

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

MODELAGEM DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS NOS SISTEMAS DE SECAGEM E
ARMAZENAMENTO DE GRÃOS

por

PEDRO AUGUSTO PEREIRA BORGES

Tese para a obtenção do Título de

Doutor em Engenharia

Porto Alegre, fevereiro de 2002

MODELAGEM DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS NOS SISTEMAS DE SECAGEM E ARMAZENAMENTO DE GRÃOS

por

PEDRO AUGUSTO PEREIRA BORGES
Mestre em Matemática

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. Oleg A. Khatchatourian

Co-orientador: Prof. Dr. Horácio A. Vielmo

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Jáuber Cavalcante de Oliveira, Depto de Informática, UFSC

Prof. Dr. Victor Krioukov, Depto de Tecnologia, UNIJUÍ

Prof. Dr. Keiko Wada, Depto de Engenharia Química, UFRGS

Prof. Dr. Paulo S. Schneider, Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS

Coordenador do PROMEC: Prof. Dr. Alberto Tamagna

Porto Alegre, fevereiro de 2002.

RESUMO

A produção de soja é uma das principais atividades econômicas na Região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. As perdas de produto em condições de comercialização ocasionadas nas atividades de secagem e armazenamento são significativas, justificando a pesquisa e aprimoramento destes processos.

Nesta tese foram pesquisados dois problemas: 1. Modelamento matemático dos processos de secagem, utilizando parâmetros conhecidos de soja e 2. Modelamento matemático do problema de aeração para o cálculo da distribuição da pressão e da velocidade do ar na massa de grãos em unidades de armazenamento de soja.

No problema de secagem foi desenvolvido um sistema composto de quatro equações diferenciais parciais hiperbólicas acopladas não-lineares, que descreve o comportamento da temperatura e do teor de umidade do ar e dos grãos em função do tempo. Para resolver o sistema foram utilizados os métodos das diferenças finitas (p. ex., métodos de MacCormack e Crank-Nicolson.) e o método dos volumes finitos. A análise dos resultados permitiu recomendar o método mais adequado para cada tipo do problema. Para determinação da intensidade do fluxo de massa e de calor foram utilizados os dados experimentais de camada fina obtidos da literatura e complementados com dados experimentais desta tese. Foi desenvolvido um equipamento para obtenção das curvas de secagem de grãos em secador de leito fixo, a fim de identificar o modelo para secagem em camada espessa. A comparação entre os resultados experimentais e das simulações numéricas mostrou que o modelo descreve razoavelmente a dinâmica de secagem.

No problema de aeração foi desenvolvido um modelo matemático que descreve o escoamento do ar em sistemas de armazenamento de grãos, baseado em relações experimentais entre velocidade e gradiente de pressão. Para resolver o problema de aeração foi utilizado o método dos elementos finitos e desenvolvido um programa computacional. Um teste realizado com o programa mostrou que os resultados da solução numérica convergem para uma solução analítica conhecida. As simulações realizadas mostraram que o programa computacional pode ser usado como instrumento auxiliar para o projeto de silos, possibilitando o cálculo e a visualização gráfica da distribuição das pressões e das linhas de corrente em diferentes seções do armazém.

ABSTRACT

The soybean production is one of the main economic activities of the Northwest Region of Rio Grande do Sul State. The meaning loss of this product in drying and storage activities, justify the investigated and refinement of these processes.

In this thesis two problems were researched: 1. Mathematical modeling of the drying process, using soybean known parameters and 2. Mathematic modeling of the aeration problem to calculate the pressure distributions and air velocity in the grain bed in the soybean storage unities.

A system with four hyperbolic coupled non-linear differential equations was developed to the drying problem, which describe the variation of air and grain temperature and moisture content as a time function. To solve this system the differences finite method (McCormack and Crank-Nicolson methods) and the finites volumes method were used. The results of the analyses allowed the recommendation of the most adequate method for each problem type. To determine mass and heat flow intensity experimental data of thin layer were employed obtained from the literature and complemented with own experimental data. An equipment was developed to obtain drying rate curves about fixed bed dryer, to identify the deep bed drying model. The comparison between experimental and simulated results showed that the model describe reasonably the drying dynamic.

For the aeration problem a mathematical model was developed which describes air flow in grain storage systems, based in experimental relations between velocity and pressure gradient. To solve aeration problem the finite element method was employed and developed a computing program. The conducted test with the program showed that the numeric solution converge to analytic known solution. The simulations showed that the computing program could e used as an auxiliary instrument to project grain silos, enabling the calculus and graphic visualization of pressure and stream lines distribution in different silos sections.

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. A cultura da soja no país e na região noroeste do RS.....	1
1.2. Perdas de grãos e conservação do produto armazenado.....	2
1.3. Modelagem e otimização dos processos de secagem e armazenamento de grãos	5
1.4. Escopo do presente trabalho	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Tipos e esquemas de secadores, armazéns e silos	7
2.1.1. Secador do tipo torre	8
2.1.2. Armazém graneleiro	12
2.1.3. Silo secador	13
2.2. Modelagem matemática do processo de secagem de grãos	15
2.2.1. Noções preliminares	15
2.2.2. Modelos matemáticos	19
2.2.3. Aplicações dos modelos matemáticos	32
2.3. Modelagem matemática do processo de aeração de grãos	34
2.3.1. Noções preliminares	34
2.3.2. Modelos matemáticos	35
2.4. Proposição do Problema	41
3. MODELOS MATEMÁTICOS DOS PROCESSOS DE SECAGEM E AERAÇÃO	43
3.1. Modelo matemático do processo de secagem de grãos	43
3.1.1. Equação de conservação da massa de água no ar	50
3.1.2. Equação da conservação da energia no ar	51
3.1.3. Equação de conservação da massa de água nos grãos	55
3.1.4. Equação de conservação da energia nos grãos	55
3.2. Modelo matemático do processo de aeração de grãos.....	58
4. MÉTODOS NUMÉRICOS DE SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EDPs	61
4.1. Métodos de solução do sistema de EDPs para o modelo de secagem	61
4.1.1. Formulação para o Método das Diferenças Finitas ..	61
4.1.2. Comparação do valor das derivadas temporais e espaciais nas equações da umidade e temperatura do ar	63
4.1.3. Formulação para o Método dos Volumes Finitos.....	65
4.1.4. Análise dos resultados: Comparação entre os métodos numéricos	69
4.2. Método de solução para o problema de aeração	70
4.2.1. Formulação para o Método dos Elementos Finitos	70
4.2.2. Equações do Método dos Elementos Finitos	73

5. DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E EXPERIMENTOS DE SECAGEM	78
5.1. Experimentos de secagem em leito profundo	81
5.1.1. Descrição dos equipamentos	81
5.1.2. Descrição dos experimentos	84
5.2. Experimentos de secagem em camada fina	86
5.2.1. Descrição dos equipamentos.....	86
5.2.2. Descrição dos experimentos	86
6. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	88
6.1. Problema de secagem.....	88
6.1.1. Verificação do modelo para dados de camada fina.....	88
6.1.2. Comparação entre os resultados experimentais e simulados para o problema de secagem em leito profundo.....	91
6.1.3. Balanços de massa e energia	94
6.1.4. Simulações numéricas	97
6.1.5. Simulações no secador de fluxo contínuo	99
6.2. Problema de aeração	101
6.2.1. Determinação dos coeficientes A e B.....	101
6.2.2. Validação do programa de aeração: comparação com uma solução analítica	103
6.2.3. Simulações numéricas	108
7. CONCLUSÃO	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
APÊNDICE I Laboratório de Secagem	
APÊNDICE II Planilhas dos experimentos	

LISTA DE SÍMBOLOS

a	razão entre a área superficial e o volume do grão [m^{-1}]
A	área [m^2]
B	expoente da equação de Shedd [adimensional]
B_i	coeficiente de troca de massa d'água entre os compartimentos i e $i+1$
C	calor específico [$J kg^{-1} K^{-1}$]
C_p	calor específico a pressão constante [$J kg^{-1} K^{-1}$]
C_v	calor específico do vapor de água [$J kg^{-1} K^{-1}$]
G_a	taxa de fluxo de massa de água do ar [$kg m^{-2} s^{-1}$]
h	entalpia (J)
H_v ou h_{fg}	calor latente de vaporização da água [$J kg^{-1}$]
h_c	coeficiente convectivo de calor [$J s^{-1} m^{-2} K^{-1}$ ou $W m^{-2}$]
K	coeficiente de permeabilidade [$m^4 s^{-1} N^{-1}$]
m_s	massa do grão seco [kg]
m_u	massa do grão úmido [kg]
m_w	massa de água [kg]
M	teor de umidade do grão [adimensional]
M_e	teor de umidade de equilíbrio [adimensional]
P	pressão por profundidade do leito de grãos [$P_a m^{-1}$]
p	pressão [adimensional]
P_x	derivada parcial da pressão na direção X
P_y	derivada parcial da pressão na direção Y
Q	fluxo de ar [$m^3 min^{-1} \cdot m^{-2}$]
Re	Número de Reynolds
T	temperatura [$^{\circ}C$ ou K]
t	tempo (s)
u	componente da velocidade na direção X [$m s^{-1}$]
U_a	umidade relativa do ar [decimal]
V	volume [m^3]
V_{vaz}	volume de ar dentro do volume de controle [m^3]
v	componente da velocidade na direção Y [$m s^{-1}$]
W	velocidade [$m s^{-1}$]
Y	teor de umidade do ar (base seca)
x, y e z	coordenadas cartesianas [m]

Letras Gregas

β_p	coeficiente de transferência de massa [$m \cdot s$]
ε	porosidade [adimensional]
φ	umidade relativa do ar [%]
Φ_m	densidade de fluxo de massa entre grão e ar [$kg m^{-2} s^{-1}$]
Φ_h	densidade de fluxo de calor entre grão e ar [$W m^{-2}$]
Ψ	variável genérica
ρ	densidade ou massa específica [$kg m^{-3}$]
θ	temperatura do grão [K]
τ	tempo [s]
ω	fração vaporizada da massa de água [decimal]

Sub-índices

<i>a</i>	ar
<i>av</i>	valor médio
<i>g</i>	grão
<i>h</i>	calor
<i>l</i>	líquido
<i>m</i>	massa
<i>o</i>	valor inicial
<i>p</i>	produto, espécie
<i>s</i>	seco
<i>u</i>	úmido
<i>v</i>	vapor
<i>w</i>	água

Sobre-índices

<i>o</i>	tempo anterior [<i>s</i>]
----------	-----------------------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 - Gráfico de conservação de cereais.....4

Capítulo 2

Figura 2.1.1 - Partes de um secador tipo “torre” de fluxo misto9

Figura 2.1.2 - Esquema de fluxos para secagem contínua, com resfriamento10

Figura 2.1.3 - Esquema geral dos tipos de fluxos de ar de secagem11

Figura 2.1.4 - Fluxo de ar na torre de secagem.....11

Figura 2.1.5 - Secção transversal de um armazém graneleiro.....13

Figura 2.1.6.- Silo secador cilíndrico.....14

Figura 2.2.1 - Histerese entre absorção e desorção18

Figura 2.3.1 - Variação do fluxo de ar em relação à queda de pressão para a soja, com umidade inicial de 10% (base seca). (Uma das curvas de Shedd, 1953).....36

Capítulo 3

Figura 3.1.1 – Secador de leito fixo.....43

Figura 3.1.2 – Volume de controle (VC):44

Figura 3.1.3 - Curvas de dependência entre RU e $\frac{\partial RU}{\partial t}$ obtidas com os dados de SOARES para secagem de soja em camadas finas.....46

Figura 3.1.4 - K_1 em função da temperatura dos grãos.....47

Figura 3.1.5 - K_2 em função da temperatura dos grãos.....48

Figura 3.1.6 - K_3 em função da temperatura dos grãos.....48

Figura 3.1.7 - Comparação entre os dados experimentais e as curvas de secagem obtidas usando a dependência (3.1.15)49

Capítulo 4

Figura 4.1.1 - Comparação de derivadas temporais e espaciais para temperatura do ar durante de tempo de secagem.64

Figura 4.1.2. Comparação de derivadas temporais e espaciais para teor de umidade do ar durante de tempo de secagem.64

Figura 4.1.3. - Domínio de integração unidimensional65

Figura 4.1.4 - Comparação de métodos numéricos aplicados.69

Figura 4.1.5 - Comparação entre Diferenças Finitas (*) e Volumes Finitos (—).....70

Figura 4.2.1 - Elemento simples bidimensional.74

Capítulo 5

Figura 5.1 - Esquema do equipamento experimental.....78

Figura 5.2 – Fotografia do equipamento de secagem em leito profundo.78

Figura 5.3 - Manômetro de tubos com seções diferentes 79

Figura 5.4 - Distribuição da velocidade de ar em vários pontos ao longo do diâmetro da seção do tubo, para diferentes velocidades.80

Figura 5.5 - Relação do Coeficiente C com o número de Reynolds.80

Figura 5.6 - Câmara de secagem em leito profundo.82

Figura 5.7 – Seção transversal da caixa de secagem com a distribuição dos termo-pares.....84

Figura 5.8 – Câmara de secagem em camada fina.....86

Figura 5.9 – Temperatura ao longo de um diâmetro na câmara de secagem em camada fina.

$T_{amb} = 26^{\circ}C$ e $T_a = 60^{\circ}C$87

Capítulo 6

Figura 6.1.1 – Dados experimentais de camada fina de [Soares, 1986] (pontos vazios) e os dados obtidos com experimentos próprios (pontos cheios).....	90
Figura 6.1.2 – Comparação entre os dados experimentais de camada fina (pontos) e simulações com o modelo matemático (curvas).	90
Figura 6.1.3 – Comparação entre os dados experimentais de camada fina (pontos) e simulações com o modelo matemático (curvas).	91
Figura 6.1.4 – Comparação entre os dados experimentais de camada fina (pontos) e simulações com o modelo matemático (curvas).....	91
Figura 6.1.5 - Comparação entre dados experimentais e numéricos em leito profundo: Teor de umidade dos grãos, para $T_a=70^{\circ}\text{C}$; $V_a=1,25\text{ m/s}$; 3h de secagem e 1h de resfriamento.....	92
Figura 6.1.6 – Comparação entre dados experimentais e numéricos: Temperatura dos grãos.para $T_a=50^{\circ}\text{C}$; $W_a=1,25\text{ m/s}$; $0,75\text{ h}$ de secagem e 1h de resfriamento.	93
Figura 6.1.7 – Comparação entre dados experimentais e numéricos: Temperatura do ar. para $T_a=50^{\circ}\text{C}$ e $W_a=1,25\text{ m/s s}$; secagem de $0,75\text{ h}$ e 1h de resfriamento.....	93
Figura 6.1.8 - Influência da velocidade do ar de secagem no teor de umidade dos grãos.....	94
Figura 6.1.9 – Balanço de massa de água para todo o secador de leito fixo.....	95
Figura 6.1.10 - Balanço de energia para todo o secador de leito fixo.....	97
Figura 6.1.11 – Influência da velocidade do ar de secagem no teor de umidade dos grãos com $T_a=70$ e 110°C em $z=L/2$	98
Figura 6.1.12 – Influência da temperatura de secagem no teor de umidade dos grãos com $W_a=0,9\text{m/s}$ em $z=L/2$	99
Figura 6.1.13 - Simulação da dinâmica de secagem em regime de fluxo contínuo com 10 estágios, comparado com o regime de secagem em leito fixo.....	101
Figura 6.2.1 - Dados experimentais da perda de pressão estática por metro da camada de soja em função da vazão, com diferentes teores de umidade.....	102
Figura 6.2.2 – Domínio de integração.	105
Figura 6.2.3 – Diferença entre as soluções exata e numérica.	106
Figura 6.2.4 – Diferença entre a solução exata e a solução da equação de Laplace (1ª aproximação, para malha de 25 nós)	107
Figura 6.2.5 –Diferença entre as soluções exata e numérica para malha de 25 nós e 2 iterações.	107
Figura 6.2.6 – Diferença entre as soluções exata e numérica para malha de 25 nós e 4 iterações	108
Figura 6.2.7 – Secção transversal de um silo.	108
Figura 6.2.8 - Distribuição das isóbaras no silo com 5 fontes.	109
Figura 6.2.9 - Distribuição das isóbaras em silo com secção transversal na forma de trapézio, $A_e/A_s=2$	109
Figura 6.2.10 - Queda de Pressão Relativa ($\Delta P/\Delta P_{max}$) ao longo da altura do silo, para diferentes teores de umidade, $A_e/A_s=4$	110
Figura 6.2.11 - Os valores de m com relação aos teores de umidade do grão	110
Figura 6.2.12 - Variação da área de secção transversal com relação ao coeficiente K relativo, para diferentes teores de umidade	111
Figura 6.2.13 - Distribuição das linhas de fluxo no silo (3 fontes)	111
Figura 6.2.14 - Distribuição das linhas de fluxo no silo (7 fontes)	112
Figura 6.2.15 - Distribuição das isóbaras para diferentes posições das fontes (5 fontes)	112
Figura 6.2.16 - Distribuição das linhas de corrente para diferentes posições das fontes (5 fontes)	112

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1.1 – Composição média da soja [Puzzi, 1977]	1
---	---

Capítulo 4

Tabela 4.1.1 - Coeficientes da equação geral para volumes finitos.....	68
--	----

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Procedimentos para os experimentos de secagem em leito profundo	85
Tabela 5.2 – Procedimentos para os experimentos de secagem camada fina	87

Capítulo 6

Tabela 6.1 - Porosidade para diferentes teores de umidade de soja	102
Tabela 6.2- Coeficientes A e B para a soja com diferentes teores de umidade	102

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo justifica-se a escolha do tema desta tese em função da importância econômica da cultura da soja na região noroeste do Rio Grande do Sul, dos problemas que ocorrem nas operações de secagem e armazenamento e do uso da modelagem matemática como técnica de pesquisa.

1.1. A cultura da soja no país e na região noroeste do estado do RS

A soja é uma planta oleaginosa de origem chinesa e chegou ao Brasil (Bahia) no fim do século passado. Sua classificação biológica é a seguinte: Família : *Leguminosae* ; Sub-Família: *Faboidae*; Gênero : *Glycine L.*; Espécie: *Glycine max*. Foi cultivada inicialmente no Rio Grande do Sul pouco antes de 1950 e de forma mais intensiva a partir da década de 60, juntamente com o trigo, na região Noroeste do Estado.

O interesse pelo cultivo da soja deve-se ao alto valor protéico e a grande quantidade de gordura presente no grão (ver Tabela 1.1). A gordura da soja é aproveitada industrialmente, para a produção de óleo comestível e margarinas. A pasta da soja é aproveitada para farinhas e farelos, utilizados nas rações animais e, em percentual bem menor, para alimentação humana.

Tabela 1.1 – Composição média da soja [Puzzi, 1977]

Componentes	%
Água	10
Matérias protéicas	35
Matérias graxas	19
Carboidratos	26
Celuloses	5
Cinzas	5

Devido à utilização de grandes quantidades de soja pela indústria nacional e mundial, essa leguminosa passou a ser cultivada em grande escala em todo o mundo. Os Estados Unidos da América são os maiores produtores e por isso, praticamente determinam os preços praticados desse produto. O Brasil colheu pouco mais de 31,5 milhões de toneladas em 1999.

A produção de soja é uma das principais atividades econômicas na Região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. É uma atividade agrícola geradora de recursos, da qual dependem outras áreas tais como a indústria, o comércio e a prestação de serviços. O comércio regional oferece desde artigos para o abastecimento da população rural (roupas, alimentação, etc) até os insumos agrícolas tais como adubos, sementes, fertilizantes, herbicidas, ferramentas e maquinário. No setor de serviços o cultivo da soja emprega mão de obra diretamente na lavoura (atualmente em

fase de diversificação devido à mecanização), técnicos de nível médio (tecnólogos em agronomia, extensão rural) e superior (agrônomos). A indústria regional produz, além das ferramentas mais comuns, máquinas sofisticadas como tratores, plantadeiras, roçadeiras, arados, colheitadeiras, silos metálicos, máquinas de limpeza e secadores. Esses implementos são imprescindíveis para a produção em grande escala.

Na região noroeste do RS, existem empresas com sede em Panambi, Santa Rosa, Horizontina, Frederico Westphalen e Ijuí que fabricam diversos tipos de máquinas para processamento de produtos agrícolas. Nas áreas de secagem e armazenamento, destacam-se as empresas fabricantes de secadores de grande porte e silos metálicos circulares de leito fixo. Outras empresas fabricam acessórios tais como quadros de comando para o gerenciamento do funcionamento dos secadores e monitoramento da temperatura em armazéns graneleiros. Estas empresas desenvolveram seus produtos somando suas próprias iniciativas (p. ex., desenvolvimento de protótipos, análise do desempenho das unidades produzidas e implementação de modificações necessárias) à tecnologia pronta, nacional ou importada (p.ex., softwares sobre secagem e aeração, dispositivos para controle de secadores). A otimização do rendimento das máquinas e o barateamento do produto, visando uma melhor inserção no mercado, tem exigido conhecimentos mais detalhados acerca dos fenômenos inerentes aos processos de secagem e armazenamento. A necessidade de aperfeiçoamento desses produtos industriais, leva ao desenvolvimento de formas alternativas de apoio a novos projetos, que dêem respostas rápidas, precisas e de baixo custo, evitando ou complementando a onerosa alternativa da construção de protótipos.

1.2. Perdas de grãos e conservação do produto armazenado

Em cada uma das etapas da produção de soja, desde a maturação no campo, colheita, transporte, secagem até o armazenamento, ocorrem perdas significativas de grãos em condições de comercialização. As perdas variam de acordo com a região, rotinas de trabalho adotadas, técnicas de colheitas, máquinas, tipo de secagem e armazenamento. Nos EUA, as perdas no armazenamento ficam em cerca de 4,5 % e ocorrem devido aos danos mecânicos durante o manuseio de secagem e armazenamento (o ataque de insetos é responsável por cerca de 1 a 3% das perdas) [Brooker *et al.*, 1982]. A EMBRAPA elaborou uma tabela sobre a produção agrícola de 1993, mostrando que dos 24,363 milhões de toneladas de soja produzidos no Brasil, 10,3 % foram perdidos. Cerca de 5% na colheita e 2,7 % no armazenamento. [Weber, 1998].

Considerando uma safra gaúcha como a de 2001, estimada em 6,2 milhões de toneladas, a economia do estado deixaria de contar com cerca de 350 milhões de reais. A redução destas perdas é um dos

objetos da pesquisa científica atual, e particularmente a redução das perdas no armazenamento, pela otimização do funcionamento dos secadores e armazéns, é o objeto de estudo desta tese.

Um procedimento prático já adotado na região é a realização da colheita do grão com teores de umidade mais elevados, pois as perdas na lavoura e por danos mecânicos aumentam se o teor de umidade diminui. A secagem artificial apresenta várias vantagens: A secagem na lavoura é um processo natural de amadurecimento e envolve respiração, portanto com perda de matéria seca (CO_2), enquanto que a secagem artificial ocorre somente com a perda de água; a secagem pode ser processada independentemente das condições do tempo; existe a possibilidade de estabelecer um programa de operação com mais facilidade; como o processo é mais rápido, impede o desenvolvimento de fungos [Weber, 1998]. A desvantagem deste procedimento é o custo da secagem.

Para conservar o produto armazenado utilizam-se recursos preventivos como a secagem prévia e a aeração durante o armazenamento. Recursos corretivos como a aplicação de produtos químicos (fumigação) e mudança da massa de grãos de um silo para outro (transilagem), também são usados, mas podem danificar o produto deixando resíduos químicos, além de aumentar os custos do armazenamento. Visando evitar esse tipo de correção, a massa de grãos deve ser mantida sob condições ambientais bem especiais. Ou seja, condições que não prejudiquem o produto e, ao mesmo tempo, sejam indesejáveis pelos agentes que o atacam (ratos, insetos, fungos e umidade). Burges e Burrell (Hara, 1977) elaboraram um gráfico onde determinam as temperaturas e umidades ideais para a conservação de produtos agrícolas (Fig. 1.1). De modo geral, grãos com baixo teor de umidade (menor que 14% *b.u.*) serão bem conservados se forem mantidos à temperatura menor que 22°C.

A secagem é um processo preventivo e consiste na retirada de parte da água do grão, para evitar a ação de microorganismos, insetos e diminuir a intensidade do processo natural de desenvolvimento do grão durante o período de armazenamento. O resultado da secagem é a separação parcial entre o líquido (geralmente água) e a matriz sólida. Durante o armazenamento por um período longo pode ocorrer perda de matéria orgânica pela respiração dos grãos [Brooker *et al.*, 1982 e Puzzi, 1977].

Em regiões de clima seco, como é o caso do Mato Grosso e da Bahia, em regra, a soja não necessita de secagem artificial para posterior armazenamento. No entanto, no noroeste do RS, a época de colheita (março-maio) coincide com um período de chuvas, sendo que o produto sai úmido da lavoura e chega nos armazéns com teor de umidade na faixa de 16 a 21 % (*b.u.*).

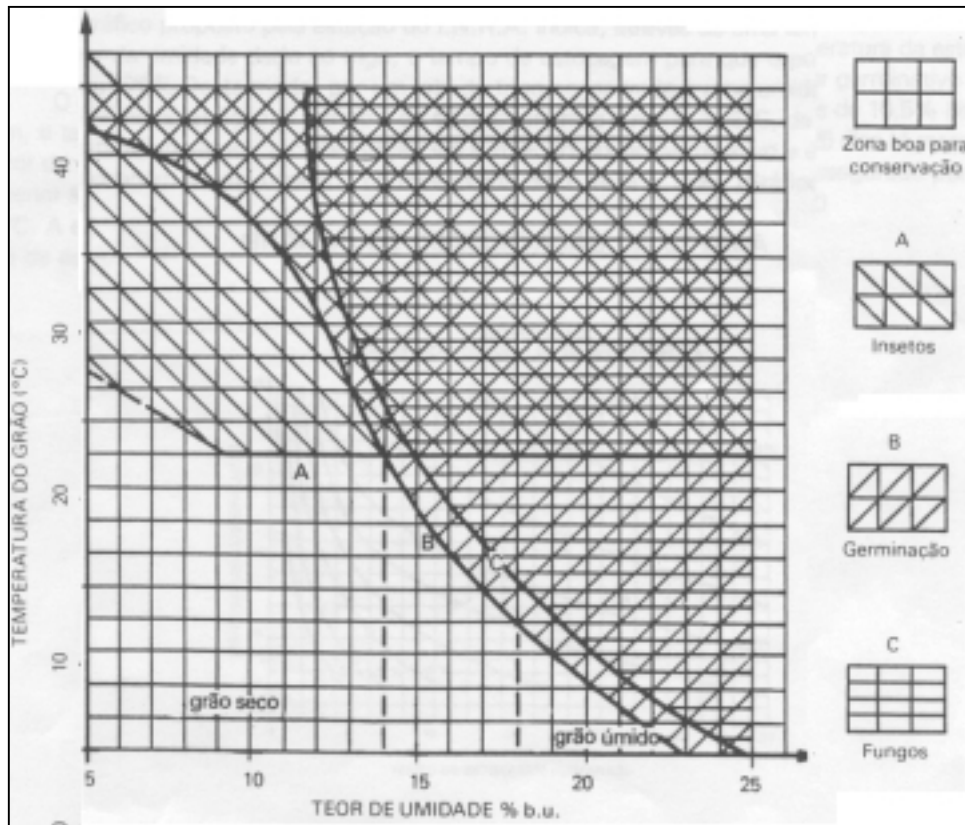


Figura 1.1 - Gráfico de conservação de cereais (Kepler Weber)

Se o silo tiver aeração e o teor de umidade não for superior a 15 %, a secagem por secador pode ser dispensada, e a própria aeração faz uma secagem lenta de até dois pontos percentuais da umidade inicial dos grãos. Se o armazenamento for em um silo sem aeração, a secagem artificial torna-se obrigatória, reduzindo o teor de umidade para próximo de 13 %.

O processo de aeração é simplesmente a passagem forçada de ar ambiente (ou em alguns casos aquecido) pela massa de grãos. Essa alternativa tem a vantagem de agilizar o uso do secador durante a safra e diminuir os danos provocados por gradientes de umidade, decorrentes de secagens rápidas. É usado para resfriamento do produto, pois no fim da secagem, a temperatura deste ainda está 2 a 5 °C acima da temperatura ambiente e, principalmente, para armazenamentos de longos períodos (às vezes mais de um ano). Nesse caso, a temperatura e a umidade do grão e a umidade do ar são monitoradas por sensores ligados a um sistema de processamento de dados. Empresas gaúchas produzem esses equipamentos, mas poucos armazéns dispõem de tais controles, devido ao seu alto custo.

Essas considerações evidenciam a necessidade e conveniência do uso de processos de secagem para o processamento e manutenção das safras devido às condições climáticas da região Noroeste do RS.

1.3. Modelagem e otimização dos processos de secagem e armazenamento de grãos

A tecnologia na área de secagem e armazenamento é desenvolvida principalmente pela produção de protótipos e aperfeiçoamento posterior dos equipamentos, através da observação e análise do desempenho destes. A vantagem desse método é que as simplificações do equipamento a ser desenvolvido, são somente geométricas. Ou seja, o protótipo praticamente reproduz o objeto a ser desenvolvido. No entanto, a investigação do efeito de algumas variáveis, fica condicionada às modificações ou à construção de novos protótipos, o que torna o método bastante caro e demorado. O conhecimento qualitativo e quantitativo do comportamento das principais variáveis dos fenômenos envolvidos, pode ajudar consideravelmente a atividade de projeto de novos produtos. No caso do projeto de secadores, os modelos matemáticos podem ser usados para dimensionar peças e máquinas, testar e otimizar sistemas e fornecer dados para o monitoramento do processo de secagem, visando à otimização deste. No caso da aeração da massa de grãos, a modelagem pode auxiliar no projeto de novos silos e armazéns, fornecendo informações sobre o comportamento e a magnitude das correntes de ar em qualquer ponto da massa de grãos e otimizar a colocação dos sensores que monitoram a temperatura e a umidade, diminuindo o custo do sistema.

O domínio e o aperfeiçoamento da tecnologia envolvida nos projetos e monitoramento de secadores e armazéns, justificam a pesquisa em modelagem matemática dos processos de secagem e aeração. O funcionamento ótimo dos secadores é gerenciado por um *software*, que recebe informações calculadas por um modelo matemático. Para que possa ser utilizado, esse modelo precisa ter, pelo menos, duas qualidades: simplicidade e precisão. Como a secagem precisa ser feita em um período de tempo limitado (para otimizar o tempo de uso do secador em época de colheita) é necessário otimizar a velocidade do grão e a temperatura do ar em cada instante. Para que o sistema de controle do secador possa fazer os devidos ajustes é necessário que o software produza as informações necessárias em tempo hábil. A concordância entre os resultados calculados e os dados reais (principalmente com relação ao teor de umidade e temperatura dos grãos) garantirá a eficiência do sistema.

1.4. Escopo do presente trabalho

A presente tese é um trabalho sobre os problemas de secagem e armazenamento de grãos e é composta por sete capítulos e um apêndice.

No Capítulo 1 é feita uma introdução enfatizando a importância econômica do cultivo de soja na região noroeste do RS e da necessidade de aprimoramento dos processos de secagem e aeração, tendo a modelagem matemática como um recurso auxiliar para o projeto de máquinas e instalações de unidades armazenadoras.

A revisão bibliográfica sobre os tipos de secadores, armazéns e os modelos matemáticos dos processos de secagem e aeração é apresentada no Capítulo 2. É mostrada uma classificação dos secadores de acordo com as características físicas; detalhados os tipos de fluxo que ocorrem nos secadores de fluxo misto (tipo mais usado na região); descrito o funcionamento do secador tipo torre, de fluxo misto; descrito o funcionamento dos silos cilíndricos e prismáticos equipados com aeração. Também são apresentados os conceitos básicos de secagem e aeração e a evolução dos modelos matemáticos sobre estes processos, com destaque para aqueles que influenciaram o desenvolvimento dos modelos utilizados neste trabalho.

A dedução das equações dos modelos matemáticos de secagem e aeração utilizados nesta tese é apresentada no Capítulo 3.

Os métodos numéricos (volumes finitos, diferenças finitas e elementos finitos) aplicados para a resolução dos sistemas de EDPs, empregados nos modelos de secagem e aeração são descritos no Capítulo 4. Os métodos de volumes finitos e diferenças finitas são utilizados para resolver o problema de secagem e o método dos elementos finitos para o problema de aeração.

Uma descrição dos equipamentos e dos experimentos sobre medição do teor de umidade dos grãos, secagem em camada fina e leito profundo é feita no Capítulo 5.

No Capítulo 6 os resultados das simulações numéricas do problema de secagem são comparados com os resultados experimentais com o objetivo de verificar o modelo proposto; são analisadas as leis da conservação da massa e da energia para um secador de leito fixo, calculada a massa de água retirada dos grãos e a energia utilizada para este fim e é feita uma simulação para um secador de fluxo contínuo. O algoritmo do problema de aeração é testado analisando a convergência da solução numérica para uma solução analítica conhecida. Ainda neste capítulo, são mostradas as curvas de distribuição da pressão e das correntes de ar em silos, para analisar a eficiência do sistema de aeração.

A conclusão da tese é apresentada no Capítulo 7.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi realizada sobre dois grandes temas: os sistemas de secagem e armazenamento, com a descrição física dos secadores e armazéns e os modelos matemáticos sobre secagem e aeração de grãos. Os modelos matemáticos de secagem que se referem ao deslocamento de água no interior dos grãos são chamados de modelos de camada fina e os que se referem ao transporte de vapor de água fora do grão são chamados de modelos de leito profundo.

2.1. Tipos e esquemas de secadores, armazéns e silos

Os tipos de secadores variam de acordo com suas características. Em Weber, 1998 encontra-se a seguinte classificação:

1. Quanto à mobilidade: móveis e fixos. Sendo os fixos divididos em silos secadores e secadores tipo torre. Propriedades rurais médias/grandes, cooperativas ou indústrias usam somente secadores ou silo secadores fixos.

2. Quanto ao sistema de carga: intermitentes e contínuos.

O sistema chama-se intermitente quando o produto passa mais de uma vez pela torre de secagem. É indicado para iniciar a secagem contínua ou para produtos com alto teor de umidade. O sistema é contínuo quando o produto passa uma vez pela torre do secador e já sai com as características desejadas para armazenagem.

3. Quanto à ventilação: com insuflação ou com aspiração de ar.

O ar de secagem pode ser insuflado à montante (p.ex. secador de leito fixo) ou aspirado à jusante da área de secagem. Os secadores tipo torre possuem exaustores (nº 13, da Fig.2.1.1) na saída do ar quente, colocados na parte inferior (ventilador) ou na superior (exaustor).

4. Quanto ao fluxo de ar: Concorrente, contracorrente, cruzado e misto. (O detalhamento das direções dos fluxos do ar e dos grãos é apresentado nas Figs. 2.1.3 e 2.1.4)

5. Quanto à torre de secagem: calhas paralelas, calhas cruzadas, de colunas e com câmara de descanso.

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

O sistema de descarga é um dispositivo localizado na parte inferior dos secadores tipo torre (números 1,2 e 3 da Fig. 2.1.1) que permite o controle da velocidade de descida do grão. Em unidades automatizadas, esse sistema é comandado por um computador

7. Quanto ao combustível: líquido, sólido e gasoso.

8. Ar da fornalha: direto e indireto.

9. Grau de automatização: secagem de controle manual e secagem automatizada.

As principais variáveis para o controle de um secador são a temperatura de entrada e saída do ar e a umidade de entrada e saída do grão. Isso pode ser feito manualmente por operadores ou por sistemas eletrônicos. Para melhorar a eficiência do trabalho do secador (maior exatidão e homogeneidade no teor de umidade final da massa de grãos e a segurança) são utilizados sistemas de controle compostos por sensores de umidade e temperatura, cabos e uma unidade de processamento que recebe todos os dados e comanda a carga e descarga do produto.

Os secadores mais usados para secagem de soja no RS são:

1. Tipo torre, intermitente/contínuo, com insuflação de ar, fluxo de ar misto, calhas paralelas, descarga de bandejas mecânicas, combustível sólido (lenha), ar da fornalha direto e secagem de controle automático.
2. Tipo fixo, silo secador, com insuflação de ar e leito fixo.

Neste trabalho serão estudados somente os secadores do tipo torre.

2.1.1. Secador do tipo torre

Os secadores do tipo torre são estruturas de metal ou alvenaria, geralmente grandes, instaladas ao lado de uma unidade receptora (moega) e de um armazém graneleiro. De modo geral, o complexo todo é composto por um sistema de aquecimento do ar (fornalha), um sistema de circulação de ar (ventilador e dutos), sistema de transporte de grãos (elevadores) e um sistema de secagem e resfriamento (torre).

Esses secadores são fabricados com capacidade de secagem entre *10* e mais de *100 ton/h*. Ocupam uma área de *25* a *100 m²* e a altura da torre chega próximo de *27 m*.

O produto é colocado na parte superior pelos elevadores (5) (ver numeração das partes do secador na Fig. 2.1.1) e cai por gravidade, passando pelas calhas horizontais da torre (4). O controle do fluxo dos grãos é feito com o fechamento/abertura da mesa de descarga (3). O ar aquecido na fornalha (7) é misturado com o ar ambiente (9) e conduzido pela lateral da torre até a entrada das calhas (6), como se pode observar nas Fig. 2.1.1 e 2.1.2. As calhas de entrada de ar são fechadas no outro lado, obrigando o ar a sair por baixo e passar pela massa de grãos (ver Fig. 2.1.3 e 2.1.4). Como esse ar tem baixo teor de umidade e temperatura em torno de *100°C*, bem maior que a dos grãos que estão a temperatura ambiente, ocorre o aquecimento dos grãos e a conseqüente vaporização da água presente nestes. Com a migração do vapor de água dos grãos para o ar, ocorre o processo de secagem do produto. O ar úmido é recolhido pelas calhas de saída, conduzido para o

difusor de saída de ar (12) e retirado da torre por um escoamento de ar forçado produzido por um exaustor localizado na parte superior do secador (nº 13 da Fig. 2.1.2) ou por um ventilador colocado na parte inferior (nº 13 da Fig.2.1.1), conforme o modelo do equipamento. Depois de passar pela câmara de secagem (parte superior, 2/3 da torre), o produto passa pela câmara de resfriamento (parte inferior, 1/3 da torre), na qual é submetido a um fluxo de ar com temperatura ambiente (ver Fig. 2.1.2).

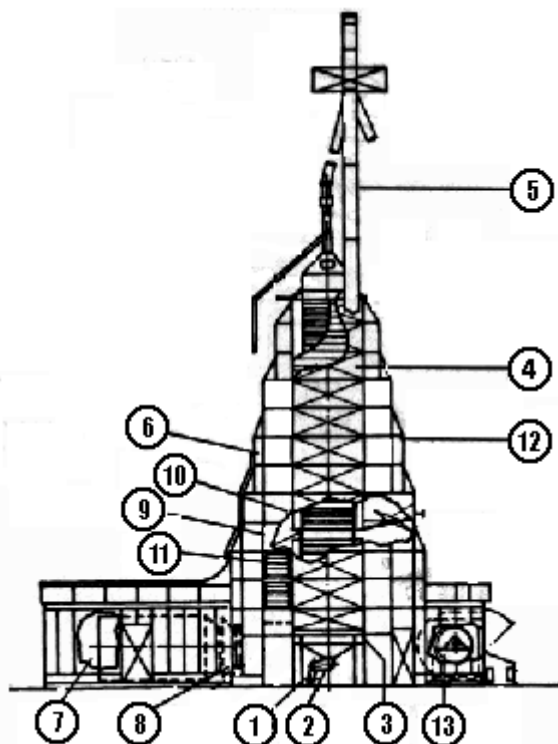


Figura 2.1.1 – Partes de um secador tipo “torre” de fluxo misto. (Weber, 1998)

(1) Acionamento da rosca de descarga. (2) Rosca transportadora de descarga. (3) Mesa de descarga. (4) Torre de secagem. (5) Elevador de carga e descarga. (6) Difusor de entrada de ar. (7) Fornalha de saída frontal. (8) Duto de saída do ar quente. (9) Registro de ar quente lateral. (10) Registro de ar quente central. (11) Registro de ar frio lateral de resfriamento. (12) Difusor de saída do ar. (13) Ventilador.

Em secadores equipados com sistema de automação existe um sensor de umidade na parte superior da torre (entrada de grãos) que mede o teor de umidade dos grãos e via cabos, transmite esta informação para uma central de processamento. Essa central comanda a abertura da mesa de descarga, determinando a velocidade adequada para o teor de umidade do grão escolhido. Alguns componentes desse sistema são importados, encarecendo o preço final, o que justifica o baixo número de unidades de secagem na região noroeste do RS, que dispõem de tal recurso.

Em secadores com recirculação, o ar utilizado para o resfriamento é misturado com o ar aquecido na entrada de ar da câmara de secagem (ver setas da Fig. 2.1.2). Este processo torna o secador mais eficiente, em termos de consumo de energia.

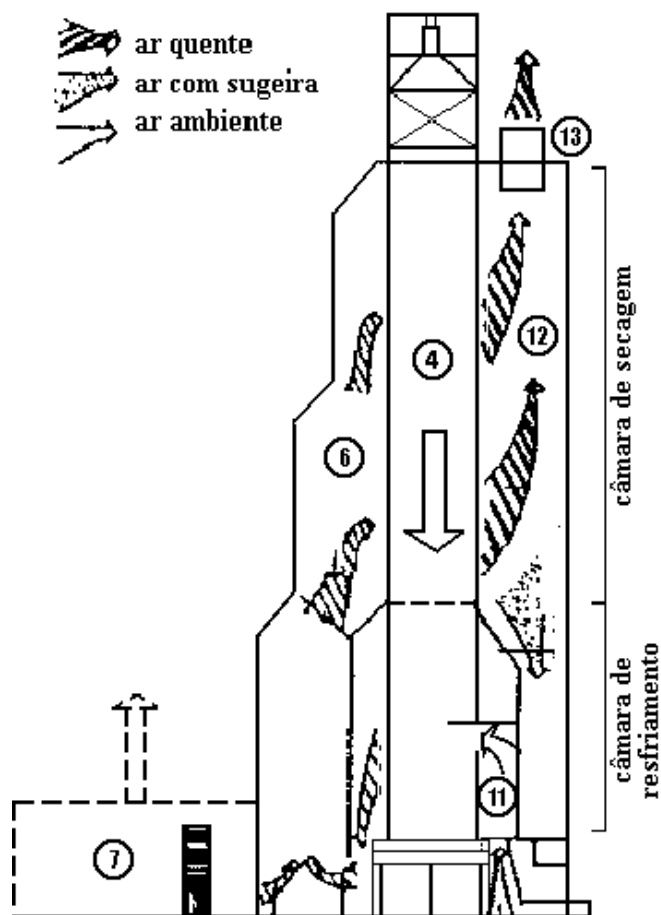


Figura 2.1.2 – Esquema de fluxos para secagem contínua, com resfriamento.

O esquema de fluxos de ar depende do sistema de secagem utilizado. Para **secagem contínua** a torre é dividida em duas partes: os dois terços superiores recebem ar quente e são usados para secar o produto; o terço inferior é usado para resfriamento, como ilustra a Fig. 2.1.2. Como os grãos descem e passam uma só vez pela torre, esse sistema é recomendado para grãos com baixo teor de umidade. Para **secagem contínua e de corpo inteiro** o ar quente é distribuído para toda a torre. Nesse caso, não há a etapa de resfriamento, possibilitando maior capacidade de secagem. O produto deve ser resfriado por aeração, posteriormente no silo ou armazém. Para **secagem intermitente**, toda a torre é preenchida com grãos, que começam a ser movimentados (abrindo o registro de descarga) quando o sistema de ventilação é acionado. Como o tempo de exposição à corrente de ar quente é diferente para as várias camadas de grãos, uma nova passagem pela torre se faz necessária, para homogeneização do teor de umidade. Esse sistema é utilizado para iniciar a operação no sistema contínuo e para produtos com alto teor de umidade. Para a **secagem em lotes** ou **carga parcial** usa-se somente parte da área de secagem da torre. Nesse caso, as entradas de ar, que não são cobertas com grãos, são devidamente fechadas para evitar um caminho mais fácil para o fluxo de ar. Esse sistema é usado para secar cargas pequenas, que não completam o volume total da torre.

Comparando as direções e sentidos dos fluxos dos grãos e do ar, pode-se identificar quatro tipos de fluxo: Concorrente, contra-corrente, cruzado e misto, ilustrados na Fig. 2.1.3 e 2.1.4.

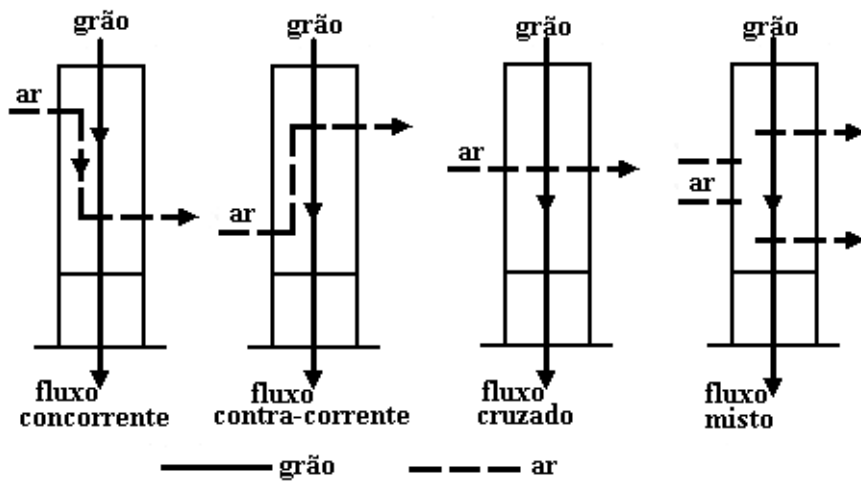


Figura 2.1.3 – Esquema geral dos tipos de fluxos de ar de secagem. (Weber, 1998)

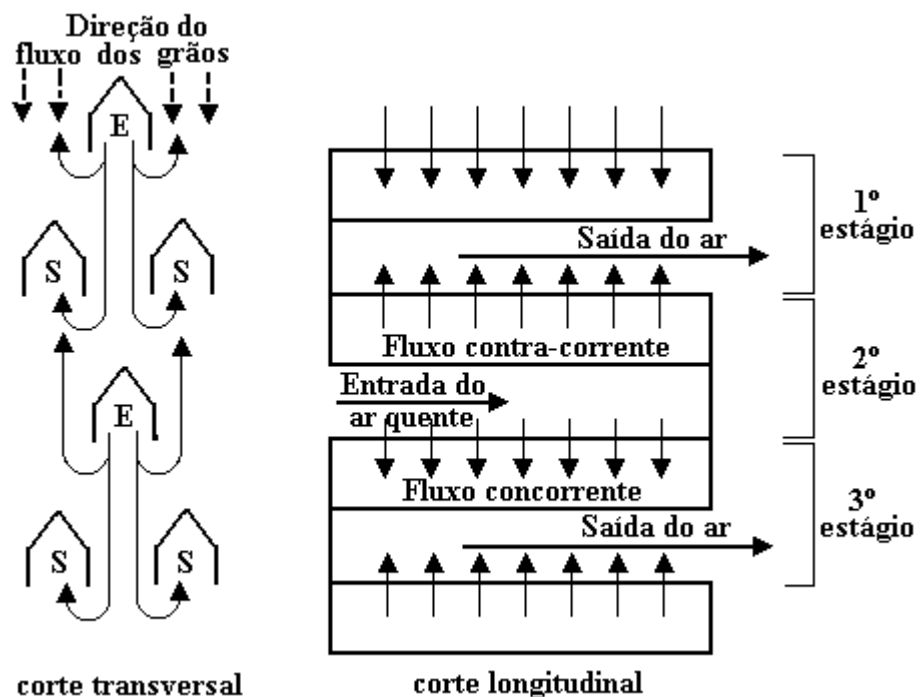


Figura 2.1.4 – Fluxo de ar na torre de secagem

A Fig. 2.1.4 mostra esquematicamente um corte transversal onde se pode observar as calhas de entrada e saída de ar, assim como a trajetória sinuosa dos grãos ao descer pela torre e passar entre as calhas. Nas regiões imediatamente abaixo das calhas ocorre o fluxo cruzado. No corte longitudinal pode-se observar os fluxos do ar, concorrente e contra-corrente. Foi considerado um estágio, o espaço entre uma calha de entrada e uma de saída de ar.

Os secadores de torre apresentam todos os tipos de fluxos entre as calhas de entrada e saída na torre de secagem. Por isso são chamados de secadores de fluxo misto. Em geral, as zonas de fluxo cruzado são relativamente pequenas comparadas às de fluxo concorrente e contracorrente,

apesar de que esta relação depende do espaçamento entre as calhas nas direções horizontal e vertical.

2.1.2. Armazém graneleiro

Os armazéns graneleiros são edificações de concreto armado (ou de metal), muito utilizados na região para armazenamento de grandes quantidades de grãos em longos períodos. A Fig. 2.1.5 mostra uma secção transversal deste tipo de armazém. A cobertura (1) pode ser de metal ou de concreto armado. O carregamento é feito com elevadores e internamente as correias distribuem o produto ao longo do silo, fazendo um perfil em declive (2) da massa de grãos. O fundo do armazém fica abaixo do nível do solo (3) (com exceção dos armazéns de fundo chato) para facilitar a manutenção da temperatura. A retirada dos grãos é feita com correias colocadas no túnel de descarga (4), que conduzem o produto até o poço de elevadores. O monitoramento da temperatura é feito através de sensores (5) instalados em cabos verticais e colocados em várias secções ao longo do comprimento do armazém. A leitura das informações dos sensores pode ser feita manualmente ou através de um sistema acoplado a um computador e com base nelas, é tomada a decisão de aumentar, diminuir ou cancelar a aeração. Essa decisão depende ainda das condições do ar externo, que são informadas por uma estação meteorológica instalada fora do armazém. A aeração dos grãos é feita pela insuflação de ar ambiente através de dutos, por possantes ventiladores (6), de fora para dentro. O ar entra por furos do piso do armazém, passa pela massa de grãos, sai na superfície livre e é retirado por exaustores instalados nos oitões.

Neste tipo de armazém, o objetivo principal da aeração é manter o teor de umidade e a temperatura dos grãos nos níveis desejados, evitando a proliferação de insetos, fungos e o ataque de roedores.

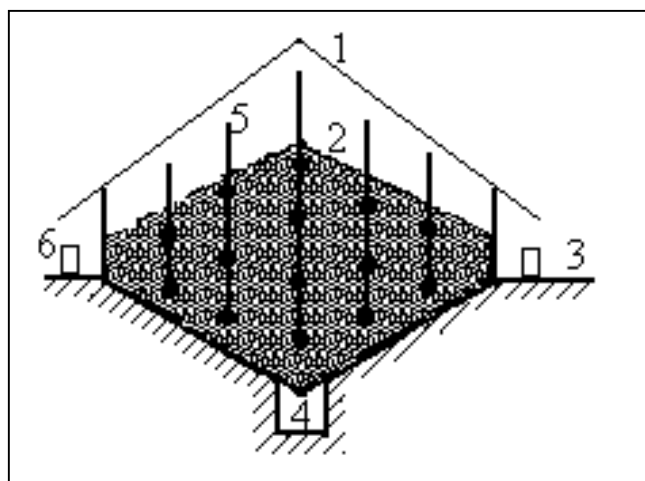


Figura 2.1.5 – Secção transversal de um armazém graneleiro

2.1.3 Silo secador

Os secadores de leito fixo mais utilizados na região noroeste do RS são silos cilíndricos metálicos (Figura 2.1.6). Geralmente são utilizados para armazenar produtos com baixo teor de umidade inicial (menos de 20%), para complementar a secagem ou resfriar o produto processado por outros secadores. O produto é colocado por elevadores pela parte superior (10) e distribuído (11) homogeneamente no interior do silo, onde fica estático.

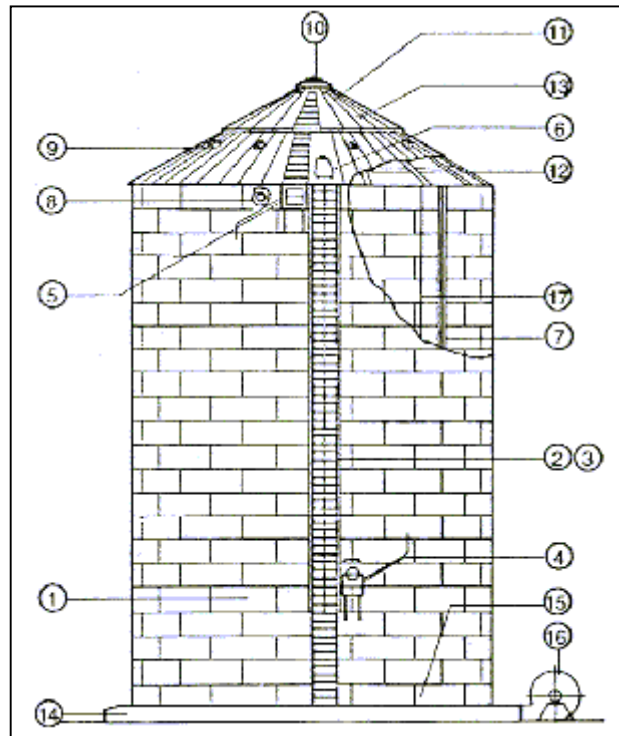


Figura 2.1.6. Silo secador cilíndrico. (Weber, 1998)

(1) Parede. (2) e (3) Escadas externas e internas. (4) Plataformas com porta de acesso inferior e superior (5) e (6). (7) Montantes. (8) Controle de nível. (9) Respiros. (10) Entrada de grãos. (11) Espalhador de grãos. (12) Estrutura do telhado. (13) Telhado. (14) Piso. (15) Base. (16) Ventilador. (17) Pêndulos da Termometria.

No período de armazenamento, o produto é submetido a uma corrente de ar (aquecido ou ambiente) que reduz a umidade lentamente (comparando com o secador de torre) em cerca de 2 pontos percentuais. As vantagens desse tipo de secagem são a manutenção da qualidade do grão, devido ao uso de ar pouco aquecido, ou até não aquecido (variações térmicas bruscas tendem a provocar trincas), e ainda o longo período de secagem, que evita a formação de fortes gradientes de umidade no interior do grão.

O ar é insuflado por ventiladores (16) através de canais localizados abaixo do piso (14) e passa pela massa de grãos, saindo pelos respiros (9) da parte superior. Com a passagem contínua de

ar, forma-se uma frente de umidade, que se desloca de baixo para cima, até atingir a superfície e sair do silo. Esse processo também é conhecido como seca-aeração.

Outros fenômenos ocorrem nesses silos, tais como a formação de correntes de ar e gradientes de umidade. Convecção natural de ar são comuns quando a temperatura externa é muito diferente da interna. No inverno, ocorre a formação de correntes de ar úmido descendentes, próximo às paredes e ascendentes no centro, com o depósito de umidade na parte central superior. No verão ou em dias quentes, ocorre o contrário, concentrando umidade no fundo. Uma aeração eficiente resolve esse tipo de problemas.

2.2. Modelagem matemática do processo de secagem de grãos

O estudo da secagem na indústria é aplicado a uma quantidade muito grande de produtos: madeira, alimentos, produtos agrícolas, papel, roupas, solos, cerâmicas, etc. No que se refere à secagem de produtos agrícolas, de acordo com Neves *et al.*, 1983, a pesquisa acadêmica começou de forma sistemática na década de 50, na Universidade de Purdue, USA.

No âmbito internacional destaca-se o papel do International Drying Symposium (IDS), cuja primeira edição ocorreu em 1978, em Montreal, Canadá, integrando pesquisas acadêmicas e industriais. A área preferida pelos participantes tem sido a secagem de produtos agrícolas, com cerca de 18 % dos trabalhos apresentados. Segundo Mujumdar, 1998, inicialmente a tendência das pesquisas era investigar a conservação de energia e os procedimentos de escala, enquanto que atualmente é a melhoria da qualidade, otimização via modelagem matemática e desenvolvimento de novas técnicas de secagem. Os trabalhos da Universidade de Estadual de Campinas, Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Viçosa e Universidade Federal de Pelotas (RS) se destacam no Brasil, pela pesquisa em modelagem matemática de processos de secagem e pela atuação direta no sistema produtivo.

Neste capítulo, foi feita uma revisão das publicações, descrevendo a evolução da pesquisa experimental e da modelagem matemática relativamente aos processos de secagem, aeração e seca-aeração de grãos de soja.

2.2.1. Noções preliminares

O grão de soja considerado é composto de matéria seca e úmida. Pelos motivos já expostos na introdução deste trabalho, durante o armazenamento é importante que a quantidade de água presente no interior do grão seja mínima, ou ainda, seja apenas a quantidade suficiente para a continuidade dos processos biológicos de interesse do armazenador (por exemplo, a manutenção do poder germinativo, no caso de sementes, ou mesmo a manutenção da resistência mecânica, que é importante, tanto para grãos, como para as sementes) .

A água está presente no grão de várias formas:

1. **Água líquida ou de constituição:** são moléculas individuais de água ligadas a grupos moleculares da matéria biológica. Só pode ser removida mediante rigorosas condições de temperatura e longo período de tempo.
2. **Água adsorvida:** São grupos de moléculas de água que aderem sobre as camadas de água precedentes. É água não solvente, fortemente adsorvida.

3. **Água líquida sob pressão osmótica:** É a água que atua como solvente e retém várias substâncias dissolvidas. É retirada do grão com certa dificuldade.

4. **Água absorvida:** é a água livre mantida fracamente por capilaridade nos poros do grão. Evapora-se facilmente.

A quantidade de água nos grãos é expressa pelo **teor de umidade em base úmida** M_{bu} , que é a razão entre a massa de água (m_w) e a massa do grão úmido (m_u),

$$M_{bu} = \frac{m_w}{m_u} \cdot 100 \quad (2.2.1)$$

ou, pelo **teor de umidade em base seca** M_{bs} , que é a razão entre a massa de água e a massa do grão seco (m_s),

$$M_{bs} = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100. \quad (2.2.2)$$

Para a mesma amostra de grãos, o teor de umidade em base úmida sempre será menor que o teor de umidade em base seca, pois m_u será sempre maior que m_s . Neste trabalho, será usada a expressão **teor de umidade do grão**, simplesmente, referindo-se ao teor de umidade em base seca em percentagem ou decimal. Quando algum dado em base úmida for usado, será acompanhado das letras “b.u.” entre parêntesis.

A determinação da massa de água pode ser feita por métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos requerem condições de laboratório, onde é medida a diferença entre as massas do grão úmido e seco. A massa do grão seco é obtida com a retirada da água por aquecimento em estufa (ou forno de micro-ondas), até que a variação de massa seja mínima. Os métodos indiretos utilizam a influência do teor de umidade na variação de alguma propriedade deste, tal como a condução de corrente elétrica. Uma descrição detalhada desses métodos pode ser encontrada em Brooker *et al.*, 1982 e Puzzi, 1973. Informações adicionais sobre o método de medição do teor de umidade dos grãos utilizada nessa tese, estão expostas no Capítulo 5.

Entre os vários fatores que provocam o deslocamento da água dentro do grão, os mais significativos, nas condições consideradas, são:

1. **Difusão líquida:** como a distribuição de água dentro do grão não é uniforme, formam-se gradientes de concentração, fazendo com que a água se desloque no sentido contrário a estes.

2. **Difusão de vapor d' água:** Nos processos de secagem com ar aquecido, o calor é transferido para o grão e provoca a mudança de fase da água, formando gradientes de pressão de vapor. O movimento da água, de dentro para fora do grão, ocorre em virtude da diferença entre a pressão parcial de vapor na superfície do produto e a pressão parcial de vapor no ar envolvente. Se a pressão parcial do vapor de água na superfície do produto é maior que a pressão do vapor de água no ar, então ocorre a secagem. Se forem iguais ocorre o equilíbrio higroscópico entre o produto e o ar [Lasseran,1988]. O teor de umidade do grão, nesse caso, é chamado de Teor de Umidade de Equilíbrio.

3. **Escoamento de líquidos e vapor.** O deslocamento da água dentro do grão pode ocorrer também por capilaridade.

O Teor de Umidade de Equilíbrio (M_e) é o teor de umidade limite admitido por um material sujeito a um meio ambiente estável (i.é, o ar em volta do material tem umidade e temperatura constantes) durante um período de tempo “suficientemente longo”, ou simplesmente, é o teor de umidade correspondente à condição de equilíbrio entre o material e o meio. [Parry, 1985].

As transferências de água entre o material e o meio são explicadas, analisando como se dá a absorção (processo em que a água do meio ambiente entra no grão) e a desorção (processo em que a água do grão passa para o meio ambiente). Alguns pesquisadores obtiveram experimentalmente curvas isotermas de M_e por umidade relativa do ar (φ) e constataram que, para os mesmos valores de umidade relativa do ar, os limites de absorção e desorção (valores do teor de umidade de equilíbrio) são diferentes. Ou seja, a curva de umedecimento de um material é diferente da curva de secagem deste mesmo material, indicando o fenômeno de histerese. Uma ilustração das isotermas pode ser observada na Fig. 2.2.1.

A partir de dados experimentais, Henderson, 1952, propôs a função

$$1 - \varphi = \exp(-aM_e^b) \quad (2.2.3)$$

para relacionar o teor de umidade de equilíbrio (M_e) e a umidade relativa do ar (φ), entendida aqui como a razão entre o teor de umidade do ar e o teor de umidade do ar saturado. As constantes a e b , são obtidas experimentalmente, a partir de dois pontos conhecidos de uma isoterma, e dependem

das características do material. O próprio Henderson modificou a expressão (2.2.3) escrevendo o coeficiente a como uma função da temperatura absoluta, T_{abs}

$$1 - \phi = \exp(-cT_{abs}M_e^b). \quad (3.1.4)$$

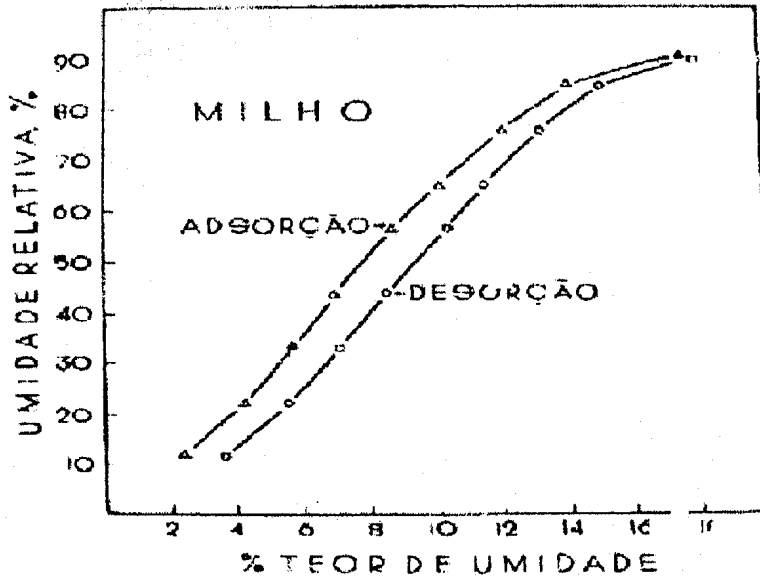


Figura 2.2.1 - Histerese entre absorção e desorção.

Os modelos teóricos e semi-empíricos, geralmente não são aplicáveis a todos os tipos de grãos e sobre largas faixas de umidade relativa do ar. Um procedimento cauteloso, seria usar somente modelos empíricos até que um entendimento melhor do processo físico da desorção fosse conseguido.

Simmonds *et al.*, 1953, propõe um modelo para descrever o teor de umidade do grão cuja solução é uma função exponencial, envolvendo o teor de umidade de equilíbrio.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -k(M - M_e). \quad (2.2.5)$$

Em Bakker-Arkema e Hall, 1965, encontra-se a contestação desta proposição e em Nellist, 1974, é introduzindo um termo dependente da temperatura para expressar o teor de umidade de equilíbrio. As constantes b_1 , b_2 e b_3 são obtidas experimentalmente.

$$M_e = b_1 - b_2 \cdot \ln(1 - \phi) - b_3 \cdot \ln T. \quad (2.2.6)$$

Os experimentos mostram que existem duas fases no processo de secagem de um material. Na primeira, a evaporação da água ocorre com uma taxa constante, quase como a taxa de evaporação de um líquido com superfície livre. Na segunda fase, a taxa de evaporação cai continuamente. O ponto de separação destas fases é conhecido como *o teor de umidade crítico* (M_{crit}). Para grãos de cereais o M_{crit} está fora da faixa de umidade de interesse para armazenamento. Em Simmonds *et al.* é mostrado que para o trigo, o teor de umidade crítico está entre 69 % e 85 % (b.s.) aproximadamente. Portanto, somente a segunda fase interessa para a pesquisa dos processos reais de secagem.

2.2.2. Modelos Matemáticos

Existem diferentes tipos de modelos do processo de secagem. Todos eles têm a variável temporal. Os modelos que não consideram a variável espacial são chamados *modelos de camada fina*. Os modelos que consideram as variáveis espaciais são chamados *modelos de leito profundo*. Nos modelos de camada fina toda a massa de grãos a ser secada está sob condições uniformes. Ou seja, os parâmetros do grão (temperatura e teor de umidade) e do ar (temperatura e teor de umidade) em todo o volume considerado são iguais, em cada instante de tempo. Os modelos de leito profundo são de uma, duas ou três dimensões e os parâmetros mencionados acima variam conforme a posição considerada. Para simplificar o problema, as vezes o leito de grãos é considerado como uma seqüência de camadas finas ortogonais ao fluxo principal de ar (caso 1D) ou como um conjunto de dimensões reduzidas (elementos finitos, volumes finitos,...) para os quais os parâmetros do grão e do ar não sofrem variações consideráveis. Na realidade esta simplificação é usada ao utilizar-se um método numérico para resolver o sistema de EDPs do modelo.

Modelos para camada fina

Os modelos para camada fina podem ser classificados em teóricos, semi-empíricos e empíricos. Os teóricos consideram o transporte de massa e calor dentro do grão e consistem em sistemas de equações diferenciais que relacionam a umidade e a temperatura do grão. Os modelos empíricos são resultado de ajuste de curvas de dados obtidos experimentalmente.

Os modelos mais completos consideram um sistema de equações de transporte de calor, massa e quantidade de movimento, para descrever a secagem. Este sistema, na forma mais generalizada, foi apresentado por Luikov e Mikhailov, 1961. Para o caso de um corpo capilar-poroso, desprezando os termos convectivos e fontes potenciais, o sistema foi apresentado em Luikov, 1966, na forma

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M}{\partial t} &= \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}\theta + \nabla^2 K_{13}P \\
\frac{\partial \theta}{\partial t} &= \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}\theta + \nabla^2 K_{23}P \\
\frac{\partial P}{\partial t} &= \nabla^2 K_{31}M + \nabla^2 K_{32}\theta + \nabla^2 K_{33}P
\end{aligned}
\tag{2.2.7}$$

onde o potencial M representa a concentração de água (teor de umidade), θ é o potencial de transferência de calor (temperatura) e P é o potencial de filtração (pressão). K_{ij} , para $i = j$, representam os coeficientes termo-físicos de transporte (por exemplo., K_{11} é o coeficiente de difusão da umidade, no caso da secagem) e K_{ij} para $i \neq j$ representam os coeficientes de acoplamento (por exemplo, K_{12} é o coeficiente de difusão de umidade influenciado pela temperatura). Devido às dificuldades encontradas para conseguir todos os dados experimentais exigidos na matriz K , este modelo não tem sido muito utilizado por completo. Porém, desconsiderando o efeito do gradiente de pressão, termo-difusão e a evaporação interna, o modelo de Luikov aplicado para secagem de grãos torna-se simplesmente um sistema de duas equações diferenciais parciais.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M}{\partial t} &= D_m \nabla^2 M \\
\frac{\partial T_g}{\partial t} &= D_t \nabla^2 T_g
\end{aligned}
\tag{2.2.8}$$

onde M é o teor de umidade, T_g a temperatura do grão e D_m e D_t são os coeficientes de difusão de massa e calor, respectivamente.

A solução de (2.2.8) implica na escolha de uma forma geométrica (domínio de integração) para representar o grão e um adequado sistema de coordenadas. As soluções podem ser analíticas, (em particular, na forma de séries como em Crank, 1975) e estimam a razão média de umidade (MR) dada por

$$MR(t) = (M - M_e) / (M_o - M_e).
\tag{2.2.9}$$

onde M_o é o teor de umidade de equilíbrio.

Usando coordenadas esféricas, a primeira equação do sistema de Luikov, para D_m constante dentro do grão é escrita como equação linear

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_m \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (2.2.10)$$

com condições de fronteira e iniciais

$$\begin{aligned} M(r,0) &= M_o, & 0 < r < R \\ M(R,t) &= M_e, & t \geq 0. \\ \frac{\partial M}{\partial t}(0,t) &= 0. \end{aligned} \quad (2.2.11)$$

onde R é o raio médio dos grãos.

Sua solução analítica é

$$MR(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{n^2 \pi^2} \exp(-D_m n^2 \pi^2 t / M^2) \quad (2.2.12)$$

Em outros artigos como em Chu e Hustrulid, 1968 a equação (2.2.10) é resolvida usando métodos numéricos (diferenças finitas) e considerando o coeficiente de difusão uma função da umidade, o que torna esta equação não linear.

Devido à complexidade matemática e a falta de dados confiáveis sobre a condutividade térmica e a difusividade mássica, muitos pesquisadores preferiram adotar os métodos empíricos para determinar a taxa de secagem.

Os modelos empíricos negligenciam a resistência interna à transferência de massa e de calor, o que permite considerar a umidade e a temperatura constantes para todo grão. Relacionam o teor de umidade e o tempo de secagem com dados obtidos experimentalmente, para várias temperaturas. Um exemplo, é o modelo de Thompson. Em Thompson, 1968 a equação de secagem do milho é

$$t = A \cdot \ln(MR) + B \cdot [\ln(MR)]^2 \quad (2.2.13)$$

onde

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

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

As equações semi-empíricas são conhecidas como *leis exponenciais de secagem*, tais como as apresentadas em Lewis, 1921,

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = e^{-kt} \quad (2.2.14)$$

e Page

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = e^{-kt^n} \quad (2.2.15)$$

onde k é um parâmetro (min^{-n}) e n é um parâmetro adimensional.

O modelo de Lewis considera que a resistência à difusão interna ocorre igualmente em todo o núcleo do grão. Chen e Johnson [in: Parry, 1985] consideraram três períodos distintos de secagem e modificaram a equação diferencial inicial de Lewis acrescentando um expoente a na diferença entre o teor de umidade do grão e teor de umidade de equilíbrio.

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e)^a \quad (2.2.16)$$

onde k e a são parâmetros de ajuste que dependem de cada período de secagem.

Em Nellist e O'Callaghan, 1971, é proposta a combinação de dois termos exponenciais para ajustar os dados empíricos sobre secagem de sementes de centeio.

$$M = M_e + A \exp(-k_1 t) + B \exp(-k_2 t) \quad (2.2.17)$$

Em Hendersen, 1974, os dois termos exponenciais são da forma

$$MR = a \exp(-k_1 t) + (1-a) \exp(-k_2 t) \quad (2.2.18)$$

e a , k_1 e k_2 são determinados experimentalmente.

Em Sharaf-Eldeen *et al.*, 1978, é proposta a generalização da equação de termos exponenciais

$$MR = \sum_{i=0}^N A_i \exp(-b_i kt) \quad (2.2.19)$$

onde N é um inteiro positivo. Quanto maior for N mais precisa será a solução.

Este modelo já fornece resultados precisos para modelar a secagem de milho, arroz e soja.

Em Soares, 1986, foi pesquisada a variação do coeficiente de difusão da massa de água no grão, a massa específica aparente e global, a porosidade, a área superficial e do volume do grão durante o processo de secagem de soja para camadas finas. Soares definiu o coeficiente de difusão de água (D) como o produto da profundidade radial no interior do grão pelo volume de água transferido por unidade de área da seção considerada, em um determinado intervalo de tempo. O coeficiente D é o coeficiente da lei de difusão de Fick, cuja equação empírica proposta é

$$D = 0,9556 \times 10^{-9} \cdot M_o \exp(0,5868 \times 10^{-4} \cdot T_g^2)$$

onde M_o é o teor de umidade inicial do grão e T_g a temperatura do produto. Sobre a variação da porosidade, esse pesquisador concluiu que esta aumenta, quando aumenta o teor de umidade no interior dos grãos. Soares elaborou uma série de experimentos e obteve curvas de secagem para a soja em diferentes teores de umidade inicial dos grãos e temperatura do ar de secagem.

Modelos para leito profundo

Nos modelos de camada fina as condições externas ao grão são sempre as mesmas, e o objetivo principal destes modelos é descrever o processo de difusão da água dentro do grão ou descrever o processo de transferência de calor e de massa da água entre a superfície do grão e o ar ambiente. Nos modelos para leito profundo, além dos objetivos citados, interessam também os fenômenos de transporte da umidade nos espaços entre os grãos, que é um fenômeno predominantemente convectivo.

Em Parry, 1985, encontra-se uma classificação dos modelos para leito profundo:

1. Modelos logarítmicos;
2. Modelos de balanço de calor e massa;
3. Modelos de equações diferenciais parciais.

Hukill, citado em Parry, 1985, partiu do princípio que a taxa de variação da temperatura em relação à z (direção da profundidade do leito) é proporcional à taxa de variação do teor de umidade do grão em relação a t . Isso equivale a dizer, que a perda de energia térmica pelo ar é

causada somente pelo calor latente de vaporização e também, desconsidera o aquecimento do grão. O modelo de Hukill é composto pela equação

$$G_a c_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \rho_p h_{fg} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2.2.20)$$

com condições iniciais e de contorno:

$$M(z,0) = M_o, \quad \frac{T_a - T_e}{T_o - T_e} = \exp(-cz) \quad \text{para } t = 0 \quad \text{e}$$

$$T_a(0,t) = T_o, \quad \text{e} \quad MR = \exp(-kt) \quad \text{para } z = 0.$$

onde G_a é a taxa de massa de ar, c_a é o calor específico do ar, T_a é a temperatura do ar, T_e é um valor limite da temperatura do ar e c e k são constantes empíricas.

Resolvendo a equação de Hukill com estas condições encontra-se

$$MR = \frac{2^z}{2^z + 2^\tau - 1} \quad (2.2.21)$$

onde z e τ são as variáveis adimensionais de espaço e tempo, respectivamente. O próprio Hukill reconhecia que seu modelo sub estimava o tempo requerido para a secagem.

Em Baughman *et al.*, 1971, é sugerida uma equação semelhante a Hukill e acrescentado um termo relativo à zona de secagem. Em Barre *et al.*, 1971, a equação de Baughman é resolvida, obtendo-se a solução

$$MR = \frac{1}{z} \ln \frac{e^z + e^\tau - 1}{e^\tau} \quad (2.2.22)$$

Segundo Parry, 1985, os modelos logarítmicos são muito usados devido a sua simplicidade e economia computacional, mas aceitáveis somente para baixas temperaturas e baixas taxas de fluxo de ar, em simulação de secagem.

Os modelos de balanço de calor e massa são mais complexos que os logarítmicos. Em Boyce, 1965, foi considerado o aquecimento dos grãos durante a secagem e criado um modelo chamado camada por camada com base nesses balanços. Foi calculada a temperatura e a umidade do ar e do grão na secagem de cevada. Foi observado que o tempo de secagem era maior que o

esperado. Em Thompson *et al.*, 1968, foram apresentados modelos similares a Boyce, com procedimentos de ajuste da temperatura e da umidade do ar para evitar que a umidade relativa não ultrapassasse 100%. Esses modelos consideram constantes as condições de camada fina para um pequeno intervalo de tempo.

Com o aperfeiçoamento dos computadores, aumentando a memória e a velocidade de processamento, os pesquisadores encorajaram-se a propor modelos com menos restrições e baseados nos fenômenos de transferência de calor e massa, expressos por sistemas de equações diferenciais parciais.

Em Law e Parry, 1983, com base na teoria das misturas contínuas, trataram a umidade do ar e a umidade do grão como uma mistura binária e propuseram um modelo para secagem de grãos em secadores de leito fixo, fluxo cruzado, fluxo concorrente e fluxo contra-corrente. Esses pesquisadores admitiram fluxos constantes e perpendiculares entre o ar e os grãos e negligenciando as transferências de calor por condução e radiação, representaram a secagem convectiva por um sistema de equações diferenciais parciais na forma:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + A \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} + B \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} = \vec{b}. \quad (2.2.23)$$

sendo o vetor $\vec{u} = [T_g, M, T_a, Y]^T$ e as matrizes A e B dadas por

$$A = \begin{bmatrix} v_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_p \end{bmatrix} \quad (2.2.24)$$

onde v_a e v_p são as velocidades do ar e dos grãos, respectivamente. O vetor \vec{b} é dado por

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m / \epsilon \rho_a \\ -m / \rho_p \\ \{-\psi - m E_v(T)\} / \{\epsilon \rho_a (C_a + C_v H)\} \\ \{-\psi + m E_w(\theta)\} / \{\rho_p (C_p + C_w M)\} \end{bmatrix} \quad (2.2.25)$$

onde m e ψ são as taxas líquidas de massa e energia transferidas do grão para o ar ; $E_v(T)$ e $E_w(T)$ representam a energia interna específica do vapor de ar e água dentro do grão, respectivamente.

Para modelar os diferentes tipos de secadores, Law e Parry fizeram simplificações na equação geral. Para $v_p = 0$ (velocidade dos grãos), o leito é fixo e então a equação de Law e Parry fica

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \bar{b} \quad (2.2.26)$$

Se o fluxo é cruzado vale a equação (2.2.23). Se o fluxo é concorrente ou contracorrente o sistema é

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + C \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \bar{b} \quad (2.2.27)$$

onde $C=A+B$ para o fluxo concorrente e $C=A-B$ para o fluxo contracorrente.

Van Arsdel, e Klapp são citados em Parry, 1985, como autores de modelos particulares, obtidos mediante algumas simplificações do modelo geral, com o objetivo de minimizar o tempo computacional. Van Arsdel usou diferenças finitas e Klapp usou transformada de Laplace para resolver o sistema de equações de seu modelo.

Em Brooker, Bakker-Arkema e Hall, 1974, foi desenvolvido um modelo para leito profundo, unidimensional, com base em Schumann, 1929, Van Arsdel, 1955 e Bakker-Arkema *et al.*, 1967, o qual é um caso particular do modelo de Parry. Este modelo é conhecido também, como o modelo da *Michigan State University* (MSU). Considera as seguintes suposições:

1. A contração volumétrica dos grãos é negligenciável.
2. Os gradientes de temperatura dentro dos grãos são negligenciáveis.
3. A condução de calor partícula-partícula é negligenciável.
4. Os fluxos de ar e grão são uniformes.
5. $\partial T/\partial t$ e $\partial W/\partial t$ são negligenciáveis se comparados com $\partial T/\partial x$ e $\partial W/\partial x$.
6. O fluxo de calor através das paredes é negligenciável.
7. As capacidades de calor para o ar úmido e grão são constantes durante um pequeno período de tempo.
8. Uma equação de secagem para camada fina e a isoterma de umidade de equilíbrio é conhecida.

Estas suposições indicam que o modelo de secagem de grãos representa desumidificação adiabática dos grãos de leitos uniformes. A transferência de energia convectiva é dominante em relação à difusiva na fase gasosa. A transferência de massa de água do grão para o ar é controlada pela taxa de desorção, de acordo com os modelos de camada fina. Existe equilíbrio na superfície, entre o vapor de água do ar e o vapor de água do núcleo do grão, porque é considerado que a desorção ocorre instantaneamente [Brooker *et al.*, 1982].

Fazendo balanços em um volume de controle para o teor de umidade e energia do produto e do ar de secagem e usando as oito suposições acima, Brooker *et al.* chegaram ao sistema

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial M}{\partial t} &= \text{uma curva conhecida de camada fina} = f(M, t) \\
 \frac{\partial T_g}{\partial t} &= \frac{ha}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} (T_a - T_g) + \frac{h + c_v (T_a - T_g)}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} G_a \frac{\partial Y}{\partial x} \\
 \frac{\partial Y}{\partial x} &= -\frac{\rho_p}{G_a} \frac{\partial M}{\partial t} \\
 \frac{\partial T_a}{\partial x} &= \frac{h' a}{G_a c_a + G_a c_v Y} (T_a - T_g)
 \end{aligned} \tag{2.2.27}$$

onde h é o coeficiente convectivo de calor, M e T_g são o teor de umidade e a temperatura do grão, respectivamente; Y e T_a são o teor umidade e a temperatura do ar, respectivamente. Esse sistema foi usado para simular a secagem em quatro tipos de secadores. Para leito fixo, o sistema (2.2.27) foi resolvido com diferenças finitas usando as condições de contorno e iniciais

$$T_a(0,t)=T; \quad T_g(x,0)=\theta; \quad Y(0,t)=Y \quad \bar{M}(x,0)=\bar{M} .$$

onde a barra significa valor médio.

Para o secador de fluxo cruzado foi considerado $dy/dt = V_p$ e trocado o sinal da equação da temperatura dos grãos no sistema (2.2.27). O sistema foi resolvido usando diferenças finitas com as condições de contorno

$$T_a(0,y)=T_a; \quad T_g(x,0)=T_g; \quad Y(0,y)=Y \quad \text{e} \quad \bar{M}(x,0)=\bar{M} .$$

Para o secador de fluxo contra-corrente foi usado o mesmo sistema de equações do secador de fluxo cruzado, trocando y por x (coordenadas espaciais) e também o sinal do segundo termo na equação da temperatura do leito. As condições de contorno são diferentes dos demais secadores porque se referem a dois pontos. Para resolvê-lo usaram técnicas de otimização.

$$T_a(0)=T_a; \quad T_g(0)=T_g; \quad W(0)=W \quad \text{e} \quad \bar{M}(0)=\bar{M} .$$

Para o secador de fluxo concorrente foi usado o mesmo sistema do fluxo cruzado trocando y por x e na equação da temperatura do leito e o sinal da equação da umidade do ar. As

condições de contorno são diferentes dos demais secadores. Para resolvê-lo usaram o método de Runge-Kutta, com as seguintes condições de contorno e iniciais:

$$T_a(L)=T_a; \quad T_g(0)=T_g; \quad W(L)=W \quad \text{e} \quad \bar{M}(0)=\bar{M},$$

onde L é o comprimento do secador.

Nos modelos de secagem estacionários, segundo Moreira e Bakker-Arkema, 1990 as condições de entrada são consideradas constantes. Nesse artigo, esses pesquisadores superaram essa limitação e usando um modelo semelhante ao modelo (2.2.27), simularam um secador não estacionário, com fluxo de grãos variável, com vários estágios e com fluxo concorrente para a secagem de milho. As equações do modelo são as mesmas de Law e Parry, também usadas por Brooker *et al.*, porém com termos onde aparecem as velocidades do ar e dos grãos.

Em Fortes e Okos, 1981 afirma-se que mesmo sendo a teoria da difusão a preferida por vários pesquisadores, ela pode levar a erros significativos, quando utilizada para prever processos de secagem. Esses pesquisadores propuseram um modelo que considera o gradiente do teor de umidade de equilíbrio e não simplesmente o gradiente do teor de umidade, como a força motriz para o deslocamento da umidade dentro do grão (caso isotérmico). Propuseram as equações de fluxo de calor, fluxo líquido e fluxo de vapor vapor

$$\begin{aligned} \bar{J}_q &= -K_T \nabla T - \left[\rho_l K_l R_v \ln H + K_v \left(\rho_{vo} \frac{\partial H}{\partial T} + H \frac{d\rho_{vo}}{dT} \right) \right] \frac{R_v T^2}{H} \\ \bar{J}_l &= -\rho_l K_l R_v \ln H \nabla T - \rho_l K_l \frac{R_v T}{H} \frac{\partial H}{\partial M} \nabla M \\ \bar{J}_v &= -K_v \left(\rho_o \frac{\partial H}{\partial T} + H \frac{d\rho_{vo}}{dT} \right) \nabla T - K_v \rho_{vo} \frac{\partial H}{\partial M} \nabla M \end{aligned} \quad (2.2.28)$$

respectivamente, e as equações de conservação de massa e energia

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_s M)}{\partial t} &= -\nabla \cdot (\bar{J}_l + \bar{J}_v) \\ \rho_s C_g \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_s \Delta h_w \frac{\partial M}{\partial t} &= \nabla \cdot \bar{J}_q - \Delta h_v \nabla \cdot \bar{J}_v - \bar{J}_l \cdot c_l \nabla T - \bar{J}_v \cdot c_v \nabla T. \end{aligned}$$

onde Δh_v é o calor latente específico de vaporização e Δh_w é o calor diferencial específico de sorção.

Fazendo modificações nos modelos de Thompson e Brooker outros pesquisadores tais como França, 1991, Souza e Ferreira, 1996 e Courtois *et al.*, 1991, criaram diferentes modelos, visando a modelagem de secadores reais.

Em França, 1991, foram incorporadas ampliações no modelo unidimensional de Brooker *et al.* França considerou um secador bi-dimensional, levou em conta o efeito da variação da

massa específica dos grãos em função da temperatura e utilizou as equações completas de conservação da massa e energia para descrever os processos de transporte entre ar e grãos em função do tempo. Considerou as seguintes hipóteses de base:

- a contração volumétrica do leito é negligenciável;
- os gradientes de temperatura dentro do grão são negligenciáveis;
- a transferência de calor entre os grãos é negligenciável;
- O fluxo de calor através das paredes é negligenciável;
- uma equação de secagem em camada fina, suficientemente precisa, e as isotermas de equilíbrio são conhecidas.

Fazendo balanços de massa e energia em um volume de controle, França obteve o sistema de equações (2.2.29) e resolveu-o utilizando os métodos de elementos finitos e volumes finitos, para os casos 1-D e 2-D:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_a W)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_a \frac{\vec{V}}{\varepsilon} W \right) &= -\frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{M}{t} \\ \frac{\partial(\rho_a T_a)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_a \frac{\vec{V}}{\varepsilon} T_a \right) &= -\frac{h' a (T_a - T_g)}{\varepsilon (c_a + W c_v)} \\ \frac{\partial(\rho_p T_g)}{\partial t} &= \frac{h' a (T_a - T_g)}{(c_p + c_w M)} + \frac{h_{fg} + c_v (T_a - T_g)}{c_p + c_w M} \frac{\partial M}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.2.29)$$

França usou o modelo de Thompson *et al.*, 1968, como equação da taxa de secagem, considerando a secagem de milho.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_e - M}{3600 [A'^2 + (1/900) B' t]^{1/2}} \quad (2.2.30)$$

onde A e B são funções da temperatura do ar.

Em Weber, 1998, afirma-se que a perda de peso pela evaporação da água e a conseqüente retração do volume dos grãos são significativos, especialmente para produtos colhidos com elevado teor de umidade. No caso da soja, colhida com teor de umidade acima de 20%, o produto precisa ficar circulando pelo secador até atingir a umidade desejada (secagem intermitente). Então, devido à contração do volume, ocorre falta de produto na parte superior do secador, fato que prejudica o rendimento deste. Para evitar esse problema, é usado um depósito de grãos entre a torre e o funil de carga. Esta observação de ordem prática, enfatiza a influência da retração do volume dos grãos no processo de secagem, e conseqüentemente no seu modelamento.

Em Courtois *et al.*, 1991 foi proposto um modelo unidimensional baseado nas equações de balanço de massa e energia, relacionando temperatura e umidade dos grãos e do ar de secagem e

ainda uma equação sobre a qualidade dos grãos de milho. O grão foi considerado composto por três compartimentos: o primeiro é o núcleo, o segundo é a massa entre o núcleo e terceiro compartimento, que é o invólucro.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M_1}{\partial t} &= -\frac{B_1}{\rho_g \tau_1} (M_2 - M_1) \\
\frac{\partial M_2}{\partial t} &= \frac{B_1}{\rho_g \tau_2} (M_1 - M_2) + \frac{B_2}{\rho_g \tau_2} (M_3 - M_2) \\
\frac{\partial M_3}{\partial t} &= \frac{B_2}{\rho_g \tau_3} (M_2 - M_3) + \frac{\phi_m a}{\rho_g \tau} \\
\frac{\partial Q}{\partial t} &= -K_Q Q^n \\
\frac{\partial T_g}{\partial t} &= \frac{-\phi_h a - \phi_m a L_v}{\rho_g (C_{pg} + MC_{pw})} \\
\frac{\partial Y}{\partial t} &= -V_a \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{\phi_m a (1 - \varepsilon)}{\rho_a \varepsilon} \\
\frac{\partial T_a}{\partial t} &= -V_a \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{a(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \frac{\phi_m c_{pv} (T_g - T_a) + \phi_h}{\rho_a (C_{pa} + YC_{pv})}
\end{aligned} \tag{2.2.31}$$

A resolução do sistema (2.2.31) foi feita pelo método das diferenças finitas em Courtois *et al.*, 1992. Esse grupo de pesquisadores criou um software (DRYER 2000) para prever os fenômenos de condensação, seções de aquecimento e resfriamento, ciclos de circulação de ar, mudança de temperatura, umidade, taxa de fluxo de ar, etc. Courtois *et al.*, ainda modelaram secadores de fluxo misto para os fluxos concorrentes e contracorrentes. Desconsideraram o fluxo cruzado, porque é menor a ocorrência de regiões com este tipo de fluxo e dependem do espaçamento das calhas por onde passa o ar. Simplificaram a trajetória curva dos grãos e do ar, considerando-as apenas retas verticais.

Estudos mais recentes de Whitaker e Chon, 1983, Oliveira e Haghghi, 1998, Perré e Turner, 1999, Mhimid *et al.*, 1999 e Laurindo e Prat, 1998 mostram uma tendência de detalhar mais os fenômenos de transporte que ocorrem na secagem de produtos em geral.

Em Oliveira e Haghghi, 1998, os modelos de leito profundo e camada fina são criticados porque o sistema todo é considerado como um meio poroso simples, onde o transporte que ocorre dentro dos grãos não é levado em conta. Segundo eles, a modelagem de um sistema multi-partículas, por qualquer teoria, deveria levar em conta a solução de equações de transporte no sólido, acopladas às equações de camada limite aplicadas ao meio de secagem. Esses autores modelaram a secagem fazendo uma análise multi-grãos, dividindo o problema em duas partes:

camada limite e análise da secagem do sólido. Para modelar a transferência de calor e massa dentro do grão, utilizaram o modelo de Luikov, escrito na forma

$$\begin{aligned} C_q \frac{\partial T_a}{\partial t} &= \nabla(K_{11}\nabla T_a + K_{12}\nabla U) \\ C_m \frac{\partial U}{\partial t} &= \nabla(K_{21}\nabla T_a + K_{22}\nabla U) \end{aligned} \quad (2.2.32)$$

onde C_q e C_m são as capacidades de calor e massa, respectivamente e K_{11} e K_{12} são os coeficientes de condução de calor e difusão, respectivamente. K_{12} e K_{21} são os coeficientes de termo-difusão e U é o potencial de umidade.

As equações para o escoamento externo são:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{W} &= 0 \\ \vec{W} \cdot \nabla \vec{W} &= \nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{W} \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{W} \cdot \nabla T_a &= \frac{1}{Re Pr} \nabla^2 T_a \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \vec{W} \cdot \nabla \omega &= \frac{1}{Re Sc} \nabla^2 \omega \end{aligned} \quad (2.2.33)$$

Oliveira e Haghghi resolveram o sistema (2.2.33) usando elementos finitos, com as seguintes suposições: o fluxo convectivo externo é laminar, a escala de comprimento característico da secagem média é muito menor do que a do fluxo externo; a interface que divide os dois domínios é considerada sem espessura e o equilíbrio é instantâneo em toda a interface, para cada passo de tempo. Consideraram duas situações: um e dois grãos esféricos sujeitos a um escoamento de ar e analisaram, dentre outras relações, a influência da velocidade do ar sobre a variação do teor de umidade do grão.

Em Mhimid *et al.*, 1999, foi analisada a secagem em um leito cilíndrico vertical com fluxo de ar quente e paredes sujeitas às condições de Dirichlet e Newmann. O método dos volumes finitos foi usado para resolver o sistema de equações proposto.

Em Laurindo e Prat, 1998 encontra-se uma classificação das abordagens da modelagem dos fenômenos de transporte em meios porosos: abordagens contínuas e discretas. As primeiras consideram o meio como uma massa contínua, supondo que a dimensão característica do objeto inteiro estudado (escala de comprimento). Esses pesquisadores consideraram que algumas situações ainda são impossíveis de simular aplicando a hipótese da escala de comprimento, mas admitem a razoável concordância dos resultados desses métodos com os dados experimentais para casos

simples. As abordagens discretas usam fractais e métodos da física-estatística tais como percolação e re-normalização.

Essas abordagens apesar de detalharem mais os fenômenos que ocorrem na secagem, ainda estão em desenvolvimento e não são adequadas para uso em um software de controle ou projeto de secadores industriais.

Em Khatchatourian *et al.*, 1999, foi proposto um modelo matemático para leito fixo e profundo analisando as trocas de massa e energia entre o ar e os grãos. Os fluxos de massa e calor foram obtidos considerando curvas de secagem e temperatura experimentais. Esta tese tem como base esse modelo, cujas hipóteses e dedução das equações são encontradas no Capítulo 3.

2.2.3. Aplicações dos modelos matemáticos

Alguns dos modelos matemáticos mencionados foram utilizados para aplicações em secadores reais, como suporte para o projeto de novos secadores ou como base de *software* auxiliar no planejamento ou tomada de decisões sobre unidades de secagem.

A primeira publicação sobre controle ótimo de secadores deve-se a Zachariah e Isacs, 1966. As dificuldades iniciais eram a medida contínua do teor de umidade do grão e o tempo computacional para resolver as equações que forneceriam as informações para os ajustes de velocidade de descida do grão e temperatura do ar de secagem. Vários pesquisadores colaboraram no desenvolvimento de equipamentos (sensores), métodos de medida e algoritmos para o controle ótimo, tais como Holtman e Zachariah, 1969, Borsum e Bakker-Arkema, 1982, Schisler *et al.*, 1982 e Forbes *et al.*, 1984. Em Eltigani e Bakker-Arkema, 1987 foi usado o modelo da Universidade de Michigan para modelar a secagem e desenvolver, um sistema para o controle de secadores. Esse sistema usa como dados o teor de umidade do grão na entrada do secador e a temperatura do ar de secagem, depois resolve o modelo matemático e determina a velocidade do grão no interior do secador, em função do teor de umidade do grão desejado. Na saída, o teor de umidade do grão é medido, para verificação da eficiência do sistema e para fazer os necessários ajustes.

Em Souza e Ferreira, 1996, foi utilizado o modelo de França para simular a secagem de grãos em um secador real cilíndrico.

Em Marinos-Kouris *et al.*, 1998, encontra-se uma abordagem do problema da secagem como um sistema complexo, considerando o planejamento e o projeto de sistemas de secagem. Neste artigo modelos matemáticos foram utilizados para o controle da temperatura e umidade do grão e do ar, análise e dimensionamento da estrutura, condições de operação, custos e o desempenho dos equipamentos. Também foi desenvolvido um software que gera informações sobre

cada bloco do sistema (funcionamento do secador, dimensionamento e custos, avaliação econômica,...) gerando dados otimizados para cada solicitação do projetista.

Em Reis e Carrocci, 1998, encontra-se a análise do consumo de energia para diferentes tipos de secadores. Os resultados obtidos pelo modelo matemático de Parti, 1991, foram comparados com dados experimentais, medidos em um protótipo de laboratório (secador por pulverização, desenvolvido especialmente para secagem de amido de mandioca).

Em Zhihuai e Chongwen, 1999, foram feitas a simulação e a otimização do projeto de um secador de grãos com fluxo cruzado. Um sistema de equações diferenciais parciais foi usado para simular a variação da temperatura e umidade do grão e o método do polígono complexo para a otimização, tendo uma função sobre o consumo de energia como base. A conclusão da pesquisa destes autores é que as condições de operação, pequenas mudanças na estrutura e dimensões do secador têm efeitos decisivos na performance do equipamento.

2.3. Modelagem matemática do processo de aeração de grãos

2.3.1. Noções Preliminares

As características do armazenamento dependem da finalidade dos produtos armazenados. Para produção de cervejas e conservação de sementes, o poder germinativo precisa ser mantido, portanto o ambiente de armazenagem deve proporcionar a continuidade do processo biológico. Para as indústrias de óleos e farinhas os grãos precisam estar secos e mortos e as condições de armazenamento são outras. Nestas duas situações, o ataque de insetos é uma grande ameaça à qualidade final do produto, a ponto de justificar, em alguns casos, o tratamento com produtos químicos. Com todas estas variáveis, o armazenamento de cereais está longe de ser uma operação trivial e segura. Visando bons resultados finais, para armazenar grãos ou sementes é necessário definir sua utilização futura e em função disto, planejar as condições ótimas de armazenamento, com relação à umidade e temperatura do produto, intensidade da aeração e controle de pragas.

A aeração é realizada pela passagem forçada do ar ambiente (em alguns casos é necessário injetar ar resfriado) pela massa dos cereais armazenados e constitui-se no procedimento mais utilizado para controlar a temperatura e a umidade. A passagem do ar pela massa de grãos depende:

- dos parâmetros do fluxo de ar;
- das características da superfície do produto (rugosidade)
- da forma e tamanho das impurezas (sujeiras, grãos quebrados,...)

- do grau de compactação da massa de grãos;
- da configuração e tamanho dos espaços intersticiais;
- da homogeneidade da massa de grãos e
- da altura da camada de produto.

Diferenças significativas de porosidade ou presença de impurezas em determinadas regiões da massa de grãos, podem oferecer resistência maior ou menor à passagem do ar, criando regiões super-aeradas e outras sub-aeradas. O resultado disso é a formação de gradientes de umidade e/ou de temperatura e ainda a formação de focos de infestação de fungos. Portanto, a aeração precisa ser uniforme.

A existência de espaços intersticiais permite a passagem do ar e o entendimento da massa de grãos como um meio poroso [Shedd, 1953]. A porosidade de grãos é definida por

$$\varepsilon = \frac{\text{volume dos espaços vazios}}{\text{volume total da massa de grãos}}$$

e varia entre 40 e 50 %, para grãos depositados por gravidade.

Segundo Kepler Weber, existem quatro tipos de aeração:

1. **Aeração de resfriamento.** É usada para grãos com teor de umidade na faixa de 13 a 18 % com a finalidade de baixar a temperatura do grão usando o ar ambiente ou resfriado.
2. **Aeração contínua ou quase contínua.** É usada para grãos com teor de umidade acima de 18 % como medida provisória de conservação, geralmente antes da secagem.
3. **Aeração secante.** É usada para pequenos lotes de produto úmido e faz a secagem lentamente. O ar utilizado tem temperatura em torno de 4 a 8°C acima da temperatura ambiente.
4. **Aeração aplicada à técnica de resfriamento (Seca-aeração).** Como o grão que sai do secador ainda está um pouco quente, a aeração finaliza a secagem, reduzindo a temperatura e a umidade.

2.3.2. Modelos Matemáticos

O sistema dos silos onde o processo de aeração é usado, geralmente é constituído por potentes ventiladores, localizados externamente ao armazém, que insuflam o ar através de aerodutos

na base da massa de grãos. O fluxo de ar nas regiões próximas às fontes de ar não é uniforme, tendendo a uniformização em regiões distantes das fontes.

Em Shedd, 1953, encontra-se uma laboriosa investigação experimental sobre a variação do fluxo de ar em relação à queda de pressão em leitos de produtos agrícolas. Shedd apresenta esta relação na forma de curvas para mais de 20 espécies de grãos. A Fig. 2.3.1 apresenta a curva relativa à soja. Esse autor observou que as curvas em gráficos log-log são semelhantes entre si e levemente convexas, quase retas por partes. Considerando-as como retas por partes, o relacionamento entre o fluxo de ar (Q) e a queda de pressão (ΔP) é dado pela expressão

$$Q = a \Delta P^b \quad (2.3.1)$$

onde Q é o fluxo de ar [$m^3 \text{ min}^{-1} \cdot m^{-2}$], P é a queda de pressão por profundidade do grão [P_a/m] e a e b são constantes que dependem das características do grão.

O coeficiente a é o valor de Q quando $\Delta P=1$. O coeficiente b é o coeficiente angular da reta tangente à curva no gráfico log-log do fluxo de ar pela queda de pressão. O modelo de Shedd supõe que $\Delta P/\Delta z$ (queda de pressão por unidade de profundidade) não varia, ou, independe da profundidade. Esta suposição não é correta para uma massa de grão profunda, nem para silos onde o piso não é perpendicular às paredes. Mesmo assim, para pequenas variações da queda de pressão, a equação acima pode ser considerada correta, o que justifica a grande aceitação deste modelo.

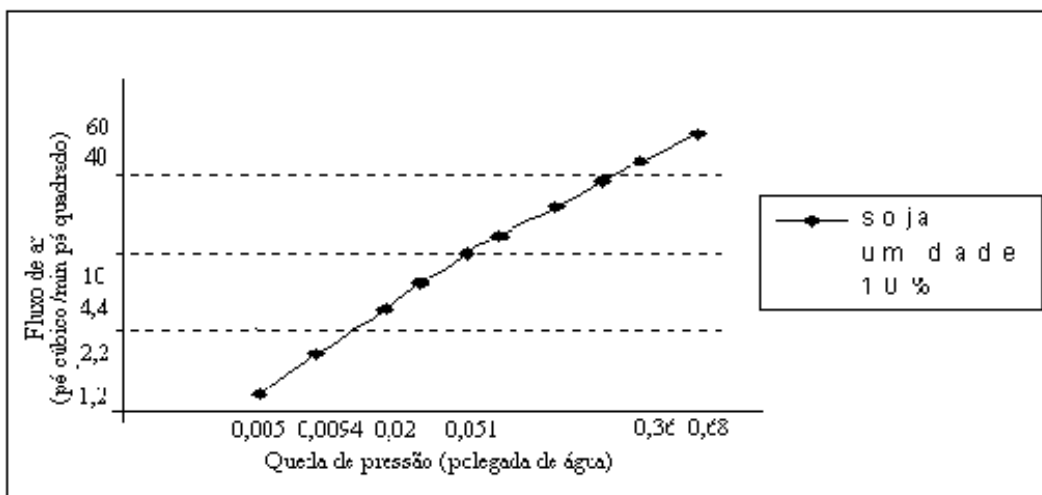


Figura. 2.3.1 – Variação do fluxo de ar em relação à queda de pressão para a soja, com umidade inicial de 10% (base seca). (Uma das curvas de Shedd, 1953)

Em Brooker, 1961, afirma-se que a variação do fluxo de ar injetado em uma massa de grãos não é uniforme em relação à queda de pressão. As trajetórias podem divergir ou convergir e a

velocidade do ar pode variar ao longo de uma linha de fluxo. Como resultado, a distância percorrida por uma partícula de ar ao longo de uma linha de fluxo poderá ser maior do que a distância em outra linha de fluxo, no mesmo escoamento. O tempo gasto para uma partícula deslocar-se da entrada de ar a um ponto P , ao longo de uma linha de fluxo é chamado **tempo transverso** do ponto P . O tempo transverso é inversamente proporcional ao tempo de aeração. O tempo transverso máximo, ou o tempo requerido para o ar passar através de toda a massa de grãos ao longo da maior linha de fluxo, é um importante parâmetro para estimar o tempo requerido para remover o excesso de umidade de uma massa de grãos. O cálculo do tempo transverso máximo é uma das aplicações do modelo para o cálculo da queda de pressão e o método de cálculo é proposto por Brooker *et al.*, 1982.

Os modelos experimentais para o cálculo da queda de pressão na massa de grãos são restritos somente aos casos medidos. Isso motivou Brooker a propor um modelo teórico. Brooker considerou um meio homogêneo e utilizou a equação da continuidade

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.3.2)$$

para o escoamento estacionário incompressível. Considerou que as linhas de fluxo são normais às linhas isóbaras e escreveu a equação de Shedd na forma

$$W = a \left(\frac{\partial P}{\partial n} \right)^B \quad \text{ou} \quad |\vec{W}| = a (\text{grad}P)^B \quad (2.3.3)$$

onde n é a direção do gradiente de pressão.

A taxa de variação da pressão na direção n é

$$\left| \frac{\partial P}{\partial n} \right| = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2} \quad (2.3.4)$$

e os componentes da velocidade são

$$\frac{u}{W} = \frac{(\partial P / \partial x)}{(\partial P / \partial n)} \quad \text{e} \quad \frac{v}{W} = \frac{(\partial P / \partial y)}{(\partial P / \partial n)}. \quad (2.3.5)$$

Explicitando $\partial P / \partial n$ em (2.3.5) e usando (2.3.3) obtém-se

$$\frac{\partial P}{\partial n} = \frac{\partial P}{\partial x} \frac{1}{u} a \left(\frac{\partial P}{\partial n} \right)^B. \quad (2.3.6)$$

Explicitando u em (2.3.6), usando (2.3.4) e fazendo $m = -(B-1)/2$, obtém-se

$$u = a \frac{\partial P / \partial x}{\left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \right]^m} \quad \text{e} \quad v = a \frac{\partial P / \partial y}{\left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \right]^m}. \quad (2.3.7)$$

Substituindo (2.3.7) na equação da continuidade (2.3.2) obtém-se

$$\begin{aligned} & \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right)^2 \right] - \\ & - 2m \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) + 2 \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} \right) + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (2.3.8)$$

Brooker usou diferenças finitas para resolver (2.3.8), que é uma equação diferencial parcial não linear. Calculou a queda de pressão para uma caixa retangular com uma entrada de ar, variando os valores de B da equação (2.3.3), para três faixas de variação do gradiente de pressão obtidas das curvas experimentais de Shedd. A resolução desta equação para domínios com geometria mais complexa (por exemplo, seções triangulares, como é o caso dos armazéns graneleiros) usando diferenças finitas, torna-se muito complicada.

Em Bunn e Hukill, 1963, encontra-se a afirmação de que não existe teoria correta para fluxos não-uniformes. Esses pesquisadores observaram que o modelo de Brooker usa as características de fluxo uniforme para analisar os fluxos não-uniformes.

Partindo de dados experimentais, Bunn e Hukill obtiveram a equação

$$\frac{\Delta P}{L} = a \left[\exp \left(\frac{bW^2}{\Delta P / L} \right) - 1 \right]$$

e usando a equação da continuidade, chegaram à equação

$$\left[(I+M)P_x^2 + 2P_y^2 \right] P_{xx} + 2(M-1)P_x P_y P_{xy} + \left[2P_x^2 + (I+M)P_y^2 \right] = 0 \quad (2.3.9)$$

para calcular a pressão estática de um sistema de fluxo de ar não uniforme, onde

$$M = \frac{\sqrt{P_x^2 + P_y^2}}{\left(a + \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \right) \ln \left(\frac{a + \sqrt{P_x^2 + P_y^2}}{a} \right)}$$

Bunn e Hukill transformaram a equação (2.3.9) em uma equação em diferenças e usaram o método de aproximações sucessivas para resolvê-la.

Em Jindal e Thompson, 1972, o modelo de Brooker foi modificado para descrever a distribuição da queda de pressão de um fluxo de ar que passa através de uma pilha de grãos de forma triangular. Em Pierce e Thompson, 1975, esse modelo foi adaptado para uma pilha de forma cônica (sólido gerado pela rotação incompleta de um triângulo retângulo em torno de um dos catetos) equipado com um duto de ar circular central.

Em Haque, Chung e Foster, 1981, os escoamentos de ar sob condições não-Darcy em leito de milho, com distribuição da massa de grãos não uniforme foram estudados com base no modelo de Haque *et al.*, 1978, que usa a expressão

$$\frac{\partial P}{\partial n} = AW_n + BW_n^2 + CW_n(f_m) \quad (2.3.10)$$

onde A , B e C são constantes obtidas experimentalmente e f_m é uma função de r (raio) e z (altura), para calcular o gradiente de pressão e a velocidade do ar em um leito de milho contendo impurezas.

O artigo de Foster, 1970, é citado em Brooker *et al.*, 1982, com relação à investigação da resistência ao fluxo em misturas de milho com impurezas. Segundo Foster, quando o percentual de impurezas cresce, a resistência à pressão aumenta, chegando ao máximo quando a quantidade de impurezas está na ordem de 30 a 40 %.

O efeito da umidade, para Brooker *et al.*, 1982, não está claro. De acordo com Shedd, 1953, com 20 % ou mais de umidade, o milho oferece menos resistência à passagem do ar do que depois de seco. Por outro lado, em Patterson, 1969, e Mattier, 1956, citados por Brooker, 1982, é afirmado que a queda de pressão no milho cresce com o aumento da umidade.

Em Haque, Ahmed e Deyoe, 1982, encontra-se um estudo da variação na resistência à passagem do ar, ocasionada pela variação da umidade da massa de grãos. Como conclusão, foi observado que a resistência decresce com o aumento da umidade do grão. Analisando as curvas de ΔP pelo teor de umidade, a expressão que melhor representou esta relação foi

$$\Delta P = AW + BW^2 + CMW . \quad (2.3.11)$$

Em Ribeiro, 1983, e Khatchatourian, *et al*, 1998, uma equação diferencial parcial não linear foi usada para calcular a pressão estática do ar injetado em leito de grãos. Como em Brooker, 1982, partiram das equações da continuidade e do momento linear, na forma

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.3.12)$$

$$\vec{V} = -K \text{ grad } P \quad (2.3.13)$$

onde K é o coeficiente de permeabilidade, que é função do número de Reynolds, da variedade dos grãos, do teor de umidade, etc. Comparando a equação (2.3.13) com a equação de Shedd, chegaram a uma expressão para K :

$$K = A(|\text{grad}P|)^{B-1} = A \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \right]^{(B-1)/2} . \quad (2.3.14)$$

Substituindo as componentes do vetor velocidade

$$u = -K(\partial P / \partial x) \quad e \quad v = -K(\partial P / \partial y)$$

na equação da continuidade, obtiveram a seguinte equação diferencial parcial para o cálculo da pressão em uma seção transversal do leito de grãos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.3.15)$$

Ribeiro, 1983 calculou a queda de pressão e a velocidade para a mesma caixa com milho debulhado de Brooker, considerando os coeficientes da equação de Shedd constantes e depois variáveis. Ribeiro obteve resultados com pequenas diferenças nas duas situações e ainda diferentes dos resultados de Brooker.

Em Khatchatourian *et al*, 1998, a equação (2.3.15) foi resolvida para diferentes geometrias de silos usando o método dos elementos finitos. Também foi feita a comparação dos dados numéricos com os experimentais sobre a relação entre o fluxo de ar e a queda de pressão, para diferentes teores de umidade do grão de soja. Foi observado que o aumento do teor de umidade

provoca uma redução na queda de pressão no intervalo estudado, o que está de acordo com Haque *et al.*, 1982.

Os primeiros estudos sistemáticos de secagem de milho começaram em 1959, na Universidade de Purdue [Neves *et al.*, 1983]. Como primeiras conclusões, foi sugerida a seguinte prática para a secagem de produtos agrícolas, a qual convencionou-se chamar de **seca-aeração**:

1. *Interrupção da secagem quando o grão atinge 16-18 % (b.u.) de umidade;*
2. *Repouso do milho de 6 a 10 h;*
3. *Aeração de 12 h.* [Neves, 1983]

Como o grão sai do secador com um gradiente de umidade em seu interior, o período de repouso possibilita a redistribuição dessa umidade praticamente sem custos. Esse processo aumenta o rendimento do secador, reduz os danos e mantém a aparência externa dos grãos.

Em Neves *et al.*, 1983 encontra-se algumas conclusões (obtidas usando o modelo de Fortes e Okos, 1981), que orientam a prática da armazenagem:

- o fluxo de vapor de água é predominante sobre o fluxo de água para temperaturas maiores que 75 °C na camada externa do grão;
- existe uma frente móvel de evaporação, que é função da temperatura e
- se o grão fosse seco a temperatura do ar entre 75°C e 97°C e fosse submetido à aeração com temperatura de 26,7 °C, logo depois da secagem, ele absorveria umidade.

Em Arthur e Rumsey, 1991, foi elaborado um modelo 2-D de secagem para secadores estacionários de nozes, na forma de um paralelogramo. Também foi calculada a distribuição da velocidade do ar, a temperatura e a umidade do produto e do ar, usando diferenças finitas. A comparação dos resultados teóricos com os experimentais foi satisfatória.

Em Pagano *et al.*, 1998, encontra-se uma avaliação experimental da resistência ao fluxo de ar em leitos de milho com correntes de ar horizontais e verticais. Usaram a equação de Shedd, 1953, e Mattei, 1969, para comparar com os dados experimentais. Concluíram que as equações de Mattei descrevem melhor a queda de pressão, na faixa de velocidade entre $0,027$ a $0,336 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$.

2.4. Proposição do problema

Considerando o estado atual das pesquisas acadêmicas e industriais em secagem e aeração de grãos, dois problemas foram selecionados para esta tese:

1. O problema de secagem consiste em desenvolver um modelo matemático (sistema de EDPs) que contenha parâmetros conhecidos do produto (soja); resolver numericamente o sistema de EDPs, e aplicá-lo para modelar o funcionamento de um secador de soja industrial de fluxo contínuo.

2. O problema de aeração consiste em desenvolver um modelo matemático para o cálculo da distribuição da pressão e da velocidade do ar na massa de grãos e testar o algoritmo de solução do modelo com uma função analítica conhecida.

3. MODELOS MATEMÁTICOS DOS PROCESSOS DE SECAGEM E AERAÇÃO

Neste capítulo serão detalhadas as equações dos modelos de secagem e aeração utilizadas nas simulações numéricas desta tese.

3.1. Modelo matemático do processo de secagem de grãos

O secador de leito fixo é constituído por uma caixa completamente cheia de grãos, nesse caso soja, pela qual passa um fluxo de ar ambiente aquecido (Fig. 3.1.1). O aumento da temperatura faz com que aumente o limite máximo de teor de vapor de água na mistura ar-vapor de água. Ao passar pela camada de grãos úmidos, o ar seco baixa o teor de umidade de equilíbrio, provocando um fluxo de vapor de água, do grão para o ar. Esta água é transportada pelo ar para fora do secador.

Como a largura do leito é muito maior do que o comprimento das camadas limite dinâmica e térmica nas paredes, o modelo foi considerado unidimensional. A velocidade do escoamento de ar e a porosidade foram consideradas constantes.

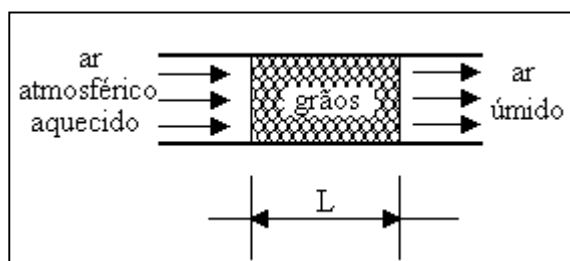


Figura 3.1.1 – Secador de leito fixo

Foram consideradas as seguintes hipóteses de base:

1. A contração volumétrica dos grãos é negligenciável.
2. Os gradientes de temperatura dentro dos grãos são negligenciáveis.
3. A condução de calor partícula-partícula é negligenciável.
4. A transferência de calor pelas paredes é negligenciável.
5. O calor específico, tanto do ar úmido como do grão é constante durante um pequeno período de tempo.
6. As equações de secagem para camada fina são obtidas de dados experimentais.
7. As propriedades do ar e do grão são consideradas constantes sobre o plano perpendicular ao escoamento. Isto é, o problema é considerado unidimensional.

Para deduzir as equações do modelo foi considerado um volume de controle (VC) localizado na massa de grãos, conforme mostra a Fig.3.1.2, preenchido pelos grãos de soja e pelos espaços intersticiais, por onde o ar escoia.

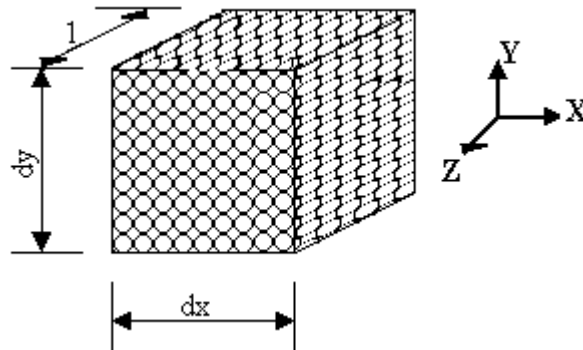


Figura 3.1.2 – Volume de controle (VC):

Para dedução das equações do modelo é necessário definir alguns termos básicos e noções específicas, tais como, teor de umidade do grão, teor de umidade do ar, razão da área pelo volume do grão, porosidade da massa de grãos e volume da massa de grãos.

Teor de umidade do grão (M)

O teor de umidade do grão (M) em base seca é a razão entre a massa de água presente no grão e a massa de grão seco.

$$M = \frac{m_{gw}}{m_{gs}} \quad (3.1.1)$$

Teor de umidade do ar (Y)

O teor de umidade do ar em base seca é a razão entre a massa de vapor de água contida no ar e a massa de ar seco.

$$Y = \frac{m_{aw}}{m_{as}} \quad (3.1.2)$$

Razão da área pelo volume do grão (a)

A razão entre a área da superfície externa e o volume do grão, é denotada por a , e sua unidade de medida é (m^{-1}):

$$a = \frac{A_g^{(e)}}{V_g^{(e)}} \quad (3.1.3)$$

onde ^(e) refere-se ao valor médio da grandeza em questão para um grão.

Porosidade

A porosidade é a razão entre o volume de ar (espaços onde não tem grão: V_a) e o volume total (V) ocupado pela massa de grãos e pelo ar.

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V} \quad (3.1.4)$$

Volume total dos grãos

Da equação (3.1.4) o volume de ar dentro do VC é

$$V_a = V \varepsilon .$$

Como o volume total do volume de controle é a soma dos volumes do ar e dos grãos $V = V_a + V_g$, tem-se

$$V_g = V(1 - \varepsilon) = \sum_{i=1}^{n_g} V_{gi} = n_g V_{gi} \quad (3.1.5)$$

onde n_g é o número de grãos

$$n_g = \frac{\sum_{i=1}^{n_g} V_{gi}}{V_g^{(e)}} = \frac{V(1 - \varepsilon)}{V_g^{(e)}} = \frac{V(1 - \varepsilon)a}{A_g^{(e)}} .$$

Cálculo do fluxo de massa de água (Φ_m)

O modelo utilizado neste trabalho não adota uma curva teórica de secagem de camada fina (como Brooker *et al.*, 1982, França, 1991) para calcular os fluxos de massa, mas utiliza curvas de secagem obtidas experimentalmente.

O fluxo de massa de água (Φ_m) entre o grão e o ar é definido como a quantidade de vapor de água que atravessa a superfície do grão, por unidade de área e unidade de tempo e depende de T_a , M_e , φ , t e W_a .

O cálculo da Φ_m foi feito com base nos dados experimentais de secagem de soja obtidos por Soares, 1986, para camada fina (Fig. 3.1.3), através da determinação da dependência entre a razão de umidade RM e o tempo, na forma de polinômios de segundo grau

$$\ln(RM) = a_1 \cdot \ln^2\left(-\frac{\partial RM}{\partial t}\right) + a_2 \cdot \ln\left(-\frac{\partial RM}{\partial t}\right) + a_3, \quad (3.1.6)$$

para $0 \leq t \leq 6h$ e $303,15 K \leq T_s \leq 343,15 K$.

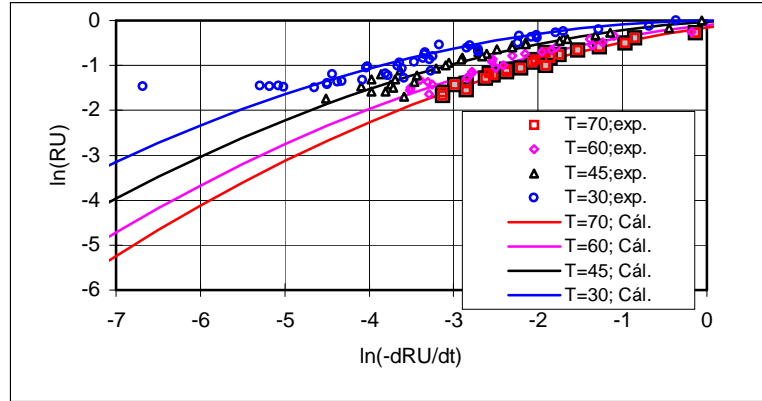


Figura 3.1.3 - Curvas de dependência entre RM e $\frac{\partial RM}{\partial t}$ obtidas com os dados de Soares para secagem de soja em camadas finas.

A razão de umidade adimensional, RM , é definida por

$$RM = \frac{M - M_e}{M_o - M_e}, \quad (3.1.7)$$

onde M_o (umidade inicial do grão) é constante. M_e é dado por

$$M_e = \frac{3,962 \cdot \varphi^{0,4919}}{100 \ln(T_s)} \quad (3.1.8)$$

onde T_s é a temperatura do ar na entrada da câmara de secagem e φ é a umidade relativa do ar (razão entre o teor de umidade do ar e o teor de umidade do ar saturado, %), calculada por

$$\varphi = \frac{76000 U_a}{0,622 + Y} \exp\left[\ln 10 \left(0,622 + \frac{7,5}{(238/T_s) + 1}\right)\right] \quad (3.1.9)$$

ambas constantes para cada curva. A solução da equação (3.1.6) é

$$\frac{\partial RM}{\partial t} = -e^{-\frac{a_2}{2a_1} \pm \sqrt{\left(\frac{a_2}{2a_1}\right)^2 - \frac{a_3}{2a_1} + \frac{1}{a_1} \ln(RM)}} \quad (3.1.10)$$

ou

$$\frac{\partial RM}{\partial t} = -K_1 \cdot e^{-\sqrt{K_2 + K_3 \ln(RM)}} \quad (3.1.11)$$

onde

$$K_1 = e^{-\frac{a_2}{2a_1}};$$

$$K_2 = \left(\frac{a_2}{2a_1}\right)^2 - \frac{a_3}{a_1} \quad e$$

$$K_3 = \frac{1}{a_1}.$$
(3.1.12)

são funções da temperatura, apresentadas pelas Figuras 3.1.4 a 3.1.6.

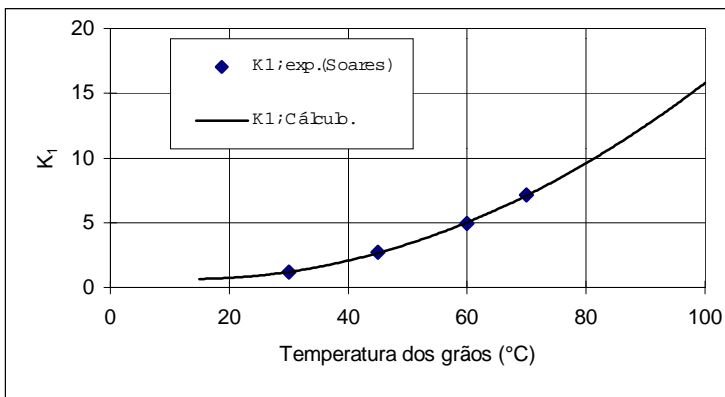


Figura 3.1.4 – K_1 em função da temperatura dos grãos

Figura 3.1.5 – K_2 em função da temperatura dos grãos

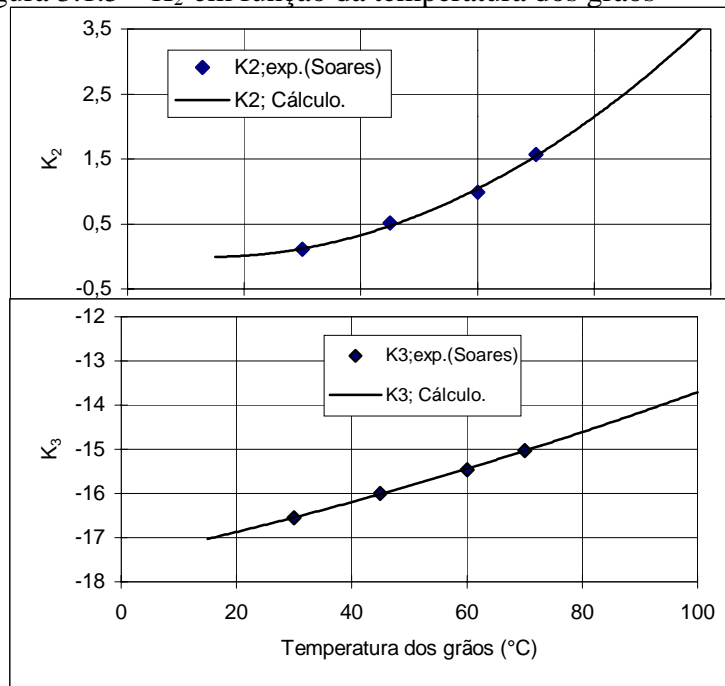


Figura 3.1.6 – K_3 em função da temperatura dos grãos

Substituindo (3.1.7) em (3.1.11) e fazendo as denotações

$$C_1 = K_1 (M_o - M_e)$$

$$C_2 = K_2 - K_3 \ln(M_o - M_e) \quad (3.1.13)$$

$$C_3 = K_3$$

$$\Phi_m = \frac{\partial RM}{\partial t}$$

chega-se à relação

$$\Phi_m = C_1(T) \cdot e^{-\sqrt{C_2(T)+C_3(T)\ln(M-M_e)}} \cdot \frac{\rho_g}{a} \quad (3.1.14)$$

A comparação entre as curvas de RM por tempo entre os dados experimentais e calculados através das relações acima, é mostrada pela Fig. 3.1.7. A forte coincidência indica que estas relações podem ser usadas no modelo e reproduzem as taxas de secagem de soja para o intervalo de temperatura estudado.

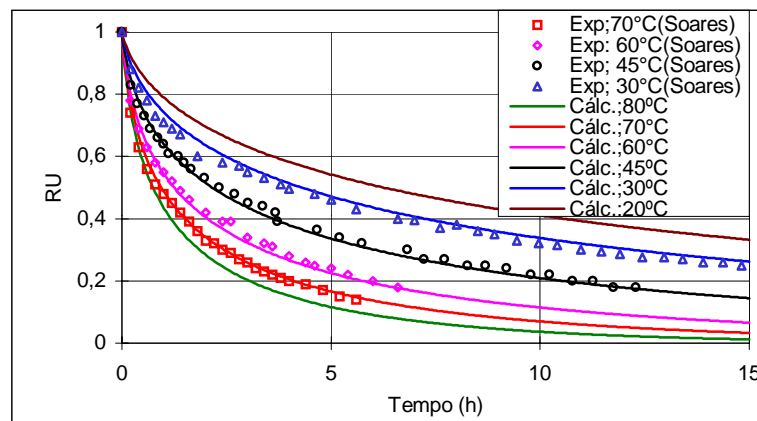


Figura 3.1.7 - Comparação entre os dados experimentais e as curvas de secagem obtidas usando a dependência 3.1.16.

As curvas de secagem de Soares, 1986, foram obtidas com velocidade $W_o = 0,9 \text{ m/s}$. Para adaptar a equação (3.1.14) para qualquer velocidade foi usada a relação proposta por Chilton-Colburn [Sissom, 1988], válida para $0,6 < Sc < 2500$ e $0,6 < Pr < 100$, visto que este trabalho enquadra-se nesses limites.

$$\frac{h}{C_p \rho W} Pr^{\frac{2}{3}} = \bar{j}_H = \bar{j}_M = \frac{k_c}{W} Sc^{\frac{2}{3}} \quad (3.1.15)$$

Para as condições em que foram feitas as experiências em Soares, 1986, tem-se $Re_p < 350$, optando-se em considerar $\bar{j}_M = Re_p^{-0,5}$. Essa análise, associada à equação (3.1.15), permitiu concluir que $h \propto W^{0,5}$ pois Pr e Sc independem da velocidade do ar enquanto que $Re_p \propto W$.

Com base nestas informações, ajustou-se a equação do fluxo de massa, levando-se em consideração a influência da velocidade do ar de secagem, obtendo a seguinte relação

$$\Phi_m = \sqrt{\frac{W_a}{W_o}} C_1(T) \cdot e^{-\sqrt{C_2(T)+C_3(T)\ln(X-X_e)}} \cdot \frac{\rho_g}{a} \quad (3.1.16)$$

Cálculo do fluxo de calor (Φ_h)

O fluxo de calor foi calculado, no modelo atual, a partir do coeficiente de transferência de calor proposto por Loncin, utilizado por Courtois e Lasseran, 1993:

$$h = -19,718 + 0,2576 T_g + 379,41 Y \quad (3.1.17)$$

Usando a mesma analogia feita para transferência de massa, pode-se afirmar que $\alpha \propto W_a^{0,5}$. Assim, a equação (3.1.17) fica na forma

$$h = \sqrt{\frac{W_a}{W_o}} (-19,718 + 0,2576 T_g + 379,41 Y) \quad .$$

e o fluxo de calor é dado pela equação

$$\Phi_h = h(T_a - T_g) \quad (3.1.18)$$

Mesmo que a equação (3.1.17) não tenha sido obtida especialmente para secagem de soja, a coincidência dos dados experimentais e calculados foi razoável [Khatchatourian *et al*, 1999 e 2000].

3.1.1. Equação de conservação da massa de água no ar

A taxa de variação da massa de água no ar, no VC, é igual à massa de água que sai dos grãos.

$$\boxed{\text{Taxa de variação da água do ar}} = \boxed{\text{Taxa de água que sai do grão}}$$

A massa do ar presente nos espaços intersticiais do VC é

$$m_a = \rho_a V_a = \rho_a \varepsilon dx dy.$$

A quantidade de vapor de água presente nos espaços intersticiais do VC é

$$m_v = Y m_a = Y \rho_a \varepsilon dx dy$$

onde Y é o teor de umidade do ar em base seca.

A variação da massa de água no ar é

$$\frac{d}{dt}(m_v) = \rho_a \varepsilon dx dy \frac{dY}{dt} \quad (3.1.19)$$

onde dY/dt é a derivada substantiva do teor de umidade do ar, que para o caso unidimensional e leito fixo é

$$\frac{dY}{dt} = \frac{\partial Y}{\partial t} + W_a \frac{\partial Y}{\partial z}$$

onde W_a é a velocidade do ar.

O fluxo total de massa de vapor que passa pela superfície de todos os grãos e vai para o ar do VC é

$$m_v = n_g \Phi_m A_g = \Phi_m a dx dy (1 - \varepsilon). \quad (3.1.20)$$

Finalmente, igualando as equações (3.1.19) e (3.1.20) para um intervalo de tempo Δt , tem-se

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

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + W_a \frac{\partial Y}{\partial z} = \frac{\Phi_m a (1 - \varepsilon)}{\rho_a \varepsilon} . \quad (3.1.21)$$

3.1.2. Equação da conservação da energia no ar

A taxa de variação da energia na massa de ar é igual à soma da taxa de energia transformada no aquecimento do vapor de água e a taxa de calor cedido para os grãos.

A entalpia da massa de ar para o volume de controle VC é a soma da entalpia da massa de ar seco com a entalpia da massa do vapor de água presentes no ar

$$I_a = (Cp_a m_a + Cp_v m_v) T_a \quad (3.1.22)$$

onde

$$m_a = \rho_a V_a = \rho_a V \varepsilon = \rho_a \varepsilon dx dy \quad e$$

$$m_v = m_a Y = Y \rho_a \varepsilon dx dy .$$

A temperatura de referência escolhida foi $T=0^\circ C$ para que a entalpia, a entropia e a energia interna correspondentes a esta temperatura, sejam iguais a zero.

Então,

$$I_a = (Cp_a + Y Cp_v) \varepsilon \rho_a T_a dx dy . \quad (3.1.23)$$

A variação total (derivada substantiva) da entalpia do ar em relação ao tempo é

$$\begin{aligned} \frac{dI_a}{dt} = \frac{d}{dt} [(Cp_a + Y Cp_v) T_a] \varepsilon \rho_a dx dy = \\ \varepsilon \rho_a dx dy \left[(Cp_a + Y Cp_v) \frac{dT_a}{dt} + Cp_v T_a \frac{dY}{dt} \right] \end{aligned} \quad (3.1.24)$$

O calor usado para o aquecimento do vapor de água de T_g para T_a é

$$Cp_v m_v (T_a - T_g) = Cp_v \Phi_m a dx dy (1 - \varepsilon) (T_a - T_g) \quad (3.1.25)$$

O calor cedido para os grãos no VC por segundo é

$$n_g A_g^{(e)} \Phi_h = \frac{aV(1-\varepsilon)}{A_g^{(e)}} A_g^{(e)} \Phi_h = a dx dy (1-\varepsilon) \Phi_h. \quad (3.1.26)$$

Igualando as equações (3.1.24) e (3.1.25) e (3.1.26), de acordo com a proposição inicial de balanço de energia para o ar, tem-se

$$\varepsilon \rho_a dx dy \left[(Cp_a + Y Cp_v) \frac{dT_a}{dt} + Cp_v T_a \frac{dY}{dt} \right] = Cp_v \Phi_m a dx dy (1-\varepsilon) (T_g - T_a) + a dx dy (1-\varepsilon) \Phi_h$$

de onde

$$\frac{dT_a}{dt} + \frac{Cp_v T_a}{Cp_a + Y Cp_v} \frac{dY}{dt} = \frac{a(1-\varepsilon)}{\varepsilon \rho_a (Cp_a + Y Cp_v)} (\Phi_m Cp_v T_g + \Phi_h). \quad (3.1.27)$$

Considerando (3.1.21) tem-se

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{a(1-\varepsilon)}{\varepsilon \rho_a (Cp_a + Y Cp_v)} [\Phi_m Cp_v (T_g - T_a) + \Phi_h].$$

que para o problema unidimensional e leito fixo toma a forma

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + W_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{a(1-\varepsilon)}{\varepsilon \rho_a (Cp_a + Y Cp_v)} [\Phi_m Cp_v (T_g - T_a) + \Phi_h]. \quad (3.1.28)$$

3.1.3. Equação de conservação da massa de água nos grãos

A taxa de variação da massa de água no VC é zero, pois toda a água que sai dos grãos é recebida pelo ar.

A quantidade total da massa de água (m_w) no VC é

$$m_w = m_g M + m_a Y \quad (3.1.29)$$

onde M é o teor de umidade do grão em base seca.

A massa dos grãos secos (m_g) no volume de controle é

$$m_g = \rho_g V_g = \rho_g V(1-\varepsilon) = \rho_g (1-\varepsilon) dx dy \quad (3.1.30)$$

e a massa de ar seco no volume de controle é

$$m_a = \rho_a V_a = \rho_a V \varepsilon = \rho_a \varepsilon dx dy .$$

Então:

$$m_w = [\rho_g (1-\varepsilon) M + \rho_a \varepsilon Y] dx dy . \quad (3.1.31)$$

Considerando a hipótese inicial, de que a variação desta massa é igual a zero, tem-se

$$\rho_g (1-\varepsilon) \frac{dM}{dt} + \rho_a \varepsilon \frac{dY}{dt} = 0$$

Considerando (3.1.21) tem-se

$$\frac{dM}{dt} = - \frac{a \Phi_m}{\rho_g} \quad (3.1.32)$$

e usando a definição da derivada substantiva para o caso unidimensional, tem-se

$$\frac{\partial M}{\partial t} + W_g \frac{\partial M}{\partial z} = - \frac{a \Phi_m}{\rho_g} .$$

Para o secador de leito fixo ($W_g=0$), então

$$\frac{\partial M}{\partial t} = - \frac{a \Phi_m}{\rho_g} . \quad (3.1.33)$$

De outro modo, pode-se considerar que a variação da massa de água dos grãos é igual a massa de água que entra nos grãos através da superfície destes.

variação da massa de água dos grãos	=	massa de água que passa através da superfície dos grãos
-------------------------------------	---	---

A massa de água nos grãos é

$$m_{wg} = m_g M = V(1 - \varepsilon) \rho_g M = M(1 - \varepsilon) \rho_g dx dy$$

A taxa de variação da massa de água nos grãos é

$$\frac{d}{dt}(m_{wg}) = \frac{dM}{dt}(1 - \varepsilon) \rho_g dx dy. \quad (3.1.34)$$

A massa de água que sai dos grãos é

$$m_{wgs} = \Phi_m A_g = \Phi_m a(1 - \varepsilon) dx dy \quad (3.1.35)$$

Igualando as equações (3.1.34) e (3.1.35) de acordo com a hipótese no quadro, tem-se

$$\frac{dM}{dt}(1 - \varepsilon) \rho_g = \Phi_m a(1 - \varepsilon).$$

Fazendo as simplificações pertinentes obtém-se a mesma equação (3.1.32).

3.1.4. Equação de conservação da energia nos grãos

A variação da energia no VC ocorre devido a energia utilizada para vaporizar a água que sai dos grãos (-), a energia que entra nos grãos cedida pelo ar (+) e a energia que sai dos grãos com a massa de água na forma de vapor (-).

A entalpia do grão é a soma das entalpias da massa de grãos secos e da água presente nos grãos.

$$I_g = (Cp_g m_g + Cp_w m_w) T_g \quad (3.1.36)$$

A massa seca de grãos (m_g) é dada pela equação (3.1.30) e a massa de água presente nos grãos é

$$m_w = m_g M = M \rho_g (1 - \varepsilon) dx dy \quad (3.1.37)$$

Então

$$I_g = (Cp_g + M Cp_w)(1 - \varepsilon) \rho_g T_g dx dy. \quad (3.1.38)$$

A variação da entalpia em relação ao tempo é a derivada substantiva da equação (3.1.38), então

$$\frac{dI_g}{dt} = (1 - \varepsilon) \rho_g dx dy \left[(Cp_g + MCp_w) \frac{dT_g}{dt} + Cp_w T_g \frac{dM}{dt} \right] \quad (3.1.39)$$

Esta variação da entalpia é provocada pela vaporização da água que vai sair do grão em um intervalo de tempo dt ; pelo calor que entra nos grãos por convecção e pela perda da entalpia devido a saída de massa de água:

1) Energia usada na vaporização da água:

Sendo $m_w^{(v)}$ a massa de água que sai do grão na forma de vapor, por unidade de tempo, tem-se

$$m_w^{(v)} = n \Phi_m A_g^{(e)} = \Phi_m a (1 - \varepsilon) dx dy \quad (3.1.40)$$

O calor usado para evaporação dessa massa de água é

$$m_w^{(v)} H_v = \Phi_m a (1 - \varepsilon) dx dy H_v \quad (3.1.41)$$

2) Calor que entra nos grãos por unidade de tempo

3)

$$n_g A_g^{(e)} \Phi_h = \Phi_h a (1 - \varepsilon) dx dy \quad (3.1.42)$$

3) Energia que sai com a massa de água na forma de vapor por unidade de tempo

A entalpia da massa de água na forma de vapor é

$$Cp_v m_w^{(v)} T_g = Cp_v \Phi_m a (1 - \varepsilon) T_g dx dy \quad (3.1.43)$$

Igualando as equações (3.1.39), (3.1.41), (3.2.41) e (3.1.43) de acordo com o balanço de energia proposto tem-se

$$\begin{aligned} & \left[\frac{dT_g}{dt} (Cp_g + MCp_w) + Cp_w T_g \frac{dM}{dt} \right] \rho_g (1 - \varepsilon) dx dy = \\ & = -\Phi_m a (1 - \varepsilon) dx dy H_v + \Phi_h a (1 - \varepsilon) dx dy - \Phi_m Cp_v a (1 - \varepsilon) dx dy T_g \end{aligned}$$

ou

$$\frac{dT_g}{dt} + \frac{Cp_w T_g}{Cp_g + MCp_w} \frac{dM}{dt} = - \frac{a [\Phi_h + \Phi_m (H_v + Cp_v T_g)]}{\rho_g (Cp_g + MCp_w)} \quad (3.1.44)$$

Relembrando (3.1.32) tem-se:

$$\frac{dT_g}{dt} + \frac{Cp_w T_g}{Cp_g + MCp_w} \left(-\frac{a\Phi_m}{\rho_g} \right) = -\frac{a[\Phi_h + \Phi_m(H_v + Cp_v T_g)]}{\rho_g(Cp_g + MCp_w)}$$

ou

$$\frac{dT_g}{dt} = -\frac{a\{\Phi_h + \Phi_m[H_v + (Cp_v - Cp_w)T_g]\}}{\rho_g(Cp_g + MCp_w)}.$$

Usando a definição da derivada substantiva para o caso unidimensional tem-se

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} + W_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = -\frac{a\{\Phi_h + \Phi_m[H_v + (Cp_v - Cp_w)T_g]\}}{\rho_g(Cp_g + MCp_w)}.$$

Para o secador de leito fixo e leito fixo ($W_g=0$), então

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = -\frac{a\{\Phi_h + \Phi_m[H_v + (Cp_v - Cp_w)T_g]\}}{\rho_g(Cp_g + MCp_w)}. \quad (3.1.45)$$

Em resumo, as equações do modelo do secador de leito fixo, para 1-D são:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} &= -\frac{\Phi_m a}{\rho_g} \\ \frac{\partial T_g}{\partial t} &= -\frac{a\{\Phi_h + \Phi_m[H_v + (Cp_v - Cp_w)T_g]\}}{\rho_g(Cp_g + MCp_w)} \\ \frac{\partial Y}{\partial t} + W_a \frac{\partial Y}{\partial z} &= \frac{\Phi_m a(1-\varepsilon)}{\rho_a \varepsilon} \end{aligned} \quad (3.1.46)$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + W_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{a(1-\varepsilon)}{\varepsilon \rho_a (Cp_a + YCp_v)} [\Phi_m Cp_v (T_g - T_a) + \Phi_h]$$

com as condições iniciais:

$$M(0,z) = M_o ; T_g(0,z) = T_{amb} ; Y(0,z) = Y_{amb} ; T(0,z) = T_{amb}$$

e condições de contorno:

$$Y(t,0) = Y_o \text{ (teor de umidade do ar, aquecido na temperatura de secagem)}$$

$$T(t,0) = T_s \text{ (temperatura do ar na entrada do secador).}$$

3.2. Modelo matemático do processo de aeração de grãos

Como o processo de aeração ocorre com ar na temperatura ambiente (e a diferença entre a temperatura do ar e dos grãos é pequena), a influência da transferência de calor pode ser negligenciada. O sistema de equações que modela um escoamento incompressível de fluidos viscosos, desprezando as forças volumétricas, é constituído pela equação da continuidade e pela equação de conservação do momento linear (equação de Navier-Stokes).

$$\operatorname{div} \vec{W} = 0 \quad (3.2.1)$$

$$\rho \frac{D\vec{W}}{Dt} = -\operatorname{grad}P + \mu \nabla^2 \vec{W} \quad (3.2.2)$$

O escoamento do ar, nas diferentes regiões da massa de grãos em um silo, não é uniforme e ocorre com diferentes números de Reynolds, na faixa de transição (5 a 10^3). Assim, fica difícil modelar esse fenômeno usando as equações de Navier-Stokes. A alternativa proposta em Khatchaturian, 2000(b), consiste em utilizar um sistema de equações composto pela equação da continuidade (3.2.1) e uma equação vetorial que relaciona o vetor velocidade e o gradiente de pressão, negligenciando as forças volumétricas. Admitindo-se que a colinearidade dos vetores \vec{W} e $\operatorname{grad}P$ conservam-se para o regime de transição, pode-se escrever

$$\vec{W} = -\frac{K_o}{\mu} \cdot \operatorname{grad}P \quad (3.2.3)$$

A abordagem deste modelo consiste em simplificar o problema trocando a equação (3.2.2) pela equação (3.2.3) onde o coeficiente $K = K_o / \mu$ (coeficiente de permeabilidade), é uma função do número de Reynolds local, da porosidade local e do gradiente da pressão local. Além disso, K varia em cada ponto do domínio do escoamento onde estas grandezas não são uniformes. Para determinar estas dependências foram usadas as relações empíricas obtidas experimentalmente por Shedd, 1953, entre a vazão e a queda de pressão, escrita por Brooker, 1982, como

$$|\vec{W}| = A(|\operatorname{grad}P|)^B, \quad (3.2.4)$$

onde \vec{W} é o vetor velocidade do escoamento.

Usando as equações (3.2.3) e (3.2.4) em módulo e igualando-as, tem-se:

$$A(|gradP|)^B = K|grad P|. \quad (3.2.5)$$

Desta equação, chega-se em uma expressão para o coeficiente de permeabilidade.

$$K = A \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \right]^{(B-1)/2}. \quad (3.2.6)$$

Substituindo os componentes da velocidade escritos na forma

$$u = -K \frac{\partial P}{\partial x} \quad ; \quad v = -K \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3.2.7)$$

na equação da continuidade bi-dimensional, tem-se

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0. \quad (3.2.8)$$

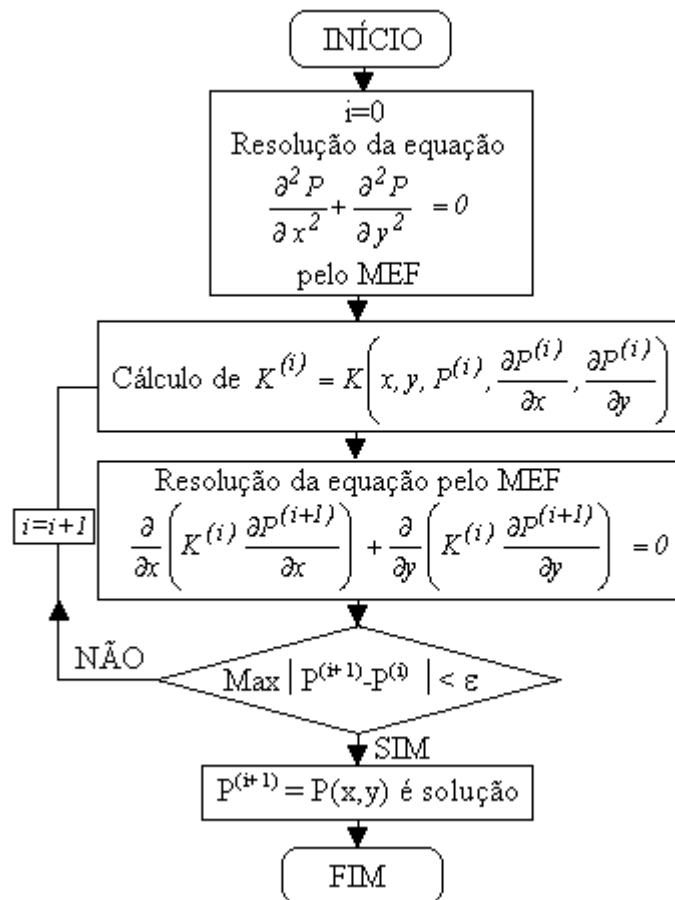
A equação (3.2.8) é uma equação não linear (quase harmônica) e modela a distribuição da pressão de um escoamento de ar em uma região plana, juntamente com as seguintes condições de contorno de Dirichlet

$$\begin{aligned} P &= P_o && \text{para as superfícies livres ;} \\ P &= P_e && \text{para as superfícies de entrada de ar.} \end{aligned}$$

e de Newmann

$$\vec{n} \cdot gradP = 0 \quad \text{para as superfícies limitadas por paredes.} \quad (3.2.9).$$

O coeficiente de permeabilidade K foi calculado iterativamente. A primeira aproximação é feita usando uma distribuição de P calculada pela equação de Laplace em cada nó da malha. As demais iterações usam a distribuição dos valores da função P da iteração imediatamente anterior. O processo iterativo termina quando o módulo máximo das diferenças entre os valores de P de uma iteração para outra for menor do que um ε determinado. Nesse caso, a última distribuição dos valores de P é assumida como a solução do problema. O fluxograma simplificado do algoritmo é apresentado abaixo.



4. MÉTODOS NUMÉRICOS DE SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EDPs

Para que o secador retire a água dos grãos até atingir o teor de umidade desejado, em um certo intervalo de tempo, é necessário que a velocidade de descida dos grãos seja controlada. Para isso, o processo de secagem deve ser calculado por um *software*, usando um modelo matemático, antes da secagem se efetivar. O cálculo é feito com informações fornecidas por sensores sobre o teor de umidade inicial dos grãos, temperatura inicial do ar de secagem e o teor de umidade inicial do ar. O resultado prático dos cálculos é a determinação da velocidade ideal de descida dos grãos em função do teor de umidade desejado. Esta velocidade é implantada através de um comando para o acionamento do mecanismo de regulagem das comportas na base do secador. Esse cálculo é repetido periodicamente durante toda a secagem, viabilizando a regulagem praticamente contínua do sistema. Por isso, é necessário que seja feito com rapidez e precisão. Dessa forma, a escolha do método numérico a ser utilizado para resolver o modelo de secagem é extremamente importante.

O modelo matemático para o problema de secagem estudado nesta tese, tal como foi formulado no Capítulo 3, foi considerado unidimensional. Para resolvê-lo foram utilizados dois métodos numéricos, com diferentes esquemas de interpolação: Método das Diferenças Finitas e o Método dos Volumes Finitos. Neste capítulo são apresentadas as formulações e em seguida são analisadas a convergência e a precisão desses métodos.

O modelo matemático do problema de aeração é bi-dimensional e o domínio de integração, para alguns tipos de silos, pode ser irregular. Por isso, para resolvê-lo foi utilizado o Método dos Elementos Finitos. Neste capítulo é apresentada a formulação desse método para o problema de aeração.

4.1. Métodos de solução do sistema de EDPs para o problema de secagem

4.1.1. Formulação para o Método das Diferenças Finitas

O sistema (hiperbólico) de equações diferenciais parciais não lineares (3.1.46) foi reescrito na forma matricial

$$\frac{\partial U}{\partial t} + C \frac{\partial U}{\partial z} = F(z, t, U) \quad (4.1.1)$$

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

Para resolução deste sistema, vários métodos numéricos foram analisados com o objetivo de escolher o de melhor desempenho. Dentre estes, os métodos de 2ª ordem de

MacCormack (explícito de dois passos) e o método de Crank-Nicolson (implícito) deram os melhores resultados. Admitiu-se que a satisfação das condições de consistência e estabilidade é suficiente para a convergência do método. Isto é, o Teorema de Lax, demonstrado para equações lineares, serve também para o caso considerado.

O método de MacCormack

O método de MacCormack, 1969, geralmente usado para resolver sistemas de EDPs não lineares, é uma variante do método de Lax-Wendroff com dois passos, foi escrito na forma Preditor/Corretor.

Preditor:

$$\overline{U}_j^{n+1} = U_j^n - C \frac{\Delta t}{\Delta z} (U_{j+1}^n - U_j^n) + \Delta t \cdot F_j^n \quad (4.1.2)$$

Aplicando-se o esquema de Euler melhorado, tem-se:

Corretor:

$$U_j^{n+1} = \frac{1}{2} \left[U_j^n + \overline{U}_j^{n+1} - C \frac{\Delta t}{\Delta z} (\overline{U}_j^{n+1} - \overline{U}_{j-1}^{n+1}) \right] + \Delta t \frac{F_j^{n+1}}{2} \quad (4.1.3)$$

A estabilidade desse método foi analisada através do método de Neumann, e é condicional, satisfeita para os valores do número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) $\delta = \frac{C \cdot \Delta t}{\Delta z}$ no intervalo $0 < \delta \leq 1$.

O erro de truncamento é de segunda ordem $O(\Delta z^2, \Delta t^2)$.

Método de Crank-Nicolson

Para reduzir as limitações na escolha do passo de integração foi aplicado o esquema implícito centrado por tempo (Método de Crank-Nicolson), na forma:

$$U_j^{n+1} - U_j^n + C \frac{\Delta t}{4\Delta z} (U_{j+1}^{n+1} + U_{j+1}^n - U_{j-1}^{n+1} - U_{j-1}^n) - \Delta t \cdot F_j^{n+1/2} = 0 \quad (4.1.4)$$

ou na forma matricial

$$T \cdot U^{n+1} = H \cdot U^n + g. \quad (4.1.5)$$

onde T , H e g são matrizes.

O esquema é absolutamente estável, mas para cada passo de tempo é necessário resolver o sistema de equações algébricas lineares com a matriz tridiagonal T . Para análise da estabilidade com influência das condições de fronteira, o sistema de equações em diferenças finitas foi transformado para a forma matricial

$$U^{n+1} = B \cdot U^n + d \quad (4.1.6)$$

onde B é um operador do passo temporal (matriz de transição). Para as condições iniciais foi demonstrado que $|\lambda(B)| < 1$, isto é, todos os módulos dos autovalores da matriz B são menores do que 1. Essa é a condição necessária e suficiente para que o processo iterativo (4.1.6) seja convergente.

A matriz tridiagonal T depende só do número CFL. Por isso para resolução do sistema (4.1.5) foi aplicada a decomposição L - U da matriz T , a qual serviu até o momento de alteração do passo temporal (ou espacial).

4.1.2. Comparação do valor das derivadas temporais e espaciais nas equações da umidade e temperatura do ar

Mesmo que os métodos implícitos (Crank-Nicolson) permitiram reduzir significativamente o tempo de cálculo em comparação com os métodos explícitos, este tempo continuava bastante elevado. Para resolver este problema foi feita uma simplificação do modelo matemático para certas condições iniciais. A comparação dos valores das derivadas espacial e temporal nas equações do teor de umidade e da temperatura do ar mostrou que as derivadas temporais são bem menores do que as derivadas espaciais, para todo tempo de secagem, (Fig. 4.1.1) e podem ser desprezadas nas equações (3.1.21) e (3.1.28).

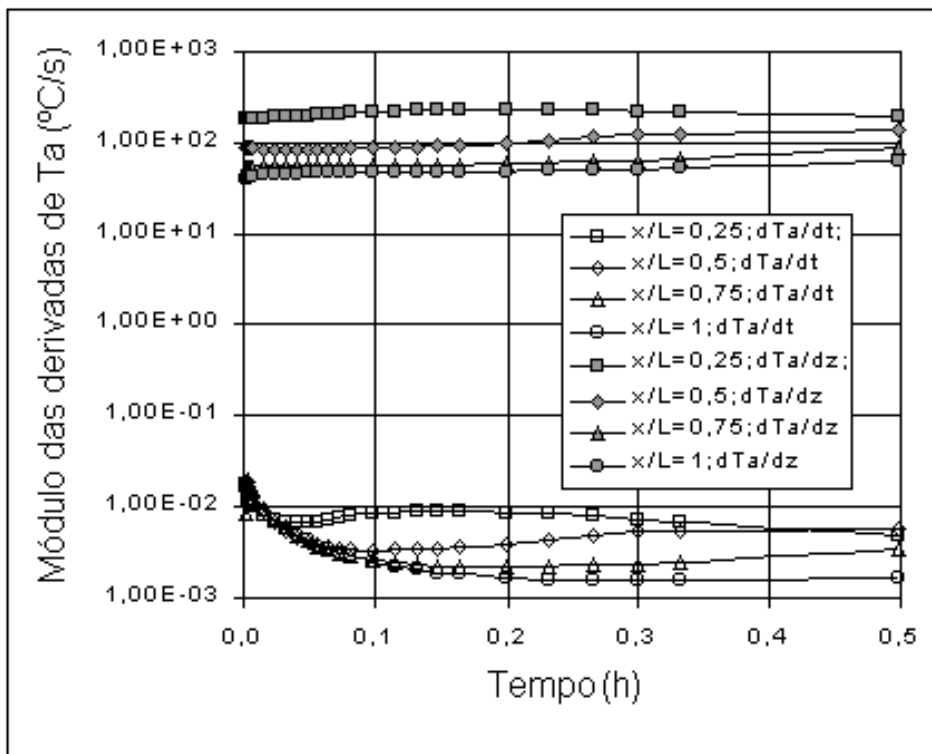


Figura 4.1.1. Comparação de derivadas temporais e espaciais para temperatura do ar durante de tempo de secagem.

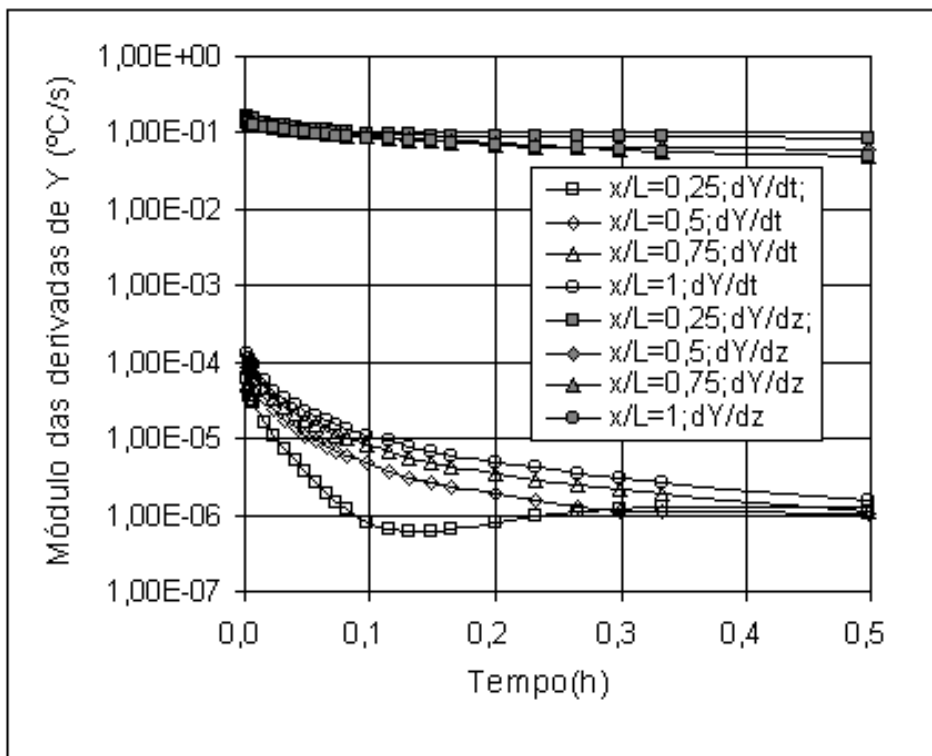


Figura 4.1.2. Comparação de derivadas temporais e espaciais para teor de umidade do ar durante de tempo de secagem.

4.1.3. Formulação para o Método dos Volumes Finitos

Para resolver o sistema (hiperbólico) de equações diferenciais parciais do modelo de secagem simplificado (sem as derivadas temporais das equações da umidade e temperatura do ar) usando o Método dos Volumes Finitos, cada equação foi integrada em relação ao tempo e ao espaço, e expressa na forma discreta, mediante as seguintes considerações:

1. O domínio de integração foi dividido em células unidimensionais de comprimento Δz , como indica a Fig.4.1.3.
2. As grandezas a , L_v , C_{pg} , C_{pw} , C_{pa} , ρ_g e ε foram consideradas constantes $\forall z \in (0,L)$ e $t \in (0,\infty)$ e não foram atualizados a cada iteração.

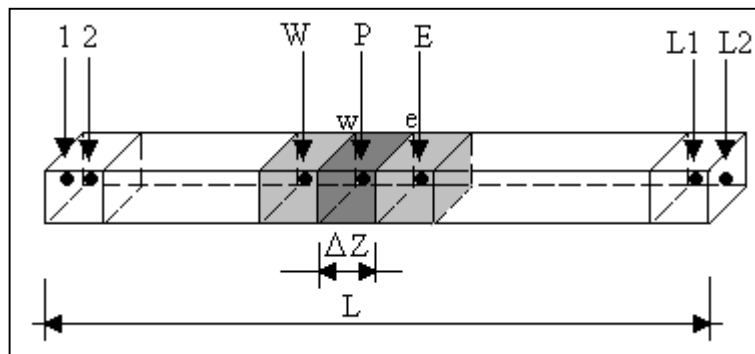


Figura 4.1.3 – Esquema geral do Método dos Volumes Finitos

3. Os fluxos de massa (Φ_m) e calor (Φ_h) e a massa específica do ar (ρ_a) são constantes para cada célula e calculados aplicando os valores de M , T_g , Y e T_a do passo espacial anterior. Nas equações do grão os fluxos são calculados com valores das variáveis da iteração temporal anterior, da célula correspondente (Ψ_P^o). Nas equações do ar, são calculados com valores das variáveis da iteração temporal presente e da célula anterior (Ψ_W^I).

As integrações foram feitas considerando as seguintes aproximações:

$$\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial \Psi}{\partial t} dt = \Psi_P^I - \Psi_P^o \quad (4.1.7)$$

$$\int_w^e \Psi dz = \Psi z|_w^e \approx \Psi_*^I \Delta z \quad (4.1.8)$$

$$\int_w^e \frac{\partial \Psi}{\partial z} dz \approx \Psi_e^l - \Psi_w^l \approx \Psi_P^l - \Psi_W^l \quad (4.1.9)$$

onde o sub-índice indica a posição espacial, o super-índice indica a posição temporal e (*) é a posição espacial, que depende do esquema de interpolação escolhido.

Equação da conservação da água do grão

Integrando a equação do teor de umidade do grão em relação a t e a z , tem-se:

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial M}{\partial t} dt dz = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e -\frac{\Phi_m \cdot a}{\rho_g} dz dt .$$

Usando as aproximações (4.1.7) e (4.1.8) obtém-se a equação da conservação da água do grão discretizada:

$$M_P^l = -\frac{\Phi_{mP}^o \cdot a}{\rho_g} \Delta t + M_P^o . \quad (4.1.10)$$

Para aplicar o teorema do valor médio foram usados os valores de Φ_{mP}^o e Φ_{hP}^o .

Equação da conservação da energia do Grão

Na integração da equação da temperatura do grão, o teor de umidade do grão (M) é considerado constante e assume o valor atualizado da iteração temporal anterior.

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T_g}{\partial t} dt dz = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{-a \{ \Phi_h + \Phi_m [H_v + (C_{pv} - C_{pw}) T_{gP}^l] \}}{\rho_g (C_{pg} + M_P^o C_{pw})} dz dt .$$

Usando as aproximações (4.1.7) e (4.1.8) obtém-se a equação de T_g discretizada.

$$T_{gP}^l \left[1 + \frac{a \Phi_m (C_{pv} - C_{pw}) \Delta t}{\rho_g (C_{pg} + M_P^o C_{pw})} \right] = \frac{-a \Delta t}{\rho_g (C_{pg} + M_P^o C_{pw})} (\Phi_h + \Phi_m H_v) + T_{gP}^o \quad (4.1.11)$$

Equação de conservação da umidade do ar

Integrando a equação do teor de umidade do ar

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial Y}{\partial z} dz = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \left(\frac{\Phi_m \cdot a(1-\varepsilon)}{W_a \rho_a \varepsilon} \right) dz dt$$

e usando as aproximações (4.1.9) obtém-se a equação de Y discretizada.

$$Y_P^I = \frac{a(1-\varepsilon)\Phi_m}{W_a \rho_a \varepsilon} \Delta z + Y_W^I \quad (4.1.12)$$

Equação de conservação da energia do ar

As variáveis T_g e Y são consideradas constantes na integração da equação da temperatura do ar e assumem o valor atualizado da presente iteração temporal.

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T_a}{\partial z} dt dz = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \left(\frac{a(1-\varepsilon)\Phi_m \cdot C_{pv}(T_g^I - T_a) + \Phi_h}{W_a \varepsilon \rho_a (C_{pa} + Y_P^I C_{pv})} \right) dz dt$$

Usando as aproximações (4.1.8) e (4.1.9) com (*) = W , para integrar T_a e T_g no lado direito, obtém-se:

$$T_{aP}^I = C\Phi_m \cdot C_{pv}\Delta z T_{gW}^I + (1 - C\Phi_m \cdot C_{pv}\Delta z) T_{aW}^I + C\Phi_h \Delta z. \quad (4.1.13)$$

Usando as aproximações (4.1.8) e (4.1.9) com (*) = P , para integrar T_a e T_g no lado direito, obtém-se:

$$(1 + C\Phi_m \cdot C_{pv}\Delta z) T_{aP}^I = T_{aW}^I + C \left(\Phi_m \cdot C_{pv} T_{gP}^I + \Phi_h \right) \Delta z, \quad (4.1.14)$$

$$\text{onde } C = \frac{a(1-\varepsilon)}{W_a \varepsilon \rho_a (C_{pa} + Y_P^I C_{pv})}$$

Usando as equações (4.1.10 a 4.1.14) pode-se determinar os coeficientes da equação geral do Método dos Volumes Finitos (MVF) na forma

$$A_P \Psi_P = A_W \Psi_W + A_E \Psi_E + b \quad (4.1.15)$$

mostrados na Tabela. 1, para os esquemas de interpolação utilizados.

Tabela 4.1.1 - Coeficientes da equação geral para volumes finitos.

MÉTODO PSEUDO-IMPLÍCITO (com (*) = W)				
EQ	A _P	A _W	A _E	b
M	1	0	0	$-\frac{\Phi_m \cdot a}{\rho_g} \Delta t + M_P^o$
T _g	$1 + \frac{a \Phi_m (C_{pv} - C_{pw}) \Delta t}{\rho_g (C_{pg} + M_P^o C_{pw})}$	0	0	$\frac{-a \Delta t}{\rho_g (C_{pg} + M_P^o C_{pw})} (\Phi_h + \Phi_m H_v) + T_{gP}^o$
Y	1	1	0	$\frac{\Phi_m \cdot a(1-\varepsilon)}{W_a \rho_a \varepsilon} \Delta z$
T _a	1	$1 - C \Phi_m \cdot C_{pv} \Delta z$	0	$C [\Phi_m \cdot C_{pv} T_{gW}^I + \Phi_h] \Delta z$
MÉTODO PSEUDO-IMPLÍCITO (com (*) = P)				
T _a	$1 + C \Phi_m \cdot C_{pv} \Delta z$	1	0	$C [\Phi_m \cdot C_{pv} T_{gP}^I + \Phi_h] \Delta z$

4.1.4. Análise dos resultados: Comparação entre os métodos numéricos

Os cálculos realizados mostraram que a diferença entre os resultados obtidos pelos métodos de MacCormac e Crank-Nicolson é desprezível. A Fig.4.1.4 apresenta uma parte das curvas de secagem calculadas por estes métodos, em um intervalo do tempo escolhido, onde ocorreu a maior diferença entre os métodos comparados.

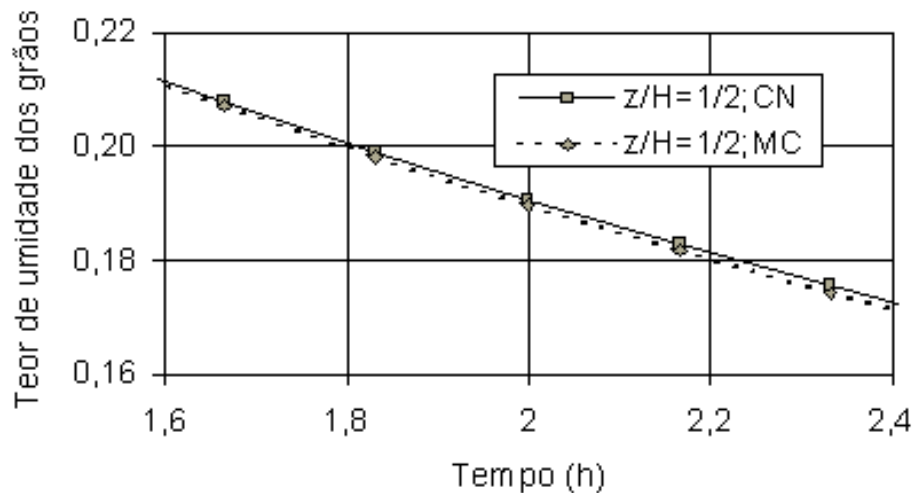


Figura 4.1.4 - Comparação de métodos numéricos aplicados.

Mesmo com a realização em cada passo temporal das substituições progressivas e inversas no método L-U o método de Crank-Nicolson ficou muito mais vantajoso pois permitiu aumentar o número de CFL (isto é, o passo temporal que é a variável de marcha) e conseqüentemente, reduzir o tempo de cálculo significativamente. Por isso todas as simulações neste trabalho, foram feitas aplicando o método de Crank-Nicolson.

Apesar da estabilidade absoluta do método de Crank-Nicolson demonstrada pelos métodos de Neumann e matricial (que apresentam as condições necessárias de estabilidade), o número CFL não pode ultrapassar o valor próximo de 3, pois surgem oscilações numéricas.

Para comparar os resultados dos Métodos de Diferenças Finitas com o de Volumes Finitos, os programas foram executados para as seguintes condições iniciais e de contorno:

$$X = 0,32 ; T_g = 25^{\circ}\text{C} ; Y = 0,0007 \text{ e } T_a = 25^{\circ}\text{C} \text{ para } t = 0 \text{ e } 0 \leq z \leq L \text{ e}$$

$$Y = 0,007 \text{ e } T_a = 50^{\circ}\text{C} \text{ para } t > 0 \text{ e } z = 0 .$$

A Fig. 4.1.5 mostra a comparação entre os métodos citados, para $t = 3h$. A mesma coincidência foi observada com relação à temperatura do grão, umidade e temperatura do ar. Os tempos de execução computacional foram de 2,5 a 11s, para domínios de 9 a 110 células respectivamente e foram praticamente iguais para os dois métodos.

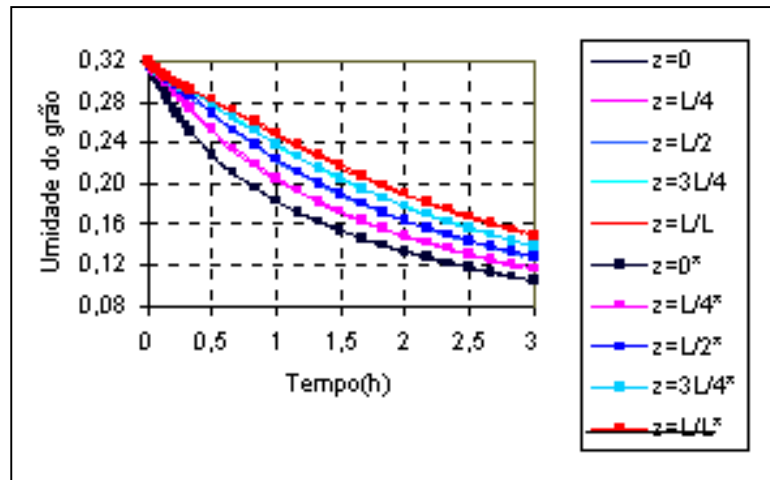


Figura 4.1.5 – Comparação entre Diferenças Finitas (*) e Volumes Finitos (—).

4.2. Método de solução para o problema de aeração

4.2.1. Formulação para o Método dos Elementos Finitos

Para resolver o problema da aeração foi utilizado o Método dos Elementos Finitos, por ser mais adequado a problemas com geometria não regular do domínio de integração. Este problema (equações 3.2.8 e condições de contorno 3.2.9) é equivalente ao problema de minimização de um funcional.

Consideremos um funcional com dois argumentos:

$$\Phi[z(x, y)] = \iiint_v F(x, y, z, z_x, z_y) dV; \quad (4.2.1)$$

onde

$$z_x = \frac{\partial z}{\partial x}; \quad (4.2.2)$$

$$z_y = \frac{\partial z}{\partial y}$$

É conhecido do cálculo variacional que o desvio infinitesimal de $F(x, y, z, z_x, z_y)$ corresponde à variação do funcional:

$$\delta\Phi = \iiint_v \left(\frac{\delta F}{\delta z} \delta z + \frac{\delta F}{\delta z_x} \delta z_x + \frac{\delta F}{\delta z_y} \delta z_y \right) dV; \quad (4.2.3)$$

então

$$\delta\Phi = \iiint_v \left[\frac{\partial F}{\partial z} \delta z + \frac{\partial F}{\partial z_x} \frac{\partial}{\partial x} (\delta z) + \frac{\partial F}{\partial z_y} \frac{\partial}{\partial y} (\delta z) \right] dV. \quad (4.2.4)$$

Usando a identidade (derivação por partes)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial z_x} \cdot \delta z \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial z_x} \right) \delta z + \frac{\partial F}{\partial z_x} \frac{\partial}{\partial x} \delta z \quad (4.2.5)$$

e aplicando a equação de Ostrogradski-Gauss:

$$\iiint_v \operatorname{div} \bar{w} \, dv = \iint_s \bar{n} \cdot \bar{w} \, ds \quad (4.2.6)$$

para a integral do lado esquerdo da equação (4.2.5), na direção OX, tem-se:

$$\iiint_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial z_x} \cdot \delta z \right) dV = \iint_s \cos \alpha \frac{\partial F}{\partial z_x} \cdot \delta z \cdot dS \quad (4.2.7)$$

onde $\cos \alpha$ é a componente do vetor unitário ortogonal à superfície e

α é o ângulo formado entre a normal da superfície e o eixo x.

Substituindo a equação (4.2.5) em (4.2.7) e re-agrupando os termos, tem-se a seguinte equação (integração por partes para integrais múltiplas):

$$\iiint_v \frac{\partial F}{\partial z_x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\delta z) dV = \iint_s \cos \alpha \frac{\partial F}{\partial z_x} \cdot \delta z ds - \iiint_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial z_x} \right) \cdot \delta z dV \quad (4.2.8)$$

Analogamente, para a direção OY, tem-se

$$\iiint_v \frac{\partial F}{\partial z_y} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (\delta z) dV = \iint_s \cos \beta \frac{\partial F}{\partial z_y} \cdot \delta z ds - \iiint_v \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial F}{\partial z_y} \right) \delta z dV \quad (4.2.9)$$

Substituindo (4.2.8) e (4.2.9) em (4.2.4), tem-se:

$$\begin{aligned} \delta \Phi = & \iiint_v \left[\frac{\partial F}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial z_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial F}{\partial z_y} \right) \right] \delta z dV + \\ & + \iint_s \left[\cos \alpha \frac{\partial F}{\partial z_x} + \cos \beta \frac{\partial F}{\partial z_y} \right] \delta z dV \end{aligned} \quad (4.2.10)$$

O valor estacionário do funcional pode ser atingido somente quando as funções sob as integrais na equação (4.2.10) são iguais a zero, então:

$$\frac{\partial F}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial z_x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial F}{\partial z_y} \right) = 0 \quad (4.2.11)$$

$$\cos \alpha \frac{\partial F}{\partial z_x} + \cos \beta \frac{\partial F}{\partial z_y} = 0 \quad (4.2.12)$$

A equação (4.2.11) chama-se equação de Ostrogradsky para o funcional (4.2.1) e junto com as condições de fronteira (4.2.12) determinam os extremais que podem minimizar o funcional (4.2.1).

Escolhendo a função $F(x, y, z, z_x, z_y)$ na forma:

$$F(x, y, z, z_x, z_y) = \frac{I}{2} \left[K_{xx} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (4.2.13)$$

as equações (4.2.11) e (4.2.12) tomam as seguintes formas:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial z}{\partial y} \right) = 0$$

$$\cos \alpha K_{xx} \frac{\partial z}{\partial x} + \cos \beta K_{yy} \frac{\partial z}{\partial y} = 0$$

ou para $K_{xx} = K_{yy}$, (pois trata-se de um caso isotrópico) tem-se

$$\cos \alpha \frac{\partial z}{\partial x} + \cos \beta \frac{\partial z}{\partial y} = 0 \quad (4.2.16)$$

Substituindo z por p , temos o problema dado em (3.2.8 e 3.2.9). Então, a equação (4.2.14) com as condições (4.2.15) é a equação de Ostrogradsky para o funcional:

$$\Phi = [P(x,y)] = \iiint_V \left[K_{xx} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \right] dV \quad (4.2.17)$$

A função que minimiza este funcional é um extremal e tem que satisfazer ao problema dado em (3.2.8 e 3.2.9). Por isso, em vez de achar diretamente a solução de (3.2.8 e 3.2.9) encontraremos uma função aproximada que minimiza o funcional (4.2.17) e consideraremos como a solução de (3.2.8 e 3.2.9).

4.2.2. Equações do Método dos Elementos Finitos

O campo de integração (secção transversal do silo estudado) é dividido em vários elementos triangulares, cujos vértices i, j, k são chamados de nós. Consideram-se os valores da pressão nos nós de P_i, P_j, P_k conhecidos e escolhe-se uma função linear para a aproximação dos valores da pressão nos pontos internos de cada elemento, o qual é chamado de elemento simples.

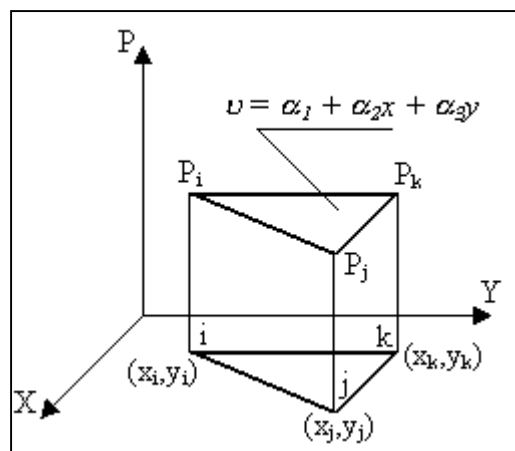


Figura 4.2.1 - Elemento simples bidimensional.

Então:

$$P = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y = (1 \ x \ y) \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} \quad (4.2.18)$$

Para os valores nos nós, tem-se:

$$\begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = [C] \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} \quad (4.2.19)$$

de onde

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = [C]^{-1} \begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{pmatrix} \quad (4.2.20)$$

Substituindo (4.2.20) em (4.2.18), tem-se:

$$P = (1 \ x \ y) [C]^{-1} \begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{pmatrix} = \frac{1}{\det C} (1 \ x \ y) \begin{pmatrix} C_{11} & C_{21} & C_{31} \\ C_{12} & C_{22} & C_{32} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{pmatrix} \quad (4.2.21)$$

ou

$$P = N_i P_i + N_j P_j + N_k P_k = [N] \{P\} \quad (4.2.22)$$

onde N_i , N_j e N_k são as funções de forma que coincidem com as coordenadas naturais do triângulo $L = (L_1 \ L_2 \ L_3)$ e C_{ij} é o cofator do elemento (c_{ij}) da matriz C .

Foi denotado

$$[N] = (N_i \ N_j \ N_k) \quad e \quad (4.2.23)$$

$$\{P\} = \begin{pmatrix} P_i \\ P_j \\ P_k \end{pmatrix}. \quad (4.2.24)$$

Derivando (4.2.22), tem-se:

$$\{g\} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \end{pmatrix} = [B] \{P\} \quad (4.2.25)$$

onde

$$[B] = \frac{1}{\det C} \begin{pmatrix} C_{12} & C_{22} & C_{32} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{pmatrix} \quad (4.2.26)$$

Denotando $[D] = \begin{pmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{pmatrix}$ e aplicando a propriedade aditiva das integrais transforma-se o funcional (4.2.17) em:

$$\Phi[P(x,y)] = \iiint_v \frac{1}{2} \left[K_{xx} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right)^2 \right] dV = \sum_{e=1}^E \iiint_{v_e} \frac{1}{2} \{g^{(e)}\}^T [D^{(e)}] \{g^{(e)}\} dV = \quad (4.2.27)$$

$$= \sum_{e=1}^E \iiint_{v_e} \frac{1}{2} \{P^{(e)}\}^T [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] \{P^{(e)}\} dV \quad (4.2.28)$$

onde “e” é o índice do elemento finito (triângulo)

“E” é o número total de elementos.

A função a integrar não depende das coordenadas x e y para a divisão do domínio de integração escolhido. Realmente, $\{P^{(e)}\}$ é determinado pelos valores nos NÓS que são considerados constantes; $[B^{(e)}]$ é a matriz que se determina pelas coordenadas dos vértices do elemento “e”. A matriz $[D^{(e)}]$ é constante para o elemento dado.

Por isso, tem-se:

$$\Phi [P(x, y)] = \sum_{e=1}^E \frac{1}{2} \{P^{(e)}\}^T [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] \{P^{(e)}\} \iiint_{v_e} dV \quad (4.2.29)$$

Considerando a espessura do corpo estudado em direção normal ao domínio de integração igual a 1, tem-se:

$$\iiint_{v_e} dV = V^{(e)} = A^{(e)}.1 = A^{(e)} \quad (4.2.30)$$

onde $A^{(e)}$ é a área do elemento finito “e”.

A área de um triângulo é dada por:

$$A^{(e)} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i^{(e)} & y_i^{(e)} \\ 1 & x_j^{(e)} & y_j^{(e)} \\ 1 & x_k^{(e)} & y_k^{(e)} \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \det C \quad (4.2.31)$$

onde $(x_i^{(e)} \ y_i^{(e)})$, $(x_j^{(e)} \ y_j^{(e)})$, $(x_k^{(e)} \ y_k^{(e)})$ são as coordenadas dos vértices do elemento “e”.

Então, (4.2.29) pode ser reescrita na forma:

$$\Phi[P(x, y)] = \frac{1}{4} \sum_{e=1}^E \det C^{(e)} \{P^{(e)}\}^T [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] \{P^{(e)}\} \quad (4.2.32)$$

A função (4.2.32) se apresenta como uma função de várias variáveis P_u ($u = 1, 2, 3, \dots, n$), onde n é o número de nós.

Para minimizar esta função, deriva-se a função (4.2.32) em relação de P_u e chega-se a um sistema de equações lineares:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial P_1} = 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial P_2} = 0 \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial \Phi}{\partial P_n} = 0 \end{cases} \quad (4.2.33)$$

Para derivar os produtos matriciais:

$$\{P\}^T [G] \{P\} \quad (4.2.34)$$

onde $[G]$ é a matriz simétrica, usa-se a seguinte relação:

$$\frac{\partial (\{P\}^T [G] \{P\})}{\partial \{P\}} = 2[G] \{P\} \quad (4.2.35)$$

Se a matriz $[D^{(e)}]$ na equação (4.2.32) for simétrica, então, a matriz-produto:

$$[G] = [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}]$$

é simétrica também, visto que

$$\begin{aligned} [G]^T &= \left([B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] \right)^T = [B^{(e)}]^T [D^{(e)}]^T [B^{(e)}] = \\ &= [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] = [G]. \end{aligned}$$

Então, derivando (4.2.32) chega-se à seguinte relação:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \{P^{(e)}\}} = \sum_{e=1}^E \frac{\det C^{(e)}}{2} \cdot [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] \{P^{(e)}\} = 0 \quad (4.2.36)$$

ou

$$\sum_{e=1}^E \frac{1}{2 \det C^{(e)}} \left(\begin{bmatrix} C_{12} & C_{22} & C_{32} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{12} & C_{22} & C_{32} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{bmatrix} \right)^{(e)} \{P^{(e)}\} = 0 \quad (4.2.37)$$

O sistema (4.2.37) pode ser escrito na seguinte forma:

$$[K]\{P\} = 0 \quad (4.2.38)$$

onde

$[K]$ é a matriz de rigidez

$\{P\}$ é o vetor das incógnitas.

O determinante da matriz $[K]$ é sempre diferente de zero. Para obter a solução não trivial, é preciso transformar o sistema, escolhendo os valores de P_u nas fronteiras S_1 e S_2 . Por exemplo, para S_1 (superfície livre dos grãos) todos os valores de P_u são iguais a zero. Para a entrada do ar com pressão máxima, os valores de P_u são iguais a 1 .

6. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são mostradas as simulações numéricas do processo de secagem comparativamente aos resultados experimentais. Tanto para camada fina como para leito profundo, os experimentos têm a função de verificação do modelo. Ou seja, os experimentos servem como uma referência para analisar os dados obtidos numericamente, mas ainda nesta etapa não alimentam o modelo com informações.

As simulações numéricas sobre o problema de secagem foram feitas usando o Método das Diferenças Finitas, com o esquema de Crank-Nicolson para o modelo completo e com o esquema de Euler para o modelo simplificado (com o negligenciamento da influência das derivadas temporais nas equações da umidade e temperatura do ar). São também apresentadas algumas simulações numéricas variando a temperatura e a velocidade de secagem.

Para o problema de aeração são apresentados dados experimentais sobre a resistência oferecida à passagem de ar pela massa de grãos. As simulações numéricas foram feitas variando a umidade dos grãos e considerando diferentes geometrias dos silos, número e posições das entradas de ar. Também é mostrado um estudo sobre a validação do algoritmo utilizado, comparando seus resultados com uma solução analítica conhecida para um caso hipotético.

6.1. Problema de secagem

As simulações numéricas foram feitas usando os valores abaixo relacionados para as constantes envolvidas no modelo:

- $a = 800 \text{ m}^{-1}$ razão entre a área superficial e o volume do grão
- $C_{pv} = 1864,7 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ calor específico a pressão constante do vapor de água
- $C_{pa} = 1005,7 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ calor específico a pressão constante do ar atmosférico
- $C_{pg} = 1122 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ calor específico a pressão constante do grão de soja
- $C_{pw} = 4178 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ calor específico a pressão constante da água
- $H_v = 2,357 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ calor latente de vaporização da água
- $P_{sat} = 4828$ pressão por profundidade do leito de grãos
- $\varepsilon = 0,45$ porosidade
- $\rho_a = 1,1624 \text{ kg m}^{-3}$ massa específica do ar à 300 K
- $\rho_g = 1350 \text{ kg m}^{-3}$ massa específica do grão de soja

6.1.1. Verificação do modelo para dados de camada fina

Os resultados dos experimentos de camada fina para o intervalo de temperatura de 60 a 110°C e velocidade do ar igual a $0,9\text{ m s}^{-1}$ são apresentados na Fig. 6.1.1, juntamente com os dados de Soares, 1986. Comparando os dados para a temperatura de 60°C pode-se concluir que existe uma concordância razoável entre os dados experimentais desta tese e os dados do referido pesquisador.

Nas Figuras 6.1.2 a 6.1.4 são apresentados os dados experimentais desta tese para o intervalo de temperatura de 60 a 110°C e velocidade do ar igual a $0,5$ e 3 m s^{-1} , juntamente com os resultados da aplicação do programa computacional, com base no modelo e métodos numéricos apresentados nos Capítulos 3 e 4 desta tese, respectivamente.

Pode-se observar que o modelo desenvolvido para o cálculo da dinâmica de secagem em camada fina descreve bem a influência da temperatura. As discordâncias mais significativas ocorrem somente para temperaturas elevadas ($\sim 110^{\circ}\text{C}$) depois de um tempo grande de secagem. Para secadores reais este tempo de secagem já não apresenta interesse, pois o grão perderia qualidade se ficasse exposto tanto tempo a tais temperaturas tão altas.

Ao mesmo tempo, a influência da velocidade do ar sobre a dinâmica de secagem ficou mais fraca do que o esperado. As simulações feitas (curva nas Figuras 6.1.2 a 6.1.4) apresentam uma variação maior das curvas de secagem para a faixa de variação da velocidade estudada ($0,5$ a 3 s^{-1}) do que apresentam os dados experimentais (pontos nas mesmas figuras). Em outras palavras, o distanciamento maior entre as curvas simuladas em relação aos pontos experimentais para cada velocidade, indica que o modelo superestima a influência da velocidade do ar na secagem, comparativamente aos dados experimentais. Provavelmente, a redução da influência da velocidade do ar sobre a dinâmica de secagem está sendo provocada pela limitação da migração da água de dentro do grão para a superfície, nas condições de velocidades elevadas. Pode-se imaginar que a partir de uma velocidade suficientemente alta esta influência desaparecerá completamente e o processo da secagem nestas condições vai depender somente do transporte da água no interior do grão. Para ajustar o modelo seria necessário mudar o índice (0,5) da raiz da razão das velocidades proposto no Capítulo 3, nas equações do fluxo de massa e calor. No entanto, considerando a análise feita para a escolha deste índice e que as diferenças com os dados experimentais não são muito grandes, optou-se por manter a raiz quadrada da razão das velocidades.

É esperado que para diferentes velocidades e para uma mesma temperatura, as curvas do teor de umidade partissem do mesmo ponto, se separassem no decorrer do tempo mostrando a

influência da velocidade do ar e tendessem para o mesmo teor de umidade de equilíbrio (M_e), a partir de um certo tempo. As simulações numéricas apresentam esse comportamento. Para a secagem em 60 e 80°C a tendência para o M_e ainda não ocorre em 3h . Porém, na secagem a 110°C o fenômeno é facilmente identificado (Fig. 6.1.4).

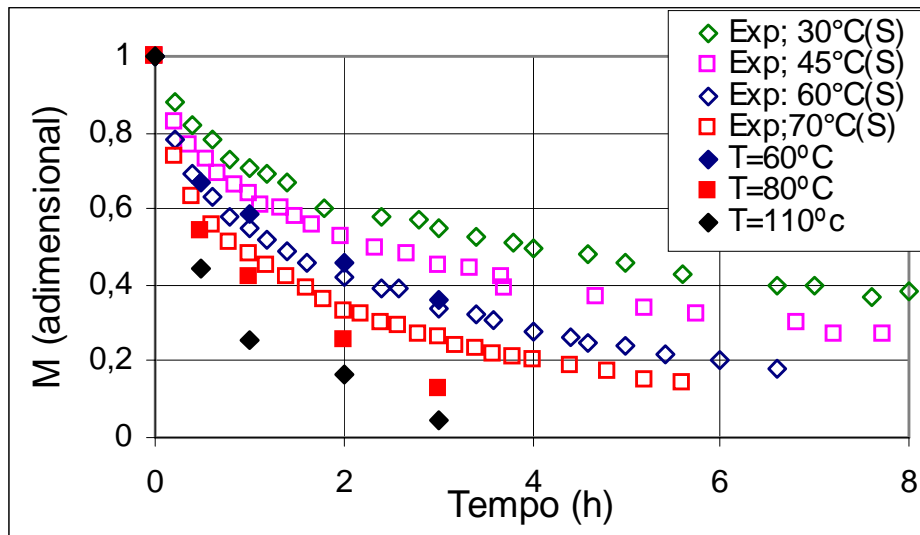


Figura 6.1.1 –Dados experimentais de camada fina de Soares, 1986 (pontos vazios) e os dados obtidos com experimentos próprios (pontos cheios).

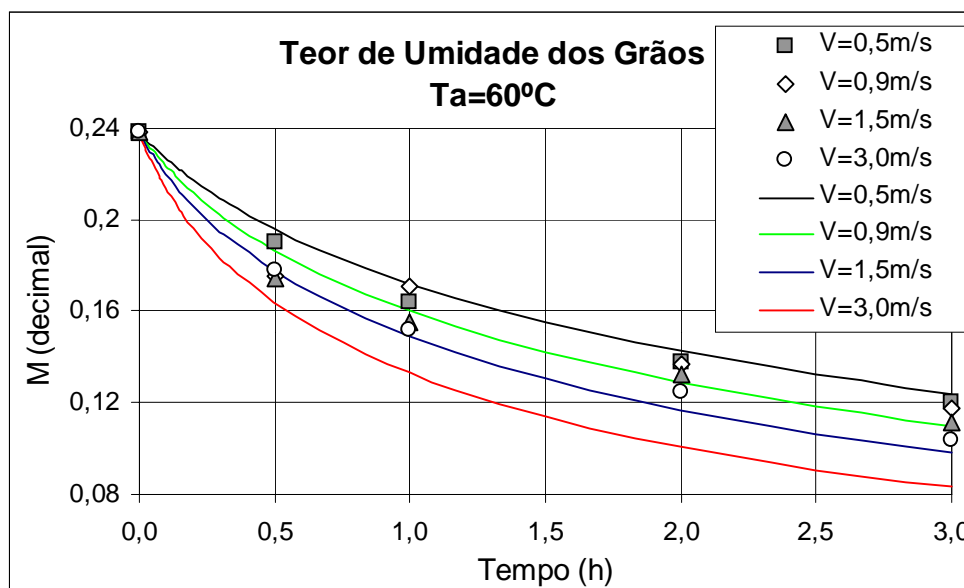


Figura 6.1.2 – Comparação entre os dados experimentais de camada fina (pontos) e simulações com o modelo matemático (curvas).

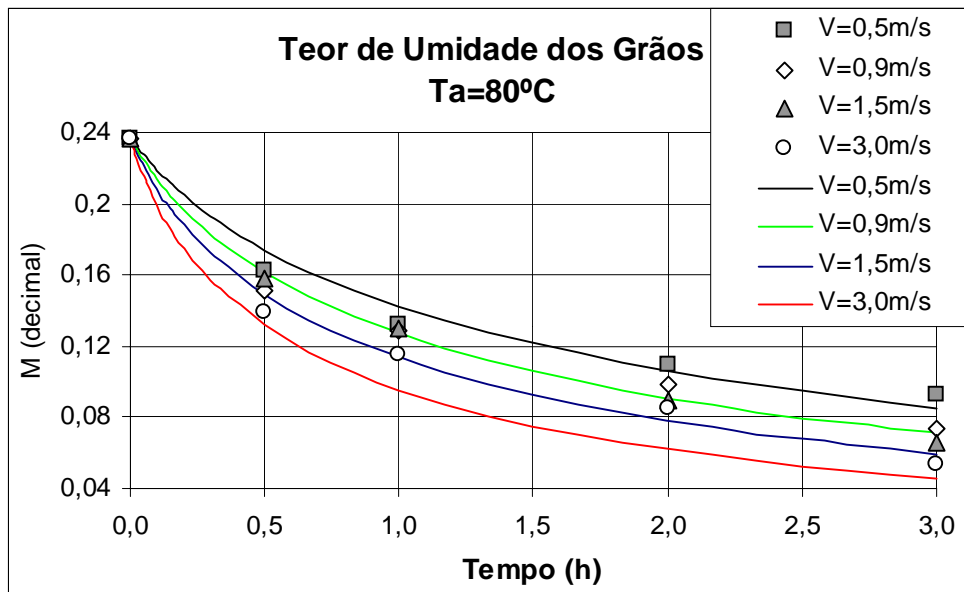


Figura 6.1.3 – Comparação entre os dados experimentais de camada fina (pontos) e simulações com o modelo matemático (curvas).

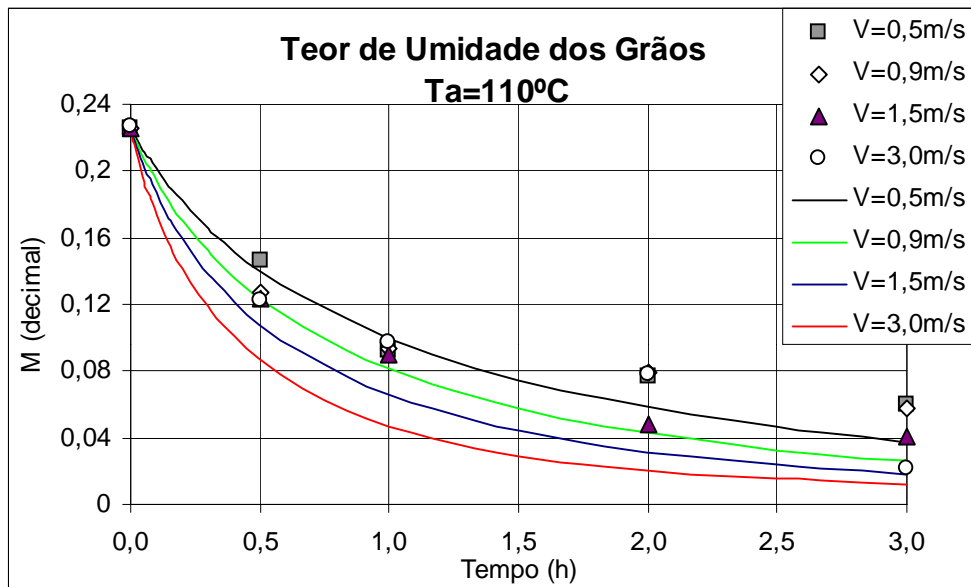


Figura 6.1.4 – Comparação entre os dados experimentais de camada fina (pontos) e simulações com o modelo matemático (curvas).

6.1.2. Comparação entre os resultados experimentais e simulados para o problema de secagem em leito profundo

Os experimentos sobre a dinâmica de secagem em leito profundo foram realizados para dois valores de temperatura do ar (50 e 70°C) e para duas velocidades do escoamento do ar ($1,25$ e $2,5\text{ m s}^{-1}$). Depois do aquecimento dos grãos pelo ar quente durante o tempo escolhido (processo de secagem), os grãos foram expostos ao ar frio (processo de resfriamento). Paralelamente foi executado o programa computacional para as condições físicas dos experimentos realizados para comparar os resultados calculados e medidos. Na Figura 6.1.5 são apresentadas as curvas simuladas e experimentais da dinâmica de secagem (3h de secagem e 1h de resfriamento). Pode-se observar que as curvas simuladas descrevem razoavelmente o processo de secagem e resfriamento em todas as seções da câmara. A dinâmica de secagem simulada é mais intensa do que a experimental (diferenças significativas aparecem somente depois de duas horas de secagem). Uma das causas desse fato pode ser a excessiva influência da velocidade do ar sobre os processos de transferência de calor e massa no modelo de camada fina utilizado, onde a velocidade de referência é $0,9\text{ m s}^{-1}$.

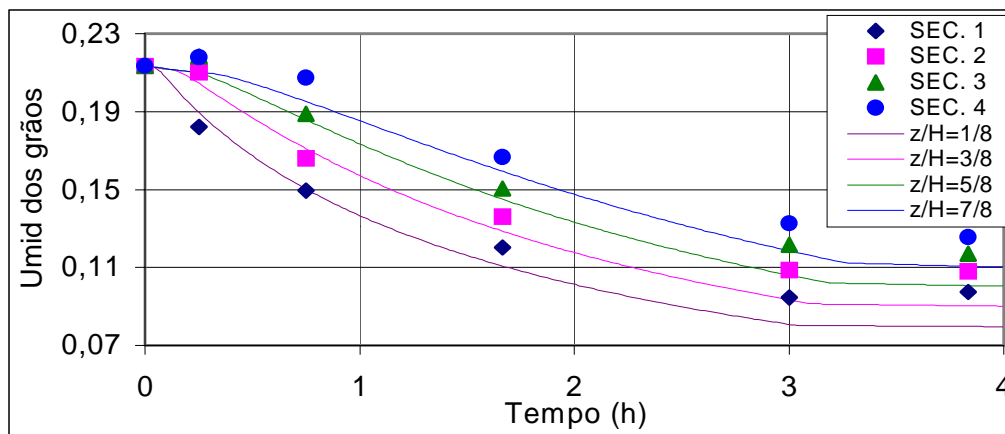


Figura 6.1.5 - Comparação entre dados experimentais e numéricos em leito profundo: Teor de umidade dos grãos, para $T_a=70^{\circ}\text{C}$; $V_a=1,25\text{ m s}^{-1}$; 3h de secagem e 1h de resfriamento.

As curvas das simulações numéricas da variação da temperatura do grão e do ar em relação ao tempo, mostradas nas Figs.6.1.6 e 6.1.7, respectivamente, apresentam razoável semelhança com os dados experimentais correspondentes. As diferenças maiores ocorrem nas camadas mais a jusante, nas quais os resultados numéricos apresentam gradientes de temperatura mais fortes do que os experimentais. Provavelmente, essa diferença está relacionada com a influência demasiada do teor de umidade do ar sobre o coeficiente de transferência de calor, utilizado no modelo. Mesmo que nos secadores de fluxo contínuo a espessura de cada estágio

(distância entre as calhas de entrada e saída) não chega ao comprimento do leito pesquisado (0,5 m) essa influência deve ser corrigida.

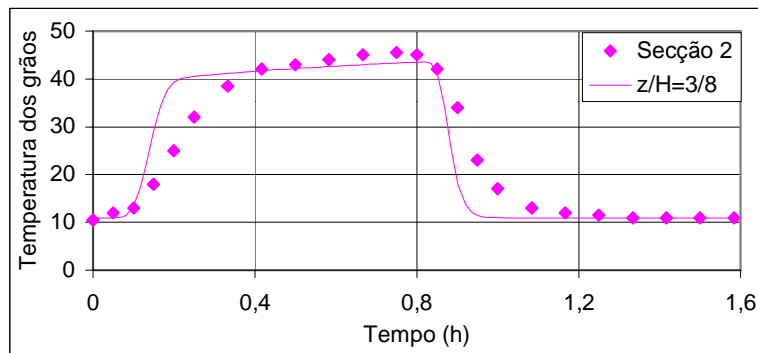


Figura 6.1.6 – Comparação entre dados experimentais e numéricos: Temperatura dos grãos. para $T_a=50^{\circ}C$; $W_a=1,25 m s^{-1}$; 0,75 h de secagem e 1h de resfriamento.

Em geral, apesar da existência de algumas discordâncias entre curvas experimentais e calculadas, os resultados são bastante satisfatórios, considerando as hipóteses e simplificações feitas no modelo.

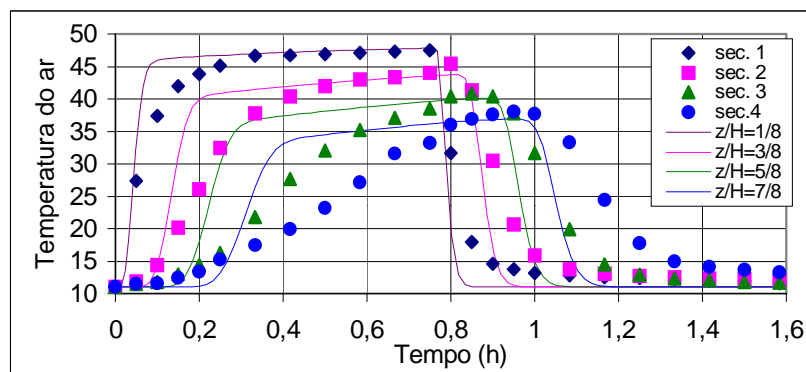


Figura 6.1.7 – Comparação entre dados experimentais e numéricos: Temperatura do ar. para $T_a=50^{\circ}C$ e $W_a=1,25 m s^{-1}$; secagem de 0,75 h e 1h de resfriamento.

A Figura 6.1.8 mostra que o aumento da velocidade do ar acelera significativamente a retirada de água dos grãos. Observa-se também, que a taxa desta aceleração é maior para o modelo do que para os dados experimentais. O modelo descreve satisfatoriamente a dinâmica de secagem para $V_a=1,25 m s^{-1}$ em todas as camadas do secador, para o tempo de secagem escolhido. Como foi mencionado acima, isto é resultado da excessiva influência da velocidade do ar sobre os fluxos de massa e calor no modelo de camada fina utilizado.

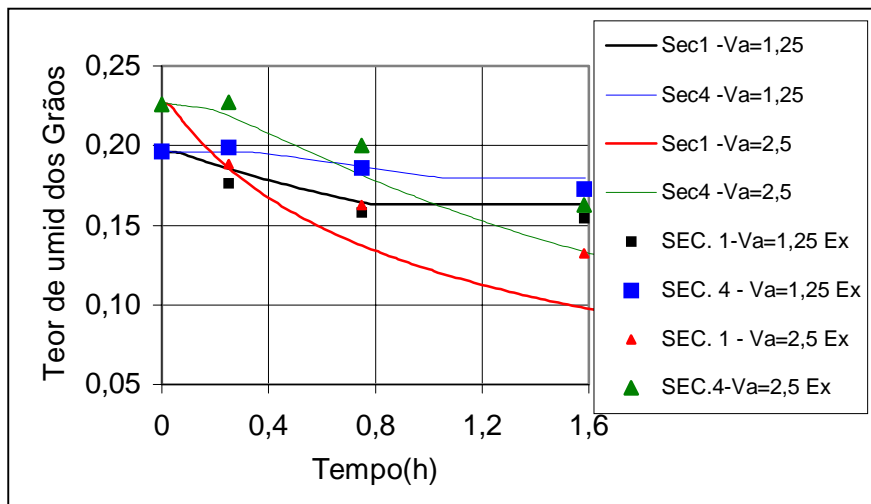


Figura 6.1.8 - Influência da velocidade do ar de secagem no teor de umidade dos grãos.

6.1.3. Balanços de massa e energia

A fim de verificar a coerência entre o modelo matemático/ algoritmo computacional e as leis de conservação, foram realizadas as análises de balanços de massa e energia.

O balanço da massa de água foi realizado usando o programa de volumes finitos, cujas equações e coeficientes estão detalhados no Capítulo 3 desta tese. Se uma célula do domínio de integração (Fig. 4.1) do secador unidimensional de leito fixo estiver vazia e for percorrida por uma massa de ar aquecido durante um intervalo de tempo Δt , a variação da massa de água, entre as seções de entrada e saída seria nula. No entanto, se esta célula estiver cheia de grãos de soja úmidos, com porosidade ε , a variação da massa de água no ar (Δm_{wa}) entre as seções de entrada e saída será igual à variação da massa de água presente nos grãos (Δm_{wg}), pois toda a água que sair dos grãos, necessariamente será recolhida pelo ar. Adotando esta hipótese como lei de conservação da massa, tem-se:

$$\Delta m_{wa} = \Delta m_{wg} \quad \text{para } t = \Delta t. \quad (6.1.1)$$

Usando os conceitos de vazão e teor de umidade do ar e do grão obtém-se:

$$\Delta m_{wa} = W_a A \rho_a \varepsilon \Delta t (Y_e^I - Y_w^0) \quad e \quad (6.1.2)$$

$$\Delta m_{wg} = A \rho_g (1 - \varepsilon) \Delta z (M_P^0 - M_P^I). \quad (6.1.3)$$

As equações (6.1.2) e (6.1.3) foram calculadas para todas as células, em cada passo temporal e os resultados foram somados separadamente, obtendo-se a variação total da massa de água do ar e dos grãos em todo o secador. A Fig. 6.1.9 apresenta o gráfico destas variações em função do tempo. Como existe uma boa aproximação entre as referidas variações, pode-se concluir que o modelo e o algoritmo computacional produzem resultados coerentes com a lei de conservação de massa de água no secador.

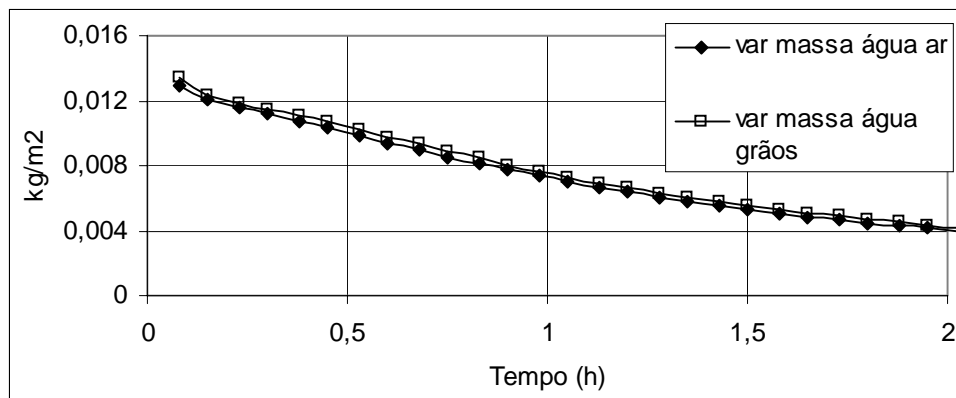


Figura 6.1.9 – Balanço de massa de água para todo o secador de leito fixo.

O balanço de energia foi realizado considerando um conceito semelhante ao da conservação da massa: a variação da energia do ar (ΔE_a) entre as seções de entrada e saída de uma célula, é igual à variação da energia na massa de grãos ($\Delta E T_g$) durante um intervalo de tempo.

$$\Delta E_a = \Delta E T_g \text{ para } t = \Delta t. \quad (6.1.4)$$

Analogamente à equação (6.1.2) a variação da energia do ar entre as seções de entrada (w) e saída (e) da célula, nos tempo inicial (0) e final (1) é

$$\Delta E_a = W_a A \rho_a \varepsilon \Delta t C p_a \left(T_w^0 - T_w^1 - T_e^0 + T_e^1 \right). \quad (6.1.5)$$

A energia cedida pelo ar para os grãos é utilizada para o aquecimento destes (entalpia dos grãos úmidos, E_g), para efetuar a evaporação da água (energia de vaporização, E_v) e para aquecer a água que sai dos grãos na forma de vapor (com temperatura igual a T_g) até a temperatura do ar (energia de aquecimento, E_{aq}). Na forma de equações, tem-se:

$$\Delta ET_g = \Delta E_g + \Delta E_v + \Delta E_{aq}. \quad (6.1.6)$$

A variação na entalpia dos grãos úmidos foi calculada considerando o grão composto por matéria seca e água. Com base nos conceitos de teor de umidade do grão e entalpia, obtém-se

$$\Delta E_g = A\rho_g(1-\varepsilon)\Delta z \left(C_{p_g} + C_{p_a}M_P^I \right) (T_{gP}^I - T_{gP}^0). \quad (6.1.7)$$

A energia de vaporização foi calculada multiplicando-se o calor latente de vaporização pela variação da massa de água presente no ar em um intervalo de tempo (esta quantidade de água é justamente a água que saiu dos grãos),

$$\Delta E_v = A\rho_a\varepsilon\Delta z H_v \frac{Y_P^I - Y_P^0}{1 + Y_P^0} n. \quad (6.1.8)$$

onde n é o número de volumes de ar (equivalentes ao “volume” de uma célula) que passam pela célula durante o intervalo de tempo Δt :

$$n = \frac{pt}{t} = \frac{ptW_a}{\Delta z},$$

onde pt é o passo temporal, t é o tempo necessário para um volume de ar cruzar todo o comprimento Δz da célula, com velocidade W_a .

A energia de aquecimento da água na forma de vapor que sai dos grãos por Δt também foi calculada para a variação da massa de água presente ar em um intervalo de tempo Δt :

$$\Delta E_{aq} = A\rho_a\varepsilon\Delta z C_v \left(T_{aP}^I - T_{gP}^0 \right) n. \quad (6.1.9)$$

Calculando as parcelas pelas equações (6.1.5), (6.1.7), (6.1.8) e (6.1.9) para todas as células em cada passo temporal e somando os resultados de acordo com as equações (6.1.4) e (6.1.6), obtém-se o gráfico comparativo das variações da energia em função do tempo, mostrado na Fig. 6.1.10 para uma malha de 21 células. As diferenças maiores correspondem ao início do processo de secagem quando existem grandes gradientes de temperatura no ar e no grão. Durante a secagem esta diferença diminui.

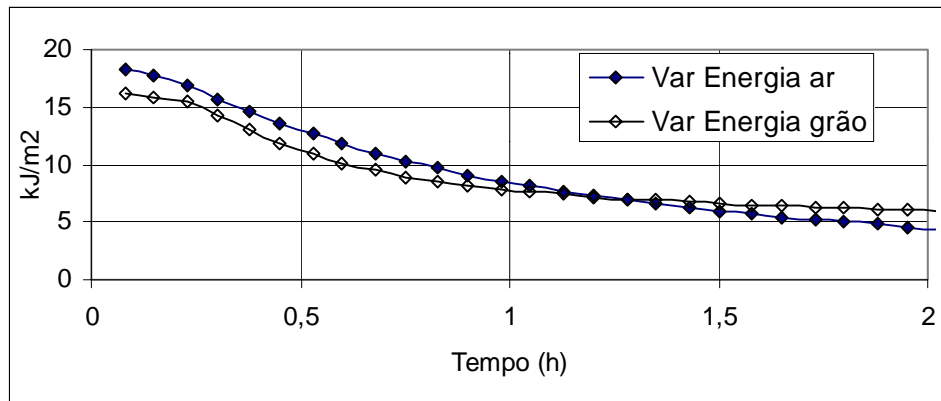


Figura 6.1.10 - Balanço de energia para todo o secador de leito fixo.

6.1.4. Simulações Numéricas

Como foi mostrado acima o programa desenvolvido descreve bem o fenômeno de secagem de soja. Isto permite fazer simulações diversas, analisando a influência de uma variável sobre as demais. Como exemplo, são apresentadas simulações variando a temperatura e a velocidade do ar.

Para analisar a influência da velocidade do ar sobre o teor de umidade dos grãos foram feitas simulações numéricas com diferentes valores de velocidades e temperaturas do ar. A Fig. 6.1.11 apresenta dois grupos de curvas de teor de umidade dos grãos sob diferentes velocidades para a mesma temperatura. A distância entre as curvas do mesmo grupo indica a influência da velocidade do ar sobre o teor de umidade dos grãos. A análise do gráfico leva às seguintes considerações:

- 1ª) A influência da temperatura de ar sobre a secagem é muito mais forte do que a influência da velocidade do ar (a curva com $W_a=0,5 \text{ m s}^{-1}$ e $T=110^\circ\text{C}$ decresce mais rapidamente do que a curva com $W_a=3 \text{ m s}^{-1}$ e $T=70^\circ\text{C}$).
- 2ª) As distâncias entre as curvas no grupo de $T_a=70^\circ\text{C}$ são menores do que no grupo $T_a=110^\circ\text{C}$.
- 3ª) As maiores distâncias entre as curvas do mesmo grupo ocorrem nos períodos iniciais e intermediários do tempo de secagem simulado.

A secagem depende da diferença das pressões do vapor d'água interna e pressão parcial da água no ar de secagem. A pressão interna depende da temperatura do grão. A pressão externa depende do teor de umidade do ar, que no processo de secagem, depende da velocidade e da

temperatura do ar de secagem. Quanto maior a velocidade, mais rapidamente a água será levada para as seções posteriores e num certo momento, menor será a pressão parcial do vapor, facilitando a secagem. Isso justifica a maior influência da velocidade do ar em temperaturas maiores. Nestas o ar próximo aos grãos é umedecido rapidamente, pois existe energia suficiente para promover a vaporização da água, devido à elevada pressão parcial do vapor. A substituição do ar úmido (próximo da saturação) pelo ar seco atua diminuindo a pressão parcial do vapor d'água e aumentando a taxa de secagem. Nas temperaturas baixas a vaporização é mais lenta e o ar é substituído com pouca umidade. A diferença entre a pressão de equilíbrio e pressão parcial do vapor d'água no ar não é suficiente para retirar mais vapor de dentro do grão. Assim, a velocidade terá mais influência na secagem quando a quantidade de vapor d'água retirada dos grãos for maior, o que justifica as duas constatações acima.

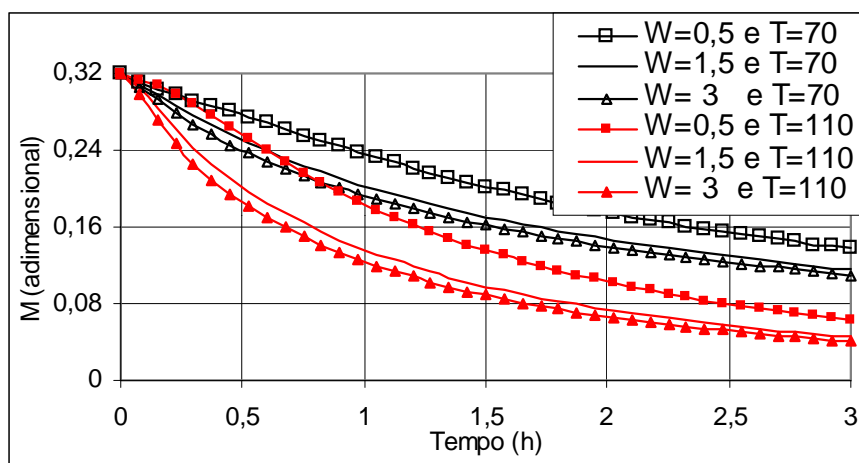


Figura 6.1.11 – Influência da velocidade do ar de secagem no teor de umidade dos grãos com $T_a=70$ e 110°C em $z=L/2$.

A temperatura de secagem tem forte influência sobre o teor de umidade dos grãos. A Fig. 6.1.12 mostra que para temperaturas mais altas as curvas de secagem são mais acentuadas, para qualquer seção da câmara de secagem. Um fato indesejável no armazenamento é a presença de grãos com diferentes teores de umidade, podendo formar espaços suscetíveis ao desenvolvimento de fungos. A secagem, em secador de leito fixo com temperaturas altas, pode fazer com que as camadas de grãos localizadas mais à montante fiquem com teor de umidade muito diferente dos grãos das camadas à jusante. Isto pode ser observado nas curvas relativas à temperatura de 90°C , no período de 1 a 1,5 h de secagem, justamente quando o produto está na faixa de umidade desejada para armazenamento ($\sim 0,13\%$).

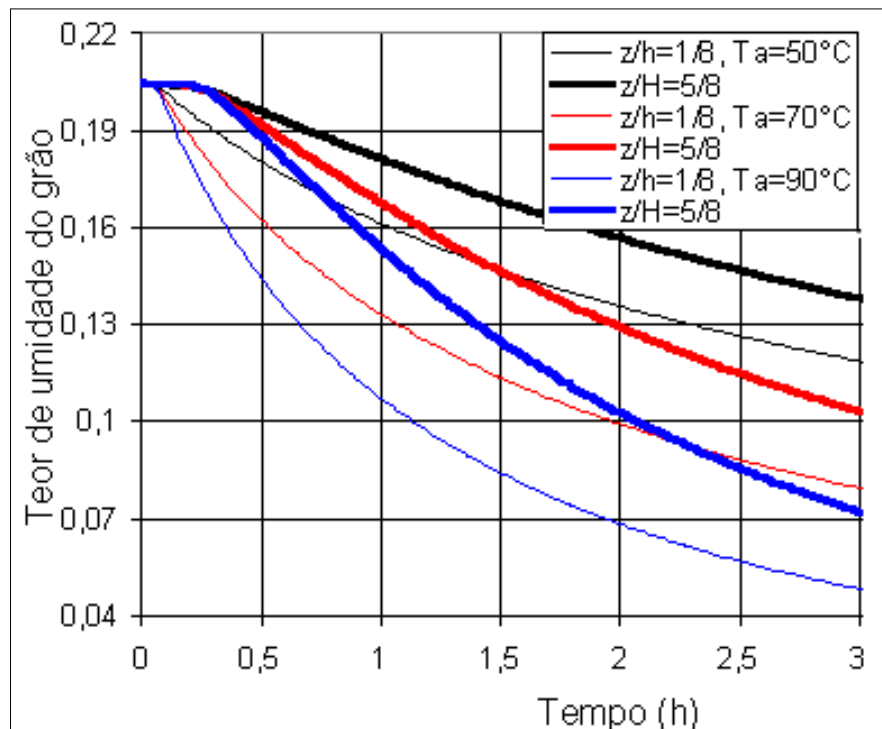


Figura 6.1.12 – Influência da temperatura de secagem no teor de umidade dos grãos com $Wa=0,9m$ s^{-1} em $z=L/2$.

6.1.5. Simulação do secador de fluxo contínuo

A simulação do regime de secagem em fluxo contínuo foi feita para um secador real com a torre de secagem composta de 10 estágios. Cada estágio corresponde a um conjunto de níveis de calhas de entrada/saída ou saída/entrada de ar conforme ilustrado na Fig. (2.4).

A obtenção de dados experimentais para validação dos modelos matemáticos em condições de fluxo concorrente ou contra-corrente para camadas espessas é problema bastante complicado. Além disso, as funções empíricas para os fluxos de calor e de massa disponíveis, foram obtidas para condições de leito fixo. Mesmo assim, a velocidade de descida dos grãos é muito menor do que a velocidade do ar. Isto justifica a possibilidade de usar os dados de leito fixo para a análise do fluxo contra e concorrente. Por isso, neste trabalho são apresentados resultados das simulações feitas para levar em conta somente a influência da conversão da direção do fluxo de ar, na medida em que o grão passa de um estágio para outro. Essas limitações implicam nas seguintes simplificações do processo real:

- durante o tempo de permanência, que é igual à razão entre a profundidade de um estágio e a velocidade dos grãos, estes ficam nas mesmas posições, para cada estágio;
- a translação dos grãos para o estágio posterior acontece “instantaneamente”;
- a porosidade não varia com movimento dos grãos;
- a influência do fluxo cruzado, que ocorre próximo das calhas de entrada, é negligenciável.

Para simular a descida dos grãos na torre do secador, foi considerada a seguinte seqüência de estágios em leito fixo: no 1º estágio, inicialmente, todos os grãos estão estáticos sob as mesmas condições iniciais (M_0 , T_{g0} , Y_0 e T_{a0}). Um fluxo de ar aquecido perpassa a camada de grãos de cima para baixo, durante um intervalo de tempo Δt . Os valores das variáveis são calculados em função de Z (direção da altura da torre), até $t=\Delta t$, mudando para $[M_1(z)$, $T_{g1}(z)$, $Y_1(z)$ e $T_{a1}(z)]$. Nestas condições, a massa de grãos passa “instantaneamente” para o 2º estágio, onde será submetida a um fluxo de ar aquecido de baixo para cima, durante um intervalo de tempo Δt , mudando os valores das variáveis para $[X_2(z)$, $T_{g2}(z)$, $Y_2(z)$ e $T_{a2}(z)]$. Assim sucessivamente até o 10º estágio. Dessa forma, o processo de secagem de fluxo contínuo foi simplificado, entendido como uma seqüência de 10 estágios em regime de leito fixo, com alternância do sentido do fluxo de ar.

A comparação entre as curvas de secagem para mesmo volume da massa de grãos nos regimes de leito fixo (para um estágio correspondente à toda câmara de secagem) e fluxo contínuo é apresentada na Fig. 6.1.13.

No regime de leito fixo, as primeiras camadas ficam submetidas ao ar quente e seco durante todo o tempo de secagem. Por isso secam-se muito mais do que as camadas à jusante. No regime de fluxo contínuo a secagem é feita nos dois sentidos e por isso a umidade fica distribuída das extremidades para o centro e com menor variação em torno da média de todos os grãos. Isto pode ser observado, comparando a diferença entre as curvas de secagem para os dois regimes.

A homogeneidade do teor de umidade na massa de grãos armazenados tem dupla importância: por um lado, diminui o perigo de danificar parte dos grãos, secando alguns destes demasiadamente, e por outro evita a formação de espaços com grãos mais úmidos e outros secos, formando gradientes de umidade na massa do produto armazenado, exigindo mais trabalho de aeração.

A quantidade de água retirada dos grãos nos dois regimes é praticamente a mesma, com pequena vantagem para o regime de fluxo contínuo.

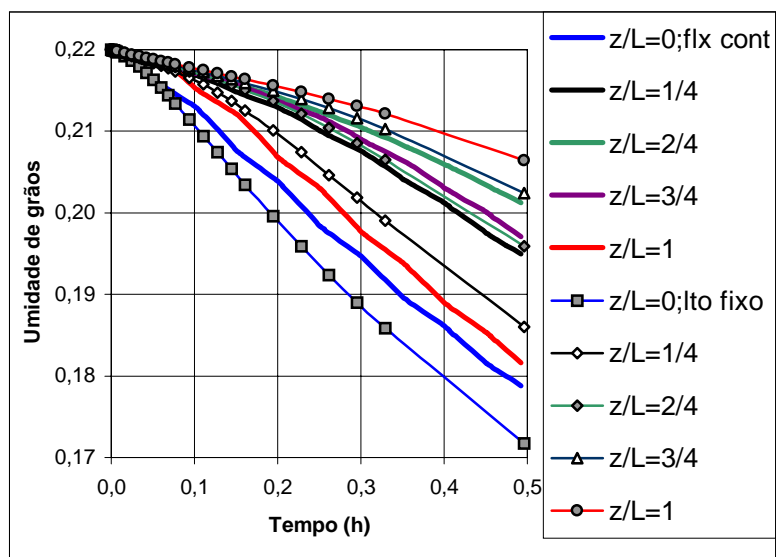


Figura 6.1.13 - Simulação da dinâmica de secagem em regime de fluxo contínuo com 10 estágios, comparado com o regime de secagem em leito fixo.

6.2. Problema de aeração

6.2.1. Determinação dos coeficientes A e B

Os dados obtidos experimentalmente se referem à resistência oferecida à passagem do ar pela massa de grãos. Verifica-se que a variação da pressão estática a uma dada altura da camada de grãos é maior quanto maior for o valor da vazão. Para um dado valor da vazão, a relação entre a queda da pressão estática e a altura da camada de grãos é linear, independentemente do teor de umidade. Esse comportamento mostra, que para pequenas alturas das camadas de grãos estudadas e o modo utilizado para encher o receptáculo, a compactação dessas é aproximadamente uniforme. Esses resultados estão de acordo com o trabalho apresentado por Shedd, 1953.

A Figura 6.2.1 mostra a relação entre o fluxo de ar e a queda de pressão para diferentes teores de umidade dos grãos:

Pode-se observar que, para a faixa estudada, a relação proposta por Shedd, descreve razoavelmente bem a dependência entre a vazão e a queda de pressão.

Verificou-se, também, que o aumento do teor de umidade provoca uma redução da queda de pressão no intervalo estudado. Esses resultados estão de acordo com os dados apresentados por Haque *et al.*, 1982. A redução da pressão estática para teores de umidade maiores pode ser explicada pelo fato de que o peso específico da amostra de soja utilizada tenha diminuído e a porosidade tenha aumentado, facilitando a passagem do ar pela massa de grãos. As medições da porosidade feitas para diversos teores de umidade de soja mostram isto, conforme pode-se observar na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Porosidade para diferentes teores de umidade de soja

Umidade(%)	12,0	14,0	15,0	19,0	21,0
Porosidade	0,389	0,396	0,398	0,408	0,412

As dependências dos fatores de atrito obtidas experimentalmente, para diferentes teores de umidade dos grãos, estão agrupadas satisfatoriamente sobre os dados de outros autores apresentados na literatura [Sissom e Pitts, 1988] e ficam na faixa de transição.

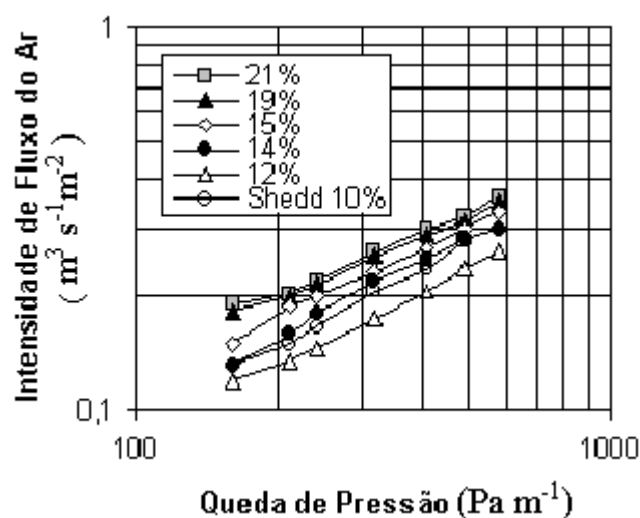


Figura 6.2.1 - Dados experimentais da perda de pressão estática por metro da camada de soja em função da vazão, com diferentes teores de umidade.

Os dados obtidos experimentalmente e ajustados pelo método dos mínimos quadrados, são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2- Coeficientes A e B para a soja com diferentes teores de umidade

Teores de Umidade(%)	Coefficiente A	Coefficiente B
12	0,0049	0,6224
14	0,0105	0,5267
15	0,0094	0,5544
19	0,0133	0,5112
21	0,0198	0,4551
10 (Shedd)	0,0034	0,7108

As dependências de A e B em relação à umidade dos grãos apresentadas na forma linear e ajustadas pelo método dos mínimos quadrados foram inseridas no aplicativo utilizado.

Os resultados do estudo experimental permitiram ampliar o intervalo de aplicação da equação (3.2.3), levar em conta as variações da umidade do grão e aplicar esta equação para outras variedades de grãos.

6.2.2. Validação do programa de aeração: comparação com uma solução analítica

A equação diferencial parcial não-linear usada no modelo de aeração da massa de grãos é

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (6.2.1)$$

onde $K = K \left(x, y, P, \frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y} \right)$ e $P = P(x, y)$. Para testar o funcionamento do algoritmo foi escolhida uma função P e encontrada uma função K , que satisfazem a equação (6.2.1), e foram comparadas as soluções numérica e exata.

Obtenção da solução exata

A equação (6.2.1) pode ser escrita na forma

$$\frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial K}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \frac{\partial K}{\partial y} + K \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (6.2.2)$$

Para os objetivos desta análise a função $P(x, y)$ não pode ser harmônica, pois nesse caso a equação (6.2.2) seria equivalente ao sistema

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial K}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \frac{\partial K}{\partial y} = 0 \\ \nabla^2 P = 0 \end{cases}$$

e para $\forall K$ que satisfaça esse sistema, as soluções de (6.2.1) e de $\nabla^2 P = 0$ seriam as mesmas. Essa solução poderia ser encontrada na iteração inicial resolvendo a equação de Laplace.

A equação (6.2.1) depende das funções $P(x,y)$ e $K = K(x,y,P)$, por isso, uma delas pode ser escolhida arbitrariamente. Caso $P(x,y)$ for conhecida, a equação (6.2.1) se apresenta como uma equação diferencial parcial de 1ª ordem homogênea.

Neste trabalho, a função P foi escolhida de modo que fosse semelhante à distribuição real das pressões nos silos:

$$P = xy^2. \quad (6.2.3)$$

Substituindo (6.2.3) em (6.2.2) tem-se:

$$\frac{\partial K}{\partial x} y^2 + \frac{\partial K}{\partial y} 2xy + 2Kx = 0 \quad (6.2.4)$$

O sistema de equações que determina as características desta equação tem a forma:

$$\frac{dx}{y^2} = \frac{dy}{2xy} = \frac{dK}{-2xK} \quad (6.2.5)$$

Resolvendo (6.2.5), tem-se as equações das características:

$$2x^2 - y^2 = C_1 \quad (6.2.6)$$

$$Ky = C_2. \quad (6.2.7)$$

A solução geral de (6.2.4) tem a forma:

$$F(2x^2 - y^2; Ky) = 0 \quad (6.2.8)$$

ou

$$Ky = f(2x^2 - y^2) \quad (6.2.9)$$

onde F e f são funções arbitrárias.

De (6.2.9)

$$K = \frac{1}{y} \cdot f(2x^2 - y^2) \quad (6.2.10)$$

Escolhendo $f(2x^2 - y^2) = (2x^2 - y^2)$,

Finalmente, tem-se:

$$K = \frac{I}{y} (2x^2 - y^2). \quad (6.2.11)$$

De (6.2.3) tem-se:

$$y = \pm \sqrt{\frac{P}{x}} \quad (6.2.12)$$

que resulta (para $y > 0$):

$$K = \sqrt{\frac{x}{P}} (2x^2 - y^2). \quad (6.2.13)$$

Então, a equação (6.2.1), para a função K determinada, tem a forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sqrt{\frac{x}{P}} (2x^2 - y^2) \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sqrt{\frac{x}{P}} (2x^2 - y^2) \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (6.2.14)$$

que tem como uma solução particular exata a função (6.2.3).

Solução numérica

A equação não linear (6.2.14), com condições de fronteira de Dirichlet satisfazendo a equação (6.2.3) para cada nó da fronteira, foi resolvida numericamente usando o Método dos Elementos Finitos, para o domínio apresentado na Figura 6.2.2. Esse domínio foi escolhido de modo que o sistema (6.2.5) tivesse as condições de unicidade e existência de solução.

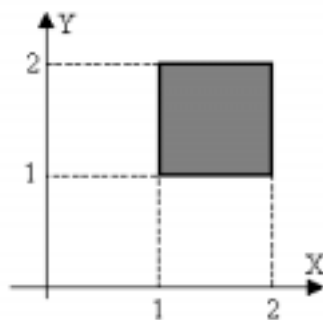


Figura 6.2.2 – Domínio de integração.

O coeficiente K foi calculado por um processo iterativo, que usa a distribuição dos valores da função P nos nós, obtida da iteração imediatamente anterior, conforme fluxograma do algoritmo apresentado no Capítulo 3.

Comparação entre a solução exata e a solução numérica

Para verificar a convergência do processo iterativo e o desempenho do aplicativo foi feita a comparação dos resultados das soluções exata e numérica. A Figura 6.2.3 mostra o logaritmo do erro máximo absoluto em função do número de iterações para diferentes malhas. Observa-se que o erro diminui na medida que o número de nós aumenta e que a partir da quarta iteração não ocorre melhoria significativa na solução numérica.

A distribuição espacial do erro (diferença entre a solução exata e a solução numérica) no domínio de integração, obtida com a primeira iteração (Equação de Laplace) é mostrada na Figura 6.2.4. A diferença diminui na medida que são feitas mais iterações, como mostram as Figuras 6.2.5 e 6.2.6. Em alguns pontos (por exemplo, nas vizinhanças do ponto (1,2;1,2)) as diferenças são bem maiores do que nos demais, mas mesmo assim são da ordem de 10^{-3} na malha de 25 elementos.

A convergência do método numérico é observada pela tendência da solução aproximada para a solução exata, quando o diâmetro máximo dos elementos da malha tende para zero.

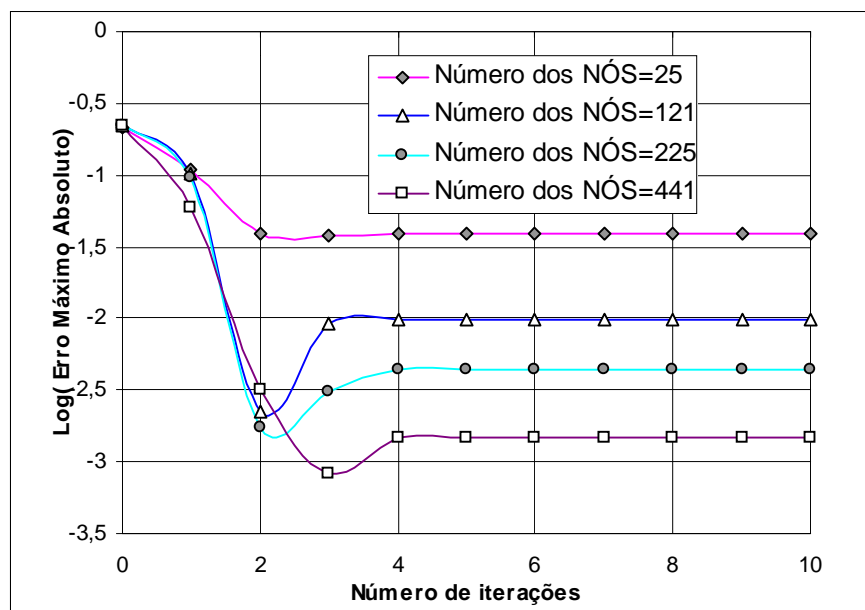


Figura 6.2.3 – Diferença entre as soluções exata e numérica.

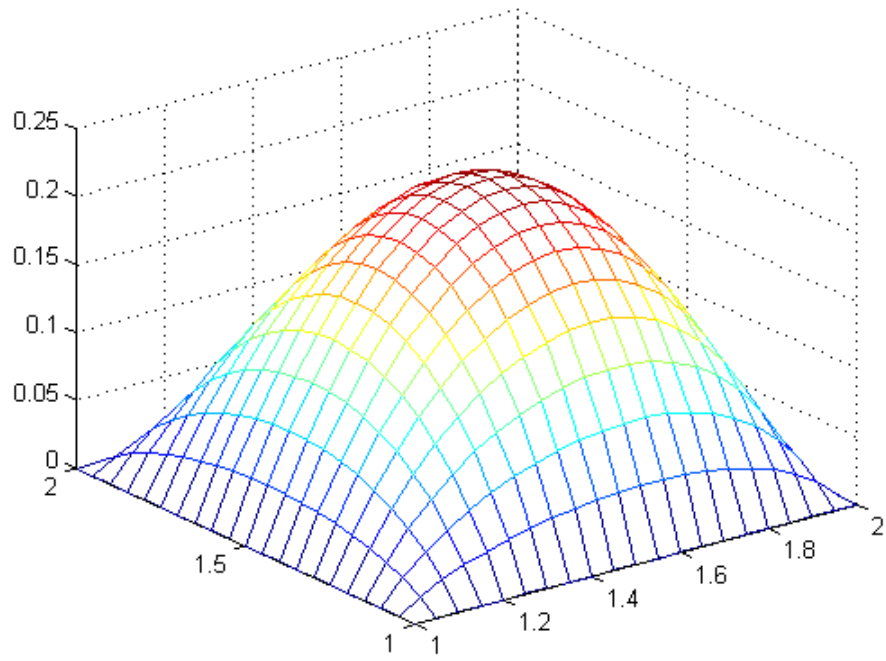


Figura 6.2.4 – Diferença entre a solução exata e a solução da equação de Laplace (1ª aproximação, para malha de 25 nós)

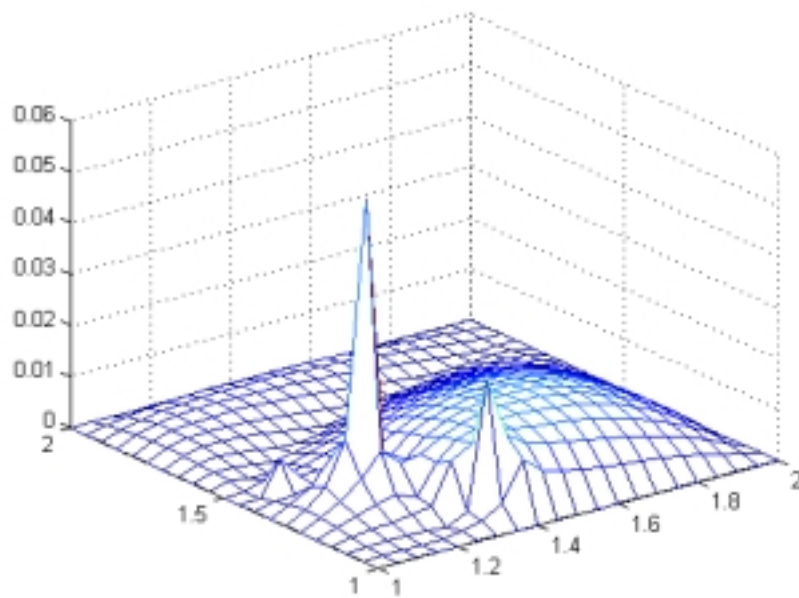


Figura 6.2.5 – Diferença entre as soluções exata e numérica para malha de 25 nós e 2 iterações

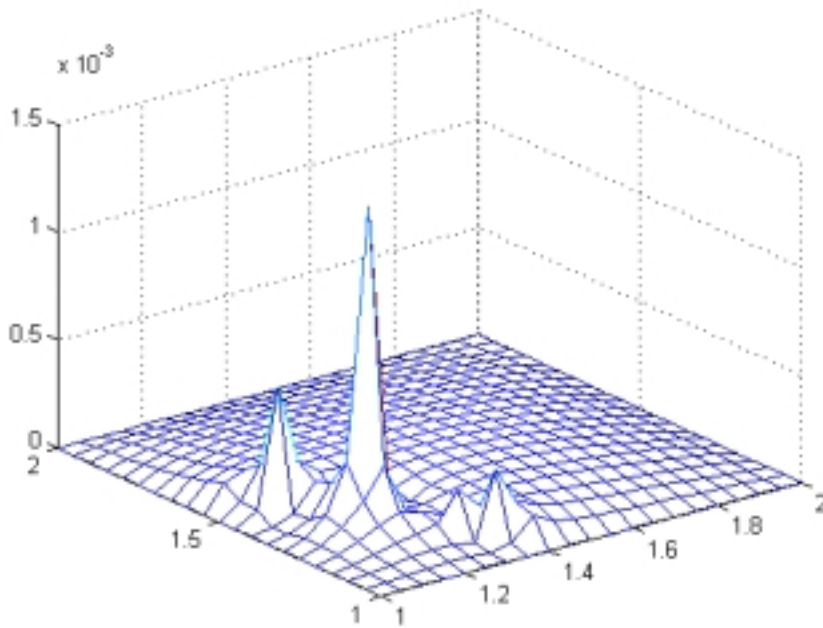


Figura 6.2.6 – Diferença entre as soluções exata e numérica para malha de 25 nós e 4 iterações

6.2.3. Simulações Numéricas

As simulações numéricas foram realizadas variando o teor de umidade do grão, o sistema de distribuição do ar (número de fontes/ entradas de ar) e a forma do fundo do silo.

Na Figura 6.2.7 é mostrado o esquema de um silo utilizado na região noroeste do Rio Grande de Sul.

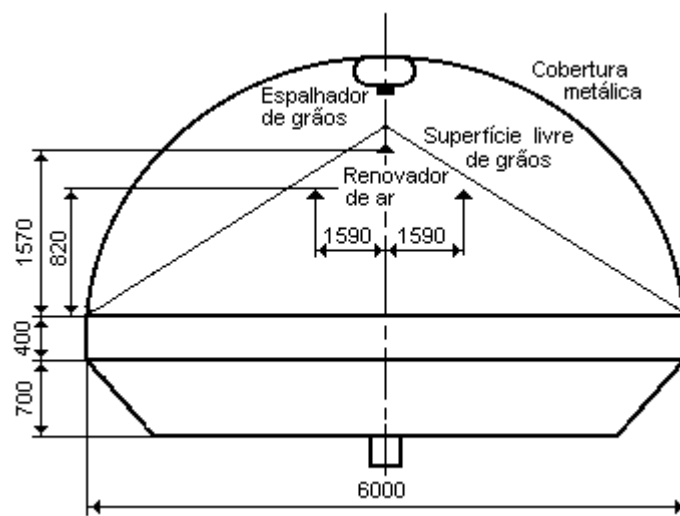


Figura 6.2.7 – Secção transversal de um silo.

A Figura 6.2.8, apresenta a comparação das isóbaras obtidas para diferentes teores de umidade e dos cálculos baseados nas relações de Shedd, 1953, ajustadas por Brooker, 1969. A diferença obtida mostra que os dados de Shedd não podem ser usados para qualquer variedade de grãos e com teores de umidade diferentes.

Pode-se ver a influência significativa do teor de umidade sobre a distribuição da pressão no silo. O aumento do teor de umidade provoca uma redistribuição das posições das isóbaras, deslocando estas na direção das regiões com taxas de velocidades maiores, ou seja, na direção onde as áreas transversais são menores.

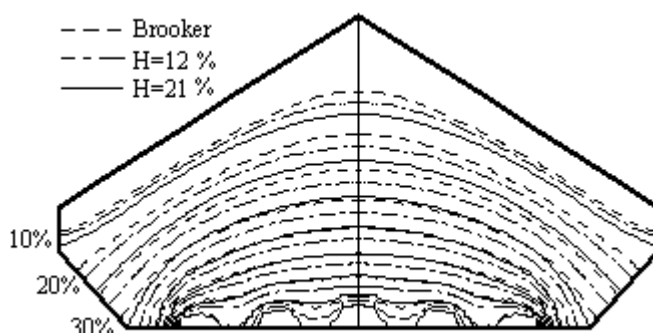


Figura 6.2.8 - Distribuição das isóbaras no silo com 5 fontes.

Para uma melhor compreensão deste comportamento, foram feitos cálculos para esquemas simplificados de silos com seções transversais na forma retangular e de trapézio (Fig. 6.2.9).

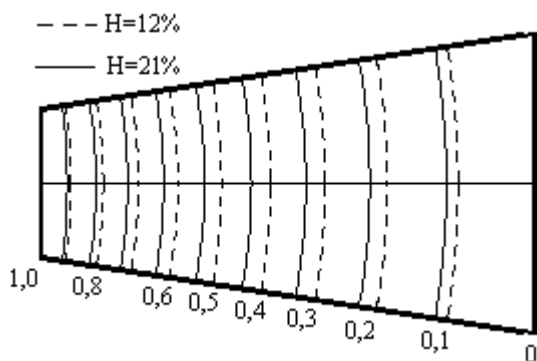


Figura 6.2.9 - Distribuição das isóbaras em silo com seção transversal na forma de trapézio, $A_e/A_s = 2$

Como era esperado, foi constatado que a queda de pressão para o silo de seção retangular é linear, ou seja, a taxa de queda de pressão é constante. Para o silo com seção na forma de trapézio, a taxa de queda de pressão é variável (Figura 6.2.10). No início do escoamento, as velocidades são maiores e a queda de pressão é mais rápida do que no caso do silo com seção transversal retangular.

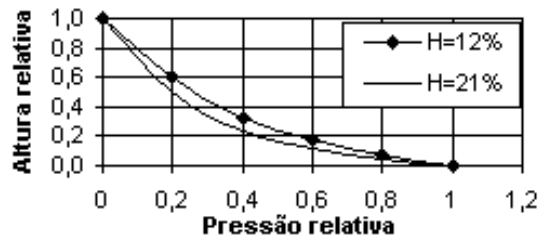


Figura 6.2.10 - Queda de Pressão Relativa ($\Delta P/\Delta P_{max}$) ao longo da altura do silo, para diferentes teores de umidade, $A_s/A_s = 4$

O aumento do teor de umidade aumenta a taxa de queda de pressão nesta região, mas à medida que a seção transversal se amplia, a taxa de queda de pressão diminui.

Este comportamento está relacionado com a influência das velocidades e da umidade sobre o coeficiente de permeabilidade K que pode ser apresentado na seguinte forma, combinando as equações (3.2.4) e (3.2.6):

$$K = A \left(\frac{A}{V} \right)^{\frac{1-B}{B}} = A \frac{1}{B} \cdot \frac{1}{V^m} \quad (6.2.1)$$

onde $m = \frac{1-B}{B}$, $B < 1$.

Os dados experimentais obtidos (Figura 6.2.11) mostram, que para o intervalo estudado de velocidade e umidade, o valor de m cresce com o aumento do teor de umidade. Isto provoca uma redução do valor de coeficiente de permeabilidade K com o aumento da velocidade, ou seja, dificulta a passagem do ar através dos grãos.

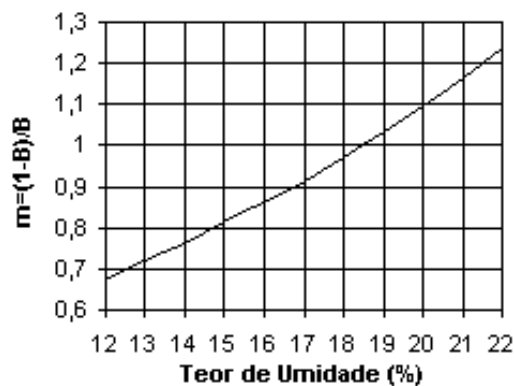


Figura 6.2.11 - Os valores de m com relação aos teores de umidade do grão

A Figura 6.2.12 mostra a influência da variação da área da seção transversal sobre o coeficiente K relativo para diferentes teores de umidade.

Como se pode ver, a redução da área (que corresponde ao aumento da velocidade) no intervalo $[0,2; 1,0]$ provoca queda mais rápida do valor relativo de K para os teores de umidade elevados.

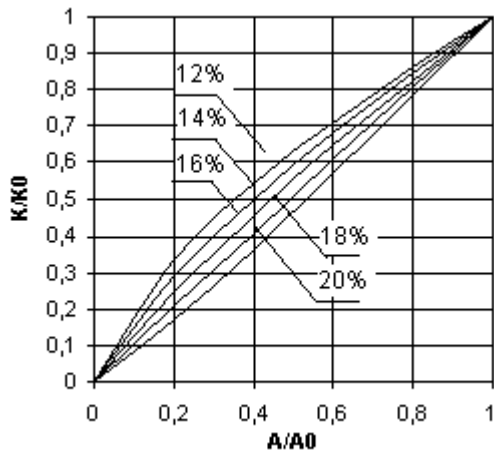


Figura 6.2.12 - Variação da área de secção transversal com relação ao coeficiente K relativo, para diferentes teores de umidade

A distribuição das linhas de corrente calculadas para o esquema básico do silo, variando o número de fontes/entradas de ar (3 e 7), estão apresentadas nas Figs. 6.2.13 a 6.2.14.

Observa-se que o aumento do número de fontes de ar no silo permite obter um fluxo mais uniforme. No entanto, se o número de fontes excede a 5, para o silo estudado, não provoca significativamente maior uniformidade para o fluxo de ar.

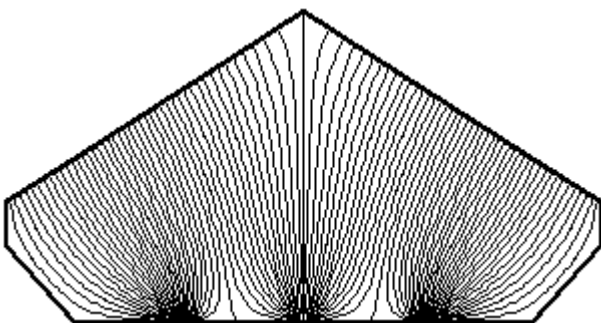
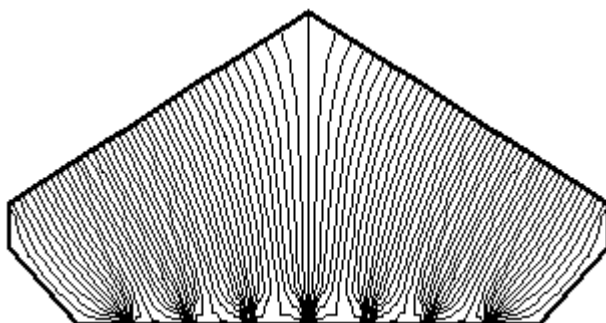


Figura 6.2.13 - Distribuição das linhas de fluxo no silo (3 fontes)

linhas de fluxo no silo (7 fontes)



Com o objetivo de mostrar a possibilidade usar o aplicativo desenvolvido para análise do escoamento do ar em silos existentes e/ou projetados, com diferentes geometrias, apresenta-se a distribuição de pressão (Figura 6.2.15) e de linhas de corrente (Figura 6.2.16 para diferentes esquemas de injeção de ar, mantendo o mesmo número de fontes).

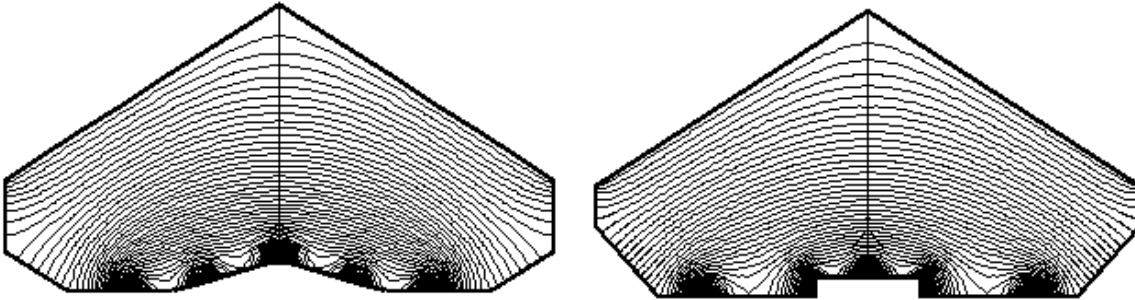


Figura 6.2.15 - Distribuição das isóbaras para diferentes posições das fontes (5 fontes)

As simulações feitas mostram que o aplicativo desenvolvido permite detectar regiões com intensidades de fluxo diferentes no interior do silo em estudo, possibilitando que sejam dadas sugestões para melhorar as condições de aeração.

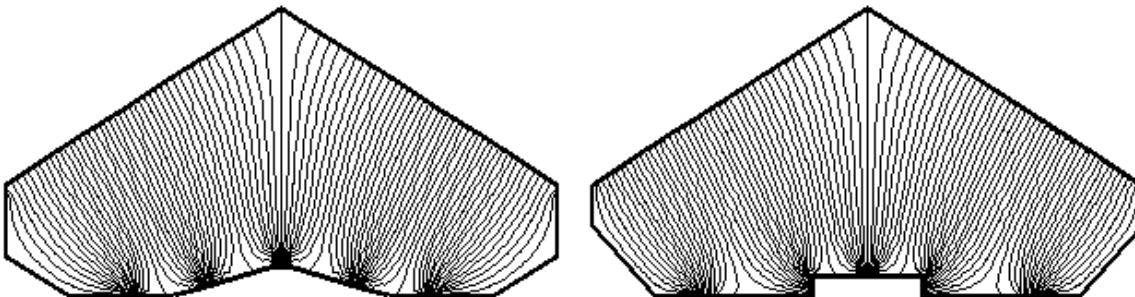


Figura 6.2.16 - Distribuição das linhas de corrente para diferentes posições das fontes (5 fontes)

7. CONCLUSÃO

Sobre o modelo de secagem de grãos

Nesta tese foi desenvolvido um modelo matemático para secagem, composto por um sistema de quatro equações diferenciais parciais, que relacionam o teor de umidade e a temperatura dos grãos e do ar, usando parâmetros característicos de soja brasileira. O modelo simula o processo de secagem para diferentes valores de variáveis importantes para o monitoramento deste processo, tais como a temperatura e a velocidade do ar de secagem, a velocidade e o teor de umidade inicial dos grãos. O modelo foi desenvolvido inicialmente para leito fixo e adaptado para secagem em fluxo contínuo, de acordo com as características dos secadores do tipo torre, mediante algumas simplificações. As simulações realizadas mostraram que a principal vantagem do sistema de fluxo contínuo em relação ao leito fixo é o estabelecimento de diferenças menores entre os teores de umidade máximo e mínimo das diferentes camadas da massa de grãos, tornando a massa de grãos mais homogênea e diminuindo a possibilidade de formação de gradientes de umidade durante o armazenamento do produto. Com relação à eficiência da secagem (quantidade de massa de água retirada dos grãos) os dois sistemas mostraram-se praticamente equivalentes.

Visando o uso do modelo matemático para o monitoramento e controle de sistemas de secagem, foi realizada uma análise comparativa dos métodos numéricos para resolução do sistema de EDP a fim de escolher o método mais adequado. A análise da influência das derivadas temporais das equações da umidade e temperatura do ar sobre o teor de umidade dos grãos mostrou que aquelas são negligenciáveis para os valores das variáveis em que foram realizados os testes. Desconsiderando-as na elaboração dos programas, foi possível diminuir sensivelmente o tempo de resolução computacional, viabilizando a utilização futura do algoritmo em um software acoplado a um sistema real de controle do processo de secagem. Com essa simplificação, tanto os métodos de diferenças finitas como volumes finitos mostraram desempenho semelhante com relação à precisão dos resultados e tempo de execução.

Os dados existentes na literatura sobre secagem em camada fina referem-se ao intervalo de temperatura entre 55°C e 70°C , enquanto que os secadores atuais utilizam temperatura do ar de secagem até 110°C . Para verificar a validade do modelo em temperaturas altas foram realizados experimentos em camada fina para o intervalo de temperaturas entre 60 e 110°C (dados em anexo) e diferentes velocidades do ar. Simulando a secagem com o modelo de leito profundo e comparando os resultados da primeira camada com os dados experimentais de camada fina, observou-se que o modelo descreve bem o processo de secagem de grãos nas condições consideradas com relação aos

valores do teor de umidade dos grãos e temperatura do ar. Os resultados sobre a influência da velocidade na secagem estão um pouco superiores aos dos experimentos, não inviabilizando, no entanto, a utilização modelo proposto para o intervalo de temperatura de 55 a 110 °C e velocidades entre 0,5 e 3 m s⁻¹.

Para identificar o modelo de leito profundo foram realizados experimentos sobre o processo de secagem nas fases de aquecimento e resfriamento, cujos resultados estão bem próximos dos resultados do modelo, apesar das curvas de temperatura do ar e dos grãos apresentar gradientes mais acentuados nos primeiros instantes de secagem e resfriamento. Mesmo assim, é razoável considerar que para fins de monitoramento e controle, o modelo descreve razoavelmente a secagem e o resfriamento, visto que o efeito das diferenças nas temperaturas não implica significativamente em variações no teor de umidade dos grãos. Por outro lado, deve-se admitir a necessidade de melhorias no modelo, no que se refere à formulação do processo de transferência de calor, assim como a consideração de eventuais perdas de calor ocorridas durante os experimentos de duração mais longa.

Foram realizadas simulações numéricas sobre a influência da velocidade do ar e da temperatura no teor de umidade dos grãos. Observou-se que para as temperaturas mais baixas a velocidade não tem grande influência. No entanto, para temperaturas mais altas (próximo de 100°C) a influência da velocidade do ar é significativa. Também foi constatado que a temperatura do ar tem forte influência sobre a secagem, o que justifica a tendência dos secadores atuais em aquecer o ar até temperaturas superiores à da ebulição da água.

Para analisar a coerência entre o modelo matemático/ algoritmo computacional e as leis de conservação, foram realizados os balanços de massa de água e de energia, mostrando que o modelo é coerente com tais leis. Foram feitas simulações em diferentes condições de operações para analisar o rendimento dos secadores de leito fixo. As simulações mostraram que para os mesmos intervalos de teores de umidade dos grãos (mesma quantidade de água retirada) o rendimento varia diretamente com a temperatura do ar: quanto maior for a temperatura do ar maior será o rendimento do secador. No entanto, para produtos muito úmidos (tempo de secagem maior do que 1 h) o rendimento tende a ser o mesmo para qualquer temperatura, no intervalo simulado. Portanto, confirmam-se as vantagens do uso de temperaturas de secagem altas, visto que o teor de umidade da soja recebida durante a safra, em regra, está próximo de 0,18 e é secado até 0,13 ou 0,12. Nesse intervalo a vantagem é dupla: tempo e rendimento (economia de energia).

Sobre o modelo de aeração de grãos

Os modelos de aeração existentes são de difícil utilização em um *software* de monitoramento e controle de unidades de armazenamento de grãos devido a sua complexidade e tempo real resposta. Nesta tese foi desenvolvido e resolvido um modelo matemático para o escoamento do ar em silos, caso 2-D (aeração de soja), levando em conta a influência da umidade inicial dos grãos, para diferentes esquemas de silos e distribuição inicial do ar. Para resolver o problema do escoamento foi utilizado o método dos elementos finitos, viabilizando a solução do problema de aeração em silos com geometrias irregulares.

O modelo matemático e o algoritmo computacional foram testados comparando os resultados numéricos com uma solução analítica conhecida. Foi observado que a diferença entre as soluções diminui na medida que a malha é refinada, mostrando que a solução numérica é convergente para a solução analítica.

As simulações realizadas mostraram que o programa computacional pode ser usado como instrumento auxiliar para o projeto de silos, possibilitando o cálculo e a visualização gráfica da distribuição das pressões e das linhas de corrente em diferentes seções do armazém.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arthur, J.F. and Rumsey, T.R. ,1991. Two-dimensional drying model for stationary bin walnut dryers. *Transaction of the ASAE* . 34(1):193-200.
- Bakker-Arkema, F.W.; Bickert, W. G., and Patterson, R.J. 1967. Simultaneous heat and mass transfer during the cooling of a deep bed of biological products under varying inlet air conditions. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 12, 297-307.
- Borém, F.M., Hara, T. e Silva, R.F., 1992. Efeito da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem sobre o trincamento e a suscetibilidade à quebra de sementes de milho, híbrido AG-303. *Engenharia na Agricultura*. Série: Armazenamento, Vol. 2(3), abril, 1-11.
- Borges, P.A.P., Khatchaturian, O. A. e Vielmo, H. A. Modelagem matemática de secagem de grãos: aplicação do método dos volumes finitos. XXIII CNMAC/2000, Santos, SP, 2000.
- Bouraoui, M., Richard, P. e Fichtali, J. A review of moisture content determination in foods using microwave oven drying. *Food Research International*, (20) 49-57, 1993.
- Brooker, D.B., 1961. Pressure patterns in grain-drying systems established by numerical methods. *Transaction of the ASAE*. 4(1) p.72-74 .
- Brooker, D.B., 1969. Computing air pressure and velocity distribution when air flows through a porous medium and nonlinear velocity-pressure relationships exist. *Transaction of the ASAE*, 12(1):118-120.
- Brooker, D.B., Bakker-Arkema and Hall, C.W. , 1982 (5ª Pr.). *Drying cereal grains*. Westport, The Avi Publishing Company.
- Bunn, J.M. and Hukill, W.V. , 1963. Pressure Pattern Predictions for Non-Linear Air Flow Through Porous Media. *Transaction of the ASAE*. p.32-36.
- Corso, J. , 1997. *Modelagem Matemática do Processo de Secagem de Soja em Secador Contínuo de Leito Fixo*. Dissertação de mestrado, UNIJUÍ. Ijuí/RS.
- Cortez, L.A.B. e Magalhães ,P.S.G (coordenadores) 1993. *Introdução à engenharia agrícola*. Campinas, SP: Editora Unicamp.
- Courtois, F., Lebert, A., Lasseran, J.C. and Bimbenet, J.J. 1991. Simulation of industrial dryers: solving numerical and computer problems . *Drying Technology*, 9(4), 927-945.
- Courtois, F., Lebert, A., Duquenoy, A., Lasseran, J.C. and Bimbenet, J.J. , 1992. Modelling of drying in order to improve precessing quality of maize. *Drying'92*, Enselvier Science Publischer B.V.
- Crank, J. and Nicolson, P. (1947). A Partial method for Numerical Evaluation of Solutions of Partial Differential Equations of the Heat-Conduction Type.- Proc. Cambridge Philos. Soc., v.43, p.50-67.
- Eltigani, A. Y. e Bakker-Arkema. 1987. Automatic control of commercial crossflow grain dryers. . *Drying Technology*, 5(4), 561-575.
- Fortes, M. and Okos, M.R., 1980. Drying theories: their basis and limitations as applied to foods and grains, pp 119-154, in A.S. Mujumdar(ed) *Advances in Drying*, Hemisphere, New York.
- Fortes, M. and Okos, M.R. & Pinheiro Filho, 1980 J.B. Modeling of Dryeration Process. In: *International Symposium on Drying*, 2, Montreal, 1980. Anais. Montreal, McGill University.
- Fortes, M. and Okos, M. R. A , 1981. non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary-porous media. *Transaction of the ASAE*. 756-760.

- França, A.S., 1991. Simulação bidimensional de secadores de grãos cereais, *Dissertação de Mestrado*. Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, MG, Brasil.
- França, A.S., Fortes, M. and Haghghi, K., 1994. Numerical simulation of intermittent and continuous deep-bed drying of biological materials. *Drying Technology*, Vol.12(7), 1537-1560.
- Haque, E.; Chung, D.S. and Foster, G.H., 1981. Pressure and Velocity Field in Airflow Through Packed Bed of Corn Mixed with Fines Under Non-Darcy Flow Conditions. *Transaction of ASAE*. p.1595-1599.
- Haque, E.; Ahmed, Y.N. and Deyoe, C.W., 1982. Static Pressure drop in fixed bed of grain as affected by grain moisture content. *Transaction of ASAE*. p.1095-1098.
- Haque, E.; Chung, D.S. and Foster, G.H., 1978. Static pressure drop across a bed of corn mixed with fines. *Transaction of the ASAE* 21(5):997-1000.
- Hara, T. Teor de Umidade e Temperatura de Grãos Armazenados. *Revista Brasileira de Armazenagem*. Ano 2, nº 2, Dez/1977.
- Hawlder, M.N.A. and Ho, J.C., 1999. A mathematical Model for Drying of Shrinking Materials. *Drying Technology* . vol. 17, Combined Issues 1-2, p.27-47.
- Henderson, S.M. Progress in developing the thin layer drying equation. *Transaction of the ASAE* 1974 17 (6):1167-1172.
- Hustrulid, A ., 1962. Comparative drying rates of naturally moist, remoistened, and frozen corn. *Transactions of the ASAE*. 5(1):64-67.
- Jindal, V.K. e Thompson, T.L., 1972. Air pressure paterhns and flow path in two-dimensional triangular-shaped piles of sorghum using forced convection. *Transaction of the ASAE* . 15(4):737-741.
- Kemp, I. C., 1999. Progress in Dryer Selection Techniques. *Drying Technology*. vol. 17, Issue 7-8, p.1667-1680.
- Kepler Weber S.A. *Aeração, seca-aeração e termometria: Conservação e ensilagem*. (sem dados de edição).
- Khatchatourian, O.A., Toniazzo, N.A. e Borges, P.A.P., 1998. Estudo Teórico/ experimental e Simulação Numérica do Escoamento do Ar em Silos. *Mercofrio 98*. Porto Alegre..
- Khatchatourian, O.A., Toniazzo, N.A. e Borges, P.A.P., 1999. Um modelo simples para análise do processo de secagem de soja em camada móvel com fluxo contrário de ar. *Cilamce/99*. São Paulo.
- Khatchatourian, O.A., Toniazzo, N.A. e Borges, P.A.P. (a), 2000. Modelagem matemática do processo de secagem de soja : ar e grão em fluxos contrários. *ENCIT2000*. Porto Alegre.
- Khatchatourian, O.A., Toniazzo, N.A. y Borges, P.A.P. (b) Simulacion numérica Del flujo de aire em silos para el almacenamiento de granos. *Información Tecnológica*, Vol. 11, nº 4, 2000.
- Khatchatourian, O.A.; Borges, P.A.P. and Petry, V.J. Mathematical model and numerical methods for simulation of dynamics of drying of soy grains in camera of fixed bed. In: *Proceedings of LACAFLUM 2001 - V Latin American and Caribbean Congress on Fluid Mechanics*, DHT-4, pp1-6, Universidad Simón Bolívar, May 14 – 17, 2001 , Caracas, Venezuela. 2001.
- Khatchatourian, O.A.; Borges, P.A.P. e Weber, P.E. Simulação numérica do processo de secagem de soja em secador de fluxo contínuo. In: , *Proceedings of the 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering XVI COBEM*. Vol 9, p.300-307, Uberlândia, 2001.

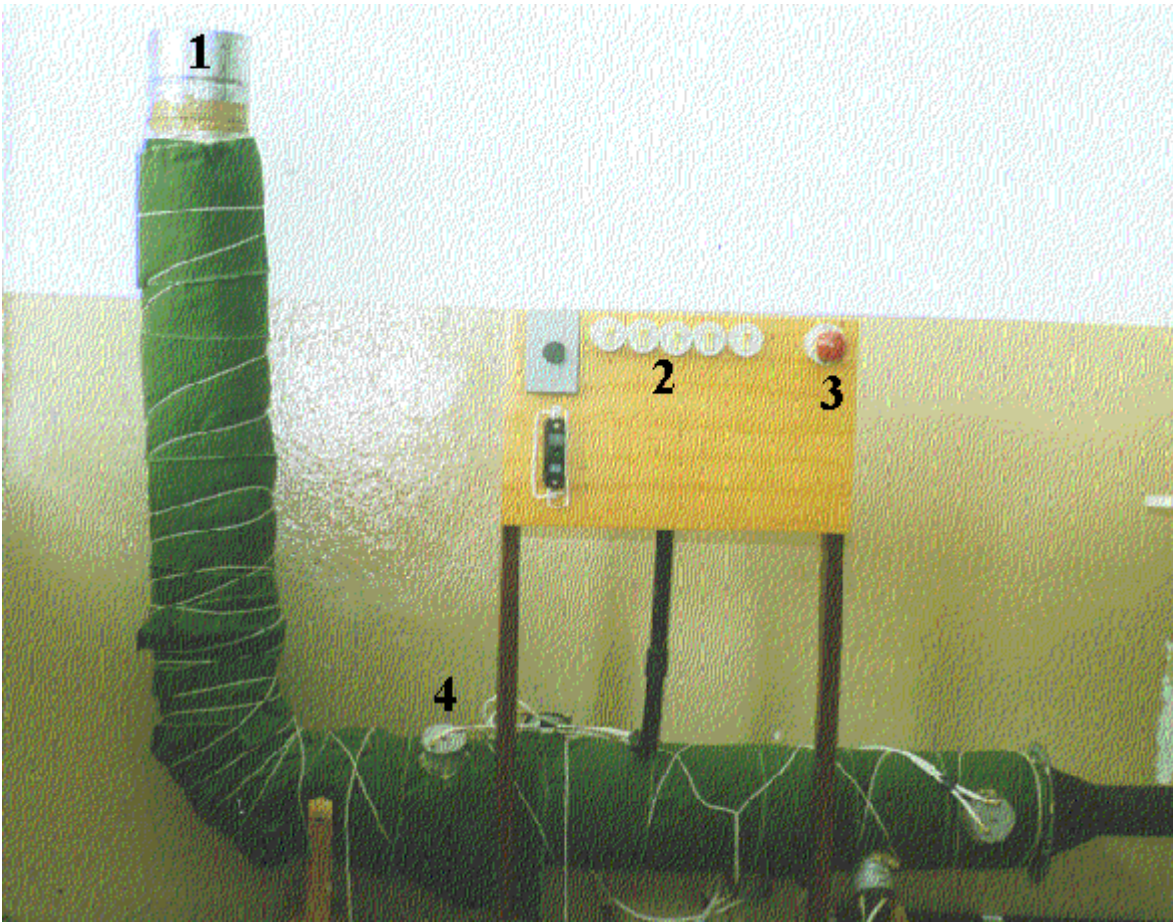
- Klapp, E., 1963. Mathematical analysis of simultaneous heat and mass transfer processes in granular materials through which passes a gas.[Translation 154, Harris E., *Scientific Information Dept. Natn. Inst. Agric. Engng. Silsoe, from Ingenieur-Archiv*. 32(5)360-372].
- Laws, N. Parry, J.L. Mathematical modelling of heat and mass transfer in agricultural grain drying. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 1983 **385** 169-187. .
- Lacerda Filho, A.F. Queiroz, D.M, Gonzalo, R.,1982. Avaliação experimental de secador comercial intermitente de arroz. *Revista Brasileira de Armazenamento*. Viçosa, 7(1):39-49.
- Lasseran, J.C. , 1981. Experiências Práticas sobre Seca-Aeração. *Revista Brasileira de Armazenamento*. 6(1):13-23.
- Lasseran, J.C. ,1988. The drying of grains-principles, equipment, energy savings and fire safety. In: *MULTON, J.L., ed.Preservation and storage of grains, seeds and their by-products.Paris, Tec & Doc-Lavoisier*. p.606-663.
- Lasseran, J.C., 1993. Mejora del manejo de la ventilación y del sistema de conductos para controlar la calidad de los granos. *Simposio sobre Secado y Almacenaje de Granos en America Latina*. Octubre 18-22, Porto Alegre.
- Lasseran, J.C. and Courtois, F. , 1993. A CAD Software to improve the heat energy efficiency of mixed-flow maize dryers. *CESA/FAO Latin American Technical Meeting of Grain Drying and Storage*, Octubre 18-22. Porto Alegre.
- Laurindo, J.B. and Prat, M. ,1998. Modeling of Drying in Capillary-Porous Media: A Discrete Approach. *Drying Technology*. vol. 17, Combined Issues 9-10, p.1769-1787.
- Laws, N. and Parry, J.L. Mathematical modelling of heat and mass transfer in agricultural grain drying. *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 1983 **385** 169-187.
- Lewis, W.K. The rate of drying of solid materials. *Industr. Engng Chemistry.*, 1921 (13) 427.
- Loncin, M. and Merson, R.L., 1979: In: *Food Engineering : principles and selected applications*, Academic Press, New York, USA.
- Luikov, A.V. *Transferência de calor e massa em processos de secagem*. Moscou, Leningrado. Ed. Estatal Energia. 1956 (em russo). .
- Luikov, A. and Mikhaylov, Y. *Theory of energy and mass transfer*. Prentice Hall Inc. N.Y., 1961.
- Luikov, A.V. *Heat and Mass Transfer in Capillary-porous Bodies*. New York: Pergamon, 1966.
- MacCormak, R.W and Paullay, A.J. (1972). Computational Efficiency Achieved by Time Splitting of Finite Difference Operators. – AIAA Paper 72-154, San Diego, California.
- MacCormak, R.W. *The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering* - AIAA, Paper 69-354, Cincinnati, Ohio, 1969.
- Maliska, C.R., 1985. *Transferência do Calor e Mecânica dos Flúidos Computacional*, LTC, Rio de Janeiro.
- Mao, Z. and Cao, C. ,1999. Simulation and Optimization of Cross Flow Grain Dryers. *Drying Technology* . vol.17, Issue 9, p.1767-1777.
- Marinos-Kouris, D.; Maroulis, Z.B. e Kiranoudis,C.T. ,1998. Modeling, Simulation and Design of Convective Industrial Dryers. *Drying Technology*. vol. 16, Issue 6, p.993-1026.
- Martins, J. H.; Pinheiro Filho, J.B. Fortes, M. Sedyama, G.C. 1982. Avaliação de secagem de milho em camada estacionária. *Revista Brasileira de Armazenamento*. Viçosa, 7(1):5-18.
- Martins, R.R.; Franco, J.B.R. e Oliveira, P.A.V. 1999. *Tecnologia de secagem de grãos*. Passo Fundo (RS), EMBRATER/EMBRAPA-RS.

- Mattei, M., 1969, *Donnees Techniques sur la ventilation du grain. Centre National d'Etudes et d'Experimentation de Machinisme Agricole.*
- Mhimid, A., 1999. Heat and Mass Transfer During Drying of Granular Products by Combined Convection and Conduction. *Drying Technology*. vol. 17, Issue 6, p.1043-1063.
- Miller, P.C.H. and Whitfield, R.D., 1984. The predicted Performance of Mixed-Flow Grain Drier. *J. Agricultural Engineering Research*. 30, 373-380.
- Moffat, R.J., 1982. Contributions to the Theory of Single-Sample uncertainty Analysis. *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 104, pp.250-260.
- Moreira, R.G. and Bakker-Arkema, F.W., 1990. Unsteady-state simulation of a multi-stage concurrent-flow: maize dryer, *Drying Technology*, Vol.8(1),61-75.
- Moreira, R.G. and Maier, D.E., 1993. Aeration of grains using natural and chilled air. *Technical Meeting in Grain Drying and Storage*. Porto Alegre, Outubro.
- Mujumdar, A.S., 1991, Drying Technologies of the future. *Drying Technology*. 9(2)pp.325-347.
- Mujumdar, A.S., 1998. International Drying Symposium Series (IDS): A personal Perspective. *Thessaloniki, Halkidiki, Grécia.*
- Nellist, M.E. The drying of ryegrass seeds in deep layers. PhD Thesis, University of Newcastle-upon-Tyne, 1974 (não publicada).
- Nellist, M.E.; O'Callaghan, J.R. The measurement of drying rates of ryegrass seed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1971 **16**(3) 192-212.
- Neves, M.J.B.; Fortes, M.; Moreira, S.M.C. e Pinheiro Filho, J.B., 1983. Simulação físico-matemática do processo de seca-aeração. *Revista Brasileira de Armazenamento. Viçosa*. 8(1,2):3-10.
- Oliveira, L. and Haghghi, K., 1998. Conjugate Heat and Mass Transfer in Convective Drying of Multiparticle Systems. Part I: Theoretical Considerations. *Drying Technology*. vol. 16, Issue 3-5, p.433-461.
- Oliveira, L. and Haghghi, K., 1998. Conjugate Heat and Mass Transfer in Convective Drying of Multiparticle Systems. Part II: Soybean Drying. *Drying Technology*. vol. 16, Issue 3-5, p.463-483.
- Pagano, A.M., Crozza, D.E. Koenig, M. Nolasco, S.M. Almacenamiento de maiz de produccion Argentina: aireacion com direccion de flujo de aire vertical y horizontal. *Mercofrio 1998*. Porto Alegre.
- Patankar, S.V., 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw Hill, New York.
- Parry, J.L., 1985, Mathematical modelling and computer simulation of heat mass transfer in agricultural grain drying: A review. *J. Agric. Eng. Research*, Vol. 32, 1-29.
- Parti, M., 1993, Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers, *J. Agric. Eng. Research*. Vol.54, 339-352.
- Patil, N.D., 1987, Improvement of deep-bed crossflow model by a diffusion component for the grain particle and log model for evaluation of recirculating crossflow dryer, *Drying Technology*. Vol. 5(1), 87-106.
- Perré, P., 1999. Transpore: a Generic Heat and Mass Transfer Computational Model for Understanding and Visualizing the Drying of Porous Media. *Drying Technology* vol. 17, Combined Issues 7-8, p.1273-1289.
- Petry, V., 2000. *Modelagem Matemática do Processo de Secagem de Soja em Secadores de Leito Fixo*. Dissertação de mestrado, UNIJUÍ. Ijuí/RS.

- Pierce, R.O. and Thompson, T.L., 1974. Air flow patterns in conical shaped piles of grain. *Transaction of the ASAE* . Paper No. 74-3015, St. Joseph.
- Prasertsan, S., 1998. Heat Pump Drying of Agricultural Materials. *Drying Technology* vol.16, Combined issues 1-2.
- Puzzi, D., 1973. *Manual de armazenamento de grãos*. São Paulo, Ed. Agronômica Ceres.
- Ramaswamy, S. and Holm, R.A., 1999. High Intensity Drying. *Drying Technology* . vol. 17, Combined Issues 1-2, p.73-95.
- Reis, J.A.dos e Carrocci, L.R. Análise de modelos de sistemas de secagem. Sistemas por pulverização, flash e leito fluído. *Mercofrio/1998*. Porto Alegre.
- Ribeiro, C.A.A.S., 1983. *Solução, por elementos finitos, da equação não-linear de Laplace, aplicada à análise de fluxos de ar em silos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, M.G.
- Shedd, C.K., 1953. Resistance of Grains and Seeds to Air Flow. *Agricultural Engineering*. 34:(9) 616-619, September .
- Shivhare, U.S.; Raghavan, G.S.V. e Bosisio, R.G. Modelling the Drying Kinetics of Maize in a Microwave Environment. *Journal of Agricultural Engineering Research* . (1994)57, 199-205.
- Silva, J.S., Sabioni, P.M. Afonso, A.D.L. e Pinto, F.A.C., 1992. Avaliação de secadores e custo de secagem de produtos agrícolas. *Engenharia na Agricultura*. Série: Armazenamento, Vol. 2(4), junho, 1-19.
- Silva, J.S., 1993. Estado da arte da secagem e armazenagem de grãos no Brasil. *Engenharia na Agricultura*. Série: Armazenamento, Vol. 3(6), janeiro, 1-17.
- Soares, J.B., 1986. *Curvas de secagem em camada fina e propriedades físicas de soja (Glycine max L.)*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Viçosa, MG.
- Songtao, H.; Xuquan, L. Guodan, L.; Leming, L. and Lineng, L., 1999. Cross-effect of Heat and Mass Transfer of Luikov Equation: Measurement and Analysis. *Drying Technology* vol. 17, Issue 9, p.1859-1877.
- Souza, J.L.F e Ferreira, W.R., 1996. Simulação de secadores reais bidimensionais. *Anais do V ENCIT/VI LATCYM*. Florianópolis, 1996.
- Streeter, V.L. e Wylie, E.B. *Mecânica dos fluídos*. 7ed. São Paulo: McGrawHill, 1980.
- Thompson, T.L. Peart, R.M. and Foster, G.H. 1968. Mathematical Simulation of Corn Drying - a New Model. *Transaction of the ASAE* .11(4):582-586.
- Toniazzo, N.A. Modelagem matemática do escoamento do ar em sistemas de armazenagem de grãos. *Dissertação de Mestrado*. UNIJUÍ. Ijuí (RS). 1997.
- Van Arsdell, W.B. 1955. Simultaneous heat and mass transfer in a ninoisothermal system: through-flow drying in the low-moisture range. *Chem. Eng. Prog. Symp. Series*, 51(16)47-58.
- Weber, E.A. *Armazenagem Agrícola*, 1998. Porto Alegre: Kepler Weber Industrial.
- Whitaker, S., 1977. Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media. *Drying Technology*, vol.1. pp.3-33.
- Whitaker, S., 1977. Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying. In: *Advances in Heat Transfer*. Vol. 13, Academic Press, New York.
- Zhihuai, M. e Chonwen, C., 1999. Simulation and optimization of cross flow grain dryers. *Drying Technology* .17(9), 1767-1777. .

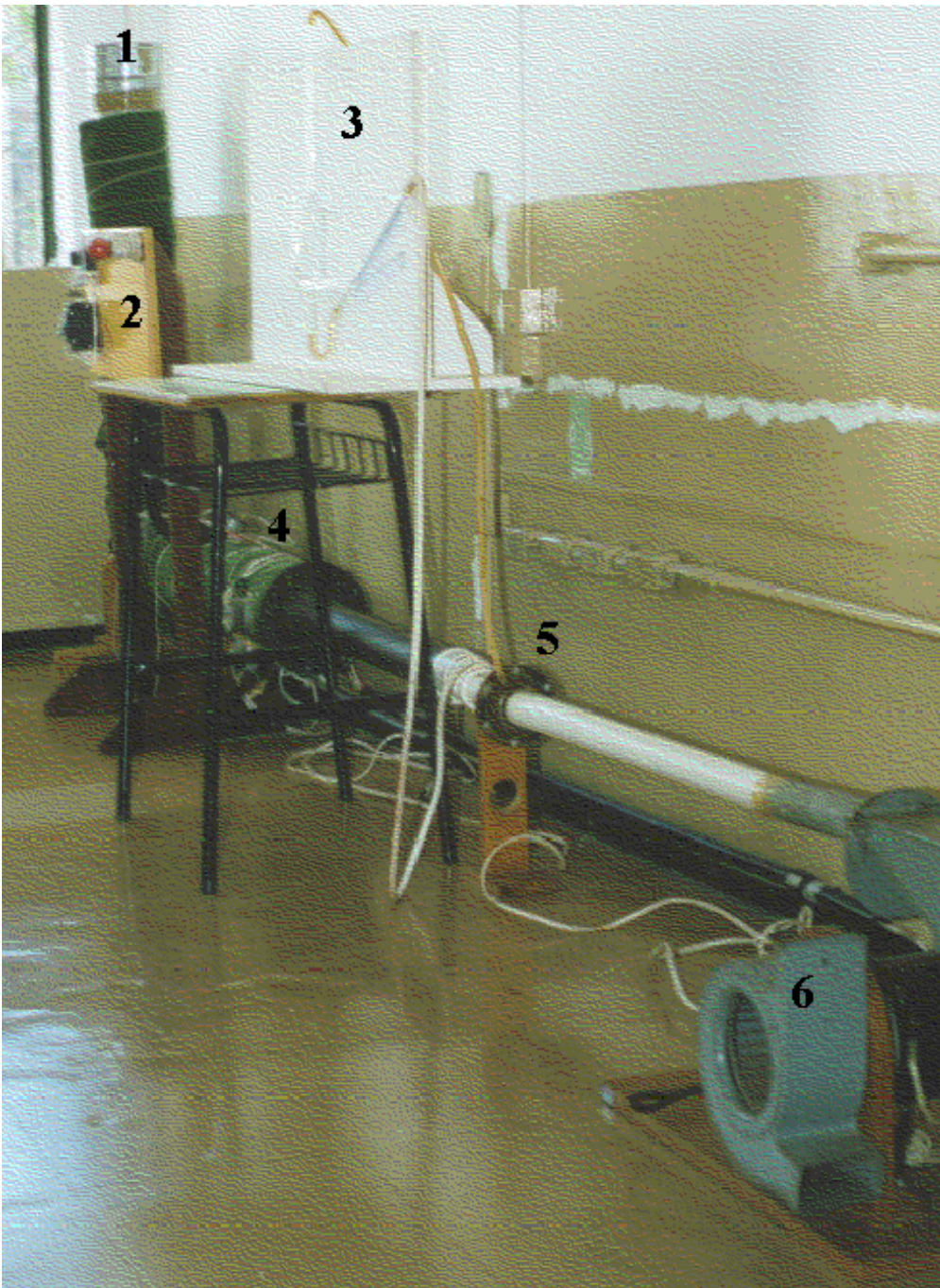
ANEXO

FOTOS DOS EQUIPAMENTOS



Vista parcial do equipamento de secagem em camada fina.

1. Peneira de secagem em camada fina; 2. Interruptores para controle da temperatura dos aquecedores; 3. Lâmpada de segurança; 4. Resistores.



Vista geral do equipamento de secagem em camada fina.

1. Área de secagem ; 2. Controle da temperatura dos aquecedores; 3. Manômetro; 4. Câmara de aquecimento; 5. Placa de orifício; 6. Ventilador.