

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM
ARTIFICIAL DE GRÃOS DE SOJA EM SECADORES DE FLUXO CONTÍNUO

por

Luís Antonio Bortolaia

Tese para obtenção do Título de
Doutor em Engenharia

Porto Alegre, julho de 2011

MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM
ARTIFICIAL DE GRÃOS DE SOJA EM SECADORES DE FLUXO CONTÍNUO

por

Luis Antonio Bortolaia
Mestre em Engenharia Mecânica

Tese submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Horácio Antonio Vielmo

Co-orientador: Prof. Dr. Oleg Khatchatourian

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Fernando Pedro Reis Brod, Centro de Tecnologia Canavieira, CTC

Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges, Universidade Federal da Fronteira Sul, UFFS

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS

Coordenador do PROMEC: Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Porto Alegre, julho de 2011.

RESUMO

O sistema agroindustrial da soja é uma atividade econômica fundamental na Região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, que contempla a produção de grãos e empresas fabricantes de secadores. Considerando os grandes volumes das colheitas e que praticamente toda a colheita de grãos, antes do armazenamento, é exposta ao processo de secagem, toda melhoria e aceleração nesse processo fornece um benefício econômico significativo. Essa economia justifica a pesquisa para o desenvolvimento e otimização de secadores, em que a aplicação da modelagem matemática e da simulação numérica são recursos essenciais. Nesta tese foram desenvolvidos um modelo matemático e um programa computacional para simular o processo de secagem de soja em secadores do tipo torre de coluna com fluxo contínuo e múltiplos estágios. Os processos de transferência de calor e de massa foram descritos por um sistema de quatro equações diferenciais parciais não-lineares, resolvido pelo método de MacCormack. Os termos-fonte destas equações foram definidos por equações auxiliares semi-empíricas, obtidas através de dados experimentais em camada fina. Para obter os dados experimentais da dinâmica de secagem da soja em camada fina no campo de abrangência da temperatura do ar de secagem de 45 a 110 °C, da velocidade do ar de secagem de 0 a 2,5 m/s, da umidade relativa do ar de secagem de 10 a 30% e do teor de umidade inicial do grão de 13 a 32% e validar o modelo foi desenvolvido um equipamento que permitiu a variação da umidade, temperatura e velocidade do ar. Os experimentos foram conduzidos em leito fixo. O modelo de secagem do grão com dois compartimentos foi escolhido para a representação da camada fina, pois o estudo experimental mostrou que o coeficiente de difusão médio depende da distribuição de umidade dentro do grão. Nesses compartimentos os coeficientes de secagem são diferentes e variam em função da temperatura. A comparação entre os resultados experimentais e as simulações em camada fina e camada espessa unidimensional apresentam concordância satisfatória, indicando diferenças relativas médias inferiores a 7%. Simulações foram realizadas para diferentes esquemas de secadores de fluxo contínuo, incluindo esquema para economia de energia com a recirculação do ar para o resfriamento e secagem de grãos. As simulações permitiram avaliar a eficiência energética de cada esquema, sendo que o reaproveitamento do calor do ar de recirculação provocou uma economia média de combustível entre 28,5 e 41%, e um rendimento da secagem entre 39,7 e 68%, dependendo do esquema de secador analisado.

ABSTRACT

The agroindustrial system of soybeans is an essential economic activity in the northwest region of Rio Grande do Sul, which includes the grain production and manufacturers of dryers. Considering the large volumes of crops and that practically every grain harvest, before storage, is exposed to drying process, every improvement and acceleration in this process provides a significant economic benefit. This economy justifies the research for the development and optimization of dryers, where the application of the mathematical modeling and numerical simulation are essential resources. In this thesis, a mathematical model and a computer program were developed to simulate the soybeans drying process in column dryers with continuous flow and multistage. The processes of heat and mass transfer were described by a system of four non-linear partial differential equations solved by the MacCormack method. The source terms of these equations were determined by auxiliary semi-empirical equations obtained from thin layer experimental data. To obtain the thin layer experimental data from drying soybean dynamics in temperature range from 45 to 110 ° C, velocity range from 0 to 2.5 m / s, air relative humidity 10 to 30%, grain moisture content from 13 to 32% and validate the model, an equipment which allowed the variation of humidity, temperature and air velocity was developed. The experiments were conducted in a fixed bed. The two-compartment grain drying model has been chosen to represent the thin layer, because the experimental study showed that the average diffusion coefficient depends on the distribution of moisture within the grain. In these compartments the drying coefficients are different and vary depending on the temperature. The comparison between experimental results and simulations on thin layer and unidimensional thick layer show satisfactory agreement, indicating average differences lower than 7%. Simulations were made for different schemes of continuous flow dryers, including energy saving scheme with recirculation of air for cooling and drying of grain. The simulations permitted to evaluate the energy efficiency of each scheme, and the reuse of heat from the recirculated air caused an average fuel economy of 28.5 and 41%, and a drying efficiency between 39.7 and 68%, depending on the chosen scheme.

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABELAS.....	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Aspectos introdutórios do processo de secagem	5
2.2 Equipamentos de secagem	7
2.2.1 Classificação Geral.....	8
2.2.2 Secador do tipo torre	12
2.3 Modelos matemáticos do processo de secagem.....	21
2.3.1 Noções preliminares.....	21
2.3.2 Teor de umidade de equilíbrio.....	22
2.3.3 Modelos de camada fina	27
2.3.4 Modelos de camada espessa	42
3. O MODELO MATEMÁTICO DO PROCESSO DE SECAGEM.....	60
3.1. Considerações iniciais	60
3.2. O modelo matemático de camada espessa.....	62
3.2.1. Equação da conservação da massa de água para o ar	63
3.2.2. Equação da conservação da massa de água para os grãos.....	64
3.2.3. Equação da conservação da energia para o ar.....	66
3.2.4. Equação da conservação da energia para os grãos.....	68
3.3. O modelo matemático de camada fina	70
3.3.1. Modelo de dois compartimentos para a secagem de soja	71
3.4. Fluxos de massa e de calor.....	75
3.4.1. Fluxo de massa de vapor de água entre o grão e o ar	76
3.4.2. Fluxo de calor entre o grão e o ar	76
3.5. Equações do modelo matemático	77
4. RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DO PROCESSO DE SECAGEM ...	79
4.1 Método das diferenças finitas.....	79
4.2 Solução das equações diferenciais parciais	81
4.2.1 Método de MacCormack 1-D.....	82
4.2.2 Método de MacCormack 2-D com esquema “time-split”	83
5. EXPERIMENTOS DE SECAGEM EM CAMADA FINA E CAMADA ESPESSA ...	87
5.1 Experimentos de secagem em camada fina	87
5.1.1 Equipamento experimental para camada fina	87
5.1.2 Procedimento experimental para a secagem em camada fina	90
5.2 Experimentos de secagem em camada espessa	91
5.2.1 Equipamento experimental para camada espessa	92
5.2.2 Procedimento experimental para a secagem em camada espessa.....	95

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM LEITO FIXO	97
6.1 Resultados experimentais e simulações em camada fina	97
6.2 Resultados experimentais e simulações em camada espessa	105
7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE SECADORES DE GRÃOS DE FLUXO CONTÍNUO	115
7.1 Esquemas de secadores de fluxo contínuo investigados.....	115
7.2 Resultados da simulação para os secadores de fluxo contínuo	121

LISTA DE SÍMBOLOS

a	razão entre a área superficial e o volume do grão	$[m^{-1}]$
a_q	difusividade térmica	$[m^2 s^{-1}]$
a_m	difusividade de massa	$[m^2 s^{-1}]$
A	área	$[m^2]$
A_{gm}	valor médio da área do grão	$[m^2]$
B_1, B_2	coeficientes de transferência de massa entre os compartimentos 1 e 2	$[kg s^{-1} m^{-3}]$
Bi_h	número de Biot da transferência de calor	[adimensional]
Bi_m	número de Biot da transferência de massa	[adimensional]
c_p	calor específico a pressão constante	$[J kg^{-1} K^{-1}]$
D_m	coeficiente de difusão de massa	$[m^2 s^{-1}; m^2 h^{-1}]$
D_t	coeficiente de difusão de calor	$[m^2 s^{-1}; m^2 h^{-1}]$
G_a	vazão em massa de ar por unidade de área	$[kg m^{-2} s^{-1}]$
G_g	vazão em massa de grão por unidade de área	$[kg m^{-2} s^{-1}]$
H	entalpia	[J]
h	coeficiente de transferência de calor convectivo	$[W m^{-2} °C^{-1}]$
h_m	relação entre H_m e D_m	$[m^{-1}]$
H_m	coeficiente de transferência de massa convectivo	$[m s^{-1}]$
H_v, h_{fg}	calor latente de vaporização da água	$[J kg^{-1}]$
k	condutividade térmica	$[W m^{-1} °C^{-1}]$
k	constante de secagem	$[s^{-1}, min^{-1}, h^{-1}]$
k_m	coeficiente de transferência de massa	$[m s^{-1}]$
k_Y	coeficiente convectivo de transferência de massa	$[kg m^{-2} s^{-1}]$
m	massa	[kg]
m_w	massa de água no grão	[kg]
m_{gu}	massa do grão úmido	[kg]
m_{gs}	massa do grão seco	[kg]
\dot{m}	fluxo de massa	$[kg s^{-1}]$
M	teor de umidade do grão	[adimensional]

M_b	teor de umidade máxima do grão	[adimensional]
M_{bu}	teor de umidade em base úmida	[adimensional, %]
M_{bs}	teor de umidade em base seca	[adimensional, %]
M_e	teor de umidade de equilíbrio	[adimensional]
M_0	teor de umidade inicial do grão	[adimensional, %]
M_s	teor de umidade na superfície do grão	[adimensional]
MR	razão de umidade	[adimensional]
n_g	número de grãos dentro do volume de controle	[adimensional]
P	pressão	[Pa]
P_v	pressão de vapor	[Pa]
P_{vs}	pressão de vapor saturado	[Pa]
q	fator que considera a influência da velocidade do ar de secagem no modelo de camada fina de dois compartimentos	[adimensional]
Q	fluxo volumétrico	[m ³ min ⁻¹ m ⁻²]
R	raio médio do grão	[m]
Re	número de Reynolds	[adimensional]
r	coordenada radial dentro do grão	[m]
S	função objetivo a ser minimizada para determinação dos coeficientes k_1 e k_2	
T	temperatura	[°C, K]
t	tempo	[s]
UR	umidade relativa do ar	[decimal]
V	volume	[m ³]
V_{vaz}	volume de ar dentro do volume de controle	[m ³]
v	velocidade	[m s ⁻¹]
X	teor de umidade do grão	[decimal]
Y	conteúdo de umidade do ar	[kg _w kg _a ⁻¹]
Y_s	conteúdo de umidade do ar na superfície do grão	[kg _w kg _a ⁻¹]

Símbolos Gregos

ρ	massa específica	[kg m ⁻³]
ϵ	porosidade	[adimensional]

τ_i	razão de volume no compartimento i da camada fina	[adimensional]
ϕ_m	fluxo de massa de vapor d'água entre o ar e o grão	[kg m ⁻² s ⁻¹]
ϕ_q	fluxo de calor entre o ar e o grão	[W m ⁻²]
ξ	coeficiente do gradiente de umidade	[K]
δ	coeficiente do gradiente de temperatura	[K ⁻¹]

Sub - índices

a	ar
c	câmara de resfriamento
g	grão
m	médio
o	valor inicial
s	ar seco
u	úmido
v	vapor
x, y	coordenadas cartesianas
w	água
1, 2	compartimentos da camada fina
1, 2, 3	estágios dos secadores

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Unidade armazenadora de pequeno porte (Weber, 1995).....	8
Figura 2.2 Representação simplificada dos sistemas de secagem (Weber, 2005).....	9
Figura 2.3 Esquema dos fluxos de ar em secadores (Weber, 2005).....	10
Figura 2.4 Perspectiva e componentes principais de um secador do tipo torre de fluxo misto (Weber, 1995).....	12
Figura 2.5 Torre de secagem ou corpo de um secador (Weber, 1995).....	13
Figura 2.6 Espelhos e dutos da torre de secagem (Weber, 2005).....	13
Figura 2.7 Fluxo de ar na torre de secagem (Weber, 2005).....	14
Figura 2.8 Secador de torre de cavaletes de fluxo misto com resfriamento (Silva, 2005).	15
Figura 2.9 Secador de fluxo cruzado de duas colunas.....	16
Figura 2.10 Esquema de torre de secagem pelo sistema de colunas.....	16
Figura 2.11 Secador de coluna de fluxo misto.	17
Figura 2.12 Torre de secagem de colunas.....	17
Figura 2.13 Secador contínuo de colunas com fluxo cruzado.	18
Figura 2.14 Esquema do secador de coluna de fluxo cruzado 5HT-15.	19
Figura 2.15 Esquema de secador de fluxo cruzado de múltiplas colunas.	19
Figura 2.16 Recirculação do ar em secador de fluxo contínuo.....	20
Figura 2.17 Dupla recirculação do ar em secador de fluxo contínuo.	21
Figura 2.18 Equilíbrio higroscópico da soja para temperatura do ar de 25°C.....	23
Figura 2.19 Decomposição da camada espessa em um conjunto de camadas finas.....	28
Figura 2.20 Dinâmica da distribuição do teor de umidade em componentes harmônicos.	37
Figura 3.1 Esquema do secador de leito fixo e volume de controle na massa de grãos.	61
Figura 3.2 Representação esquemática do modelo de dois compartimentos.....	71
Figura 3.3 Variação do fator q em função da velocidade do ar de secagem.....	74
Figura 3.4 Dependência do coeficiente k_1 com relação à temperatura de secagem.....	75
Figura 3.5 Dependência do coeficiente k_2 com relação à temperatura de secagem.....	75
Figura 4.1 Malha unidimensional uniformemente espaçada.	79
Figura 4.2 Aproximações da derivada.	81
Figura 4.3 Método de MacCormack 2D com esquema time-split para três operadores.....	85
Figura 5.1 Equipamento experimental para secagem em camada fina.....	88
Figura 5.2 Sistema de controle de temperatura e umidade do equipamento experimental.	89
Figura 5.3 Câmara de secagem em camada fina.....	89
Figura 5.4 Representação da câmara de secagem em camada fina: locais de medição.....	90
Figura 5.5 Equipamento experimental de secagem em camada espessa.	92
Figura 5.6 Câmara de secagem em camada espessa (a) Câmara completa com as seções de secagem, (b) Detalhe da seção de secagem.	93
Figura 5.7 Experimentos de camada espessa: localização dos pontos de medição.	94
Figura 6.1 Dinâmica de secagem de soja em camada fina em diferentes teores de umidade inicial dos grãos: $T = 70\text{ }^\circ\text{C}$ e $v = 0.9\text{ m/s}$	98
Figura 6.2 Dinâmica de secagem de soja em camada fina em diferentes teores de umidade inicial dos grãos: $T = 60\text{ }^\circ\text{C}$ e $v = 0.9\text{ m/s}$	99
Figura 6.3 Dinâmica da variação da taxa de secagem absoluta de soja em camada fina em diferentes teores de umidade inicial dos grãos.	99
Figura 6.4 Influência da temperatura na dinâmica de secagem de soja em camada fina.....	100

Figura 6.5 Influência da velocidade na dinâmica de secagem de soja em camada fina.	101
Figura 6.6 Dinâmica da secagem da soja em camada fina com distribuição inicial de umidade uniforme e não uniforme dentro do grão.	102
Figura 6.7 Dinâmica de secagem nos compartimentos 1 e 2 (MR_1 e MR_2) e valor médio MR , segundo o modelo de dois compartimentos.	104
Figura 6.8 Influência da umidade relativa do ar na secagem em camada fina.	105
Figura 6.9 Dados experimentais em camada espessa: temperatura do ar de secagem e temperatura ambiente em $y/H = 0.0$ (entrada do secador) durante os ensaios realizados.	106
Figura 6.10 Dados experimentais em camada espessa: temperatura do ar na seção 1 ($y/H=0.25$) do secador.	106
Figura 6.11 Dados experimentais em camada espessa: temperatura do ar na seção 2 ($y/H=0.50$) do secador.	107
Figura 6.12 Dados experimentais em camada espessa: temperatura do ar na seção 3 ($y/H=0.75$) do secador.	107
Figura 6.13 Dados experimentais em camada espessa: temperatura do ar na seção 4 ($y/H=1.0$) do secador.	108
Figura 6.14 Experimentos em camada espessa: temperatura do ar nas seções do secador. ...	108
Figura 6.15 Dados experimentais em camada espessa: temperatura dos grãos.	109
Figura 6.16 Dados experimentais em camada espessa: teor de umidade dos grãos.	109
Figura 6.17 Simulação e experimentação em camada espessa: teor de umidade dos grãos ($T_{ar}=105\text{ °C}$ e $v = 0,5\text{ m/s}$).	111
Figura 6.18 Simulação em camada espessa: teor de umidade dos grãos ($T_{ar}=105\text{ °C}$ e $v=0,5\text{m/s}$).	111
Figura 6.19 Simulação e experimentação em camada espessa: temperatura do ar ($T_{ar}=105\text{°C}$ e $v = 0,5\text{ m/s}$).	112
Figura 6.20 Simulação e experimentação em camada espessa: temperatura dos grãos ($T_{ar}=105\text{°C}$ e $v = 0,5\text{ m/s}$).	112
Figura 6.21 Simulação em camada espessa: variação da temperatura do ar ($T_{ar}=105\text{ °C}$ e $v=0,5\text{m/s}$).	113
Figura 6.22 Simulação em camada espessa: variação da temperatura dos grãos ($T_{ar} = 105\text{ °C}$ e $v = 0,5\text{ m/s}$).	114
Figura 6.23 Simulação em camada espessa: variação da umidade do ar ($T_{ar} = 105\text{ °C}$ e $v=0,5\text{m/s}$).	114
Figura 7.1 Layout de secador de fluxo contínuo de grãos com 3 estágios de secagem e câmara de resfriamento, com saída do ar de exaustão ao nível do estágio 1.	116
Figura 7.2 Layout de secador de fluxo contínuo de grãos com 3 estágios de secagem e câmara de resfriamento, com saída do ar de exaustão ao nível do estágio 3.	116
Figura 7.3 Layout de secador de fluxo contínuo de grãos com 2 estágios de secagem e câmara de resfriamento, com saída do ar de exaustão ao nível do estágio 1.	117
Figura 7.4 Layout de secador de fluxo contínuo de grãos com 2 estágios de secagem e câmara de resfriamento, com saída do ar de exaustão ao nível do estágio 2.	118
Figura 7.5 Esquemas de secadores de fluxo contínuo com três estágios de secagem.	119
Figura 7.6 Esquemas de secadores de fluxo contínuo com dois estágios de secagem.	120
Figura 7.7 Razão de umidade da soja para temperatura do ar de 30°C	122
Figura 7.8 Distribuição do teor de umidade dos grãos no secador 1 em estado estacionário.	123
Figura 7.9 Distribuição da temperatura do grão no secador 1 em estado estacionário.	123
Figura 7.10 Distribuição de temperatura do ar no secador 1 em estado estacionário.	124
Figura 7.11 Distribuição da umidade do ar no secador 1 em estado estacionário.	124

Figura 7.12 Distribuição do teor de umidade dos grãos no secador 2 em estado estacionário.	125
Figura 7.13 Distribuição de temperatura dos grãos no secador 2 em estado estacionário.....	126
Figura 7.14 Distribuição da temperatura do ar no secador 2 em estado estacionário.....	126
Figura 7.15 Distribuição do conteúdo de umidade do ar no secador 2 em estado estacionário.	127
Figura 7.16 Comparação da distribuição da umidade média do grão para os secadores 1 e 2.	127
Figura 7.17 Comparação da distribuição de temperatura do grão para os secadores 1 e 2.....	128
Figura 7.18 Comparação da distribuição de temperatura média do ar para os secadores 1 e 2.	128
Figura 7.19 Comparação da distribuição da umidade do ar para os secadores 1 e 2.....	129
Figura 7.20 Distribuição do teor de umidade dos grãos no secador 3 em estado estacionário.	129
Figura 7.21 Distribuição da temperatura do grão no secador 3 em estado estacionário.....	130
Figura 7.22 Distribuição da temperatura do ar no secador 3 em estado estacionário.....	130
Figura 7.23 Distribuição do conteúdo de umidade do ar no secador 3 em estado estacionário.	131
Figura 7.24 Distribuição do teor de umidade dos grãos no secador 4 em estado estacionário.	131
Figura 7.25 Distribuição da temperatura do grão no secador 4 em estado estacionário.....	132
Figura 7.26 Distribuição da temperatura do ar no secador 4 em estado estacionário.....	132
Figura 7.27 Distribuição do conteúdo de umidade do ar no secador 4 em estado estacionário.	133
Figura 7.28 Economia de combustível devido ao reaproveitamento do ar de recirculação para os secadores 1 e 2.	134
Figura 7.29 Economia de combustível devido ao reaproveitamento do ar de recirculação para os secadores 3 e 4.	134

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Equações para a umidade de equilíbrio.....	26
Tabela 2.2 Geometria aplicável para produtos [Katehawa e Silva, 2006].....	32
Tabela 5.1 Experimentos e medições realizadas em camada espessa.....	95
Tabela 5.2 Condições de realização dos experimentos de secagem em camada espessa....	96
Tabela 6.1 Diferença relativa percentual entre os dados de Soares e próprios para T=70°C e v = 0,9 m/s.....	98
Tabela 7.1 Rendimento da secagem para os secadores com reaproveitamento de calor.....	136
Tabela 7.2 Tempo de secagem para os secadores analisados.....	136
Tabela 7.3 Temperaturas e umidades médias do ar nos secadores 1 e 2.....	136
Tabela 7.4 Temperaturas e umidades médias do ar nos secadores 3 e 4.....	136

1. INTRODUÇÃO

A análise de estudos estatísticos mostra a evolução da população mundial nos próximos anos. No ano de 1830 a população mundial atingiu 1 bilhão de pessoas e em 1930, cem anos depois, chegou a 2 bilhões de habitantes. Em 1960, 30 anos mais tarde, atingiu 3 bilhões e 15 anos mais tarde, chegou a 4 bilhões. Dados recentes do Departamento de Referência da População dos Estados Unidos indicaram 6,7 bilhões de habitantes no ano de 2008 (Weber, 2005; <http://jn.sapo.pt>, 2008). As projeções do aumento populacional futuro indicam que este aumento estará concentrado nos países subdesenvolvidos, onde a agricultura possui baixos índices de produtividade e altos índices de perdas pós-colheita, o que contribuirá ainda mais para o agravamento dos índices de fome no mundo.

Esse contexto evidencia a oportunidade de crescimento do Brasil a partir da produção de alimentos e da bioenergia, o que alavanca toda a área industrial, de máquinas, equipamentos e instalações.

O Brasil, no que se refere à produção agrícola, dispõe de grandes áreas agriculturáveis adequadas à produção de grãos. Possui também condições favoráveis de clima, água e tecnologia para produção em regiões tropicais. Os principais grãos produzidos são: soja, milho, arroz, trigo e feijão.

Segundo Dall’Agnol e Hirakuri, 2008, “o setor agroindustrial brasileiro cresce significativamente a décadas, resultado da expansão da área de produção e, principalmente, do aumento da produtividade. O setor responde por cerca de 24% do Produto Interno Bruto, pela geração de 37% dos empregos e por 36% das exportações totais, que, em 2000, somaram US\$ 20,6 bilhões; em 2008, contribuindo com a totalidade (1994 a 2004 e em 2007) ou a maior parcela (85% em 2005 e 90% em 2006) do superávit da balança comercial brasileira das últimas décadas.

A soja se destaca na produção mundial e nacional. No Brasil, o Rio Grande do Sul é um grande produtor, sendo que o sistema agroindustrial da soja é uma atividade econômica fundamental na Região Noroeste do Estado, gerando recursos na agricultura, na indústria, no comércio e na prestação de serviços. Essa região contempla importantes empresas que fabricam equipamentos nas áreas de secagem e armazenagem de grãos.

A armazenagem de grãos, entendida como sendo as atividades destinadas à guarda e conservação em condições inalteradas de quantidade e qualidade, apresenta o seguinte

fluxograma convencional para uma unidade de beneficiamento:

Colheita → Recebimento → Pré-limpeza → Secagem → Limpeza → Armazenamento → Expedição

Os grãos, procedentes da lavoura, depois de colhidos são entregues na unidade de armazenamento e beneficiamento com teores de impureza e umidade elevados, sendo submetidos a um processo de limpeza, secagem e armazenamento, para ao final serem beneficiados e consumidos [Weber, 2005]. As etapas de limpeza e secagem são, portanto, indispensáveis para uma boa conservação dos grãos armazenados em silos ou armazéns.

A operação de colheita usualmente leva em consideração o teor de umidade do grão, sendo que a realização da colheita é indicada para ocorrer o mais próximo possível da sua maturidade fisiológica. Tal maturidade é o momento em que as sementes/grãos possuem a maior qualidade do produto, ou seja, a maior quantidade de matéria seca [Sartori, 1990]. Entretanto, os grãos atingem a maturidade fisiológica geralmente com teores de umidade acima de 30%, umidades estas incompatíveis com a tecnologia disponível para a colheita mecânica [Garcia et al., 2004].

Para a obtenção de um grão de boa qualidade, a recomendação em relação ao processo de secagem é a colheita da soja com teores de umidade próximos de 16 a 20% (b.u), e para o armazenamento, entre 10 e 13% (b.u) [Sartori, 1990; Weber, 2005], dependendo das condições do clima local e do período de armazenamento. Portanto, verifica-se que o grão deve ser submetido, necessariamente, a um processo de secagem, visando à preservação da sua qualidade fisiológica e permitindo a colheita antecipada, minimizando as diversas perdas e deteriorações que podem ocorrer no campo.

A secagem é o processo que consiste na retirada de água dos grãos por evaporação até um nível que possibilite a armazenagem com conservação segura. Durante o processo de secagem ocorre o transporte de água, nas formas de líquido e vapor, do interior para a superfície do grão e desta para o ar, por convecção.

A secagem artificial que utiliza um fluxo forçado de ar aquecido é o método de secagem mais recomendado, em função de não depender das condições climáticas do ambiente e permitir a secagem com rapidez e em grande escala. Esse método permite o controle dos parâmetros fundamentais que garantem a eficiência do processo de secagem, que são a temperatura e a vazão do ar de secagem, e o tempo de exposição do grão ao ar aquecido.

O processo de secagem da soja, grão objeto de estudo neste trabalho, em secadores,

apresenta algumas exigências: deve ser rápido, pois o fluxo de entrega dos grãos nas unidades de beneficiamento não pode ser interrompido na época da colheita; deve ser eficiente, onde uma quantidade prescrita de água necessita ser retirada para que o grão atinja o teor de umidade adequado ao armazenamento; deve ser seguro, visto que o grão não pode sofrer danos que prejudiquem sua finalidade futura; e deve ser econômico, sendo realizado com o mínimo custo operacional.

Para satisfazer as exigências citadas, é necessário conhecer e monitorar os fenômenos físicos presentes no processo de secagem dos secadores industriais e, nesse sentido, a modelagem matemática e a simulação numérica associada a resultados experimentais é uma alternativa eficiente e de baixo custo.

A pesquisa em modelagem matemática do processo de secagem de grãos ocorre a mais de 90 anos. Para descrever a secagem em camada fina foram propostos diversos tipos de modelos: teóricos [Luikov, 1966], semi-empíricos [Lewis, 1921; Page, 1949; Henderson e Pabis, 1969; Henderson, 1974] e empíricos [Thompson et al., 1968]. Para descrever o comportamento da umidade e da temperatura do ar e do grão, vários modelos foram propostos para secadores de diferentes tipos de fluxo: leito fixo, fluxo concorrente, fluxo contracorrente e fluxo cruzado [Laws e Parry, 1985; Bakker-Arkema et al., 1967; Brooker et al., 1974].

A utilização de modelos matemáticos é necessária para a simulação do processo de secagem em secadores, e para o desenvolvimento e otimização dos mesmos, minimizando o custoso procedimento de construção e aperfeiçoamento de protótipos. Os parâmetros determinados pelo modelo matemático permitem otimizar a eficiência do sistema através de monitoramento e controle do processo através de um software interativo.

O exposto justifica a importância da pesquisa e desenvolvimento tecnológico na modelagem matemática dos processos de secagem para a região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, que contempla a produção agrícola de grãos de soja e empresas fabricantes de secadores.

Dessa forma, o tema desta tese é o estudo, a modelagem matemática e a simulação do processo de secagem de soja em secadores do tipo torre de coluna com fluxo contínuo e múltiplos estágios com recirculação de ar. Os objetivos são modelar a transferência de massa do grão para o ar, modelar a transferência de calor do ar para o grão, modelar a influência do conteúdo de umidade do ar e do teor de umidade inicial do grão na secagem, bem como avaliar a eficiência energética de secadores.

O trabalho está organizado conforme segue: no capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica dos temas abordados na tese, o processo e os mecanismos de secagem de grãos, os secadores, com suas diversas classificações e características particulares, principalmente o secador de fluxo contínuo, que é o mais utilizado para a secagem de soja no Rio Grande do Sul, e os modelos matemáticos de secagem de grãos em camada fina e camada espessa.

No capítulo 3 descreve-se o modelo matemático para o processo de secagem em camada espessa e o modelo matemático de camada fina. O modelo é apresentado para leito fixo unidimensional e expandido para o caso bidimensional e fluxo contínuo.

A resolução do sistema de equações do processo de secagem é apresentada no capítulo 4, com o método das diferenças finitas e o método de MacCormack 1D e 2D com esquema time-split.

No capítulo 5 apresentam-se os equipamentos e os procedimentos para a realização dos experimentos em camada fina e camada espessa. A discussão e os resultados dos experimentos e das simulações em camada fina e camada espessa são apresentados e comparados no capítulo 6.

As simulações de secadores de fluxo contínuo de grãos de coluna de fluxo cruzado com múltiplos estágios em diferentes esquemas são apresentadas no capítulo 7. As simulações foram realizadas aplicando-se o método das diferenças finitas com o esquema de MacCormack 2-D “time-split”.

No capítulo 8 é apresentada a conclusão da tese.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se neste capítulo a revisão bibliográfica dos temas abordados nesta tese, consistindo do estudo geral sobre o processo e os mecanismos de secagem de grãos, dos equipamentos de secagem, os secadores e os modelos matemáticos de secagem de grãos em camada fina e em camada espessa.

2.1 Aspectos introdutórios do processo de secagem

Os grãos de cereais são substâncias higroscópicas. A higroscopia caracteriza a capacidade que o grão possui de ceder ou absorver umidade do ar e representa uma das mais importantes características físicas dos grãos.

A higroscopia do grão determina a sua capacidade de estar em permanente troca de água com o ar circundante. A intensidade e o sentido dessa troca são determinados pelo gradiente de potencial hídrico existente entre o grão e o ar, ocorrendo do maior para o menor potencial até que seja atingido o equilíbrio higroscópico. No citado equilíbrio a transferência de água entre o grão e o ar é nula [Vieira-Júnior et al., 1999, Garcia et al., 2004].

Os grãos, encontrando-se em um determinado teor de umidade, são compostos por matéria seca e úmida, sendo que a água (parte úmida) pode se apresentar de várias formas. Existem três formas básicas:

1. Umidade superficial: é a umidade localizada na parte externa do grão e que se encontra no estado líquido. Caracteriza-se pela fácil remoção através da evaporação;
2. Umidade intersticial: é a umidade livre no interior dos grãos, nos denominados canais intersticiais. Na secagem é estabelecido um gradiente de pressão osmótica entre as partes interna e externa do grão, forçando o aumento da pressão interna e a saída da umidade do mesmo. Esta umidade é também de remoção relativamente fácil;
3. Umidade de constituição: localizada nas células, encontra-se quimicamente ligada aos componentes dos grãos (vitaminas, proteínas, carboidratos, enzimas e gorduras). Não é removida durante a secagem.

Na secagem consegue-se remover a umidade superficial e reduzir a intersticial,

permanecendo a umidade de constituição, que representa cerca de 8 a 10 % da umidade total [Weber, 2005].

Pereira [S.d] apresenta a água contida nos grãos em quatro categorias principais, sendo:

1. Água ligada ou de constituição: formada por uma camada monomolecular ligada à matéria biológica. Pode ser removida do grão somente através da aplicação de condições rigorosas de temperatura e longo período de tempo;

2. Água adsorvida: constituída por uma camada polimolecular que se adere sobre a camada monomolecular precedente. Água não solvente e fortemente adsorvida;

3. Água líquida sob pressão osmótica: é água solvente que retém substâncias no material biológico. É retirada do grão com certa dificuldade;

4. Água absorvida: é a água livre nos poros dos grãos, mantida fracamente por forças capilares. É fácil de ser retirada.

A secagem é o processo que consiste na retirada de umidade (água) dos grãos por evaporação até um nível que possibilite a armazenagem com conservação segura. Para a armazenagem de grãos o conteúdo de umidade adequado é da ordem de 10 a 13%.

Durante o processo de secagem ocorre o transporte de água, nas formas de líquido e vapor, do interior para a superfície do grão. Os principais mecanismos de transporte de água nos grãos, nas condições consideradas nesse trabalho, são [Parry, 1985, Park et al., 2007]:

1. Difusão líquida: é o transporte líquido devido à existência de gradientes de concentração de umidade, ou seja, transporte molecular;

2. Difusão de vapor: é o transporte de vapor devido ao gradiente de pressão de vapor provocado pelo gradiente de temperatura necessário para vaporizar a água líquida contida no grão;

3. Transporte de líquido e vapor: ocorre devido à diferença de pressão total e capilaridade.

A secagem envolve dois processos fundamentais e simultâneos: a transferência de calor e a transferência de massa. O calor é transferido do ar para o grão elevando a temperatura do mesmo e evaporando a água. A transferência de massa ocorre como líquido ou vapor dentro do grão e como vapor na sua superfície. No decorrer da secagem, as variações das transferências de calor e de massa caracterizam a ocorrência de dois ou mais períodos

distintos de secagem [Park et al., 2007; Parry, 1985; Perry e Chilton, 1980].

Os períodos de secagem são descritos em função do tempo necessário para que esse processo ocorra. Inicialmente tem-se o aquecimento do grão até a entrada em regime de secagem propriamente dito, visto que o grão está inicialmente mais frio que o ar de secagem. Na seqüência, os períodos são definidos como período de taxa de secagem constante e período de taxa de secagem decrescente.

No período de taxa de secagem constante existe grande disponibilidade de água dentro do grão na forma de água livre, e o movimento de migração de umidade do interior para a superfície do grão é suficiente para manter uma condição saturada na superfície do mesmo. Dessa forma a taxa de transferência de massa e a taxa de transferência de calor são constantes, e a temperatura do grão e a taxa de secagem permanecem igualmente constantes.

O próximo período se caracteriza como período de taxa de secagem decrescente. Inicia-se no ponto designado de teor de umidade crítico, onde termina o período de taxa de secagem constante. A superfície do grão não é mais mantida na condição saturada pelo movimento de migração da umidade dentro do grão, reduzindo a transferência de massa. A transferência de massa não é mais compensada pela transferência de calor e a taxa de secagem decresce a partir da superfície do grão. A temperatura do produto aumenta e tende a atingir a temperatura do ar. O processo é finalizado quando o grão atingir a umidade de equilíbrio com o ar de secagem.

2.2 Equipamentos de secagem

As unidades armazenadoras, em um âmbito geral, são compostas por vários equipamentos que visam ao recebimento, limpeza, secagem e armazenamento de produtos agrícolas. Nessas unidades existem transportadores, máquinas de pré-limpeza, limpeza e secadores, bem como silos armazenadores, sistema de aeração, termometria, silos pulmão e silo de expedição [Weber, 1995].

Na Figura 2.1 ilustra-se uma unidade armazenadora de pequeno porte, em vista lateral. Mostra-se a máquina de pré-limpeza (PL), o silo pulmão (SP), o secador (SE), o silo armazenador (SA) e os transportadores.

2.2.1 Classificação Geral

Os equipamentos de secagem, denominados secadores, são fabricados sob diversas formas construtivas e operacionais. Portanto, podem ser classificados de diversas maneiras, conforme suas características particulares. Weber, 1995, Weber, 2005, Borges, 2002, e Silva, 2005, apresentam a seguinte classificação geral:

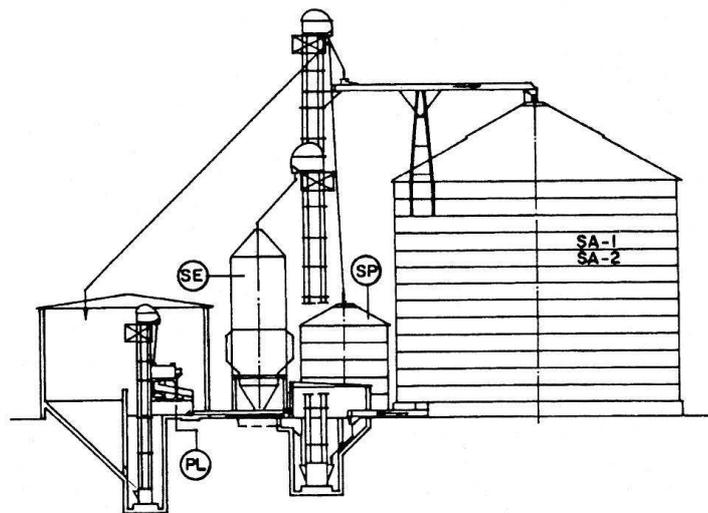


Figura 2.1 Unidade armazenadora de pequeno porte (Weber, 1995).

- Quanto ao tipo de fabricação: apresentam-se como secadores móveis e fixos.

Os secadores móveis são aqueles de menor porte e que podem ser movimentados de um local para outro. Já os fixos são os que não possuem movimento, permanecendo instalados fixos em um determinado local. São os mais utilizados e são divididos em silos secadores e secadores do tipo torre.

- Quanto ao sistema de carga/funcionamento: são classificados em intermitentes e contínuos.

Os secadores contínuos são aqueles em que o produto passa uma única vez pela torre de secagem para atingir o teor de umidade desejado. Nos secadores intermitentes o produto a ser secado passa mais de uma vez pela torre de secagem, ocorrendo a recirculação do produto. A Figura 2.2 mostra os sistemas de secagem contínua e intermitente.

Essa classificação não é fixa, pois um mesmo secador, dependendo do teor de umidade

do produto, poderá operar de forma contínua ou intermitente.

A operacionalização do funcionamento do sistema ocorre com o elevador de carga (1) carregando o secador (2). Na câmara superior (S) passará ar quente de secagem e na câmara inferior (R) passará ar frio de resfriamento. No sistema contínuo o grão sai seco na parte inferior do secador (3), indo para o pé do elevador (5) e por fim ao silo de armazenagem. No sistema intermitente os grãos saem em (3) e são direcionados ao elevador de carga pela tubulação (4), sendo novamente conduzidos ao secador. As câmaras de secagem e de resfriamento estarão ambas funcionando como câmara de secagem. Os grãos circulam uma, duas, ou mais vezes até secarem a umidade desejada. Na última passagem de secagem o ar quente da câmara inferior será suspenso, passando esta a operar com ar frio de resfriamento. Com os grãos secos e frios, os mesmos são direcionados ao pé do elevador de descarga (5) e através da tubulação (6) para o silo de armazenagem.

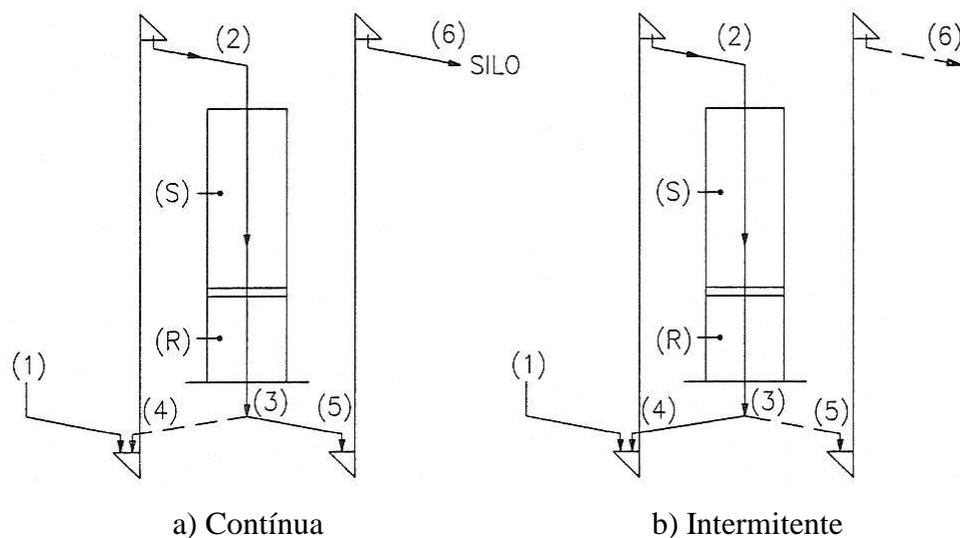


Figura 2.2 Representação simplificada dos sistemas de secagem (Weber, 2005).

- Quanto à forma de movimentação do ar: secadores com insuflação ou com exaustão de ar.

O ar de secagem pode ser insuflado antes da massa de produto a ser secado, ou aspirado após sua passagem pelo produto.

O sistema por insuflação possui atualmente pouca aplicação. O fluxo de ar é obtido através de ventiladores e a seqüência de equipamentos por onde o ar passa é: fornalha – ventilador – secador. No sistema por aspiração o ventilador trabalha aspirando o ar de

secagem. É o mais utilizado atualmente. A seqüência do fluxo de ar neste sistema é: fornalha – secador – ventilador.

- Quanto ao sentido do fluxo do ar de secagem: são classificados em concorrente, contracorrente, cruzado e misto.

Os grãos, quando da operação dos secadores citados, sempre seguirão o fluxo vertical do alto da torre para baixo.

No secador concorrente os fluxos de ar de secagem e de grãos possuem o mesmo sentido de deslocamento de cima para baixo. O secador contracorrente, por sua vez, opera de forma contrária ao secador concorrente, estando o ar de secagem escoando de baixo para cima, em sentido oposto aos grãos. O secador de fluxo cruzado opera segundo um escoamento de ar de secagem em sentido horizontal (perpendicular) ao escoamento dos grãos.

No secador misto o ar de secagem possui um sentido subindo (sistema contracorrente), um sentido descendo (sistema concorrente) e um sentido horizontal (sistema cruzado), com as possibilidades ocorrendo em uma só torre de secagem. O nome secador de fluxo misto vem do fato do mesmo possuir todos os tipos de fluxo.

A Figura 2.3, a seguir, sistematiza esquematicamente os diversos fluxos de ar de secagem.

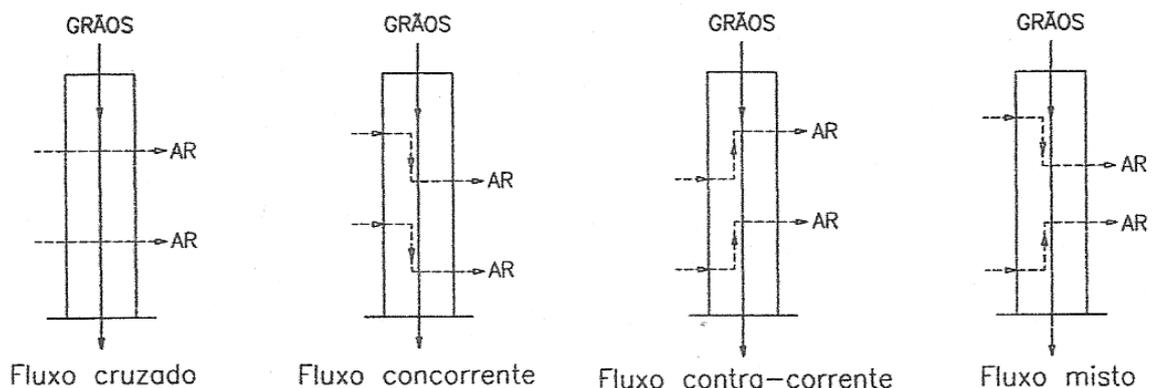


Figura 2.3 Esquema dos fluxos de ar em secadores (Weber, 2005).

- Quanto à torre de secagem: cavaletes (calhas paralelas), calhas cruzadas, de colunas e com câmara de descanso.

A torre de secagem é a principal parte de um secador. Estando conectada aos difusores

de entrada e de saída de ar, nela ocorrerá a secagem e o resfriamento da massa de grãos.

- Quanto ao sistema de descarga: descarga de bandejas mecânicas, descarga pneumática e descarga de eclusas rotativas.

O sistema de descarga está presente em todos os secadores e possui a finalidade de regular a velocidade de descida dos grãos.

- Quanto às fontes de calor: combustíveis sólido, líquido e gasoso.

Uma grande variedade de combustíveis pode ser utilizada, principalmente a lenha, casca de arroz, briquetes de casca de arroz ou serragem, resíduos orgânicos, óleo diesel, fuel-oil, óleo de baixo ponto de fluidez, óleo de alto ponto de fluidez, gás liquefeito do petróleo e o gás natural.

- Quanto ao ar de secagem da fornalha: ar direto e ar indireto.

No sistema de ar direto (ou fogo direto) os gases de combustão entram em contato direto com os grãos. No caso do ar indireto, existe um trocador de calor intermediário, usado para aquecer o ar de secagem a partir dos gases de combustão. Para esse sistema os gases de combustão não entram em contato com os grãos a serem secados.

- Quanto ao sistema de controle: secagem de controle manual e secagem automatizada.

Os parâmetros temperatura do ar de secagem e umidade dos grãos são importantes para o controle do processo de secagem. Na secagem manual a temperatura do ar na entrada e na saída do secador, e a umidade dos grãos são operadas manualmente. A regulagem da descida dos grãos depende do operador do secador.

Ao contrário, no sistema de secagem automatizado, as temperaturas do ar na entrada e saída do secador e as umidades de entrada e saída dos grãos são controladas via sistema eletrônico. Os sistemas de controle são constituídos de sensores de temperatura e de umidade, cabos e controlador computadorizado, que ajustará automaticamente a velocidade de descarga dos grãos.

Os secadores predominantemente utilizados para a secagem de soja no Estado do Rio Grande do Sul são os do tipo torre, de cavaletes e de coluna, contínuo/intermitente, utilizando combustível sólido (lenha) e ar da fornalha direto. Também se tem a secagem em silo (silo

secador), com insuflação de ar e leito fixo.

O objetivo principal do trabalho é o estudo do secador do tipo torre, de coluna, com sistema de carga contínuo.

2.2.2 Secador do tipo torre

Um secador do tipo torre de cavaletes de fluxo misto típico, muito utilizado no mercado nacional, é mostrado na Figura 2.4 , com suas partes componentes. Na Figura 2.5 mostra-se a torre de secagem.

Os principais componentes deste secador são:

1. Bases de concreto;
2. Funil e rosca de descarga;
3. Mesa de descarga;
4. Torre de secagem e de resfriamento;
5. Fornalha;
6. Difusor de entrada do ar quente;
7. Caixa e funil de carga com controle de nível;
8. Difusor de saída do ar;
9. Ventilador axial;
10. Elevador de carga;
11. Cano de retorno.

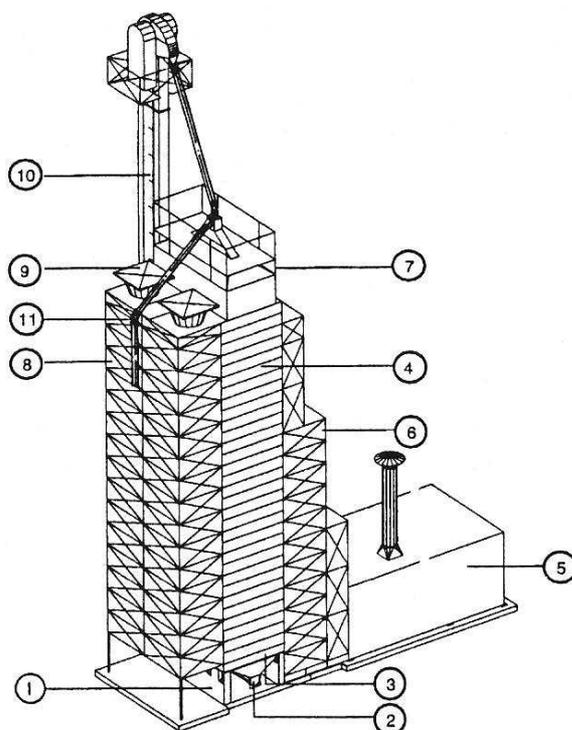


Figura 2.4 Perspectiva e componentes principais de um secador do tipo torre de fluxo misto (Weber, 1995).

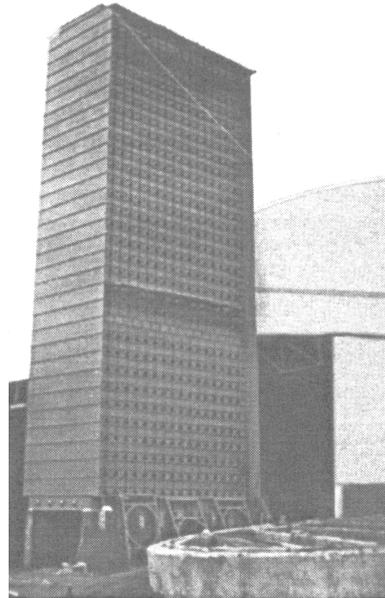


Figura 2.5 Torre de secagem ou corpo de um secador (Weber, 1995).

No secador de cavaletes as torres possuem calhas (ou dutos) e espelhos distribuídos de forma paralela e horizontal. Os espelhos de um mesmo nível são abertos no lado da fornalha (entrada do ar) e fechados no lado oposto, lado do ventilador (saída do ar), conforme mostra a Figura 2.6 . Nos níveis imediatamente superior e inferior, de forma contrária, os espelhos são fechados no lado da fornalha e abertos no lado do ventilador.

Os grãos possuem movimento vertical para baixo e o ar é aspirado por ventiladores, entrando em um nível de dutos horizontais (E) e saindo por outro nível de dutos inferiores ou superiores (S). Dessa forma (Figura 2.7), tem-se caracterizada a operação do secador pelo fluxo de ar em sentido concorrente, contracorrente e cruzado (fluxo misto), sendo o fluxo cruzado relativamente pequeno se comparado com os fluxos concorrentes e contracorrentes. O nome secador de fluxo misto vem do fato do mesmo possuir todos os tipos de fluxo.

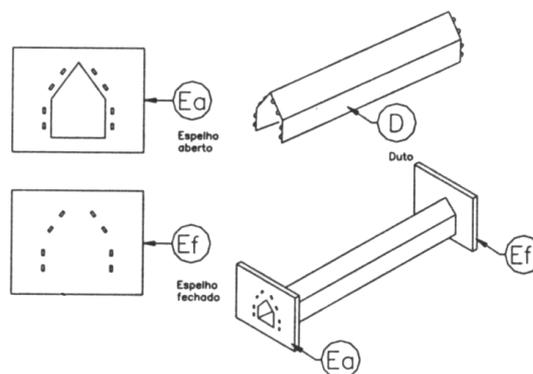


Figura 2.6 Espelhos e dutos da torre de secagem (Weber, 2005).

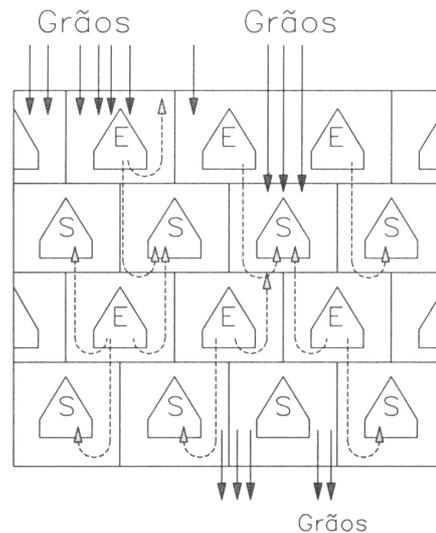


Figura 2.7 Fluxo de ar na torre de secagem (Weber, 2005).

No funcionamento do secador, conforme Figura 2.8, o produto cai por gravidade do funil de carga passando pelos cavaletes horizontais da torre. O fluxo de grãos é controlado pelo fechamento/abertura da mesa de descarga. O ar aquecido na fornalha é misturado com o ar ambiente e conduzido (ar de secagem, normalmente com temperaturas entre 80 a 110°C) até a entrada dos cavaletes da câmara de secagem, que correspondem a aproximadamente 2/3 da torre. Os cavaletes de entrada de ar, fechados no lado oposto (Figuras 2.6 e 2.7), direcionam o ar a passar pela massa de grãos onde ocorre o aquecimento e secagem dos grãos. Através dos cavaletes de saída, o ar úmido (chamado de ar exausto ou ar de exaustão) sai conduzido para o difusor de saída de ar através da ação de um ventilador. Na câmara de resfriamento, que corresponde a aproximadamente 1/3 da altura da torre, o produto é submetido a um fluxo de ar a temperatura ambiente com o objetivo de retirar calor do mesmo, deixando-o com temperatura próxima da temperatura de armazenagem.

O processo de secagem pode ser controlado por um sistema de sensores de umidade de grãos, instalados na entrada e interligados com uma central de processamento que envia o sinal para abertura da mesa de descarga. Este sinal depende do teor de umidade dos grãos e determina a velocidade da descida do produto, ou o tempo de permanência do produto no secador. Em virtude do custo e da confiabilidade deste sistema ele não se encontra presente em todos os secadores do mercado.

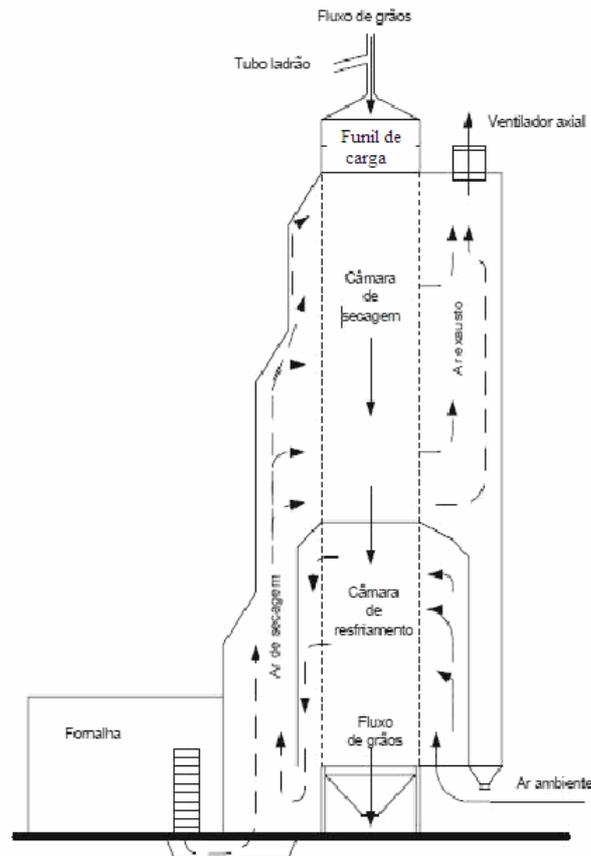


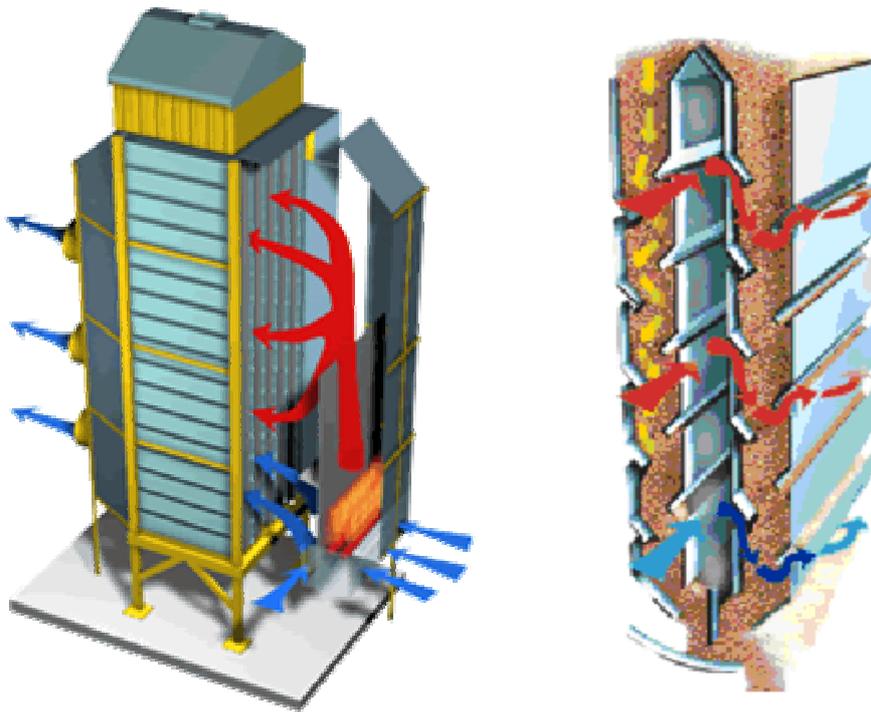
Figura 2.8 Secador de torre de cavaletes de fluxo misto com resfriamento (Silva, 2005).

No secador apresentado tem-se o reaproveitamento do ar que passa na câmara de resfriamento. Este ar é misturado ao ar quente da fornalha, aumentando o rendimento do secador e reduzindo o consumo de energia.

Os secadores de coluna são secadores que estão entrando com muita velocidade no Brasil, tendo a sua aplicação aumentada nos últimos anos. Possuem a característica de permitir a secagem de produtos com até 4% de impurezas, e propiciam uma elevada taxa de secagem.

Nos secadores de torre de coluna de fluxo cruzado, assim como nos secadores de torre de cavaletes, os grãos úmidos entram na parte superior do secador, descem pelas colunas de secagem e são descarregados na parte inferior. O controle do fluxo de grãos é regulado por um mecanismo rotativo no final da coluna de secagem. O ar de secagem atravessa a coluna perpendicularmente aos grãos. A Figura 2.9 mostra um secador de fluxo cruzado convencional [Dalpasquale et al., 1987]. A Figura 2.10 apresenta um outro esquema de secador de colunas [Weber, 2005].

A Figura 2.11 mostra um esquema do secador de coluna de fluxo misto [Engenharia



a) Vista geral do fluxo de ar

b) Detalhe do fluxo de ar na coluna

Figura 2.11 Secador de coluna de fluxo misto.

A representação de uma torre de secagem de colunas completa e em detalhe parcial é realizada na Figura 2.12 [Kepler Weber, Catálogo Secadores].



a) Torre completa



b) Detalhe parcial da torre

Figura 2.12 Torre de secagem de colunas.

Um secador contínuo de colunas com fluxo cruzado é ilustrado na Figura 2.13 (GSI, Catálogo Process Dryer). Nessa figura tem-se: a coluna de grãos de 290 mm que realiza a primeira etapa da secagem, onde os grãos estão mais úmidos e frios; o intercambiador de grãos que realiza a mudança dos grãos dentro da coluna, possibilitando a homogeneização da temperatura e da umidade; a câmara de grãos de 380 mm possibilitando uma menor velocidade de escoamento da massa de grãos, racionalizando a quantidade de energia consumida e melhorando a eficiência do processo e a qualidade do produto; a câmara de secagem com um ambiente pressurizado com ar quente entre as colunas que distribui o ar de secagem; a câmara de resfriamento sendo um ambiente pressurizado entre as colunas, que distribui o ar frio; duto de reaproveitamento que interliga a câmara de enclausuramento das colunas ao ventilador de ar quente que possibilita o reaproveitamento do ar de resfriamento e parte do ar de secagem.

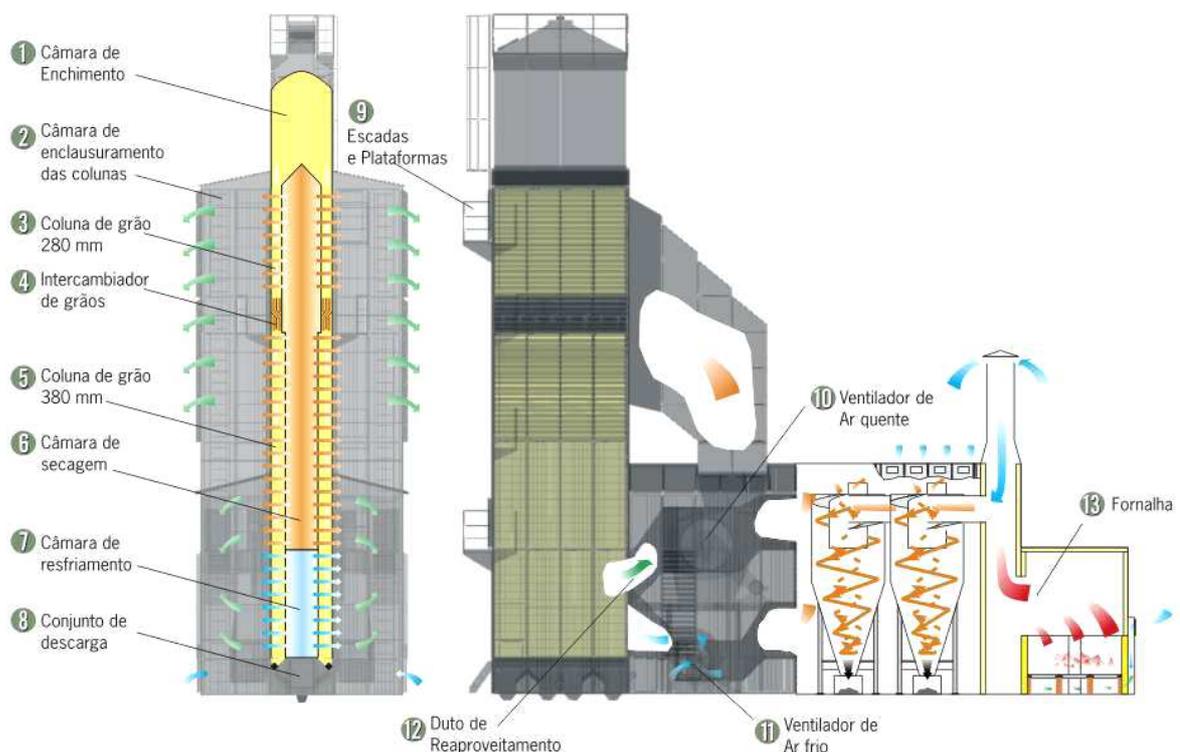


Figura 2.13 Secador contínuo de colunas com fluxo cruzado.

Um esquema de secador de fluxo cruzado composto de duas seções de secagem, uma seção de reversão dos grãos e uma seção de resfriamento e recirculação do ar de exaustão, secador de grãos Beidahuang 5HT-15 [Zhihuai e Chongwen, 1999], é mostrado na Figura

2.14. Na Figura 2.15 ilustra-se um secador de fluxo cruzado de múltiplas colunas [Dalpasquale et al., 1987].

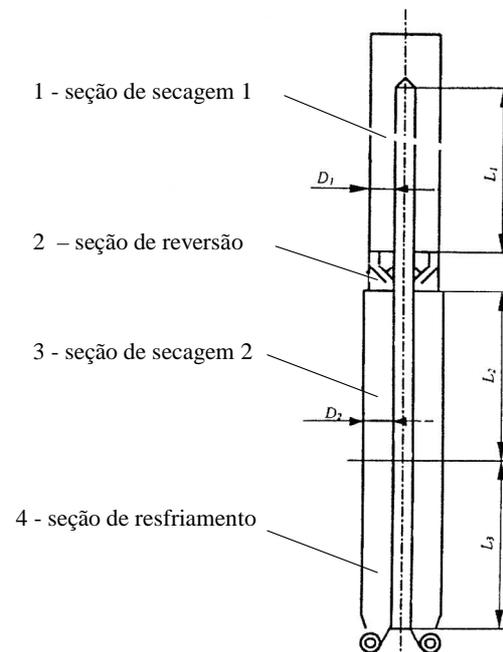


Figura 2.14 Esquema do secador de coluna de fluxo cruzado 5HT-15.

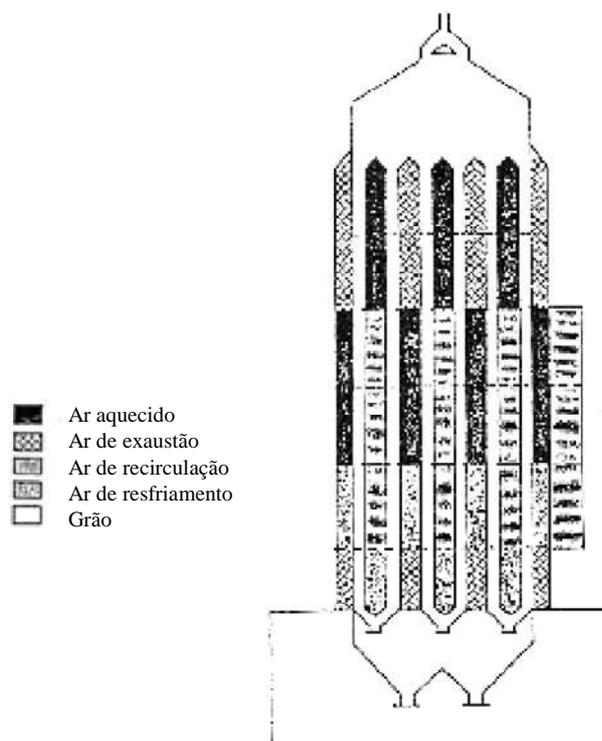


Figura 2.15 Esquema de secador de fluxo cruzado de múltiplas colunas.

Com relação ao reaproveitamento do ar que atravessa a câmara de resfriamento na câmara de secagem, chamado de recirculação do resfriamento, este é mostrado também na Figura 2.16. O ar ambiente (ar frio) realiza o resfriamento da massa de grãos. Após, saindo como ar de recirculação, é misturado ao ar quente vindo da fornalha resultando no ar de secagem. O ar de secagem realiza a secagem dos grãos na câmara de secagem e é descarregado ao ambiente como ar saturado (ou ar exausto).



Figura 2.16 Recirculação do ar em secador de fluxo contínuo.

Um esquema com dupla recirculação do ar é mostrado na Figura 2.17. A secagem ocorre em duas seções (estágios) de secagem com diferentes temperaturas e uma seção (estágio) de resfriamento. O ar ambiente realiza o resfriamento dos grãos na câmara de resfriamento (seção inferior), saindo desta como ar de recirculação. Misturado ao ar quente da fornalha é alimentado à câmara de secagem da seção intermediária (primeira recirculação) e sai novamente como ar de recirculação. O ar de recirculação da seção intermediária é misturado ao ar quente da fornalha e como ar de secagem realiza a secagem dos grãos na seção superior (segunda recirculação), saindo como ar saturado succionado pelo (s) ventilador (es).

Na recirculação dupla, o ar proveniente das seções inferiores (seção de resfriamento e seção de secagem intermediária) é duplamente aproveitado, otimizando sua eficiência energética e obtendo um produto com temperatura ideal para a armazenagem.



Figura 2.17 Dupla recirculação do ar em secador de fluxo contínuo.

2.3 Modelos matemáticos do processo de secagem

Apresenta-se a seguir os conceitos do teor de umidade do grão e do teor de umidade de equilíbrio, além da revisão dos modelos matemáticos de secagem em camada fina e em camada espessa.

2.3.1 Noções preliminares

O processo de secagem de grãos leva em consideração dois tipos básicos de parâmetros. Os denominados parâmetros externos, que se referem às propriedades do ar de secagem e os parâmetros internos, referentes às relações existentes entre o grão e o seu teor de umidade.

O teor de umidade (ou quantidade de água) do grão pode ser expresso em base úmida ou em base seca. O teor de umidade em base úmida é definido por:

$$M_{bu} = \frac{m_w}{m_{gu}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

onde:

M_{bu} - teor de umidade em base úmida (%);

m_w - massa de água no grão (kg);

m_{gu} - massa do grão úmido ou matéria úmida (kg).

A massa de grão úmido, por sua vez, é expressa como:

$$m_{gu} = m_w + m_{gs} \quad (2.2)$$

Em que:

m_{gs} - massa do grão seco, massa da matéria seca (kg).

O teor de umidade em base seca é expresso por:

$$M_{bs} = \frac{m_w}{m_{gs}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

sendo:

M_{bs} - teor de umidade em base seca (%).

A expressão teor de umidade em base úmida ou teor de umidade é tradicionalmente utilizada no comércio e na indústria, ao passo que, em trabalhos no meio científico utiliza-se o teor de umidade de base seca.

As relações de conversão entre os teores de umidade de base seca e base úmida são expressas pelas equações seguintes:

$$M_{bu} = \frac{M_{bs}}{100 + M_{bs}} \quad (2.4)$$

$$M_{bs} = \frac{M_{bu}}{100 - M_{bu}} \quad (2.5)$$

2.3.2 Teor de umidade de equilíbrio

O teor de umidade de equilíbrio é um conceito importante na teoria de secagem e umedecimento de produtos, sendo determinante do teor de umidade estabelecido durante a secagem sob determinadas condições específicas. Dessa forma é essencial no estabelecimento de modelos matemáticos para simulação da secagem e de secadores.

O teor de umidade de equilíbrio (M_e) é o teor de umidade limite de um material (grão) exposto a um ambiente controlado (ar com temperatura e umidade relativa constantes) em um

período de tempo suficientemente longo. De forma alternativa, é o teor de umidade correspondente à pressão de vapor de equilíbrio entre o material e o ambiente [Parry, 1985]. O teor de umidade de equilíbrio é influenciado pela temperatura e umidade relativa do ar de secagem e pela espécie de grão.

A representação gráfica do teor de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa é denominada de curva isoterma. A Figura 2.18 [Puzzi, 1986] apresenta uma curva isoterma para a soja, mostrando diferentes níveis de umidade relativa à temperatura do ar de 25 °C e a relação com o teor de umidade de equilíbrio (ou equilíbrio higroscópico).

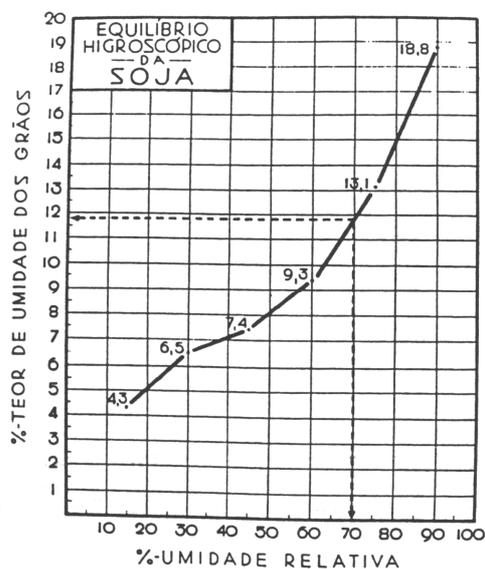


Figura 2.18 Equilíbrio higroscópico da soja para temperatura do ar de 25°C

Para diferentes temperaturas do ar são obtidas diferentes curvas de equilíbrio, relacionando o teor de umidade de equilíbrio, a umidade relativa do ar e o tipo de grão.

O processo para se atingir o teor de umidade de equilíbrio, à mesma umidade relativa, pode ser realizado através da secagem (desorção) ou umedecimento (adsorção) dos grãos. Existe uma diferença entre as isotermas de desorção e de adsorção, conhecida como fenômeno de histerese.

Parry, 1985, relata que a máxima diferença observada para o teor de umidade de equilíbrio de base seca entre as isotermas de desorção e adsorção, para grãos de cereais, parece ser da ordem de 1 a 2%. A histerese é um fenômeno complexo podendo, segundo Ferreira, 2004, ocorrer devido à retração e modificações nas estruturas celulares durante a secagem, diminuindo os espaços possíveis para a reabsorção de umidade.

Na simulação numérica do processo de secagem existe a necessidade da representação do teor de umidade de equilíbrio por meio de equações matemáticas. As equações para a estimativa do teor de umidade são divididas em três classes: teóricas, semi-empíricas e empíricas.

As equações teóricas têm por base as teorias cinéticas de adsorção de um gás por um sólido. As seguintes equações teóricas se destacam [Parry, 1985; Guimarães, 2005]: equação de Kelvin, baseada nos modelos de condensação capilar, de Langmuir, Brunauer-Emmett e Teller (BET), Guggenheim-Anderson e De Boer (GAB), baseados no modelo de adsorção, e de Harkins-Jura (potencial de intensidade de campo).

As equações teóricas não têm sido muito utilizadas, visto que não conseguem descrever com precisão o teor de umidade de equilíbrio nos intervalos dos valores de temperatura e umidade relativa do ar utilizados na secagem de grãos.

Muitas equações semi-empíricas e empíricas têm sido propostas para descrever as equações de teor de equilíbrio. Henderson [Parry, 1985] estabeleceu, a partir de dados experimentais, a seguinte equação semi-empírica baseada na teoria de adsorção de Gibbs:

$$1 - UR = \exp(-a M_e^b) \quad (2.6)$$

sendo,

$$UR = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (2.7)$$

onde:

UR - umidade relativa do ar;

P_v - pressão de vapor (Pa);

P_{vs} - pressão de vapor saturado (Pa);

M_e - teor de umidade de equilíbrio, base seca (adimensional);

a, b – constantes relativas ao produto. São obtidas experimentalmente a partir de dois pontos conhecidos de uma isoterma.

O próprio Henderson modificou a equação anterior, escrevendo o coeficiente a como uma função da temperatura:

$$1 - UR = \exp(-c T_{abs} M_e^b) \quad (2.8)$$

sendo:

c, b – constantes relativas ao produto.

Um teor de umidade de equilíbrio estático em relação ao tempo constitui a base das equações anteriormente citadas. O teor de umidade de equilíbrio dinâmico foi introduzido por Simmonds et al., 1953, para justificar a lei de secagem exponencial, assumido como:

$$\frac{dM}{dt} = -k (M - M_e) \quad (2.9)$$

O teor de umidade de equilíbrio dinâmico é a função que fornece uma linha reta quando $\ln(M - M_e)$ é plotado com relação ao tempo.

Smith, 1947 [Parry, 1985] usou a isoterma de Langmuir para modelar o termo de umidade e a equação de BET para modelar a umidade condensada, obtendo:

$$M_e = M_b - a \ln(1 - UR) \quad (2.10)$$

em que M_b é a umidade máxima do grão.

Nellist, 1974, obteve através da modificação da equação de Smith pela introdução de um termo dependente da temperatura, uma equação de teor de umidade de equilíbrio dinâmica da forma:

$$M_e = a - b \ln(1 - UR) - c \ln T \quad (2.11)$$

As principais equações apresentadas na literatura para a determinação da umidade de equilíbrio de produtos agrícolas estão sistematizadas na Tabela 2.1.

San Martin et al., 2001, analisaram o teor de umidade de equilíbrio para o arroz, empregando as equações modificadas de Chung – Pfof, Halsey, Henderson, Oswin e a equação de Guggenheim - Anderson - DeBoer (GAB), para ajustar os dados obtidos. Concluíram que o melhor ajuste foi o alcançado pela equação de Chung - Pfof, e um resultado similar pela equação de Henderson.

Wang et al., 2004, desenvolveram um software para simulação da secagem de grãos utilizando equações estabelecidas por vários pesquisadores. Um dos módulos deste software simula o teor de umidade de equilíbrio de 45 tipos diferentes de grãos sob condições diversas do ar de secagem, usando as equações modificadas de Henderson, Chung – Pfof, Halsey e Oswin.

Tabela 2.1 Equações para a umidade de equilíbrio

<i>Nome</i>	<i>Equação</i>
Hendersom modificada (Hendersom - Thompson)	$M_e = 0,01 \cdot \left[-\frac{\ln(1 - UR)}{a \cdot (T + c)} \right]^{1/b}$
Equação de Chung – Pfof modificada	$M_e = a - b \cdot \ln[-(T + c) \cdot \ln UR]$
Equação de Halsey modificada	$M_e = \left[-\frac{\exp(a + bT)}{\ln UR} \right]^{1/c}$
Equação de Oswin modificada	$M_e = (a + bT) \left(\frac{UR}{1 - UR} \right)^{1/c}$
Equação de Guggenheim – Anderson – DeBoer (GAB)	$M_e = \frac{a \cdot b \cdot c \cdot UR}{(1 - b \cdot UR)(1 - bUR + b \cdot c \cdot UR)}$
Equação de Smith	$M_e = a - (b \cdot T) - c \cdot \ln(1 - UR)$
Equação de Luikov	$M_e = a \cdot \left[1 + b \cdot T \cdot \ln \left(\frac{1}{UR} \right) \right]^{-1}$

Freire et al., 2005, usaram a equação de Halsey modificada, com parâmetros estimados por Barrozo et al., 1996, para a determinação do teor de umidade de equilíbrio de soja na condução de estudo da cinética de secagem.

Abalone et al., 2006, obtiveram experimentalmente o teor de umidade de equilíbrio de sementes de amaranto e utilizaram a equação de Henderson modificada para ajustar os dados experimentais. Citam que a equação de Henderson modificada é uma das mais conhecidas equações empíricas para a determinação do teor de umidade de equilíbrio para grãos.

Segundo Chirife e Iglesias, 1978, e Mazza e Jayas, 1991 [Corrêa et al., 2006], as equações de Chung - Pfof, Oswin e Smith, dentre as demais equações apresentadas na literatura para estimar o teor de umidade de equilíbrio entre os grãos e o ambiente que os envolve, são as mais apropriadas. Por outro lado, vários autores como Jayas et al., 1998 e Talib et al., 1995 [Corrêa, 2006], indicam a equação de Henderson modificada como a mais

adequada para a determinação do teor de umidade de equilíbrio de produtos agrícolas.

Corrêa et al., 2006, obtiveram a melhor representação dos dados experimentais de milho com a equação de Oswin, e de alpiste e painço com a equação de Chung - Pfof, quando analisadas as equações de Oswin, Chung - Pfof, Smith e Henderson modificada.

As equações de Halsey, Luikov e Henderson modificada foram utilizadas por Luz et al., 2006, para estimar a umidade de equilíbrio do farelo de soja.

Uma equação empírica foi proposta por Roa, da Universidade Estadual de Campinas, e segundo Guimarães, 2005, apresenta valores precisos e é de aplicação mais geral. Esta equação é representada por:

$$M_e = \left(\sum_{i=1}^3 p_i \cdot UR^i \right) \exp \left[\left(\sum_{i=0}^4 q_i \cdot UR^i \right) (T + q_5) \right] \quad (2.12)$$

em que:

T - temperatura do ar de secagem (°C);

p_i e q_i - constantes obtidas por estimação não linear.

Os coeficientes da equação (2.12) encontram-se disponíveis para arroz em casca, soja, milho e trigo.

Dalpasquale, 1981, apresentou a seguinte equação para a determinação do teor de umidade de equilíbrio da soja, em função da umidade relativa e da temperatura do ar de secagem:

$$M_e = \frac{3,962 \cdot UR^{0.4919}}{100 \ln(T)} \quad (2.13)$$

2.3.3 Modelos de camada fina

O comportamento dos produtos biológicos durante a secagem em lotes de camada espessa, ou camada fina (partículas individuais), apresenta-se de maneira distinta. Assim, o processo de secagem é dividido em dois tipos de modelos diferentes: modelos de camada fina e modelos de camada espessa, segundo Brooker et al., 1974, Parti, 1993 e Parry, 1985.

Os modelos de camada fina são aqueles que consideram a variável temporal e desconsideram a variável espacial. Nesse modelo as temperaturas e os teores de umidade do ar e do grão em todo o volume são iguais, em cada instante de tempo.

Os modelos de camada espessa (ou leito profundo) consideram simultaneamente as variáveis temporal e espacial. Pode ser de uma, duas ou três dimensões, sendo que a temperatura e o teor de umidade, para o grão e para o ar, variam de acordo com a posição espacial.

A norma ASAE S448, 1998, define camada fina como uma camada de material totalmente exposta a uma corrente de ar durante a secagem. A profundidade, ou espessura da camada deve ser homogênea e não ultrapassar três camadas de grãos. Jayas et al., 1991, appud Chen e Wu, 2001, definiram camada fina como uma camada cuja espessura possui o requisito de que a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem permanecem constantes quando da passagem através da camada de grãos.

As equações dos modelos de camada fina são as mais utilizadas para a obtenção da cinética de secagem, estabelecendo equações do teor de umidade em função do tempo para o processo de secagem. O procedimento utilizado por muitos pesquisadores [Courtois et al., 1992; Tang et al., 2004; Srivastava e John, 2002; Madhiyanon et al., 2001; Sitompul et al., 2001; Liu e Bakker – Arkema, 2001; Kashaninejad et al., 2007] é o de representar a camada espessa como uma série de camadas finas sucessivas, conforme Figura 2.19.

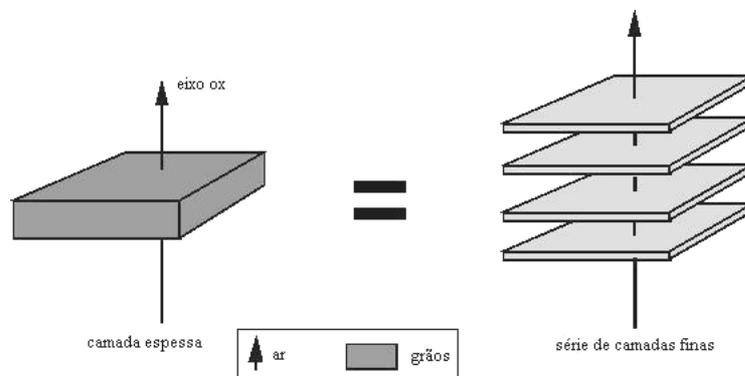


Figura 2.19 Decomposição da camada espessa em um conjunto de camadas finas (Courtois et al, 1992).

Os modelos de secagem em camada fina podem ser divididos em três grupos principais, com alguma superposição entre eles: modelos de parâmetros distribuídos, modelos de parâmetros concentrados e equações de secagem em camada fina [Parti, 1993].

Os modelos de parâmetros distribuídos e concentrados consideram a transferência simultânea de calor e massa durante o processo de secagem. Os modelos de parâmetros

distribuídos consideram as resistências internas e externas à transferência de calor e massa, enquanto os modelos de parâmetros concentrados ignoram as resistências internas, considerando somente as resistências externas. A simplificação dos modelos de parâmetros distribuídos leva à obtenção de modelos de parâmetros concentrados.

Parry, 1985, considera os modelos ou equações de secagem em camada fina classificados segundo três categorias: teóricos, semi-empíricos e empíricos. Os modelos teóricos consideram os diferentes mecanismos de transporte de umidade e consistem da solução das equações da transferência de massa e de calor dentro do grão.

Os modelos semi-empíricos são os que se baseiam na Lei de resfriamento de Newton, aplicada para a transferência de massa e secagem isotérmica. Os modelos empíricos fornecem relações diretas entre o teor de umidade e o tempo de secagem, obtidas através do ajuste de curvas resultantes de dados provenientes de experimentos.

Os modelos citados são descritos a seguir.

a) Modelos teóricos

A secagem de produtos agrícolas ocorre geralmente no período de taxa de secagem decrescente. O período de taxa de secagem constante ocorre somente quando o teor de umidade é suficientemente alto para manter uma camada superficial de água livre no produto (Parry, 1985).

Durante o período de taxa de secagem decrescente a taxa de secagem é dependente do produto a ser secado e do transporte de umidade do interior para a superfície do grão, ou seja, do transporte por difusão (Parry, 1985; Guimarães, 2005).

Um modelo teórico mais completo de secagem envolvendo um sistema de equações de transferência de massa e calor em forma generalizada foi apresentado por Luikov e Mikhailov, 1961. Luikov, 1966, apresentou o seguinte modelo para um corpo capilar-poroso considerando dois fluxos envolvidos em um sistema de quatro fases (ar, vapor, líquida e sólida):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M}{\partial t} &= \nabla^2 K_{11} M + \nabla^2 K_{12} T + \nabla^2 K_{13} P \\
\frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla^2 K_{21} M + \nabla^2 K_{22} T + \nabla^2 K_{23} P \\
\frac{\partial P}{\partial t} &= \nabla^2 K_{31} M + \nabla^2 K_{32} T + \nabla^2 K_{33} P
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Na equação (2.14), M, T e P representam o teor de umidade, a temperatura e a pressão, respectivamente. Na matriz 3x3, os coeficientes $K = K_{ij}$ são dependentes das propriedades físicas dos produtos, tais como a difusividade e a condutividade térmica. Os coeficientes K_{ii} , para $i = j$, são os coeficientes fenomenológicos, e os coeficientes K_{ij} , para $i \neq j$, são os coeficientes de acoplamento entre os vários mecanismos de transporte.

Os coeficientes da matriz K não estão disponíveis para a grande maioria dos produtos agrícolas, e os experimentos para a sua determinação são complexos e apresentam dificuldades de levantamento dos coeficientes. Assim, simplificações na equação mais geral foram realizadas para permitir a descrição da secagem, sem prejuízo da precisão dos resultados. As principais simplificações são as descon siderações dos efeitos do gradiente de pressão total, dos efeitos do gradiente de temperatura no interior dos grãos e da evaporação interna.

O modelo de Luikov torna-se um sistema de duas equações diferenciais parciais não acopladas, e para coeficientes de difusão constantes são apresentadas na forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_m \nabla^2 M \tag{2.15}$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = D_t \nabla^2 T_g \tag{2.16}$$

As grandezas M, T_g , D_m [$m^2 s^{-1}$; $m^2 h^{-1}$] e D_t [$m^2 s^{-1}$; $m^2 h^{-1}$] representam o teor de umidade, a temperatura do grão, o coeficiente de difusão de massa e o coeficiente de difusão de calor, respectivamente.

Caso o coeficiente de difusão de massa não seja assumido constante, mas dependente da posição no grão, da temperatura, ou do teor de umidade, a equação fica:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D_m \nabla M) \quad (2.17)$$

As equações anteriores, baseadas nas hipóteses simplificadoras, são denominadas de equações de difusão ou modelo de Liukov simplificado, e são aceitas para se determinar a secagem de grãos.

A solução das equações de Liukov necessita da definição de uma forma geométrica para o grão e de um sistema apropriado de coordenadas. A solução pode ser analítica ou por meio de métodos numéricos, e é utilizada para se obter estimativas da razão de umidade, MR, definida por:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2.18)$$

em que:

- MR: razão de umidade, adimensional;
- M: teor de umidade instantâneo, (% b.s);
- M_0 : teor de umidade inicial, (% b.s);
- M_e : teor de umidade de equilíbrio, (% b.s).

Para o coeficiente de difusão de massa constante do grão e geometria esférica, a equação de Liukov pode ser escrita como:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_m \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (2.19)$$

com condições de fronteira e iniciais:

$$\begin{aligned} M(r,0) &= M_0, & 0 < r < R \\ M(R,t) &= M_e, & t \geq 0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

sendo R o raio médio dos grãos.

A solução analítica da equação de Liukov em forma de série para a razão de umidade [Parry, 1985] é apresentada na seqüência, conforme Crank, 1957, para coeficiente de difusão constante. Para grãos de geometria esférica, com simetria radial e um sistema de coordenadas esféricas tem-se:

$$MR = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{n^2 \pi^2} \exp\left(\frac{-D_m n^2 \pi^2 t}{a^2}\right) \quad (2.21)$$

As condições de fronteira e inicial prescritas são similares àquelas da equação de Luikov.

Katekawa e Silva, 2006, apresentam aplicações de modelos de secagem para produtos biológicos e as respectivas geometrias aplicadas na solução, conforme Tabela 2.2.

Parti, 1993, apresentou o modelo de parâmetros distribuídos, cujas equações expressam a conservação da massa (umidade) e da energia (temperatura). Essas equações são da seguinte forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_m r^2 \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (2.22)$$

Tabela 2.2 Geometria aplicável para produtos [Katehawa e Silva, 2006]

Produto Biológico	Forma Geométrica	Referência citada
Arroz	Placa 3D	Jia et al. (2002)
Arroz em casca	Cilindro infinito	Frias et al. (2002)
Ameixa	Esfera	Di Matteo et al. (2003)
Milho	2D irregular	Irudayaraj, J. e Haghghi, K. (1993) Irudayaraj et al. (1993)
Soja	Esfera	Irudayaraj, J. e Haghghi, K. (1993) Irudayaraj et al. (1993) Misra e Young (1980) Haghghi, K. (1990)

e

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_t r^2 \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) \quad (2.23)$$

Com condições iniciais:

$$t = 0, 0 \leq r \leq R, T = T_0 \quad (2.24)$$

$$t = 0, 0 \leq r \leq R, M = M_0 \quad (2.25)$$

E condições de contorno:

$$r = 0 \quad t > 0 \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (2.26)$$

$$r = 0 \quad t > 0 \quad \frac{\partial M}{\partial r} = 0 \quad (2.27)$$

$$r = R \quad t > 0 \quad k \frac{\partial T}{\partial r} = h (T - T_s) - k_Y (Y_s - Y) h_{fg} \quad (2.28)$$

$$r = R \quad t > 0 \quad -D_m \rho_s \frac{\partial M}{\partial r} = k_Y (Y_s - Y) \quad (2.29)$$

em que:

r – coordenada radial dentro do grão (m);

k – condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

h – coeficiente de transferência de calor convectivo ($\text{W m}^{-2} \text{°C}^{-1}$);

T – temperatura do ar de secagem (°C);

k_Y – coeficiente convectivo de transferência de massa ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

Y – conteúdo de umidade do ar ($\text{kg}_w \text{ kg}_a^{-1}$);

s – sub-índice que representa o valor da propriedade na superfície.

As hipóteses aplicadas na obtenção do modelo (equações 2.22 a 2.29) são:

1. A partícula é homogênea, isotrópica e esférica;
2. A evaporação ocorre somente na superfície da partícula;
3. A temperatura e a distribuição do teor de umidade são inicialmente uniformes, e são simétricas durante o processo de secagem;
4. A transferência de calor dentro da partícula é por condução e fora da partícula é por convecção;
5. O volume de contração da partícula durante a secagem é negligenciável;
6. As propriedades físicas do material são constantes durante a secagem.

O modelo de parâmetros distribuídos obtido considera a transferência simultânea de calor e massa, e também as resistências interna e externa à transferência de calor e massa. Assume-se que levando em consideração a variação da temperatura é possível aperfeiçoar a curva de secagem predita no início do processo, e recolocando o teor de umidade de equilíbrio na superfície por uma condição de contorno convectiva geralmente são alcançados melhores ajustes da curva de secagem.

O modelo distribuído pode ser simplificado segundo algumas possibilidades, podendo ser assumidos: um modelo de parâmetro concentrado; temperatura de equilíbrio; teor de

umidade de equilíbrio na superfície; e/ou diferentes condições de contorno convectivas sobre a transferência de umidade.

Uma condição de contorno convectiva diferente na superfície da partícula foi aplicada por Newman, substituindo a equação (2.29) pela (2.30):

$$-D_m \frac{\partial M}{\partial r} = k_m (M_s - M_e) \quad (2.30)$$

e assumindo a temperatura de equilíbrio resolvida pelo modelo matemático.

Na equação (2.30) k_m é o coeficiente de transferência de massa ($m s^{-1}$). O modelo de Newman é um modelo de parâmetro distribuído com a hipótese da temperatura de equilíbrio.

A generalização dos resultados pode ser obtida através da introdução de parâmetros adimensionais, os números de Biot da transferência de calor (Bi_h) e da transferência de massa (Bi_m), definidos por:

$$Bi_h = \frac{h R}{k} \quad (2.31)$$

$$Bi_m = \frac{k_Y R}{D_m \rho_s} = \frac{k_m R}{D_m} \quad (2.32)$$

Os números de Biot da transferência de calor e massa foram utilizados para estabelecer faixas de utilização, onde os modelos e hipóteses podem ser usados sem erro significativo para a predição do tempo e das curvas de secagem. Para número de Biot da transferência de massa maior do que 1000 e número de Biot da transferência de calor menor do que 1, a temperatura de equilíbrio e o teor de umidade de equilíbrio na superfície podem ser assumidos. Se Bi_h é menor do que 0,1 a diferença de temperatura dentro do grão pode ser ignorada, e o modelo de parâmetro concentrado pode ser utilizado [Parti, 1993].

Se o vapor não entra no corpo vindo de fonte externa e a geração de vapor no corpo ocorre devido à evaporação do líquido dentro do corpo, a variação do teor de umidade sob todas as condições pode ser calculada pelo uso de um fluxo líquido através da superfície de controle levando em consideração a lei de transferência de um líquido (em lugar do vapor).

Considerando um grão de soja como uma esfera e admitindo que o teor de umidade em cada ponto do grão em um determinado tempo t é uma função do raio vetor r deste ponto, o problema de secagem em camada fina para o grão pode ser representado pela equação (2.22), Parti, 1993:

$$\frac{\partial M(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D_m \frac{\partial M(r, t)}{\partial r} \right) \quad (2.22)$$

em que D_m é o coeficiente de difusão de massa no interior do grão.

Na superfície do grão ($r = R$), a absorção de umidade é considerada proporcional à diferença entre a umidade do ar sobre essa superfície e a umidade do ar de secagem:

$$D_m \frac{\partial M(R, t)}{\partial r} + H_m (Y_s - Y_a) = 0 \quad (2.33)$$

em que H_m o coeficiente de transferência de massa convectivo ($m s^{-1}$).

Assumindo que a absorção de umidade é proporcional à diferença entre o teor de umidade na superfície do grão e o teor de umidade de equilíbrio, a equação (2.33) é expressa por:

$$D_m \frac{\partial M(R, t)}{\partial r} + H_m (M(r, t) - M_e) = 0 \quad (2.34)$$

A condição inicial é apresentada como:

$$M(r, 0) = \psi(r) \quad (2.35)$$

em que a função $\psi(r)$ é uma função que determina uma distribuição inicial de água dentro do grão esférico, e $M=M(r, t)$ é o teor de umidade local do grão.

Utilizando a semelhança com a razão de umidade do grão (equação 2.18), define-se:

$$\varphi(r) = \frac{\psi(r) - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2.36)$$

e,

$$h_m = \frac{H_m}{D_m} \quad (2.37)$$

A equação do teor de umidade de equilíbrio utilizada foi a equação de Dalpasquale (1981), conforme equação (2.13).

As equações representativas do problema tornam-se:

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D_m \frac{\partial MR}{\partial r} \right) \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial MR}{\partial r} + h_m MR = 0 \quad (2.39)$$

$$MR(r,0) = \varphi(r) \quad (2.40)$$

Utilizando os critérios de Fourier e Biot para a transferência de massa,

$$Fo_m = \frac{D_m t}{R^2} \quad (2.41)$$

$$Bi_m = \frac{k_Y R}{D_m \rho_s} = \frac{H_m \cdot R}{D_m} = h_m \cdot R \quad (2.42)$$

sendo:

Fo_m - número de Fourier da transferência de massa (adimensional). É a razão entre a taxa de difusão e a taxa de seu acúmulo, representando o tempo adimensional;

Bi_m - número de Biot da transferência de massa (adimensional). Representa a razão entre a resistência interna à transferência de massa e a resistência na camada limite (camada superficial).

Assumindo uma distribuição uniforme da concentração de água inicial dentro do grão $\psi(r) = 1$, a solução pelo método da separação de variáveis pode ser apresentada na forma:

$$MR(r,t) = \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(Bi_m - 1)^2 + \mu_n^2}{(Bi_m - 1) Bi_m + \mu_n^2} \cdot \frac{\text{sen } \mu_n - \mu_n \cos \mu_n}{\mu_n^2} \cdot \text{sen } \mu_n r e^{-\mu_n^2 Fo_m} \quad (2.43)$$

em que μ_n é a enésima raiz da equação.

A Figura 2.20 mostra a contribuição de vários componentes harmônicos na solução do sistema de equações (2.38 a 2.40) para $Bi_m = 10$, os quais constituem a soma da equação (2.43) para os valores médios do teor de umidade do grão $\overline{MR}(t)$ no curso da secagem:

$$\overline{MR}(t) = \frac{3}{R^3} \int_0^R MR(r,t) r^2 dr \quad (2.44)$$

Observa-se que o primeiro componente MR_1 ($n=1$, primeiro harmônico) é mais significativo do que a soma MR de todos os demais componentes. Com o aumento do número de Fourier da transferência de massa, Fo_m (relacionado ao tempo) a influência desse componente harmônico torna-se predominante.

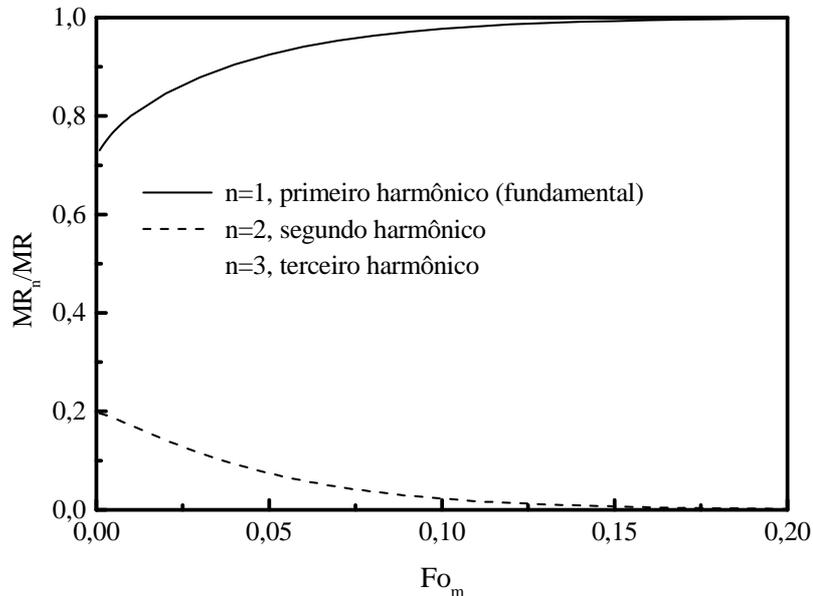


Figura 2.20 Dinâmica da distribuição do teor de umidade em componentes harmônicos.

Então, desde que a certo momento de tempo tem-se o chamado regime regular, onde para encontrar o coeficiente de difusão dentro do grão com a exatidão prescrita, é possível considerar somente a primeira harmônica. A Figura 2.21 mostra a dependência do início do regime regular para uma esfera com variação de teor de umidade MR como função do critério de Fo_m e Bi_m para várias tolerâncias.

Khatchatourian e Oliveira, 2006, citam que para valores numéricos do número de Biot da transferência de calor grandes ($Bi_h > 100$) a taxa de aquecimento do grão é determinada pela transferência de calor dentro do grão (denominado de problema interno, onde se considera as resistências internas). Para pequenos valores do número de Biot ($Bi_h < 0,2$) existe uma distribuição uniforme de temperatura do grão, podendo-se considerar o problema reduzido à temperatura da superfície. Nesse caso, a taxa de aquecimento do grão é determinada pela taxa de transferência de calor do ar para a superfície do grão (denominado de problema externo, considerando-se as resistências externas). Se o número de Biot estiver compreendido entre $0,2 < Bi < 100$, deve-se considerar ambos os processos, interno e externo.

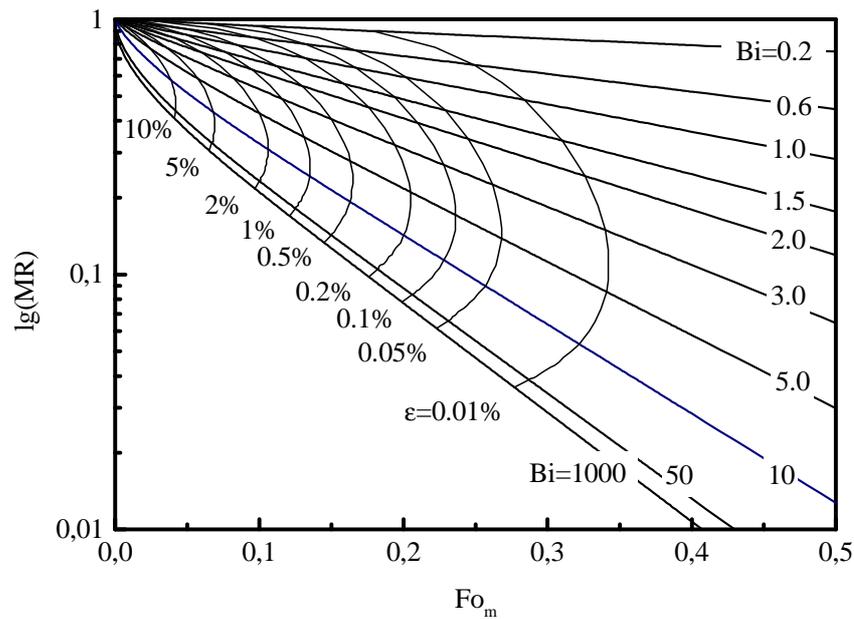


Figura 2.21 Início do regime regular para a esfera (grão de soja) com variação da razão de umidade MR como função de Fo_m e Bi_m e da precisão dos resultados.

b) Modelos empíricos

Uma equação empírica para a secagem de milho, na faixa de 60 - 150°C, foi desenvolvida por Thompson et. al., 1968. A equação de Thompson apresenta a seguinte forma:

$$t = A \ln(MR) + B [\ln(MR)]^2 \quad (2.45)$$

onde:

$$A = 1,862 + 0,00488T_a ;$$

$$B = 427,4 \exp(-0,033T_a) .$$

Roa e Macedo, 1976, appud Guimarães, 2005, apresentaram uma equação empírica fundamentada na diferença da pressão parcial de vapor entre a superfície do grão e o ar de secagem:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -m q (M - M_e) (P_{vs} - P_v)^n t^{q-1} \quad (2.46)$$

onde:

- m, q e n são parâmetros adimensionais obtidos dos dados experimentais;

- t é o tempo (h).

c) Equações semi-empíricas

A equação (2.21), representando a solução analítica para a equação da difusão, se simplificada com a consideração de utilizar-se apenas o primeiro termo da série, pode representar a razão de secagem. A equação resultante é:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D_m \pi^2 t}{a^2}\right) \quad (2.47)$$

Se considerarmos:

$$\frac{-D_m \pi^2}{a^2} = -k \quad (2.48)$$

A equação (2.47) fica:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp(-kt) \quad (2.49)$$

Uma comparação das equações (2.21) e (2.47) ou (2.49) mostra que elas fornecem valores significativamente diferentes apenas quando os valores de t são pequenos.

Lewis, 1921, sugeriu uma equação similar à equação (2.47/2.49) e análoga à lei de Newton do resfriamento, com o decréscimo da taxa de secagem proporcional à diferença entre o teor de umidade instantâneo e o teor de umidade de equilíbrio do grão:

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (2.50)$$

sendo k é uma constante para descrever a taxa de secagem.

A integração da equação (2.50) para um determinado intervalo de tempo leva a:

$$MR = \exp(-k t) \quad (2.51)$$

Como resultado dessa expressão, a equação (2.50) é referida como lei exponencial (ou logarítmica) de secagem. Essa equação tem sido usada com freqüência para a modelagem da taxa de secagem, na secagem de grãos [Parry, 1985]. Contudo, muitas vezes, ela não expressa com a precisão necessária a curva de secagem, fornecendo taxa de secagem inicial muito

baixa e quando se aproxima do teor de umidade de equilíbrio taxa de secagem muito alta [Guimarães, 2005].

O modelo de Henderson e Pabis, 1969 [Abalone et al., 2006; Kashaninejad et al., 2007] é uma variação no modelo de difusão, através da adição de uma constante:

$$MR = a \exp(-kt) \quad (2.52)$$

A constante de secagem está relacionada à difusividade efetiva quando o processo de secagem se dá no período de taxa decrescente e a difusão líquida controla o processo.

O modelo de Lewis da taxa de secagem foi modificado por Chen e Johnson [Parry, 1985], através do acréscimo de um expoente a no termo dos teores de umidade e da consideração de três períodos diferentes de secagem para torná-lo mais eficiente:

$$\frac{dM}{dt} = -k (M - M_e)^a \quad (2.53)$$

sendo k e a constantes empíricas dependentes de cada período de secagem.

Page, 1949 [Abalone et al., 2006; Cihan et al., 2007; Kashaninejad et al., 2007] sugeriu uma modificação no modelo exponencial de Lewis com a finalidade de aperfeiçoar o mesmo e corrigir suas deficiências. O modelo de Page é expresso por:

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (2.54)$$

em que k é uma constante de secagem modificada e n é uma constante.

Nellist e O'Callaghan, 1971, através de dados experimentais de secagem de centeio, determinaram o ajuste exponencial de dois termos da forma:

$$M = M_e + A \exp(-k_1t) + B \exp(-k_2t) \quad (2.55)$$

Na expressão apresentada, o primeiro termo exponencial representa o efeito do primeiro termo da solução em série para a esfera, e o segundo termo exponencial representa os termos de alta ordem da solução em série.

Henderson, 1974, também utilizou um ajuste exponencial de dois termos da seguinte forma:

$$MR = a \exp(-k_1t) + (1 - a) \exp(-k_2t) \quad (2.56)$$

onde M_e , a , b , k_1 e k_2 são determinados empiricamente através dos dados experimentais.

Glenn, 1978 [Kashaninejad et al., 2007] desenvolveu uma aproximação semi-empírica para a modelagem da camada fina descrevendo o grão como uma massa discreta, a partir da solução geral para a equação da difusão considerando parte da série infinita de expoentes negativos.

White et al., 1981, utilizaram a equação de Page modificada para descrever os dados experimentais da secagem de soja em camada fina. O objetivo foi prever o teor de umidade como função do teor de umidade inicial da soja e das várias propriedades físicas e térmicas do ar de secagem. O expoente n não apresentou qualquer dependência do teor de umidade inicial, mas variou com a temperatura e umidade relativa do ar de secagem, conforme a equação a seguir:

$$n = 0,33 + 0,00238 UR + 0,00276 T_a \quad (2.57)$$

O parâmetro k foi encontrado para ser uma função do teor de umidade inicial e da temperatura e umidade relativa do ar de secagem, com alguma interação entre o teor de umidade e a temperatura do ar de secagem. A expressão para k :

$$k = -0,207 + 3,57 \cdot 10^{-3} T_a + 2,16 \cdot 10^{-3} M_0 + 2,613 \cdot 10^{-3} UR + 3,202 \cdot 10^{-6} M_0 T_a^2 \quad (2.58)$$

Em Soares, 1986, realizou-se uma investigação experimental da secagem de soja em camada fina variando os teores de umidade inicial do grão e a temperatura do ar de secagem. O autor obteve curvas de secagem e indicou que os melhores resultados foram obtidos com os modelos de Page e de Sharaf-Eldeen.

Para o modelo de Page os parâmetros k e n foram ajustados como:

$$k = 0,1149 \cdot 10^{-3} M_0^{0,5423} \exp(0,0208 T_a) \quad (2.59)$$

$$n = 0,5459$$

Soares também pesquisou o coeficiente de difusão da massa de água no grão. Fez a proposta do coeficiente de difusão como função da umidade inicial do grão e da temperatura do grão, obtendo a equação empírica:

$$D = 0,9556 \cdot 10^{-9} M_0 \exp(0,5868 \cdot 10^{-4} T_g) \quad (2.60)$$

A norma ASAE S448, 1998, para a secagem em camada fina indica o modelo de Page para a equação de secagem, sugerindo que a apresentação de formas adicionais das equações de secagem é opcional. Apresenta também a consideração de que a equação de Lewis de

primeira ordem parece ser uma representação inadequada da secagem em muitas culturas, especialmente em aplicações de secagem a altas temperaturas.

Estudos recentes indicam a utilização dos diversos modelos de camada fina para a ajustagem do modelo de camada fina do processo de secagem. Chen e Wu, 2001, conduzindo experimentos para o arroz, analisaram quatro modelos de secagem em camada fina: Lewis ou exponencial, Page, Wang e Shing e modelos de dois termos.

Souza et al, 2002, desenvolveram um programa computacional para a simulação da secagem de milho utilizando a equação de Thompson.

Wang et al., 2004, no desenvolvimento do software SAPGD para simulação da secagem de grãos em camada fina, citam a utilização de várias equações adotadas. Os modelos de camada fina utilizados são: Page, Lewis de um e dois termos e modelos na forma exponencial de um termo, de dois termos e de três termos.

Kashaninejad et al., 2005, estudaram seis modelos de secagem: exponencial ou de Lewis, Henderson e Pabis, Page, Page modificado, exponencial de dois termos e modelo de Thompson. Abalone et al., 2006, através da construção de um secador experimental, analisaram a secagem de sementes de amaranto em camada fina. Utilizaram os modelos de Lewis, Henderson e Pabis, Page e Thomson para ajustar os dados experimentais de secagem.

Cihan et al., 2006, analisaram muitos modelos empíricos e semi-empíricos para a secagem de arroz: Lewis, Page, Henderson e Pabis, Logarítmico, exponencial de dois termos, Midilli, Wang e Singh.

Gely e Giner, 2007, para a secagem de soja, consideraram a solução analítica do modelo de difusão para geometrias esféricas. Determinaram que esta solução possibilita um excelente modelo de secagem em camada fina.

Rafiee et al, 2008, e Janjai et al., 2008, utilizaram o modelo bidimensional da equação da difusão, com coeficiente de difusão de massa constante, para a simulação da secagem em camada fina de soja e manga, respectivamente.

2.3.4 Modelos de camada espessa

Os modelos de camada fina, isoladamente, não descrevem de forma adequada os processos de transferência em camada espessa. Os modelos de camada fina podem prover dados úteis para a predição da taxa de secagem, a qual pode ser utilizada em simulações de

camada espessa. O transporte de umidade e de calor devido à difusão em secadores de grãos convectivos é, em geral, considerado desprezível se comparado ao transporte devido à convecção.

Parry, 1985, classifica os modelos de camada espessa em três tipos: modelos logarítmicos, modelos de balanço de calor e massa e modelos de equações diferenciais parciais. Já Tirawanichakul et al., 2003, os divide, de forma semelhante, também em três modelos, a saber: modelo de não equilíbrio (citando Brooker et al., 1974), modelo de equilíbrio, ou próximo ao equilíbrio (citando Soponronnarit, 1988) e modelo logarítmico (citando Hukil, 1947).

O modelo logarítmico foi apresentado por Hukil [Parry, 1985], através de uma análise simplificada da secagem em camada espessa. Ele assumiu que a taxa de variação espacial da temperatura do ar com relação a uma profundidade x do leito é proporcional à taxa de variação do teor de umidade do produto com relação ao tempo t . A equação do modelo logarítmico de Hukil é:

$$G_a c_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial x} = \rho_g h_{fg} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2.61)$$

onde: G_a é vazão em massa de ar por unidade de área; c_{pa} , o calor específico do ar; ρ_g , a massa específica do grão.

A condição inicial e de contorno são:

$$M(x, t) = M_0 \frac{T - T_e}{T_0 - T_e} = \exp(-c x), \text{ para } t = 0;$$

$$T(0, t) = T_0 \text{ e } MR = \exp(-k t) \text{ para } x = 0.$$

onde T_a é a temperatura do ar, c e k são constantes empíricas da expressão da taxa de secagem empírica (do tipo Lewis), e T_e é um valor limite da temperatura do ar (para um leito de profundidade infinita).

A equação (2.61) assume que a perda de energia térmica pelo ar (calor sensível) é devida somente ao calor latente de vaporização da água presente no grão, negligenciando o seu aquecimento sensível.

A solução da equação de Hukil, com as condições descritas, fornece uma expressão para a razão de umidade da forma:

$$MR = \frac{2^X}{2^X + 2^\tau - 1} \quad (2.62)$$

onde X e τ são variáveis adimensionais de espaço e tempo, respectivamente. Hukil encontrou que o seu modelo subestimava o tempo requerido para a secagem do grão, sugerindo que isso ocorria devido às inexatidões na condição de contorno para a taxa de secagem.

Baughman et al., 1971, sugeriram uma equação semelhante à apresentada por Hukil:

$$G_a c_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial X} = -Q h_{fg} \frac{\partial M}{\partial X} \quad (2.63)$$

onde o termo Q representa a taxa de avanço da zona de secagem.

A solução de (2.63) foi apresentada por Barre et al., 1971:

$$MR = \frac{1}{X} \ln \frac{e^X + e^\tau - 1}{e^\tau} \quad (2.64)$$

Em Wang et al., 2004, foi utilizado o modelo logarítmico para simular a secagem em leito fixo. As equações para a taxa de umidade e temperatura do grão são apresentadas por:

$$MR(X, \tau) = \frac{e^X}{e^X + e^\tau - 1} = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2.65)$$

$$T_g(X, \tau) = \frac{e^\tau}{e^X + e^\tau - 1} = \frac{T_g - T_e}{T_0 - T_e} \quad (2.66)$$

A utilização dos modelos logarítmicos na simulação da secagem de grãos, segundo Parry, 1985, é devido principalmente à sua simplicidade de aplicação e economia computacional.

Os modelos de balanço de calor e massa são modelos simplificados de camada espessa. Esses modelos assumem que existem condições de equilíbrio entre o ar de secagem e o grão para cada camada em um dado intervalo de tempo. Boyce, 1966, considerou o aquecimento sensível durante a secagem do grão e apresentou um modelo denominado camada por camada para determinar a temperatura e o teor de umidade do ar e do grão, aplicando-o à secagem de cevada. Encontrou, todavia, que o tempo de secagem predito pelo modelo era muito longo se comparado com o esperado. Ele próprio promoveu modificações em seu modelo, incluindo uma expressão empírica para o coeficiente de transferência de calor em termos de temperatura

do ar, melhorando os resultados.

Thompson et al., 1968, apresentaram um modelo similar ao de Boyce, incorporando um procedimento para ajustar os valores da temperatura e da umidade do ar, de forma a assegurar que a umidade relativa não exceda 100%.

O modelo apresentado por Thompson et al., 1968, é um modelo semi-empírico, utilizado originalmente para a simulação da secagem de milho, mas que pode também ser aplicado para a secagem de outros grãos. Utiliza o balanço de energia e massa e uma equação empírica de secagem em camada fina. No desenvolvimento do modelo foram utilizadas as seguintes considerações:

a) A secagem em camada fina do grão é descrita por uma equação empírica. Para o milho esta equação é a (2.45).

b) A temperatura do grão é igual à temperatura do ar que o envolve.

c) O teor de umidade de equilíbrio do milho é descrito em função da temperatura e umidade relativa do ar:

$$M_e = 1,206 \left(\frac{-\ln(1 - 0,01 UR)}{T_a + 45,6} \right) \quad (2.67)$$

d) A entalpia latente de vaporização da água no grão de milho depende da temperatura e do teor de umidade, sendo expressa por:

$$H_v = (606 - 0,57 T_a) [1 + 4,35 \exp(-28,25 M)] \quad (2.68)$$

e) O calor específico do milho é fornecido por:

$$c_p = 0,35 + 0,00851 M_{bu} \quad (2.69)$$

Em Souza et al., 2002, foi desenvolvido um programa computacional para a simulação do processo de secagem de milho utilizando como base o modelo de Thompson. Utilizou-se da divisão do processo de secagem em vários sub-processos. O leito fixo foi considerado como sendo formado por várias camadas com espessuras reduzidas sobrepostas umas às outras (sobreposição de camadas finas), e as condições do ar e do grão em cada camada foram calculadas através de pequenos incrementos de tempo.

Na passagem do ar pela camada fina, em um determinado intervalo de tempo, uma quantidade de água do grão é evaporada e absorvida pelo ar. Consequentemente a temperatura do ar diminui, em função da transferência de calor sensível do ar para o aquecimento do grão, e do calor latente necessário à evaporação parcial da água do grão. As temperaturas finais do

ar e do grão são determinadas através do balanço de energia e a água perdida pelo grão para o ar é calculada através de uma equação empírica de camada fina.

O desempenho do modelo de simulação desenvolvido em relação à precisão e exatidão foi satisfatório, com erro relativo médio de 10,88% e segundo Souza et al., 2002, inferior ao erro satisfatório considerado por Mata e Dantas, 1998, cujo valor é de 20%.

A aplicação dos modelos de balanço de calor e massa tem sido realizada em diferentes tipos de secadores, e em vários casos os resultados tem sido satisfatórios para uma variedade de grãos. A precisão alcançada é, no entanto, dependente das hipóteses feitas na derivação do modelo [Parry, 1985].

Os modelos de equações diferenciais parciais são mais precisos que os modelos logarítmicos e de balanço de calor e massa. Com o atual aumento da capacidade e disponibilidade dos computadores modernos, a implementação dos modelos de secagem baseados em equações diferenciais parciais tem sido viabilizada, tanto para a pesquisa quanto para o projeto. Esses modelos são formulados com base nas leis de transferência de calor e massa, com menos restrições simplificadoras que os modelos anteriores.

Em Law e Parry, 1983 [Parry, 1985] apresentou-se um modelo matemático geral para descrever a transferência de calor e massa na secagem de sólidos particulados. Baseando-se na teoria das misturas, tratando o ar e o grão úmidos como uma mistura binária foram deduzidos modelos para a secagem de grãos em secadores de leito fixo, de fluxo cruzado, de fluxo concorrente e de fluxo contracorrente. Assumindo hipóteses de fluxo de massa constante e unidimensional, massas específicas constantes para o ar e o grão e transferências de calor por condução e radiação negligenciáveis, a secagem convectiva do grão pode ser representada por um sistema geral de equações diferenciais parciais na forma vetorial:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + A \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} + B \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} = \vec{b} \quad (2.70)$$

Os fluxos de ar e de grãos são assumidos perpendiculares entre si (o fluxo de ar é assumido na direção x e o fluxo de grãos na direção y). O vetor \vec{u} depende das temperaturas e umidades do ar e do grão, sendo dado por:

$$\vec{u} = [Y, M, T_a, T_g]^T \quad (2.71)$$

As matrizes A e B são dadas por,

$$A = \begin{bmatrix} v_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_g \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

E o vetor \bar{b} :

$$\bar{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m / \varepsilon \rho_a \\ -m / \rho_g \\ \{-\psi - m E_v(T_a)\} / \{\varepsilon \rho_a (c_{pa} + c_v Y)\} \\ \{\psi + m E_w(T_g)\} / \{\rho_g (c_{pg} + c_w M)\} \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

onde:

- $E_v(T_a) = e_v + c_{pv} T_a$ representa a energia interna específica do vapor no ar;
- $E_w(T_g) = e_w + c_{pw} T_g$ representa a energia interna específica da água no grão;
- as energias básicas e_v e e_w , e os calores específicos c_{pv} e c_{pw} são assumidos constantes;
- m representa a taxa líquida de transferência de massa, ou seja, a taxa líquida de evaporação de água do grão;
- ψ é a taxa líquida de energia transferida do grão para o ar. Em geral, assume-se que m e ψ são funções das variáveis de estado Y , M , T_a e T_g , e das velocidades do ar (v_a) e do grão (v_g).

A equação geral (2.70) foi obtida através da aplicação dos balanços de massa, energia e momento, tomados sobre um elemento arbitrário do volume de controle dentro da mistura ar-grão. As equações de balanço de momento não estão presentes no sistema (2.70), uma vez que não fornecem qualquer informação de interesse obtida pela solução desse sistema [Parry, 1985]. O modelo geral dependente do tempo da equação (2.70) representa o caso de secador de fluxo cruzado.

No caso de leito fixo, $v_g = 0$, o sistema (2.70) se reduz para:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \bar{b} \quad (2.74)$$

Para fluxos concorrentes ou contracorrentes, o sistema fica:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + C \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \bar{b} \quad (2.75)$$

onde:

- para fluxo concorrente: $C = A + B$;

- para fluxo contracorrente: $C = B - A$.

Em regime estacionário, quando as condições dentro do secador são assumidas não variáveis com o tempo, tem-se:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = 0 \quad (2.76)$$

Nesse regime o sistema (2.74) se reduz a um sistema de equações diferenciais ordinárias. Laws e Parry [Parry, 1985] observaram que, em face da dependência linear dos termos b_1 e b_2 das equações do balanço de massa, esse sistema pode ser re-escrito como um sistema de três equações diferenciais ordinárias e uma equação algébrica linear, da forma:

$$v_a \frac{dY}{dx} = \pm b_1 \quad \text{ou} \quad v_g \frac{dM}{dx} = b_2$$

$$\text{e} \quad v_a \frac{dT_a}{dx} = \pm b_3 \quad (2.77)$$

$$v_g \frac{dT_g}{dx} = b_4$$

$$\text{juntas com} \quad \varepsilon \rho_a v_a Y = \rho_g v_g M = \text{constante}$$

em que o sinal positivo é usado para o caso de fluxo concorrente e o sinal negativo para o caso de fluxo contracorrente.

Para cada tipo de secador, leito fixo, fluxo cruzado, fluxo concorrente ou fluxo contracorrente, existe um número expressivo de problemas que podem ser colocados. Condições iniciais e de contorno apropriadas devem ser associadas para cada sistema de equações representativas do secador.

O modelo geral representado pela equação (2.70) é composto por quatro equações diferenciais parciais semi-lineares, em que os coeficientes do lado esquerdo da equação são constantes e os coeficientes do lado direito são, em geral, funções não lineares das variáveis dependentes Y , M , T_a e T_g .

Laws e Parry [Parry, 1985] observaram que vários outros modelos que aparecem na literatura podem ser considerados como casos particulares do modelo geral sob um conjunto

de hipóteses apropriadas.

Um modelo particular clássico do modelo geral é o desenvolvido por Brooker et al., 1974. Com base nos modelos de Schumann, 1929, Van Arsdel, 1955, e Bakker – Arkema et al., 1967, eles desenvolveram um modelo para camada espessa, unidimensional e estacionário, denominado de modelo da Michigan State University – MSU. Esse modelo considera as seguintes suposições:

1. O volume de contração dos grãos é negligenciável.
2. Os gradientes de temperatura dentro dos grãos são negligenciáveis.
3. A condução de calor partícula-partícula (grão-grão) é negligenciável.
4. Os fluxos de ar e grão são uniformes.
5. Os termos $\partial T/\partial t$ e $\partial Y/\partial t$ são negligenciáveis se comparados com $\partial T/\partial x$ e $\partial Y/\partial x$, isto é, a variação da temperatura e do teor de umidade com relação ao tempo são desprezíveis se comparadas com essa mesma variação com relação à espessura da camada fina.
6. O fluxo de calor através da parede é negligenciável.
7. Os calores específicos para o ar úmido e o grão são constantes durante um pequeno período de tempo.
8. Uma equação de secagem para camada fina e a isoterma de umidade de equilíbrio são conhecidas.

O modelo MSU é estabelecido através do balanço de energia e massa em um volume de controle diferencial, que além das suposições descritas, está sujeito ainda às seguintes considerações [Guimarães, 2005]:

- o processo de secagem ocorre por desorção adiabática;
- as camadas encontram-se uniformemente compactadas;
- a transferência de calor é regida pela energia convectiva do ar;
- a transferência de massa do grão para o ar, considerado inerte, é dominada pela taxa de desorção, conforme os modelos de camada fina;
- existe equilíbrio higroscópico na superfície do grão, devido à consideração de que a desorção ocorre instantaneamente;
- a porosidade (volume do espaço intersticial entre os grãos) é considerada constante.

O modelo permite a simulação da secagem em leito fixo, fluxos cruzado, concorrente e contracorrente. O balanço de massa e energia para o ar e o grão para leito fixo fornece o seguinte sistema de equações diferenciais:

$$\frac{\partial Y}{\partial x} = - \frac{\rho_g}{G_a} \frac{\partial M}{\partial t}$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial x} = \frac{h a}{G_a c_a + G_a c_v Y} (T_a - T_g)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{uma curva conhecida de camada fina}$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{h a}{\rho_g c_g + \rho_g c_w M} (T_a - T_g) + \frac{h_{fg} + c_v (T_a - T_g)}{\rho_g c_g + \rho_g c_w M} G_a \frac{\partial Y}{\partial x}$$
(2.78)

O sistema (2.78) para leito fixo foi resolvido através do método de diferenças finitas, com as seguintes condições de contorno:

$$T_a(0,t) = T_a; \quad T_g(x,0) = T_{go}; \quad Y(0,t) = Y \quad \text{e} \quad M(x,0) = M$$
(2.79)

Para a secagem em fluxo cruzado foi considerada a substituição de $\partial t = \partial y / v_g$, considerado $G_g = \rho_g v_g$ e trocado o sinal da equação da temperatura do leito no sistema (2.78). O sistema para fluxo cruzado foi resolvido usando diferenças finitas com as condições de contorno a seguir:

$$T_a(0,y) = T_a; \quad T_g(x,0) = T_{go}; \quad Y(0,y) = Y \quad \text{e} \quad M(x,0) = M$$
(2.80)

Para a simulação da secagem em fluxo concorrente e considerando o sistema de fluxo cruzado, substituem-se as derivadas parciais do modelo por derivadas totais, troca-se y por x na equação da temperatura do leito e também troca-se o sinal da equação da umidade do ar. Para resolver o sistema de fluxo concorrente foi utilizado o método de Runge-Kutta, com as condições de contorno e iniciais:

$$T_a(L) = T_a; \quad T_g(0) = T_{go}; \quad Y(L) = Y \quad \text{e} \quad M(0) = M$$
(2.81)

Para o secador de fluxo contracorrente, troca-se y por x e também o sinal da equação da temperatura do ar. A solução foi realizada com técnicas de otimização e as condições de

contorno:

$$T_a(0) = T_a; \quad T_g(0) = T_{g0}; \quad Y(0) = Y \quad e \quad M(0) = M \quad (2.82)$$

Ao modelo de Brooker et al. foram implementadas algumas alterações por França, 1991. O autor considerou a variação da massa específica dos grãos em função da temperatura e a utilização das equações completas (incluindo os termos de acumulação) do balanço da conservação da massa e energia entre os grãos e o ar em função do tempo, em um secador bi-dimensional. As hipóteses consideradas para o modelo são semelhantes às de Brooker et al.

O sistema de equações do modelo foi obtido realizando-se balanços de massa e energia em um volume de controle no leito, sendo expresso por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_a Y)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_a \frac{\bar{v}}{\varepsilon} Y \right) &= - \frac{\rho_g}{\varepsilon} \frac{M}{t} \\ \frac{\partial(\rho_a T_a)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_a \frac{\bar{v}}{\varepsilon} T_a \right) &= - \frac{h a (T_a - T_g)}{\varepsilon(c_{pa} + c_{pv} Y)} \\ \frac{\partial(\rho_g T_g)}{\partial t} &= \frac{h a (T_a - T_g)}{(c_{pg} + c_{pw} M)} + \frac{h_{fg} + c_{pv}(T_a - T_g)}{(c_{pg} + c_{pw} M)} \frac{\partial M}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.83)$$

Esse sistema foi resolvido utilizando-se os métodos dos elementos finitos e volumes finitos para os casos unidimensional e bidimensional.

A equação do teor de umidade dos grãos foi determinada através do modelo de Thompson et al., considerando o milho como o produto a ser secado:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_c - M}{3600 [A^2 + (1/900) B t]^{1/2}} \quad (2.84)$$

em que A e B são funções da temperatura do ar.

Courtois et al., 1992, apresentaram um modelo de equações diferenciais parciais para simulação unidimensional dos fenômenos transitórios em secadores de milho de fluxo cruzado através de métodos numéricos. O método clássico de simulação envolve a decomposição do leito do secador em uma série de camadas finas. No nível da camada fina e baseando-se na proposta da divisão compartimental de Toyoda, 1988 [Courtois et al., 1991], consideraram o grão de milho como sendo composto de três compartimentos concêntricos. O primeiro é o núcleo, ou compartimento central, o segundo é o compartimento médio, e o terceiro é o compartimento periférico ou invólucro. A transferência de massa dentro do grão é

considerada através do processo de difusão, nos compartimentos 1 e 2, e no compartimento 3 ocorre somente a vaporização. A consideração dessa proposta minimiza a hipótese da geometria do grão.

O modelo de Courtois et al. [Courtois et al., 1991, Courtois et al. 1992, Lasseran e Courtois, 1993] de camada espessa pode ser dividido em dois sub-sistemas: o grão e o ar. O sistema representa sete variáveis de estado para camada fina, que são:

- M_1, M_2, M_3 : teores de umidade dos três compartimentos representativos do grão;
- Q : qualidade do grão;
- T_g : temperatura do grão;
- Y : conteúdo de umidade do ar;
- T_a : temperatura do ar.

O sistema de Courtois et al. realizando balanços de massa e de calor para o grão e para o ar pode ser escrito na forma:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial M_1}{\partial t} &= \frac{B_1}{\rho_g \tau_1} (M_2 - M_1) \\
 \frac{\partial M_2}{\partial t} &= \frac{B_1}{\rho_g \tau_2} (M_1 - M_2) + \frac{B_2}{\rho_g \tau_2} (M_3 - M_2) \\
 \frac{\partial M_3}{\partial t} &= \frac{B_2}{\rho_g \tau_3} (M_2 - M_3) + \frac{\beta_p a}{\rho_g \tau_3} (P_{va} - P_{v23}) \\
 \frac{\partial Q}{\partial t} &= -K_Q Q^2 \\
 \frac{\partial T_g}{\partial t} &= \frac{-\alpha a (T_g - T_a) - \beta_p a (P_{va} - P_{v3}) L_v}{\rho_g (c_{pg} + M.c_{pw})} \\
 \frac{\partial Y}{\partial t} &= -v_a \frac{\partial Y}{\partial x} + \phi_m a \frac{(1-\epsilon)}{\rho_a \epsilon} \\
 \frac{\partial T_a}{\partial t} &= -v_a \frac{\partial T_a}{\partial x} + \frac{a(1-\epsilon)}{\epsilon} \frac{\phi_m c_{pv} (T_g - T_a) + \phi_c}{\rho_a (c_{pa} + Y c_{pv})}
 \end{aligned} \tag{2.85}$$

Com as condições iniciais:

- Para o grão: $M_1, M_2, M_3 = M_0$ e $T_g = T_{g0}$;
- Para o ar: $Y = Y_0$ e $T_a = T_{g0}$, em $t = 0$ e para $x = 0$.

E, com condições de contorno:

$$T_a = T_{a0} \text{ e } Y = Y_0 \text{ para } x = 0 \text{ e } \forall t \geq 0.$$

sendo:

- t : tempo (s);
- τ_i : razão de volume no compartimento i (adimensional);
- B_1, B_2 : coeficientes de transferência de massa entre os compartimentos. São funções exponenciais da temperatura do grão ($\text{kg s}^{-1} \text{ m}^{-3}$);
- ρ_g : massa específica do grão (kg m^{-3});
- ϕ_m : densidade de fluxo de massa entre o ar e o grão ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);
- β_p : coeficiente de transferência de massa referente à pressão P_{v3} ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$);
- a : relação entre a área da superfície e o volume do grão (m^{-1});
- P_{va} : pressão parcial de vapor no ar (Pa);
- P_{v3} : pressão parcial do vapor no compartimento 3. É uma função complexa, envolvendo o teor de umidade e a temperatura do grão (Pa);
- K_Q : coeficiente de qualidade do grão (s^{-1});
- ϕ_c : densidade de fluxo de calor entre o ar e o grão (W m^{-2});
- x : abscissa ao longo do eixo do fluxo de ar (m);
- L_v : calor latente de vaporização (J.kg^{-1});
- α : coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);
- c_{pg} : calor específico do grão ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);
- c_{pw} : calor específico da água ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);
- c_{pv} : calor específico do vapor ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);
- v_a : velocidade do ar (m s^{-1});
- ε : porosidade do leito (adimensional).

O sistema (2.85) foi resolvido pelo método de diferenças finitas através de um software desenvolvido pelos autores [Courtois et al., 1992]. Em Lasseram e Courtois, 1993, encontra-se o detalhamento da implementação do software de simulação, que permite determinar os fenômenos transitórios de condensação, seções de repouso e resfriamento, ciclos de recirculação de ar, variação de temperatura, umidade e taxa de fluxo de ar, entre outros, para secadores de fluxo misto com fluxo concorrente e contracorrente.

Sitompul et al., 2001, desenvolveram equações acopladas de transferência de calor e massa para o grão e para o ar baseadas nas equações de Luikov e considerando dispersão axial de massa e calor no ar. Aplicaram coordenadas esféricas ao grão, considerando um coeficiente de termomigração (δ) na equação do teor de umidade para o grão (balanço de massa para o grão) e um fator de conversão de fase (ζ) na equação da temperatura do grão (balanço de calor para o grão). Consideraram $\zeta = 0$ para a difusão líquida e $\zeta = 1$ para a difusão de vapor. As equações do modelo foram resolvidas numericamente pelo método das diferenças finitas, para um leito fixo de forma cilíndrica, determinando os teores de umidade e temperaturas para o ar e o grão de milho em diferentes posições do leito axial.

Os modelos matemáticos de secagem de grãos têm sido desenvolvidos basicamente com a aplicação dos princípios da conservação da massa e da energia, sem a consideração do efeito da transferência do momento.

Istadi e Sitompul, 2002, e Sitompul et al., 2003, apresentaram um modelo matemático para a secagem em leito fixo onde consideram a conservação simultânea de momento, massa e energia. Na fase ar foi desenvolvida a transferência transiente bidimensional de massa e calor por mecanismos convectivos e difusivos, enquanto a conservação do momento foi realizada em regime estacionário ao longo da coluna do secador cilíndrico. Para o grão, as transferências de calor e massa são também consideradas através dos mecanismos de difusão de massa e de termodifusão. As equações do momento simulam os campos de perda de pressão e de velocidade do ar de secagem, e as equações do balanço de calor e massa determinam os perfis de temperatura e umidade nas fases ar e grão, nas seções do leito.

Em Srivastava e John, 2002, é proposto um modelo de secagem em leito fixo não estacionário considerando os balanços de energia e massa em um volume diferencial localizado em uma posição arbitrária no leito. Determina-se a umidade e temperatura do ar, e o teor de umidade e temperatura do grão em função da variação temporal e da altura do leito fixo. Analisaram-se os efeitos da variação da velocidade do ar e da porosidade do leito na

simulação do modelo.

Tang et al., 2004, apresentaram um modelo descrevendo a secagem em leito fixo com vapor para resíduos de malte em cervejarias. Segundo os autores, as tecnologias de secagem com vapor superaquecido indicam que a secagem no período de taxa decrescente é mais rápida quando da utilização do vapor superaquecido do que com o ar quente, sob certas condições. Um conjunto de equações diferenciais parciais foi desenvolvido a partir do balanço de energia e massa, de forma semelhante aos modelos de secagem com ar. Realizou-se uma modificação dos modelos correspondentes, em leito fixo, à secagem com ar, pela substituição da quantidade de umidade do ar pela taxa de fluxo de vapor. O modelo foi resolvido através da utilização do método das diferenças finitas.

Em muitos modelos de secagem ocorre a simplificação da descrição física, pela desconsideração dos termos de acumulação nas equações de balanço de energia e massa. Essa simplificação acarreta na diminuição da complexidade e do tempo de computação, mas pode também, dependendo das condições de secagem, reduzir a precisão do modelo. Aregba e Nadeau, 2007, analisaram e compararam dois modelos de não equilíbrio para a secagem de trigo em leito fixo, através do desenvolvimento de dois códigos computacionais. Os modelos foram baseados em Bakker-Arkema et al., 1967, e propostos por Brooker et al., 1974, com os balanços de energia e massa sendo realizados em um volume de controle no leito.

No primeiro modelo de Aregba e Nadeau, 2007, foram considerados os termos de acumulação, e no segundo modelo estes termos foram negligenciados. Através de simulações computacionais, verificaram que os resultados para os dois modelos podem ser consideravelmente diferentes.

Oliveira e Haghghi, 1998, considerando a análise da secagem em um sistema multi-grãos criticam o modelo de camada espessa e camada fina, visto que nesses modelos considera-se o sistema inteiro como sendo um meio poroso único, no qual o transporte que ocorre dentro dos grãos individuais não é considerado. Ou seja, as interações entre os grãos do sistema e entre os grãos e o ar circunvizinho são negligenciadas. Indicam que a secagem de um sistema multi-grãos, por qualquer das teorias existentes, não considera as equações de solução para o transporte dentro dos grãos acoplada às equações de camada limite, como aplicada para o meio de secagem.

Oliveira e Haghghi, 1998, propõem uma metodologia de solução para os problemas conjugados de transferência de calor e massa, onde é analisado o acoplamento dos

mecanismos de transferência de calor e massa dentro e entre as fases no mesmo sistema. Segundo os autores, a metodologia para a solução consiste na divisão do problema em duas partes: a análise da secagem do sólido e da camada limite. A resolução de ambos se dá de forma separada.

Songtao et al., 1999, visando a um melhor estudo teórico da secagem propõem a inclusão de novos fatores na equação de Liukov para considerar a influência da transferência de massa sobre a transferência de calor e a interação entre as transferências de calor e de massa.

O efeito mútuo da transferência de massa e de calor pode ser simultaneamente levado em consideração em meios capilares porosos pelo sistema de equações:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial t} &= a_q \nabla^2 T + a_q \xi \nabla^2 U \\ \frac{\partial U}{\partial t} &= a_m \nabla^2 U + a_m \delta \nabla^2 T\end{aligned}\tag{2.86}$$

onde:

a_q - difusividade térmica (m^2/s);

a_m - difusividade de massa (m^2/s);

ξ - coeficiente do gradiente de umidade (K);

δ - coeficiente do gradiente de temperatura ($1/K$).

Os autores concluíram que o modelo matemático desenvolvido e o método de solução, para as equações diferenciais acopladas de transferência de calor e massa, são corretos e podem ser usados para o cálculo e a análise do processo de secagem em taxa de secagem constante. As equações e respectivas condições iniciais e de contorno foram transformadas em duas equações de condução de calor homogêneas através da transformação de Henry.

A modelagem da secagem de soja em leito móvel com fluxo paralelo, concorrente e contracorrente, comparando dados simulados e experimentais e considerando perfil de velocidades plano e não plano do ar de secagem foi realizada por Barrozo et al., 2006. O modelo de duas fases foi utilizado, baseado nas equações diferenciais derivadas dos balanços de calor e massa para o grão e o ar e considerações simplificadoras segundo Brooker et al., 1974. Souza et al., 2000, appud Barrozo et al., 2006, mostraram que as hipóteses do perfil plano de velocidade no ar intersticial e da taxa de fluxo do grão uniforme são válidas para secadores de leito móvel com altas razões entre o diâmetro do leito e do grão.

A equação para o teor de umidade de equilíbrio da soja é descrita pela equação de Halsey modificada:

$$M_e = \left\{ \left[-\exp(-0.00672 T_g + 3.02) / \ln(\text{UR}) \right] \right\}^{1/1.508} \quad (2.87)$$

com M_e em base seca, a umidade relativa do ar em razão de massa e a temperatura do grão em °C.

A cinética de secagem da soja é descrita pelo modelo difusivo, através da equação (2.21). O coeficiente efetivo de difusão, em função da temperatura, foi obtido pela reparametrização da equação de Arrhenius:

$$D_{ef} = \exp(\beta) \exp \left[- \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{273} \right) \exp(\gamma) \right] \quad (2.88)$$

sendo D_{ef} em cm^2/min , T_a em Kelvin. Os valores de β e γ são 13.185 e 8.36, respectivamente.

Weres e Olek, 2005, questionando a exatidão dos coeficientes dos modelos matemáticos baseados no balanço de massa e de energia para o grão e o ar desenvolveram um algoritmo computacional utilizando a análise inversa com elementos finitos para determinação desses coeficientes de maneira confiável.

O método de análise inversa por meio de elementos finitos tem como princípios a aproximação da modelagem por elementos finitos diretos e o conceito da modelagem inversa sobre um procedimento de otimização requerido para identificar valores de coeficientes desconhecidos.

O modelo desenvolvido compreende a condução de calor para identificar a condutividade térmica e o coeficiente de transferência de calor convectivo, e a difusão de umidade para identificar o coeficiente de difusão, o teor de umidade de equilíbrio e o coeficiente de transferência de massa convectivo. A simulação foi realizada para o pinho, madeira de faia e milho.

Giner e Estrebou, 2004, desenvolveram um programa computacional para simulação da transferência de calor e massa em secadores unidimensionais de fluxo cruzado contínuos e de bateladas para o trigo. Segundo os autores, a equação da taxa de secagem dos modelos é possivelmente a sua mais importante característica e, normalmente, ela é empírica demais e

inadequada, como por exemplo a expressão de Lewis. Ou então ela é muito lenta para a simulação, como os modelos numéricos para difusão dentro do grão.

As hipóteses de Giner e Estrebou, 2004, são aquelas para o modelo de quatro equações diferenciais combinadas com uma equação cinética difusiva e uma bem fundamentada solução analítica, rápida para a simulação em um computador, e com capacidade para prever o comportamento detalhado do grão e do ar ao longo da profundidade do leito em função do tempo. Desta forma, uma formulação adequada para gerar um software interativo. Uma nova característica desse software é a predição da condensação que ocorre quando a umidade relativa do ar saindo da camada de grão é maior ou igual a um.

Em Khatchatourian et al, 2003, foi proposto e desenvolvido um modelo matemático para a secagem de soja a partir dos balanços de calor e massa para o ar e para o grão, utilizando curvas de secagem em camada fina obtidas experimentalmente. O modelo é composto de quatro equações diferenciais parciais não lineares, resolvidas através do método de diferenças finitas e volumes finitos. Khatchatourian e Oliveira, 2006, utilizaram esse modelo para a simulação da dinâmica do aquecimento e do resfriamento de soja, e para a modelagem do estado térmico em silos de aeração. Esse modelo é baseado naquele desenvolvido por Courtois et al., 1991, e modificado por Khatchatourian et al, 2003.

Simulações e resultados em secadores de fluxo cruzado são apresentados em Nellist, 1987, Platt et al., 1991, Zhihuai e Chongwen, 1999, Liu e Bakker-Arkema, 2001.

Nellist, 1987, desenvolveu um modelo computacional de um secador de grãos de fluxo cruzado através das equações de transferência de calor e de massa. O secador é constituído de câmara de secagem e de resfriamento. Os resultados foram apresentados em termos de consumo de energia, massa de grãos a serem secados, tempo de permanência dos grãos no secador e temperatura do grão na saída do mesmo.

Platt et al., 1991, apresenta um modelo dinâmico geral para um secador de fluxo cruzado a partir das equações dos balanços de massa e energia. As equações são expressas na forma adimensional. O modelo é estendido para incluir como opções um inversor no fluxo de grãos e a recirculação do ar.

Em Zhihuai e Chongwen, 1999, são realizadas a simulação e a otimização. O secador de fluxo cruzado 5HT-15 foi modelado com duas seções de secagem, uma seção de reversão dos grãos, uma seção de resfriamento e recirculação do ar de exaustão. O modelo de equações diferenciais parciais é empregado para estabelecer o programa de simulação. O método das

diferenças finitas atrasadas e a integração preditor-corretor são usadas na estimativa do processo de secagem.

Liu e Bakker-Arkema, 2001, desenvolveram um modelo para realizar o controle do processo de secagem de grãos em secadores de fluxo cruzado, utilizando as equações de transferência de calor e de massa. O modelo apresentado é mais simples que os modelos de secagem de grãos de propósito geral. O mesmo foi validado através da comparação da capacidade de secagem de secadores comerciais com o modelo desenvolvido e o modelo da universidade de Michigan.

3. O MODELO MATEMÁTICO DO PROCESSO DE SECAGEM

Descreve-se neste capítulo a obtenção das equações diferenciais do modelo matemático utilizado no processo de secagem em camada espessa, através da aplicação dos princípios de conservação da massa e da energia para o ar e para o grão.

3.1. Considerações iniciais

O modelo desenvolvido para descrever o processo de secagem baseou-se nos modelos propostos por Khatchatourian et al, 2003, e Khatchatourian e Oliveira, 2006, a partir da aplicação das equações da conservação da massa e da energia para o ar de secagem e para os grãos em um secador de leito fixo e caso unidimensional. O modelo é constituído de quatro equações diferenciais parciais envolvendo os teores de umidade e as temperaturas do ar e do grão.

As hipóteses consideradas para a obtenção do modelo foram:

1. O volume de contração dos grãos é negligenciável durante a secagem;
2. Os gradientes de temperatura dentro dos grãos podem ser negligenciados;
3. A condução de calor entre os grãos é negligenciável;
4. O fluxo de ar é uniforme;
5. A transferência de calor pelas paredes do secador é negligenciável;
6. O calor específico do ar úmido e do grão é constante durante um pequeno intervalo de tempo;
7. A dinâmica de secagem para camada fina é obtida de dados experimentais.

A aplicação das equações de conservação foi realizada em um secador de leito fixo unidimensional, conforme Figura 3.1. O secador possui uma profundidade L do leito, onde se encontra a massa de grãos a ser secada. Ar ambiente aquecido à temperatura de secagem, com capacidade de absorver a umidade dos grãos é insuflado na massa de grãos, retirando umidade da mesma e saindo do secador como ar úmido.

A consideração de um modelo unidimensional é aceitável para um secador cuja largura do leito é muito maior do que o comprimento das camadas limite dinâmica e térmica nas paredes. A velocidade de escoamento do ar de secagem e a porosidade do leito foram consideradas constantes.

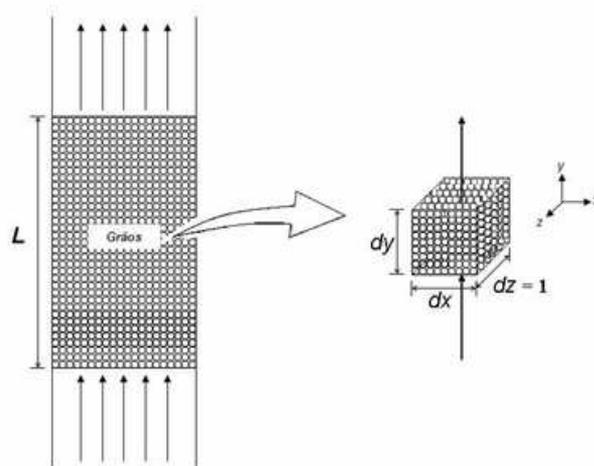


Figura 3.1 Esquema do secador de leito fixo e volume de controle na massa de grãos.

Um volume de controle localizado na massa de grãos foi considerado para a dedução das equações do modelo. O volume de controle é preenchido pelos grãos e pelos espaços vazios, onde ocorre o escoamento do ar de secagem.

O ar de secagem possui um determinado conteúdo de umidade, o qual varia para os diversos pontos da profundidade L do secador. A razão entre a massa de água (vapor de água) contida no ar e a massa de ar seco é denominada de teor de umidade do ar (Y), sendo expressa por:

$$Y = \frac{m_w}{m_{as}} \quad (3.1)$$

O grão, de forma semelhante ao ar, também possui um determinado teor de umidade, variável durante o processo de secagem. O teor de umidade do grão (M), em base seca, definida anteriormente pela equação (2.3), é a razão entre a massa de água contida no grão e a massa de grão seco.

$$M = \frac{m_w}{m_{gs}} \quad (2.3)$$

A porosidade do leito (ε) é definida como a razão entre o volume de ar (V_a) nos espaços vazios onde não se tem grãos e o volume total (V) ocupado pela massa de grãos e ar no volume de controle.

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_a + V_g} = \frac{V_a}{V} \quad (3.2)$$

O volume dos grãos dentro do volume de controle considerado é:

$$V_g = V - V_a = V(1 - \varepsilon) \quad (3.3)$$

Esse volume é constituído por um determinado número de grãos, e a equação (3.3) pode ser escrita na forma:

$$V_g = \sum_{i=1}^{n_g} V_{gm_i} = n_g V_{gm} \quad (3.4)$$

em que V_{gm} é o valor médio do volume de um grão.

Definindo a razão entre a área pelo volume do grão como:

$$a = \frac{A_{gm}}{V_{gm}} \quad (3.5)$$

sendo:

a - razão entre a área superficial média e o volume médio do grão (m^{-1});

A_{gm} - valor médio da área do grão (m^2).

A equação para o número de grãos contidos no volume de controle fica:

$$n_g = \frac{V_g}{V_{gm}} = \frac{V(1 - \varepsilon)}{V_{gm}} = \frac{V(1 - \varepsilon)}{A_{gm}} a \quad (3.6)$$

3.2. O modelo matemático de camada espessa

O modelo matemático tem como objetivo a determinação das equações diferenciais de camada espessa considerando as variáveis temporal e espacial para as variações da umidade e da temperatura do ar e do grão, através da aplicação das equações da conservação da massa e da energia.

3.2.1. Equação da conservação da massa de água para o ar

A equação da conservação da massa para o sistema ar - grão pode ser enunciada da seguinte forma:

$$\left[\begin{array}{l} \text{a taxa de variação da massa de água} \\ \text{(umidade) no ar em relação ao tempo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{massa de água transferida dos grãos} \\ \text{para o ar por unidade de tempo} \end{array} \right]$$

A massa de ar presente nos espaços vazios do volume de controle, para $dz = 1$, é dada por:

$$m_a = \rho_a V_a = \rho_a \varepsilon dx dy 1 \quad (3.7)$$

A massa de vapor de água no ar dos espaços vazios é determinada a partir da definição do conteúdo de umidade do ar:

$$m_v = m_a Y = \rho_a \varepsilon dx dy 1 Y \quad (3.8)$$

A taxa de variação da massa de água no ar é expressa por:

$$\frac{d}{dt}(m_v) = \rho_a \varepsilon dx dy \frac{dY}{dt} \quad (3.9)$$

sendo que o termo dY/dt representa a derivada substantiva ou material. Para um escoamento unidimensional na direção y e leito fixo, tem-se:

$$\frac{dY}{dt} = \frac{\partial Y}{\partial t} + v_a \frac{\partial Y}{\partial y} \quad (3.10)$$

onde v_a é a velocidade do ar ($m s^{-1}$).

O fluxo de massa de vapor de água (\dot{m}_v) que é transferido para o ar é o fluxo total de vapor de água que atravessa a superfície de todos os grãos do volume de controle. Logo:

$$\dot{m}_v = \Phi_m n_g A_g = \Phi_m a \, dx \, dy \, (1 - \varepsilon) \quad (3.11)$$

onde:

ϕ_m - fluxo de massa de vapor d'água entre o ar e o grão ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Fazendo a igualdade das equações (3.9) e (3.11) para um intervalo de tempo Δt , obtêm-se:

$$\frac{dY}{dt} = \Phi_m \frac{a(1-\varepsilon)}{\rho_a \varepsilon} \quad (3.12)$$

Substituindo (3.10) em (3.12) chega-se à equação final:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + v_a \frac{\partial Y}{\partial y} = \Phi_m \frac{a(1-\varepsilon)}{\rho_a \varepsilon} \quad (3.13)$$

3.2.2. Equação da conservação da massa de água para os grãos

A equação da conservação da massa para o sistema ar - grão pode ser enunciada da seguinte forma:

$$\left[\begin{array}{l} \text{taxa de variação da massa} \\ \text{de água nos grãos} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{variação da massa de água que atravessa a} \\ \text{superfície dos grãos por unidade de tempo} \end{array} \right]$$

A massa de grãos secos (m_{gs}) no volume de controle, para $dz = 1$, é dada por:

$$m_{gs} = \rho_g V_g = \rho_g V (1 - \varepsilon) = \rho_g \, dx \, dy \, (1 - \varepsilon) \quad (3.14)$$

A massa de água (m_w) nos grãos é determinada através da definição do teor de umidade do grão em base seca:

$$m_w = m_{gs} M = \rho_g \, dx \, dy \, (1 - \varepsilon) M \quad (3.15)$$

A taxa de variação da massa de água nos grãos:

$$\frac{d}{dt}(m_w) = \rho_g \, dx \, dy \, (1 - \epsilon) \frac{dM}{dt} \quad (3.16)$$

O fluxo de massa de água que atravessa a superfície do grão, saindo do mesmo, é:

$$\dot{m}_{wsg} = \Phi_m A_g = \Phi_m a \, dx \, dy \, (1 - \epsilon) \quad (3.17)$$

Fazendo a igualdade das equações (3.16) e (3.17):

$$\rho_g \frac{dM}{dt} = \Phi_m a \quad (3.18)$$

O fluxo de massa é vinculado à taxa de variação da massa de água no grão. No processo de secagem ocorre a perda de água, e a equação (3.18) é representada por:

$$\frac{dM}{dt} = -\Phi_m \frac{a}{\rho_g} \quad (3.19)$$

A derivada substantiva para o caso unidimensional é:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\partial M}{\partial t} + v_g \frac{\partial M}{\partial y} \quad (3.20)$$

Para secador de leito fixo, onde $v_g=0$, a combinação das equações (3.19) e (3.20) fornece:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\Phi_m \frac{a}{\rho_g} \quad (3.21)$$

3.2.3. Equação da conservação da energia para o ar

O ar de secagem cede energia para os grãos, aquecendo a massa orgânica, a água líquida e o vapor d'água contido nos mesmos, vaporizando a água, que sai dos grãos no processo de secagem. Assim, a taxa de variação de energia na massa de ar úmido é igual à soma da taxa de energia necessária para o aquecimento do vapor de água contida no grão e a taxa de energia fornecida à massa orgânica.

O ar de secagem é constituído de ar seco e vapor d'água. A energia, ou entalpia, da massa de ar contida no volume de controle em estudo será a soma da entalpia da massa de ar seco e da entalpia do vapor de água presente no ar.

Assim, a entalpia da massa de ar no volume de controle é:

$$H_a = H_{as} + H_{va} = (m_{as} c_{p_{as}} + m_{va} c_{p_{va}}) T_a \quad (3.22)$$

Substituindo as equações (3.7) e (3.8) na equação (3.22):

$$H_a = (c_{p_a} + Y c_{p_v}) \rho_a \varepsilon dx dy 1 T_a \quad (3.23)$$

A taxa de variação total da entalpia do ar em relação ao tempo é:

$$\frac{dH_a}{dt} = \frac{d}{dt} \left[(c_{p_a} + Y c_{p_v}) \rho_a \varepsilon dx dy T_a \right] \quad (3.24)$$

Que fornece,

$$\frac{dH_a}{dt} = \rho_a \varepsilon dx dy \left[(c_{p_a} + Y c_{p_v}) \frac{dT_a}{dt} + c_{p_v} T_a \frac{dY}{dt} \right] \quad (3.25)$$

A taxa de calor para o aquecimento do vapor de água, da temperatura do grão (T_g) até a temperatura do ar (T_a) é:

$$\dot{Q}_{aq. va} = \dot{m}_v c_{p_v} (T_a - T_g) \quad (3.26)$$

Utilizando a equação (3.11) tem-se:

$$\dot{Q}_{\text{aq. va}} = \Phi_m c_{p_v} a \, dx \, dy (1 - \varepsilon) (T_a - T_g) \quad (3.27)$$

A taxa de energia, na forma de calor, fornecida pelo ar aos grãos através de suas superfícies é dada por:

$$\dot{Q}_{\text{ar/grão}} = \Phi_q n_g A_g \quad (3.28)$$

sendo ϕ_q o fluxo de calor entre o ar e o grão (W m^{-2}).

Das definições de a e n_g :

$$\dot{Q}_{\text{ar/grão}} = a V (1 - \varepsilon) \Phi_q = a \, dx \, dy (1 - \varepsilon) \Phi_q \quad (3.29)$$

A conservação da energia para o ar vem da igualdade da equação (3.25) com a soma das equações (3.27) e (3.29). Logo:

$$\rho_a \varepsilon \, dx \, dy \left[(c_{p_a} + Y c_{p_v}) \frac{dT_a}{dt} + c_{p_v} T_a \frac{dY}{dt} \right] = \Phi_m c_{p_v} a \, dx \, dy (1 - \varepsilon) (T_g - T_a) + a \, dx \, dy (1 - \varepsilon) \Phi_q$$

Isolando dT_a/dt :

$$\frac{dT_a}{dt} = - \frac{c_{p_v} T_a}{c_{p_a} + Y c_{p_v}} \frac{dY}{dt} + \frac{a (1 - \varepsilon)}{\rho_a \varepsilon (c_{p_a} + Y c_{p_v})} \left[\Phi_m c_{p_v} T_g + \Phi_q \right] \quad (3.30)$$

em que c_{p_a} e c_{p_v} mudam explicitamente.

Substituindo a equação (3.12) em (3.30):

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{a (1 - \varepsilon)}{\rho_a \varepsilon (c_{p_a} + Y c_{p_v})} \left[\Phi_m c_{p_v} (T_g - T_a) + \Phi_q \right] \quad (3.31)$$

Aplicando a derivada substantiva dT_a/dt para o caso unidimensional e leito fixo, tem-se:

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + v_a \frac{\partial T_a}{\partial y} = \frac{a(1-\varepsilon)}{\rho_a \varepsilon (c_{p_a} + Y c_{p_v})} [\Phi_m c_{p_v} (T_g - T_a) + \Phi_q] \quad (3.32)$$

3.2.4. Equação da conservação da energia para os grãos

A equação da conservação da energia para o grão pode ser enunciada da seguinte forma: a taxa de variação de energia na massa de grãos do volume de controle é igual à soma da taxa de energia que entra nos grãos cedida pelo ar (+), da taxa de energia necessária para vaporizar a água que sai dos grãos (-) e da taxa de energia que sai dos grãos junto com a massa de água na forma de vapor (-).

A taxa de variação de energia na massa de grãos dentro do volume de controle é determinada pela variação da entalpia em relação ao tempo, considerando a massa de grãos secos e a massa de água presente nos mesmos. A entalpia dos grãos é expressa por:

$$H_g = (m_{gs} c_{p_g} + m_w c_{p_w}) T_g \quad (3.33)$$

As massas do grão seco e de água nos grãos são dadas pelas equações (3.14) e (3.15), respectivamente. A entalpia dos grãos pode ser escrita na forma:

$$H_g = (c_{p_g} + M c_{p_w}) \rho_g (1-\varepsilon) dx dy T_g \quad (3.34)$$

Logo, a variação da entalpia dos grãos em relação ao tempo aplicando a derivada substantiva é:

$$\frac{dH_g}{dt} = \rho_g (1-\varepsilon) dx dy \left[(c_{p_g} + M c_{p_w}) \frac{dT_g}{dt} + c_{p_w} T_g \frac{dM}{dt} \right] \quad (3.35)$$

A taxa de energia que entra nos grãos do volume de controle, cedida pelo ar, é dada pela equação (3.29).

O fluxo de massa de água que sai do grão é fornecido pela equação (3.17) e a taxa de energia utilizada para vaporizar esta água é:

$$\dot{Q}_{\text{vap. água grão}} = \dot{m}_{\text{wsg}} H_v = \Phi_m a \, dx \, dy (1 - \varepsilon) H_v \quad (3.36)$$

A taxa de energia que sai dos grãos com a massa de água na forma de vapor é determinada através da entalpia por unidade de tempo:

$$H_{\text{w sai grãos}} = c_{p_v} \Phi_m a (1 - \varepsilon) \, dx \, dy T_g \quad (3.37)$$

Da conservação da energia para o grão, igualando-se a equação (3.35) com a soma das equações (3.29), (3.36) e (3.37):

$$\begin{aligned} \rho_g (1 - \varepsilon) \, dx \, dy \left[(c_{p_g} + M c_{p_w}) \frac{dT_g}{dt} + c_{p_w} T_g \frac{dM}{dt} \right] = a (1 - \varepsilon) \, dx \, dy \Phi_q \\ - \Phi_m a (1 - \varepsilon) \, dx \, dy H_v - c_{p_v} \Phi_m a (1 - \varepsilon) \, dx \, dy T_g \end{aligned} \quad (3.38)$$

A equação (3.19) fornece a relação da variação da perda de água no grão com relação ao fluxo de massa. Substituindo-a na equação (3.38) e isolando dT_g/dt , vem:

$$\frac{dT_g}{dt} = - \frac{a \{ \Phi_q + \Phi_m [H_v + (c_{p_v} - c_{p_w}) T_g] \}}{\rho_g (c_{p_g} + M c_{p_w})} \quad (3.39)$$

Substituindo a derivada substantiva dT_g/dt obtêm-se:

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = - \frac{a \{ \Phi_q + \Phi_m [H_v + (c_{p_v} - c_{p_w}) T_g] \}}{\rho_g (c_{p_g} + M c_{p_w})} \quad (3.40)$$

Sistematizando o modelo matemático para o caso unidimensional e leito fixo ($v_g = 0$), tem-se o seguinte sistema de equações diferenciais parciais:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\Phi_m \frac{a}{\rho_g}$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = -\frac{a \{ \Phi_q + \Phi_m [h_{lf} + (c_{pv} - c_{pw}) T_g] \}}{\rho_g (c_{pg} + M c_{pw})} \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + v_a \frac{\partial Y}{\partial y} = \Phi_m \frac{a (1 - \epsilon)}{\rho_a \epsilon}$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + v_a \frac{\partial T_a}{\partial y} = \frac{a (1 - \epsilon)}{\rho_a \epsilon (c_{pa} + Y c_{pv})} [\Phi_m c_{pv} (T_g - T_a) + \Phi_q]$$

O termo $\partial M / \partial t$ da primeira equação desse sistema é representado por uma equação de camada fina apropriada.

As condições iniciais estabelecidas para o sistema de equações são:

$$M(0, y) = M_0, \text{ para } \forall y \in (0, L)$$

$$T_g(0, y) = T_{amb}, \text{ para } \forall y \in (0, L) \quad (3.42a)$$

$$Y(0, y) = Y_{amb}, \text{ para } \forall y \in (0, L)$$

$$T_a(0, y) = T_{amb}, \text{ para } \forall y \in (0, L)$$

As condições de contorno:

$$Y(t, 0) = Y_0, \text{ para } \forall t \in (0, \infty)$$

$$T_a(t, 0) = T_s, \text{ para } \forall t \in (0, \infty) \quad (3.42b)$$

3.3. O modelo matemático de camada fina

O modelo matemático de camada fina, na forma do modelo de dois compartimentos é apresentado a seguir.

3.3.1. Modelo de dois compartimentos para a secagem de soja

Neste trabalho o modelo do grão de dois compartimentos foi escolhido, pois conforme o estudo experimental mostrou (resultados experimentais e simulações em camada fina – páginas 99 e 100), o coeficiente de difusão tem valor variável na direção radial. A modelagem considera o gradiente do teor de umidade dentro do grão através de uma representação do grão em dois compartimentos concêntricos 1 e 2, conforme mostra a Figura 3.2:

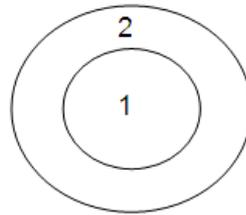


Figura 3.2 Representação esquemática do modelo de dois compartimentos.

A massa de água (umidade) no grão é representada por:

$$m_{wg} = m_g M = \rho_g V_g M \quad (3.43)$$

Definindo τ_i como a razão de volume no compartimento i ($i = 1, 2$), a massa de água no grão nos compartimentos fica:

$$m_{wg_i} = \rho_g V_g \tau_i M_i \quad (3.44)$$

ou,

$$m_{wg_1} = \rho_g V_g \tau_1 M_1 \quad \text{e} \quad m_{wg_2} = \rho_g V_g \tau_2 M_2 \quad (3.45)$$

onde:

τ_1, τ_2 - razões de volume nos compartimentos 1 e 2, respectivamente (adimensional);

M_1, M_2 - teores de umidade médios nos compartimentos 1 e 2, respectivamente.

O teor de umidade médio no grão é:

$$M = M_1 \tau_1 + M_2 \tau_2 \quad (3.46)$$

Para o compartimento 1, a taxa de fluxo de umidade por difusão entre os compartimentos 1 e 2 pode ser escrita como:

$$\frac{\partial(m_{wg1})}{dt} = -D_{12} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g V_g \tau_1 M_1) = \rho_g V_g \tau_1 \frac{\partial M_1}{dt} \quad (3.47)$$

A taxa de transferência de massa dentro do grão é determinada através da equação:

$$\frac{\partial(m_{wg1})}{dt} = -D_{12} = -k_{12}(M_1 - M_2) = -B_1 V_g (M_1 - M_2) \quad (3.48)$$

onde:

D_{12} - taxa de fluxo de água entre os compartimentos 1 e 2, respectivamente (kg s^{-1});

B_1 - coeficiente de transferência de massa entre os compartimentos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-3}$).

Substituindo a equação (3.48) em (3.47):

$$\frac{\partial M_1}{dt} = -\frac{B_1}{\rho_g \tau_1} (M_1 - M_2) \quad (3.49)$$

Que pode ser escrita como:

$$\frac{dM_1}{dt} = -k_1 (M_1 - M_2) \quad (3.50)$$

sendo k_1 o coeficiente de secagem, ou coeficiente de proporcionalidade (s^{-1}).

Para o compartimento 2 deve-se levar em consideração o efeito da difusão dentro do grão (análogo ao compartimento 1) e também a transferência de massa por convecção na superfície do grão. A representação deste compartimento é sugerida como:

$$\frac{\partial M_2}{dt} = -k_1 (M_2 - M_1) - q k_2 (M_2 - M_e)^n \quad (3.51)$$

onde:

k_2 - coeficiente de secagem (s^{-1});

n - constante (adimensional);

q - fator que considera a influência da velocidade do ar sobre a secagem (adimensional).

Dessa forma o modelo matemático de dois compartimentos para a secagem em camada fina é apresentado por um sistema de duas equações diferenciais ordinárias:

$$\begin{cases} \frac{\partial M_1}{\partial t} = -k_1 (M_1 - M_2) \\ \frac{\partial M_2}{\partial t} = -k_1 (M_2 - M_1) - q k_2 (M_2 - M_e)^n \end{cases} \quad (3.52)$$

O coeficiente de secagem k_1 é relacionado com o coeficiente de difusão no primeiro compartimento, e o coeficiente k_2 reúne os efeitos da difusão no segundo compartimento e da transferência convectiva sobre a superfície do grão. Os coeficientes k_1 e k_2 dependem da temperatura, sendo que a influência do teor de umidade inicial sobre esses coeficientes pode ser negligenciada.

Aplicando a razão de umidade do grão, o sistema pode ser apresentado na forma:

$$\begin{cases} \frac{\partial MR_1}{\partial t} = -k_1 (MR_1 - MR_2) \\ \frac{\partial MR_2}{\partial t} = -k_1 (MR_2 - MR_1) - q k_2 (M_0 - M_e)^{n-1} MR_2^n \end{cases} \quad (3.53)$$

No sistema (3.53), a segunda equação apresenta a influência da taxa de secagem com relação ao teor de umidade inicial do grão, M_0 , e da umidade do ar através do teor de umidade de equilíbrio M_e . Para considerar a influência da velocidade na secagem o coeficiente k_2 foi multiplicado por um fator:

$$q = \frac{2.3306}{1 + e^{-2v}} - 1 \quad (3.54)$$

A equação (3.54) fornece um valor do fator q igual a 1 quando $v = 0.9$ m/s, (velocidade básica ou de referência dos experimentos). A Figura 3.3 mostra o comportamento do fator q com relação à velocidade do ar de secagem.

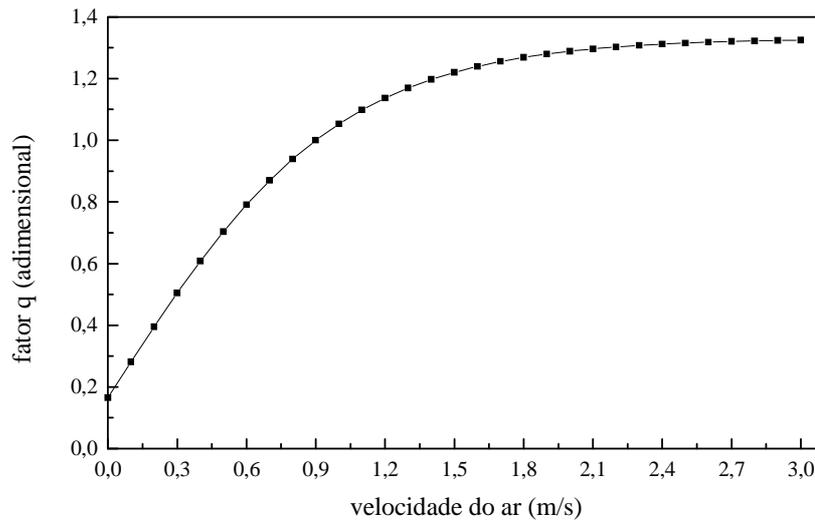


Figura 3.3 Variação do fator q em função da velocidade do ar de secagem.

Aplicando o método do problema inverso, com a técnica da descida por gradiente e o método de Newton, os coeficientes k_1 e k_2 foram obtidos para diferentes teores de umidade inicial e temperaturas, na mesma velocidade $v = 0.9$ m/s ($q = 1$). O problema é resolvido pela minimização de uma função objetivo através do método dos mínimos quadrados, definida como:

$$S = \min_{k_1, k_2} \sum_{i=1}^N [M_{\text{valores medidos}} - M_{\text{valores calculados}}]^2 \quad (3.55)$$

em que N é o número total de medidas realizadas durante o experimento.

Como mostram os dados experimentais de camada fina (Figuras 3.4 e 3.5), os coeficientes k_1 e k_2 dependem da temperatura, mas são constantes nos respectivos compartimentos. As figuras seguintes apresentam essa dependência.

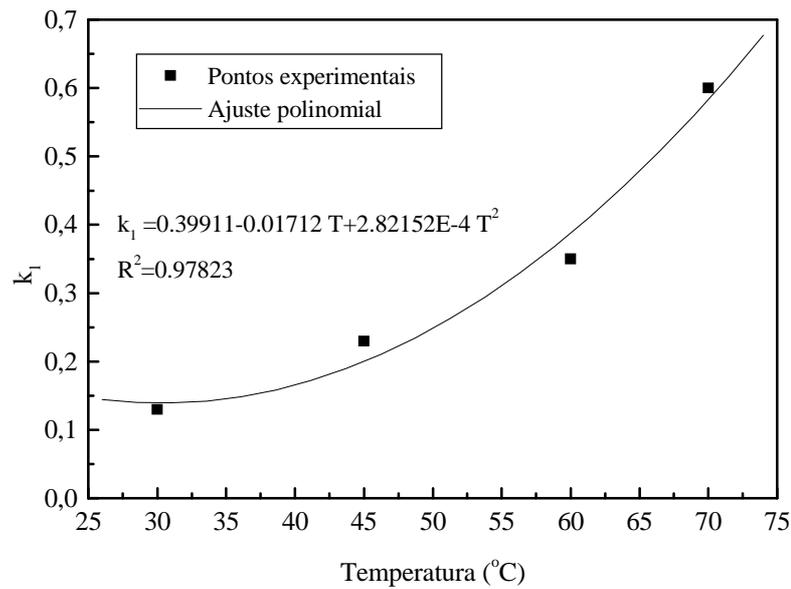


Figura 3.4 Dependência do coeficiente k_1 com relação à temperatura de secagem.

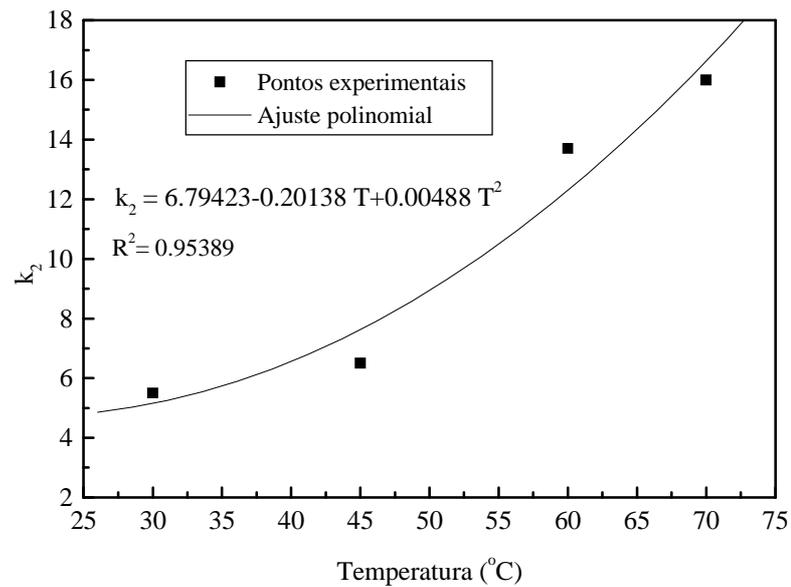


Figura 3.5 Dependência do coeficiente k_2 com relação à temperatura de secagem.

3.4. Fluxos de massa e de calor

A determinação dos fluxos de massa e de calor, para aplicação no modelo, é realizada a seguir através da utilização de dados experimentais da camada fina.

3.4.1. Fluxo de massa de vapor de água entre o grão e o ar

O fluxo de massa de vapor de água entre o ar e o grão está diretamente relacionado com a variação da massa de água no grão, conforme indica a primeira equação do sistema (3.41). Considerando o modelo de camada fina de dois compartimentos, representado pelo sistema (3.52), tem-se o teor de umidade média do grão como:

$$M = M_1 + M_2 \quad (3.56)$$

Assim,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial(M_1 + M_2)}{\partial t} = -q k_2 (M_2 - M_e)^n \quad (3.57)$$

Igualando a primeira equação do sistema (3.41) com a equação (3.57), o fluxo de massa pode ser expresso por:

$$\phi_m = \frac{\rho_g q k_2}{a} (M_2 - M_e)^n \quad (3.58)$$

De forma semelhante, se considerarmos a razão de umidade do grão, representada pelo sistema (3.53), tem-se:

$$\phi_m = \frac{\rho_g q k_2}{a} MR_2^n (M_0 - M_e)^n \quad (3.59)$$

3.4.2. Fluxo de calor entre o grão e o ar

O fluxo de calor é determinado considerando que a transferência de calor entre o ar de secagem e a superfície do grão ocorre, predominantemente, por convecção forçada, sendo expresso por:

$$\phi_q = h (T_g - T_a) \quad (3.60)$$

Sendo:

ϕ_q - fluxo de calor entre o grão e o ar ($W m^{-2}$);

h - coeficiente de transferência de calor por convecção ($W m^{-2} °C^{-1}$).

Khatchatourian e Oliveira, 2006, usando o método do regime térmico regular, com resultados de experimentos da dinâmica de secagem em camada fina de soja, considerando os efeitos da temperatura e da velocidade do ar de secagem e da temperatura do grão, propuseram equações para o cálculo do coeficiente de transferência de calor.

Uma variação temporal da temperatura adimensional do grão para diferentes velocidades e temperaturas do ar de secagem foi representada por funções lineares, permitindo a determinação dos coeficientes angulares k das mesmas. O coeficiente angular k é relacionado, para baixos valores do número de Biot, com o coeficiente de transferência de calor por convecção através da equação:

$$h = k \frac{\rho_g c_{p_g} V_g}{A_g} \quad (3.61)$$

k – taxa de aquecimento, representada pelo coeficiente angular da função linear (s^{-1}).

A influência da velocidade do ar de secagem sobre o coeficiente de transferência de calor foi determinada pela equação a seguir, que descreve satisfatoriamente a dinâmica de secagem para as condições analisadas:

$$h = 16.62 v_a^{0.5} \quad (3.62)$$

3.5. Equações do modelo matemático

As equações diferenciais parciais para o modelo matemático do secador de leito fixo 1D ($v_g=0$) obtidas da camada fina e do balanço de massa e energia estão sistematizadas a seguir.

Para camada fina, o modelo de dois compartimentos é representado pelas equações (3.53), mostradas anteriormente:

$$\begin{cases} \frac{\partial MR_1}{\partial t} = -k_1 (MR_1 - MR_2) \\ \frac{\partial MR_2}{\partial t} = -k_1 (MR_2 - MR_1) - q k_2 (M_0 - M_e)^{n-1} MR_2^n \end{cases} \quad (3.53)$$

Para camada espessa, equações (3.41):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial M}{\partial t} + v_g \frac{\partial M}{\partial x} = -\phi_m \frac{a}{\rho_g} \\ \frac{\partial T_g}{\partial t} + v_g \frac{\partial T_g}{\partial x} = -\frac{a \{ \phi_q + \phi_m [H_v + (c_{p_v} - c_{p_w}) T_g] \}}{\rho_g (c_{p_g} + M c_{p_w})} \\ \frac{\partial Y}{\partial t} + v_a \frac{\partial Y}{\partial x} = \phi_m \frac{a(1-\varepsilon)}{\rho_a \varepsilon} \\ \frac{\partial T_a}{\partial t} + v_a \frac{\partial T_a}{\partial x} = \frac{a(1-\varepsilon)}{\rho_a \varepsilon (c_{p_a} + Y c_{p_v})} \left[\phi_m c_{p_v} (T_g - T_a) + \phi_q \right] \end{array} \right. \quad (3.41)$$

Expandindo o escoamento para o caso bidimensional (2D), com o ar escoando na direção x e os grãos na direção y, e considerando o fluxo cruzado, o modelo matemático de secagem proposto fica:

Para camada fina (modelo de dois compartimentos):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial MR_1}{\partial t} = -k_1 (MR_1 - MR_2) \\ \frac{\partial MR_2}{\partial t} = -k_1 (MR_2 - MR_1) - q k_2 (M_0 - M_e)^{n-1} MR_2^n \end{array} \right. \quad (3.53)$$

Para camada espessa:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial M}{\partial t} + v_x \frac{\partial M}{\partial x} + v_y \frac{\partial M}{\partial y} = -\phi_m \frac{a}{\rho_g} \\ \frac{\partial T_g}{\partial t} + v_x \frac{\partial T_g}{\partial x} + v_y \frac{\partial T_g}{\partial y} = -\frac{a \{ \phi_q + \phi_m [H_v (c_{p_v} - c_{p_w}) T_g] \}}{\rho_g (c_{p_g} + M c_{p_w})} \\ \frac{\partial Y}{\partial t} + v_x \frac{\partial Y}{\partial x} + v_y \frac{\partial Y}{\partial y} = \phi_m \frac{a(1-\varepsilon)}{\rho_a \varepsilon} \\ \frac{\partial T_a}{\partial t} + v_x \frac{\partial T_a}{\partial x} + v_y \frac{\partial T_a}{\partial y} = \frac{a(1-\varepsilon)}{\rho_a \varepsilon (c_{p_a} + Y c_{p_v})} \left[\phi_m c_{p_v} (T_g - T_a) + \phi_q \right] \end{array} \right. \quad (3.63)$$

4. RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DO PROCESSO DE SECAGEM

O sistema de equações diferenciais parciais do modelo matemático proposto para a secagem de grãos em leito fixo 1-D e fluxo cruzado contínuo 2-D foi resolvido através do método das diferenças finitas utilizando os esquemas de MacCormack 1-D e MacCormack 2-D com esquema “time-split”. Apresenta-se neste capítulo a formulação desses esquemas.

4.1 Método das diferenças finitas

A solução das equações diferenciais (modelo matemático) é realizada através do método das diferenças finitas. A discretização, ou seja, a aproximação das equações diferenciais por um sistema de equações algébricas é realizada para as variáveis em pontos discretos no espaço e no tempo. A solução, em um domínio, implica na obtenção dos valores para a variável dependente f em cada ponto desse domínio, abrangida por uma malha.

A definição de uma malha considerando o problema unidimensional é mostrada na Figura 4.1, onde x_0 é um número real qualquer e Δx um número positivo.

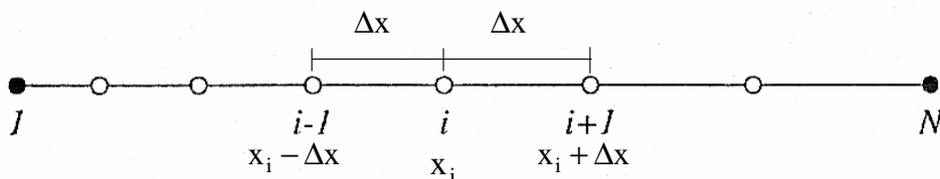


Figura 4.1 Malha unidimensional uniformemente espaçada.

A malha de passo Δx associada a um valor inicial x_0 é o conjunto de pontos:

$$x_i = x_0 \pm i \cdot \Delta x \quad (4.1)$$

em que:

$$i = 1, 2, 3, \dots, N.$$

A idéia geral do método das diferenças finitas tem por base a definição da derivada de uma função f contínua:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{x_i} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_i + \Delta x) - f(x_i)}{\Delta x} \quad (4.2)$$

Uma aproximação de diferenças finitas é fornecida pelo lado direito da equação (4.2), sem aplicar-se o limite da expressão, representando uma aproximação algébrica para a primeira derivada da função. Nos pontos da malha serão calculadas as aproximações de uma função $f(x)$.

A série de Taylor serve de base para as aproximações de diferenças finitas. Qualquer função contínua diferenciável $f(x)$ pode, nas proximidades de x_i , ser expressa como uma série de Taylor:

$$f(x) = f(x_i) + \Delta x \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_i + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right)_i + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left(\frac{\partial^3 f}{\partial x^3}\right)_i + \dots + \frac{(\Delta x)^n}{n!} \left(\frac{\partial^n f}{\partial x^n}\right)_i + H \quad (4.3)$$

em que H significa os termos de ordem superior e $\Delta x = x - x_i$.

Substituindo x por x_{i+1} ou x_{i-1} na série de Taylor e truncando no 3º termo, teremos a aproximação da derivada primeira, que pode ser realizada através de diferenças finitas adiantadas, atrasadas ou centrais. A equação (4.4) a seguir é uma equação de diferenças finitas adiantadas e a equação (4.5) uma equação de diferenças finitas atrasadas, e $O(\Delta x)$ representa o erro local de truncamento, devido à utilização de um número finito de termos na série de Taylor.

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (4.4)$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_i = \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (4.5)$$

Pode-se obter uma aproximação de $O(\Delta x)^2$, segunda ordem, realizando a subtração (4.4) - (4.5):

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2 \Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (4.6)$$

que é uma equação de diferenças finitas centrais para a primeira derivada da função $f(x)$.

Uma interpretação geométrica da aproximação de diferenças finitas é mostrada na Figura 4.2 (Ferziger e Peric, 1999). A primeira derivada $\frac{\partial f}{\partial x}$ em um ponto é a inclinação da tangente da curva $f(x)$ nesse ponto, identificada com a linha escrita exata. Essa inclinação pode ser aproximada pela inclinação de uma linha passando através de dois pontos próximos sobre a curva, originando as diferenças adiantadas, atrasadas e centrais.

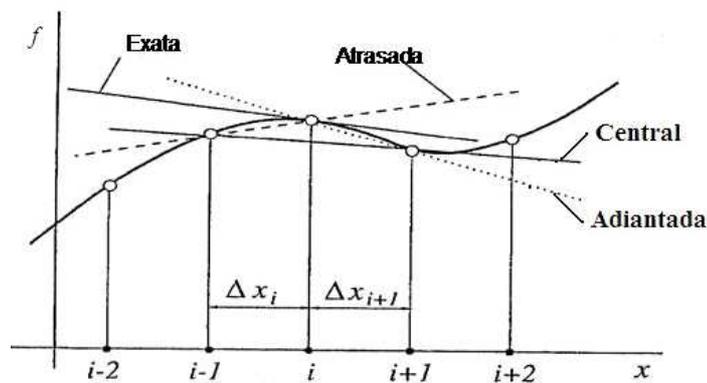


Figura 4.2 Aproximações da derivada.

A Figura 4.2 mostra que a aproximação por diferença central possui uma inclinação muito próxima da inclinação da linha exata. A precisão da aproximação aumenta quando os pontos se aproximam de x_i , ou seja, quando a malha é refinada.

4.2 Solução das equações diferenciais parciais

O sistema de equações diferenciais (hiperbólicas) parciais não lineares, representativas do problema de secagem, foi reescrito na forma matricial apresentada a seguir.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + v_x \frac{\partial U}{\partial x} + v_y \frac{\partial U}{\partial y} = F(t, x, y, U) \quad (4.7)$$

Em que:

$$U = (M, T_g, Y, T_a)^T$$

$$F = (f_1, f_2, f_3, f_4)^T$$

v_x - velocidade do ar, na direção x;

v_y - velocidade do grão, na direção y.

Para leito fixo e problema unidimensional (1-D) a velocidade do grão, v_y , é nula, e a resolução do sistema de equações é realizada pelo método de MacCormack. Para o secador de fluxo cruzado e bidimensional (2-D), o sistema de equações é resolvido pelo método de MacCormack 2-D com esquema “time-split”.

4.2.1 Método de MacCormack 1-D

O método de MacCormack (MacCormack, 1969) é geralmente usado para resolver sistemas de EDPs não lineares. O método na forma Preditor - Corretor é uma variação do método de Lax - Wendroff com dois passos. Os valores de previsão são definidos em (t^{n+1}, x_i) por $\overline{U_i^{n+1}}$, utilizando diferença adiantada, seguido por um passo com um corretor utilizando diferença atrasada (Cebeci et. all, 2005).

Na forma preditor, a equação fica:

$$\overline{U_i^{n+1}} = U_i^n - v_x \frac{\Delta t}{\Delta x} (U_i^{n+1} - U_i^n) + \Delta t \cdot F_i^n \quad (4.8)$$

em que:

$\overline{U_i^{n+1}}$ - é o valor predito em t^{n+1} . Não é o valor final da solução em t^{n+1} ;

$CFL = v_x \frac{\Delta t}{\Delta x}$ - é o número de Courant ou Courant-Friedrichs-Lewy.

Na forma corretor:

$$U_i^{n+1} = \frac{1}{2} \left[U_i^n + \overline{U_i^{n+1}} - CFL \left(\overline{U_i^{n+1}} - \overline{U_{i-1}^{n+1}} \right) \right] + \Delta t \cdot \frac{\overline{F_i^{n+1}}}{2} \quad (4.9)$$

A estabilidade do método de MacCormack, analisada através do método de Neumann é condicional, satisfeita para valores do número de Courant-Friedrichs-Lewy no intervalo $0 < CFL \leq 1$. O erro de truncamento do método é de segunda ordem $O(\Delta x^2, \Delta t^2)$.

4.2.2 Método de MacCormack 2-D com esquema “time-split”

A resolução do sistema de equações para o secador de fluxo cruzado foi realizada utilizando-se o método de MacCormack 2-D com esquema “time-split”. Foi admitido que a satisfação das condições de consistência e estabilidade é suficiente para a convergência do método, ou seja, o Teorema de Lax (Fortuna, 2000), demonstrado para equações lineares, serve também para o caso considerado.

O método iterativo de MacCormack com esquema “time-split” (MacCormack, 1971) transforma o problema bidimensional em problemas unidimensionais. Considerando-se o operador diferencial L_x , relacionado à variável espacial x , tem-se:

$$U_{i,j}^* = L_x (\Delta t_x) U_{i,j}^n \quad (4.10)$$

A aplicação do método de MacCormack (1969, 1971) corresponde à seqüência de operações Preditor e Corretor:

Preditor:

$$\overline{U}_{i,j}^* = U_{i,j}^n - v_x \frac{\Delta t_x}{\Delta x} (U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n) + \Delta t_x F_{i,j}^n \quad (4.11)$$

Corretor:

$$U_{i,j}^* = \frac{1}{2} \left[U_{i,j}^n + \overline{U}_{i,j}^* - \frac{v_x \Delta t_x}{\Delta x} \left(\overline{U}_{i,j}^* - \overline{U}_{i-1,j}^* \right) \right] + \frac{\Delta t_x \overline{F}_{i,j}^*}{2} \quad (4.12)$$

O asterisco (*) foi utilizado para designar os parâmetros com passos de tempo intermediários.

O número de Courant (ou Courant-Friedrichs-Lewy) CFL, expresso nas equações (4.11) e (4.12) é definido por:

$$CFL_x = \frac{v_x \Delta t_x}{\Delta x} \quad (4.13)$$

O operador L_y , com relação à variável espacial y é definido similarmente, substituindo V_x e t_x por V_y e t_y :

$$U_{i,j}^* = L_y(\Delta t_y) U_{i,j}^n \quad (4.15)$$

O esquema do método de MacCormack com esquema “time-split” pode ser apresentado na forma geral:

$$U_{i,j}^{n+1} = \left[L_x \left(\frac{\Delta t_x}{2m} \right) \right]^m L_y(\Delta t_y) \left[L_x \left(\frac{\Delta t_x}{2m} \right) \right]^m U_{i,j}^n \quad (4.15)$$

Para o caso geral o esquema será estável se para cada operador (camada temporal intermediária) o passo temporal não ultrapassar o valor máximo, e será consistente se a soma dos passos de tempo, para cada operador, coincidir.

Adotando-se um esquema de segunda ordem com valor $m = 1$, o método é apresentado como:

$$U_{i,j}^{n+1} = L_x \left(\frac{\Delta t_x}{2} \right) L_y(\Delta t_y) L_x \left(\frac{\Delta t_x}{2} \right) U_{i,j}^n \quad (4.16)$$

Para o esquema escolhido, com as variáveis temporal (t) e espacial (x e y), o procedimento realizado será: dá-se meio passo temporal em direção a x , seguido de um passo temporal em direção a y , e por fim, mais meio passo temporal em direção a x . Cada operador é composto por um preditor (com diferença progressiva) e um corretor (com diferença regressiva), exceto nos pontos de fronteira. A Figura 4.3 ilustra o procedimento deste esquema, em que se destaca os três operadores: o operador L_x para a metade do passo temporal (n^*), operador L_y para o passo temporal inteiro (n^{**}) e o operador L_x para a metade do passo temporal ($n+1$).

A realização dos cálculos ocorre através do seguinte procedimento: valores dos parâmetros de secagem para cada ponto do domínio (temperatura e conteúdo de umidade do ar e temperatura e teor de umidade dos grãos) são calculados no preditor, esses novos valores são os valores utilizados para atualizar os parâmetros do corretor, chegando-se assim ao final dos cálculos para um operador. Quando se inicia um novo operador, os valores do corretor do operador anterior são os valores considerados para a realização dos cálculos.

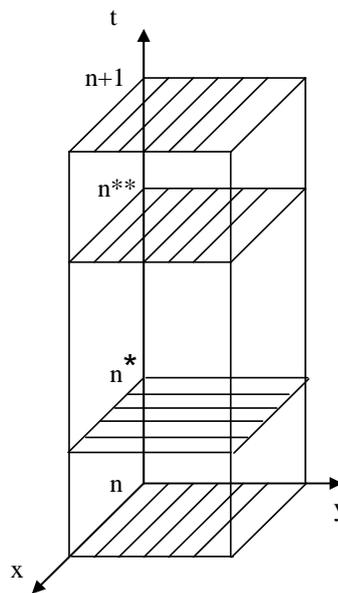


Figura 4.3 Método de MacCormack 2D com esquema time-split para três operadores.

Assumindo v_x e v_y constantes, o operador L_x para a metade do passo temporal e as derivadas em relação a x , é composto de:

Preditor:

$$\overline{U_{i,j}^{*n+1/2}} = U_{i,j}^n - v_x \frac{\Delta t_x}{2\Delta x} (U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n) + \frac{\Delta t_x}{2} F_{i,j}^n \quad (4.17)$$

Corretor:

$$U_{i,j}^{*n+1/2} = \frac{1}{2} \left[U_{i,j}^n + \overline{U_{i,j}^{*n+1/2}} - \frac{v_x \Delta t_x}{2\Delta x} \left(\overline{U_{i,j}^{*n+1/2}} - \overline{U_{i-1,j}^{*n+1/2}} \right) \right] + \frac{\Delta t_x}{2} \overline{F_{i,j}^{*n+1/2}} \quad (4.18)$$

O operador L_y para o passo temporal inteiro e as derivadas em relação a y é composto por:

Preditor:

$$\overline{U_{i,j}^{**}} = U_{i,j}^{*n+1/2} - v_y \frac{\Delta t_y}{\Delta y} \left[U_{i,j+1}^{*n+1/2} - U_{i,j}^{*n+1/2} \right] + \Delta t_y F_{i,j}^{*n+1/2} \quad (4.19)$$

Corretor:

$$U_{i,j}^{**} = \frac{1}{2} \left[U_{i,j}^{*n+1/2} + \overline{U_{i,j}^{**}} - v_y \frac{\Delta t_y}{\Delta y} \left(\overline{U_{i,j}^{**}} - \overline{U_{i,j-1}^{**}} \right) \right] + \Delta t_y \overline{F_{i,j}^{**}} \quad (4.20)$$

em que,

$CFL_y = \frac{v_y \Delta t_y}{\Delta y}$ é o número de Courant.

E novamente o operador L_x para a metade do passo temporal:

Preditor:

$$\overline{U_{i,j}^{*n+1/2}} = U_{i,j}^{**} - v_x \frac{\Delta t_x}{2\Delta x} (U_{i+1,j}^{**} - U_{i,j}^{**}) + \frac{\Delta t_x}{2} F_{i,j}^{**} \quad (4.21)$$

Corretor:

$$U_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{2} \left[U_{i,j}^{**} + \overline{U_{i,j}^{*n+1/2}} - \frac{v_x \Delta t_x}{2\Delta x} \left(\overline{U_{i,j}^{*n+1/2}} - \overline{U_{i-1,j}^{*n+1/2}} \right) \right] + \frac{\Delta t_x}{2} \overline{F_{i,j}^{*n+1/2}} \quad (4.22)$$

A estabilidade do método de MacCormack, analisada através do método de Neumann, é condicional, satisfeita para valores do número de Courant-Friedrichs-Lewy no intervalo $0 < CFL \leq 1$. O erro de truncamento do método é de segunda ordem $O(\Delta x^2, \Delta t^2)$.

5. EXPERIMENTOS DE SECAGEM EM CAMADA FINA E CAMADA ESPESSA

Apresentam-se neste capítulo os equipamentos e os procedimentos para a realização dos experimentos em camada fina e camada espessa. Para a camada fina o objetivo dos experimentos é determinar a dinâmica de secagem da soja no campo de abrangência da temperatura do ar de secagem de 45 a 110 °C, da velocidade do ar de 0 (secagem em estufa) a 2,5 m/s, da umidade relativa do ar de secagem de 10 a 30% e do teor de umidade inicial do grão de 13 a 32%. Para a camada espessa o objetivo é a determinação da dinâmica de secagem e a temperatura dos grãos para uma temperatura do ar de secagem de 105 °C, velocidade do ar de secagem de 0,5 m/s e teor de umidade inicial dos grãos de 22 % (b.s).

5.1 Experimentos de secagem em camada fina

O equipamento experimental e o procedimento para a realização dos testes em camada fina são apresentados nos itens a seguir.

5.1.1 Equipamento experimental para camada fina

O equipamento experimental utilizado para o estudo da dinâmica da secagem em camada fina e leito fixo é mostrado na Figura 5.1. O sistema permite a obtenção de um fluxo de ar e sua mistura com um fluxo de vapor saturado, controlando a temperatura e a umidade relativa do ar misturado.

O equipamento utilizado consiste em: um ventilador para insuflamento de ar acoplado a um variador de frequência que controla a rotação e o fluxo do ar de saída do ventilador; uma placa de orifício conectada a um manômetro de coluna inclinado, que permite a determinação da velocidade do ar; uma câmara de aquecimento do ar com resistências elétricas; um sistema de geração de vapor de água, com fonte de calor variável; um sistema de injeção e mistura do vapor de água com o ar aquecido na tubulação; um sistema de controle de temperatura do ar de aquecimento; uma câmara de secagem de grãos em camada fina; um sistema de aquisição de dados de temperatura e umidade relativa do ar de secagem. O sistema, a partir da câmara de aquecimento do ar de secagem, é termicamente isolado.

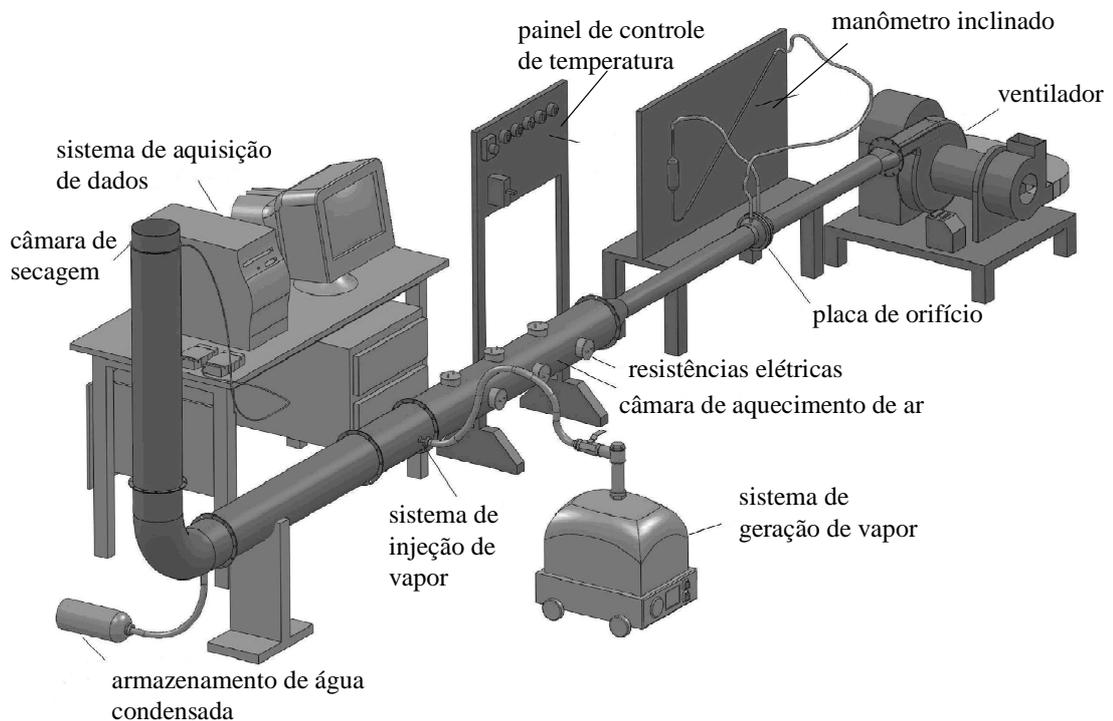


Figura 5.1 Equipamento experimental para secagem em camada fina.

De forma geral, os dispositivos do equipamento experimental compõem-se de:

1. Ventilador com motor elétrico de $\frac{3}{4}$ de CV e 3450 rpm;
2. Placa de aquisição de dados do tipo LR 7018, 16 bits, com 8 canais de leitura de dados. A capacidade de leitura é de até 10 leituras por segundo. Os termopares de leitura são do tipo MTK, tipo K Universal, para temperaturas na faixa de -40 a 204 °C, com precisão de $\pm 0,75\%$ da leitura;
3. Câmara de aquecimento do ar de secagem, composta de seis resistências elétricas de 600 W conectadas a potenciômetros para ajuste da temperatura;
4. Sistema gerador de vapor, com capacidade de 8 litros de água e capacidade de aquecimento de 1500 W;
5. Sistema de controle de temperatura e umidade relativa do ar: o sistema de controle de temperatura e umidade (painel de controle) é mostrado na Figura 5.2. Os diversos interruptores do painel permitem o acionamento das resistências elétricas, conforme a necessidade de estabelecimento da temperatura. Os potenciômetros possibilitam o

ajuste da temperatura no valor determinado no experimento;

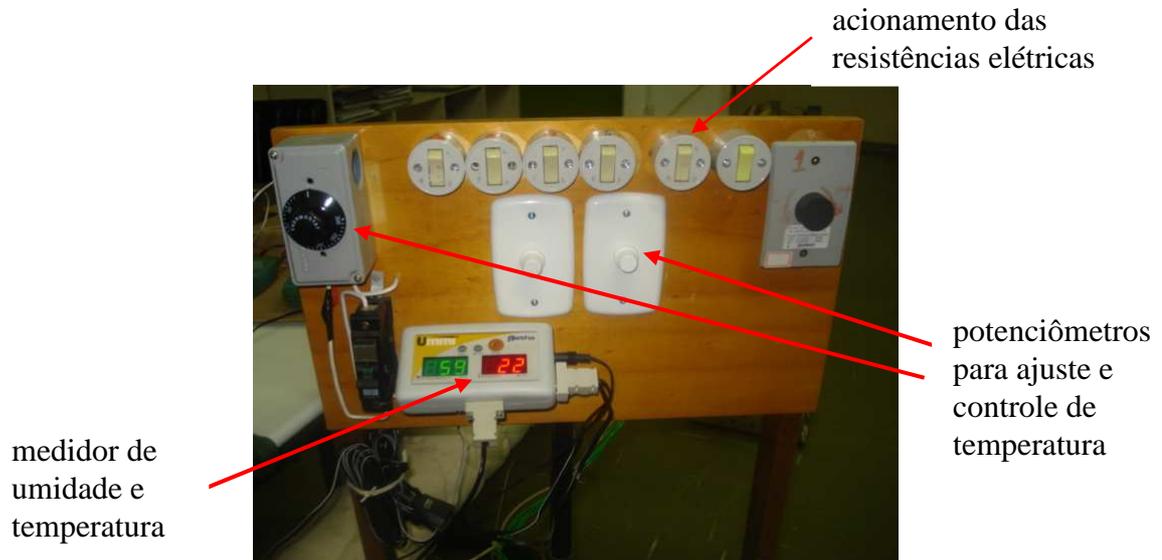


Figura 5.2 Sistema de controle de temperatura e umidade do equipamento experimental.

6. Câmara de secagem em camada fina, constituída por um tubo cilíndrico metálico de pequena altura com uma tela interna (Figura 5.3) sobre a qual é colocada uma massa de grãos. A massa de grãos é submetida a um fluxo de ar de secagem. Na região de entrada da câmara de secagem em camada fina é medida a temperatura e a umidade do ar de secagem (Figura 5.4).

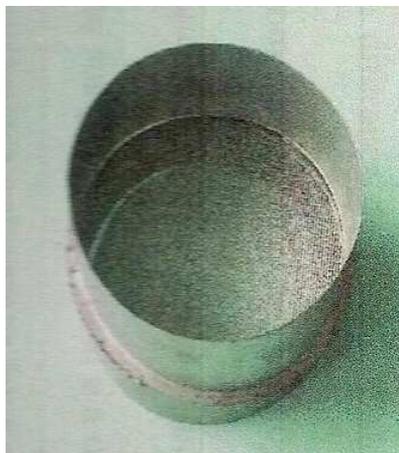


Figura 5.3 Câmara de secagem em camada fina.

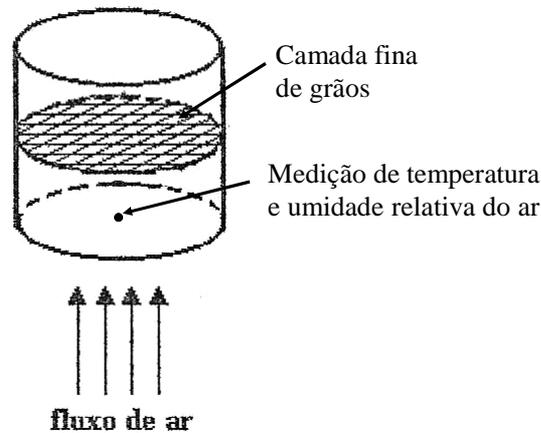


Figura 5.4 Representação da câmara de secagem em camada fina: locais de medição.

5.1.2 Procedimento experimental para a secagem em camada fina

Para a realização dos experimentos de secagem em camada fina no campo de abrangência necessário ao estudo, deve-se determinar o teor de umidade inicial dos grãos e também umedecê-los.

Para a determinação do teor de umidade inicial dos grãos utilizou-se o método direto de estufa a 105°C, sugerido pela norma MB-2809 da ABNT, que permite quantificar a perda de água dos grãos através de vaporização por aquecimento da água presente na amostra, sob condições controladas. Submete-se 15g de grãos à temperatura citada durante 24 horas, intervalo de tempo suficiente para que não ocorra mais a variação de massa entre as últimas medidas da massa de grãos. As massas foram medidas com uma balança semi-analítica de 10⁻² g de precisão.

Devem ser realizadas, no mínimo, cinco repetições por determinação, e o teor de umidade inicial dos grãos é a média do teor de cada repetição de amostra. O teor de umidade inicial dos grãos (M_0), em base seca, é expresso por:

$$M_0 = \frac{m_{gu} - m_{gs}}{m_{gs}} \quad (4.1)$$

em que:

m_{gu} – massa inicial de grãos úmidos (g);

m_{gs} – massa final de grãos secos (g).

Para se conseguir realizar os experimentos com vários teores de umidade inicial dos grãos foi necessário realizar o umedecimento dos mesmos, pois a soja adquirida não possuía a umidade desejada.

Para a realização do umedecimento os grãos foram espalhados em uma superfície plana, com espessura de no máximo dois grãos, e molhados homoganeamente com água destilada. A medição do teor de umidade dos grãos é realizada conforme o procedimento anterior.

Amostras de grãos de 200g com o teor de umidade prescrito para os experimentos são embaladas em sacos plásticos fechados para armazenamento em refrigerador com temperatura controlada, com o objetivo de conservar o teor de umidade.

Os experimentos de secagem em camada fina exigem uma seqüência de procedimentos. As amostras devem ser retiradas do refrigerador e deixadas em temperatura ambiente por um período de 24 horas, após, devem ser pré-aquecidas em estufa até a temperatura determinada no experimento, visando à homogeneização da temperatura do grão.

Os experimentos de secagem devem ser realizados somente após o equipamento utilizado para esse fim alcançar condições de equilíbrio, ou seja, quando a variação da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem for menor ou igual a 1°C e 1%, respectivamente, que a temperatura e umidade requeridas no experimento. O sistema de controle de temperatura e umidade relativa do ar permitiu o ajuste nessa faixa de utilização.

Após esses procedimentos pode-se iniciar o processo de secagem propriamente dito. Para uma temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem definidas, a massa da amostra da câmara de secagem é determinada em uma balança analítica, em intervalos regulares de tempo. O intervalo de tempo entre as medições da massa da amostra utilizado foi de 5 minutos, sendo a amostra retirada, medida e recolocada no equipamento de secagem em um tempo médio de aproximadamente 20 s.

Dessa forma, o procedimento permite a obtenção da dinâmica de secagem da soja para valores definidos de temperatura e velocidade do ar de secagem e do teor de umidade inicial do grão.

5.2 Experimentos de secagem em camada espessa

O equipamento experimental e o procedimento para a realização dos testes em camada espessa são apresentados na seqüência.

5.2.1 Equipamento experimental para camada espessa

Os experimentos em camada espessa foram realizados com o mesmo equipamento experimental de camada fina mostrado anteriormente, adicionando-se ao mesmo uma nova câmara de secagem para permitir a secagem de uma maior quantidade de soja. Uma fotografia parcial do equipamento, destacando a câmara de secagem em camada espessa é mostrada na Figura 5.5.



Figura 5.5 Equipamento experimental de secagem em camada espessa.

A câmara de secagem é constituída de oito seções de dimensões 0,05 x 0,13 x 0,13m, e uma altura total de 0,40m. A câmara foi isolada termicamente com lã de vidro em toda a sua área externa exposta.

Cada uma das seções da câmara é constituída de tela perfurada em sua parte inferior e deslocam-se sobre cantoneiras, sendo, portanto removíveis, o que permite a medição da massa de grãos contida na mesma durante o tempo de realização dos experimentos. A Figura 5.6 mostra os detalhes da câmara de secagem e das seções de secagem, sendo que nesta figura não está incluída a parte do isolamento frontal da câmara.

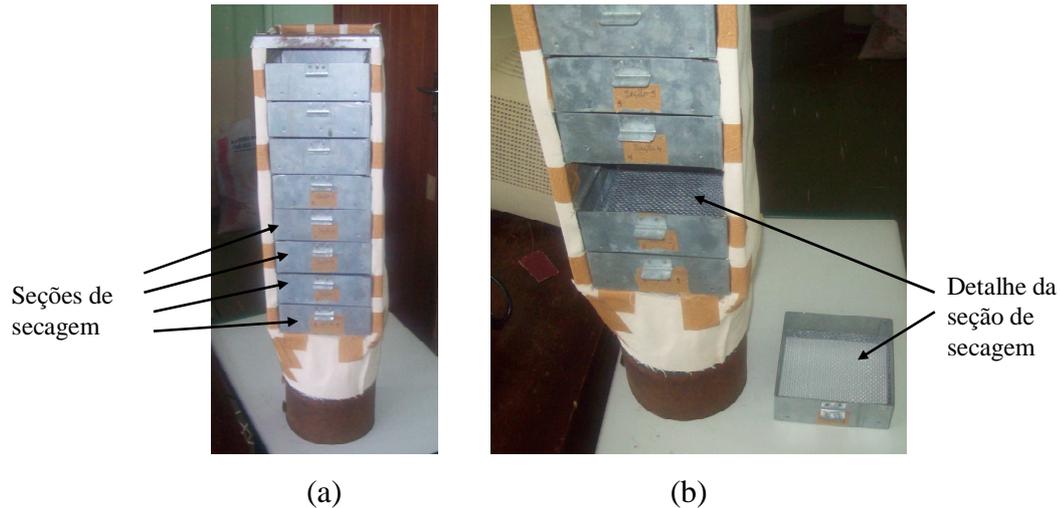


Figura 5.6 Câmara de secagem em camada espessa (a) Câmara completa com as seções de secagem, (b) Detalhe da seção de secagem.

Os experimentos foram realizados utilizando-se quatro seções (compartimentos) da câmara de secagem, o que permite uma altura (H) do leito de camada espessa de 0,20m. Em todas as quatro seções foram medidas as temperaturas do ar e do grão e a massa de grãos.

Para a medição das temperaturas do ar os termopares foram instalados na entrada da câmara de secagem e na saída de cada seção do secador. Em cada experimento realizado foram instalados dois termopares dentro de um grão em duas seções de teste escolhidas. As umidades iniciais dos grãos utilizados para os experimentos de secagem em camada espessa e leito fixo foi 18% (b.u), ou seja, 22% (b.s).

Os experimentos foram realizados seguindo a configuração geral para a sistematização dos pontos de medições indicados na Figura 5.7, onde os índices 1, 2, 3 e 4 indicam as seções do secador em camada espessa.

Na Figura 5.7 observam-se os pontos de medição em um dos experimentos de camada espessa. A seção 1 do secador, em destaque, refere-se à seção onde será determinada a variação da umidade do grão de soja com relação ao tempo, através da determinação da massa da mesma em intervalos periódicos. O ar de secagem é determinado através da temperatura de entrada (T_{entrada}) e da umidade relativa (UR_{ar}). Na seção 1, além da medição da massa dos grãos, realiza-se a medição da temperatura do ar (T_1) na saída da mesma. Para a seção 2 mede-se a temperatura do ar (T_2) e a temperatura do grão (T_g), o mesmo ocorrendo na seção 3, com a medição de T_3 e T_g . Na seção 4, a temperatura do ar na saída do secador (T_4) é medida. As medições das temperaturas nas seções são realizadas próximas às saídas das mesmas. A altura

do leito em cada seção é de aproximadamente 5 cm.

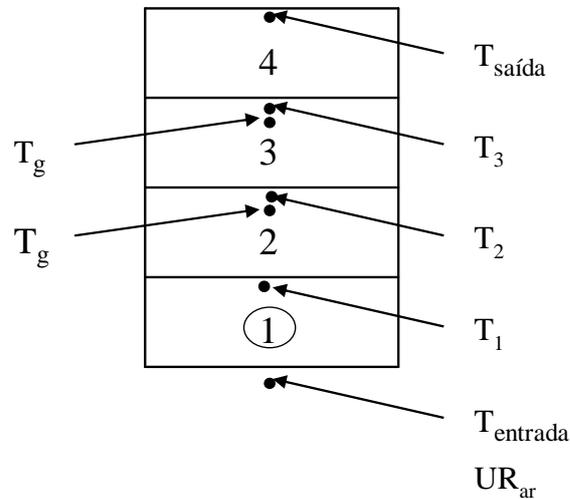


Figura 5.7 Experimentos de camada espessa: localização dos pontos de medição.

Para a medida da temperatura do ar nas seções os termopares foram encapsulados (envoltos) em uma fina tela de fibra, de forma que não houvesse o contato entre o termopar e os grãos, permitindo somente a leitura da temperatura do ar em escoamento nas seções. A medida da temperatura do grão foi realizada através da instalação do termopar dentro de um grão, e esse grão inserido na massa de grãos da seção do secador.

Outros experimentos foram realizados para as outras seções do secador, ou seja, as seções 2, 3 e 4, que terão respectivamente suas massas medidas. Quando a seção 2 é tomada como referência para medição da umidade média dos grãos através da determinação da massa, as medições realizadas no experimento são: temperatura e umidade relativa do ar de entrada, temperatura do ar nas seções 1, 2, 3 e 4 e temperatura de um grão nas seções 3 e 4. Para a seção 3 como referência, as medições realizadas são: massa de grãos da seção 3, temperatura e umidade relativa do ar de secagem na entrada do secador, temperaturas do ar nas seções 1, 2, 3 e 4, e temperatura do grão nas seções 2 e 4. Para a seção 4 como referência, mede-se: massa dos grãos na seção 4, temperatura e umidade relativa do ar de secagem na entrada do secador, temperatura do ar nas seções 1, 2, 3 e 4 e temperatura do grão nas seções 1 e 2.

Na Tabela 5.1 são ilustrados os experimentos realizados e as respectivas medições, indicando, em função do experimento de referência, as seções para determinação das massas

dos grãos (e conseqüentemente o teor de umidade médio dos mesmos), das temperaturas do ar e das temperaturas dos grãos.

Tabela 5.1 Experimentos e medições realizadas em camada espessa.

Experimento	Medição da massa (g)	Temperatura do ar (°C)	Temperatura dos grãos (°C)
Experimento 1	na seção 2	T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄	Tg ₃ , Tg ₄
Experimento 2	na seção 3	T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄	Tg ₂ , Tg ₄
Experimento 3	na seção 4	T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄	Tg ₁ , Tg ₂
Experimento 4	na seção 1	T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄	Tg ₂ , Tg ₃

5.2.2 Procedimento experimental para a secagem em camada espessa

O procedimento experimental utilizado para a obtenção dos dados em camada espessa, com o objetivo da determinação das variações do teor de umidade dos grãos e as temperaturas do ar e do grão, em função do tempo para um teor de umidade inicial do grão pré-especificado, foi:

1. Realizar a medida da umidade relativa, da temperatura e da pressão atmosférica do ambiente;
2. Realizar o ajuste da temperatura do ar de secagem na temperatura previamente especificada;
3. Regular a velocidade para a realização do ensaio. A velocidade foi controlada através da utilização de um anemômetro;
4. Preencher com a soja a ser seca as quatro seções do secador, medindo a massa das respectivas seções;
5. Realizar a instalação dos termopares nas seções do secador e em dois grãos em seções específicas;
6. Proceder à realização do experimento, tomando as medições de: temperatura e umidade relativa do ar à entrada do secador (ar de secagem); temperatura do ar (nas posições $y/H = 0,0$; $0,25$; $0,50$; $0,75$ e $1,0$, ou seja, $y = 0$ m, $y = 0,05$ m, $y = 0,010$ m, $y = 0,015$ m e $y = 0,2$ m); temperatura do grão nas posições y/H definidas conforme os experimentos realizados (Tabela 5.1); massa da seção especificada (1, 2, 3 ou 4). Todas as medições foram realizadas em intervalos de tempo pré-definidos.

A Tabela 5.2 mostra as condições de realização dos experimentos, do ambiente (pressão ambiente, temperatura média do ar ambiente e umidade relativa média do ar ambiente) e do ar de secagem (velocidade, temperatura média e umidade relativa).

Tabela 5.2 Condições de realização dos experimentos de secagem em camada espessa.

Experimento	Condições do ambiente			Condições do ar de secagem		
	P_{amb} (kPa)	T (°C)	UR (%)	v (m/s)	T (°C)	UR (%)
Experimento 1	97	24	78	0,5	101,9	2,2
Experimento 2	97,6	21	66	0,5	104,5	1,4
Experimento 3	97	21	61	0,5	105	1,3
Experimento 4	97,5	23	74	0,5	102,1	1,9

Os grãos de soja utilizados para os experimentos apresentam as seguintes características: diâmetro médio (d_m), de aproximadamente 5 mm, massa específica, $\rho_g = 1350 \text{ kg m}^{-3}$, e calor específico $c_{pg} = 1122 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM LEITO FIXO

Os resultados experimentais e as simulações numéricas em camada fina e camada espessa em leito fixo usando o modelo unidimensional são apresentados e comparados neste capítulo, com a finalidade de verificação e validação dos modelos propostos.

6.1 Resultados experimentais e simulações em camada fina

Os resultados obtidos nesta etapa foram comparados com os dados de Soares (1986), para verificação da concordância com os resultados dos experimentos próprios executados.

Nas Figuras 6.1 a 6.6 alguns dos dados experimentais da dinâmica de secagem de soja são apresentados através da razão de umidade MR , da taxa de secagem dMR/dt e do teor de umidade instantâneo M (b.s). Os resultados dos experimentos próprios apresentaram uma concordância satisfatória com os dados de Soares (1986), conforme ilustram as Figuras 6.1 e 6.2, e a Tabela 6.1, em que os valores médios das diferenças relativas percentuais indicadas são 1,84%, 1,79% e 4,16%, para os teores de umidade inicial dos grãos de 13%, 22% e 32%, respectivamente.

Conforme as figuras mostram, com o aumento do teor de umidade inicial do grão, nas mesmas temperaturas, as taxas de secagem aumentam em um estágio inicial. Com o decorrer do tempo essa taxa diminui e cessa a dependência com relação ao teor de umidade inicial, conforme mostra a Figura 6.3, e a relação dMR/dt apresenta pouca variação. Com o aumento da temperatura (Figura 6.4) a taxa de secagem aumenta em todos os valores do teor de umidade inicial do grão, manifestando-se de forma mais pronunciada nas temperaturas mais elevadas.

O aumento da temperatura de secagem influencia acentuadamente o processo de secagem, diminuindo o teor de umidade do grão e o tempo de secagem final. Tal fato ocorre devido ao aumento da disponibilidade de energia para a vaporização da água e da elevação do coeficiente de transferência de massa com o aumento da temperatura de secagem.

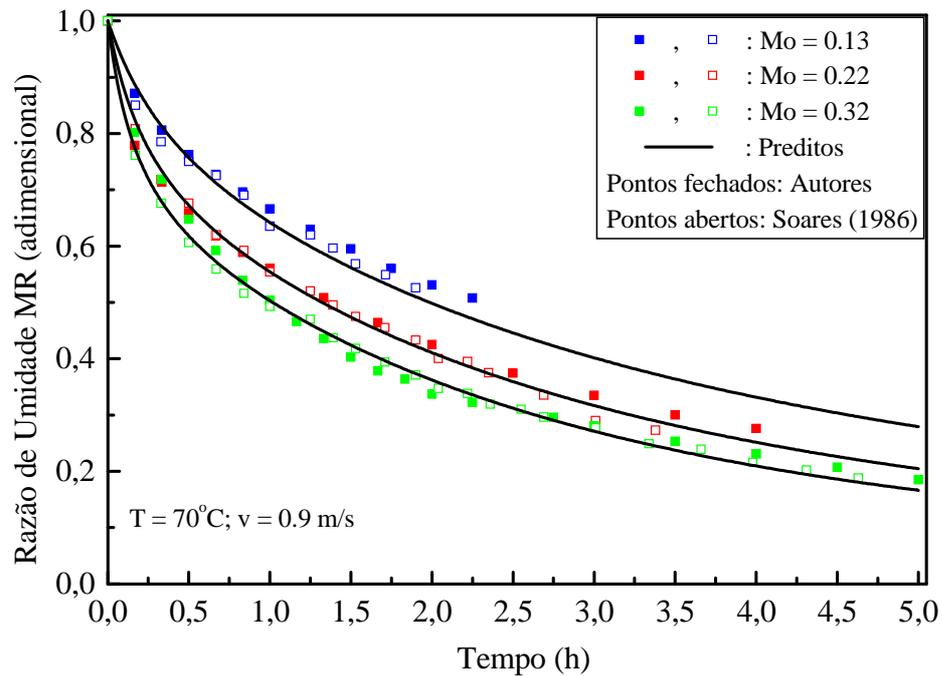


Figura 6.1 Dinâmica de secagem de soja em camada fina em diferentes teores de umidade inicial dos grãos: $T = 70^{\circ}\text{C}$ e $v = 0,9\text{ m/s}$.

Tabela 6.1 Diferença relativa percentual entre os dados de Soares e próprios para $T = 70^{\circ}\text{C}$ e $v = 0,9\text{ m/s}$.

Tempo (h)	$M_0 = 0,13$	$M_0 = 0,22$	$M_0 = 0,32$
0,17	2,48	3,64	5,32
0,33	2,67	0,67	6,29
0,5	1,60	2,54	6,82
0,67	0,28	0,32	5,87
0,84	0,87	0,59	4,52
1,0	4,88	1,21	2,13
1,25	1,66	0,19	1,49
1,5	0,17	1,67	5,05
1,75	0,53	2,93	5,40
1,9	3,27		
2,0		2,66	5,87
2,25			2,42
2,5		3,31	0,65
3,0			0,61
3,5			4,98
4,0			5,00
Valores médios das diferenças	1,84 %	1,79 %	4,16 %

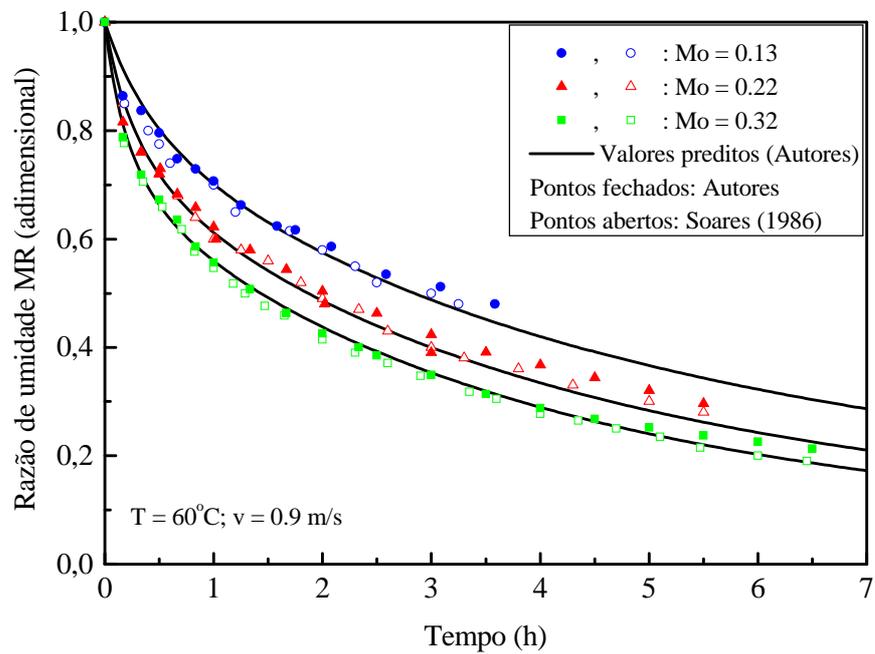


Figura 6.2 Dinâmica de secagem de soja em camada fina em diferentes teores de umidade inicial dos grãos: T = 60 °C e v = 0.9 m/s.

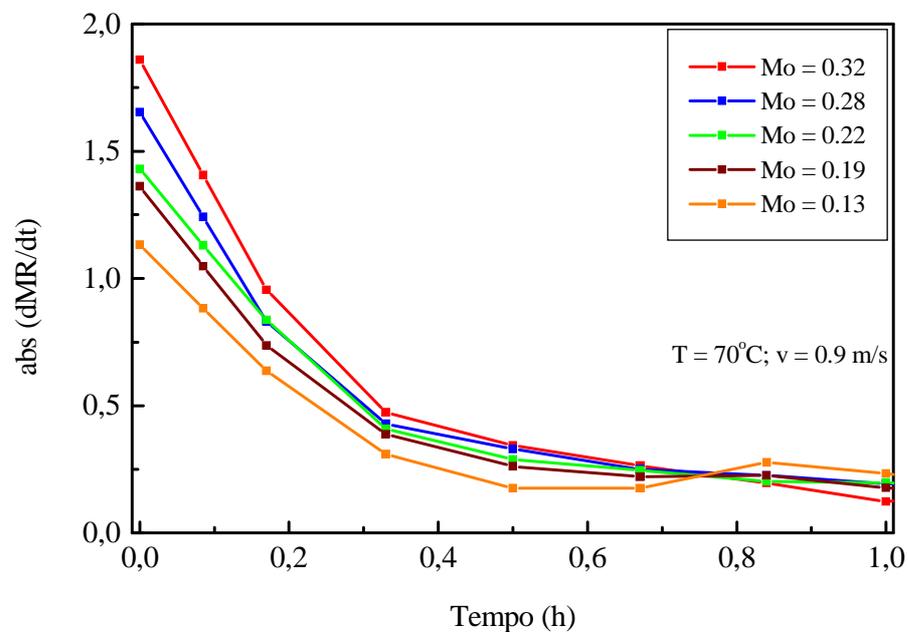


Figura 6.3 Dinâmica da variação da taxa de secagem absoluta de soja em camada fina em diferentes teores de umidade inicial dos grãos.

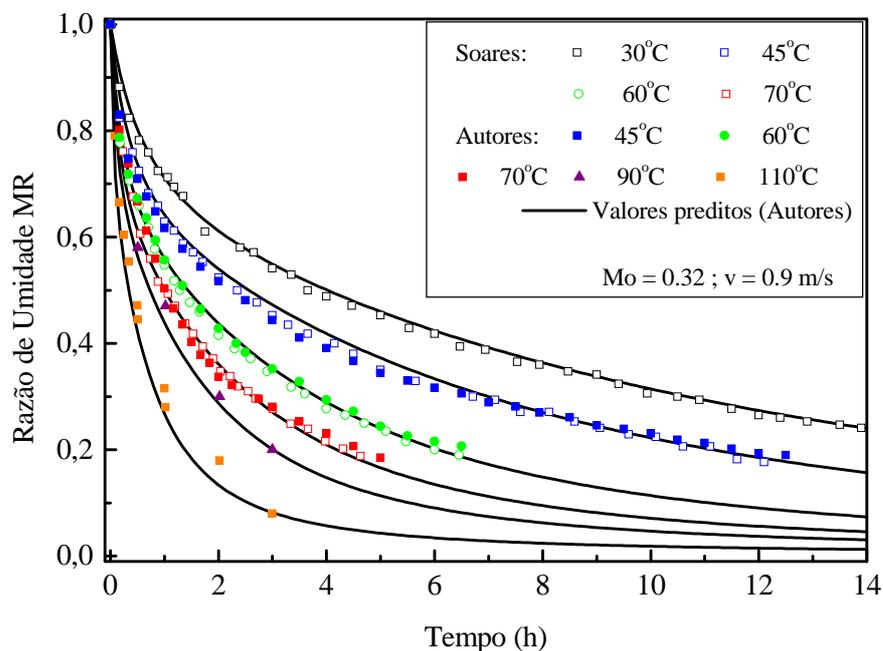


Figura 6.4 Influência da temperatura na dinâmica de secagem de soja em camada fina.

A Figura 6.5 mostra que o aumento da velocidade do ar de secagem (de 0 m/s a 0.9 m/s) inicialmente acarreta uma aceleração no processo de secagem. Isso mostra um papel essencial da transferência de massa na periferia do grão para pequenas velocidades do ar para o período inicial de secagem. Um posterior aumento da velocidade do ar quase não intensifica o processo de secagem. Com o decréscimo do teor de umidade do grão, como resultado da secagem, o papel da difusão de umidade dentro do grão aumenta e a influência da velocidade do ar sobre o processo de secagem diminui, conforme indica o menor distanciamento entre as curvas de razão de umidade para velocidades superiores a 0.9 m/s.

Na ausência da corrente de ar ($v = 0$, ou seja, convecção natural, secagem realizada em estufa) a taxa de redução do teor de umidade do grão praticamente não depende do teor de umidade inicial do mesmo (para concentração inicial maior do que 0.19). Em teores de umidades iniciais pequenos (menores que 0.13) a taxa de secagem decresce de forma essencialmente lenta.

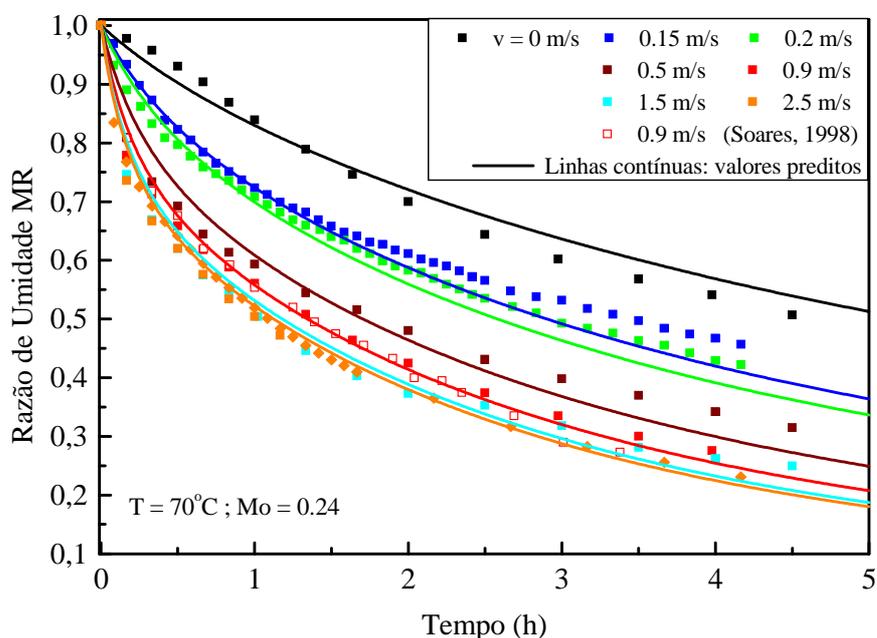


Figura 6.5 Influência da velocidade na dinâmica de secagem de soja em camada fina.

A dinâmica de secagem da soja em camada fina para dois teores de umidade inicial é apresentada na Figura 6.6. As curvas com pontos fechados correspondem ao caso de distribuição inicial natural, ou uniforme, da umidade dentro do grão (0.13 b.s e 0.19 b.s), quando os grãos foram submetidos durante um longo período de tempo para a equalização da umidade antes do processo de secagem (caso de umidade uniforme).

As curvas com pontos abertos apresentam uma continuação imediata da secagem dos grãos com teor de umidade inicial de 0.32 ou 0.22, exatamente após atingir o valor médio do teor de umidade igual a 0.19 e depois 0.13 (caso não uniforme).

Para o caso de umidade não uniforme dentro do grão pode ser admitido que uma queda significativa da taxa de secagem é condicionada pela redução da concentração nas camadas periféricas do grão durante a secagem. Isso indica que durante o processo de secagem a taxa de transferência de massa entre o ar e a superfície do grão (fluxo de massa), nos momentos iniciais, quando a concentração de umidade nas camadas periféricas do grão é relativamente alta, é determinada pelo processo de transferência de massa da superfície de contato entre o grão e o ar. Em momentos posteriores a difusão inicia para limitar a passagem de água dentro do grão e a concentração na periferia do mesmo é diminuída, reduzindo a intensidade do fluxo de massa.

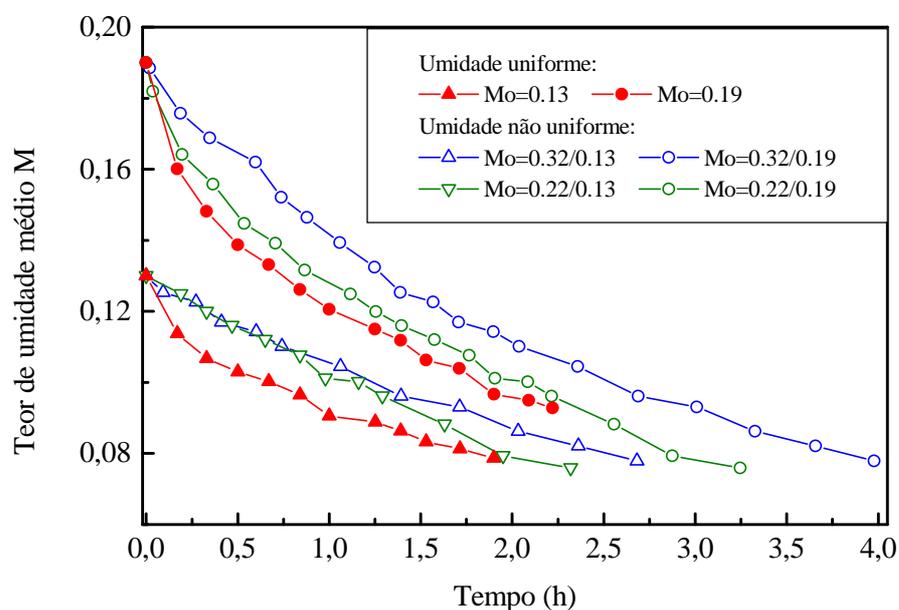


Figura 6.6 Dinâmica da secagem da soja em camada fina com distribuição inicial de umidade uniforme e não uniforme dentro do grão.

Assim, a distribuição de umidade no grão influencia na taxa de secagem. Em idêntica concentração média de umidade do grão, a taxa de secagem não é constante e depende da uniformidade da distribuição da umidade. Mesmo com a maior quantidade de água perdida pelo grão no momento corrente, a taxa de secagem é menor. A umidade deixa o grão pela superfície, então é lógico assumir que existe uma maior distribuição não uniforme de umidade relativa ao raio para o grão com maiores concentrações iniciais, em comparação com outros grãos. Assim, a parte mais úmida é concentrada na parte central do grão e a mais seca na sua periferia.

Para um coeficiente de difusão constante, a transferência de umidade para a periferia, nessas condições, deverá crescer devido ao maior gradiente de concentração, isto é, possui o efeito oposto ao observado. Considerando que o aumento da taxa de secagem é limitada pelo aumento da velocidade do ar (Figura 6.5), ou seja, a transferência convectiva de massa é limitada, é possível assumir que o coeficiente de difusão possui valor variável na direção radial. Esses fundamentos permitem apresentar condicionalmente cada grão consistindo de várias partes, diferindo pelo valor do coeficiente de difusão.

Portanto, o modelo de secagem deve considerar o processo de difusão da água e a distribuição não uniforme da umidade com relação ao raio dentro do grão, e a transferência de

massa no contato superficial entre o grão e o ar.

A Figura 6.6 mostra que o coeficiente de difusão médio depende da distribuição de umidade dentro do grão. Para a parte localizada no centro do grão, o coeficiente de difusão é maior do que na parte periférica, pois o coeficiente de difusão diminui com a redução do teor de umidade. No caso ideal para o cálculo poderia ser escolhida uma variação contínua do coeficiente de difusão ao longo do raio do grão. Isso levaria a uma grande complexidade nos cálculos pela não linearidade da equação (2.38).

Para evitar essa dificuldade e ao mesmo tempo levar em conta a não uniformidade do coeficiente de difusão ao longo do raio, nesse trabalho foi proposto um modelo de dois compartimentos, onde os coeficientes de difusão médios são diferentes, mas variam em função da temperatura. A divisão em mais compartimentos poderia ser escolhida, mas as simulações mostraram uma boa concordância com os dados experimentais.

A determinação experimental da distribuição do teor de umidade dentro do grão é bastante complexa. Por isso, ao invés da utilização do modelo de parâmetros distribuídos, nesse trabalho foi aplicado o modelo de parâmetros concentrados, com a determinação dos coeficientes de secagem k_1 e k_2 (Figuras 3.4 e 3.5). O grão foi dividido hipoteticamente em dois compartimentos, onde as concentrações de água foram consideradas uniformes em cada um deles e foi admitido que o movimento da água ocorre pela transferência de massa entre os compartimentos interno e externo (compartimentos 1 e 2), e externo e o ar de secagem. Como vantagem dessa aplicação tem-se a consideração de duas concentrações dentro do grão.

A dinâmica de secagem em cada compartimento, representada pelas razões de umidade MR_1 e MR_2 e pela razão média de umidade MR é mostrada na Figura 6.7 para os compartimentos com volumes iguais. Os coeficientes correspondentes nas equações (3.53) foram determinados para se obter a melhor coincidência com os dados experimentais para a razão de umidade média.

Os resultados da simulação, pelo modelo de camada fina proposto, são apresentados nas curvas contínuas (valores preditos) das Figuras 6.1, 6.2, 6.4 e 6.5. Os volumes dos compartimentos 1 e 2 são assumidos iguais e a constante n é considerada igual a 2. Esses resultados apresentam concordância satisfatória com os valores dos experimentos próprios realizados e com os valores de Soares (1986).

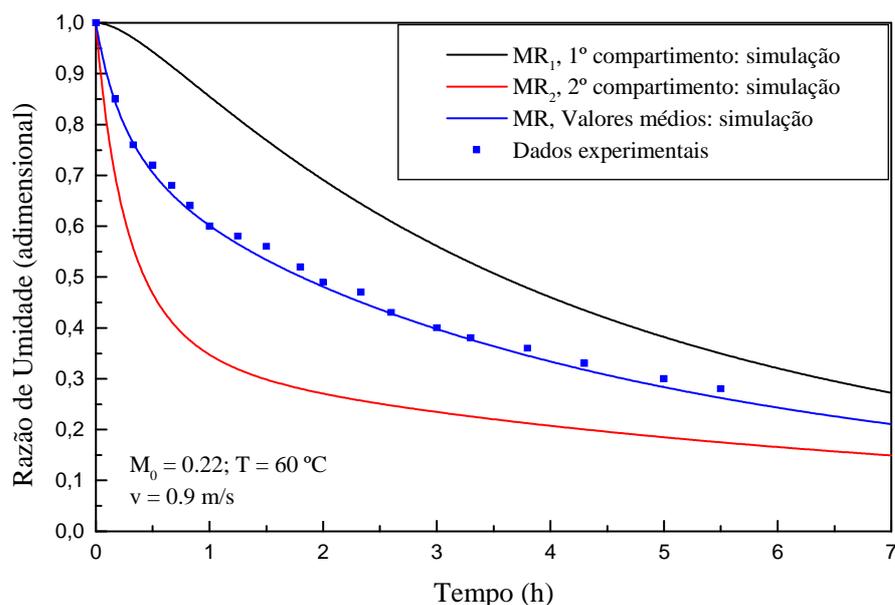


Figura 6.7 Dinâmica de secagem nos compartimentos 1 e 2 (MR_1 e MR_2) e valor médio MR , segundo o modelo de dois compartimentos.

Para a dinâmica de secagem de soja em camada fina em diferentes teores de umidade inicial dos grãos com $T = 70\text{ }^\circ\text{C}$ e $v = 0,9\text{ m/s}$ (Figura 6.1) as diferenças relativas médias percentuais entre os dados experimentais próprios e os resultados da simulação com relação à razão de umidade MR são: 3,75% para $M_0=0,13$; 3,79% para $M_0=0,22$ e 4,77% para $M_0=0,32$. A influência da temperatura do ar de secagem na razão de umidade (Figura 6.4) apresentou as seguintes diferenças relativas médias: 9,5% para $T = 110^\circ\text{C}$; 3,86% para $T = 90^\circ\text{C}$, e 5,45% para $T = 70\text{ }^\circ\text{C}$. A velocidade do ar de secagem sobre a razão de umidade (Figura 6.5) indica as diferenças relativas médias de: 6,18% para $v = 0,5\text{ m/s}$; 3,16% ($v = 0,9\text{ m/s}$); 6,71% ($v = 1,5\text{ m/s}$) e 1,97% ($v = 2,5\text{ m/s}$).

A Figura 6.8 apresenta a influência da umidade relativa do ar de secagem no processo de secagem em camada fina. Essa influência é importante na predição do tempo de secagem em períodos de chuva ou em regiões de clima úmido. O valor da umidade relativa do ar, $UR=5\%$, à temperatura do ar de secagem de $T=70\text{ }^\circ\text{C}$ corresponde à umidade do ar natural de 66% a $T=20\text{ }^\circ\text{C}$, reduzida pelo aquecimento do ar de $20\text{ }^\circ\text{C}$ a $70\text{ }^\circ\text{C}$. Os valores de umidade relativa do ar de secagem de 13% e 21% são obtidos pela injeção de vapor no ar aquecido.

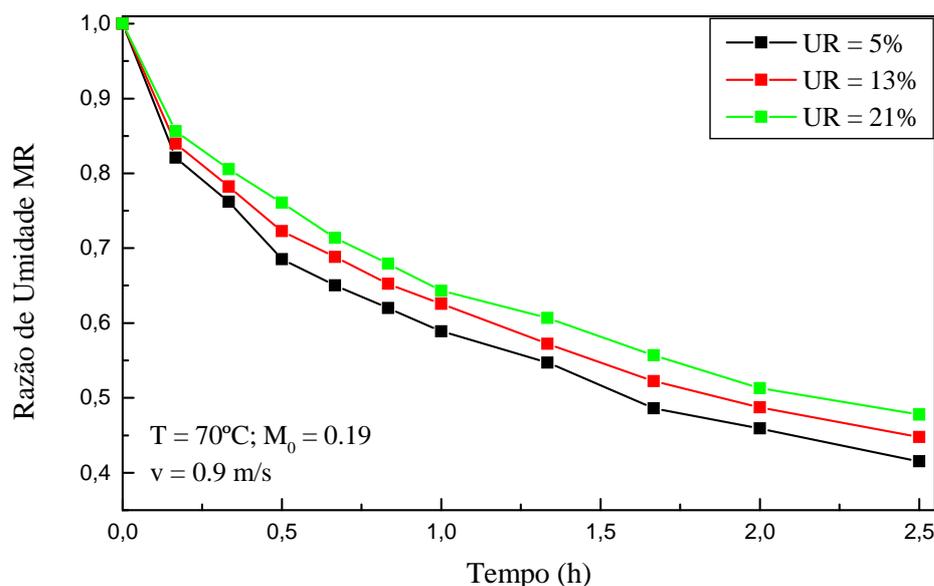


Figura 6.8 Influência da umidade relativa do ar na secagem em camada fina.

O acréscimo do ar úmido altera significativamente o processo de secagem. Para o valor da umidade relativa do ar de secagem de 21% o decréscimo do processo de secagem torna-se substancial.

A influência da umidade relativa do ar é implementada no modelo pelo teor de umidade de equilíbrio M_e , conforme a equação de Dalpasquale (eq. 2.13). Apesar da direção qualitativa correta dessa influência, sua estimativa quantitativa deve ser aperfeiçoada.

6.2 Resultados experimentais e simulações em camada espessa

Os experimentos de secagem em camada espessa foram realizados para velocidade do ar de secagem de 0.5 m/s e condições do ambiente e do ar de secagem na entrada do secador conforme a Tabela 5.2.

Os valores experimentais do comportamento da temperatura do ar de secagem, da temperatura dos grãos e do teor de umidade dos grãos obtidos para o secador de leito fixo são mostrados nas Figuras 6.9 a 6.16, para os vários experimentos realizados. A variação da temperatura do ar é determinada em $y/H = 0.0$ (entrada do secador), $y/H = 0.25$ (seção 1 do secador), $y/H = 0.50$ (seção 2), $y/H = 0.75$ (seção 3) e $y/H = 1.0$ (seção de saída do secador). A temperatura dos grãos foi determinada em $y/H = 0.25$, $y/H = 0.50$, $y/H = 0.75$ e $y/H = 1.0$. O

teor de umidade dos grãos, em base seca, teve sua determinação avaliada no ponto médio das seções, ou seja, em $y/H = 0.125$, $y/H = 0.375$, $y/H=0.625$ e $y/H=0.875$.

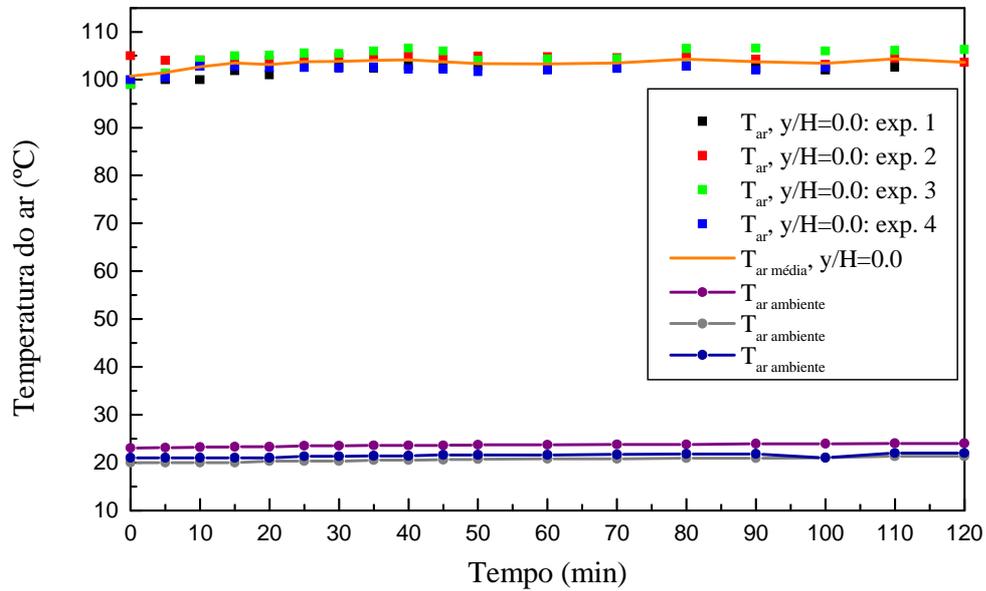


Figura 6.9 Dados experimentais em camada espessa: temperatura do ar de secagem e temperatura ambiente em $y/H = 0.0$ (entrada do secador) durante os ensaios realizados.

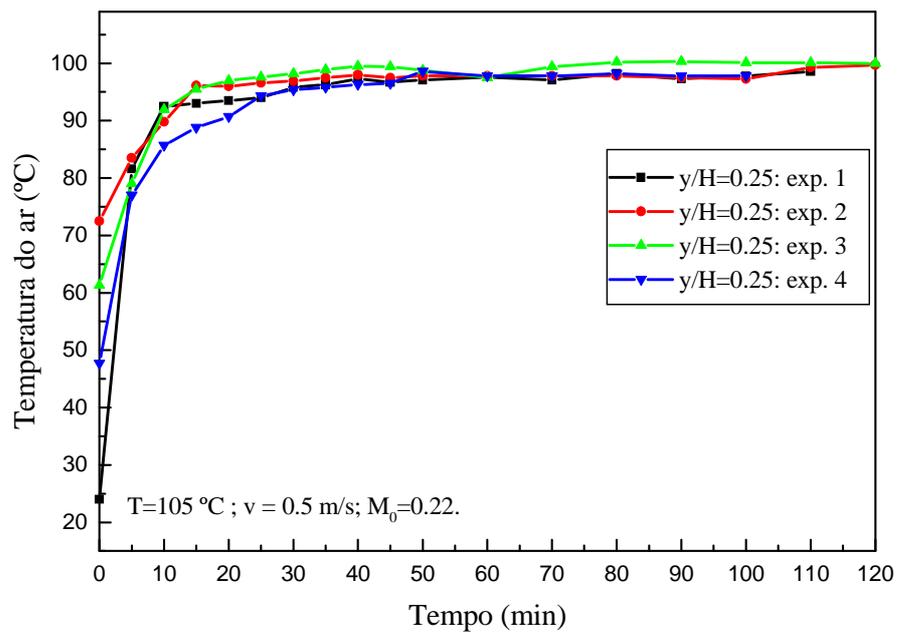


Figura 6.10 Dados experimentais em camada espessa: temperatura do ar na seção 1 ($y/H=0.25$) do secador.

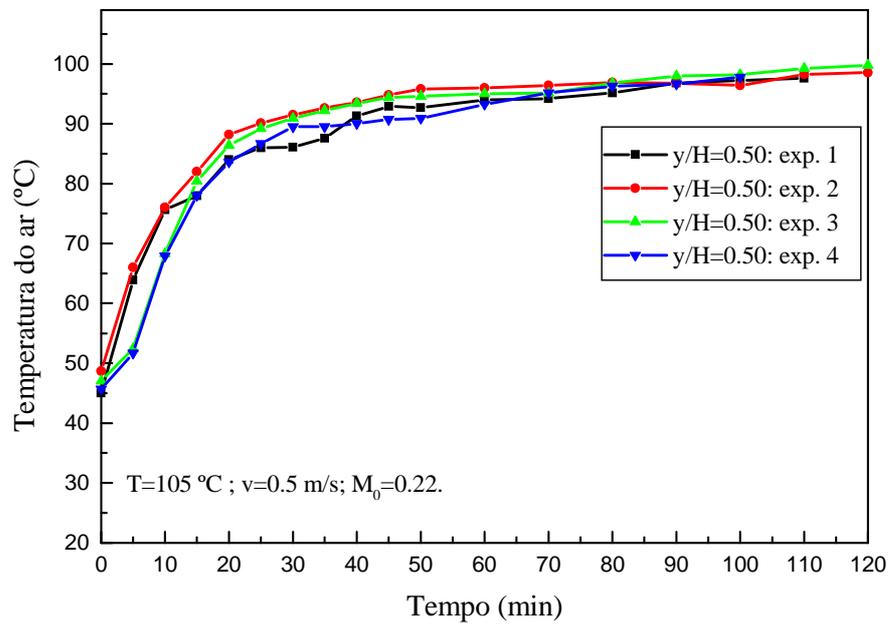


Figura 6.11 Dados experimentais em camada espessa: temperatura do ar na seção 2 ($y/H=0.50$) do secador.

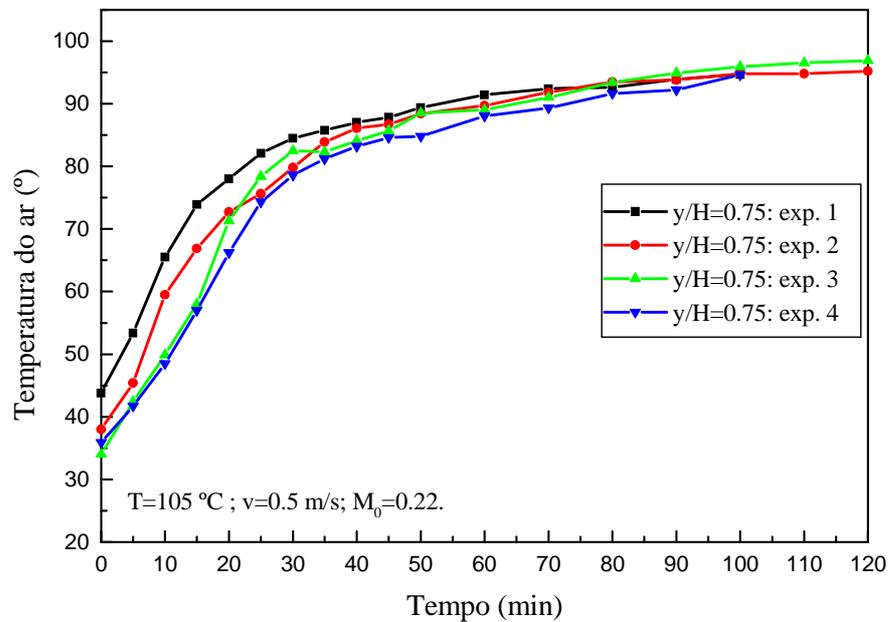


Figura 6.12 Dados experimentais em camada espessa: temperatura do ar na seção 3 ($y/H=0.75$) do secador.

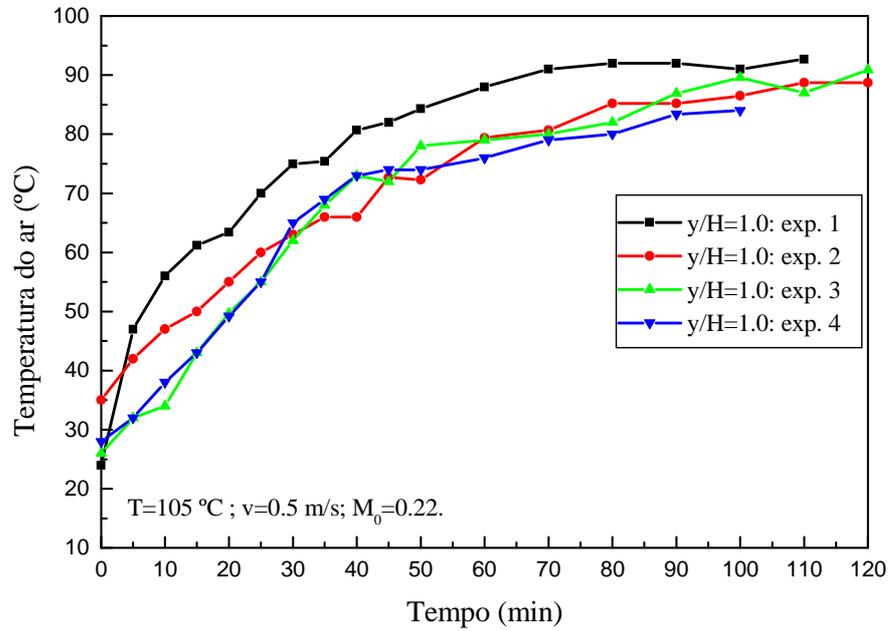


Figura 6.13 Dados experimentais em camada espessa: temperatura do ar na seção 4 ($y/H=1.0$) do secador.

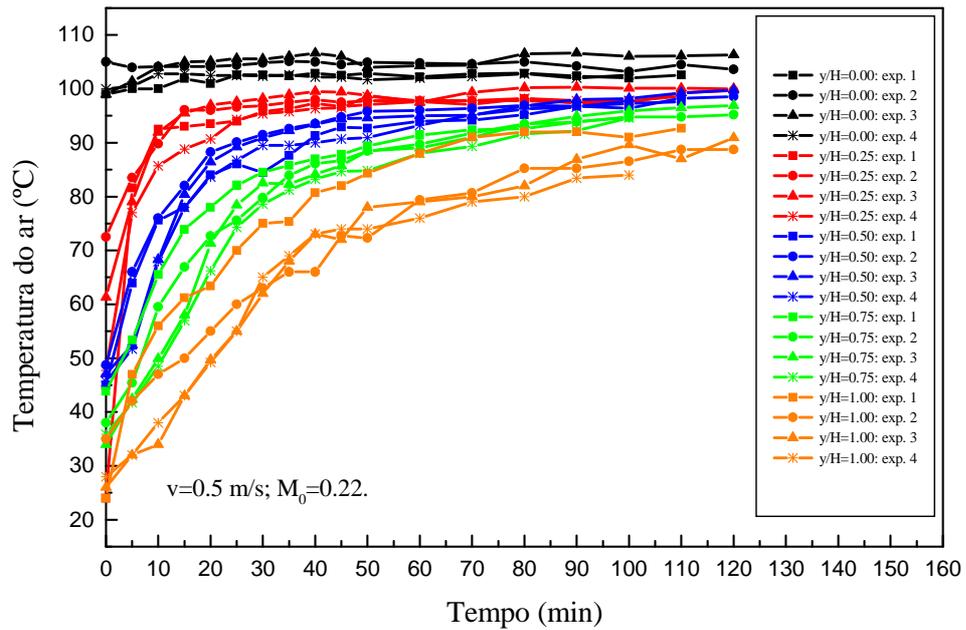


Figura 6.14 Experimentos em camada espessa: temperatura do ar nas seções do secador.

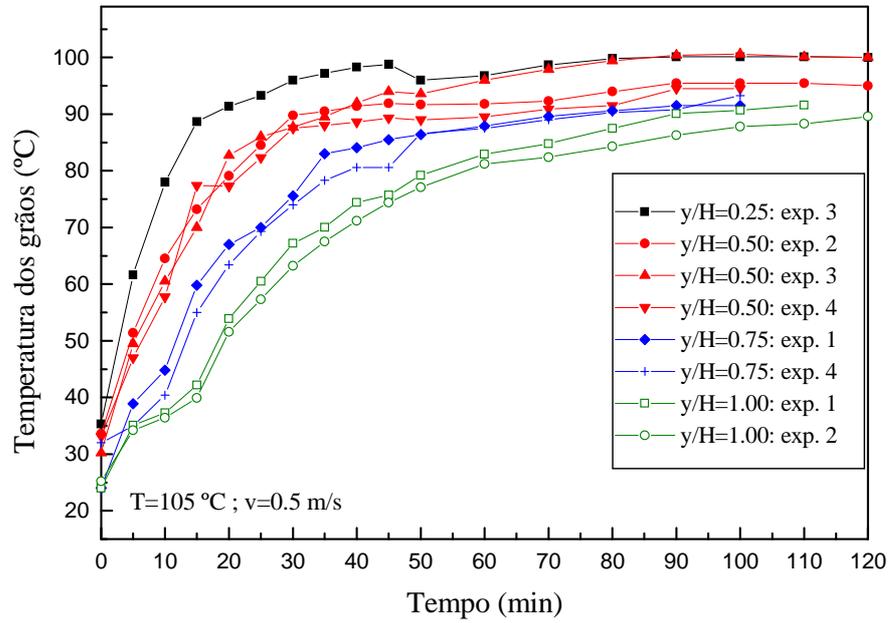


Figura 6.15 Dados experimentais em camada espessa: temperatura dos grãos.

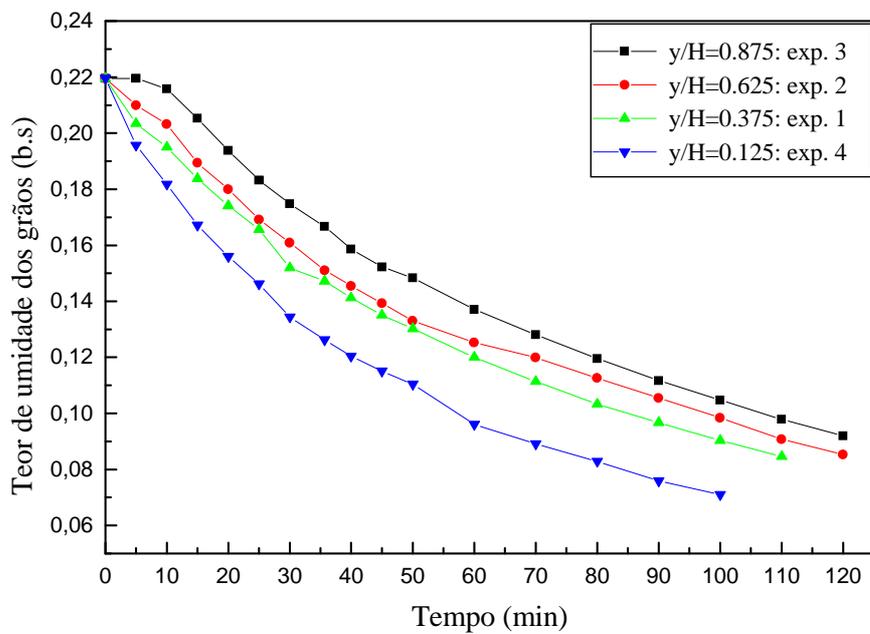


Figura 6.16 Dados experimentais em camada espessa: teor de umidade dos grãos.

As equações do sistema de secagem em camada espessa e leito fixo 1-D (equações 3.41) foram simuladas e comparadas com os dados experimentais para validação do modelo proposto.

Para a simulação numérica foram utilizados os dados a seguir:

$$a = 800 \text{ m}^{-1};$$

$$c_{pv} = 1864,7 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1};$$

$$c_{pg} = 1122 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1};$$

$$c_{pw} = 4178 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1};$$

$$\varepsilon = 0.45;$$

$$H_v = 2.357 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1};$$

$$\rho_{ar} = 1.16 \text{ kg m}^{-3};$$

$$\rho_g = 1350 \text{ kg m}^{-3}.$$

A dinâmica de secagem, indicada pela variação do teor de umidade dos grãos em função do tempo, da soja em camada espessa experimental e simulada é comparada na Figura 6.17. As diferenças relativas percentuais médias entre o experimento e a simulação, nas seções, são: 4,91% (para $y/H=0.125$); 6,10% ($y/H=0.375$); 7,29% ($y/H=0.625$) e 4,90% ($y/H=0.875$). Os resultados da simulação descrevem de forma razoável o processo de secagem. Conforme indicam as curvas, de uma forma geral o processo de secagem simulado é mais lento (menos intenso) que o experimental, no período de tempo inicial e intermediário.

A variação do teor de umidade dos grãos simulada para todas as seções do secador, indicando os pontos de entrada, de saída e médio de cada uma das quatro seções é mostrada na Figura 6.18.

As simulações numéricas para a variação da temperatura do ar com relação ao tempo de secagem, em comparação com a temperatura obtida nos experimentos é mostrada na Figura 6.19. A Figura 6.20 mostra essa comparação para a temperatura dos grãos. Ambas, temperaturas do ar e dos grãos apresentam concordância satisfatória com os resultados experimentais. As diferenças relativas médias entre os valores experimentais e simulados são: 3,65% ($y/H=0.25$), 2,98% ($y/H=0.50$), 3,74% ($y/H=0.75$) e 4,98% ($y/H=1.0$), para a temperatura do ar, e, 5,12% ($y/H=0.25$), 7,04% ($y/H=0.5$), 6,17% ($y/H=0.75$) e 4,61%

($y/H=1.0$), para a temperatura dos grãos.

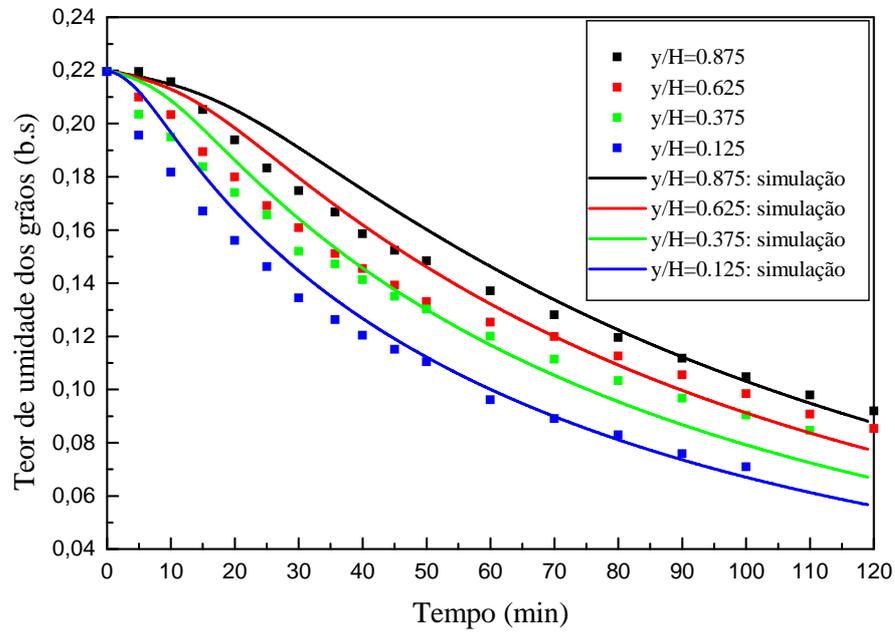


Figura 6.17 Simulação e experimentação em camada espessa: teor de umidade dos grãos ($T_{ar}=105\text{ °C}$ e $v = 0,5\text{ m/s}$).

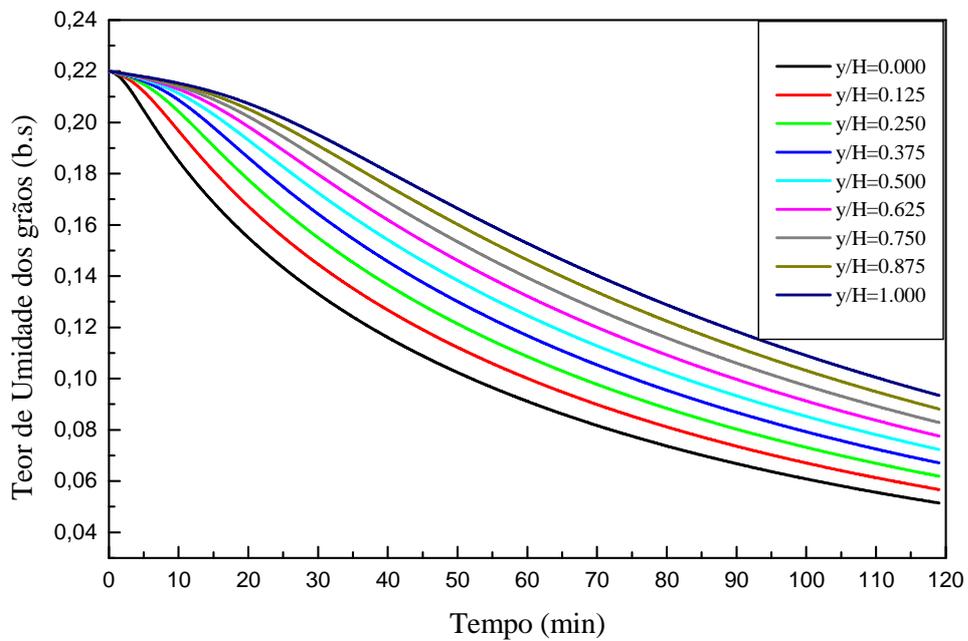


Figura 6.18 Simulação em camada espessa: teor de umidade dos grãos ($T_{ar}=105\text{ °C}$ e $v=0,5\text{m/s}$).

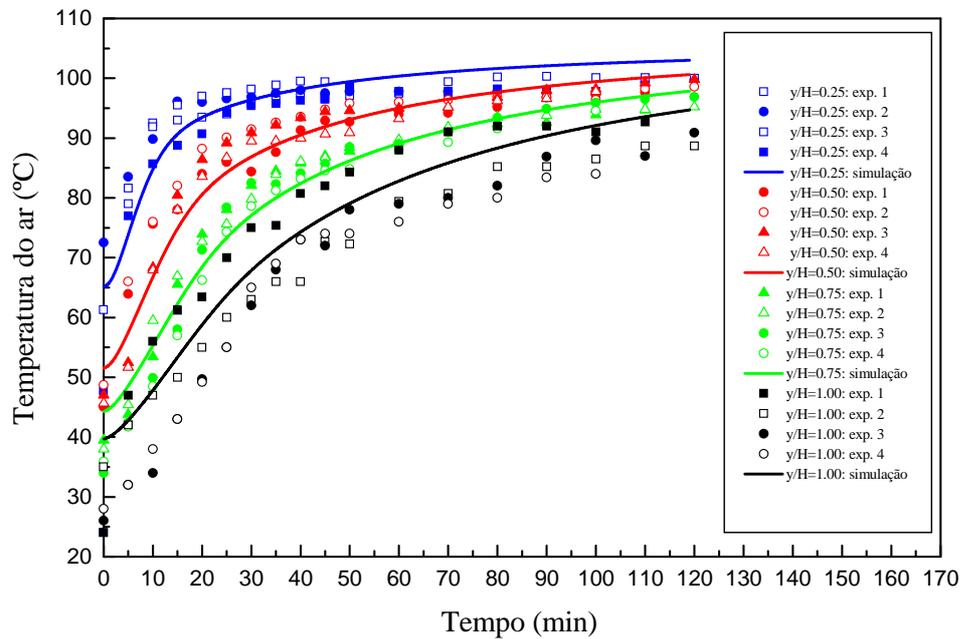


Figura 6.19 Simulação e experimentação em camada espessa: temperatura do ar ($T_{\text{ar}}=105^{\circ}\text{C}$ e $v = 0,5$ m/s).

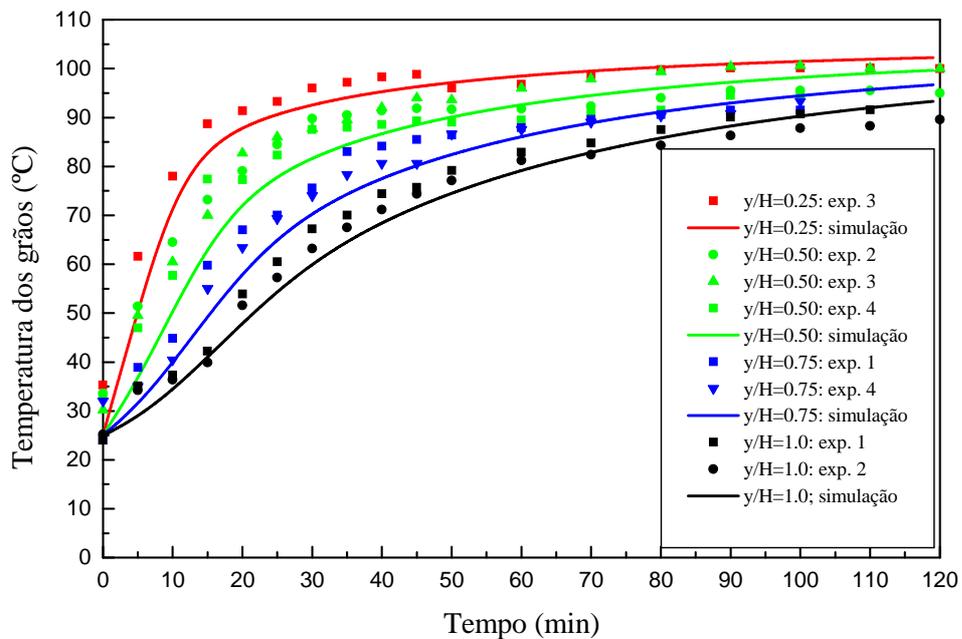


Figura 6.20 Simulação e experimentação em camada espessa: temperatura dos grãos ($T_{\text{ar}}=105^{\circ}\text{C}$ e $v = 0,5$ m/s).

As Figuras 6.21 e 6.22 mostram a variação da temperatura do ar e dos grãos simuladas para o tempo de secagem estipulado e no campo de abrangência da variação da altura do secador. Observa-se o efeito da transferência de calor do ar para o grão, com o ar a uma temperatura de entrada de 105 °C ($y/H = 0.0$) e em torno de 95 °C na seção de saída ($y/H=1.0$). O grão, por sua vez, apresentou uma elevação na sua temperatura inicial de 25 °C para 102 °C na seção de entrada ($y/H = 0.0$) e de cerca de 92°C na seção de saída ($y/H = 1.0$).

Estas figuras e as anteriores mostram que na passagem do ar pelo leito fixo a massa de grãos é aquecida, tendo a sua temperatura aumentada, e o ar tem a sua temperatura diminuída nas diversas seções, conforme aumenta a altura do leito.

O comportamento do teor de umidade do grão, ou perda de água do grão, varia mais acentuadamente nas camadas inferiores, que recebem a frente de secagem com uma temperatura maior. Portanto, as camadas inferiores possuirão um menor teor de umidade e as camadas superiores um maior teor de umidade durante o processo de secagem.

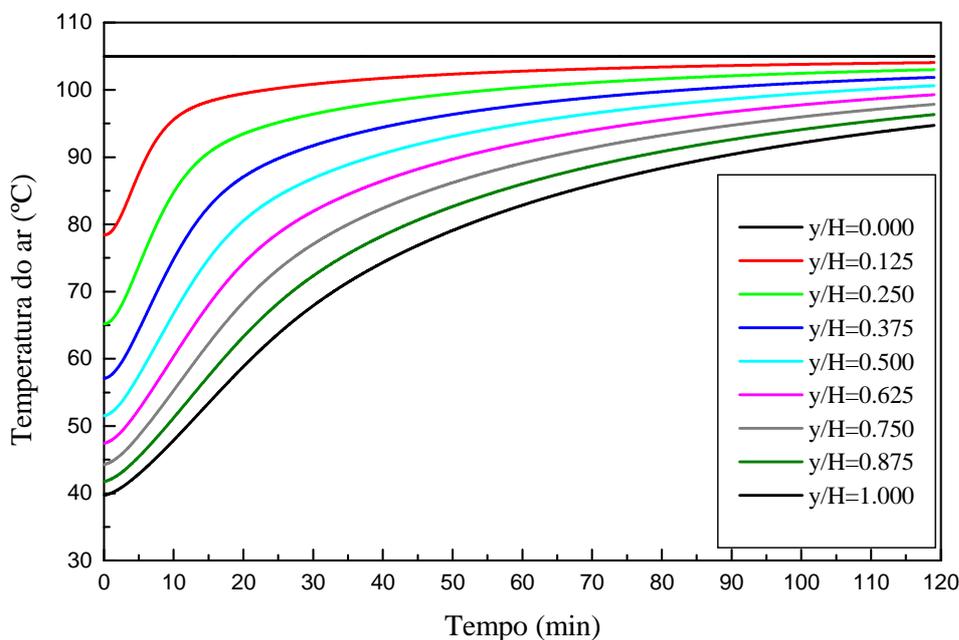


Figura 6.21 Simulação em camada espessa: variação da temperatura do ar ($T_{ar}=105$ °C e $v=0,5$ m/s).

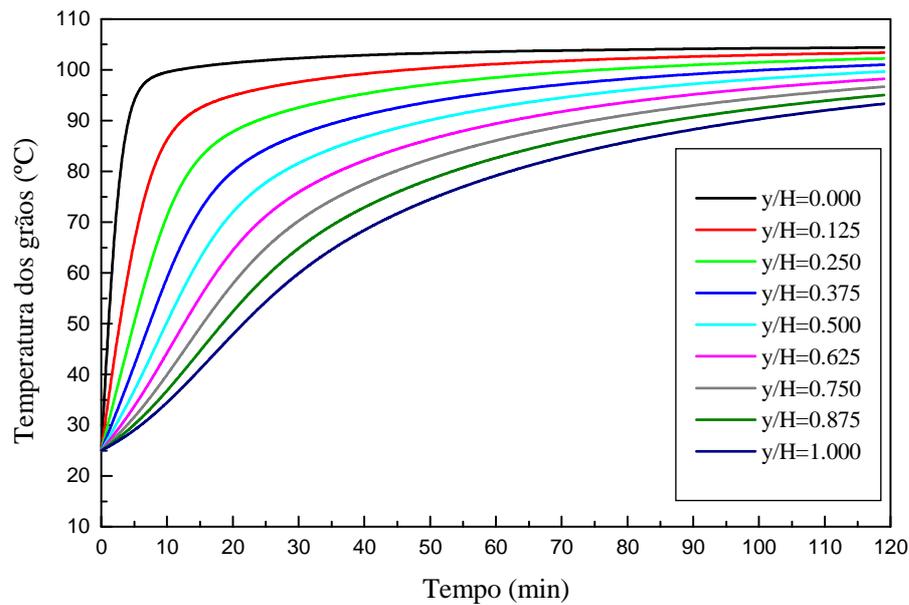


Figura 6.22 Simulação em camada espessa: variação da temperatura dos grãos ($T_{ar} = 105\text{ °C}$ e $v = 0,5\text{ m/s}$).

A Figura 6.23 mostra a variação da umidade do ar durante o processo de secagem. Assim como as taxas de secagem são maiores nos instantes iniciais de secagem e diminuem com o decorrer do tempo, a umidade do ar também aumenta nos instantes iniciais com a maior retirada de água e após vai diminuindo, conforme indicam as curvas da figura.

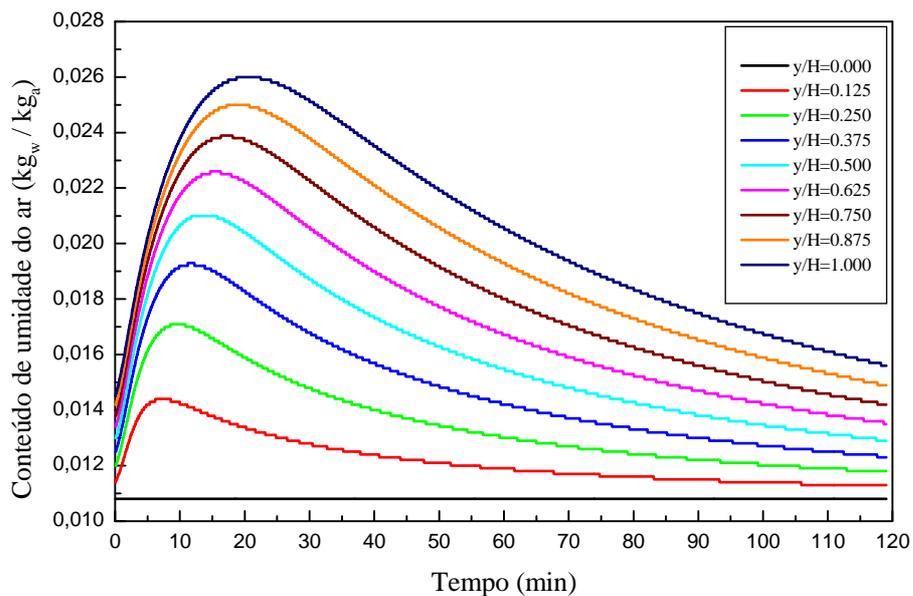


Figura 6.23 Simulação em camada espessa: variação da umidade do ar ($T_{ar} = 105\text{ °C}$ e $v=0,5\text{m/s}$).

7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE SECADORES DE GRÃOS DE FLUXO CONTÍNUO

As simulações computacionais de secadores de fluxo contínuo de grãos são mostradas neste capítulo. Os modelos escolhidos foram os secadores contínuos de coluna de fluxo cruzado com múltiplos estágios em diferentes esquemas. As simulações foram realizadas aplicando-se o método das diferenças finitas com o esquema de MacCormack 2-D “time-split”.

7.1 Esquemas de secadores de fluxo contínuo investigados

Quatro configurações de secadores, apresentadas nas Figuras 7.1 a 7.6, foram analisadas. Todas as configurações constam de uma câmara de resfriamento da massa de grãos e posterior reaproveitamento do ar de recirculação do resfriamento.

A Figura 7.1 mostra um secador de fluxo contínuo com três estágios de secagem. O ar ambiente (ar frio) atravessa a câmara de resfriamento realizando o resfriamento da massa de grãos e se aquecendo. Em seguida, é misturado com o ar quente vindo da fornalha, e essa mistura A entra no terceiro estágio do secador. O ar que sai do terceiro estágio se mistura com o ar quente da fornalha e a mistura B obtida entra no segundo estágio. De forma semelhante, a mistura C (que compreende a mistura do ar de saída do estágio 2 com o ar da fornalha e o ar frio) entra no primeiro estágio, aquece e seca o grão vindo de cima. Finalizando o processo, o ar é descarregado na atmosfera, na sua parte superior. Esse secador é denominado de secador com tripla recirculação de ar.

O uso do ar de recirculação, misturado ao ar quente da fornalha, aumenta a eficiência do secador, mas ao mesmo tempo acarreta um aumento na umidade do ar de secagem.

O secador da Figura 7.2 também apresenta três estágios de secagem. O ar que sai da câmara de resfriamento é misturado ao ar da fornalha, sendo essa mistura A dirigida ao primeiro estágio de secagem. O ar, deixando esse estágio, é misturado ao ar da fornalha formando a mistura B, que atravessa o segundo estágio. Na sequência, o ar C que deixa o segundo estágio é misturado ao ar da fornalha e introduzido no terceiro estágio e depois descarregado na atmosfera, ao nível do terceiro estágio de secagem.

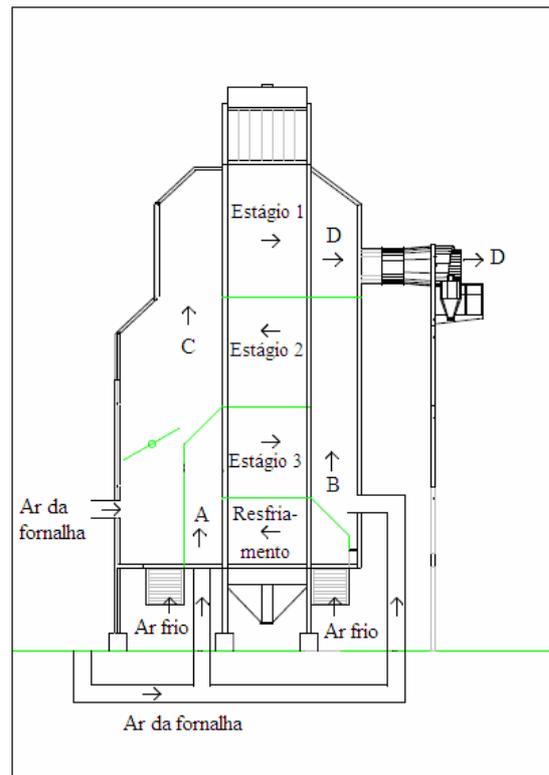


Figura 7.1 Layout de secador de fluxo contínuo de grãos com 3 estágios de secagem e câmara de resfriamento, com saída do ar de exaustão ao nível do estágio 1.

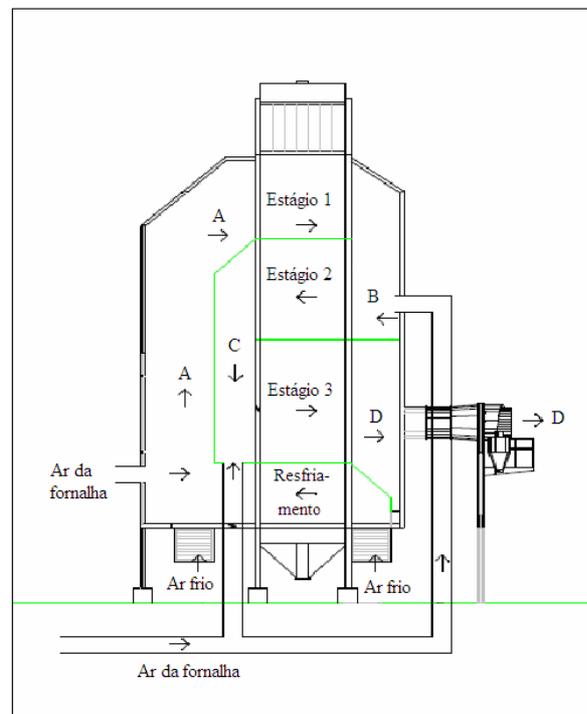


Figura 7.2 Layout de secador de fluxo contínuo de grãos com 3 estágios de secagem e câmara de resfriamento, com saída do ar de exaustão ao nível do estágio 3.

Secadores de dois estágios de secagem são mostrados nas Figuras 7.3 e 7.4. Na Figura 7.3 o ar de saída da câmara de resfriamento é misturado ao ar da fornalha (A) e forçado a passar pelo segundo estágio. Saindo do segundo estágio, o ar é misturado ao ar da fornalha (B) e dirigido ao primeiro estágio, e após é descarregado na atmosfera na parte superior (C). Esse secador é denominado de secador com dupla recirculação de ar.

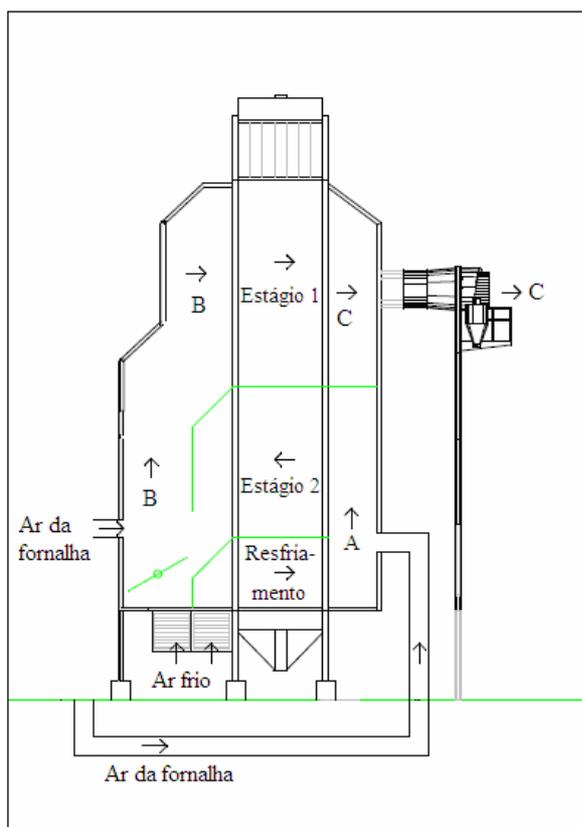


Figura 7.3 Layout de secador de fluxo contínuo de grãos com 2 estágios de secagem e câmara de resfriamento, com saída do ar de exaustão ao nível do estágio 1.

O secador da Figura 7.4 apresenta o ar de saída da câmara de resfriamento sendo misturado ao ar da fornalha (A) e enviado ao primeiro estágio de secagem. Saindo do primeiro estágio, o ar é misturado ao ar da fornalha (B) e dirigido ao segundo estágio. Deixando esse estágio, o ar (C) é descarregado na atmosfera.

Os secadores apresentados são esquematizados nas Figuras 7.5 e 7.6, para secadores de três e dois estágios, respectivamente, ilustrando as condições para cada estágio. As condições de contorno e inicial para cada estágio dependem dos parâmetros na saída dos estágios prévios. Assim, a umidade do ar de entrada depende da quantidade do ar de recirculação. Em outras palavras, essas condições dependem do número de estágios, do esquema de distribuição

e da recirculação do ar.

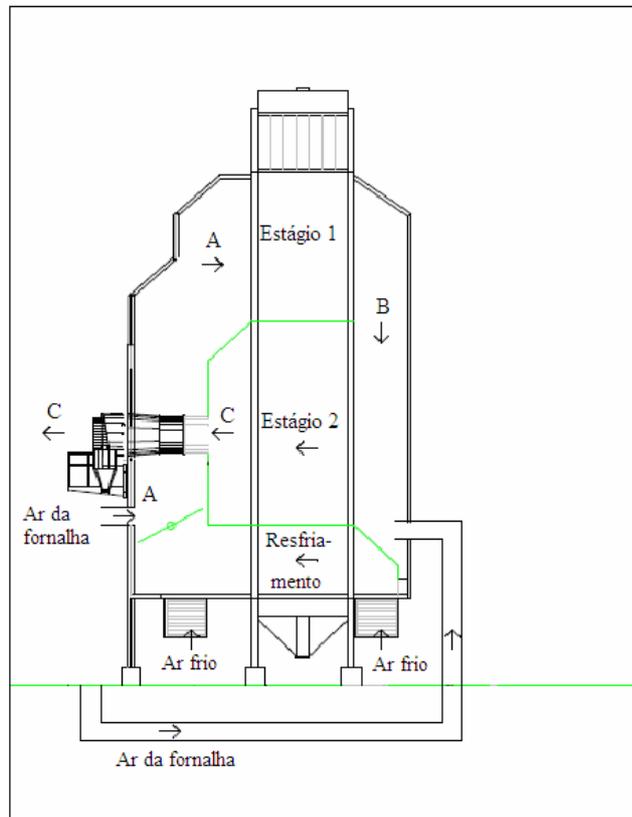


Figura 7.4 Layout de secador de fluxo contínuo de grãos com 2 estágios de secagem e câmara de resfriamento, com saída do ar de exaustão ao nível do estágio 2.

Para o secador do esquema 1 da Figura 7.5 as condições iniciais e de contorno para o estágio i ($i = 1, 2, 3, c$) são descritas a seguir.

As condições de contorno são:

$$M_1(t, x, 0) = M_0 = 0,22 \quad (\text{b.s}); \quad T_{g1}(t, x, 0) = T_{g0} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad T_1(t, 0, y) = T_{a1} = 120 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_2(t, 1, y) = T_{a2} = 110 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad T_3(t, 0, y) = T_{a3} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad T_a(t, 1, y) = T_{ac} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

As condições iniciais:

$$M_i(0, x, y) = M_0; \quad T_{gi}(0, x, y) = T_{g0}; \quad Y_{ai}(0, x, y) = Y_{a0}; \quad T_{ai}(0, x, y) = T_{g0} \quad (i = 1, 2, 3, c).$$

As condições de contorno para as variáveis $M_2(t, x, H_1)$, $T_{g2}(t, x, H_1)$, $M_3(t, x, H_1 + H_2)$, $T_{g3}(t, x, H_1 + H_2)$, $M_c(t, x, H_1 + H_2 + H_3)$, $T_{gc}(t, x, H_1 + H_2 + H_3)$, Y_{a1} , Y_{a2} e Y_{ac} são determinadas durante os cálculos através de um processo iterativo.

Para o secador do esquema 1 os valores das dimensões geométricas foram tomadas como: $L=0,167$ m; $H_1 = 4,16$ m; $H_2 = 3,4$ m; $H_3 = 2,9$ m; $H_c = 2,14$ m.

A velocidade do ar através da massa de grãos possui o valor $v_x = 0,18$ m/s e a velocidade de descida dos grãos na torre $v_y = 0,0014$ m/s.

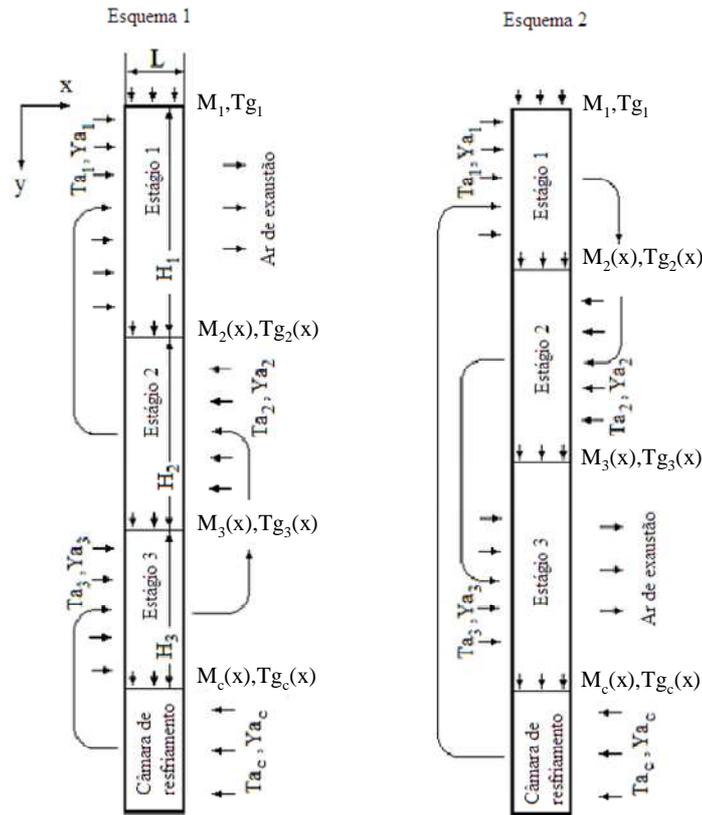


Figura 7.5 Esquemas de secadores de fluxo contínuo com três estágios de secagem.

Para o secador do esquema 2 da Figura 7.5 tem-se:

As condições de contorno:

$$M_1(t, x, 0) = M_0 = 0,22 \quad (\text{b.s.}); \quad T_{g1}(t, x, 0) = T_{g0} = 20 \quad ^\circ\text{C}; \quad T_1(t, 0, y) = T_{a1} = 120 \quad ^\circ\text{C};$$

$$T_2(t, 1, y) = T_{a2} = 110 \quad ^\circ\text{C}; \quad T_3(t, 0, y) = T_{a3} = 100 \quad ^\circ\text{C}; \quad T_a(t, 1, y) = T_{ac} = 20 \quad ^\circ\text{C}.$$

As condições iniciais:

$$M_i(0, x, y) = M_0; \quad T_{gi}(0, x, y) = T_{g0}; \quad Y_{ai}(0, x, y) = Y_{a0}; \quad T_{ai}(0, x, y) = T_{g0} \quad (i = 1, 2, 3, c).$$

As dimensões geométricas para o esquema 2 foram tomadas como: $L=0,167$ m; $H_1=2,90$ m; $H_2 = 3,40$ m; $H_3 = 4,160$ m e $H_c = 2,140$ m. A velocidade do ar é a mesma considerada para o esquema 1.

Para os secadores de dois estágios da Figura 7.6 a velocidade do ar de secagem também foi assumida como 0,18 m/s, igual à velocidade para os secadores de três estágios dos esquemas 1 e 2.

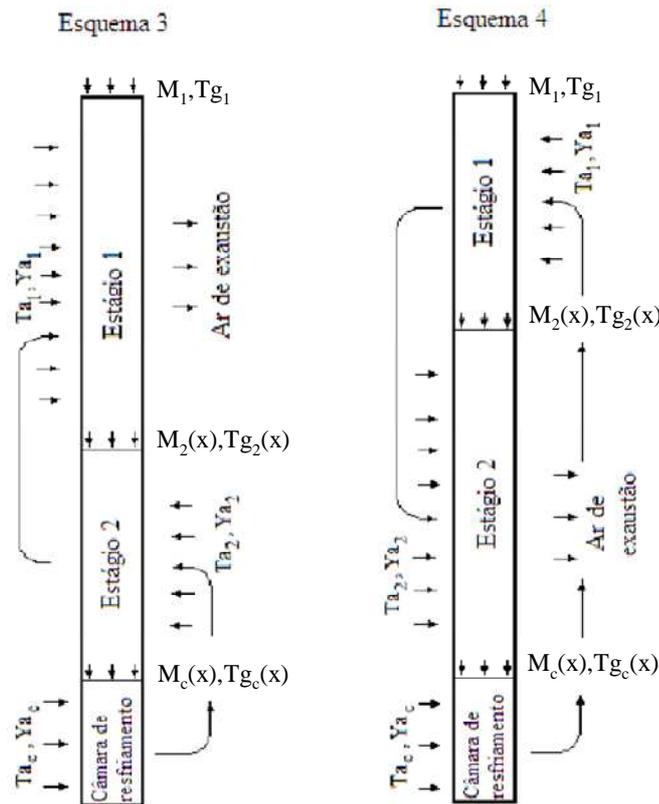


Figura 7.6 Esquemas de secadores de fluxo contínuo com dois estágios de secagem.

Para o secador do esquema 3 as condições de contorno e iniciais são:

Condições de contorno:

$$M_1(t, x, 0) = M_0 = 0,22 \quad (\text{b.s}); \quad T_{g1}(t, x, 0) = T_{g0} = 20 \quad ^\circ\text{C}; \quad T_1(t, 0, y) = T_{a1} = 120 \quad ^\circ\text{C};$$

$$T_2(t, 1, y) = T_{a2} = 100 \quad ^\circ\text{C}; \quad T_a(t, 0, y) = T_{ac} = 20 \quad ^\circ\text{C}.$$

Condições iniciais:

$$M_i(0, x, y) = M_0; \quad T_{gi}(0, x, y) = T_{g0}; \quad Y_{ai}(0, x, y) = Y_{a0}; \quad T_{ai}(0, x, y) = T_{g0} \quad (i = 1, 2, c).$$

As dimensões geométricas para o esquema 3 são: $L=0,167$ m; $H_1=6,050$ m; $H_2 = 4,410$ m e $H_c = 2,140$ m.

Para o secador do esquema 4:

Condições de contorno:

$$M_1(t, x, 0) = M_0 = 0,22 \quad (\text{b.s}); \quad T_{g1}(t, x, 0) = T_{g0} = 20 \quad ^\circ\text{C}; \quad T_1(t, 1, y) = T_{a1} = 120 \quad ^\circ\text{C};$$

$$T_2(t, 0, y) = T_{a2} = 100 \quad ^\circ\text{C}; \quad T_a(t, 0, y) = T_{ac} = 20 \quad ^\circ\text{C}.$$

Condições iniciais:

$$M_i(0, x, y) = M_0; \quad T_{gi}(0, x, y) = T_{g0}; \quad Y_{ai}(0, x, y) = Y_{a0}; \quad T_{ai}(0, x, y) = T_{g0} \quad (i = 1, 2, c).$$

As dimensões geométricas para o esquema 4 são: $L=0,167$ m; $H_1=4,410$ m; $H_2 = 6,050$ m e $H_c = 2,140$ m.

Dois processos iterativos foram utilizados para a simulação: o primeiro (interno) foi utilizado para determinar as condições de contorno entre os estágios e a umidade do ar na entrada lateral para cada estágio (que depende da composição do ar da fornalha + do ar de recirculação + do ar frio). O segundo processo iterativo (externo) foi aplicado para calcular o tempo de secagem para alcançar o teor de umidade médio dos grãos necessário na saída do secador (13% bu), ou seja, para calcular a velocidade do grão, v_y .

7.2 Resultados da simulação para os secadores de fluxo contínuo

Os resultados da simulação para os esquemas de secadores investigados são mostrados a seguir.

A secagem ocorre a partir de um teor de umidade inicial dos grãos de 22 % (b.s), ou 18% (b.u), até o teor de umidade de 15% (b.s) ou 13 % (b.u). Entre os grãos aquecidos e o ar de resfriamento existe transferência de massa. A taxa de transferência de calor (taxa de secagem) depende significativamente da temperatura e do teor de umidade dos grãos. Com a redução do teor de umidade a transferência de massa reduz significativamente. Na curva da Figura 7.7 são apresentados os dados experimentais de Soares (1986) para a dinâmica de secagem de grãos de soja a uma temperatura do ar de 30°C e teor de umidade dos grãos de 13% (b.u).

Pode-se ver que nas primeiras duas horas a redução do teor de umidade não é tão significativa. O resfriamento dos grãos acontece muito mais rápido do que a difusão de água dentro do grão, com o coeficiente de difusão de calor sendo maior que o coeficiente de difusão de massa na ordem de 10^4 . Por isso o aumento do conteúdo de umidade do ar e a

diminuição do teor de umidade do grão podem ser negligenciados para regime estacionário.

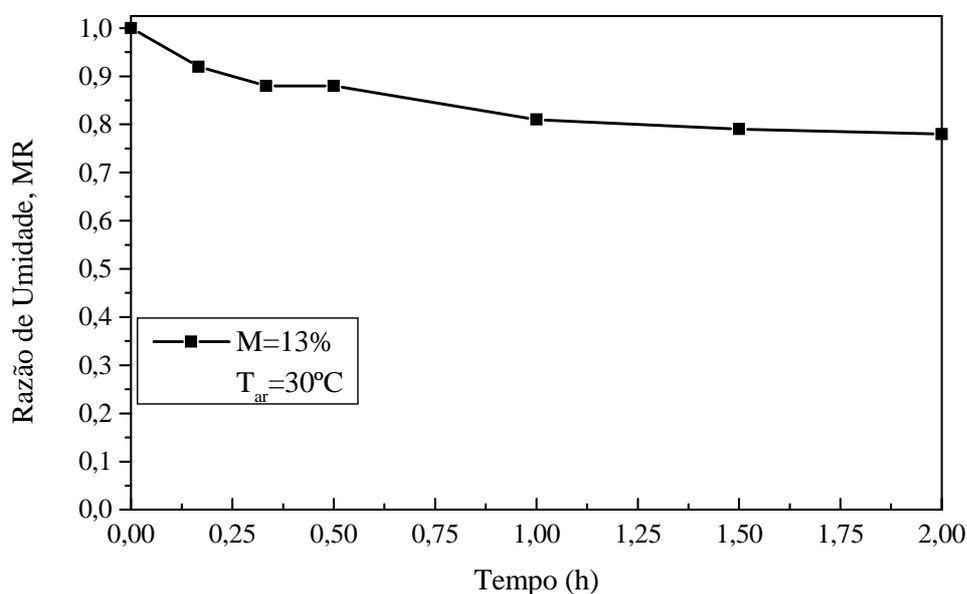


Figura 7.7 Razão de umidade da soja para temperatura do ar de 30°C.

Os resultados da simulação para o secador do esquema 1, em termos da distribuição do teor de umidade do grão, da temperatura do grão, da temperatura e umidade do ar, são mostrados nas Figuras 7.8 a 7.11. Os dados de simulação usados anteriormente para leito fixo também foram usados para os secadores de fluxo contínuo.

Para o secador do esquema 1 verifica-se que a distribuição do teor de umidade do grão (Figura 7.8) ocorre mais rapidamente nos estágios 1 e 3. No primeiro estágio as curvas para $x/L = 0.5$, 0.75 e 1 apresentam baixas variações na umidade do grão, conforme indicam a inclinação das mesmas. No segundo estágio, com a inversão do fluxo de ar de secagem, as curvas $x/L = 1$ e 0.75 indicam uma maior retirada de umidade do grão. No terceiro estágio, as seções mais próximas à entrada do ar apresentam, novamente, o maior percentual de secagem. Conforme esperado, as seções que entram em contato imediato com o ar de secagem apresentam uma secagem mais rápida que as outras seções. Observa-se que a curva de secagem na seção $x/L = 0.5$ apresenta valores do teor de umidade dos grãos abaixo da média calculada.

As temperaturas dos grãos diferem em função da posição dos mesmos com relação à largura e altura da seção transversal do secador. A altura da coluna do secador e a velocidade de descida dos grãos determinam o tempo de residência (tempo de secagem) dos grãos no

secador. A profundidade do secador somente possui influência na capacidade total do mesmo, uma vez que nessa dimensão existe simetria nos valores da temperatura e da umidade dos grãos.

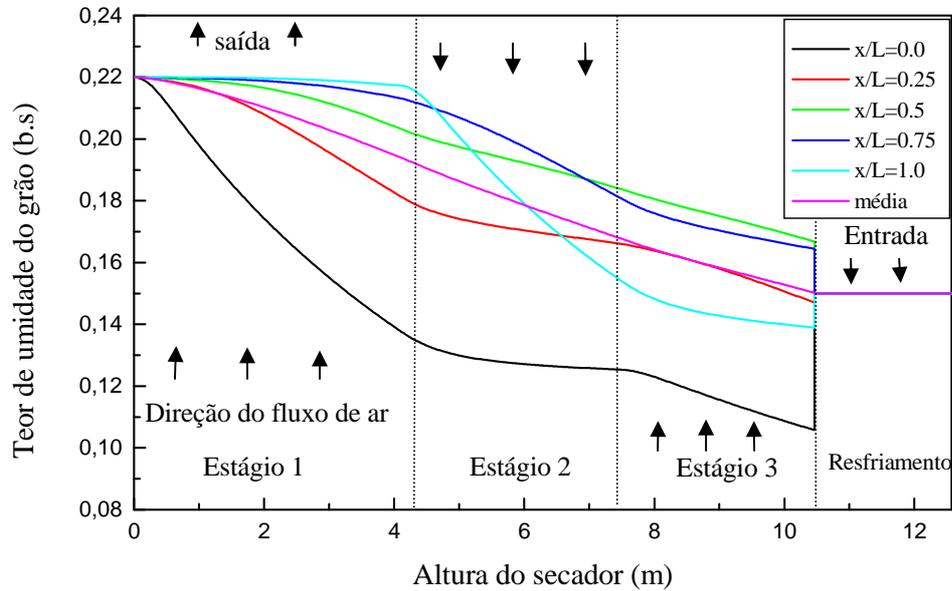


Figura 7.8 Distribuição do teor de umidade dos grãos no secador 1 em estado estacionário.

A Figura 7.9 mostra que os valores mais significativos da distribuição da temperatura do grão ocorrem no primeiro estágio. Para a média das temperaturas essa verificação também é comprovada, sendo que para os estágios 2 e 3 a média possui pouca variação.

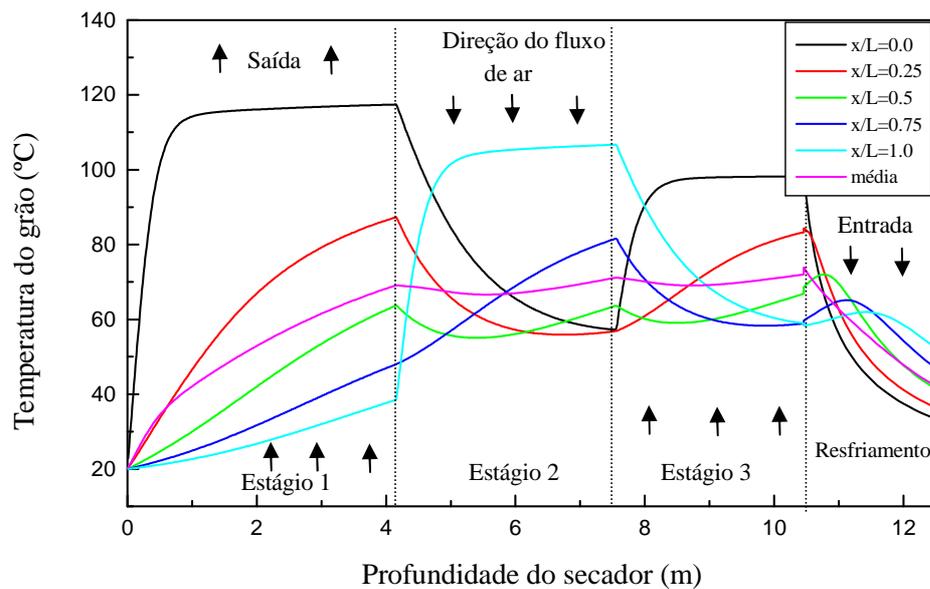


Figura 7.9 Distribuição da temperatura do grão no secador 1 em estado estacionário.

Um comportamento semelhante ao da temperatura do grão é observado para a distribuição da temperatura do ar no secador 1 (Figura 7.10).

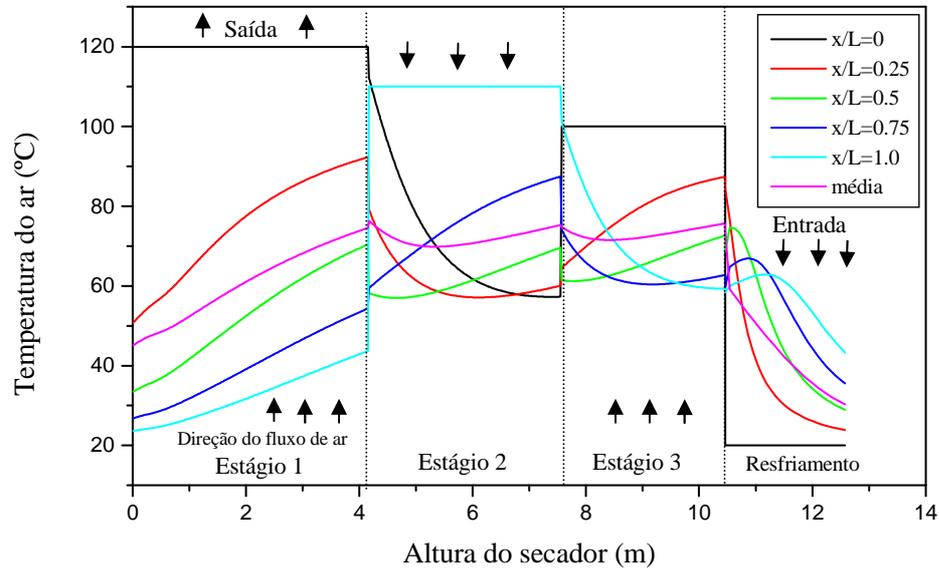


Figura 7.10 Distribuição de temperatura do ar no secador 1 em estado estacionário.

O conteúdo de umidade do ar (Figura 7.11) na saída do primeiro estágio do secador 1 varia significativamente com a altura do mesmo. Nos demais estágios, essa diferença não é muito grande. Um ar mais úmido para a secagem entra no primeiro estágio, como resultado da absorção da umidade recebida do grão no segundo e terceiro estágios de secagem.

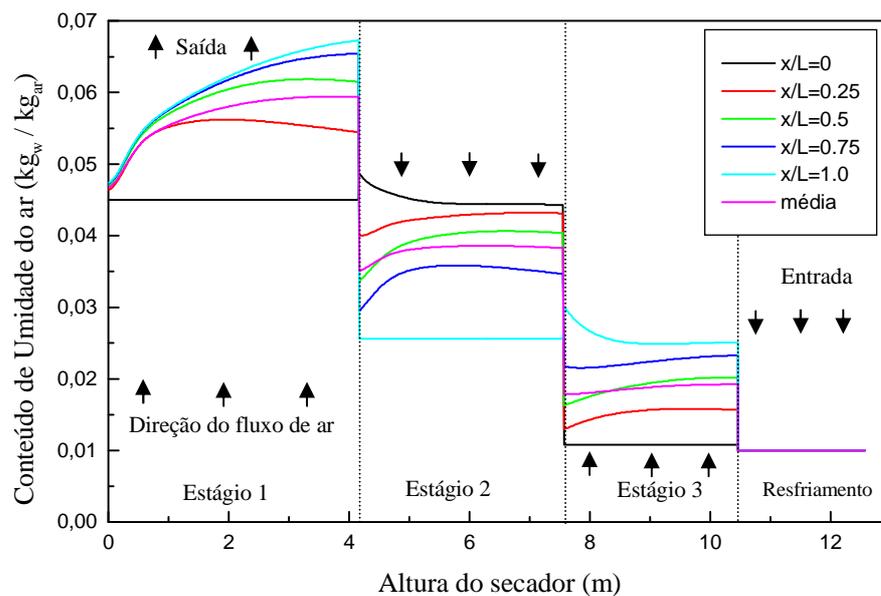


Figura 7.11 Distribuição da umidade do ar no secador 1 em estado estacionário.

Os resultados da simulação para o secador do esquema 2 são mostrados nas Figuras 7.12 a 7.15. O teor de umidade dos grãos (Figura 7.12) é muito parecido com os apresentados para o secador 1. Observa-se na Figura 7.12 que o valor médio do teor de umidade do grão na saída do estágio 3 é um pouco menor (diferença de 3,6%) que o valor fixado para o final da secagem (15% b.s). O secador 2 apresenta uma variação máxima de até cerca de 3% no teor de umidade médio, conforme mostra a Figura 7.16.

A temperatura dos grãos (Figura 7.13) mostra semelhança com a temperatura fornecida pelo secador 1. A diferença é observada no segundo e terceiro estágios, onde a temperatura não é tão homogênea, apresentando variação. Os valores médios das temperaturas são um pouco superiores que as do secador 1 (Figura 7.17).

O comportamento da distribuição da temperatura do ar no secador 2 (Figura 7.14) mantém semelhança com a distribuição da temperatura do ar no secador 1. A Figura 7.18 ilustra a diferença na distribuição das temperaturas nos dois secadores.

Assim como foi observado no secador 1, o conteúdo de umidade do ar para o secador 2 (Figura 7.15) vai aumentando conforme o ar vai circulando nos estágios de secagem e absorvendo umidade do grão. De acordo com a Figura 7.19, o conteúdo de umidade média do ar para o secador 2 é menor que para o secador 1.

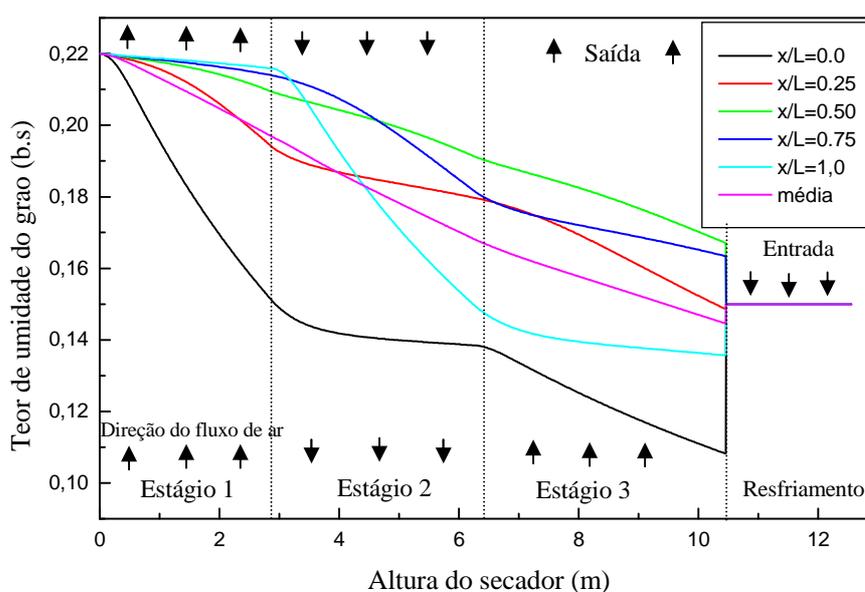


Figura 7.12 Distribuição do teor de umidade dos grãos no secador 2 em estado estacionário.

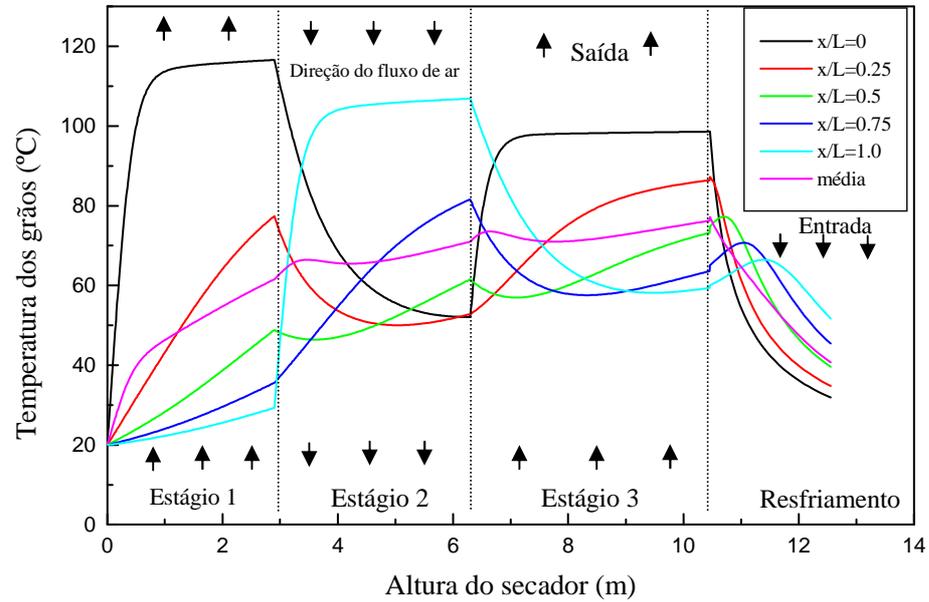


Figura 7.13 Distribuição de temperatura dos grãos no secador 2 em estado estacionário.

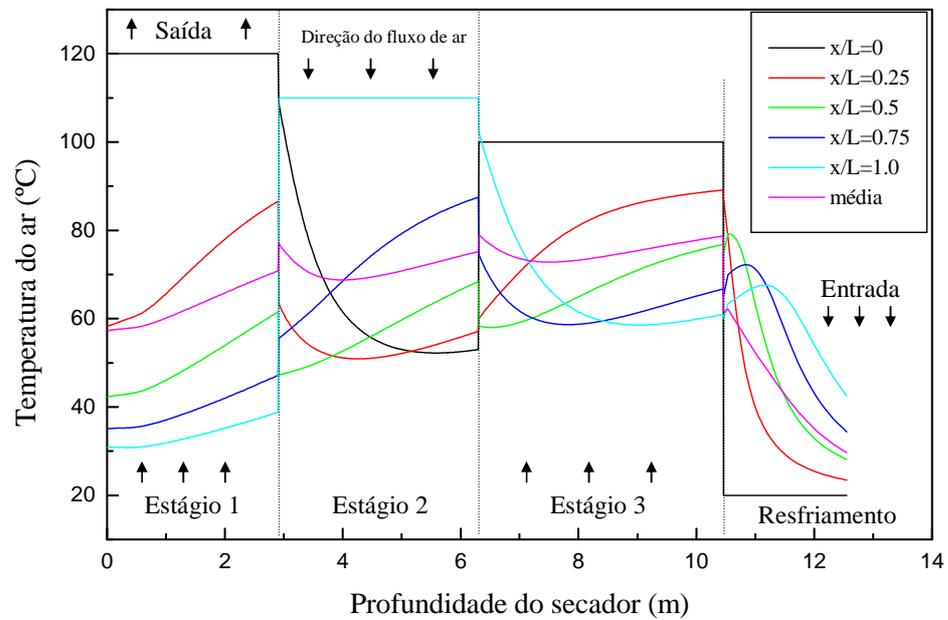


Figura 7.14 Distribuição da temperatura do ar no secador 2 em estado estacionário.

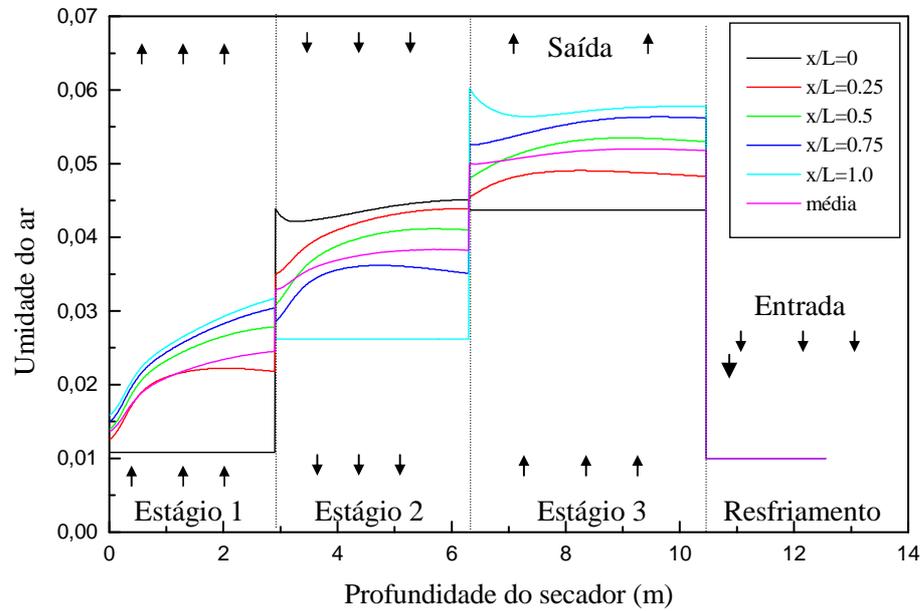


Figura 7.15 Distribuição do conteúdo de umidade do ar no secador 2 em estado estacionário.

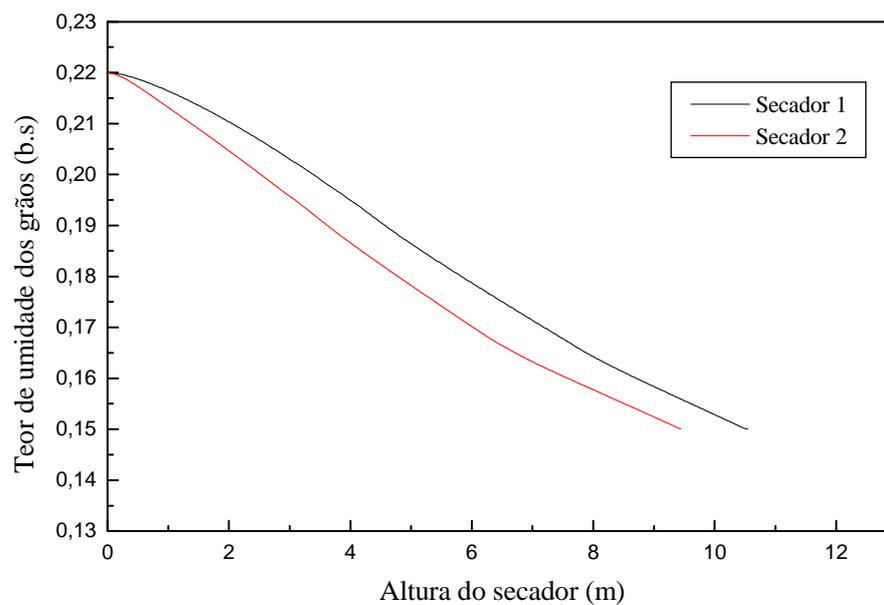


Figura 7.16 Comparação da distribuição da umidade média do grão para os secadores 1 e 2.

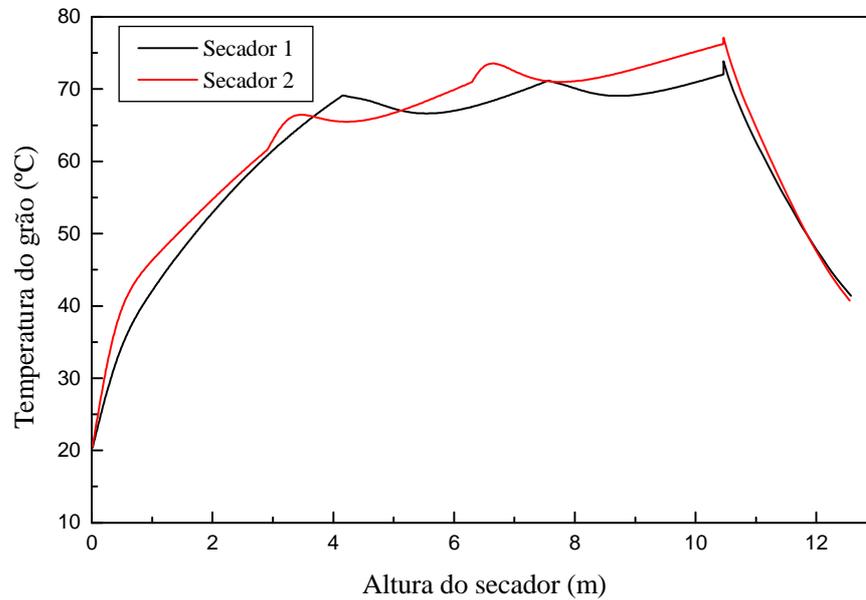


Figura 7.17 Comparação da distribuição de temperatura do grão para os secadores 1 e 2.

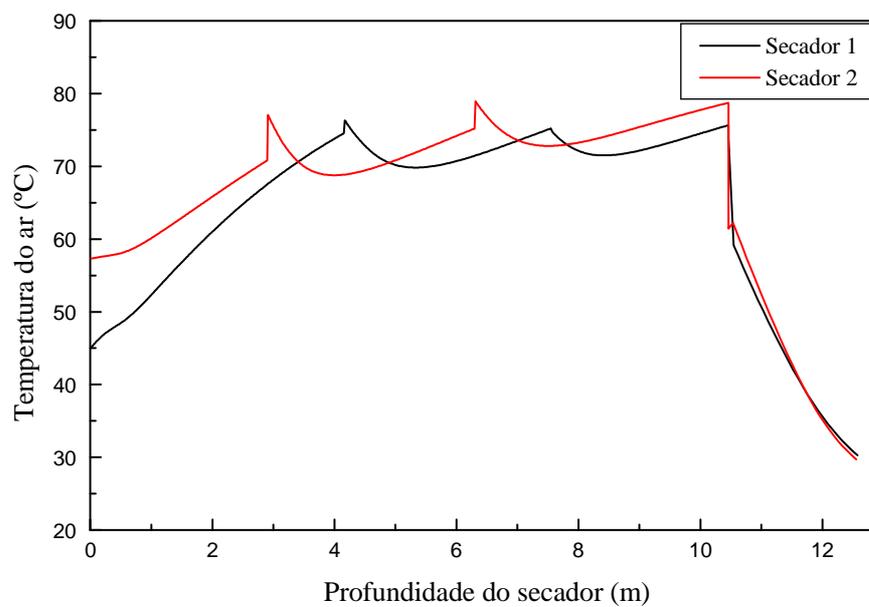


Figura 7.18 Comparação da distribuição de temperatura média do ar para os secadores 1 e 2.

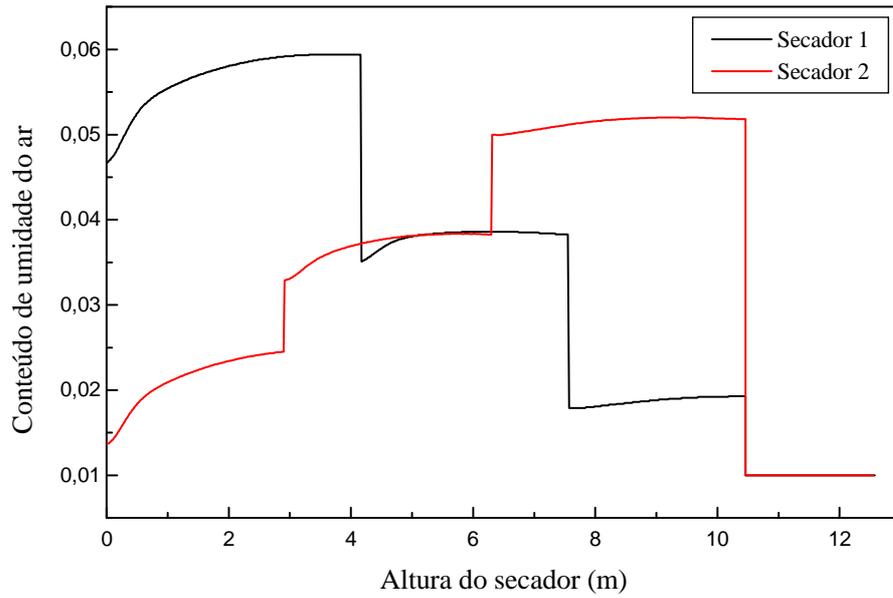


Figura 7.19 Comparação da distribuição da umidade do ar para os secadores 1 e 2.

As simulações realizadas para os secadores dos esquemas 3 e 4, com as respectivas dimensões geométricas, condições de contorno e condições iniciais são mostradas nas Figuras 7.20 a 7.27.

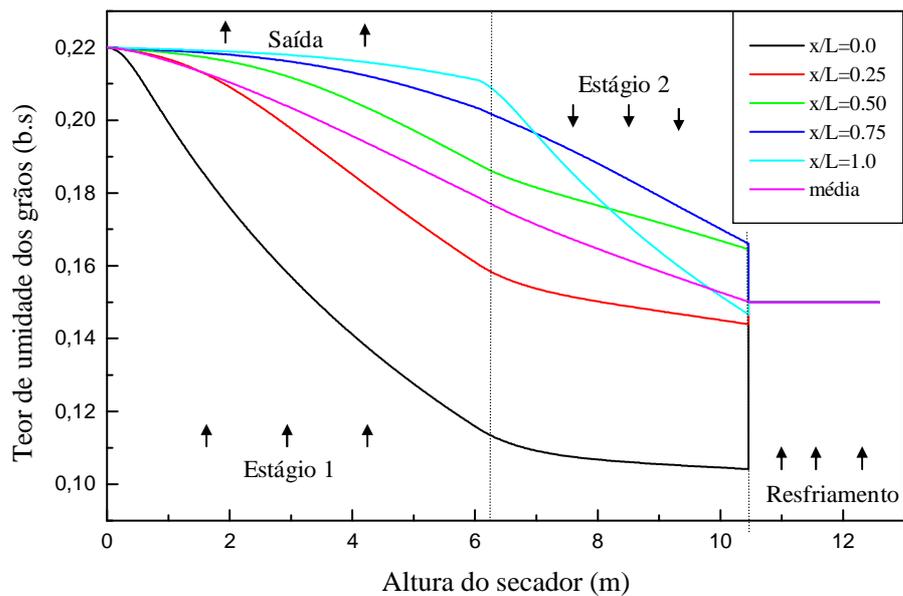


Figura 7.20 Distribuição do teor de umidade dos grãos no secador 3 em estado estacionário.

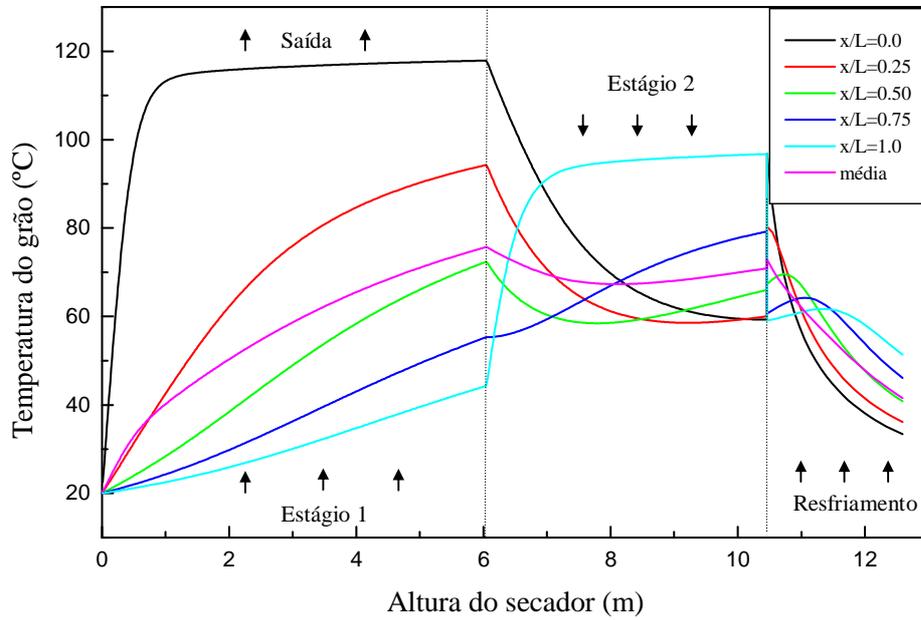


Figura 7.21 Distribuição da temperatura do grão no secador 3 em estado estacionário.

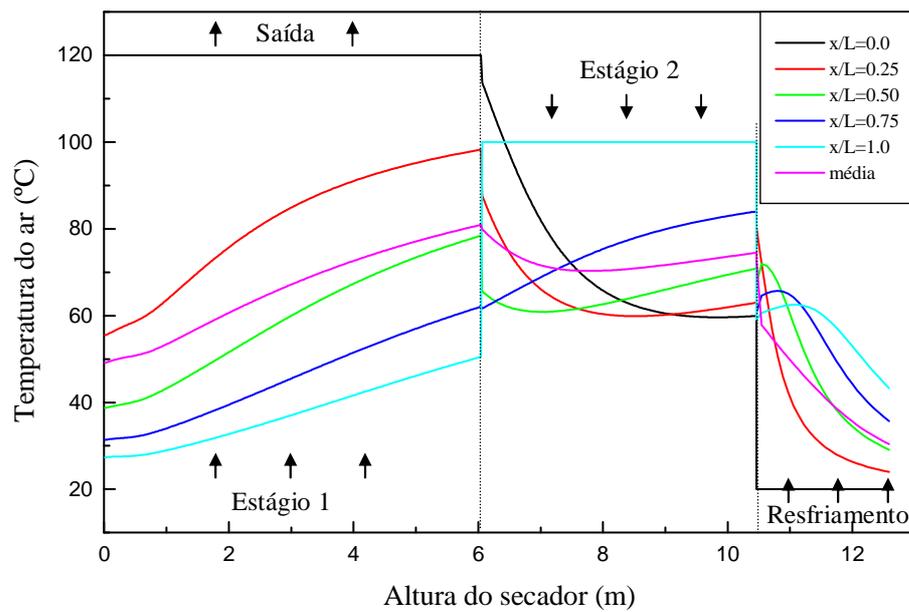


Figura 7.22 Distribuição da temperatura do ar no secador 3 em estado estacionário.

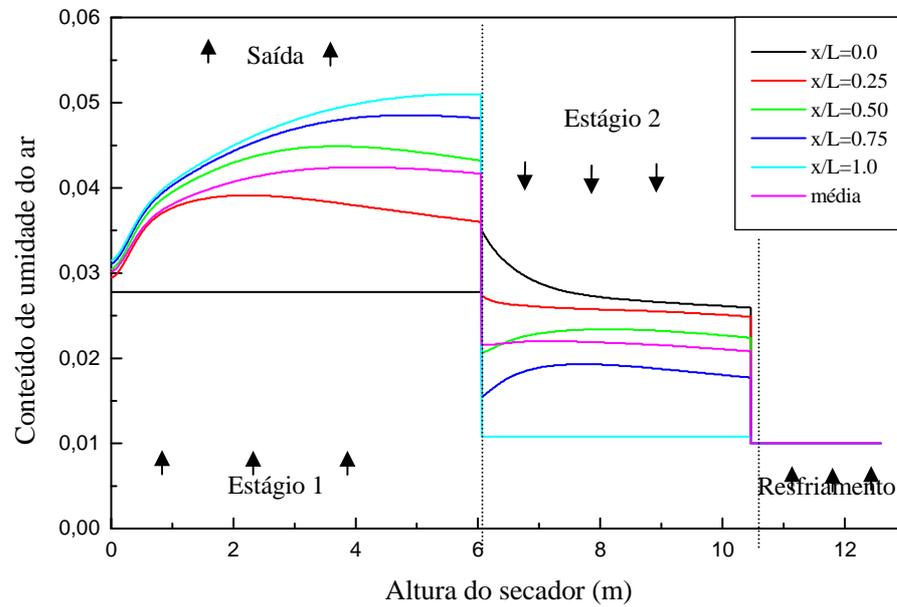


Figura 7.23 Distribuição do conteúdo de umidade do ar no secador 3 em estado estacionário.

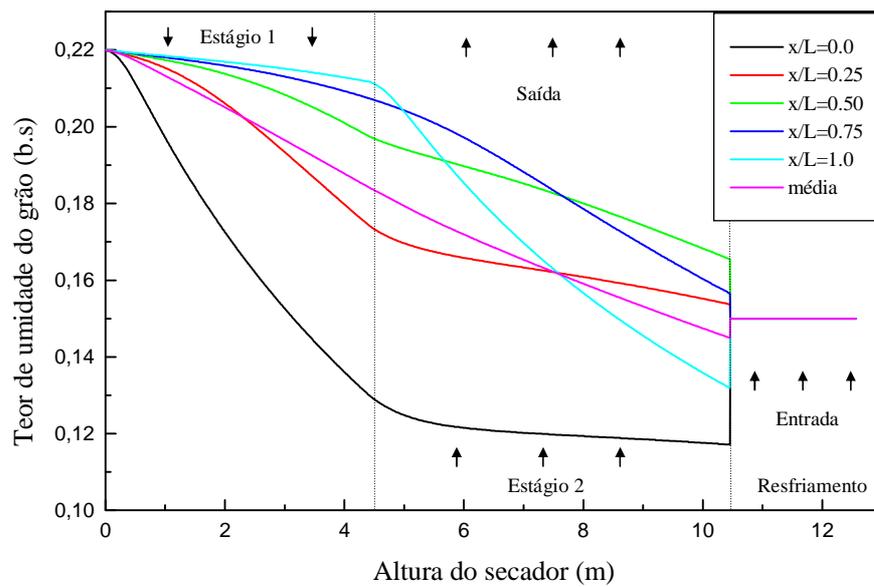


Figura 7.24 Distribuição do teor de umidade dos grãos no secador 4 em estado estacionário.

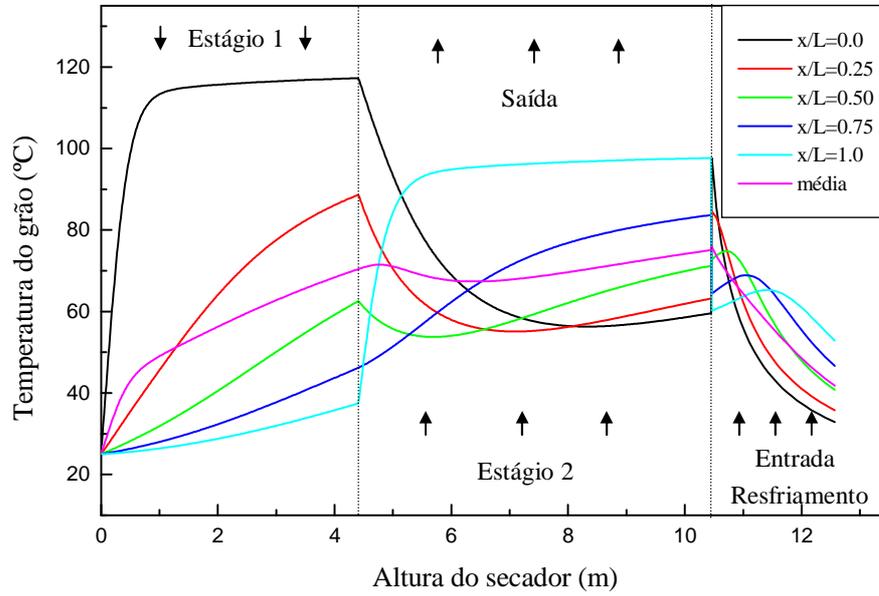


Figura 7.25 Distribuição da temperatura do grão no secador 4 em estado estacionário.

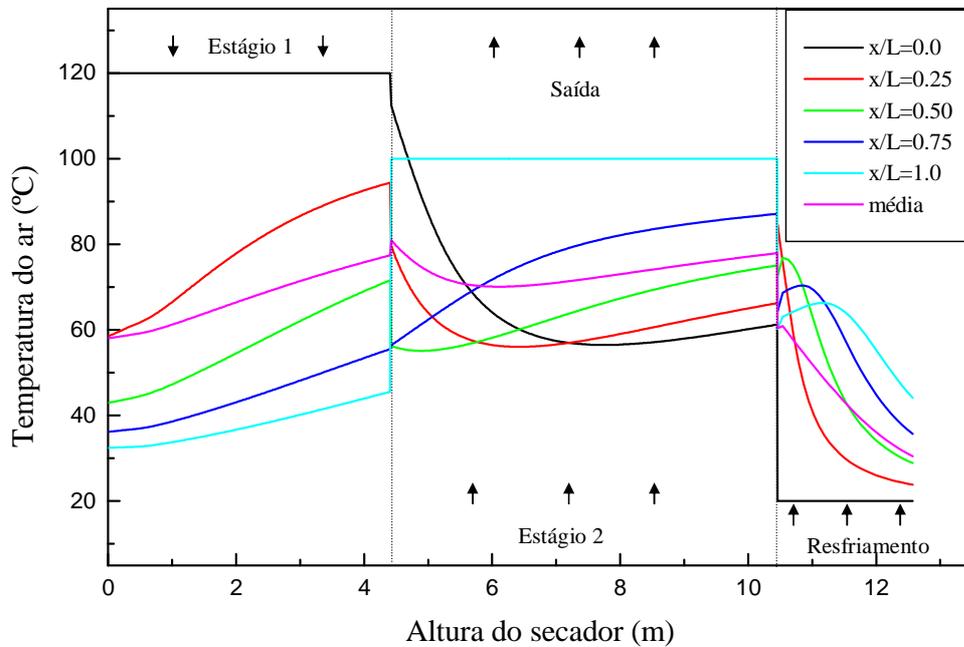


Figura 7.26 Distribuição da temperatura do ar no secador 4 em estado estacionário.

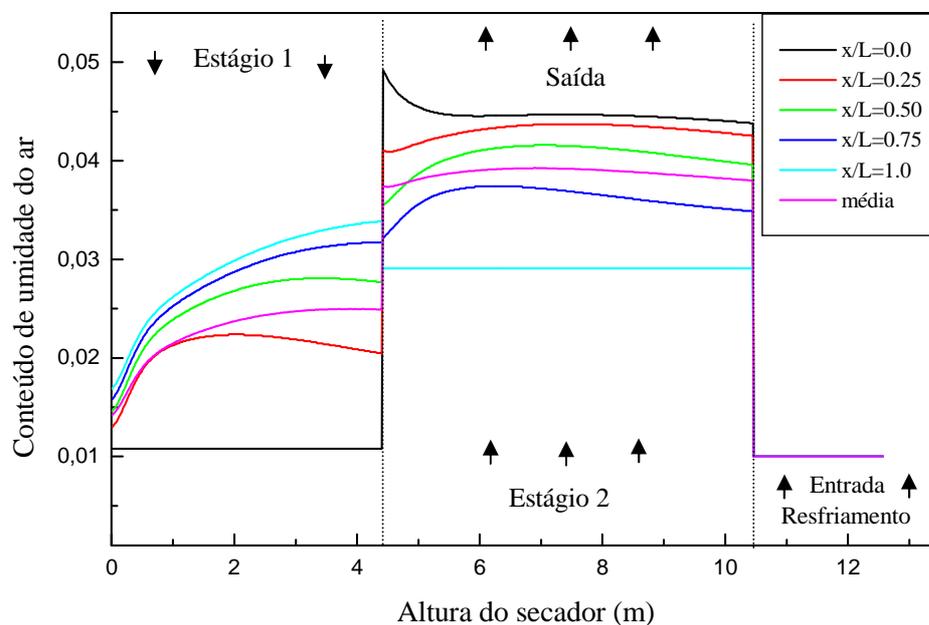


Figura 7.27 Distribuição do conteúdo de umidade do ar no secador 4 em estado estacionário.

As simulações mostraram que a inversão da direção do fluxo de ar equilibra a distribuição dos parâmetros na direção transversal do secador e acelera um pouco o processo de secagem. A recirculação do ar no secador aumenta o conteúdo de umidade do ar de secagem, e para os casos considerados, aumenta ligeiramente o tempo de secagem. Simultaneamente, o reaproveitamento do calor, obtido a partir da massa de grãos nos estágios iniciais de secagem, economiza, no caso estudado, até 41% de combustível. As Figuras 7.28 e 7.29 indicam que para o secador 1, a média é de 40,9%, para o secador 2, 28,5%, e 29,8% e 37,8% para os secadores 3 e 4, respectivamente.

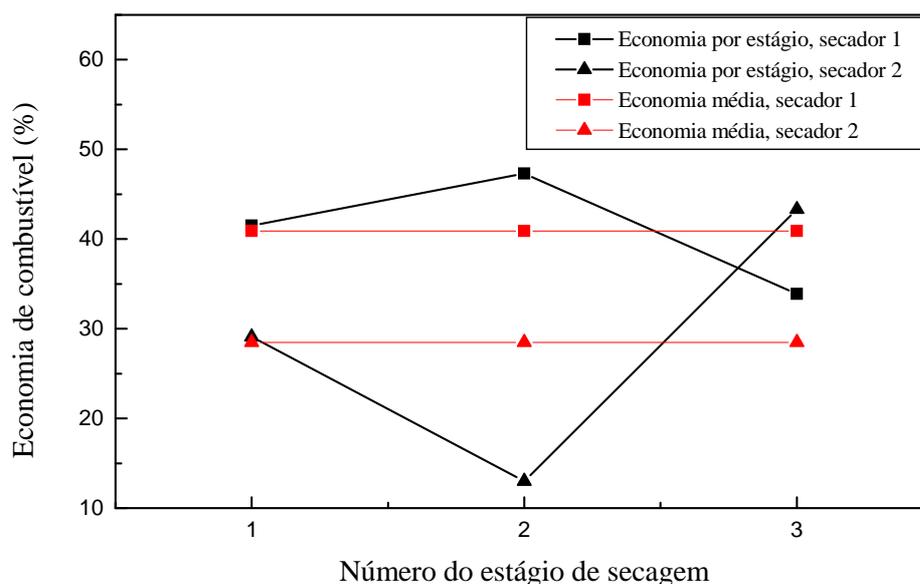


Figura 7.28 Economia de combustível devido ao reaproveitamento do ar de recirculação para os secadores 1 e 2.

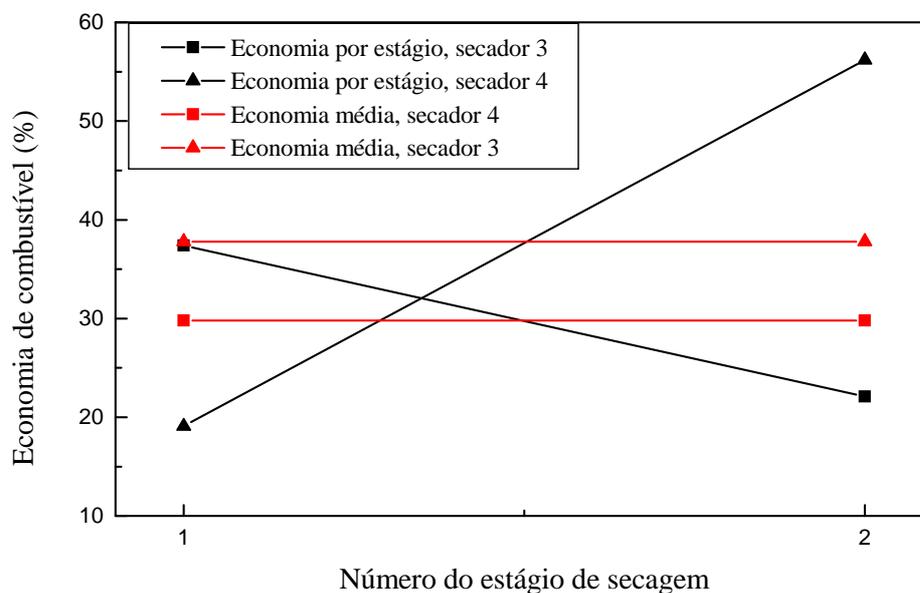


Figura 7.29 Economia de combustível devido ao reaproveitamento do ar de recirculação para os secadores 3 e 4.

A economia de combustível mostrada nas Figuras 7.28 e 7.29, devido ao reaproveitamento do ar de recirculação, é um parâmetro comparativo entre a taxa de calor fornecido ao ar com a recirculação e sem a recirculação do ar de secagem.

Quando se considera o caso sem a existência da recirculação do ar (portanto sem reaproveitamento da energia contida nesse ar), a energia adicionada a cada estágio de secagem a partir da temperatura ambiente até a temperatura especificada em cada seção de entrada do secador é fornecida pelo ar proveniente da fornalha.

Com o reaproveitamento da energia do ar de recirculação o aquecimento até a temperatura especificada na entrada da seção do secador ocorre com calor reduzido, pois a temperatura do ar de recirculação é a temperatura média da saída do estágio anterior. A relação entre o calor necessário para o aquecimento, considerando a não recirculação do ar (sem aproveitamento de calor) e a recirculação do ar de secagem (com aproveitamento de calor) fornece um coeficiente de aproveitamento de energia, que indica a economia de combustível para o fornecimento de calor ao ar.

A relação entre a energia necessária para a evaporação da umidade dos grãos e a energia fornecida ao ar de secagem para a evaporação da umidade desses grãos pode ser definida como o rendimento da secagem. A energia necessária à evaporação da umidade dos grãos é expressa por:

$$Q_{\text{evap}} = m_w \cdot H_v \quad (7.1)$$

O calor latente de vaporização da água H_v para os grãos, com umidade entre 13 e 35%, foi tomado como 2930 kJ/kg (Hall, 1980).

A determinação da energia fornecida ao ar de secagem é determinada através da seguinte equação, aplicada aos estágios do secador:

$$Q = \sum_{n=1}^i c_{p_a} \cdot v_x \cdot A \cdot \rho_a \cdot \Delta T \cdot t \quad (7.2)$$

Em que: i representa os estágios dos secadores ($i = 1, 2, 3$); A é a área dos estágios do secador, perpendicular à velocidade do ar de secagem; ΔT é a diferença de temperatura, entre a temperatura especificada na entrada dos estágios do secador e as temperaturas médias na saída dos estágios anteriores; e t é o tempo de secagem para os secadores, conforme Tabela 7.2.

Os resultados dos cálculos do rendimento da secagem para os secadores dos esquemas 1 a 4 são indicados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 Rendimento da secagem para os secadores com reaproveitamento de calor.

Secador	Rendimento da secagem (%)
1	68,0
2	48,0
3	67,0
4	39,7

O tempo de secagem para cada um dos secadores analisados é mostrado na Tabela 7.2, a seguir.

Tabela 7.2 Tempo de secagem para os secadores analisados.

Secador	Tempo de secagem (min)
1	155.19
2	168.67
3	148.02
4	155.73

Os dados comparativos médios para a temperatura e conteúdo de umidade do ar, sistematizados dos esquemas dos secadores 1, 2, 3 e 4, na entrada e saída dos estágios de resfriamento e secagem são mostrados nas Tabelas 7.3 e 7.4.

Tabela 7.3 Temperaturas e umidades médias do ar nos secadores 1 e 2.

Seção	Secador 1	Secador 1	Secador 2	Secador 2
	T (°C)	Y (kg _w /kg _a)	T (°C)	Y (kg _w /kg _a)
Entrada da câmara de resfriamento	20	0.010	20	0.010
Saída da câmara de resfriamento	56.8	0.010	59.5	0.010
Entrada do estágio 3	100	0.0108	100	0.0437
Saída do estágio 3	69.5	0.0256	66.2	0.0573
Entrada do estágio 2	110	0.0256	110	0.0262
Saída do estágio 2	70	0.045	62.3	0.0437
Entrada do estágio 1	120	0.045	120	0.011
Saída do estágio 1	32.6	0.061	33.7	0.0262

Tabela 7.4 Temperaturas e umidades médias do ar nos secadores 3 e 4.

Seção	Secador 3	Secador 3	Secador 4	Secador 4
	T (°C)	Y (kg _w /kg _a)	T (°C)	Y (kg _w /kg _a)
Entrada da câmara de resfriamento	20.0	0.010	20.0	0.010
Saída da câmara de resfriamento	56.5	0.010	59.4	0.010
Entrada do estágio 2	100	0.0108	100	0.0291
Saída do estágio 2	71.3	0.0278	64.9	0.0447
Entrada do estágio 1	120	0.0278	120	0.0110
Saída do estágio 1	37.6	0.0460	37.8	0.0291

8. CONCLUSÃO

Nessa tese desenvolveu-se o estudo, a modelagem matemática e a simulação do processo de secagem de soja em secadores do tipo torre de coluna com fluxo contínuo e múltiplos estágios com recirculação de ar, através de modelos de camada fina e camada espessa, da obtenção de dados experimentais e da avaliação da eficiência energética dos secadores.

Um modelo matemático para o processo de secagem artificial de soja, composto por quatro equações diferenciais parciais não lineares foi desenvolvido. As equações relacionam as variáveis de análise do secador: teor de umidade e temperatura do ar e dos grãos. A determinação dos fluxos de massa e de calor, para aplicação no modelo, foi realizada por meio de equações auxiliares semi-empíricas, obtidas através de dados experimentais em camada fina.

O equipamento experimental desenvolvido permitiu a obtenção da dinâmica de secagem da soja em camada fina no campo de abrangência da temperatura do ar de secagem de 45 a 110 °C, da velocidade do ar de secagem de 0 a 2,5 m/s, da umidade relativa do ar de secagem de 10 a 30% e do teor de umidade inicial do grão de 13 a 32%. O fator dominante no tempo inicial de secagem é a transferência de massa na superfície de contato entre o grão e o ar. Nos tempos posteriores o processo de difusão dentro do grão limita a taxa de fluxo de massa, tornando-a um fator dominante. O aumento da velocidade do ar de secagem nos intervalos investigados aponta para a aceleração do processo de secagem, especificando um papel essencial da transferência de massa sobre a periferia do grão. Com a redução do teor de umidade do grão durante o processo de secagem a influência da velocidade é reduzida.

O estudo experimental mostrou que o coeficiente de difusão médio depende da distribuição de umidade dentro do grão. Contudo, a determinação experimental da distribuição do teor de umidade dentro do grão é bastante complexa. Assim, nesse trabalho foi aplicado o modelo de parâmetros concentrados, onde o grão foi dividido hipoteticamente em dois compartimentos, e as concentrações de água foram consideradas uniformes em cada um dos compartimentos. Nesses compartimentos os coeficientes de secagem são diferentes e variam em função da temperatura. Como vantagem dessa aplicação tem-se a consideração de duas concentrações dentro do grão.

Os resultados dos experimentos próprios em camada fina apresentaram uma concordância satisfatória quando comparados com os dados de Soares (1986). Para a razão de umidade os valores médios das diferenças relativas percentuais foram de 1,84%, 1,79% e 4,16%, para os teores de umidade inicial dos grãos de 13%, 22% e 32%, respectivamente.

Também são consideradas satisfatórias as diferenças relativas médias percentuais sobre a razão de umidade, entre os dados experimentais próprios e os resultados da simulação utilizando o modelo de camada fina. Para a dinâmica de secagem de soja em camada fina em diferentes teores de umidade inicial dos grãos com $T = 70\text{ °C}$ e $v = 0.9\text{ m/s}$ as diferenças foram inferiores a 4,77%. A influência da temperatura do ar de secagem apresentou diferenças relativas médias de: 9,5% para $T = 110\text{ °C}$; 3,86% para $T = 90\text{ °C}$, e 5,45% para $T = 70\text{ °C}$. A influência da velocidade do ar de secagem indicou valores inferiores a 6,71%.

Os resultados obtidos através do modelo desenvolvido para simular a secagem em camada espessa e leito fixo 1-D foram comparados com os dados experimentais para validação. Os experimentos desenvolvidos em camada espessa permitiram a obtenção das variações do teor de umidade da soja, da temperatura dos grãos e do ar no secador, para uma temperatura do ar de secagem de 105 °C , velocidade do ar de secagem de $0,5\text{ m/s}$ e teor de umidade inicial dos grãos de 22 % (b.s). Concluiu-se que a simulação, utilizando o método de MacCormack 1D, descreve satisfatoriamente o processo de secagem em todas as seções da câmara de secagem. As diferenças relativas percentuais médias para o secador, considerando as variações do teor de umidade do grão, da temperatura do ar e da temperatura do grão, com relação ao tempo, são: 5,1%, 3,84% e 5,74%, respectivamente.

O modelo matemático e o programa computacional desenvolvido, utilizando o método de MacCormack 2D *time split*, para a simulação de secadores contínuos de fluxo cruzado com múltiplos estágios foi aplicado em diferentes esquemas de secadores com dupla e tripla recirculação do ar de secagem e permitem avaliar o desempenho energético dos secadores.

As configurações analisadas, incluindo a recirculação do ar, aumentam a eficiência do secador, reduzindo o consumo de combustível. A inversão da direção do fluxo de ar, obtida na recirculação forçada dos esquemas de secadores, acarreta um equilíbrio na distribuição dos parâmetros na direção transversal do secador e acelera um pouco o processo de secagem.

De forma conjunta, o reaproveitamento do calor do ar de recirculação provocou uma economia média de combustível para os casos analisados entre 28,5 e 41%, dependendo do esquema do secador. Essa economia de combustível ocorre devido ao reaproveitamento do ar

de recirculação e foi obtida comparando-se a taxa de calor fornecido ao ar com a recirculação sem a recirculação do ar de secagem.

O rendimento da secagem, obtido pela relação entre a energia necessária para a evaporação da umidade dos grãos e a energia fornecida ao ar de secagem para a evaporação da umidade desses grãos apresentou valores entre 39,7 e 68% para os esquemas de secadores analisados.

Para a realização de trabalhos futuros, ficam as seguintes sugestões:

1. Realizar mais experimentos em camada espessa de soja, com a variação da temperatura e velocidade do ar de secagem;
2. Implementar no programa computacional, com relação à seção de resfriamento, o cálculo dos conteúdos de umidade do grão e do ar e comparar com os resultados obtidos;
3. Desenvolver modelos matemáticos para outros tipos de grãos, principalmente o milho;
4. Desenvolver um modelo mais geral de camada fina, através do modelo de parâmetros distribuídos;
5. Realizar simulações de secadores reais e comparar os resultados com os dados apresentados na literatura.

REFERÊNCIAS

- Abalone, R.; Gastón, A.; Cassinera, A., Lara, M. A. 2006. **Thin layer drying of amaranth seeds**. Biosystems Engineering, 93 (2), 179 - 188.
- Aregba, A. W.; Nadeau, J. P. 2007. **Comparison of two non-equilibrium models for static grain deep-bed drying by numerical simulations**. Journal of Food Engineering. vol. 78, 1174 - 1187.
- ASAE STANDARDS – S448. 1998. **Thin - Layer drying of grains and crops**. p. 581 – 583.
- Bakker-Arkema, F. W.; Bickert, W. G.; Patterson, R. J. **Simultaneous heat and mass transfer during the cooling of a deep bed of biological products under varying inlet air conditions**. J. agric. Engng Res. 12, pp. 297-307. 1967.
- Baughman, C. R.; Handy, M. Y.; Barre, H. J. 1971. **Analog computer simulation of deep bed drying of grain**. Transactions of the ASAE, 14 (6), 1058 - 1064.
- Barre, H. J.; Baughman, C. R.; Hamdy, M. Y. 1971. **Application of a logarithmic model to deep bed drying of grain**. Transactions of ASAE, 14 (6), 1061 - 1064.
- Barrozo, M. A. S.; Murata, V. V; Assis, A. J.; Freire, J. T. 2006. **Modeling of drying in moving bed**. Drying Technology, 24, 269-279.
- Borges, P. A. P. 2002. **Modelagem dos processos envolvidos nos sistemas de secagem e armazenamento de grãos**. Porto Alegre: UFRGS. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Boyce, D. S. 1966. **Heat and moisture transfer in ventilated grain**. Journal of Agricultural Engineering Research, 11 (4), 255 - 265.

Brooker, D. B.; Bakker-Arkema, F. W.; Hall, C. W. 1974. **Drying cereal grains**. Westport, CT: AVI.

Cebeci, T.; Shao, J. P.; Kafyeke, F.; Laurendeau, E. **Computacional Fluid Dynamics for Engineers**. Horizons Publishing Inc: Long Beach, California, 2005.

Chen, C.; Wu, Po – Ching. **Thin Layer drying model for rough rice with high moisture content**. J. agric. Engng Res. 80 (1), 45 – 52, 2001.

Cihan, A.; Kahveci, K.; Hacıhafızoglu, O. **Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice**. 2007. Journal of Food Engineering 79, 293-298.

Corrêa, P. C.; Júnior, P. C. A.; Ribeiro, D. M.; Silva, F. S. da. **Equilíbrio higroscópico de milho, alpiste e painço: obtenção e modelagem**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 10, nº 1, p. 162 - 167, 2006.

Courtois, F.; Lebert, A.; Duquenoy, A.; Lasseran, J. C.; Bimbenet, J. J. **Modelling of drying in order to improve processing quality of maize**. 1991. v. 9, ed. 4, 927 – 945.

Courtois, F.; Lebert, A.; Lasseran, J. C.; Bimbenet, J. J. **Simulation of industrial dryers: solving numerical and computer problems**. Drying 92, edited by A. S. Mujumdar. Elsevier Science Publishers B. V., 1268 – 1277, 1992.

Crank, J. **The Mathematics of Diffusion**, 1957. Clarendon Press, Oxford.

Dall’Agnol, A., Hirakuri, M. H. Realidade e Perspectivas do Brasil na Produção de Alimentos e Agroenergia, com Ênfase na Soja. Circular Técnica 59. Embrapa Soja. Londrina, PR, 2008

Dalpasquale, V. A. **Drying of soybeans in continuous-flow dryers and fixed-bed drying systems**. Michigan. Tese (Ph.D), Michigan State University, 1981.

Engenharia Mega S. A. Secadores de grãos. Disponível em: <http://www.secadorasmega.com.ar/productos_po.htm> Acesso em: 10 jan. 2011.

Ferreira, M. M. P., 2004. **Desenvolvimento, caracterização e secagem de sementes com cobertura artificial**. São Carlos: UFSCar. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de São Carlos. 235 p.

Ferziger, Joel H.; Peric, Milovan. **Computacional methods for fluid dynamics**. 2nd ed. Berlin: Springer, 1999.

Fortuna, Armando de Oliveira. 2000. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.

França, A. S. 1991. **Simulação bidimensional de secadores de grãos de cereais**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, MG, Brasil.

França, A. S.; Fortes, M.; Haghghi, K. 1994. **Numerical simulation of intermitent and continuous deep-bed drying of biological materials**. *Drying Technology*, vol. 12, nº 7, pp. 1537-1560.

Freire, F. B.; Barrozo, M. A. S.; Sartori, D. J. M.; Freire, J. T. **Study of the drying kinetics in thin layer: fixed and moving bed**. *Drying Technology*, 23: 1451-1464, 2005.

Garcia, D. C.; Barros, A. C. S. A.; Peske, S. T.; Menezes, N. L. de. 2004. **A secagem de sementes**. *Ciência Rural*, vol. 34, n2, p. 603-608.

Gely M. C.; Giner, S. A. **Diffusion coefficient relationships during drying of soya bean cultivars**. 2007. *Biosystems Engineering* 96 (2), 213-222.

Giner, S. A.; Estrebou, C. A. **Visual software (FluX) for simulation of cross flow dryer performance and effect on quality. Examples for wheat**. *Drying 2004 – Proceedings of the*

14th International Drying Symposium (IDS 2004). São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. A, pp. 605-612.

GSI Brasil Indústria e Comércio de Equipamentos Agropecuários Ltda. Catálogo Process Dryer Secadores de Alto Desempenho.

Guimarães, D. S.. 2005. **Desenvolvimento de módulo computacional para a secagem estacionária de sementes.** Tese (Doutorado), Universidade Federal de Pelotas. Pelotas.

Hall, C. W. **Drying and storage of agricultural crops.** Westport: AVI Publishing Company, 1980.

Henderson, S. M. **Progress in developing the thin layer drying equation.** Transaction of the ASAE, vol. 17, 6, pp. 1167-1172. 1974.

Istadi, I.; Sitompul, J. P. **A comprehensive mathematical and numerical modeling of deep-bed grain drying.** 2002. vol. 20, n. 6, 1123-1142.

Janjai, S.; Lambert, N.; Intawee, P.; Mahayothee, B.; Haewsungcharern, P. M.; Bala, B. K.; Muller, J. 2008. **Finite element simulation of drying of mango.** Biosystems Engineering 99, 523-531.

Kashaninejad, M.; Mortazavi, A.; Safekordi, A.; Tabil, L. G. **Thin – layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts.** Journal of Food Engineering, 78, 98 – 108, 2007.

Khatchatourian, O. A.; Borges, P. A. P.; Vielmo, H. A. 2003. **Simulation of Soy Grains Drying Dynamics in Camera of Fixed Bed.** Proceeding of the 17th Internacional Congress of Mechanical Engineering. São Paulo, Brazil.

Kashaninejad, M.; Mortazavi, A.; Safekordi, A.; Tabil, L. G. 2007. **Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts.** Journal of Food Engineering, 78, 98-108.

Khatchatourian, O. A.; Oliveira, F. A. de. 2006. **Mathematical Modelling of Airflow and Thermal State in Large Aerated Grain Storage**. Biosystems Engineering, 95 (2), 159-169.

Katekawa, M. E; Silva, M. A. 2006. **A review of drying models including shrinkage effects**. Drying Technology. 24; 5-20.

KEPLER WEBER. *Cátalogo Secadores 20897*.

Lasseran, J. C.; Courtois, F. **A CAD software to improve the heat energy efficiency of mixed-flow maize dryers**. 1993. CESA/FAO Latin American Technical Meeting on Grain Drying and Storage. October 18-22, Porto Alegre, Brasil.

Lewis, W. K. **The rate of drying of solid materials**. 1921. Engng Chemistry, vol. 13, p. 427.

Liu, Q.; Bakker – Arkema, F. W. **Automatic control of crossflow grain dryers, part 1: development of a process model**. J. agric. Engng Res., 80 (1), 81 – 86, 2001.

Luikov, A. V. 1966. **Heat and mass transfer capillary-porous bodies**. Pergamon, New York.

Luikov, A. V.; Mikhailov, Y. A. *Theory of heat and mass transfer*. Moscow, Energoizdat, 1963.

Luz, G. R.; Souza, L. H. C. D.; Jorge, L. M. M.; Paraíso, P. R. **Estudo das isothermas de equilíbrio do farelo de soja**. 2006. Ciências Tecnológicas e Alimentícias. Campinas, 26 (2): 408 – 413.

MacCormack, R. W. **The effect of viscosity in hipervelocity impact cratering**. AIAA, vol. 9, p. 354. Cincinnati, Ohio, 1969.

MacCormack, R. W. **Numerical solutions of the interaction of a shock wave with a laminar boundary layer**. Roc. Second Int. Conf. Num. Methods Fluid Dyn, Lecture Notes in physics. P. 151-163. New York, 1971.

Madhiyanon, T.; Soponronnarit, S.; Tia, W. **Drying Technology**, 19 (6), 1045 – 1064, 2001.

Nellist, M. E.; O'Callaghan, J. R. 1971. **The measurement of drying rates layers of ryegrass seed**. Journal of Agricultural Engineering Research, vol. 16, nº 3, pp. 192-212.

Nellist, M. E. **Modelling the performance of a cross-flow grain drier**. J. agric. Engng Res., 1987.

Oliveira, L. S.; Haghghi, K. 1998. **Conjugate heat and mass transfer in convective drying of multiparticle systems. Part I: theoretical considerations**. Drying Technology. vol. 16, nº 3-5, pp. 433-461.

Park, K. J.; Antonio, G. C.; Oliveira, R. A.; Park, K. J. B. 2007. Conceitos de processos e equipamentos de secagem. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>> Acesso em 10 abr. 2008.

Parry, J. L. 1985. **Mathematical Modeling and computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Agricultural Grain Drying: A Review**, J. Agric. Eng. Res, vol. 32, nº1, pp. 1-29.

Parti, M. 1993. **Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers**. J. Agric. Engng Res., vol. 54, pp. 339-352.

Pereira, J. A. M. [S.d]. **Água no grão: comportamento, disponibilidade, e relação com a tecnologia de armazenagem**. Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

Platt, D.; Rumsey T. R.; Palazoglu, A. **Dynamics and control of cross-flow grain dryers 1. Model development and testing.** *Drying Technology*, 9 (1), 27-60. 1991.

Prachayawarakorn, S.; Prachayawasin, P.; Soponronnarit, S. **Heating process of soybean using hot air and superheated-steam fluidized-bed dryers.** *LWT* 39 (2006) 770-778.

Puzzi, D. **Abastecimento e armazenamento de grãos.** Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986.

Rafiee, S.; Keyhani, A.; Mohammadi, A. **Soybean Seeds Mass Transfer Simulation during Drying Using Finite Element Method.** *World Applied Sciences Journal* 4 (2), 284-288.

San Martin, M. B.; Mate, J. I.; Fernandez, T.; Virseda, P. **Modeling adsorption equilibrium moisture characteristics of rough rice.** *Drying Technology*, 19 (3&4), 681-690, 2001.

Silva, L. C. da. **Secagem de grãos.** 2005. Boletim técnico AG: 04/04, Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal do Espírito Santo.

Simmonds, W. H. C.; Ward, F. T.; McEwen, W. **The drying of wheat. Part I: The mechanism of drying.** 1953. *Trans. Inst. Chem. Eng*, 31, 265-288.

Sitompul, J. P., Istadi, Widiassa, I. N. **Modeling and simulation of deep – bed grain dryers.** *Drying Technology*, 19 (2), 269 – 280, 2001.

Sitompul, J. P.; Istadi; Sumardino, S. **Modelling and simulation of momentum, heat, and mass transfer in a deep-bed grain dryer.** 2003. v. 21, n. 2, pp. 217-229.

Soares, J. B. 1986. **Curvas de secagem em camada fina e propriedades físicas de soja.** Dissertação (Mestrado), Universidade de Viçosa. Viçosa, 1986.

Songtao, H.; Xuquan, Li; Guodan, Liu; Leming, Lian; Lineng, Li. 1999. **Cross-effect of heat and mass transfer of Luikov equation: measurement and analysis**. Drying Technology, vol 17, n° 9, pp. 1859-1877.

Souza, C. M. A. de; Queiroz, D. M. de; Lacerda Filho, A. F. de. **Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa**. 2002. Scientia Agrícola, v. 59, n. 4, 653 - 660.

Srivastava, V. K.; John, J. **Deep bed grain drying modeling**. Energy Conversion and Management, 43, 1689 – 1708, 2002.

Tang, Z.; Cenkowski, S.; Muir, W. E. **Modelling the superheated – steam drying of a fixed bed of brewer’s spent grain**. Biosystems Engineering, vol. 87, n° 1, pp. 67 – 77, 2004.

Tirawanichakul, Y.; Prachayawarakorn, S.; Tungtrakul, P.; Chaiwatpongskorn, W.; Soponronnarit, S. **Experiments on In-Store Paddy Drying Under Tropical Climate: Simulation and Product Quality**. Drying Technology, 21 (6), pp. 1049-1064. 2003.

Thompson, T. L; Peart, R. M.; Foster, G. H. 1968. **Mathematical simulation of corn drying - a new model**. Transactions of the ASAE, vol. 11, n° 14, pp. 582 - 586.

Vieira-Junior, P. A. 1999. **Estimativas do potencial total de água em sementes, usando modelos não lineares**. Revista Brasileira de Sementes, Vol. 21, n° 1, p. 87 - 92.

Wang, Dai-Chi; Fon, Din-Sue; Fang, W. **Development of SAPGD – a simulation software regarding grain drying**. Drying Technology, vol. 22, n° 3, pp. 609-625, 2004.

Weber, E. A. **Armazenagem agrícola**. Porto Alegre: Kepler Weber Industrial, 1995.

Weber, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Canoas, RS: Editora Salles, 2005.

Weres, J.; Olek, W. 2005. **Inverse finite element analysis of technological processes of heat and mass transport in agricultural and forest products.** *Drying Technology*, 23, 1737-1750.

White, G. M.; Bridges, T. C.; Loewer, O. J.; Ross, I. J., 1981. **Thin-layer drying model for soybeans.** *Transactions of the ASAE*, pp. 1643-1646.

Zhihuai, M.; Chongwen, C. **Simulation and optimization of cross flow grain dryers.** *Drying Technology*, 17(9), 1767-1777. 1999.