de força (onde se observam as lâmpadas piloto e as chaves *on-off*) e à direita, o quadro dos moto vibradores:

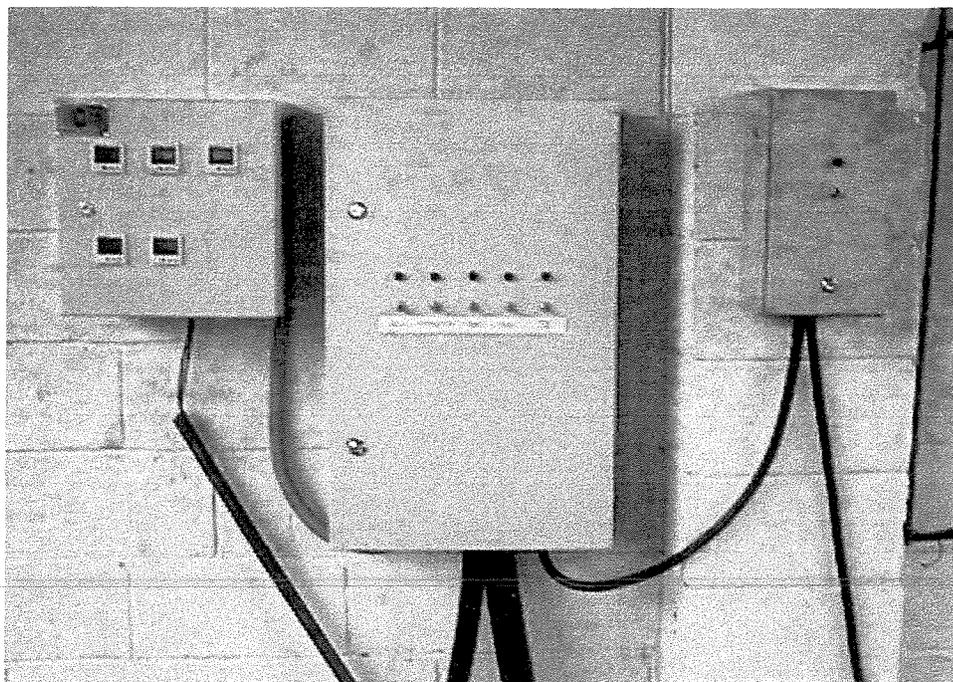


Figura 52: Quadros elétricos.

5.12 DESCRIÇÃO DO SECADOR VIBRO-FLUIDIZADO

O secador vibro fluidizado (SVF), patente industrial INPI nº 9302443, construído pela Empresa Metal Vibro Metalúrgica consiste da base estrutural do secador, do corpo do secador, da tela do leito de secagem e dos moto vibradores (BROD et al., 1997).

A base do secador foi toda confeccionada em barras em “U” de aço carbono 1010/1020. Existem quatro parafusos de ferro fundido que regulam a altura do secador e que permitem a utilização várias inclinações diferentes do leito de secagem. Acoplados a estes parafusos (através de suportes) existem quatro molas de sustentação; estas absorvem a vibração promovida pelos moto-vibradores. O esquema detalhado da base do secador está indicado no apêndice 2. Nesta figura a mola (em azul) está desenhada como um corpo inteiro, como se pode observar no corte BB. A Figura 53 indica a mola em detalhe.

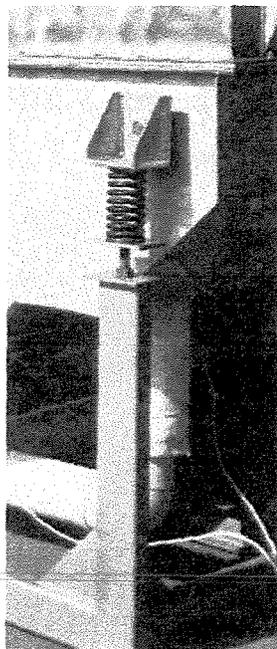


Figura 53: Detalhe da mola de vibração.

O corpo do secador pode ser dividido em duas partes, a superior e a inferior, ambas foram fabricadas em aço inox AISI 304. Na parte inferior, existem três câmaras que fazem com que o ar de secagem seja dividido em três antes de chegar ao leito, propiciando três diferentes tipos de tratamento do ar. Neste primeiro experimento foi utilizado apenas um. Existem bocais de encaixe para a tubulação de ar. Para suportar os moto-vibradores, utilizou-se de um reforço na lateral desta parte, conforme está detalhado no Apêndice 3.

Para a saída do ar (corpo superior), também existem três câmaras, unidas apenas por uma passagem de 35 mm entre a tela e a parede divisora das câmaras. Nesta parte, também existe a boca de alimentação e de descarga, conforme indica o Apêndice 4. Existem bocais de encaixe na parte superior, onde foram colocados três tubos de PVC. Nestes tubos e na tubulação de entrada (na parte inferior) foram colocados os pontos de tomada de pressão.

A Figura 54 detalha a descarga:

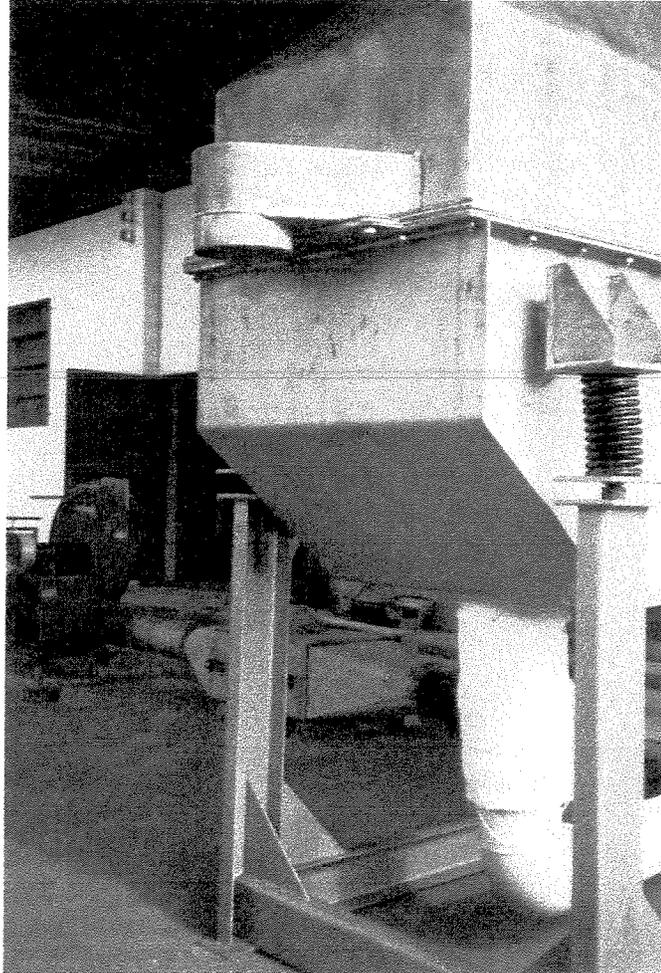


Figura 54: Detalhe da descarga do secador.

A tela foi fabricada pela empresa PakScreens com fios em perfil “V” invertido, de abertura 0,125 mm, conforme ilustra a Figura 55:

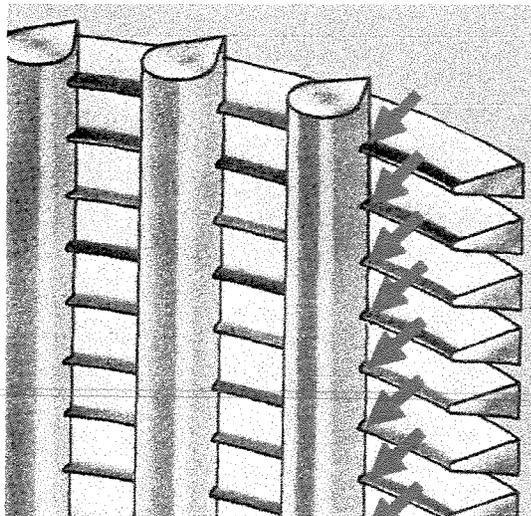


Figura 55: Detalhe da tela.

Esta configuração dos fios da tela permite uma maior área livre e uma maior capacidade de não obstrução quando comparado com malhas de arame e chapas perfuradas, além de serem mais rígidas (BROD et al., 1998 - a).

Os dois moto-vibradores possuem potência de 1500 W cada. A vibração é promovida por quatro excêntricos localizados em cada eixo dos moto-vibradores. Variando-se a posição destes excêntricos, varia-se a frequência de oscilação, totalizando 7 posições diferentes com 7 frequências de oscilações diferentes.

A Figura 56 mostra o moto-vibrador, sem as tampas de proteção dos excêntricos. E a Figura 57 indica a posição dos excêntricos que permitem a menor frequência:

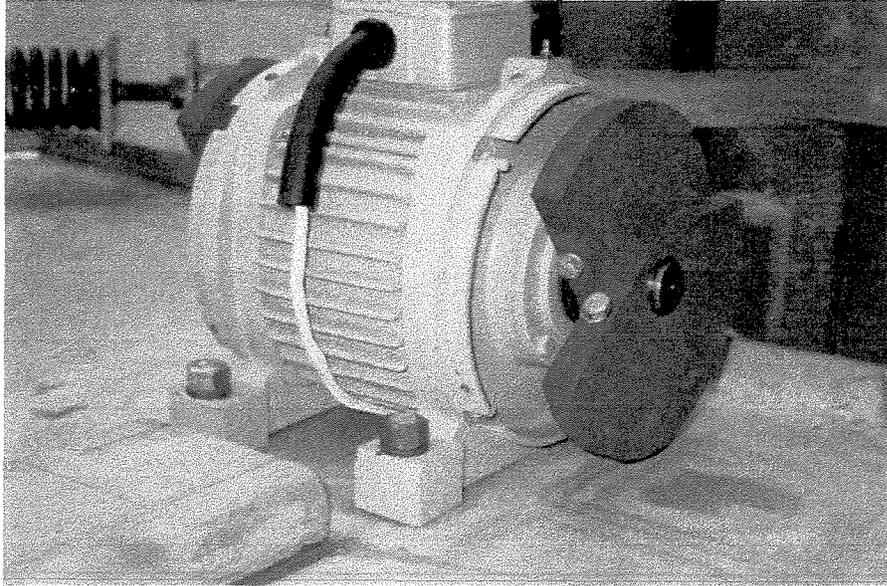


Figura 56: Moto-vibrador.

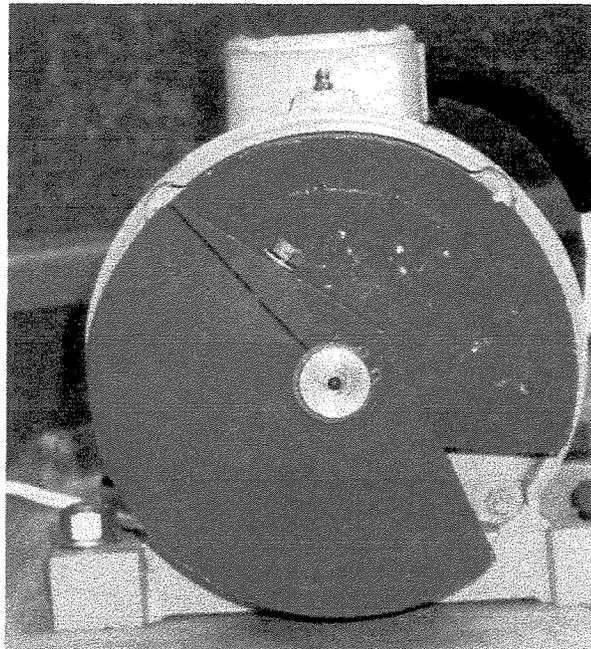


Figura 57: Posição dos excêntricos que permitem a menor frequência.

A Figura 58 indica a posição dos excêntricos que permitem a maior frequência:

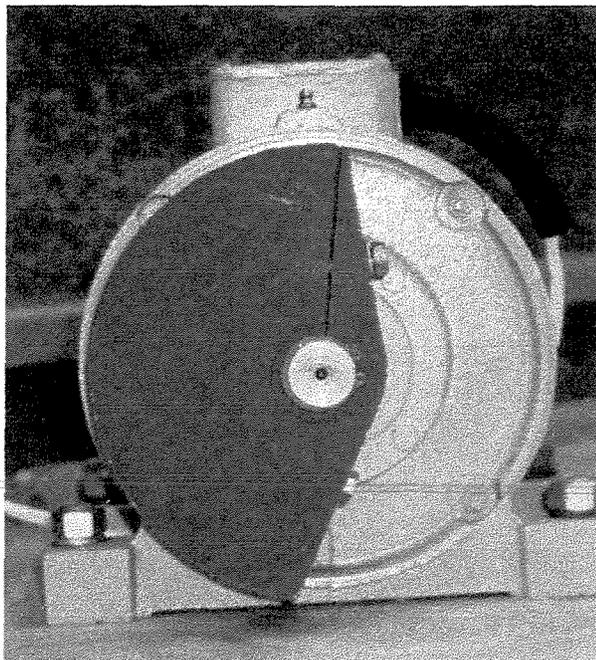


Figura 58: Posição dos excêntricos que permitem a maior frequência.

O secador todo montado está na Figura 59, onde se observam os tubos de saída do ar de secagem, um dos moto vibradores, a tubulação de ar e a posição do sensor de temperatura.

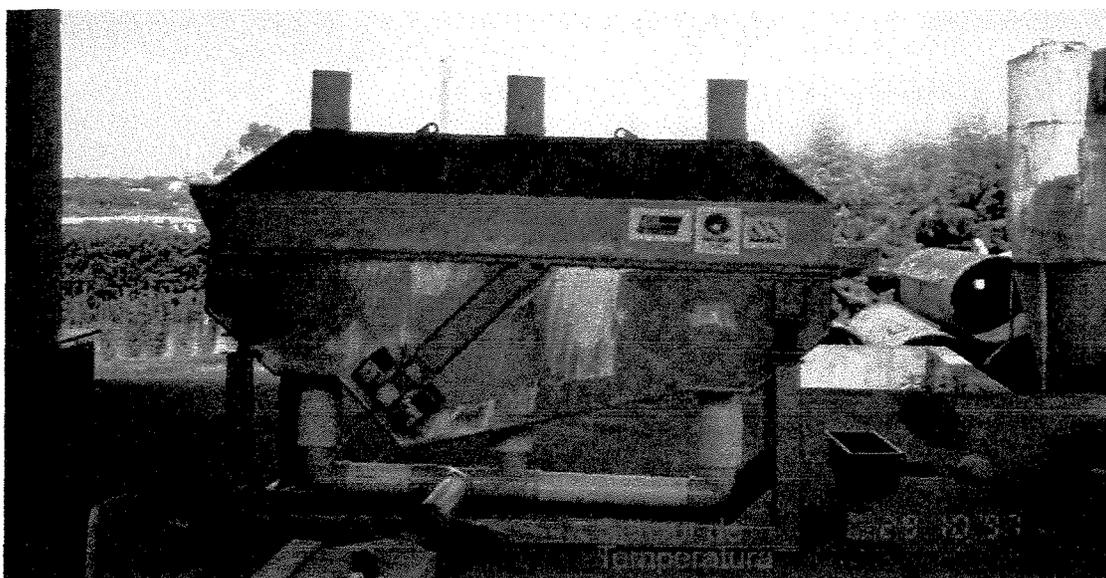


Figura 59: Secador vibro-fluidizado completo.

O Apêndice 5 apresenta as vistas laterais e uma perspectiva do secador vibro-fluidizado.

As agências que patrocinaram o secador foram as seguintes (convênio entre a Faculdade de Engenharia Agrícola e Fundação de Desenvolvimento da UNICAMP - FUNCAMP, Metalúrgica Metal Vibro e Fundação Banco do Brasil):

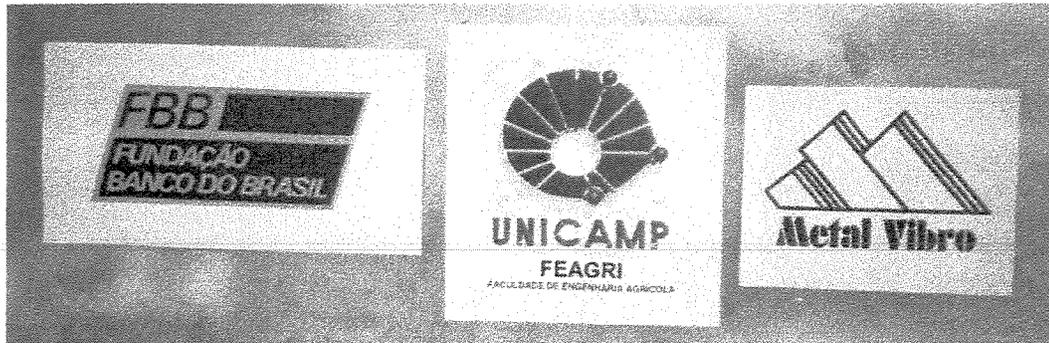


Figura 60: Agências patrocinadoras do secador vibro-fluidizado.

5.13 OBTENÇÃO DA PERDA DE CARGA NO SECADOR VIBRO-FLUIDIZADO

Para a determinação da perda de carga no leito de secagem do secador vibro-fluidizado, foi utilizado um manômetro diferencial AIRFLOW. A tomada de pressão foi feita entre a entrada do ar no secador e a sua saída (BROD et al., 1998 - a).

O aparelho utilizado para a determinação da perda de carga devido à tela do secador foi um manômetro diferencial, marca Airflow, modelo Type 5 Test Set, e para a determinação das velocidades de saída do ar foi utilizado o mesmo aparelho com um tubo de Pitot (com a mesma escala).

Para a medida da perda de carga na tela do secador, mediu-se a perda de carga entre a entrada e saída do ar no secador, nas posições indicadas na Figura 61:

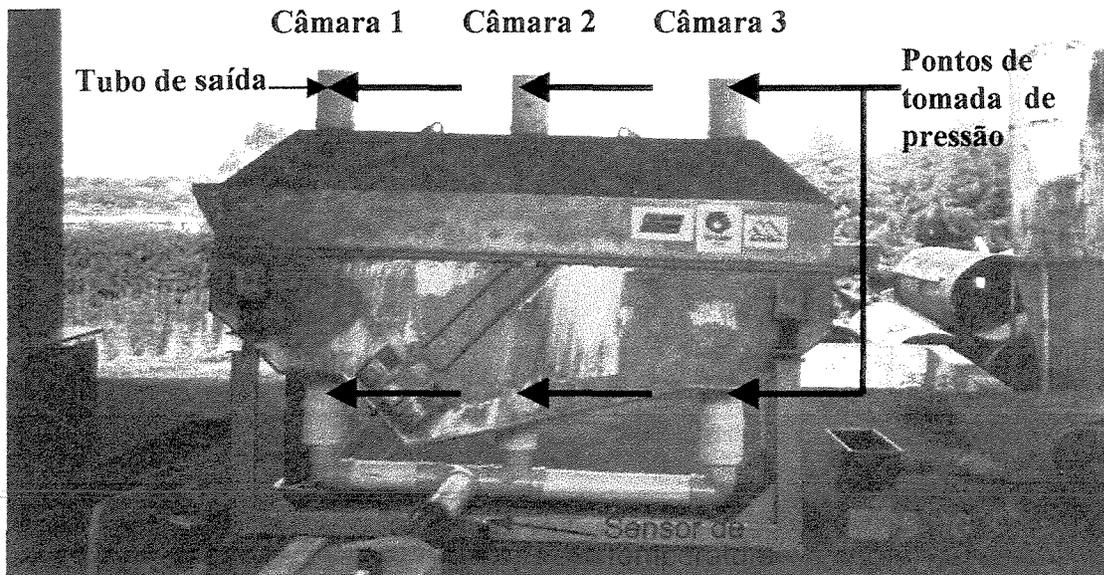


Figura 61: Posição das tomadas de pressão no secador.

O manômetro diferencial funciona da seguinte maneira (Figura 62):

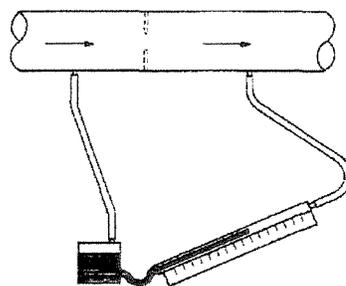


Figura 62: Esquema de funcionamento do manômetro diferencial

Para a tomada da velocidade do ar na saída do secador (que foi obtida concomitantemente com a perda de carga) foi utilizada a metodologia fornecida pela própria AirFlow: em três repetições de seis posições radiais do tubo de saída (conforme indica a Figura 63) a pressão dinâmica foi tomada com um tubo de Pitot (Figura 64).

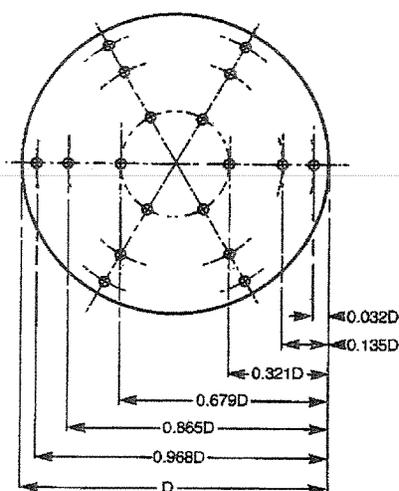


Figura 63: Posições de medida da pressão dinâmica (tubo de Pitot).

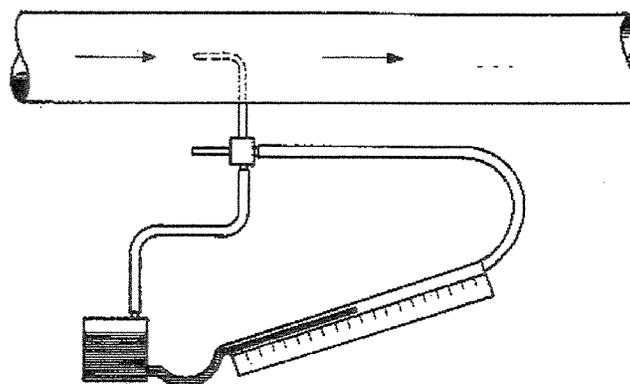


Figura 64: Esquema de funcionamento do tubo de Pitot.

Através da seguinte fórmula (fornecida pelo manual da AirFlow) , calcula-se a velocidade de saída do ar com a pressão dinâmica fornecida pelo tubo de Pitot:

$$v = 1,291 \sqrt{\frac{1000}{B} \cdot \frac{T}{289} \cdot P_v} \quad (69)$$

A metodologia adotada foi a seguinte: fechou-se a alimentação e a descarga para que não houvesse escape de ar, medindo-se a perda de carga e a velocidade de saída do ar para cada câmara do secador, variando-se cinco vezes a velocidades do ar, determinando-se, a seguir, por integração numérica a velocidade média.

VI: RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 TRATAMENTO DOS DADOS DE PERDA DE CARGA NA TELA DO SECADOR

De acordo com a metodologia anteriormente descrita, mediu-se a velocidade de saída do ar em cada câmara do secador através de um Tubo de Pitot. Coletaram-se seis pontos radialmente, com três repetições para cada uma das câmaras do secador, conforme está indicado nas Figuras 65 a 67 (onde a legenda indica as posições da guilhotina acoplada ao ventilador para o controle da velocidade do ar):

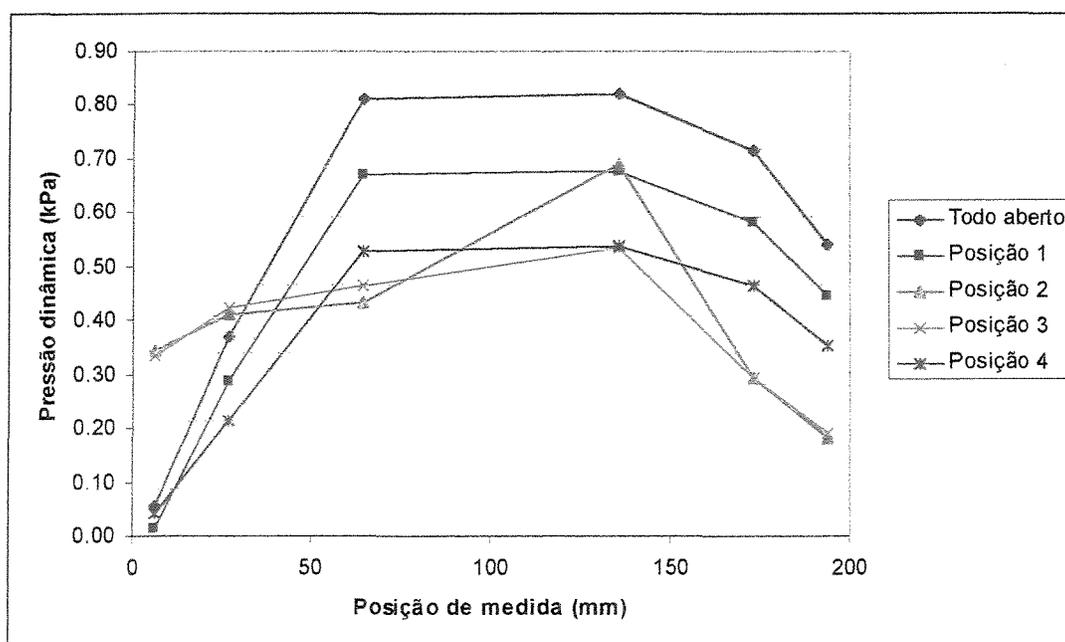


Figura 65: Perfil de pressões dinâmicas para a câmara 1.

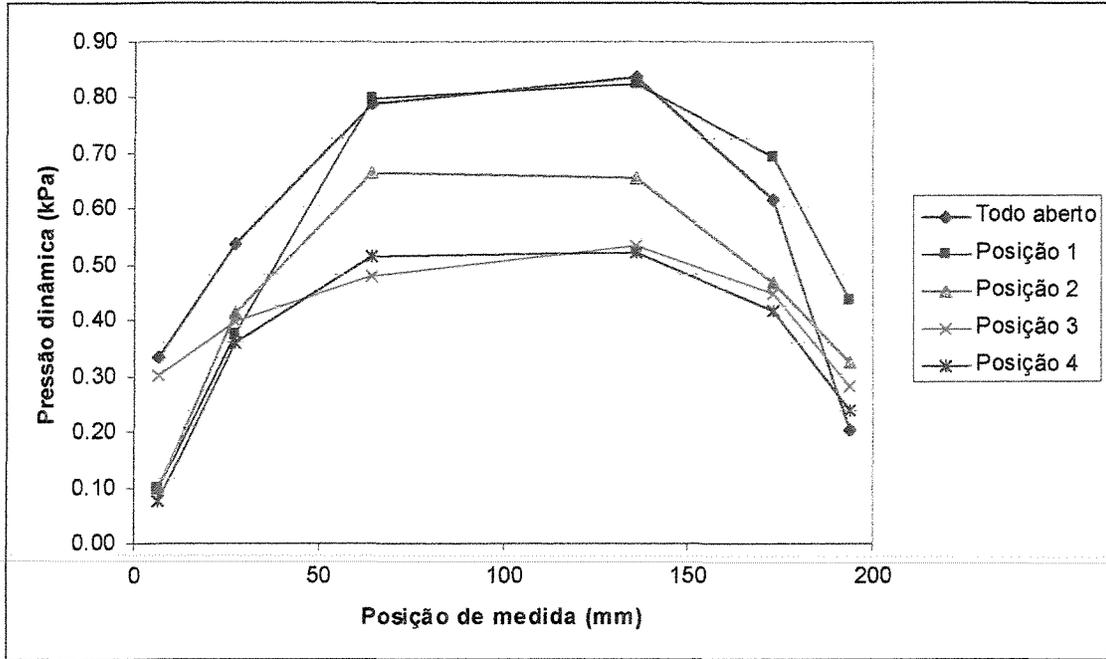


Figura 66: Perfil de pressões dinâmicas para a câmara 2.

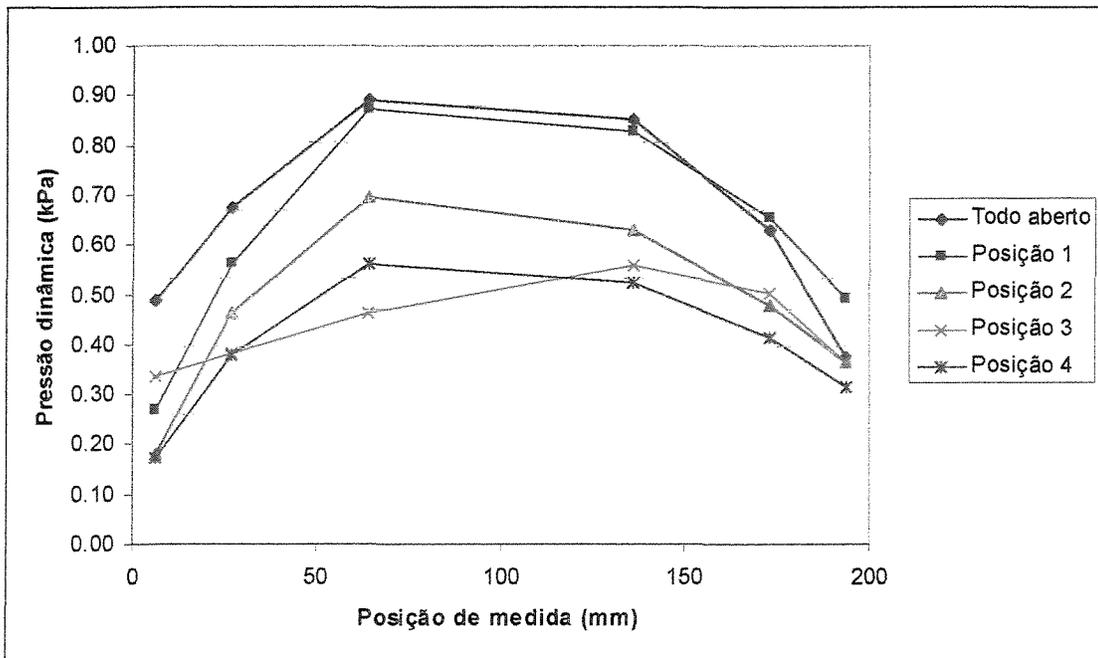


Figura 67: Perfil de pressões dinâmicas para a câmara 3.

Realizando a seguir uma média por integração numérica das posições do tubo de Pitot e calculando a velocidade através da equação 68, determinou-se a velocidade de saída do ar de secagem e o número de Reynolds (equação 14) para caracterizar o tipo de escoamento. As características do ar são mostradas na Tabela 11.

Tabela 11: Características do ar.

Parâmetro	Valor
Pressão atmosférica	93,3 kPa
Temperatura ambiente.	35°C
Densidade	1,146 kg/m ³
Viscosidade	1,89 x 10 ⁻⁵ Pa s

O diâmetro do tubo de saída do ar das câmaras foi de 200mm. A perda de carga foi obtida com o manômetro diferencial.

Tabela 12: Cálculo do número de Reynolds e dados de perda de carga para a câmara 1.

Posição da guilhotina	Pv (kPa)	v (m/s)	Reynolds	Perda de carga (kPa)
Todo aberto	0,67	3,58	43452,29	1,53
1	0,55	3,24	39284,07	1,44
2	0,46	2,97	36043,63	1,35
3	0,44	2,88	34910,45	1,16
4	0,43	2,86	34667,08	0,95

Tabela 13: Cálculo do número de Reynolds e dados de perda de carga para a câmara 2.

Posição da guilhotina	Pv (kPa)	v (m/s)	Reynolds	Perda de carga (kPa)
Todo aberto	0,68	3,60	43651,84	0,80
1	0,67	3,56	43174,32	0,75
2	0,54	3,21	38989,82	0,73
3	0,46	2,95	35795,92	0,64
4	0,44	2,89	35049,40	0,53

Tabela 14: Cálculo do número de Reynolds e dados de perda de carga para a câmara 3.

Posição da guilhotina	Pv (kPa)	v (m/s)	Reynolds	Perda de carga (kPa)
Todo aberto	0,76	3,79	45990,64	1,17
1	0,72	3,71	45021,99	1,12
2	0,56	3,27	39624,13	1,05
3	0,47	3,00	36390,26	0,92
4	0,46	2,97	36071,09	0,76

Como se observa, para todas as câmaras, o escoamento é turbulento.

A seguir determinou-se uma correlação não linear entre a perda de carga (ΔP) e a velocidade do ar na saída do secador:

Tabela 15: Correlação entre a perda de carga ΔP (kPa) e a velocidade v (m/s)

	Equações	R^2
Câmara 1	$\Delta P = -1529,9 \cdot v^2 + 10472 \cdot v - 16365$	0,85
Câmara 2	$\Delta P = -628 \cdot v^2 + 4377,2 \cdot v - 6845,5$	0,92
Câmara 3	$\Delta P = -695,5 \cdot v^2 + 5093,5 \cdot v - 8170,4$	0,90

Os valores do coeficiente de correlação, assim como a Figura 68, mostram um bom ajuste para os dados experimentais.

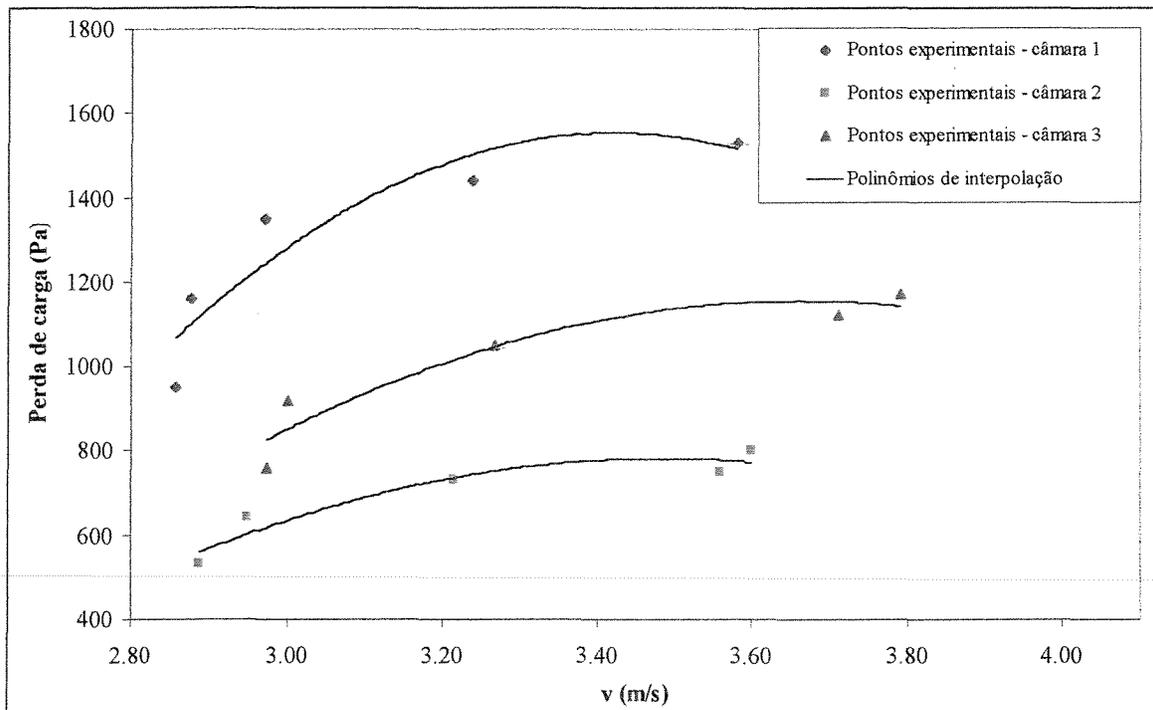


Figura 68: Correlação entre a perda de carga e a velocidade do ar.

6.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA A CENOURA

6.2.1 Umidade de equilíbrio da cenoura

Para a determinação da umidade de equilíbrio foi utilizada a isoterma de dessorção proposta por LOMAURO, BAKSHI e LABUZA (1985 - a). A equação utilizada foi a equação de Halsey (equação 36) com $A = 0,0965$ e $B = 0,8955$.

Para a determinação da umidade relativa do ar de secagem foi utilizado o software de cálculo psicrométrico PLUS: partindo de um ar ambiente com umidade relativa (UR) e a temperatura (T_{amb}), aqueceu-se este ar a umidade absoluta constante até a temperatura de secagem determinando-se neste ponto a umidade relativa do ar de secagem que corresponde a

atividade de água (a_w). Utilizando este dado na equação de Halsey se determina a umidade de equilíbrio (X_{eq}).

Tabela 16: Cálculo da umidade de equilíbrio da cenoura.

Curvas:		$T_{amb}(^{\circ}C)$	UR (%)	Umid. Abs. (kg/kg)	a_w (%)	X_{eq} (kg/kg)
T ($^{\circ}C$)	Freq.					
50	5	27,5	67,1	0,017	20,0	0,067
50	7	25,8	86,0	0,019	23,1	0,074
60	5	27,8	71,7	0,018	13,4	0,054
60	7	30,4	66,4	0,020	14,5	0,056

6.2.2 Cálculo do conteúdo adimensional de umidade

Para o cálculo do adimensional de umidade (mostrado no Apêndice) foram utilizados os dados obtidos da secagem da cenoura, a umidade de equilíbrio obtida no item anterior e a equação 62. O conteúdo adimensional de secagem está graficado na Figura 69:

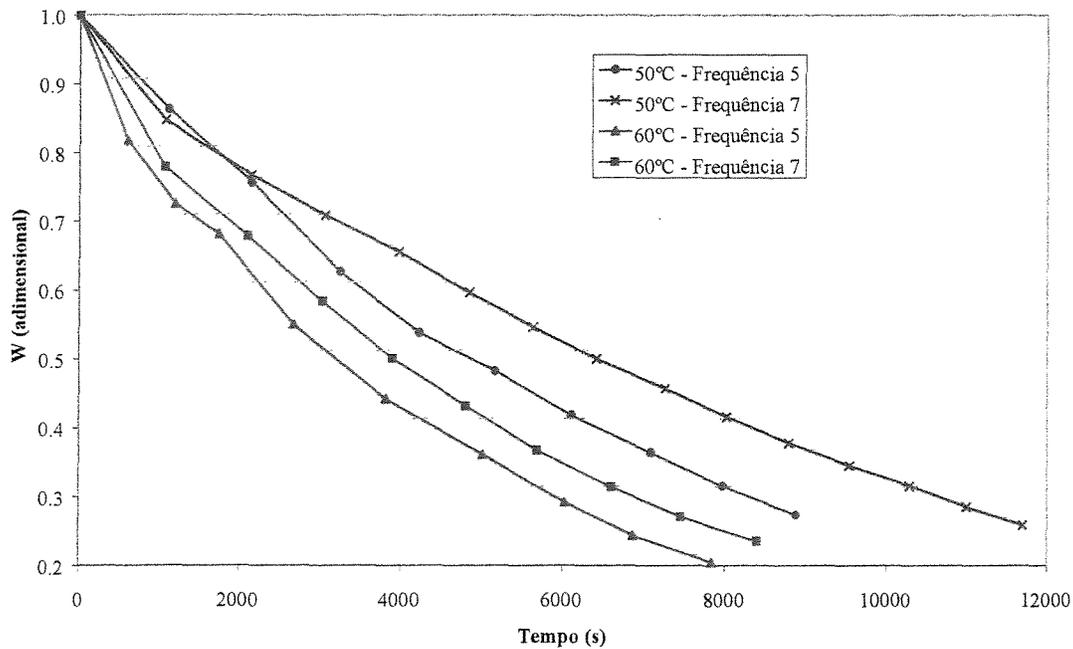


Figura 69: Conteúdo de umidade versus tempo.

6.2.3 Cálculo da difusividade efetiva

Utilizou-se o pacote *Nonlinear Estimation* do software estatístico STATISTICA para se estimar a difusividade efetiva com as equações 63 e 64 (difusão uni e tri dimensional). Os resultados estão mostrados a seguir, com o comprimento característico (2L) igual a 0,01m (BROD et al., 1998 - b):

Tabela 17: Difusividades efetivas para a cenoura utilizando o modelo unidirecional.

Curvas:		D	R ²	D _{ef} (m ² /s)
T (°C)	Frequência.			
50	5	1,040x10 ⁻⁵	0,94	1,040x10 ⁻⁰⁹
50	7	0,814x10 ⁻⁵	0,95	0,814x10 ⁻⁰⁹
60	5	1,608x10 ⁻⁵	0,98	1,608x10 ⁻⁰⁹
60	7	1,342x10 ⁻⁵	0,97	1,342x10 ⁻⁰⁹

Tabela 18: Difusividades efetivas para a cenoura utilizando o modelo tridirecional.

Curvas:		D	R ²	D _{ef} (m ² /s)
T (°C)	Frequência.			
50	5	1,826x10 ⁻⁶	0,82	1,826x10 ⁻¹⁰
50	7	1,443x10 ⁻⁶	0,84	1,443x10 ⁻¹⁰
60	5	3,001x10 ⁻⁶	0,88	3,001x10 ⁻¹⁰
60	7	2,484x10 ⁻⁶	0,87	2,484x10 ⁻¹⁰

A difusividade efetiva aumenta com o aumento da temperatura e com a diminuição da frequência de vibração devido ao aumento do tempo de residência para baixas frequências. Estes valores de difusividade calculados utilizando o modelo tri difusional de Fick exibiram uma magnitude perto dos valores propostos para o modelo uni difusional (difusão longitudinal) em um secador estático reportados por RUIZ-CABRERA et al. (1997) que variaram de 3,472x10⁻¹⁰ a 4,756x10⁻¹⁰ m²/s. Estes valores mostram que a secagem procedeu-se através de todas as superfícies das amostras, isto é, tridimensionalmente.

6.2.4 Cálculo da energia de ativação

A energia de ativação foi avaliada utilizando uma equação linear tipo Arrhenius que correlaciona as difusividades efetivas e as duas temperaturas absolutas de secagem (323,15 K e 333,15 K).

Tabela 19: Energia de ativação para a cenoura.

Nível de frequência	E _a . [J/kg mol]	
	Uni direcional	Tri direcional
5	38.141,4	43.500,8
7	43.776,4	47.569,2

A energia de ativação mostrada na Tabela 19 exibe uma magnitude perto dos valores encontrados na literatura propostos para materiais biológicos: sementes de trigo, de 54 a 70,2 kJ/mol (BECKER e SALLANS, 1955); gel de amido, de 18,8 a 50 kJ/mol (FISH, 1958); soja, de 28,8 a 30 kJ/mol (KITIC e VIOLLEZ, 1984); cebolinha, de 29,05 a 42,05 kJ/mol (PARK, BROD e SILVA, 1996); champinhon em conserva, de 23,89 a 31,45 kJ/mol (BRÓVIA i PIJUAN, BROD e PARK, 1997).

6.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA A CASCA DE OVO

6.3.1 Atividade de água à temperatura ambiente

Devido às suas características o produto casca de ovo foi dividido em casca e pele com propriedades diferentes, e assim todas as determinações foram realizadas para os dois produtos.

Nas Tabelas 20 e 21 são apresentados os valores das médias das umidades de equilíbrio para cada umidade relativa:

Tabela 20: Umidade de equilíbrio para a pele a 25°C.

UR (%)	X _{eq}	Desvio
12,0	0,0317 ±	0,0004
22,7	0,0633 ±	0,0009
32,0	0,0795 ±	0,0017
57,8	0,0957 ±	0,0008
64,3	0,1059 ±	0,0017
75,2	0,1362 ±	0,0018
87,0	0,1781 ±	0,0037

Tabela 21: Umidade de equilíbrio para a casca a 25°C.

UR (%) ± 1%	X _{eq}	Desvio
12,0	0,0078 ±	0,0016
22,7	0,0093 ±	0,0009
32,0	0,0106 ±	0,0018
43,8	0,0118 ±	0,0020
57,8	0,0123 ±	0,0021
64,3	0,0132 ±	0,0021
75,2	0,0143 ±	0,0018
87,0	0,0177 ±	0,0033

Com estes dados médios de umidade de equilíbrio partiu-se agora para a determinação dos parâmetros das equações de isotermas, para tanto foi utilizado o pacote *Nonlinear Estimation* do *software* estatístico STATISTICA. Para confirmar que os parâmetros da regressão estavam corretos, a regressão foi repetida com vários valores iniciais supostos. O critério usado para avaliar o ajuste das curvas foi o módulo do erro relativo.

$$E = \frac{100}{ne} \cdot \sum_{i=1}^{ne} \left\| \frac{VE - VP}{VE} \right\| \quad (70)$$

Onde :

ne = número de dados experimentais

VE = valores experimentais

VP = valores preditos

Geralmente considera-se que um valor de E inferior a 10% indica um razoável ajuste para propósitos práticos (AGUERRE, SUAREZ e VIOLLAZ, 1989).

Os valores estimados das constantes e erro relativo (E) para os modelos são mostrados nas Tabelas 22 e 23:

Tabela 22: Ajuste da umidade de equilíbrio da pele do ovo.

MODELO	ERRO (%)	PARÂMETROS	VALORES
BET	15,10	N	1
		xm	0,8130
		c	0,2789
BET	12,82	N	3
		xm	0,0921
		c	2,8803
GAB	9,85	xm	0,0604
		c	16,2503
		K	0,7659
HALSEY	14,52	A	0,0023
		B	2,3744
OSWIN	10,32	A	0,0894
		B	0,3619
PELEG	8,64	k ₁	0,1340
		k ₂	0,1619
		n ₁	0,5600
		n ₂	7,7546

Tabela 23: Ajuste da umidade de equilíbrio da casca do ovo.

MODELO	ERRO (%)	PARÂMETROS	VALORES
BET	6,21	N	1
		xm	0,01948
		c	4,0348
BET	4,55	N	3
		xm	0,0683
		c	28,7557
GAB	3,17	xm	0,008
		c	22328,5656
		K	0,6208
HALSEY	7745,69	A	0,0822
		B	54,6039
OSWIN	2,55	A	0,0118
		B	0,1982
PELEG	1,20	k ₁	0,0148
		k ₂	0,0170
		n ₁	0,3014
		n ₂	11,3359

Pode-se observar que os melhores ajustes foram obtidos com os modelos de PELEG, OSWIN e GAB, respectivamente. O modelo de PELEG foi então adotado para expressar a isotermas de equilíbrio (Figuras 70 a 73).

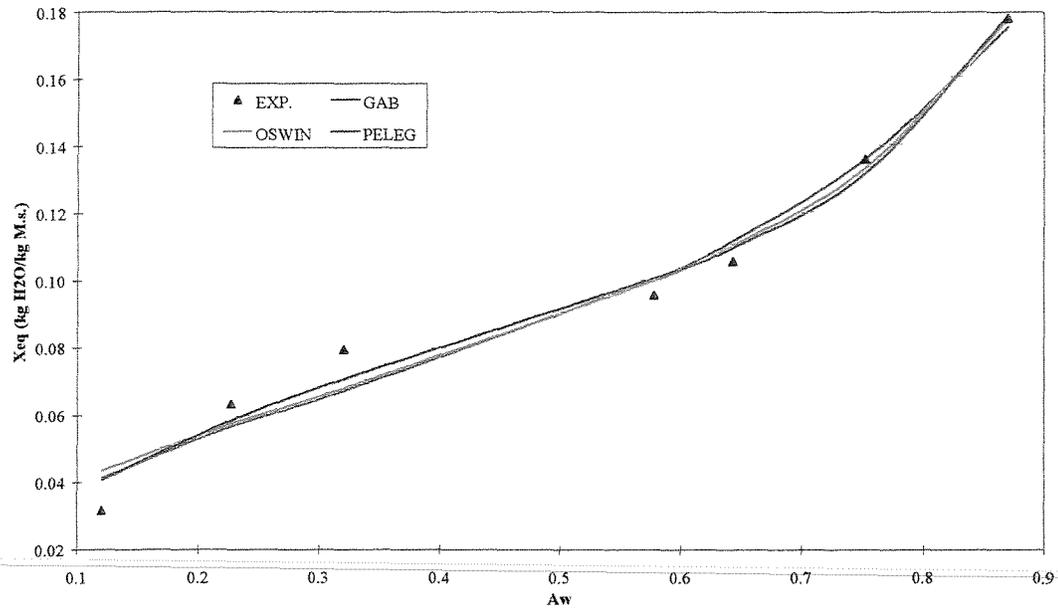


Figura 70: Ajustes das equações de isotermas para a pele.

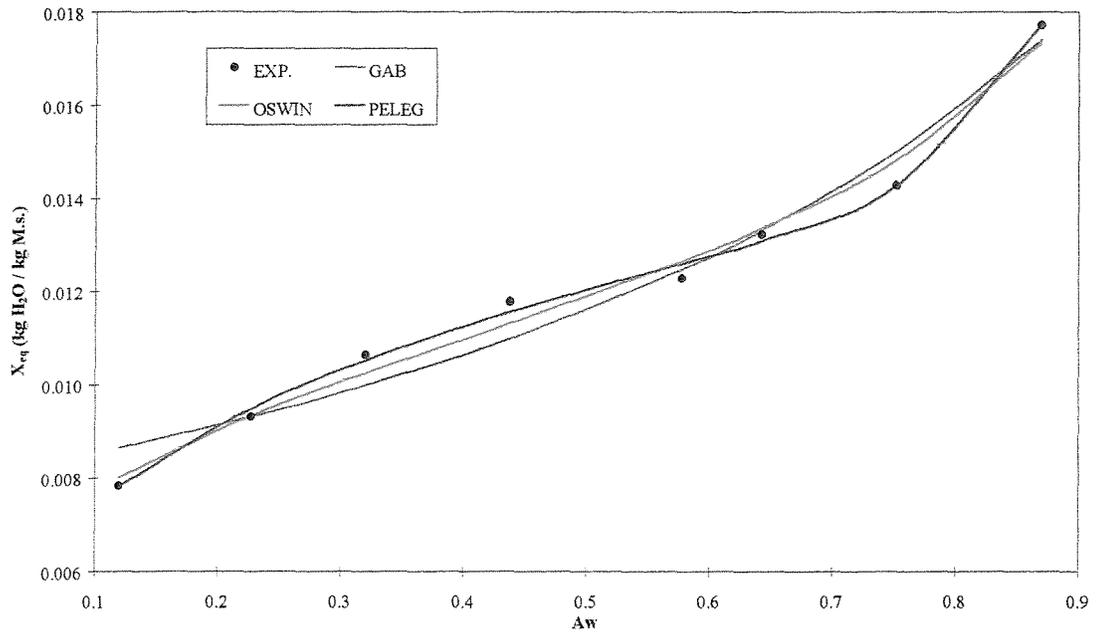


Figura 71: Ajustes das equações de isotermas para a casca.

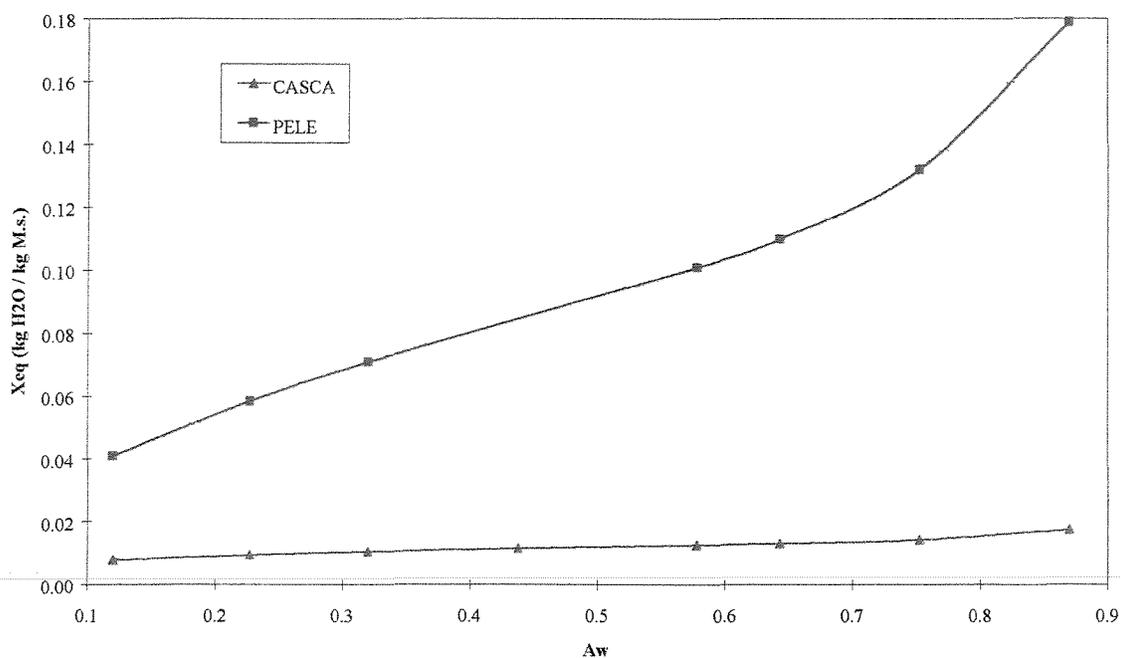


Figura 72: Curvas de equilíbrio da casca e da pele ajustadas pelo modelo de PELEG.

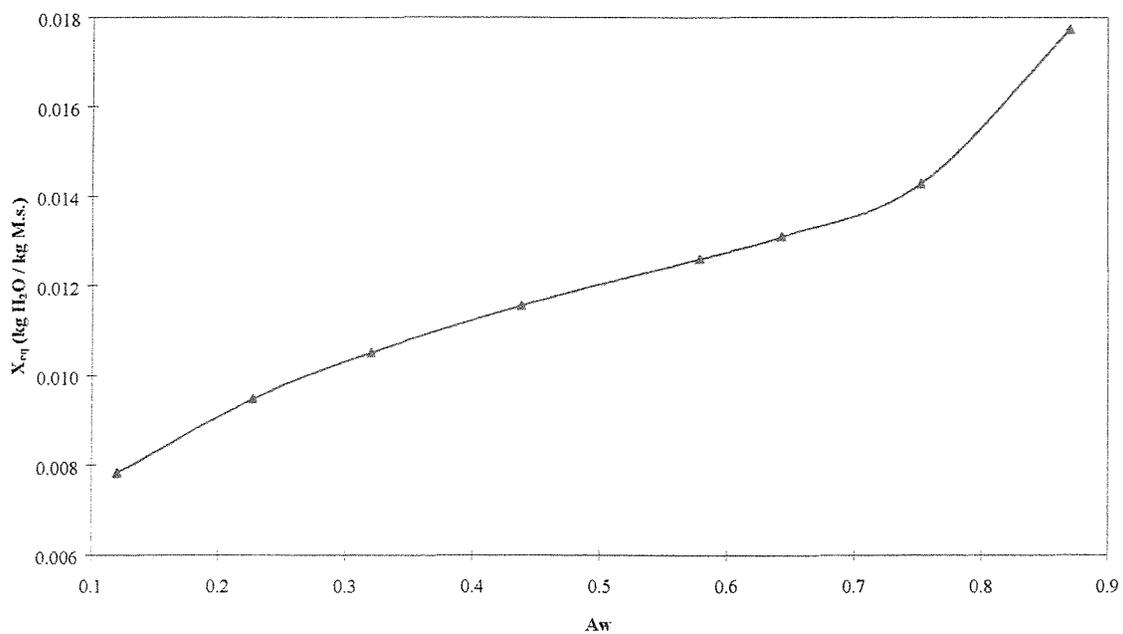


Figura 73: Curvas de equilíbrio só da casca ajustadas pelo modelo de PELEG.

6.3.2 Densidade real

De acordo com a metodologia descrita a densidade real foi determinada para a casca e para a pele do ovo em cinco repetições.

Tabela 24: Densidade real para a casca de ovo.

Amostra	M _{prod} (g)	V _{prov} (ml)	V _{prov+prod} (ml)	ρ_{real} (g/ml)
1	17,10	24,0	32,0	2,14
2	16,46	25,5	32,5	2,35
3	16,34	25,5	32,5	2,33
4	15,41	24,0	31,0	2,20
5	17,28	25,0	32,5	2,30
Média				2,27
Desvio padrão				0,09
C.v. (%)				4,07

Tabela 25: Densidade real para a pele de ovo.

Amostra	M _{prod} (g)	V _{prov} (ml)	V _{prov+prod} (ml)	ρ_{real} (g/ml)
1	1,73	50	55	0,35
2	2,68	50	56	0,45
3	1,89	50	54	0,47
4	1,99	50	55	0,40
5	1,86	50	54	0,47
Média				0,43
Desvio padrão				0,05
C.v. (%)				12,48

Conforme pode ser observado a pele apresentou um alto coeficiente de variação devido à sua forma bastante irregular.

6.3.3 Densidade aparente

De acordo com a metodologia descrita a densidade aparente foi determinada para a casca e para a pele do ovo em cinco repetições.

Tabela 26: Densidade aparente para a casca de ovo.

Volume da proveta: 50 ml			
Amostra	M_{prov} (g)	$M_{\text{prov+prod}}$ (g)	ρ_{ap} (g/ml)
1	49,49	110,69	1,22
2	49,49	105,09	1,11
3	49,49	106,74	1,15
4	49,49	109,45	1,20
5	49,49	107,48	1,16
Média			1,17
Desvio padrão			0,04
C.v. (%)			3,79

Tabela 27: Densidade aparente para a pele de ovo.

Amostra	M_{prov} (g)	$M_{\text{prov+prod}}$ (g)	V_{prov} (ml)	ρ_{ap} (g/ml)
1	212,54	223,02	150	0,07
2	212,54	242,23	160	0,19
3	212,54	249,38	174	0,21
4	212,54	241,82	150	0,20
5	212,54	236,49	160	0,15
Média				0,16
Desvio padrão				0,06
C.v. (%)				34,79

Conforme pode ser observado a pele apresentou um alto coeficiente de variação devido à sua forma bastante irregular.

6.3.4 Diâmetro médio da partícula

De acordo com a metodologia descrita anteriormente o diâmetro médio da partícula foi determinado para a casca e para a pele do ovo.

Tabela 28: Média dos dados de determinação de diâmetro médio da casca do ovo.

<i>PENEIRA</i>	<i>MASSA(g)</i>	x_i	$d_{pi}(mm)$	x_i/d_{pi}
6	0,33	0,00	3,36	0,00
8	4,60	0,02	2,38	0,01
10	36,71	0,12	1,68	0,07
14	91,69	0,30	1,19	0,26
28	154,38	0,51	0,59	0,87
48	14,92	0,05	0,297	0,17
Fundo	0,04	0,00	0,15	0,00
Total	302,67	1,00	-	1,37

Tabela 29: Média dos dados de determinação de diâmetro médio da pele do ovo.

<i>PENEIRA</i>	<i>MASSA(g)</i>	x_i	$d_{pi}(mm)$	x_i/d_{pi}
0,25"	0.15	0.00	6.35	0.00
4	0.36	0.00	4.76	0.00
6	1.04	0.01	3.36	0.00
8	2.59	0.04	2.38	0.01
14	12.41	0.17	1.19	0.14
28	24.41	0.33	0.59	0.56
48	22.75	0.30	0.297	1.03
Fundo	10.41	0.14	0.15	0.92
Total	74.13	1.00	-	2.67

Tabela 30: Resultados da determinação de diâmetro médio – dp.

Casca do ovo	Diâmetro médio (mm)	0,729
	Desvio padrão	0,028
	C.v. (%)	3,84
Pele do ovo	Diâmetro médio (mm)	0,374
	Desvio padrão	0,111
	C.v. (%)	29,68

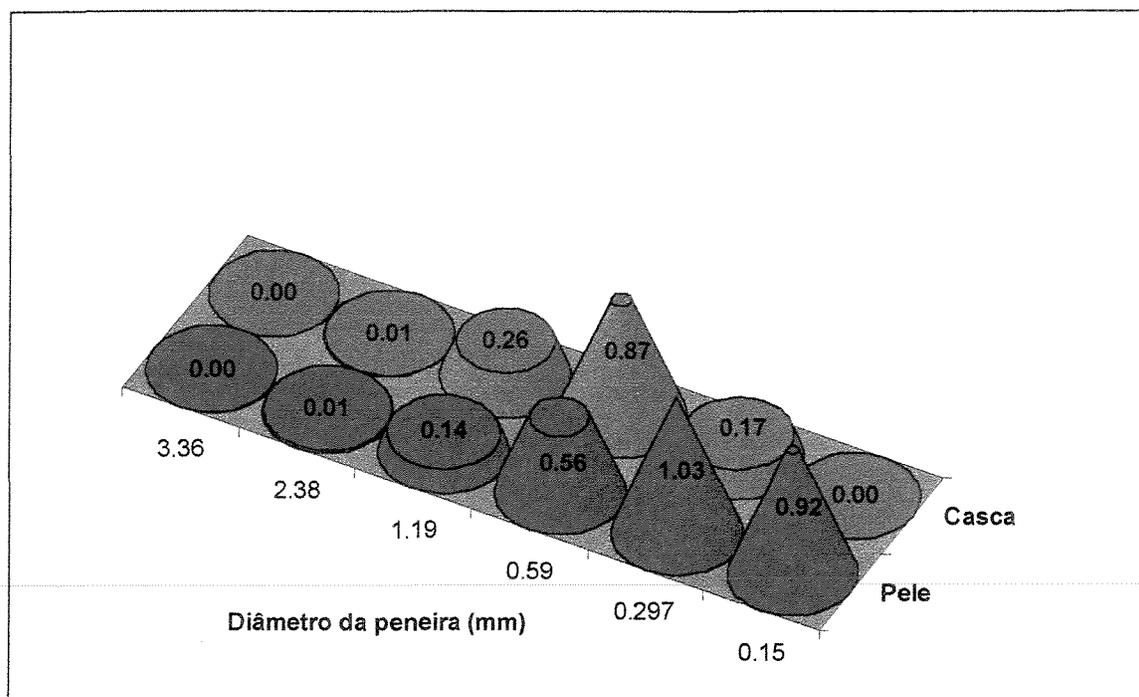


Figura 74: Distribuição da pele e casca de ovo retida nas peneiras.

6.3.5 Espessura da casca de ovo

Obteve-se a espessura da casca de ovo medindo-se 30 partículas com um micrômetro digital de precisão de 0,001 mm, obtendo-se o seguinte resultado:

Tabela 31: Espessura média da casca de ovo.

Espessura da casca de ovo (mm)	0,381
Desvio padrão	0,036
C.v. (%)	9,45

FAGAN, BUCKLEY e TSANG (1988) desenvolveram um método de medição da espessura da casca de ovo utilizando um medidor eletrônico. O resultado foi comparado ao método mecânico-manual obtendo os seguintes resultados:

Tabela 32: Espessura da casca de ovo.

Instrumento	Espessura (mm)	Desvio padrão
Medidor eletrônico	0,349	0,022
Medidor mecânico	0,349	0,021

Fonte: FAGAN, BUCKLEY e TSANG (1988)

6.3.6 Esfericidade da casca de ovo

Utilizando os valores da espessura e do diâmetro médio da partícula calculou-se a esfericidade através da metodologia descrita anteriormente (Tabela 33).

Tabela 33: Cálculo da esfericidade da casca de ovo

$S_{p\text{total}}$	1,709 mm ²
S_p	0,418 mm ²
V_p	0,159 mm ³
r_e	0,336 mm
S_e	1,420 mm ²
ϕ	0,831

6.3.7 Dados do ar e água

A seguir estão mostrados os dados das propriedades do ar e da água que serão utilizados em interpolações para os cálculos mostrados nos itens a seguir.

Tabela 34: Propriedades do ar e da água.

	T (K)	ρ (kg/m ³)	$\mu \times 10^5$ (Pa s)	Cp (J/kg K)	$k \times 10^{-2}$ (W/m K)
Ar	280	1,2614	1,7503	1005,7	2,47
	300	1,1769	1,8464	1006,3	2,62
	320	1,1032	1,9391	1007,3	2,78
	340	1,0382	2,0300	1008,5	2,93
Água	273	999,3			
	293	998,2			
	313	992,2			

Fonte: WELTY, WICKS e WILSON, 1984

Tabela 35: Área do tubo de vidro e do anemômetro.

	Diâmetro (m)	Área (m ²)
Tubo de vidro	0,144	0,016
Anemômetro	0,105	0,009

Tabela 36: Propriedades físicas da casca de ovo.

ρ_{ap} (kg/m ³) =	1168,0
ρ_{real} (kg/m ³) =	2265,7
dp (m) =	$0,729 \times 10^{-3}$
ϕ =	0,831

6.3.8 Propriedades fluido-dinâmicas

Utilizando um tubo de vidro determinou-se as velocidades mínima de fluidização e de arraste para a casca e a pele do ovo.

Tabela 37: Dados de determinação da velocidade terminal.

PELE	Mínima fluidização	0,36 m/s
	Arraste	3,30 m/s
CASCA	Mínima fluidização	1,52 m/s
	Arraste	5,08 m/s

Nas Figuras 75 e 76 estão mostrados os dados de perda de carga levantadas no tubo de vidro para a casca de ovo (onde cada corrida representa uma repetição do experimento).

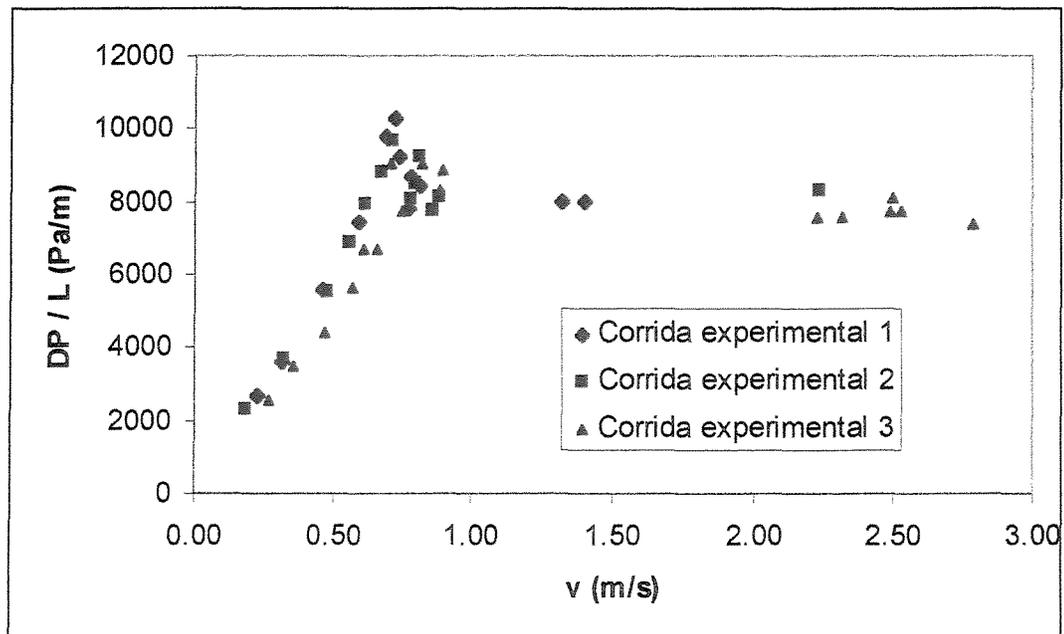


Figura 75: Curva de perda de carga versus a velocidade do ar.

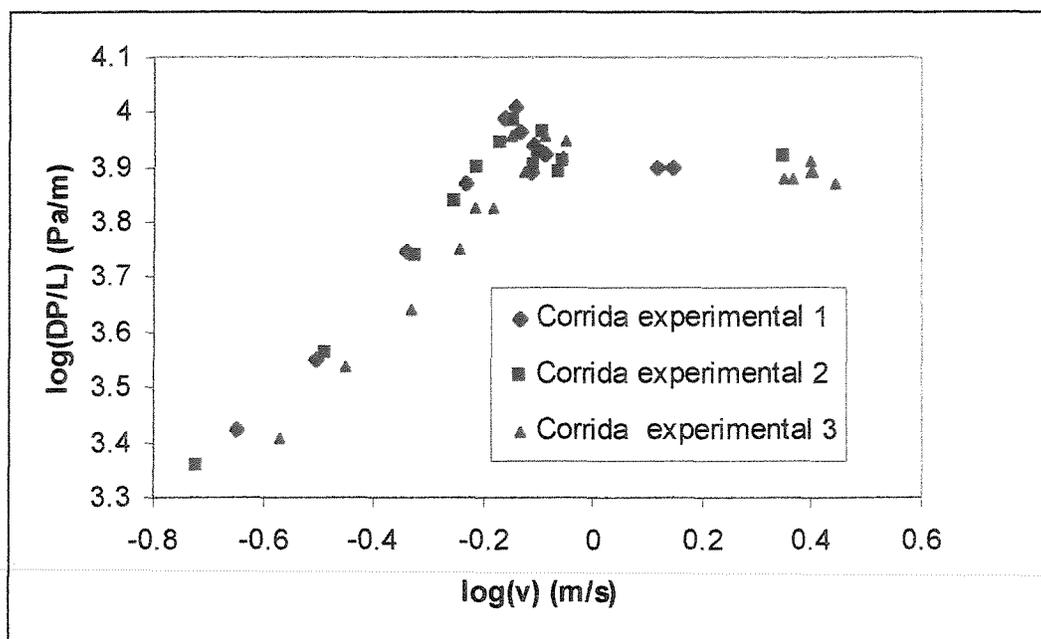


Figura 76: Logaritmo da perda de carga versus a velocidade do ar.

Como pode ser observado o logaritmo da curva de perda de carga (Figura 76) apresenta a mesma forma das curvas encontradas em literatura (Figura 13).

Foram também realizados testes com a equação de Ergun:

Tabela 38: Testes com a equação de Ergun.

$\mu_{\text{ar}} \text{ (Pa s)} =$	$1,830 \times 10^{-5}$	$T_{\text{ar}} \text{ (}^\circ\text{C)} =$	23,5	
$\rho_{\text{ar}} \text{ (kg/m}^3\text{)} =$	1,19			
$\varepsilon \text{ (eq. 5)} =$	0,50			
v tubo (m/s)	$\Delta P/L \text{ (Pa/m)}$	H leito (m)	$\varepsilon \text{ (eq. 4)}$	$\varepsilon \text{ Ergun (eq. 1)}$
0,59	7405,04	0,140	0,48	0,57
0,69	9781,97	0,142	0,49	0,56
0,72	10239,07	0,142	0,49	0,56
0,77	7770,72	0,147	0,51	0,60
0,81	8410,66	0,146	0,51	0,60
0,78	8684,92	0,148	0,51	0,59
0,74	9233,45	0,143	0,50	0,58

Os valores calculados da porosidade pela equação de Ergun estão próximos dos valores de porosidade calculada pela equação 4, mostrando que no presente caso pode-se utilizar tanto uma quanto outra equação.

Os parâmetros das equações empíricas que correlacionam a expansão do leito e as velocidades do ar estão mostrados nas Figuras 77 a 79.

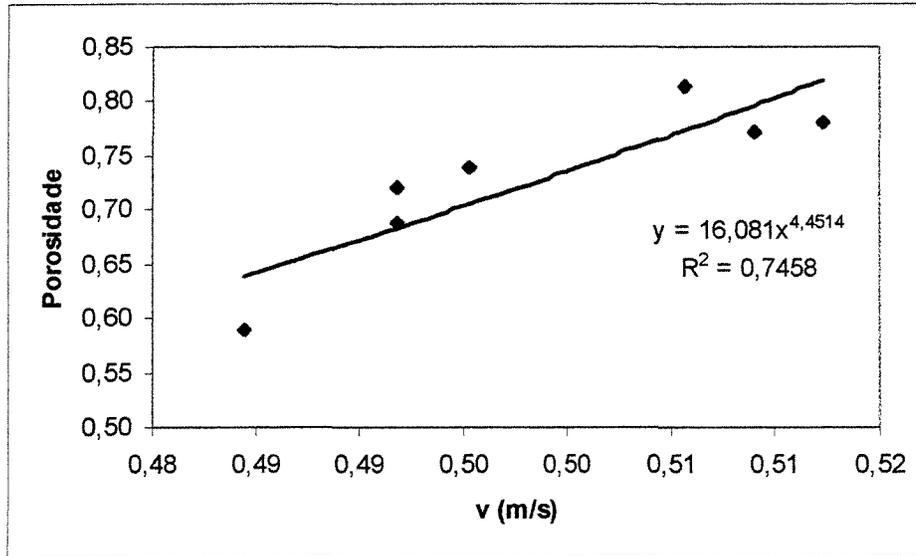


Figura 77: Correlação descrita por AKAPO et al. (1989).

Assim, os parâmetros da equação ficam da forma:

$$v = A \cdot \varepsilon^n = 16,08 \cdot \varepsilon^{4,45}$$

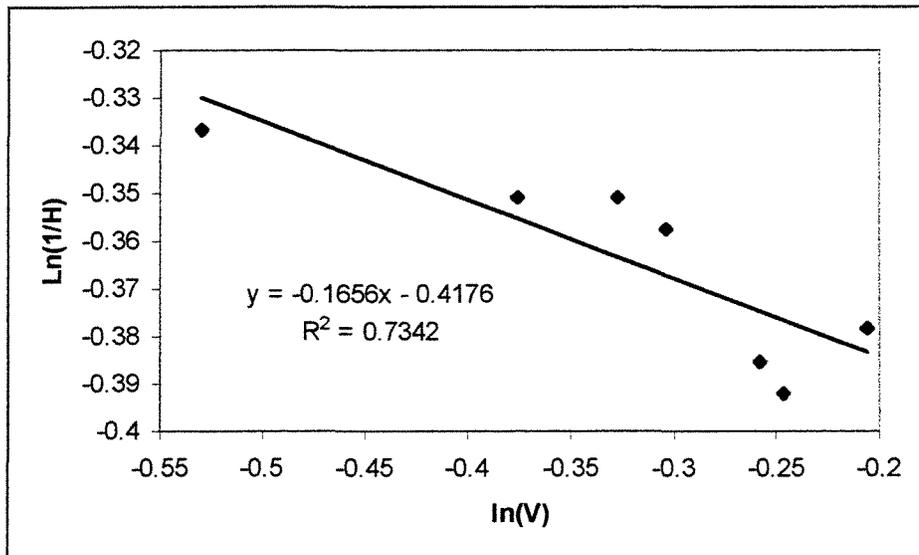


Figura 78: Determinação do coeficiente $1/n$ da equação de DAVIES e RICHARDSON (1966).

O coeficiente $1/n$ é então:

$$\ln\left(\frac{1}{H}\right) = \ln(K_1) + \frac{1}{n} \cdot \ln(K_2) + \frac{1}{n} \cdot \ln(v) = -0,4176 - 0,1656 \cdot \ln(v)$$

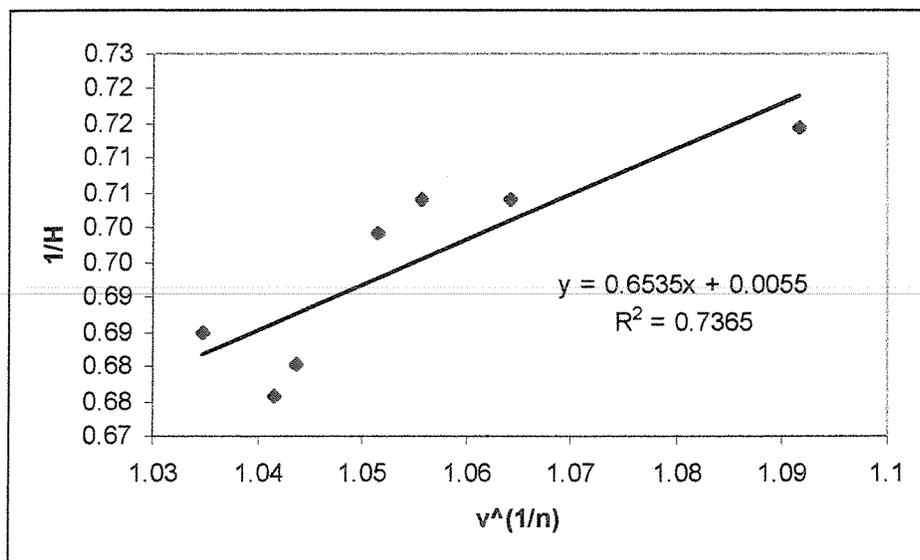


Figura 79: Correlação descrita por DAVIES e RICHARDSON (1966).

Assim, os parâmetros da equação ficam da forma:

$$\frac{1}{H} = K_1 + K_2 \cdot \left(v^{1/n}\right) = 0,0055 + 0,6535 \cdot \left(v^{-0,1656}\right)$$

O coeficiente de correlação encontrado para as duas equações mostraram um bom ajuste para os dados experimentais.

6.3.9 Condutividade térmica

Na Figura 80 estão mostrados os dados coletados em duas repetições para o cálculo da condutividade térmica da casca de ovo pelo método da sonda, conforme a metodologia descrita anteriormente (PARK, MURR e SALVADEGO, 1997):

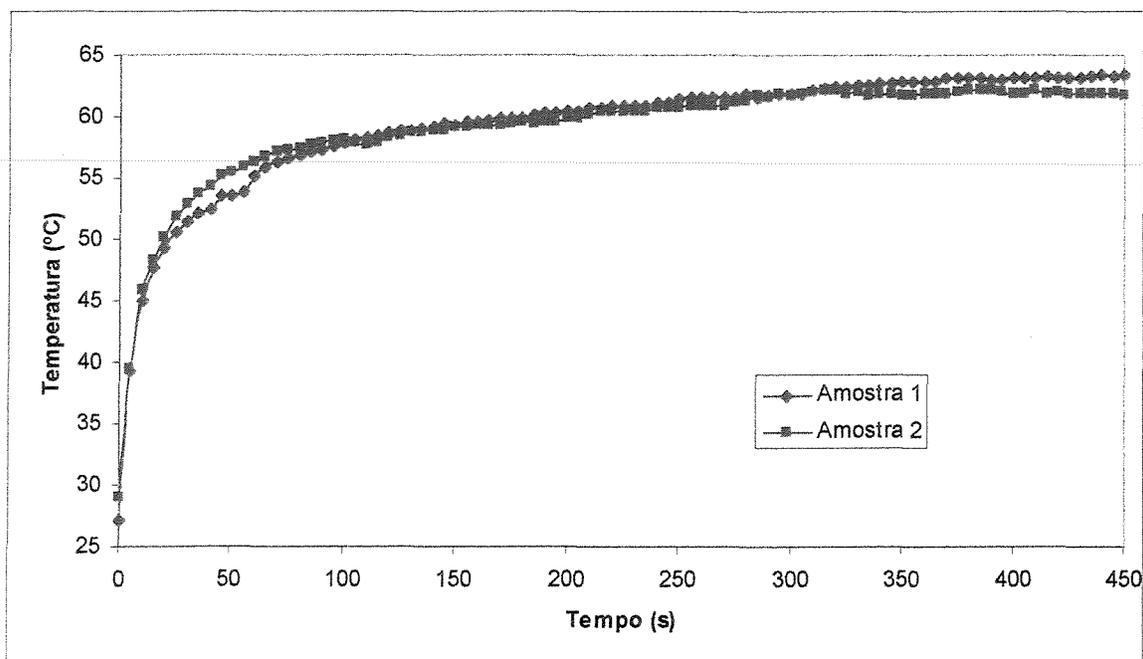


Figura 80: Variação da temperatura em função do tempo para a casca de ovo.

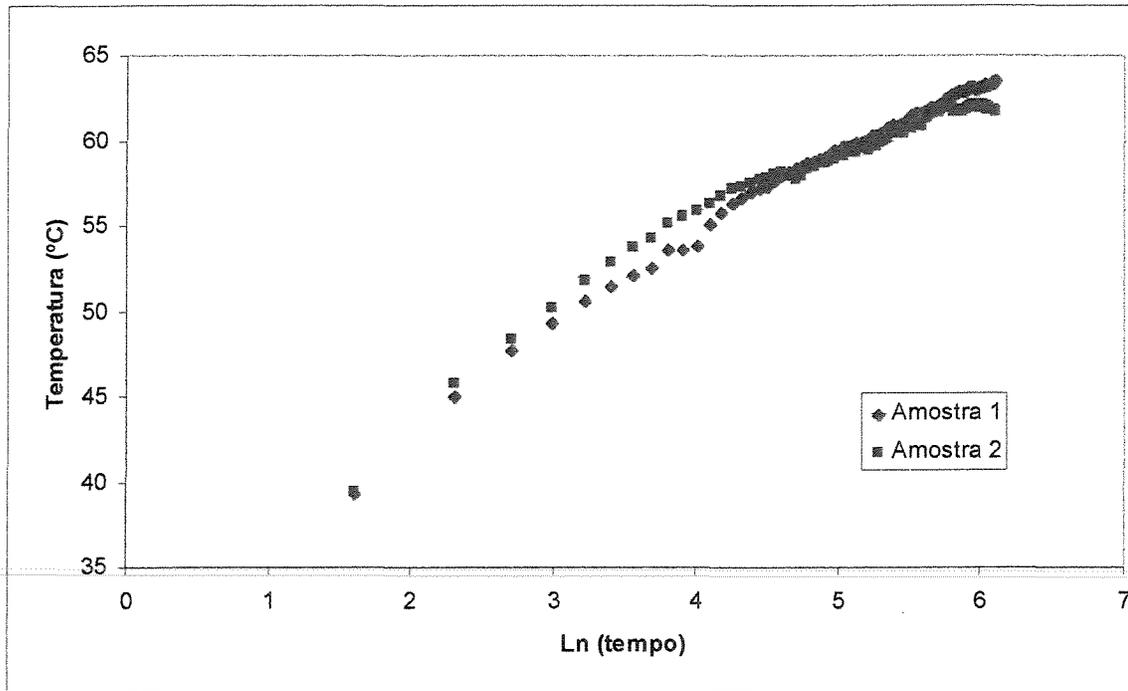


Figura 81: Variação da temperatura em função do logaritmo do tempo.

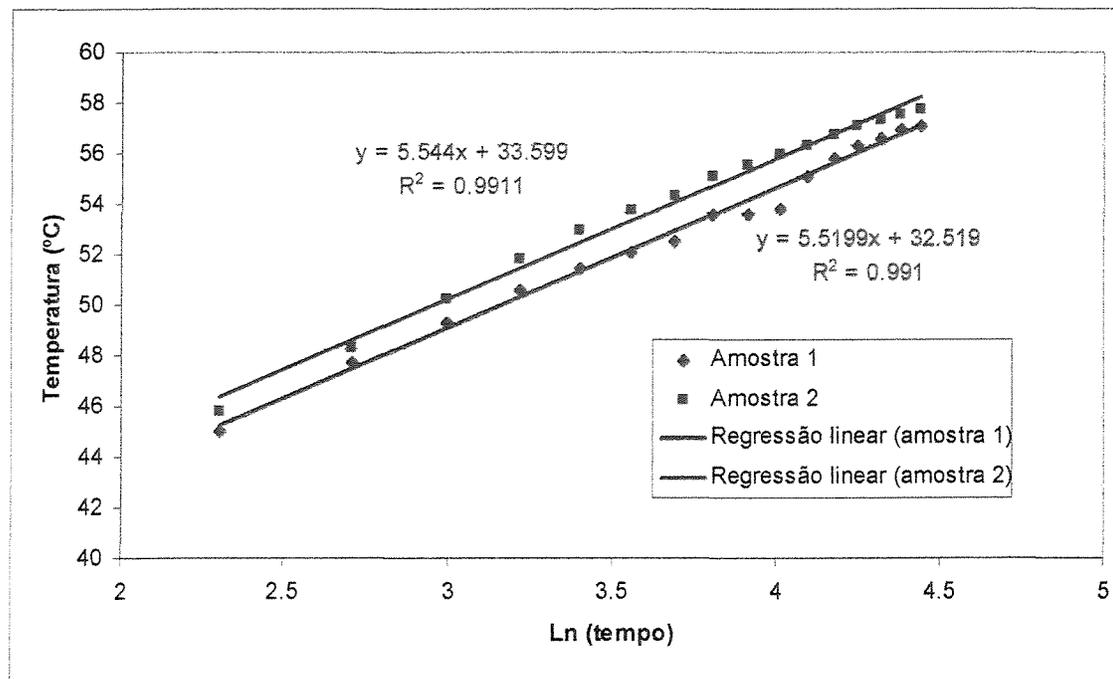


Figura 82: Regressão linear dos dados de temperatura e do ln do tempo.

Os valores de condutividade térmica para cada uma das repetições foi calculado utilizando-se o intervalo que forneceu a maior linearidade nos gráficos acima (Figuras 81 e 82). Desta forma, obtiveram-se os seguintes valores:

Tabela 39: Valores de condutividade térmica obtidos para a casca de ovo.

Amostra	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência elétrica (J/s)	q (J/m s)	m	k (J/ m s °C)
1	5,07	0,27	1,37	8,56	5,52	0,247
2	4,93	0,25	1,23	7,70	5,54	0,221
Média						0,234

Segundo PERRY e CHILTON (1973) a condutividade térmica do cálcio puro em forma giz é de 0,68 W/m K, e considerando que a casca de ovo contém 36% de cálcio a contribuição do cálcio na condutividade térmica seria de = 0,25 W/m K.

6.3.10 Transferência de calor

Para se estudar a transferência de calor em um leito fluidizado, determinou-se o coeficiente convectivo (h) para o regime transiente (Newtoniano) e para o regime estacionário (coluna de recheio).

Os dados obtidos foram para três temperaturas (35, 50 e 60°C) e uma vazão de ar, conforme está indicada na Tabela 40.

Tabela 40: Dados de vazão para as três corridas experimentais.

T (°C)	v (m/s)	\dot{V} (m ³ /s)
35	1,89	0,031
50	2,19	0,036
60	2,29	0,037

A capacidade térmica da casca de ovo foi determinada por MOHSENIN (1980) e está mostrada a seguir:

Tabela 41: Capacidade térmica da casca de ovo

C _p =	0,74	Btu/lb °F
C _p =	3098,2	J/ kg K

A área específica de troca, relação entre a superfície exposta da partícula e o seu volume, foi determinada e está mostrada a seguir:

Tabela 42: Cálculo da área específica exposta da partícula

Superfície partícula (m ²)	1,71x10 ⁻⁶
Volume partícula (m ³)	1,59x10 ⁻¹⁰
Área (m ² /m ³)	10737,66

Nas Figuras 83 a 85 estão indicados os perfis de temperatura em relação ao tempo em um leito fluidizado de casca de ovo para as três temperaturas utilizadas, conforme a metodologia descrita anteriormente.

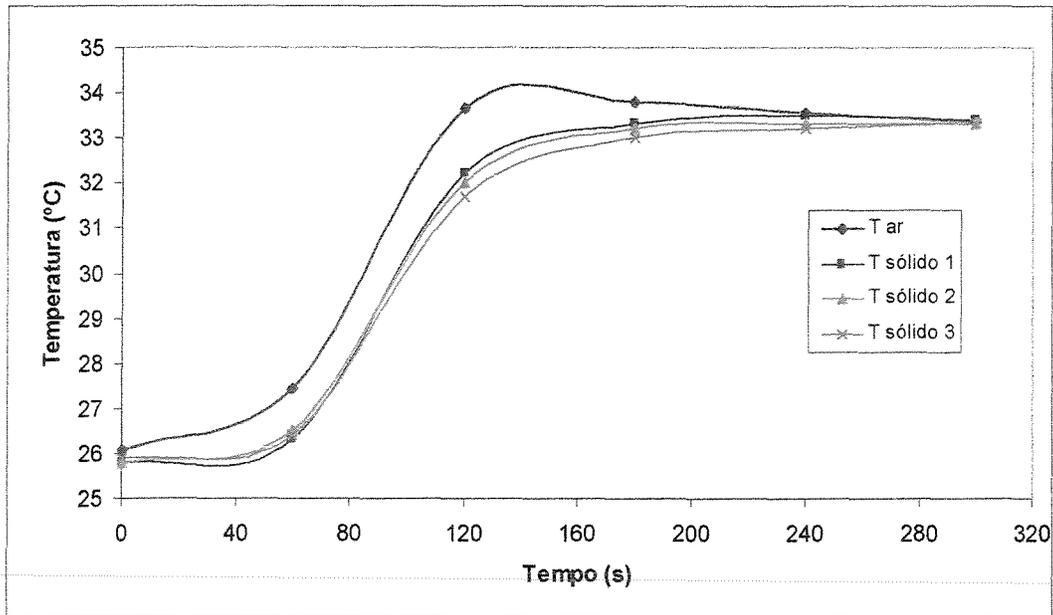


Figura 83: Perfil de temperaturas para a corrida de 35°C.

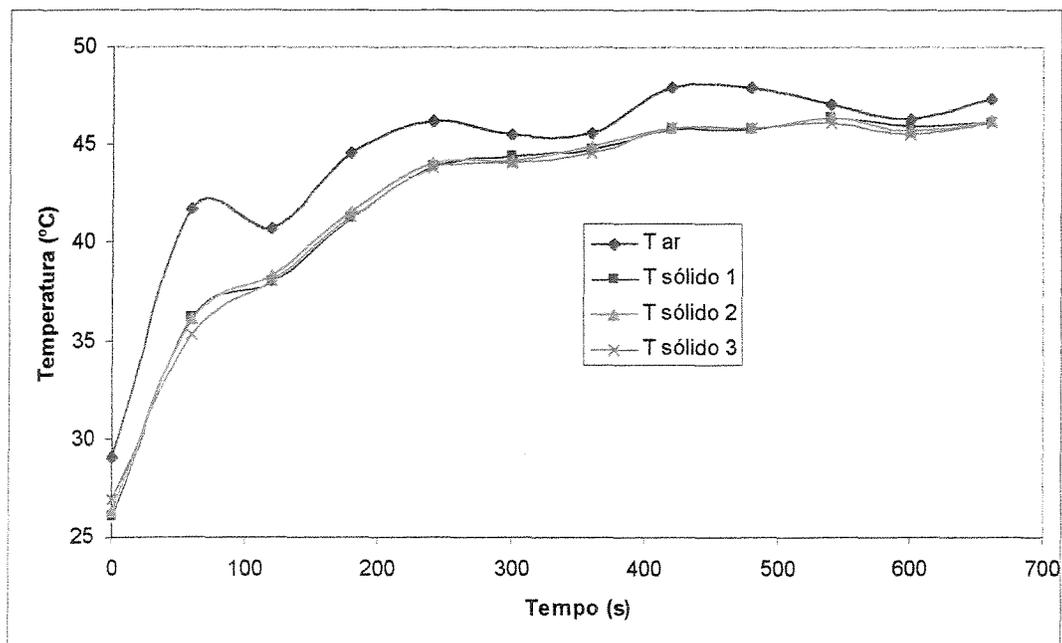


Figura 84: Perfil de temperaturas para a corrida de 50°C.

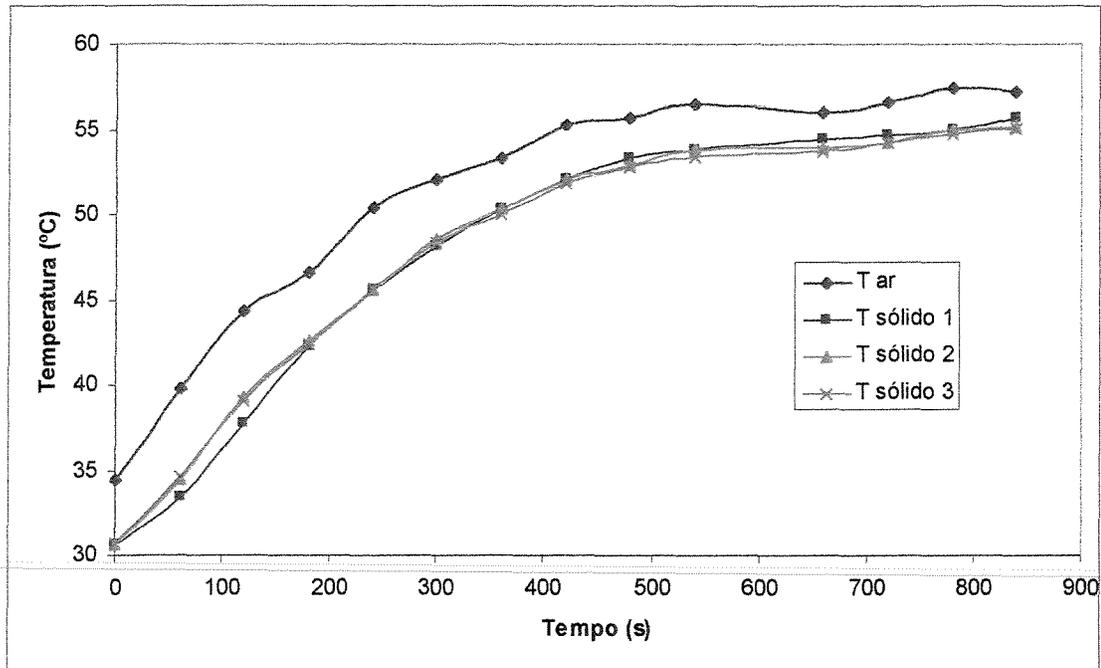


Figura 85: Perfil de temperaturas para a corrida de 60°C.

Em um regime permanente o coeficiente convectivo pode ser assim determinado ($A =$ área do tubo):

$$q = \dot{m}_{ar} \cdot C_{p_{ar}} \cdot (T_{entrada} - T_{saída}) = h \cdot A \cdot (T_{entrada} - T_{sólido}) \quad (71)$$

Utilizando os dados do regime estacionário das corridas anteriores determinou-se o coeficiente convectivo utilizando as equações de um agregado de partículas sugerida por KEEY (1992). Para se testar a relação entre Nu , Re e Pr para um agregado de partículas, utilizaram-se os dados do regime estacionário do experimento e montou-se a Tabela 43, onde a temperatura do sólido, do ar e de saída foram as médias obtidas no regime estacionário das curvas anteriores. O coeficiente convectivo foi determinado pela equação 70, Nu pela equação 15, Re pela equação 16, Pr pela equação 12, Nu_{cal} pela equação 17 e a Razão é obtida pela relação entre Nu e Nu_{cal} .

Tabela 43: Verificação da correlação de coluna de recheio.

	T = 35°C	T = 50°C	T = 60°C
\dot{m}_{ar} (kg/s)	0,0354	0,0389	0,0395
$C_{p,ar}$ (J/ kg K)	1006,71	1007,30	1008,09
$T_{entrada}$ (°C)	33,4	46,3	57,7
$T_{sólido}$ (°C)	33,3	45,7	55,5
$T_{saída}$ (°C)	33,3	45,7	55,5
h (J/s m ² K)	3280,18	2549,03	2443,73
Nu	90,94	70,36	66,43
Re	176,64	202,12	205,14
Pr	0,71	0,71	0,71
Nu_{calc.}	11,54	12,47	12,57
Razão	7,88	5,64	5,28

Como foi observado o valor do número de Nusselt calculado pela equação 15 ficou de 5,28 a 7,88 vezes maior do que o calculado pela equação 17. Esta diferença pode ser explicada pela alta porosidade do leito e pela adoção da hipótese de que a temperatura do sólido é igual a temperatura do ar.

Utilizando agora os dados obtidos do regime transiente das curvas anteriores, partiu-se para a determinação do coeficiente convectivo, considerando uma única partícula exposta à corrente do ar. Para tal, o logaritmo neperiano da temperatura adimensionalizada (T^* , equação 21) *versus* tempo foi graficado e a inclinação da reta foi determinada (somente para o regime transiente).

Os gráficos de T^* *versus* o tempo estão mostrados nas Figura 86 a 88 (regime transiente).

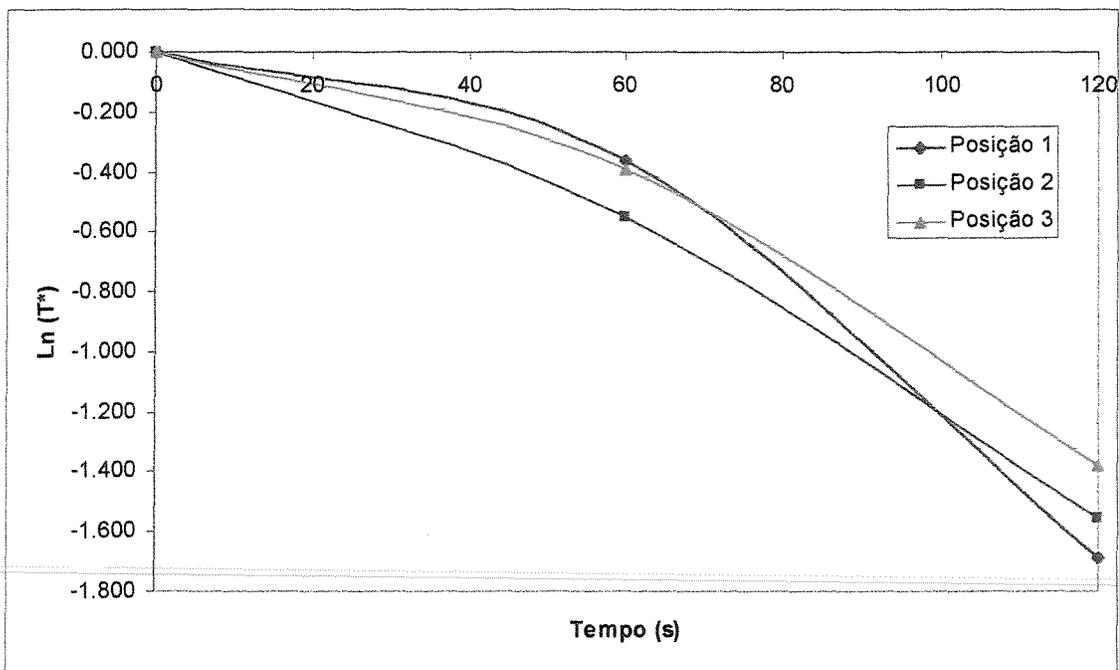


Figura 86: Logaritmo da temperatura adimensionalizada para a corrida de 35°C.

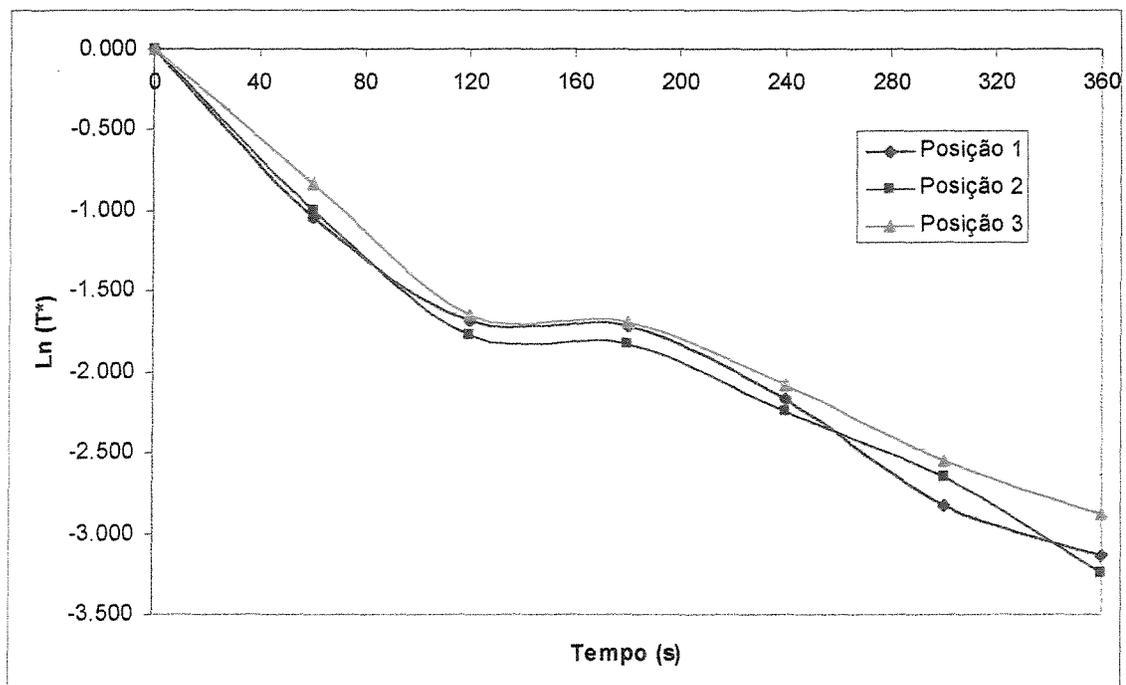


Figura 87: Logaritmo da temperatura adimensionalizada para a corrida de 50°C.

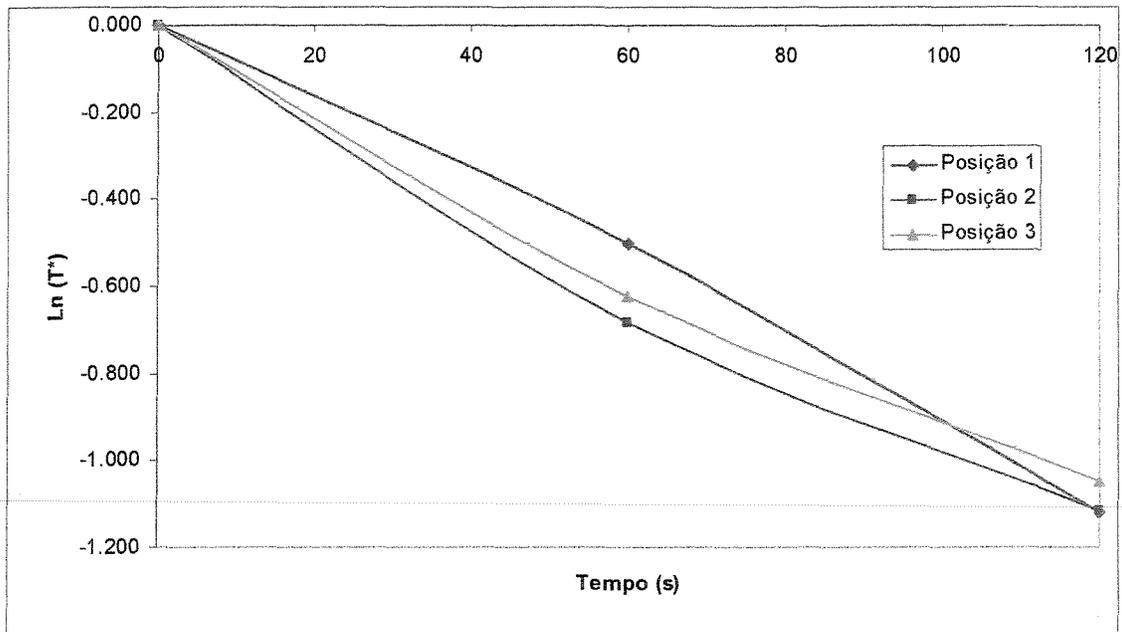


Figura 88: Logaritmo da temperatura adimensionalizada para a corrida de 60°C.

Determinado o coeficiente angular parte-se agora para a determinação do coeficiente convectivo utilizando o Transiente Newtoniano. Para se determinar a influência das resistências interna ou externa sobre o fenômeno foi determinado o número de Biot.

O coeficiente convectivo foi determinado utilizando a inclinação das curvas do $\ln(T^*)$ versus o tempo, através da seguinte fórmula:

$$m = \frac{h \cdot A}{\rho \cdot C_p \cdot V} \quad (72)$$

O valor do coeficiente convectivo foi determinado para se ter uma idéia da magnitude do seu valor numérico, comparando assim com os valores obtidos em literatura.

Tabela 44: Cálculo do coeficiente convectivo e do Biot utilizando o Transiente Newtoniano.

	Termopar	m	R ²	h (J/s m ² K)	Biot
35°C	20	-0,0125	0,88	8,379	0,013
	21	-0,0122	0,97	8,228	0,013
	22	-0,0105	0,93	7,057	0,011
			Média	7,888	0,012
50°C	20	-0,0094	0,91	6,309	0,010
	21	-0,0095	0,90	6,379	0,010
	22	-0,0087	0,91	5,864	0,009
			Média	6,184	0,010
60°C	20	-0,0091	1,00	6,151	0,010
	21	-0,0097	0,98	6,529	0,010
	22	-0,0091	0,99	6,102	0,010
			Média	6,261	0,010

Como pode ser observado o coeficiente convectivo está na faixa de convecção livre de ar: 5 - 50 W/m² K (WELTY, WICKS e WILSON, 1984). O número de Biot expressou que a resistência interna é desprezível e a capacidade de transferir calor por condução é maior do que por convecção. Deve ser ressaltado que a metodologia correta é o calculo efetuado para a coluna de recheio.

6.4 DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM

A empresa Ito Ovos estava interessada em obter um produto (casca de ovo sem a pele) com uma umidade ao redor de 1% em base seca, com um mínimo de contaminação microbiana.

De acordo com a curva de equilíbrio da pele e da casca de ovo, pode-se observar que o potencial de retenção de água pela pele é muito superior ao da casca, sendo necessária, portanto, uma perfeita separação destes dois materiais a fim de obter casca com baixo conteúdo de umidade final.

A distribuição das partículas indica que a separação por simples peneiramento não é recomendável. O diâmetro que retém a maior fração de casca é muito próximo do diâmetro que retém a pele. Os dados de velocidade do ar correspondentes a mínima de fluidização e de arraste mostram que a separação por fluidização é mais eficiente.

Ainda, de acordo com a curva de umidade de equilíbrio à temperatura ambiente (25°C) da casca de ovo, a umidade relativa (UR) do ar de secagem deve estar abaixo de 25% para obter 1% de umidade final em base seca (BS) da amostra.

Para se obter um ar de secagem a baixas temperaturas (25 a 30°C) com umidades relativas abaixo de 30% a melhor opção foi de resfriar o ar ambiente com posterior aquecimento, conforme está indicado na carta psicrométrica indicada a seguir.

Na carta, observa-se que o ar resfriado a 2°C 100% UR (estado 2) é misturado com o ar ambiente (estado 1) obtendo-se o ar no estado 3 (fator de *by - pass* do evaporador). Este ar 3 é aquecido para obter o ar secante de 30°C 20% UR (estado 4), como pode ser observado nas Figuras 89 e 90.

As características destes ares estão mostradas a seguir (obtidas através do programa de cálculo psicrométrico Plus):

Tabela 45: Dados psicrométricos.

Condições do ar	Estados			
	1	2	3	4
Tbs (°C)	30	2	4.6	30
UR (%)	60	100	100	20
Umid. abs. (kg _{H₂O} /kg _{ar seco})	0,017582	0,004742	0,005752	0,005752
Densidade (kg _{ar seco} /m ³)	1,05	1,18	1,16	1,06

Com estes dados parte-se agora para o cálculo da vazão de ar necessária:

1. Segundo o manual do fabricante, a porcentagem de área aberta da tela em perfil “V” de mesh 115 é de 7,6%. O que equivale a uma área de: $0,076 \times \text{área da tela} (3\text{m} \times 0,6\text{m}) = 0,137\text{m}^2$ de área aberta na tela.
2. Considerando uma velocidade do ar igual a 5 m/s, suficiente para arrastar a pele e só fluidizar a casca, a vazão de ar necessária será de: $5 \text{ m/s} \times 0,137\text{m}^2 = 0,685 \text{ m}^3/\text{s} = 2466 \text{ m}^3/\text{h}$.
3. Para o completo dimensionamento do ventilador, resta agora calcular a perda de carga na tela: através da Figura 68 e da Tabela 10 encontra-se um valor de 2190 Pa = 223,25 mmH₂O, para uma velocidade do ar de 5m/s. Utilizando um coeficiente de segurança de 1,5 a perda de carga será de = $2190 \times 1,5 = 3285 \text{ Pa} = 335 \text{ mm H}_2\text{O}$.

Assim o ventilador deve apresentar uma vazão de 0,685 m³/s, com uma pressão estática mínima de 3285 Pa.

DIAGRAMA PSICOMÉTRICO PARA SÃO PAULO - BRASIL

PRESSÃO BAROMÉTRICA = 695,1 mm Hg

Exemplo de uso do Multiplicador m

Conhecendo S (25 °C e 50%), sabendo que no processo
 $I_S, m = \text{calor total/calor sensível} = (h_S - h_I) / 0,24 (t_S - t_I) = 1,5$
 e que $\phi_I = 90\%$, determinar I e t_I . Desenha-se SI passando
 por S e com inclinação $m = 1,5$.
 Têm-se I e $t_I = 11,0$ °C.

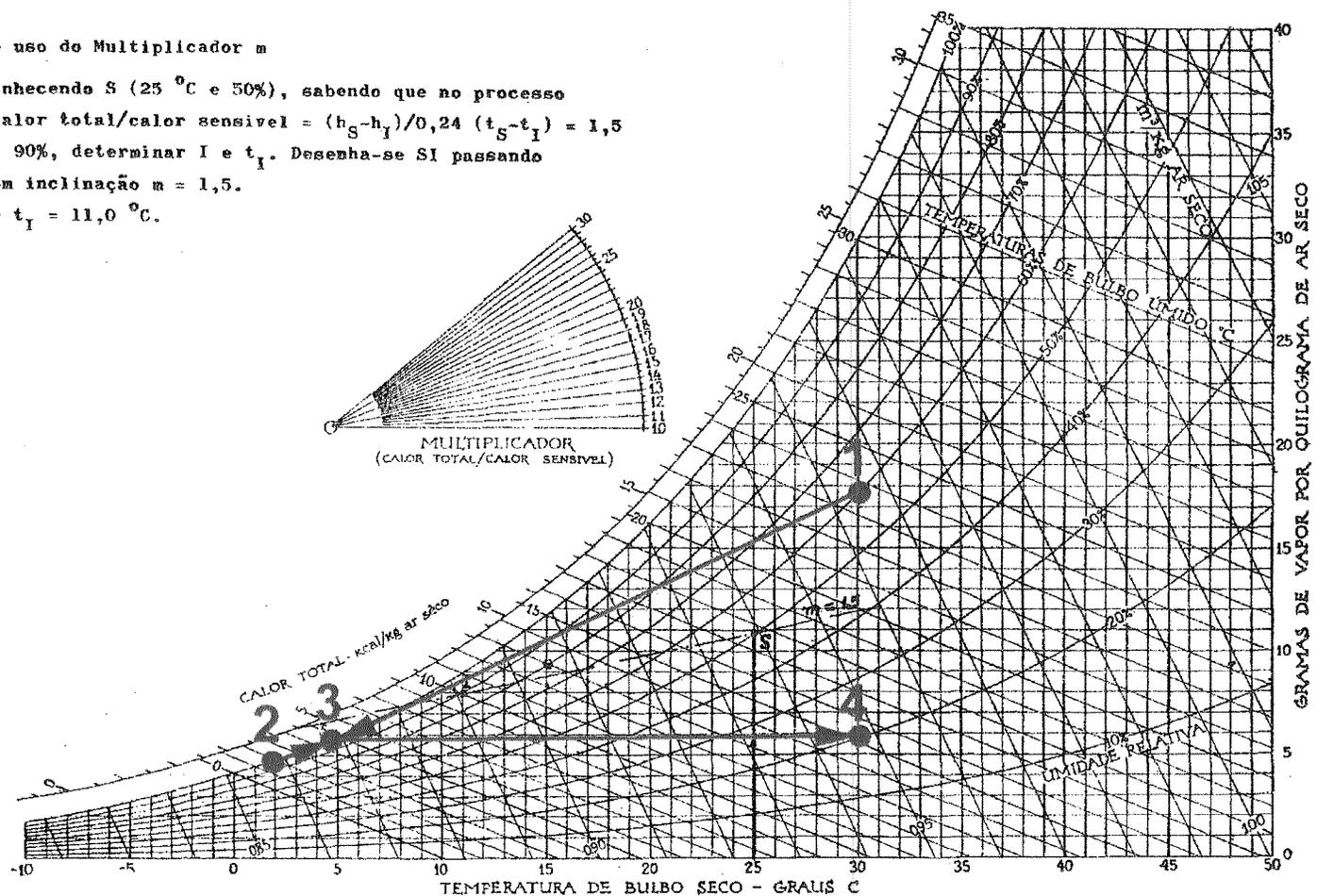


Figura 89: Esquema psicrométrico.

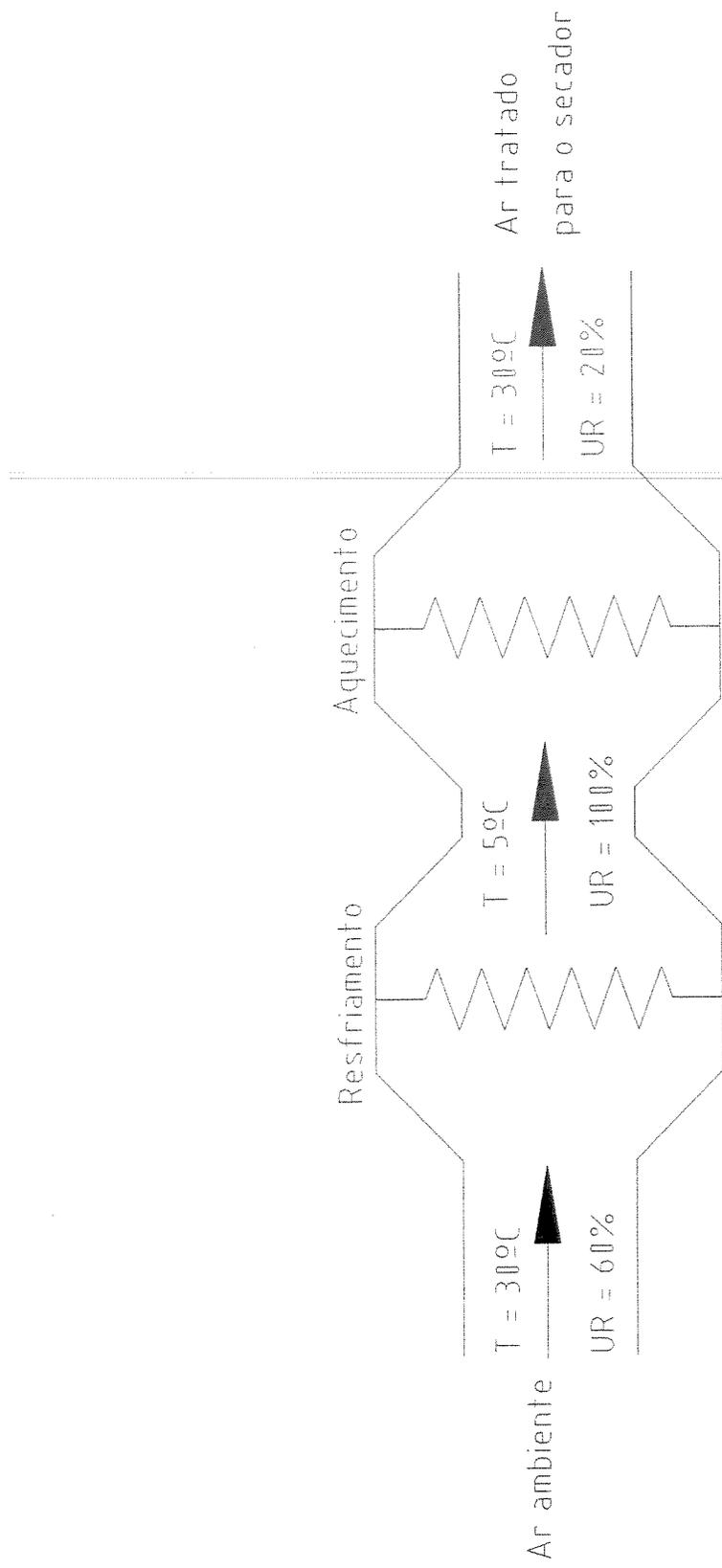


Figura 90: Esquema do tratamento de ar.

6.5 INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE SECAGEM

Conforme o dimensionamento do item anterior, a instalação do sistema de secagem foi efetuada na empresa Ito Ovos.

Os detalhes da instalação estão mostrados nas Figuras 91 a 99.

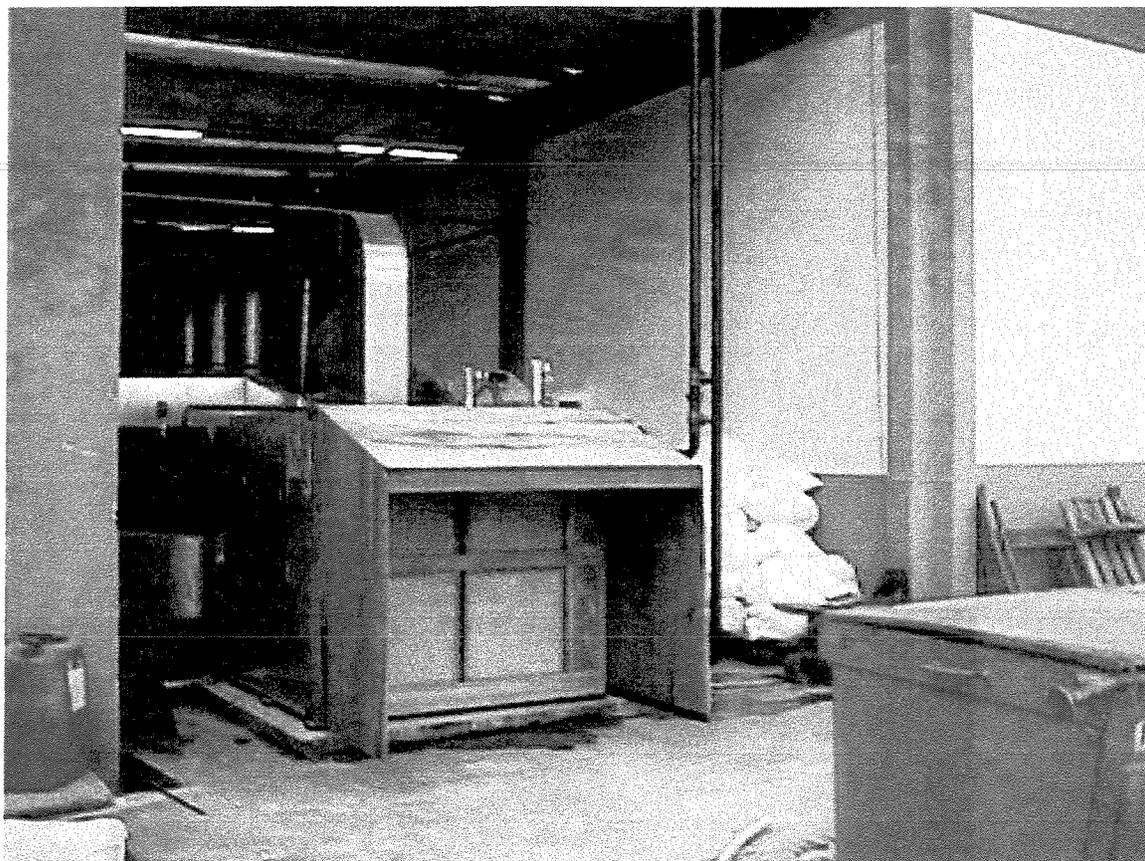


Figura 91: Entrada do local onde se instalou o sistema de secagem.

Na figura 91 observa-se em primeiro plano o tratamento do ar (evaporador + aquecedor), com um filtro de ar na entrada do sistema. Para o resfriamento foi utilizada água gelada no evaporador, já que a empresa tinha disponibilidade de água gelada.

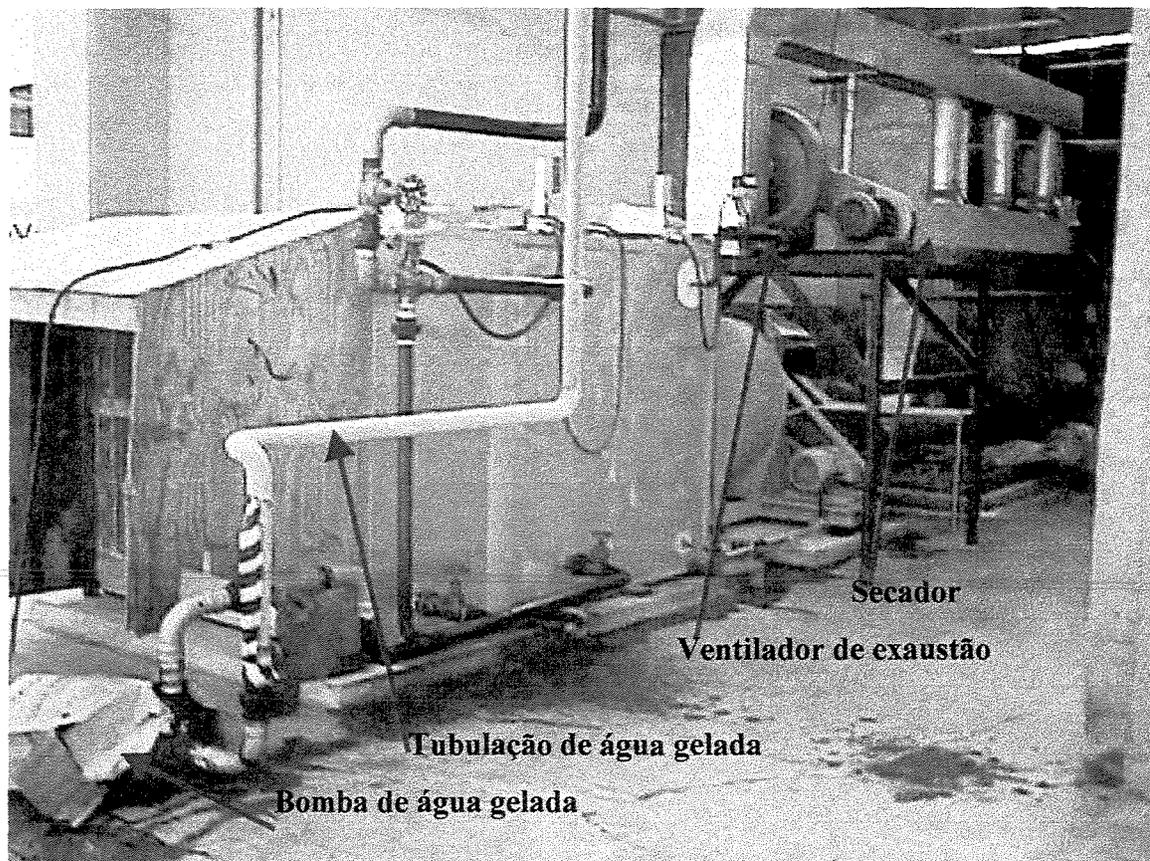


Figura 92: Detalhe do sistema de tratamento do ar.

Na Figura 92 observa-se a entrada de água gelada no evaporador, com uma bomba para aumentar o fluxo, permitindo assim um maior coeficiente convectivo de transferência de calor. Nota-se a formação de uma camada de gelo na tubulação de entrada.

Em segundo plano estão os ventiladores, a tubulação de ar e o secador ao fundo. Foi instalado um ventilador na saída do ar de secagem para promover uma equalização de pressão no secador vibro-fluidizado.

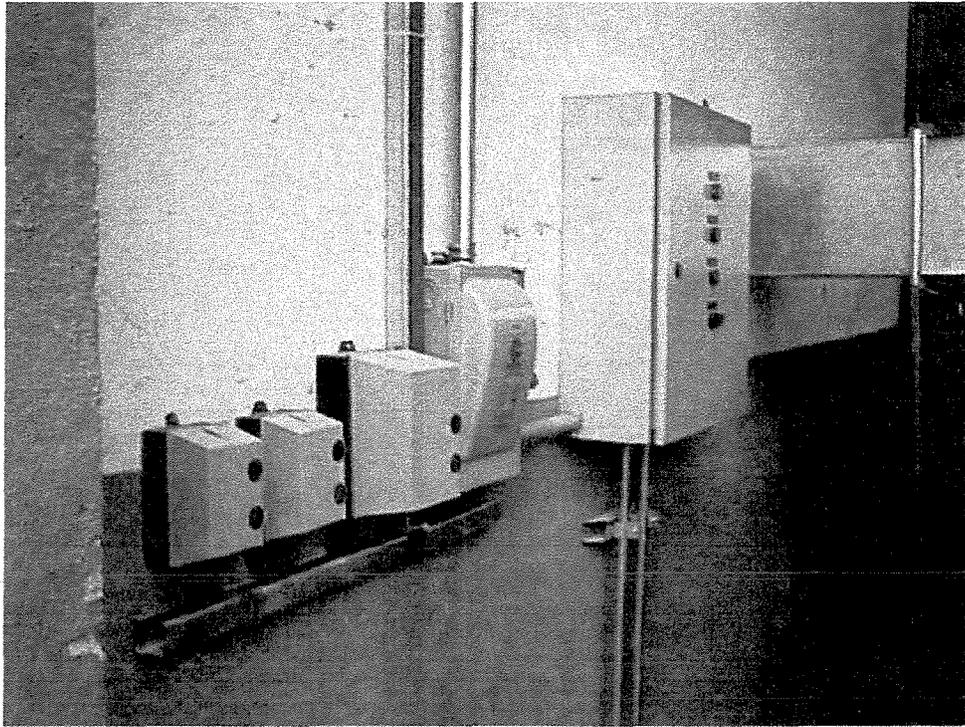


Figura 93: Quadros elétricos de comando do sistema de secagem.

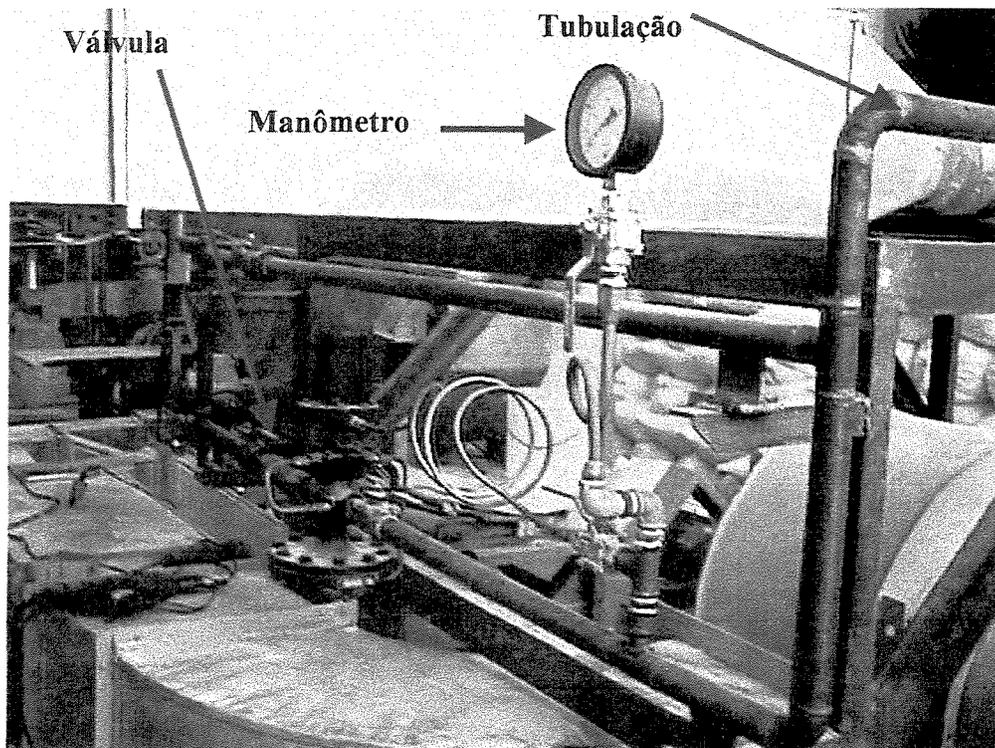


Figura 94: Válvula reguladora de vapor.

Para o aquecimento foi utilizado vapor super aquecido em um radiador. Na Figura 94, observa-se a válvula de regulagem da pressão de vapor e a tubulação de vapor.

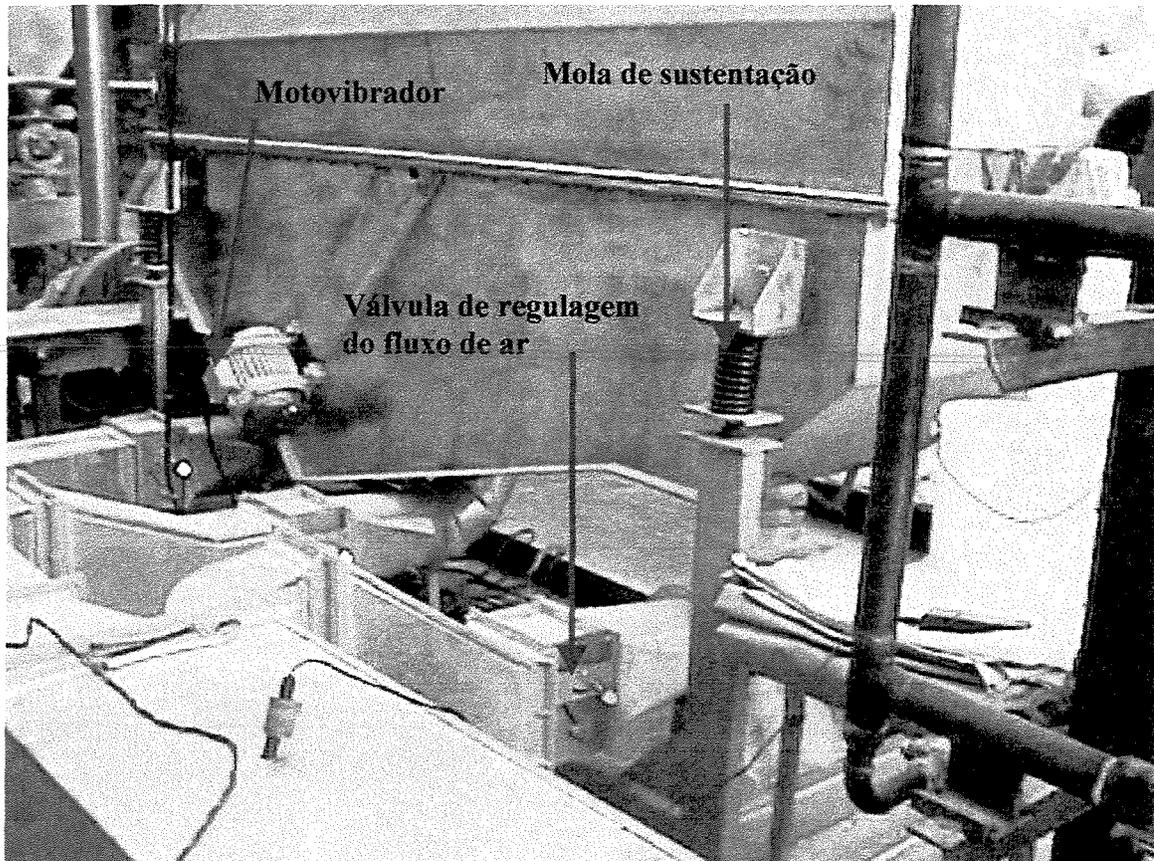


Figura 95: Detalhe da parte inferior do secador.

Na Figura 95 observa-se a ligação da tubulação de ar com o secador. As válvulas de regulagem de fluxo de ar são do tipo borboleta.

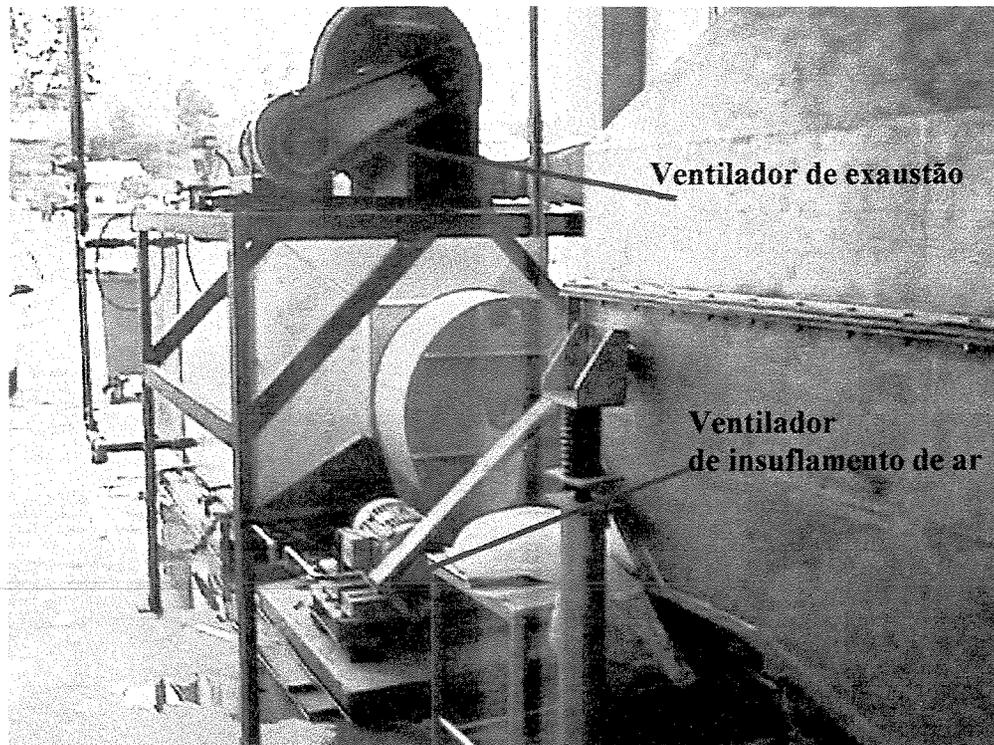


Figura 96: Ventiladores.

Na Figura 96 estão indicados os dois ventiladores utilizados no sistema de secagem.

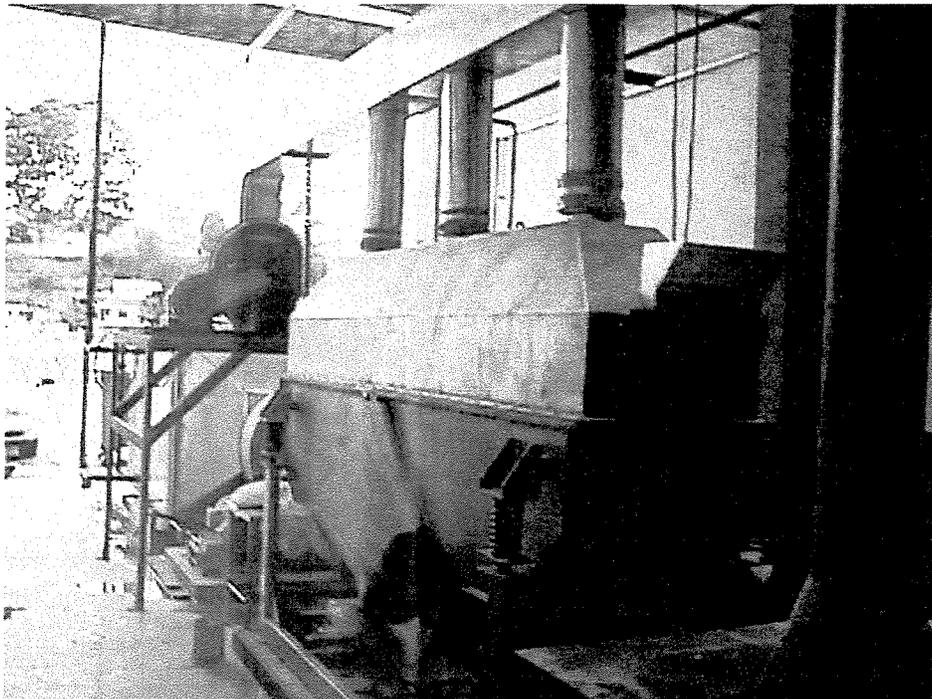


Figura 97: Vista do sistema de secagem.

Na Figura 97 mostra a entrada do secador em primeiro plano e o tratamento de ar ao fundo. Para a alimentação foi instalada uma moega com rosca sem fim, indicada nas Figuras 98 e 99.

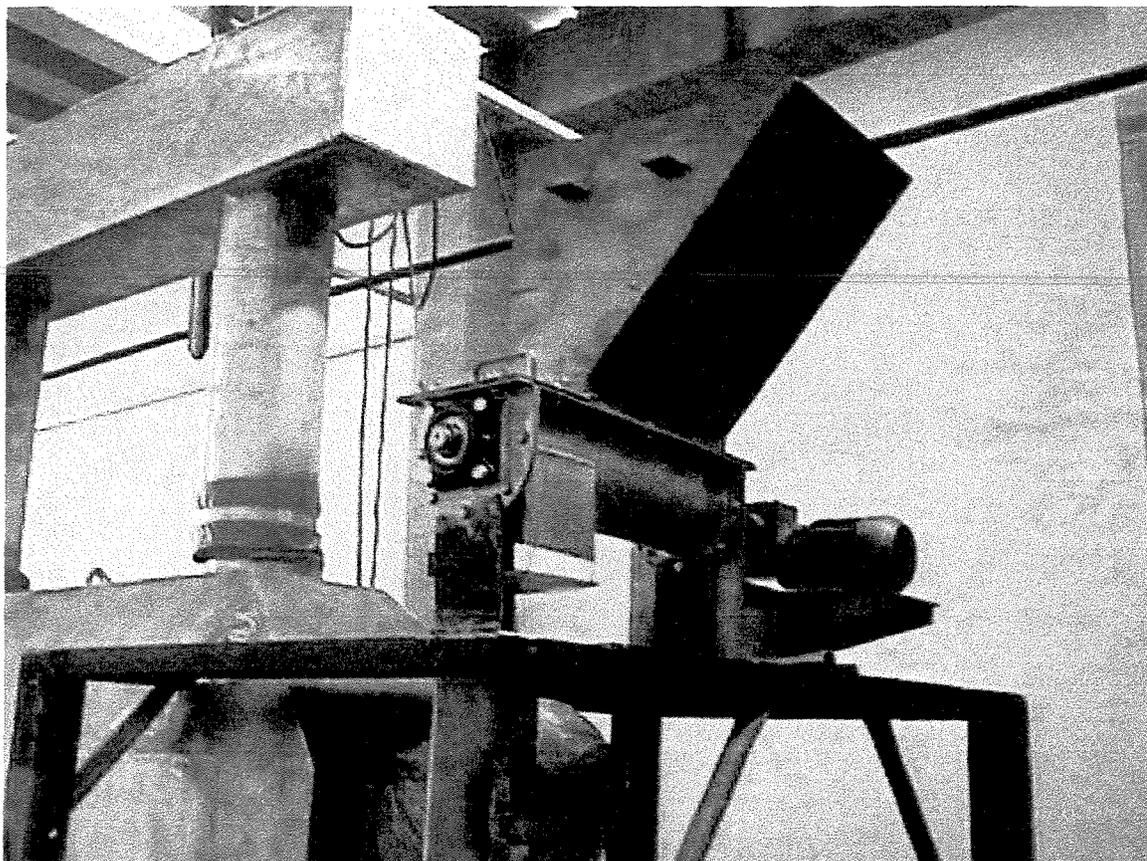


Figura 98: Moega de alimentação.

Na Figura 98 observa-se a moega de alimentação instalada na entrada do secador. O motor da moega possui regulagem de frequência para se controlar a vazão de sólidos.

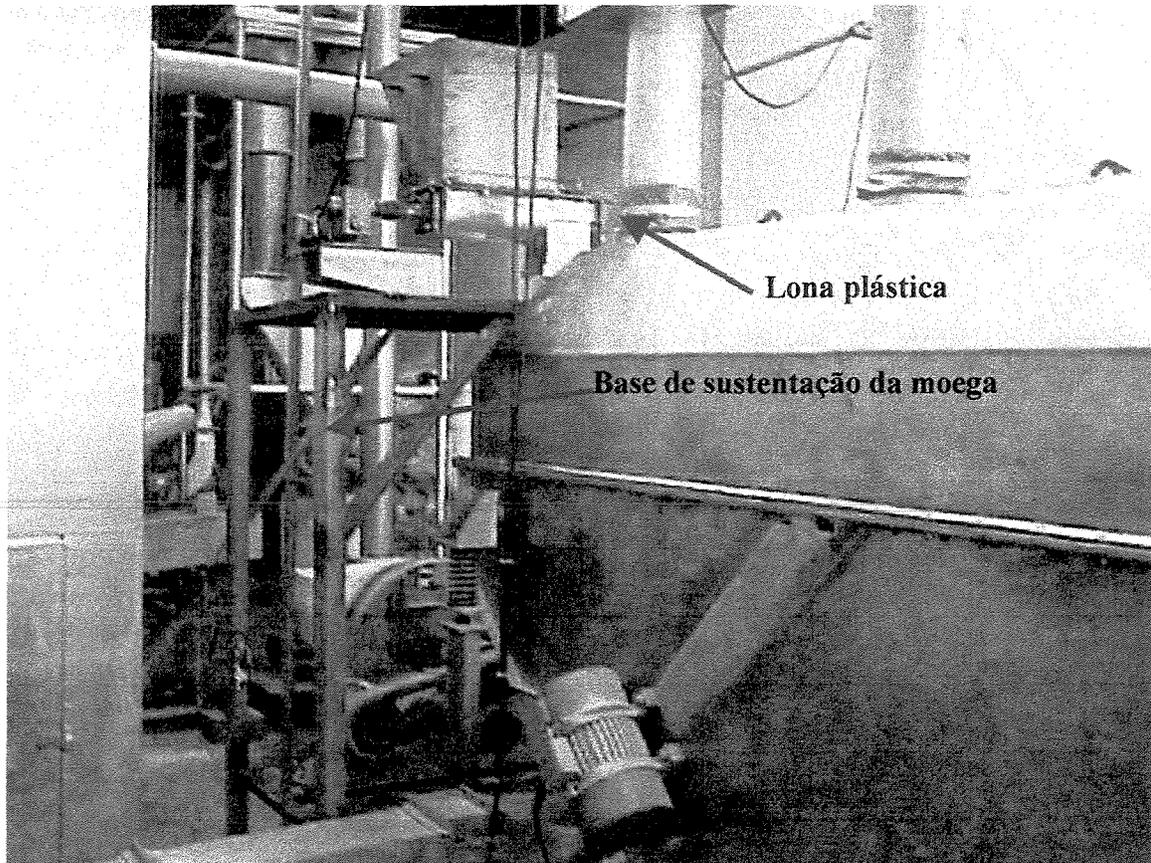


Figura 99: Vista frontal da moega de alimentação.

Foi construída uma base de sustentação para a moega, conforme mostrada na Figura 99.

A ligação da tubulação de ar com o secador foi feita através de lonas plásticas, conforme indicado.

Os dados obtidos na empresa Ito Ovos da secagem da casca de ovo foram os seguintes: para uma umidade inicial do produto ao redor de 1,6% e para a temperatura proposta de 30°C conseguiu-se uma umidade em base seca do produto ao redor de 1,1% mas com uma contaminação microbiana alta (TPC > 10³ UFC/g). Apesar da possibilidade de conseguir abaixar a umidade pelo ajuste no sistema de secagem, a contaminação microbiana só seria controlada com temperaturas altas. Assim, optou-se em utilizar temperaturas mais altas, em torno de 65°C e posterior embalagem a vácuo resultando em uma umidade abaixo de 1% (em torno de 0,7% em base seca) com um nível de contaminação microbiana baixo (TPC < 10 UFC/g).

VII: CONCLUSÕES

O diâmetro médio da pele do ovo determinado foi de 0,73 mm para pele do ovo e de 0,37 mm para a casca do ovo. A densidade real foi de 2,27 g/ml para a casca e de 0,43 g/ml para a pele. A densidade aparente foi de 1,17 g/ml para a casca e de 0,16 g/ml para a pele. A espessura da casca determinada foi de 0,381mm. A esfericidade determinada para a casca foi de 0,831.

As velocidades mínima de fluidização e de arraste foram de 0,36 e 3,30 m/s para a pele do ovo, e 1,52 e 5,08 m/s para a casca (respectivamente).

A curva de perda de carga *versus* a velocidade do ar apresentou um formato conforme citada na literatura.

A porosidade calculada pela equação de Ergun apresentou um valor próximo do o calculado pelas equações de definição de porosidade que utilizam os valores de densidades e da altura do leito sólido.

As equações empíricas que correlacionam a expansão do leito e as velocidades do ar resultaram em um coeficiente de correlação de 0,74 para a equação proposta por DAVIES e RICHARDSON (1966) e de 0,75 para a equação proposta por AKAPO et al. (1989).

A condutividade térmica da casca de ovo pelo método da sonda, foi de 0,234 W/m K.

Os cálculos de números adimensionais aplicados a agregados de partículas (coluna de recheio) mostraram que no presente estudo a magnitude de números de Nusselt calculados pela equação 15 situaram de 5,28 a 7,88 vezes maiores do que os valores calculados pela equação 17. Estes valores são resultantes da consideração da temperatura do ar sendo igual a do sólido, além da porosidade alta do leito. Estimando o coeficiente convectivo através da equação de transiente

de Newton, os valores encontrados situaram em 6,184 a 7,888 ($\text{W/m}^2 \text{ K}$), estando na faixa de convecção livre de ar. O número de Biot mostrou que a resistência interna é desprezível.

Foram levantadas, experimentalmente, as curvas de umidade de equilíbrio da casca e pele de ovo e correlacionados os dados experimentais com os modelos da literatura. O melhor modelo de ajuste foi o modelo de PELEG com erro médio de 8,64% para a pele do ovo e 1,20% para a casca do ovo.

Obteve-se uma boa correlação não-linear entre a perda de carga na tela do secador e a velocidade do ar. Observou-se um comportamento diferenciado das câmaras durante o experimento. A única explicação plausível encontrada até o momento para este comportamento diferenciado entre as três câmaras é que, como as velocidades foram determinadas na saída do secador, as contrapressões na entrada do secador influenciaram nestas medidas. Devido aos possíveis caminhos preferenciais para o escoamento do ar, ou diferentes impedimentos no duto de entrada de ar.

Na secagem conduzida no secador vibro-fluidizado, utilizando a cenoura em cubos, obtiveram-se os valores das difusividades efetivas variando de $1,443 \times 10^{-10}$ a $3,001 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. A difusividade efetiva aumenta com o aumento da temperatura e a diminuição da frequência de vibração devido ao aumento do tempo de residência para baixas frequências. Estes valores de difusividade calculados utilizando o modelo tri-difusional de Fick exibiram uma magnitude perto dos valores propostos para o modelo uni-difusional (difusão longitudinal) em um secador estático (de $3,472 \times 10^{-10}$ a $4,756 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Estes valores mostram que a secagem procedeu-se através de todas as superfícies das amostras, isto é, tridimensionalmente.

A energia de ativação calculada usando uma equação tipo Arrhenius apresentou um valor de 43,5 kJ/kg mol para uma frequência nível 5 e 47,6 kJ/kg mol para uma frequência nível 7. Estes valores estão na magnitude dos valores propostos para materiais biológicos.

A instalação industrial do sistema de secagem vibro-fluidizada, efetuada utilizando os estudos de perda de carga, transferência de calor, propriedades termo-físicas e secagem, mostrou a adequação das necessidades da indústria com a pesquisa acadêmica, garantindo o sucesso do dimensionamento.

Os estudos mais aprofundados da instalação industrial, tais como: otimização estrutural, avaliação econômica, limitações do processo de secagem e determinação de tempo de residência em função das variáveis de projeto, serão objetos de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUERRE, R.J., SUAREZ, C., VIOLLAZ, P.Z. New BET type multi-layer sorption isotherms. - Part II: Modelling water sorption in foods. In: **Lebensm - Wiss u. Tech.** [s.n.], 1989, v. 22, p.192-195.

AKAPO, S., KHONG, T.M., SIMPSON, C.P. A novel method for determining the particle density of porous aeratable powders. In: **Powder Technology**. The Netherlands: Elsevier Sequoia, 1989. v. 58, p. 237-242.

ALONSO, L.F.T. **Desenvolvimento de um aplicativo para o projeto de secadores industriais.** Exame de qualificação para doutorado em Engenharia Agrícola - FEAGRI - UNICAMP. Campinas, 1998. 49 p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE **ASAE Standard: S532.2:** Moisture Measurement, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Referências bibliográficas:** NBR 6023. São Paulo: ABNT, ago. 1989.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC. **Official Methods of Analysis:** 930.04, Moisture Content in Plants, 1990, v. 1.

BAHU, R. E. Fluidised bed dryer scale-up. In: **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., 1994. v. 12, n. 1, p. 329-339.

- BAKER, C.G.J.; LABABIDI, H.M.S. Application of fuzzy expert systems in dryer selection. In: **Drying 98: Proceedings of the 11th International Drying Symposium**. Thessaloniki-Greece: Ziti Editions, 1998. v. A, p. 448-455.
- BECKER, H. A., SALLANS, H. R. A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. In: **Cereal Chemistry**. [s.n.], 1955. v. 32, p. 212-226.
- BOBBIO, P.A. **Química do Processamento de Alimentos**. 2. ed. São Paulo: Varela, 1992.
- BORDE, I., DUKHOVNY, M., ELPERIN, T. & KATZ, V. Investigation of drying in a multistage dryer with a vibrofluidized bed. In: **Drying 96, Proceedings of 10th International Drying Symposium**, Kraków-Poland: Lodz Technical University, 1996. v. A, p. 398-404.
- BROD, F.P.R., ROSA, R.H.C., ALONSO, L.F.T., PARK, K.J. Perda de carga em um secador vibro-fluidizado. In: **XXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Poços de Caldas/MG: SBEA, 1998 - a. v. IV, p. 31-33,.
- BROD, F.P.R., ALONSO, L.F.T., PARK, K.J. Construção de secador vibro-fluidizado. In: **XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Campina Grande/PB: SBEA, 1997. CTP031-3p.
- BROD, F.P.R., ALONSO, L.F.T., ROSA, R.H.C., MINAGAWA, PARK, K.J. Carrot (*Daucus carota* L.) drying in a vibro-fluidized dryer. In: **Drying 98: Proceedings of the 11th International Drying Symposium**, Thessaloniki-Greece: Ziti Editions, 1998 -b. v. B, p. 1237-1243.

- BRÓVIA i PIJUAN, M.N., BROD, F.P.R., PARK, K.J. Estudio de secado de champiñón en conserva (*Agaricus bisporus*) utilizando un secador vertical. In: **Alimentaria: revista de tecnologia e higiene de los alimentos**. Madri-Espanha: Auditores y Técnicos, 1997. v. 286, p. 119-122.
- BRUNAUER, S., EMMET, T.H., TELLER, F. Adsorption of gases in multimolecular layers. In: **G. Am. Chem. Soc.**, [s.n.], 1938. v. 60, n. 2, p. 309-319.
- BURJAILI, M.M. **Desenvolvimento de um secador rotatório com recheio de inertes**. Tese Doutorado em Engenharia de Alimentos - UNICAMP - FEA, Campinas, 1996, 218 p.
- CHANG, C.S. Thermal conductivity of wheat, corn, and grain sorghum as affected by bulk density and moisture content. In: **Transactions of the ASAE**, [s.n.], 1986. v.29, n. 5, p. 1446-1450.
- CHEAH, C.W., HIRT, D.E., LIU, Y.A., SQUIRES, A.M. A vibrofluidized-bed heat exchanger for heat recovery from a hot gas - part I: feasibility study of a pilot-scale system. In: **Powder Technology**. The Netherlands: Esevier Sequoia, 1988. v. 55, p. 257-267.
- CHINNAN, M.S., Evaluation of selected mathematical models for describing thin-layer drying of in-shell pecans. In: **Transactions of the ASAE**, [s.n.], 1984. v.27, p. 610-615.
- CHINNAN, M.S., BEAUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours. In: **Lebensm - Wiss u. Tech.**, [s.n.], 1985. v. 18, p. 83-88.
- CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: MUJUNDAR, A. S. **Advances in drying**. Washington, D.C.: Hemisphere Publishing Corporation, 1981. v. 1, p. 73-102.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414 p.

CREDER, H. **Instalações elétricas**. 13. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995. 515 p.

DANIELSEN, S., HOVMAND, S. Drying of granulated product in a vibrated fluid bed. In: **Drying 80**. New York: Hemisphere Publishing, 1980. v. 1, p. 194-199.

DAUDIN, J.D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. In: **Sciences des Aliments**, [s.n.], 1983. v. 3, p.1-36.

DAVIES, L., RICHARDSON, J.F. Gas Interchange between bubbles and the continuous phase in a fluidized bed. In: **Trans. IChemE**. [s.n.], 1966. v.44, p. 293-305.

DOMAGALA, A., WITULSKA, M., JANUS, P. Kinetics of drying of carrots in an industrial pentabelt dryer. In: **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**. [s.n.], 1996. v. 5/46, n. 3, p. 121-130, 1996.

DONG, Z.X., PAN, Y.K., DENG, W.Y., WEI, Z., MUJUMDAR, A.S. Effect of vibration on the drying rate during the falling rate period. In: **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., 1991.v. 9, n. 3, p. 723-733.

ERDÉSZ, K. Hydrodynamic studies on vibrated fluidized beds. In: **Powder Handling & Processing**. Germany: Trans. Tech Publications, 1990. v. 2, n. 4, p. 327-339.

ERDÉSZ, K., MUJUMDAR, A.S.; Numerical investigation of a phenomenological model for vibrated fluidized beds. In: **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc, 1989. v. 7, n. 3, p. 487-502.

FAGAN, W.E.; BUCKLEY, D.J.; TSANG, C.P.W. Electronic eggshell thickness gauge. In: **Poultry Science**. Danville: Poultry Science Association Inc, 1988. v. 67, n. 7, p. 1105-1108.

-
- FINZER, J.R.D., KIECKBUSCH, T.G. Secagem em sistemas com vibração. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J.M. **Tópicos especiais em secagem**. São Carlos, SP: UFSCar, 1992. v. 1, p. 87-127.
- FISH, B. P. Diffusion and thermodynamics of water in potato starch gel. In: **Fundamental aspects of the dehydration of foodstuffs**. [s.l.]: Soc. Chem. In., 1975. p. 143-157.
- FORNELL, A.; BIMBENET, J.J.; ALMIN, Y. Experimental study and modelization for air drying of vegetable products. In: **Lebensm. Wiss. u. Technol.**, [s.n.], 1980. v. 14, p. 96-100.
-
- FREIRE, E.S. **Thermal properties of dry cocoa beans**. Master Science Thesis - Cranfield Institute of Technology - National College of Agricultural Engineering, [s.l.], 1981. 22p.
- FRONING, G.W., BERGQUIST, D. Utilization of inedible eggshells and technical egg white using extrusion technology. In: **Poultry Science**. Danville: Poultry Science Association Inc., 1989. v. 69, n. 11, p. 2051-2053.
- GÁL, S. Recent advances in techniques for determination of sorption isotherms. In: **International Symposium**, Glasgow: Academic Press Inc., 1975. p. 139-154.
- GUPTA, R., MUJUMDAR, A.S. Aerodynamics and thermal characteristics of vibrated fluid beds – a review. In: **Drying 80**. New York: Hemisphere Publishing, 1980 - a. v. 1, p. 141-1150.
- GUPTA, R., MUJUMDAR, A.S. Aerodynamics of a vibrated fluid bed. In: **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. Ottawa-Canada: The Canadian Society for Chemical Engineering, 1980 - b. v. 58, n. 3, p.332-338.

-
- GUTMAN, R.G. Vibrated beds of powders - Part I: a theoretical model for the vibrated bed. In: **Trans. Instn. Chem. Engrs.** London: Institution of Chemical Engineers, 1976 - a. v. 54, n. 3, p. 174-183.
- _____. Vibrated beds of powders - Part II: heat transfer in (and) energy dissipation of a vibrated bed. In: **Trans. Instn. Chem. Engrs.** London: Institution of Chemical Engineers, 1976 - b. v. 54, n. 4, p. 251-257.
- HALSEY, G. Physical adsorption on uniform surfaces. In: **The Journal of Chemical Physics.** [s.n.], 1948. v. 16, n. 10, p. 931-937.
- HAN, W. MAI, B., GU, T. Residence time distribution and drying characteristics of a continuous vibro-fluidized bed. In: **Drying Technology.** New York: Marcel Dekker, Inc., 1991. v. 9, n. 1, p. 159-181.
- HASATANI, M., ITAYA, Y., MIURA, K. Drying of granular materials in an inclined vibrated fluidized bed by combined radiative and convective heating. In: **Drying Technology.** New York: Marcel Dekker, Inc., 1991. v. 9, n. 2, p. 349-366.
- HOVMAND, S. Fluidized bed drying. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying.** New York: Marcel Dekker Inc., 1987. cap. 6, p. 165-225.
- IGLESIAS, H.A., CHIRIFE, J. **Handbook of food isotherms:** water sorption parameters for food and food components. New York: Academic, 1982.
- INGERSOLL, L. R., ZOBEL, O. J., INGERSOLL, A. C. **Heat conduction with engineering, geological and other applications.** New York: Mc Graw-Hill Book Company, 1954. p. 143-147.

JINESCU, G., BALABAN, C. Drying of granulated polymers in vibrofluidized bed. In: **Drying 80**. New York: Hemisphere Publishing, 1980. v. 2, p. 124-129.

KARATHANOS, V.T., VILLALOBOS, G., SARAVACOS, G.D. Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. In: **Journal of Food Science**, [s.n.], 1990. v. 55, n. 1, p.218-223.

KAZARIAN, E.A.; HALL, C.W. Thermal properties of grain. In: **Transactions of the ASAE**, [s.n.], 1965. v. 8, n. 1, p33-37.

KEYY, R. B. **Drying: principles and practice**. Oxford: Pergamon Press, 1972.

_____. **Introduction to industrial drying operations**. Oxford: Pergamon Press, 1978.

_____. Heat transfer to particles. In: KEYY, R.B. **Drying of loose and particulate materials**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992. cap. 7, p. 163-213.

KING, C. J. Rates of moisture sorption and desorption in porous dried food stuffs. In: **Food Technology**. [s.n.], 1968. v. 22, p. 165-171.

KIRANOUDIS, C.T., MAROULIS, Z.B., MARINOS-KOURIS, D., SARAVACOS, G.D. Comparison of various types of industrial dryers: design and operation. In: **Drying 96: Proceedings of 10th International Drying Symposium**. Kraków-Poland: Lodz Technical University, 1996. v. A, p. 463-469.

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

-
- KITIC, D.; VIOLLEZ, P. E. Comparison of drying kinetic of soybeans in thin layer and fluidized beds. In: **Journal of Food Technology**. [s.n.], 1984. v. 19, p. 399-408.
- KUDRA, T. Novel drying technologies for particulates, slurries and pastes. In: **Drying 92**, [s.l.]: Elsevier Science Publishers, 1992. v. B, p. 224-239.
- KUNII, D., LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1969.
- LABUZA, T.P. Sorption phenomena in foods. In: *Food Technol.* [s.n.], 1968, v. 22, n.3, p. 15-24.
-
- LABUZA, T.P., SIMON, I.B. Surface tension effects during dehydration. Air drying of apple slices. In: **Journal of Food Technology**, [s.n.], 1970. v. 24, p. 712-715.
- LANGMUIR, I. The adsorption of gases in a plane surfaces of glass, mica and platinum. In: **J. Am. Chem. Soc.**, [s.n.], 1918. v. 46, p. 1361-1403.
- LEWIS, W.K. The rate of drying of solids materials. In: **J. of Ind. and Eng. Chem.**, [s.n.], 1921. v. 13, n. 5, p. 427-432.
- LOMAURO, C.J., BAKSHI, A. S.; LABUZA, T. P. Moisture transfer properties of dry and semi-moist foods. In: **Journal of Food Science**. v. 50, p. 397-400, 1985 - b.
- LOMAURO, C.J., BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: Fruit, vegetable and meat products. In: **Lebensm. - Wiss. u.-Technol.** [s.n.], 1985 - a. v. 18, n. 2, p. 111-117.
- MARELLA, C., PATEL, S., SHAH, U.S. A mathematical model for vibrofluidized beds for drying casein. In: **J. Food Sci. Technol.** Mysore - India: Association of Food Scientists & Technologists, 1997. v. 34, n. 2, p. 153-154.

-
- MAROULIS, Z.B., TSAMI, E., MARINOS-KOURIS, D., SARAVACOS, G.D. Application of the GAB model of the moisture sorption isotherms for dried fruits. In; **Journal of Food Science**. [s.n.], 1988. v. 7, n. 1, p. 63-78.
- MENON, A. S., MUJUMDAR, A. S. Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker Inc., 1987. cap. 9, p. 295-326.
- MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plants and animals materials**. 2. ed. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1986, 841 p.
- _____. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon and Breach science Publishers, 1980. 407 p.
- MORI, S., HARUTA, T., YAMAMOTO, A., YAMADA, I., MIZUTANI, E. Vibrofluidization of very fine particles. In: **International Chemical Engineering**. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1991. v. 31, n. 3, p. 475-480.
- MROWIEC, M., CIESIELCZYK, W. Fluidized-bed dryers for paste materials. In: **International Chemical Engineering**, [s.n.], 1977. v. 2, n. 17, p. 373-379.
- MUJUNDAR, A.S., ERDÉSZ, K. Applications of vibration techniques for drying and agglomeration in food processing. In: **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., 1988. v. 6, n. 2, p. 255-274.
- NILSSON, L., WIMMERSTEDT, R. Drying in longitudinal-flow vibrating fluid-beds - Pilot plant experiments and model simulations. In: **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., 1987. v. 5, n. 3, p. 337-361.

-
- NIX, G. H., LOWERY, G. W., VACHON, R. I., TANGER, G.E. Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined line source technique. In: **Progress in aeronautics and astronautics termophysics of spacecraft and planetary bodies**. New York: Academic Press, 1967. p. 865-878.
- NONHEBEL, M. A., MOSS, A. A. H. **Drying of solids in the chemical industry**. London: Butterworth & Co., 1971.
- OTTEN, L. Determination of heat transfer using frequency response analysis. In: **Canadian Agricultural Engineering**. [s.n.], 1974. v.16, n. 2, p. 103-106.
- PAKOWSKI, Z., MUJUMDAR, A.S. Heat transfer from a horizontal cylinder to a vibrated fluid bed of wet particles. In: **Drying 80**. New York: Hemisphere Publishing, 1980. v. 2, p. 149-155.
- PAKOWSKI, Z., MUJUMDAR, A.S., STRUMILLO, C. Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying process. In: MUJUMDAR, A. S. **Advances in drying**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1984. v. 3, cap. 7, p. 245-306.
- PAN, Y.K., LI, Z.Y., MUJUMDAR, A.S., KUDRA, T. Drying of a root crop in vibro-fluidized beds. In: **Drying Technology**. NEW YORK: Marcel Dekker, Inc. v. 15, n. 1, p. 225-223, 1997 - b.
- PAN, Y.K.; PANG, J.Z.; LI, Z.Y.; MUJUMDAR, A.S.; KUDRA, T. Drying of photosynthetic bacteria in a vibrated fluid bed of solid carriers. In: **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., 1995. v. 13, n. 1-2, p. 395-404.

PAN, Y.K., WU, H., LI, Z.Y., MUJUMDAR, A.S., KUDRA, T. Effect of a tempering period on drying of carrot in a vibro-fluidized bed. In: **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1997 - a. v. 15, n. 6-8, p. 2037-2043.

PARK, K. J. **Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem**. Tese de Livre Docência em Fenômenos de Transporte DEA - FEA - UNICAMP. Campinas, 1987. 54 p.

_____. **Apostila de Secagem**. <http://secagem.agr.unicamp.br/papers/apostsec.zip>. Campinas, 1998.

PARK, K.J., ALONSO, L.F.T., GODOI, L.F.G. Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) characteristic drying curve. In: **Drying 96: Proceedings of 10th International Drying Symposium**. Kraków-Poland: Lodz Technical University, 1996. v. B, p. 1001-1008.

PARK, K.J., BROD, F.P.R., SILVA, J.E.A.R. Estudo comparativo de secagem de cebolinha (*Allium* sp. cv. Galega) utilizando secadores vertical e horizontal. In: **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas/SP: SBCTA, 1996. v. 16, n. 2, p. 143-145.

PARK, K.J., NOGUEIRA, R.I. Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos. In: **Engenharia Rural**, Piracicaba: ESALQ/USP, 1992. v. 3, n. 1, p.81-86.

PARK, K.J., MURR, F.E.X., SALVADEGO, M. Construção de um sistema de medição da condutividade térmica pelo método da sonda. In: **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas/SP: SBCTA, 1997. v. 17, n. 1, p. 7-10.

-
- PATENTE INDUSTRIAL PI 9302443, UNICAMP. **Processo e equipamento de secagem em leite vibro-fluidizado**. Inventores: Alexandre W. Mazzone, Osvaldo A. E. Bustamante, Luís Felipe Toro Alonso, Kil Jin Park. 1993.
- PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. In: **J. Food Proc. Eng.**, Connecticut-USA: Food & Nutrition Press, Inc., 1993. v. 16, n. 1, p. 21-37.
- PERRY, H.P., CHILTON, C.H. **Chemical Engineers' Handbook**. 5 ed. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 1973.
- POMMERANZ, Y. W. **Functional properties of food components**. Orlando: Academic Press, 1985. p. 3-24.
- PRABHANJAN, D.G., RAMASWAMY, H.S., RAGHAVAN, G.S.V. Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. In: **Journal of Food Engineering**. Great Britain: Elsevier Science Limited, 1995. v. 25, p. 283-293.
- RAMESH, M.N., KUMAR, M.A., SRINIVASA RAO, R.M. Application of artificial neural networks to investigate the drying of cooked rice. In: **Journal of Food Process Engineering**. Connecticut: Food & Nutrition Press Inc., 1996 v. 19, n.3, p. 321-329.
- RAMESH, M.N., SRINIVASA RAO, R.M. Drying studies of cooked rice in a vibrofluidized bed drier. In: **Journal of Food Engineering**. Great Britain: Elsevier Science Limited, 1996. v. 27, p. 389-396.
- RINGER, D.U., MUJUMDAR, A.S. Immersed surface-to-particle heat transfer in a vibro-fluidized bed. In: **Drying 80**. New York: Hemisphere Publishing, 1980. v. 2, p. 107-114.

- RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of food in dehydration. In: RAO, M.A.; RIZVI, S.S.H. **Engineering Properties of Food**. New York: Marcel Dekker, 1986. v. 4, p. 113-124.
- RUIZ-CABRERA, M.A., SALGADO-CERVANTES, M.A., WALISQEWski-KUBIAK, K.N., GARCÍA-ALVARADO, M.A. The effect of path diffusion on the effective moisture diffusivity in carrot slabs. In: **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., 1997. v. 15, n. 1, p. 169-181.
- SARAVACOS, G.D., CHARM, S.E. A study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration. In: **Food Technology**, [s.n.], 1962. v. 16, p.78-81.
- SHAH, R.M., GOYEL, S.K. Drying characteristics of tea fluidized on a vibrating bed (part II) - handling of dust grades & its impacts on quality. In: **Drying Technology**. New York: Marcel Dekker Inc., 1995. v. 13, n. 5-7, p. 1523-1541.
- SHARMA, D.K., THOMPSON, T.L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. In: **Transactions of the ASAE**, [s.n.], 1973. v.16, n. 1, p.114-117.
- SHERWOOD, T.K. The Drying of Solids (I). In: **Ind. Eng. Chem.**, [s.n.], 1929 - a. v. 21, n. 1, p. 12-16.
- _____. The Drying of Solids (II). In: **Ind. Eng. Chem.**, [s.n.], 1929 - b. v. 21, n. 10, p. 976-980.
- SIM, J.S., AW-YONG, L.M., BRAGG, D.B. Utilization of eggshell waste by the laying hen. In: **Poultry Science**. Danville: Poultry Science Association Inc., 1983. v. 62, n. 11, p. 2227-2229.
- STRUMILLO, C., KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers. 1986.

-
- STRUMILLO, C., PAKOWSKI, Z. Drying of granular products in vibrofluidized beds. In: **Drying 80**. New York: Hemisphere Publishing, 1980. v. 1, p. 211-226.
- TEXEIRA NETO, R. O., QUAST, D. G. **Isotermas de adsorção de umidade em alimentos**. Campinas: ITAL, 1977. v. 8, p. 141-197.
- THOMAS, B., LIU, Y.A., CHAN, R., SQUIRES, A.M. A method for observing phase-dependent phenomena in cyclic systems: application to study of dynamics of vibrated beds of granular solids. In: **Powder Technology**. The Netherlands: Esvier Sequoia, 1987. v. 52, p. 77-92.
- TOUPIN, C.J., Le MAUGER, M., MCGREGOR, J.R. The evaluation of BET constants from sorption isotherms data. In: **Lebensm.-Wiss. u.- Technol.** [s.n.], 1983. v. 16, n. 3, p. 153-156.
- VACCAREZZA, L.M., LOMBARDI, J.L., CHIRIFE, J. Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. In: **Journal of Food Technology**. [s.n.], 1974. v. 9, p. 317-327.
- Van der BERG, C. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. In: **Engineering and Food**. London: B. M. Mckenna Elsevier Applied Science, 1984. v. 1, p.311-321.
- WANG, N., BRENNAN, J. G. Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. In: **Journal of Food Engineering**, [s.n.], 1991. v. 14, p. 269-287.
- WEBER, E.A. **Armazenagem Agrícola**, Porto Alegre: Kleper Weber Industrial, 1995. 400 p.
- WELTY, J.R., WICKS, C.E., WILSON, R.E. **Fundamentals of momentun, heat and mass transfer**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.

_____. **Fundamentals of momentum, heat and mass transfer**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1969.

WHITAKER, S. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles. In: **AIChE Journal**. New York: Chemical Engineering Research and Development, 1972. v. 18, n. 2, p. 361-371.

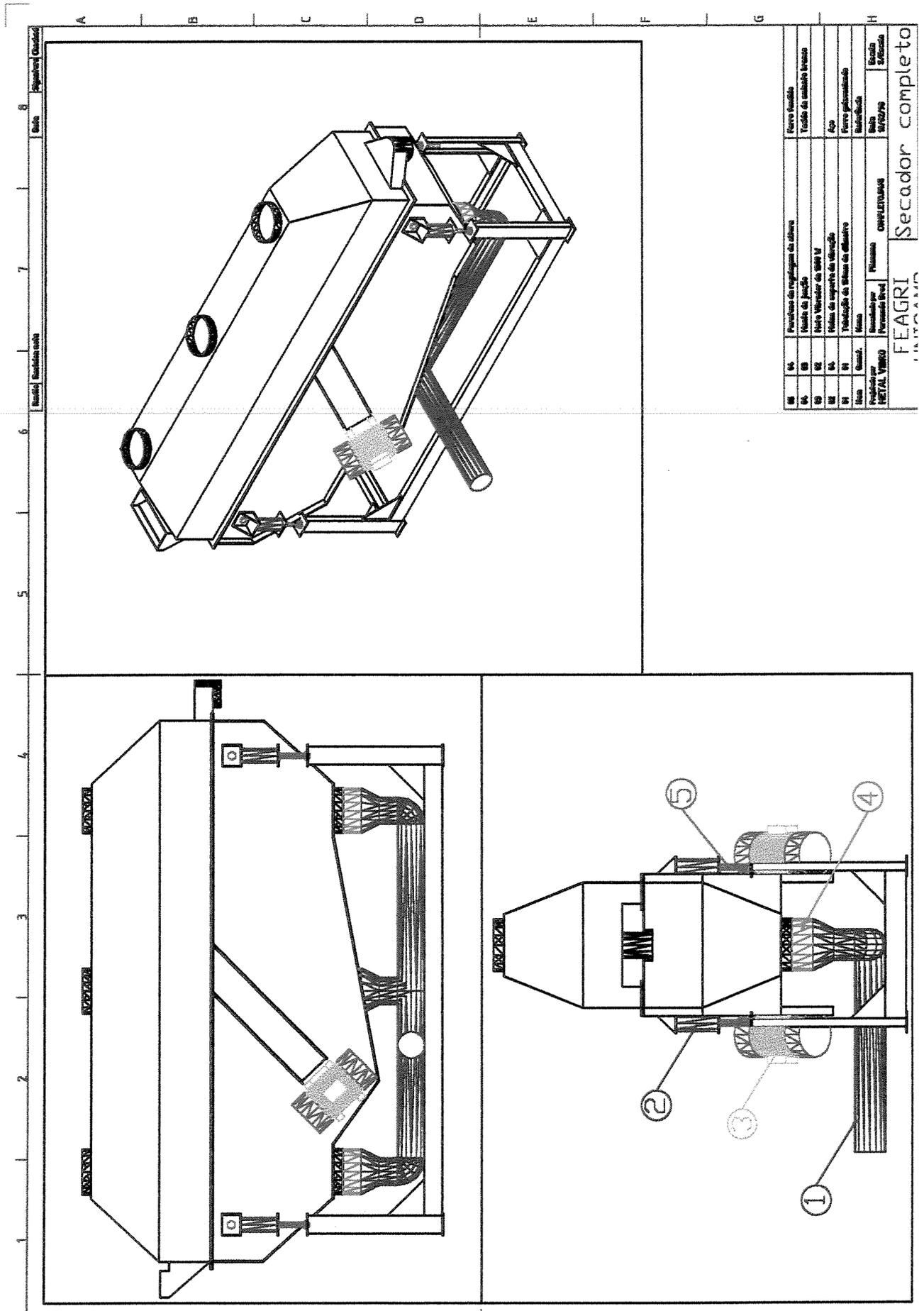
ZURITZ, C.A., SASTRY, S.K., McCOY, S.C., MURAKAMI, E.G., BLASDELL, J.L. A modified Fitch device for measuring the thermal conductivity of small food particles. In: **Transactions of the ASAE**, 1988. n. 39, p. 269-275.

APÊNDICES

APÊNDICE 1: DADOS E RESULTADOS OBTIDOS EM DISQUETE

Em disquete anexo encontram-se todos os dados e resultados obtidos durante a fase experimental. O formato das planilhas é do Microsoft Excel 97 e estão discriminadas a seguir:

Nome do Arquivo	Assunto
Condutividade.xls	Dados e resultados da condutividade térmica da casca de ovo
Fluidodinamica.xls	Dados e resultados da perda de carga e porosidade do leito para a casca de ovo
Transferencia de calor.xls	Dados e resultados para a determinação do coeficiente convectivo para a casca de ovo
Prop física pele.xls	Propriedades físicas da pele (densidade real e aparente e diâmetro médio)
Prop física casca.xls	Propriedades físicas da casca (densidade real e aparente, diâmetro médio, espessura e esfericidade)
Secagem de cenoura.xls	Dados e resultados da secagem da cenoura.



01	04	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
02	05	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
03	06	Motor Winder de 100 W	
04	07	Polias de suporte do eixo	Aço
05	08	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
06	09	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
07	10	Motor	Motor
08	11	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
09	12	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
10	13	Polias de suporte do eixo	Aço
11	14	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
12	15	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
13	16	Motor	Motor
14	17	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
15	18	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
16	19	Polias de suporte do eixo	Aço
17	20	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
18	21	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
19	22	Motor	Motor
20	23	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
21	24	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
22	25	Polias de suporte do eixo	Aço
23	26	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
24	27	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
25	28	Motor	Motor
26	29	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
27	30	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
28	31	Polias de suporte do eixo	Aço
29	32	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
30	33	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
31	34	Motor	Motor
32	35	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
33	36	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
34	37	Polias de suporte do eixo	Aço
35	38	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
36	39	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
37	40	Motor	Motor
38	41	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
39	42	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
40	43	Polias de suporte do eixo	Aço
41	44	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
42	45	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
43	46	Motor	Motor
44	47	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
45	48	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
46	49	Polias de suporte do eixo	Aço
47	50	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
48	51	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
49	52	Motor	Motor
50	53	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
51	54	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
52	55	Polias de suporte do eixo	Aço
53	56	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
54	57	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
55	58	Motor	Motor
56	59	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
57	60	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
58	61	Polias de suporte do eixo	Aço
59	62	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
60	63	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
61	64	Motor	Motor
62	65	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
63	66	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
64	67	Polias de suporte do eixo	Aço
65	68	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
66	69	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
67	70	Motor	Motor
68	71	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
69	72	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
70	73	Polias de suporte do eixo	Aço
71	74	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
72	75	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
73	76	Motor	Motor
74	77	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
75	78	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
76	79	Polias de suporte do eixo	Aço
77	80	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
78	81	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
79	82	Motor	Motor
80	83	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
81	84	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
82	85	Polias de suporte do eixo	Aço
83	86	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
84	87	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
85	88	Motor	Motor
86	89	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
87	90	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
88	91	Polias de suporte do eixo	Aço
89	92	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
90	93	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
91	94	Motor	Motor
92	95	Parafusos de montagem do eixo	Ferro Usado
93	96	Flange de ferro	Tudo de usinaria bruta
94	97	Polias de suporte do eixo	Aço
95	98	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
96	99	Volante de eixo de eixo	Ferro polido
97	100	Motor	Motor

FEAGRI Secador completo

Diadema, 22 de abril de 1998.

AUTORIZAÇÃO

A HL Brasil Indústria e Comércio Ltda. autoriza o Prof. Dr. Kil Jin Park da UNICAMP a utilizar os dados do PROJETO DE SECAGEM DE CASCA DE OVO para fins científico - acadêmicos, podendo divulgá-los em forma de teses, artigos, congressos, etc., desde que a empresa Ito Ovos seja citada.


Renato Takesi Tsuchiya.
Diretor Industrial.



HL BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO SA

AV. CASA GRANDE, 650 - JD. PIRAPITUNHA - CEP 08811-200 - MUNICÍPIO DE DIADEMA - ESTADO DE SÃO PAULO
TELEFONE: (011) 7145 7834 - FAX: (011) 714 7825