

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Simulação da Secagem de Produtos  
Biológicos em Secador de Fluxos Cruzados**

**Autor: Raimundo Pereira de Farias**

**Orientadores: Antonio Gilson Barbosa de Lima  
José Jefferson da Silva Nascimento**

Campina Grande, Abril de 2003  
PB., Brasil

---

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

# **Simulação da Secagem de Produtos Biológicos em Secador de Fluxos Cruzados**

---

**Autor: Raimundo Pereira de Farias**  
**Orientadores: Antonio Gilson Barbosa de Lima**  
**José Jefferson da Silva Nascimento**

**Curso: Engenharia Mecânica**  
**Área de Concentração: Térmica e Fluidos**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campina Grande, Abril de 2003  
PB – Brasil



F224s Farias, Raimundo Pereira de.  
Simulação da secagem de produtos biológicos em secador de fluxos cruzados / Raimundo Pereira de Farias. - Campina Grande, 2003.  
69 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2003.  
"Orientação : Prof. Dr. Antônio Gilson Barbosa de Lima, Prof. Dr. José Jefferson da Silva".  
Referências.

1. Secagem. 2. Produtos Biológicos. 3. Fluxos Cruzados. 4. Dissertação - Engenharia Mecânica. I. Lima, Antônio Gilson Barbosa de. II. Nascimento, José Jefferson da Silva. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621:631.365(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Simulação da Secagem de Produtos  
Biológicos em Secador de Fluxos Cruzados**

Dissertação Aprovada em 11 de Abril de 2003



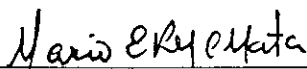
---

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Presidente  
UFCG / CCT / DEM



---

Prof. Dr. José Jefferson da Silva Nascimento  
UFCG / CCT / DEM



---

Prof. Dr. Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata  
UFCG/CCT/DEAg



---

Prof. Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho  
UFCG / CCT / DEM

Campina Grande, Abril de 2003.  
PB, Brasil

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus queridos pais: José Pereira de Sousa e Josefa Olindina da Conceição (in memoriam) e aos meus irmãos por tudo que me deram de bom na vida, amor, carinho, educação, compreensão e estímulo para vencer os obstáculos da vida e alcançar os objetivos desejados.

À minha esposa Maria José e aos meus filhos: Keitowny, Daiane, Hiure e Rodolfo, pelo amor de todos, o companherismo e o incentivo, o que me proporcionou estímulo e coragem, para a execução da tarefa e conseqüentemente a conclusão deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, por sua infinita bondade, por iluminar os caminhos que devo trilhar

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsa de estudo, visando com isso melhorar o nível tecnológico do grupo de engenheiros que estão ao nível de graduação.

Ao meu Orientador Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela orientação, dedicação e ensinamento dirigido a este mestrado, o que me motivou para o andamento e conclusão deste trabalho.

Ao meu Orientador Dr. José Jefferson da Silva Nascimento, por prestar um relevante serviço de orientação no andamento deste trabalho.

Ao colega Deivton Costa Santiago pela sua valiosa contribuição para a conclusão deste trabalho.

Aos meus colegas de mestrado pela orientação imediata durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais e irmãos, a minha esposa e filhos, pelo incentivo e apoio, durante as etapas deste trabalho.

*Não basta ensinar ao homem uma especialidade. Porque se tornará assim uma máquina inutilizável, mas não uma personalidade.*

*É necessário que adquira um sentimento, um senso prático daquilo que vale apenas ser compreendido, daquilo que é belo, do que é moralmente correto.*

*Albert Einstein*

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Revisão da literatura.....	5
2.1	Processo de Secagem.....	5
2.2	Modelos Matemáticos.....	7
2.2.1	Camada fina.....	7
2.2.2	Modelos empíricos e semi-empíricos.....	8
2.2.3	Modelos difusivos.....	10
2.2.4	Camada espessa.....	11
2.2.4.1	Modelo da Universidade Estadual de Michigan.....	11
2.2.4.2	Outros Modelos.....	18
3	Modelagem Teórica.....	26
3.1	Caracterização do problema.....	26
3.2	Modelagem matemática.....	27
3.3	Solução numérica.....	30
3.4	Propriedades termofísicas do grão de milho ,do ar e da água.....	33
3.5	Simulação da condensação de água.....	34
4	Resultados e Discussões.....	36
5	Conclusões e Sugestões.....	53
5.1	Conclusões.....	53
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	54
	Referências Bibliográficas.....	55
	Anexo.....	63



## RESUMO

FARIAS, Raimundo Pereira de, *Simulação da Secagem de Produtos Biológicos em Secador de Fluxos Cruzados*. Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2003. 84. p. Dissertação (Mestrado).

O presente trabalho, apresenta uma modelagem matemática para descrever a secagem de produtos biológicos em secador de fluxos-cruzados. O modelo é baseado nos balanços de massa e energia, escritos para um volume diferencial localizado numa posição arbitrária da camada de sólido. Para obter-se a solução numérica das equações governantes, utilizou-se o método dos volumes finitos e o esquema "upwind" como função de interpolação para os termos convectivos. Como aplicação, a metodologia foi usada para descrever o processo de secagem de grão de milho. Vários resultados do efeito das condições do ar e espessura do leito ao longo do processo de secagem são apresentados e analisados. Verificou-se que, o método numérico dos volumes finitos pode ser usado para simular processo de secagem em um secador de fluxos cruzados, devido ao bom ajuste obtido pela comparação entre dados numéricos e experimentais.

### *Palavras chaves:*

Secador, Secagem, Fluxos cruzados, Volumes finitos, Milho.

## ABSTRACT

FARIAS, Raimundo Pereira de, *Biological Products Drying Simulation in Crossflow Dryer*.  
Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de  
Campina Grande, 2003. 84 p. Dissertação (Mestrado).

This work presents a mathematical modelling to describe the drying of biological products in crossflow dryer. The model is based on the mass and energy balance, written for a differential volume located in an arbitrary position of the solid layer. To obtain the numerical solution of the governing equations, it was used the finite-volume method and the upwind scheme as interpolation function for the convective terms. As application, the methodology was used to describe the drying process of corn grain. Several results of the effect of the air-drying conditions and thickness of the bed along the drying process presented and analyzed. It was verified that, the numerical method of the finite-volumes could be used to simulate drying process in a crossflow dryer, due to the good agreement obtained by the comparison between numerical and experimental data.

### *Key Words:*

Dryer, Drying, Crossflow, Finite-volume, Corn.

## LISTA DE FIGURA

Figura 2.1	Volume elementar de uma camada de grão	12
Figura 2.2	Esquema do volume de controle diferencial	19
Figura 2.3	Camada elementar de um leito granular	23
Figura 3.1	Esquema de um secador de esteira com fluxos cruzados	27
Figura 3.2	Fração do volume de sólido	27
Figura 3.3	Esquema numérico e o volume de controle utilizado	30
Figura 4.1	Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Fortes,1978) do conteúdo de água médio durante o processo de secagem do grão de milho amarelo em $y \approx 0,0$ m e $H = 0,1$ m	39
Figura 4.2	Temperatura dos grãos de milho amarelo durante o processo de secagem para as condições de $y \approx 0,0$ m e $H = 0,1$ m	39
Figura 4.3	O efeito da temperatura do ar no conteúdo de água do grão de milho durante o processo de secagem	40
Figura 4.4	Efeito da temperatura do ar de secagem na temperatura do produto durante o processo de secagem	41
Figura 4.5	Variação da temperatura do ar dentro do leito de 0,20m, para nove tempos de secagem, com UR = 1%	42
Figura 4.6	Variação da temperatura do ar dentro do leito, para nove tempos de secagem com UR = 10%	43
Figura 4.7	Variação da temperatura do grão de milho dentro do leito, para nove tempos de secagem. Com UR = 1%	44
Figura 4.8	Variação da temperatura do grão de milho dentro do leito, para nove tempos de secagem, com UR = 10%	45
Figura 4.9	Variação da temperatura do ar dentro do leito, para nove tempos de secagem com UR = 60%	46
Figura 4.10	Variação da temperatura do grão de milho dentro do leito, para nove tempos de secagem. Com UR = 60%	47
Figura 4.11	O efeito da altura da camada de grãos de milho sob o conteúdo de água do produto durante o processo de secagem.	48
Figura 4.12	O efeito da altura da camada de grãos de milho sob a temperatura do produto durante o processo de secagem.	48
Figura 4.13	O efeito da umidade relativa do ar de secagem sob a temperatura do grão de milho a) $T = 50^{\circ}\text{C}$ e b) $T = 80^{\circ}\text{C}$ .	49

Figura 4.14 O efeito da umidade relativa do ar de secagem sob o conteúdo de água do grão de milho para as temperaturas de : a) $T = 50^{\circ}\text{C}$ e b) $T = 80^{\circ}\text{C}$ ..	50
Figura 4.15 O efeito da velocidade do ar no conteúdo de água do grão de milho durante o processo de secagem	51
Figura 4.16 O efeito da velocidade do ar sob a temperatura do grão de milho durante o processo de secagem	52

## LISTA DE TABELA

Tabela 1.1	Tipos de secadores e algumas de suas aplicações	04
Tabela 4.1	Dados usados onde se varia apenas a temperatura do ar .	36
Tabela 4.2	Dados usados onde se varia a umidade relativa do ar e a temperatura do ar de secagem é de $T = 50^{\circ}\text{C}$	37
Tabela 4.3	Dados usados onde se varia a umidade relativa do ar e a temperatura do ar de secagem é de $T = 80^{\circ}\text{C}$	37
Tabela 4.4	Dados usados onde se varia a altura da camada de produto para uma temperatura do ar de secagem de $T = 80^{\circ}\text{C}$	38
Tabela 4.5	Dados usados onde se varia a altura da camada de produto, para uma temperatura do ar de secagem de $T = 50^{\circ}\text{C}$	38
Tabela 4.6	Dados usados onde se varia a velocidade do ar de secagem.	38

## NOMENCLATURA

### Letras Latinas

$A^*$	Área específica	$[m^2/m^3]$
$c$	Calor específico	$[J/kgK]$
$c_a$	Calor específico do ar seco à pressão constante	$[J/kgK]$
$c_{as}$	Calor específico do ar seco	$[J/kgK]$
$c_{ps}$	Calor específico do produto seco	$[J/kgK]$
$c_p$	Calor específico do produto	$[J/kgK]$
$c_v$	Calor específico do vapor d'água, a pressão constante.	$[J/kgK]$
$c_w$	Calor específico da água	$[J/kgK]$
$d\bar{M}/dt,$ $\partial\bar{M}/\partial t$	Taxa de difusão	$[kg/kg/s]$
$D$	Coefficiente de difusão	$[m^2/s]$
$D^*$	Difusividade do ar	$[m^2/s]$
$D_{va}$	Coefficiente de difusão vapor no ar	$[m^2/s]$
$D_v$	Coefficiente de difusão do vapor	$[m^2/s]$
$D_{wa}$	Coefficiente de difusão de água ar	$[m^2/s]$
$f_1, f_2, f_3, f_4$	Equação da camada fina apropriada	$[-]$
$G_a$	Fluxo de massa do ar	$[kg/m^2s]$
$H$	Espessura da camada de produto	$[m]$
$h_c$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$[W/m^2K]$
$h_m$	Coefficiente de transferência de massa	$[m/s]$
$h^*_{fg}$	Calor latente de vaporização da água do produto	$[J/kg]$
$k$	Condutividade térmica	$[W/m^2K]$
$k_a$	Condutividade térmica do ar	$[W/m^2K]$
$k_{ep}$	Condutividade térmica efetiva do produto	$[W/m^2K]$
$k_p$	Coefficiente de condutividade térmica do produto	$[W/m^2K]$
$\dot{m}$	Fluxo de massa	$[kg/s]$
$\bar{M}$	Teor de umidade médio	$[kg/kg]$
$\bar{M}_e$	Teor de umidade de equilíbrio	$[kg/kg]$
$\bar{M}_o$	Teor de umidade inicial	$[kg/kg]$

$\bar{M}_f$	Teor de umidade final	[kg/kg]
$M_{ant}$	Umidade anterior do produto	[kg/kg]
$m_{ps}$	Massa do produto seco	[kg]
$P_a$	Pressão do ar	[Pa]
$P_{atm}$	Pressão atmosférica	[Pa]
$P_{vs}$	Pressão de vapor saturado	[Pa]
$S$	Área de troca de calor	[m <sup>2</sup> ]
$R$	Constante particular do gás	[J/kgK]
$r$	Posição radial interna do grão de milho	[m]
$T$	Temperatura do ar	[°C]
$T_{ant}$	Temperatura anterior do ar	[°C]
$T_{ent}$	Temperatura de entrada do ar	[°C]
$T_f$	Temperatura final do ar	[°C]
$T_{abs}$	Temperatura absoluta	[K]
$t$	Tempo	[s]
$UR$	Umidade relativa do ar	[%]
$w_a$	Velocidade do ar	[m/s]
$u_p$	Velocidade do produto	[m/s]
$x$	Razão de umidade do ar	[kg/kg]
$x_{af}$	Razão de umidade do ar, final	[kg/kg]
$x_{ao}$	Razão de umidade do ar, inicial	[kg/kg]
$x_{sa}$	Razão de umidade do ar saturado	[kg/kg]
$x_f$	Razão de umidade final do ar	[kg/kg]
$x_o$	Razão de umidade inicial do ar	[kg/kg]
$y$	É a posição com relação um ponto dentro da camada de produto	[m]
$\Delta\bar{H}_{dv}$	Calor isostérico médio	[J/kg]

### **Letras gregas**

$\rho_p$	Densidade do produto	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{ps}$	Densidade do produto seco	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_a$	Densidade do ar	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\theta$	Temperatura do produto	[°C]
$\bar{\theta}$	Temperatura média do produto	[°C]
$\theta_{ant}$	Temperatura anterior do produto	[°C]
$\theta_f$	Temperatura final do produto	[°C]
$\varepsilon$	Porosidade do leito	[decimal]
$\sigma$	Coefficiente de tortuosidade	[decimal]
$\alpha$	Difusividade térmica do milho	[m <sup>2</sup> /s]

### *Superescrito*

\*            adimensional  
O            anterior

### *Subescrito*

a            ar  
abs        absoluta  
ant        anterior  
atm        atmosfera  
c            convecção  
e            equilíbrio  
cnt        entrada  
f            final  
m           massa  
o            inicial  
p            produto  
s            seco  
sat        saturado  
v            velocidade  
w            água



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Produtos agrícolas, tais como frutas, vegetais e grãos de cereais, têm atualmente levado um grande número de pesquisadores a fazerem estudos nos vastos campos da pesquisa, controle, secagem e armazenamento, com o objetivo de preservar a safra e conseqüentemente abastecer o mercado consumidor, interno e externo que cresce proporcionalmente a população mundial.

A produção de grãos de cereais tem sido aumentada rapidamente em função de novas técnicas de produção, variedades de grãos, fertilizantes e métodos de controle de insetos e pragas. Isto proporciona maior produtividade agrícola e conseqüentemente maior necessidade de pesquisa, técnica de colheita, manuseio e armazenagem dos produtos, com o objetivo de preservar a safra colhida.

A secagem artificial dos grãos permite uma série de vantagens que são descritas abaixo (Brooker et al., 1992):

- Colheita prematura, que reduz as perdas de campo devido a perdas naturais;
- planejamento da época da colheita para fazer melhor uso da mão-de-obra, porque a colheita dependente do conteúdo de água do grão no campo;

- armazenamento por tempo longo sem deterioração;
- permite aos agricultores armazenar o produto e em poucos meses depois da colheita, conseguir alto preço, podendo se obter um aumento no preço de 25 a 100%;
- mantém a viabilidade das sementes, pois devido a remoção da umidade, evita-se a possibilidade de aquecimento do produto com subsequente redução ou destruição da germinação;
- permite ao agricultor vender um produto de melhor qualidade

Existe uma gama de secadores que atendem às necessidades específicas de determinados processos, alguns são sofisticados, outros sumariamente simples, atendendo somente a algumas peculiaridades do processo de secagem.

A adoção de uma determinada técnica de secagem depende de vários fatores diversificados, como: o valor do investimento, a escala de produção, o custo de energia, a área disponível, a qualidade final do produto, o tipo de operação (contínua ou intermitente), o nível adequado de automatização, a segurança contra acidentes, o nível de poluição tolerável no local de produção, a sazonalidade no suprimento de matéria prima, a dificuldade de treinamento de operadores, a dependência ou independência da tecnologia de terceiros, as dificuldades na reposição das peças e muitos outros (Bernauer e Rocha, 1984).

A grande variedade de produtos que passa pelo processo de secagem nos diferentes ramos industriais envolve uma grande quantidade de projeto de secadores. Entre os diferentes tipos de secadores, destacam-se os seguintes grupos (Strumillo e Kudra, 1986):

- Secadores com leito estacionário: é aquele em que o material pode ser considerado como uma camada estacionária. Nesse secador, enquanto calor está sendo fornecido ao produto, a água está sendo removida do mesmo;
- Secadores com leito móvel: é aquele em que o leito de partículas move-se por ação de força gravitacional ou por ação de forças mecânicas.

A seleção de um determinado secador para uma operação particular de secagem é um problema difícil e complexo em virtude da existência de muitos fatores que afetam a escolha. Em particular, pode-se citar as propriedades do produto que vai passar pelo processo de

secagem, o método de aquecimento e as trocas de energia entre o produto e o ar de secagem, além de que em certos tipos de produtos biológicos a qualidade destes pós-secagem é extremamente importante.

De uma forma geral, pode-se dizer que as três mais importantes considerações na seleção de secadores são: a qualidade do produto; a capacidade de secagem e o investimento que se faz necessário para obter determinada capacidade de produção. A Tabela 1 resume os vários tipos de secadores aplicados à secagem de uma grande variedade de produtos alimentares.

Visando dar uma contribuição nas áreas de secagem e simulação numérica, os objetivos deste trabalho são:

- a) Modelar matematicamente e simular a secagem de um produto agrícola em secador de operação contínua e de fluxos cruzados.
- b) Analisar o efeito das condições do ar de secagem, conteúdo de água e temperatura do produto sobre o tempo de secagem, consumo de energia e a qualidade do produto no final do processo de secagem.

Tabela 1.1 - Tipos de secadores e algumas de suas aplicações

TIPO DE SECADOR	PRODUTO
De tambor	leite, suco vegetal, banana, amido, sopa, alimento infantil pré-digerido
De prateleira à vácuo	produção limitada de certos alimentos
Contínuo à vácuo	frutas, vegetais, carnes, café
De correia contínuo (atmosférico)	vegetais e grãos
De leito fluidizado	vegetais e grãos
Estático	grãos
De esteira-espuma	sucos
Por congelamento	carnes, café, frutas, vegetais
Spray	ovos inteiros, gema de ovos, sangue albumina, leite, café, chá, purê de frutas
Rotativo	subprodutos da indústria de carnes não utilizados como alimentos, grãos, maçã, lactose, amido
Cabine ou compartimento	frutas e vegetais
Com queimadores	maçã, alguns vegetais (lúpulo) e ocasionalmente batatas
Túnel	frutas e vegetais
Pneumático	amido, polpa de frutas, bagaço de cana

Fonte: Sokhasanj e Jayas (1995), Jayaraman e DasGupta (1995), Santos (1997), Nebra (1985)

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO DA LITERATURA**

#### **2.1 O processo de secagem**

Operações de desidratação ou secagem são importantes passos nas indústrias química e de processamento de alimentos, como também no armazenamento de grãos e outros produtos biológicos. Durante a secagem de produtos biológicos ocorrem variações nas suas características físicas, químicas e biológicas, dependendo da intensidade da temperatura, podendo comprometer a qualidade do grão, a germinação ou até mesmo a perda do produto.

Um vasto número de pesquisadores tem trabalhado bastante para analisar o processo de secagem. Uns consideram as condições externas do ar, tais como, temperatura, umidade relativa e velocidade, correlacionadas à taxa de secagem do produto enquanto outros consideram as condições internas ao produto com ênfase nos mecanismos de movimento de umidade e seus efeitos sobre o mesmo. O conhecimento dos mecanismos de movimento de água no interior dos materiais é de fundamental importância e precede a tentativa de descrever a migração de água na massa de um produto.

Várias teorias de secagem foram propostas para descrever o transporte de água e calor em meios capilares porosos, as quais são listadas a seguir:

- Teoria da difusão líquida;
- Teoria da vaporização-condensação;
- Teoria capilar;
- Teoria de Kricher;
- Teoria de Luikov;
- Teoria de Philip e De Vrie;
- Teoria de Berger e Pei;
- Teoria de Fortes e Okos

Uma detalhada discussão sobre as teorias de secagem pode ser encontradas em Fortes e Okos (1980), Alvarenga et al. (1980), Keey (1992), Lima (1995), Mariz (1986), Dand, citado por Ibrahim et al. (1997).

O fenômeno da migração de água no interior do produto biológico, ainda não é bem conhecido. Alguns autores afirmam que a migração de água pode ser uma combinação de movimentos de água por difusão de líquido e de vapor, cada um predominando em certas etapas da secagem (Steffe e Singh, 1980). De acordo com as teorias listadas acima, os seguintes mecanismos de transporte de água em produtos biológicos têm sido fornecidos pela literatura (Fortes e Okos, 1980; Hall, 1980; Strumillo e Kudra, 1986; Brooker et al., 1992 e Lima, 1995):

- transporte por difusão líquida: ocorre devido a gradientes de concentração de água;
- transporte por difusão de vapor: ocorre devido a gradientes de concentração de água e pressão parcial do vapor (causado por gradientes de temperatura);
- transporte por efusão (escoamento Knudsen): ocorre quando o diâmetro médio dos poros por onde o vapor migra, tem tamanho equivalente ao das moléculas que compõem o vapor. É importante para condições de alto vácuo, como por exemplo, secagem por congelamento;
- transporte de vapor por termo-fusão: ocorre devido a gradientes de temperatura;

- transporte de líquido por forças capilares: ocorre devido a fenômenos de capilaridade:

- transporte de líquido por pressão osmótica: ocorre devido a força osmótica;
- transporte de líquido por gravidade: ocorre devido a ação de forças gravitacionais
- transporte de líquido e de vapor: ocorre, devido à diferença de pressão total, causada pela pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade.

## 2.2 Modelos Matemáticos

Modelos matemáticos para descrever o processo de secagem tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores por várias décadas. Recentemente mais e mais modelos de secagem sofisticados são apresentados. Na tentativa de correlacionar dados experimentais da secagem de um material particular à um modelo matemático, os pesquisadores da área de secagem, tem difundido uma gama de modelos que representam a cinética de secagem deste particular material.

Dependendo da espessura da camada do material estudado, estes modelos podem ser classificados em modelos de secagem em camada fina (modelos da espessura de uma partícula) e em camada espessa (modelos que se referencia a altura do secador). A importância prática da secagem em camada fina é muito limitada, porque geralmente os materiais são secos em camadas espessas: estacionárias ou em movimento. Entretanto, como será mostrado posteriormente, os modelos mais usados pelos pesquisadores levam em consideração propriedades termo-físicas, cinéticas de secagem e balanço de massa e energia no secador, ratificando assim a necessidade de se dispor de uma equação para a cinética de secagem do material em camada fina em determinadas condições operacionais pré-estabelecidas.

### 2.2.1 Camada fina

As equações de secagem em camada fina podem ser classificadas em teóricas, semi-empíricas e empíricas. Estas equações negligenciam os efeitos de variação de temperatura no processo de secagem, assumindo que o grão alcança a temperatura média do ar imediatamente, no começo do processo de secagem.

As equações empíricas possuem uma relação direta entre o conteúdo de água e o tempo de secagem, enquanto que as semi-empíricas são análogas a lei de Newton do resfriamento, assumindo que a taxa de secagem é proporcional a diferença entre o conteúdo de água do produto e seu respectivo conteúdo de água de equilíbrio para as condições de secagem especificadas. As equações teóricas geralmente utilizam difusão de líquido e/ou vapor dentro do produto, e aplicam a equação de difusão.

As equações empíricas e semi-empíricas assumem processo isotérmico e negligencia a resistência de transferência de massa interna, enquanto que as teóricas admitem equilíbrio de temperatura entre o produto e sua vizinhança, como também considera desprezível a transferência de massa na superfície do produto.

Os modelos concentrados descrevem as taxas de transferência de calor e massa para o grão inteiro, ignorando as resistências internas de transferência de calor e massa. Em contraste, os modelos distribuídos descrevem as taxas de transferência de calor e massa como função da posição dentro do grão e do tempo de secagem. Eles consideram as resistências externa e interna. Muitas equações concentradas são derivadas das equações distribuídas sob pequenas considerações. Os modelos de parâmetros concentrados são aplicados para número de Biot de transferência de massa menor que 10 e número de Biot de transferência de calor menor que 1,5 (Parti, 1993). Obviamente esta afirmação depende da geometria do corpo em estudo.

### 2.2.2 Modelos empírico e semi-empírico

De acordo com Parti (1990), Simmonds et al. foram os primeiros pesquisadores a aplicarem o modelo semi-empírico análogo a lei de Newton do resfriamento, sugerido por Lewis, citado por Jayas et al. (1991). Neste modelo, a taxa de secagem é função dos teores de umidade do produto em qualquer tempo de secagem e do seu teor de umidade de equilíbrio nas condições de secagem. Em símbolos tem-se:

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = -K_1(\bar{M} - \bar{M}_e) \quad (2.1)$$



Definindo  $M^*=(M-Mc)/(Mo-Me)$  e integrando a Equação 2.1 ao longo do tempo, tem-se:

$$\bar{M}^* = \exp(-K_1 t) \quad (2.2)$$

Este modelo é também conhecido como a lei exponencial. Deve ser mencionado que no caso de se determinar a taxa de umidade pela Equação 2.1,  $K_1$  depende do tempo de residência também, além disso, Misra e Brokker (1980), encontraram que a UR também tem um efeito na taxa de secagem. Assim, apesar desta equação ter sido bastante aplicada sucessivamente por numerosos pesquisadores, este modelo não apresentou resultados satisfatório em alguns casos, e modificações são então requeridas. A consideração em que a Equação 2.2 está baseada tem alguma insuficiência devido à linearidade das isotermas de sorção da maior parte dos produtos serem observadas apenas dentro da faixa de UR entre 0,2 e 0,8 (Beke e Vaz, 1994).

Barre et al. (1971), afirma que o efeito da velocidade na constante de secagem é negligenciado, no entanto há ampla evidência que a velocidade tem amplo efeito na constante de secagem em leito espesso, e propõe modificações na equação para o cálculo da constante de secagem.

Uma pequena modificação na equação do modelo da lei exponencial que envolve a adição de um termo exponencial na variável tempo gera um novo modelo exponencial mais preciso, para descrever as variações dos dados medidos, especialmente para o 1º estágio do processo de secagem. Este modelo é expresso por:

$$\bar{M}^* = A_1 \exp(-K_1 t^{K_2}) \quad (2.3)$$

Este modelo é conhecido como equação de Page para camada fina (Parti, 1990; Zhang e Litchfield, 1991; Brooker et al., 1992; Sokhansanj, 1984; Jayas et al., 1991; Lima e Rocha, 1997; Park et al., 1997; Mata e Menegalli, 1997a; Soponronnarit et al., 1996).

Convém ressaltar que em todos os modelos aqui referenciados, as constantes de secagem  $K_i$ , podem ser determinadas sem referência a forma e a variações dimensionais do material secado. Isto pode ser vantajoso em casos onde a geometria da partícula não pode ser

especificada com precisão, ou onde não ocorrem grandes variações geométricas do produto durante a secagem (Rapusas e Driscoll, 1995).

Para finalizar, com a discussão antecedente, pode-se mostrar, de uma forma geral, que as variações do teor de umidade do produto secando em um modelo de secagem em camada fina sob condições constantes do ar pode ser expresso pela equação seguinte:

$$\bar{M}^* = f(T_a, UR_a, v_a, \bar{M}_o, t, \text{encolhimento e outros}) \quad (2.4)$$

Contudo, convém ressaltar a importância do conhecimento dos efeitos da secagem sobre as propriedades químicas e biológicas do produto secado, uma vez que afetam sensivelmente os fenômenos de transferência de massa, principalmente em alimentos.

### 2.2.3 Modelos difusivos

Diversos autores consideram a difusão de água líquida como principal mecanismo de transporte de água em produtos (Zogzas e Maroulis, 1996; Sarker et al., 1994; Brooker et al., 1992; Liu e Simpson, 1997; Park et al., 1997; Freire e Chau, 1997; Baroni e Hubinger, 1997; Sabadini et al., 1997; Park e Brod, 1997; Tolaba et al., 1997; Quintana-Hernandez et al., 1997; Li et al., 1997; Lima, (1999); Carmo, (2000); Oliveira, (2001); Farias, (2002); Nascimento, (2002).

A segunda lei de Fick, tem sido muito utilizada, uma vez que estabelece a difusão de água em termos do gradiente de concentração no sólido:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.5)$$

Em geral o coeficiente de difusão  $D$ , é considerado constante, ou dependente da temperatura e/ou do conteúdo de água do produto. Contudo, vale salientar que a compressão mecânica reduz a porosidade e a difusividade de água efetiva; portanto a pressão tem efeito negativo na difusividade de água, (Karathanos et al., citados por Saravacos, 1995).

## 2.2.4 camada espessa

A secagem de uma só partícula individualmente ou até mesmo de uma camada de material de pequena espessura, não altera as condições do ar de secagem significativamente. No entanto, quando o material é superposto dentro do secador, formando uma camada espessa, as propriedades termodinâmicas do ar de secagem são modificadas acentuadamente. Neste caso, seu potencial de secagem diminui. Em virtude disto, os modelos de secagem em camada espessa são mais completos que os de camada fina, possuindo equações mais complexas que levam em consideração as transferências de calor e massa entre o produto e o ar que o circunda.

### 2.2.4.1 Modelo da Universidade Estadual de Michigan

O modelo de secagem da Universidade Estadual de Michigan tem sido usado para simular a secagem de sólido e baseia-se nas prévias idéias de Shumann, Van Arsdel e Klapp, citados por Bakker-Arkema et al. (1974).

Neste modelo, citado por Bakker-Arkema et al. (1974), Martins Cavalcante e Mata (1984) e Mata (1985) e Brooker et al (1992), foram assumidas as seguintes suposições:

- a redução de volume durante a secagem é desprezível;
- o gradiente de temperatura dentro dos grãos individualmente é desprezível;
- a condução de calor de partícula para partícula é desprezível;
- a distribuição do ar na massa de grãos é uniforme;
- as paredes do secador são adiabáticas, com capacidade calorífica desprezível;
- as capacidades caloríficas do ar e dos grãos são constantes durante pequenos intervalos de tempo;
- as variações da temperatura e a razão de umidade do ar com respeito ao tempo são desprezíveis quando comparadas com as variações de temperatura e razão de umidade com respeito à posição;

$$\frac{\partial T}{\partial t} \ll \frac{\partial T}{\partial y} \quad \text{e} \quad \frac{\partial x}{\partial t} \ll \frac{\partial x}{\partial y}$$

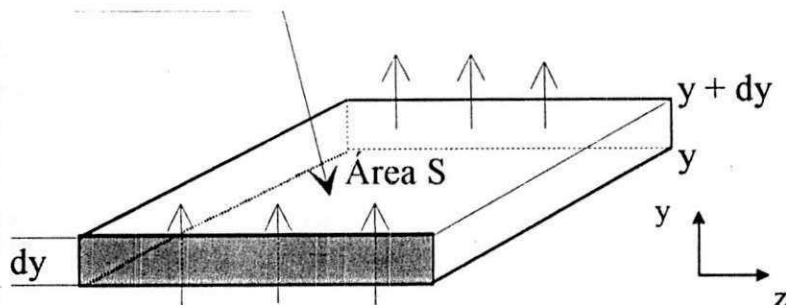
- uma equação fidedigna de secagem em camada fina e de umidade de equilíbrio é conhecida.

A seguir apresentam-se os modelos mais comumente usados de acordo com a técnica de secagem utilizada.

#### ◆ Secagem em camada fixa

O modelo de secagem em camada fixa é baseado nos balanços de massa e energia, escritas para um volume diferencial ( $Sdy$ ) localizado numa posição arbitrária da camada de produtos conforme Figura 2.1. Este modelo é aplicado para a secagem de grãos em silos e em batelada. Observe que neste modelo o produto não se move e portanto, sua velocidade é nula.

$\bar{\theta}, \bar{M}, c_p, \rho_p \cdot \varepsilon$



$x, T, w_a, \rho_a, c_a$

Figura 2.1 - Volume elementar de uma camada de grãos

Sendo assim, as seguintes equações podem ser obtidas:

- **Balço de energia para o ar.**

$$\begin{aligned}
 & [ \text{Energia que entra na área } S \text{ na posição } y ] \\
 & \quad - \\
 & [ \text{Energia que sai da área } S \text{ na posição } y+dy ] \\
 & \quad = \\
 & [ \text{Energia transferida ao produto, por convecção} ] \\
 & \quad + \\
 & [ \text{Variação, com relação ao tempo, da entalpia do ar nos espaços vazios} ]
 \end{aligned}$$

Em símbolos:

$$\begin{aligned} & (\rho_a w_a c_a + \rho_a v_a x c_v) S T dt - (\rho_a w_a c_a + \rho_a v_a x c_v) \left( T + \frac{\partial T}{\partial y} dy \right) S dt = \\ & = A \cdot h_c (T - \bar{\theta}) S dy dt + (\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \epsilon S dy \frac{\partial T}{\partial t} dt \end{aligned} \quad (2.6a)$$

Reagrupando os termos e fazendo as devidas simplificações obtém-se:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{h_c (T - \bar{\theta}) A \cdot}{\rho_a w_a (c_a + x c_v)} \quad (2.6b)$$

• **Balço de energia para o produto**

[ Energia transferida por convecção, do ar ao produto ]

=

[ Energia necessária para aquecer o produto ]

+

[ Energia necessária para evaporar a água do produto ]

+

[ Energia necessária para aquecer o vapor de água evaporada ]

Em símbolos:

$$\begin{aligned} A \cdot h_c S (T - \bar{\theta}) dy dt &= (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}) S dy \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} dt - \\ &- h \cdot_{fg} \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} dy S dt - c_v (T - \bar{\theta}) \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} dy S dt \end{aligned} \quad (2.7a)$$

Reagrupando obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{h_c A \cdot}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) + \left[ \frac{h \cdot_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \right] \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} \quad (2.7b)$$

- **Balço de massa para o ar**

[ Quantidade de vapor de água que entra na área S na posição y ]

-

[ Quantidade de vapor de água que sai da área S na posição y+dy ]

+

[ Variação da umidade do ar nos espaços vazios ]

=

[ Umidade cedida pelo produto ]

Em símbolos:

$$\rho_a w_a S x dt - \rho_a w_a S \left( x + \frac{\partial x}{\partial y} dy \right) dt + \epsilon S \rho_a \frac{\partial x}{\partial t} dy dt = \rho_p S \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy dt \quad (2.8a)$$

Reagrupando os termos e fazendo as devidas simplificações, tem-se:

$$\frac{\partial x}{\partial y} = - \frac{\rho_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.8b)$$

Os índices a, v, w, e p indicam que as propriedades que os contêm se referem ao ar, vapor, água e produto, respectivamente.

- **Balço de massa para o produto**

O teor de umidade do produto pode ser obtido usando-se uma equação empírica de camada delgada, apropriada para cada produto, que é dada por:

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_1 \quad (2.9)$$

onde (  $f_1$  ) representa uma equação de camada fina apropriada.

Para resolver qualquer equação diferencial, faz-se necessário que as condições iniciais e /ou de contorno sejam conhecidas para os modelos de secagem ao nível de secador, as

seguintes condições podem ser usadas (a) a temperatura e o conteúdo de água iniciais do grão e (b) a temperatura e a umidade absoluta inicial do ar de secagem. Para os modelos de secagem em camada fixa as condições de contorno são:

$$\begin{aligned} T(y=0,t) &= T_{ent} & \bar{\theta}(y,t=0) &= \bar{\theta}_0 \\ \bar{M}(y,t=0) &= \bar{M}_0 & x(y=0,t) &= x_{ent} \end{aligned}$$

◆ **Secagem em fluxo concorrente**

Em um secador de fluxos concorrentes o ar e o produto biológico escoam na direção  $y$ , perpendicular a  $z$ , no mesmo sentido. Os balanços de energia e de massa são obtidos de forma semelhante ao que foi feito para camada fixa. Portanto, fazendo-se os balanços de energia e de massa para o ar de secagem e para o produto, tem-se o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{-h_c A^*}{\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a c_v x} (T - \bar{\theta}) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = \left( \frac{h_c A^*}{\rho_p v_p c_p + \rho_p v_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) \right) - \left( \frac{h^*_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p v_p c_p + c_w \bar{M} \rho_p v_p} \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} \right) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial x}{\partial y} = \frac{\rho_p v_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial y} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_2 \quad (2.13)$$

onde (  $f_2$  ) representa uma equação de camada fina apropriada. Para os modelos de secagem em fluxo concorrente as condições de contorno são:

$$\begin{aligned} T(y=0,t) &= T_{ent} & \bar{\theta}(y,t=0) &= \bar{\theta}_0 \\ \bar{M}(y=0,t) &= \bar{M}_0 & x(y=0,t) &= x_{ent} \end{aligned}$$

#### ◆ Secagem em fluxo contracorrente

Em um secador de fluxos contracorrente o ar e o sólido escoam na direção  $y$ , perpendicular a  $z$ , mas em sentidos contrários.

Os balanços de energia e de massa são obtidos de forma semelhante ao que foi feito para camada fixa, obtendo-se seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{h_c A^*}{\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a c_v x} (T - \bar{\theta}) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = \left( \frac{h_c A^*}{\rho_p v_p c_p + \rho_p v_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) \right) + \left( \frac{h^*_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p v_p c_p + c_w \bar{M} \rho_p v_p} \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} \right) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial x}{\partial y} = \frac{\rho_p v_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial y} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_3 \quad (2.17)$$

onde ( $f_3$ ) representa uma equação de camada fina apropriada. Para os modelos de secagem em fluxo contracorrente as condições de contorno são:

$$T(y=L, t) = T_{ent} \quad \bar{\theta}(y=0, t) = \bar{\theta}_o$$

$$\bar{M}(y=0, t) = \bar{M}_o \quad x(y=L, t) = x_{ent}$$

#### ◆ Secagem em fluxo cruzado

Em um secador de fluxos cruzados o ar escoam na direção  $y$  e o sólido na direção  $z$ . Os balanços de energia e de massa são obtidos de forma semelhante ao que foi feito para camada fixa. Portanto, tem-se o seguinte sistema de equações:



$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{-h_c A^*}{\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a c_v x} (T - \bar{\theta}) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = \left( \frac{h_c A^*}{\rho_p v_p c_p + \rho_p v_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) \right) + \left( \frac{h^*_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p v_p c_p + c_w \bar{M} \rho_p v_p} \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} \right) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial x}{\partial y} = \frac{\rho_p v_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial z} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_4 \quad (2.21)$$

onde (  $f_4$  ) representa uma equação de camada fina apropriada. Para os modelos de secagem em fluxos cruzados as condições são:

$$\begin{aligned} T(y=0, t) &= T_{ent} & \bar{\theta}(y, t=0) &= \bar{\theta}_o \\ \bar{M}(y, t=0) &= \bar{M}_o & x(y=0, t) &= x_{ent} \end{aligned}$$

A solução analítica para os sistemas de equações obtidos a partir do modelo da Universidade Estadual de Michigan é impossível; sendo assim, usam-se técnicas numéricas de diferenças finitas ou outros métodos para sua solução.

O modelo aqui referenciado foi utilizado por Bakker-Arkema et al. (1974), para determinar o efeito da área superficial do grão nas taxas de transferência de calor e massa, com grande sucesso.

Bakker-Arkema et al. (1974) fornecem em seu trabalho o modelo da Universidade Estadual de Michigan na forma discretizada, escrito em linguagem Fortran, bem como os resultados da simulação de secagem de milho, utilizando o referido modelo.

Walker e Bakker-Arkema (1981), investigando a secagem de arroz em multi estágio, a alta temperatura, em secadores de fluxo concorrente, utilizaram o modelo da Universidade Estadual de Michigan.

Martins (1982) utilizou o modelo da Universidade Estadual de Michigan na simulação da secagem de milho em leito fixo. Neste caso, as equações diferenciais foram convertidas em diferenciais ordinárias por meio de discretização da variável espacial, utilizando um programa computacional desenvolvido por Hindmarsh.

Bakker-Arkema et al. (1974), utilizaram modelo aqui referenciado para estudar a taxa de secagem de 3 variedades de grãos: milho, arroz e trigo, em secadores de fluxo concorrente, com grande sucesso. Neste trabalho são fornecidos ainda, resultados da performance da secagem de grão em um secador de fluxo concorrente de dois estágios.

Vasconcelos e Alsina (1992) utilizaram o modelo da Universidade Estadual de Michigan para simular a secagem de feijão carioca, considerando o mesmo, segundo eles, satisfatório, com algumas restrições, após a comparação dos resultados teóricos com os experimentais.

Além dos pesquisadores citados acima, outros recentemente, também têm utilizado o modelo aqui descrito. Fasina et al. (1997) estudando resfriamento e secagem de grãos de alfafa em fluxo cruzado; Costa et al. (1997), pesquisando a secagem de sementes de soja, em fluxo concorrente e contracorrente; Li et al. (1997) simulando o processo de secagem de grão de trigo e arroz, em secadores circulares recirculante, em fluxo cruzado.

#### 2.2.4.2 Outros modelos

Franca et al. (1994), estudando a secagem contínua e intermitente de milho em leito espesso. Baseando-se na Figura 2.2 o modelo é descrito por:

$$\frac{\partial(\rho_a x)}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \rho_a \frac{\bar{v}}{\epsilon} x \right) = -\frac{\rho_p}{\epsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial(\rho_a T)}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \rho_a \frac{\bar{v}}{\epsilon} T \right) = -\frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{\epsilon(c_a + x c_v)} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial(\rho_p \bar{\theta})}{\partial t} = \frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{(c_p + c_w \bar{M})} + \frac{h_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})}{c_p + c_w \bar{M}} \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.24)$$

Na discretização do sistema de equações acima, foram utilizadas as técnicas de elementos finitos e volumes finitos. Ambas apresentaram comportamento de solução muito próximo do que foi apresentado utilizando-se o método de diferenças finitas.

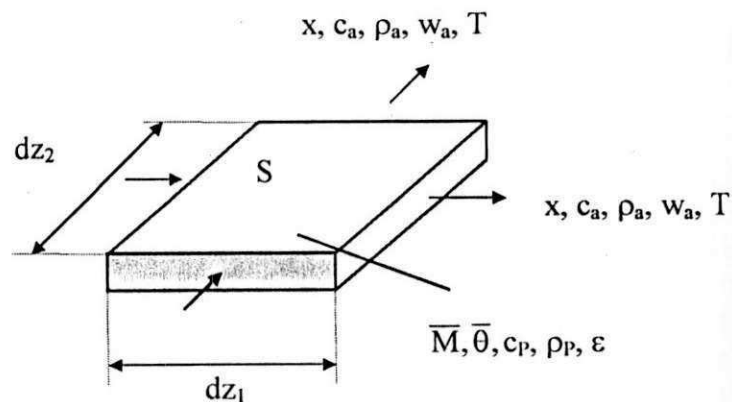


Figura 2.2 Esquema do volume de controle diferencial

Nganhou et al. (1992), propuseram um modelo unidimensional para prever a taxa de transferência de calor e massa em leito espesso de cacau, fixo. As equações de conservação, de acordo com a Figura 2.1, são as seguintes:

❖ Fase sólida

• massa

$$(1 - \epsilon) \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = (1 - \epsilon) \rho_p D \frac{\partial^2 \bar{M}}{\partial y^2} - \dot{m} \quad (2.25)$$

• energia

$$(1 - \epsilon) \rho_p c_p \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = (1 - \epsilon) k_p \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2} - \dot{m} h_{fg} + h_c A^* (T - \bar{\theta}) \quad (2.26)$$

❖ Fase gás

- massa

$$\varepsilon \rho_p \frac{\partial x}{\partial t} + \varepsilon \rho_p w_a \frac{\partial x}{\partial y} = \varepsilon \rho_a D_{va} \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} + \dot{m} \quad (2.27)$$

- energia

$$\varepsilon \rho_a c_a \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon \rho_a c_a w_a \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon k_a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - h_c A^* (T - \bar{\theta}) \quad (2.28)$$

onde  $\dot{m} = \rho_a h_m A^* (x_{sat} - x)$  é a taxa de evaporação de massa por unidade de volume.

Kameoka et al. (1986), propuseram um modelo de secagem de grão (considerado heterogêneo) em leito espesso, composto pelas equações abaixo, de acordo com a Figura 2.1:

❖ Grão

- Balanço de energia

$$(1 - \varepsilon) k_p \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial y^2} - (1 - \varepsilon) c_p \rho_p \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} - h_c A^* (T - \bar{\theta}) = 0 \quad (2.29)$$

- Balanço de massa

Para a determinação do teor de umidade médio no tempo foi utilizado o modelo de difusão líquida.

❖ Ar

- Balanço de energia

$$-\varepsilon \rho_a c_a \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_a c_a w_a \frac{\partial T}{\partial y} + k_a \varepsilon \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - h_c A^* (\theta_f - T) - \rho_p h_{fg} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = 0 \quad (2.30)$$

- Balanço de massa

$$\varepsilon \rho_a \frac{\partial x}{\partial t} + \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} = D^* \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} - \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.31)$$

com:

$$D^* = \frac{1}{0,622} \frac{D_v P \varepsilon}{RT_{abs} \sigma} \quad (2.32)$$

Fioreze et al. (1984/1985), utilizaram o modelo de Thompson, para simular a secagem de raspas de mandioca em camada espessa. Segundo os autores, o modelo se ajustou bem aos dados experimentais, com a ressalva que os dados obtidos possuem erros dentro dos limites aceitáveis do processo de secagem.

Ezeike e Otten (1981), estudando o processo cíclico de secagem de grãos, propuseram um modelo teórico baseado nas considerações termodinâmicas de distribuição de massa, trabalho e calor dentro do grão. Neste trabalho, foi investigado o comportamento dinâmico de um leito de milho submetido a fluxo de calor intermitente. As seguintes equações foram derivadas do balanço de massa e energia em um volume diferencial do leito:

a) Período de aquecimento

- Processo de transporte externo

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon \rho_a} \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} - \frac{v_o}{\varepsilon} \frac{\partial x}{\partial z} \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a c_v x)} - \frac{v_o}{\varepsilon} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{(1-\varepsilon) \rho_p c_v (T - \bar{\theta})}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a c_v x)} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{(1-\varepsilon) (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} + \frac{h_{fg} \rho_p}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.35)$$

- Processo de transporte interno

$$\frac{\partial M(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 D(T,M) \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial \theta(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \alpha(\theta, M) \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] \quad (2.37)$$

b) Período de repouso

- Processo de transporte externo

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D_{wa} \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{h_r A^* (T - \theta)}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a c_v x)} \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{(1 - \varepsilon) (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} + \frac{k_{ep}}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \quad (2.40)$$

Os processos de transporte interno são representados pelas mesmas equações já apresentadas.

Giner et al. (1996) simulando a secagem de trigo em fluxo cruzado e leito fixo, fornecem um modelo matemático de transferência de calor e massa para leito fixo. Quatro equações foram obtidas para uma camada de grãos e o ar (Figura 2.3). São elas:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = - \frac{h_c A^* (T - \bar{\theta}) - \rho_s \left( - \frac{d\bar{M}}{dt} \right) [h_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})]}{\rho_{ps} (c_{ps} + c_w \bar{M})} \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial x}{\partial z} = \frac{(1 - \varepsilon)}{G_a} \rho_{ps} \left( - \frac{d\bar{M}}{dt} \right) \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{h_c A^* (1-\varepsilon)(T-\bar{\theta})}{G_a (c_{as} + c_v x)} \quad (2.43)$$

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = \begin{cases} -(\bar{M} - \bar{M}_c) \left[ \frac{A^* \sqrt{\frac{D}{\pi t}} - 0,331 A^{*2} Dt}{1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} A^* \sqrt{Dt} + 0,331 A^{*2} Dt} \right]; & A^{*2} (Dt)^{1/2} < 0,98 \\ -(\bar{M} - \bar{M}_c) \frac{\pi^2}{a} A^{*2} D; & A^{*2} (Dt)^{1/2} > 0,98 \end{cases} \quad (2.44)$$

Segundo os autores, o modelo foi adequado para descrever os referidos processos de secagem, apresentando, no entanto, algumas recomendações para o uso do modelo em fluxo cruzado. Neste trabalho, o modelo foi validado em escala industrial, visando obter economia de energia no processo.

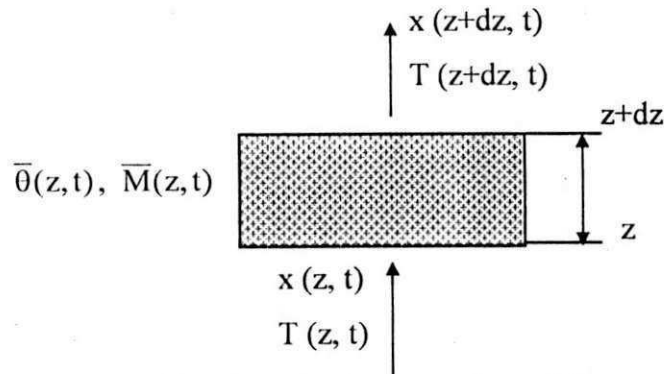


Figura 2.3 - Camada elementar de um leito granular

Jumah et al. (1996), investigando a secagem de grãos em batelada intermitente e constante, em secador tipo “spouted bed” de jato rotativo, utilizaram o seguinte conjunto de equações:

- Balanço macroscópico

$$\dot{m}_a (x_{af} - x_{ao}) = -m_{ps} \frac{d\bar{M}}{dt} \quad (2.45)$$

$$\dot{m}_a (c_a + c_v x_{ao})(T_{ent} - T_f) - m_{ps} \Delta \bar{H}_{dv} \frac{d\bar{M}}{dt} = m_{ps} (c_p + c_w \bar{M}) \frac{d\bar{\theta}}{dt} \quad (2.46)$$

- Cinética térmica e de secagem de uma partícula simples

$$\frac{\partial M(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 D \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (2.47)$$

$$\rho_s c_p \frac{\partial \theta(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 k_p \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] \quad (2.48)$$

Neste estudo, os dados numéricos foram comparados com dados experimentais, apresentando bom ajuste.

Eltigani e Bakker-Arkema (1987) estudando o controle automático de secadores de grãos de fluxo cruzado, desenvolveram um modelo matemático transiente, constituído pelas seguintes equações:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a c_v x)} - \frac{w_a}{\varepsilon} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} + \left[ \frac{c_v (T - \bar{\theta}) + h_{fg}^*}{(c_p + c_w \bar{M})} \right] \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} - u_p \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\rho_p}{\varepsilon \rho_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} + \frac{w_a}{\varepsilon} \frac{\partial x}{\partial y} \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = -u_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial z} \quad (2.52)$$

A equação de camada fina utilizada foi a do modelo de Thompson. Como aplicação, foi testado o controle da secagem de milho com grande sucesso.

Martinez-Vera et al. (1995), investigando a secagem de grãos (arroz e milho) em batelada, em leito fluidizado, propuseram um sub-modelo composto por apenas duas equações dadas por:

- Balanço de umidade

$$-m_{ps} \frac{d\bar{M}}{dt} = G_{as} (x_f - x_o) \quad (2.53)$$



- Balanço de energia

$$m_{ps}c_p \frac{d\bar{\theta}}{dt} = G_{as}(c_{as} + x_o c_v)(T_{cni} - \bar{\theta}_o) - G_{as}(x_f - x_o)\Delta\bar{H}_{dv} \quad (2.54)$$

Aliado a estas equações está o conhecimento de duas medidas de temperatura do leito, separadas por um intervalo de tempo, o que possibilita a solução do sistema de equação. Este mesmo modelo foi utilizado por Martinez-Vera et al. (1997), para simular a secagem de milho em secador de leito fluidizado, em batelada, sendo que desta feita, o modelo de difusão líquida, considerando partícula esférica, foi usado para descrever a cinética de secagem do produto, considerando o coeficiente de difusão dependente da temperatura do ar e do teor de umidade do material.

Liu e Bakker-Arkema (1997), apresentaram o desenvolvimento de modelos estocásticos para secagem de grãos. Segundo os autores, o modelo da Universidade Estadual de Michigan, que são do tipo determinístico e que calculam o conteúdo de água final do produto na saída do secador, consideram que o teor de umidade na entrada do secador é igual ao teor de umidade médio. Contudo, esta consideração é muito simplificadora, gerando assim a necessidade de modificações para modelos do tipo estocástico, que aceita distribuição não uniforme do teor de umidade inicial.

No mesmo trabalho Liu e Bakker-Arkema (1997) apresentaram os modelos para secagem em camada fina e espessa (concorrente, contracorrente e fluxo cruzado), assumindo que o teor de umidade inicial, tem distribuição normal. A comparação entre os dados experimentais e simulados, mostrou um aceitável ajuste.

Além desses trabalhos, outros pesquisadores também estudaram o processo de secagem em fluxos cruzados, por exemplo: Motta-Lima et al. (1996), Pimentel et al. (1998), Sartori (1992) e Yang Siebenmorgem (2000).

## **CAPÍTULO 3**

### **MODELAGEM TEÓRICA**

#### **3.1 Caracterização do Problema**

O problema abordado nesta pesquisa, está direcionado a modelagem matemática e simulação numérica da secagem de produtos agrícolas em um secador de fluxos cruzados. Nessas condições, foi desenvolvido um modelo melhorado baseando-se no modelo da Universidade Estadual de Michigan para a realização dos balanços de massa e energia para o ar e para o produto, considerando as propriedades variáveis, a inclusão de todos os termos transientes aplicados para o ar e produto, porosidade e condensação do vapor de água no sólido, o qual fornece equações adequadas, para descrever o processo de secagem. Neste modelo as seguintes considerações foram adotadas:

- A redução do volume durante o processo de secagem é desprezível;
- O gradiente de temperatura dentro dos grãos individualmente é desprezível;
- A condução de calor de partícula para partícula é desprezível;
- A distribuição do ar na massa de grãos é uniforme;
- As paredes do secador são adiabáticas, com capacidade calorífica desprezível;

- As capacidades caloríficas do ar e dos grãos são variáveis durante todo o processo de secagem;
- O efeito da porosidade do leito é considerado;

### 3.2 Modelagem Matemática

Para a obtenção das equações governantes, que representam os balanços de massa e energia para o ar e para o produto, considere as Figuras 3.1 e 3.2 que apresentam um esquema de um secador de esteira e fluxos cruzados e uma fração volumétrica deste secador, respectivamente.

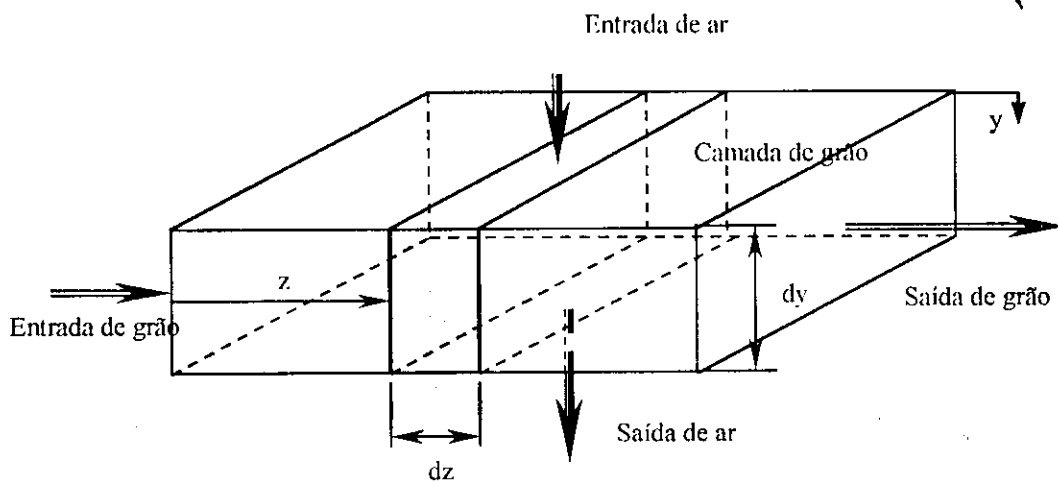


Figura 3.1 Esquema de um secador de esteira e fluxos cruzados

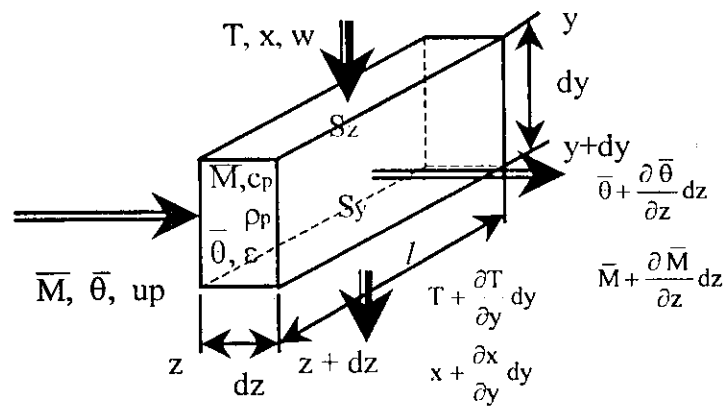


Figura 3.2 Fração do volume de sólido

A partir da Figura 3.2, as seguintes equações podem ser obtidas:

- **Balanço de energia para a o ar.**

$$\begin{aligned}
 & \text{[ Energia que entra na área } S_z \text{ na posição } y \text{ ]} \\
 & \quad - \\
 & \text{[ Energia que sai da área } S_z \text{ na posição } y+dy \text{ ]} \\
 & \quad = \\
 & \text{[ Energia transferida ao produto, por convecção ]} \\
 & \quad + \\
 & \text{[ Variação, com relação ao tempo, da energia do ar nos espaços vazios ]}
 \end{aligned}$$

Em símbolos:

$$\begin{aligned}
 & (\rho_a w_a c_a + \rho_a v_a x c_v) S_z T dt - (\rho_a w_a c_a + \rho_a v_a x c_v) \left( T + \frac{\partial T}{\partial y} dy \right) S_z dt = \\
 & = A^* h_c (T - \bar{\theta}) S_z dy dt + (\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \epsilon S_z dy \frac{\partial T}{\partial t} dt
 \end{aligned} \tag{3.1a}$$

Reagrupando os termos e fazendo as devidas simplificações, tem-se:

$$- \frac{\partial (\rho_a w_a c_a + \rho_a v_a x c_v T)}{\partial y} = A^* h_c (T - \bar{\theta}) + \frac{\partial (\rho_a c_a + \rho_a x c_v \epsilon T)}{\partial t} \tag{3.1b}$$

- **Balanço de energia para o produto**

$$\begin{aligned}
 & \text{[ Energia transferida por convecção, do ar ao produto ]} \\
 & \quad = \\
 & \text{[ Energia necessária para aquecer o produto ]} \\
 & \quad + \\
 & \text{[ Energia necessária para evaporar a água do produto ]} \\
 & \quad + \\
 & \text{[ Energia necessária para aquecer o vapor de água evaporada ]}
 \end{aligned}$$

Em símbolos:

$$A^* h_c S_z (T - \bar{\theta}) dy dt = (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}) S_z dy \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} dt - h^* f_g \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy S_z dt - c_v (T - \bar{\theta}) \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy S_z dt \quad (3.2a)$$

Reagrupando os termos e fazendo as devidas simplificações, tem-se:

$$A^* h_c (T - \bar{\theta}) = (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}) \left( \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \right) - [h^* f_g + c_v (T - \bar{\theta})] \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.2b)$$

- **Balanco de massa do ar**

[ Quantidade de vapor de água que entra na área  $S_z$  na posição  $y$  ]

-

[ Quantidade de vapor de água que sai da área  $S_z$  na posição  $y+dy$  ]

+

[ Variação da umidade do ar nos espaços vazios ]

=

[ Umidade cedida pelo produto ]

Em símbolos:

$$\rho_a w_a S_z x dt - \rho_a w_a S_z \left( x + \frac{\partial x}{\partial y} dy \right) dt + \epsilon S_z \rho_a \frac{\partial x}{\partial t} dy dt = \rho_p S_z \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy dt \quad (3.3a)$$

Reagrupando os termos e fazendo as devidas simplificações, tem-se:

$$\frac{\partial(\rho_a w_a x)}{\partial y} - \frac{\partial(\epsilon \rho_a x)}{\partial t} = \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.3)$$

- **Balanco de massa do produto**

O conteúdo de água do produto pode ser obtido usando-se uma equação empírica de camada delgada, apropriada para cada produto. Nesta pesquisa o milho foi escolhido como objeto de estudo. Neste caso, a equação para descrever a taxa de água do produto é dada por (Brokker et al, 1992).

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = \frac{M_c - \bar{M}}{3600(A^2 + \frac{Bt}{900})^{1/2}} \quad (3.4)$$

onde:

$$A = -4,1069462 + 0,0087917\bar{\theta}_p$$

$$B = 1,662.109 \exp(-0.059418\bar{\theta}_p)$$

As seguintes condições de contorno foram usadas:

$$T(y=0, t) = T_0 \quad \bar{\theta}(y, t=0) = \bar{\theta}_0$$

$$\bar{M}(y, t=0) = \bar{M}_0 \quad x(y=0, t) = x_0$$

### 3.3 Solução numérica

Para obter-se a solução desse problema transiente, foi utilizado o método numérico de volumes finitos. (Maliska, 1995; Pantankar, 1980) A Figura 3.3 ilustra um esquema numérico e o volume de controle interligado neste trabalho.

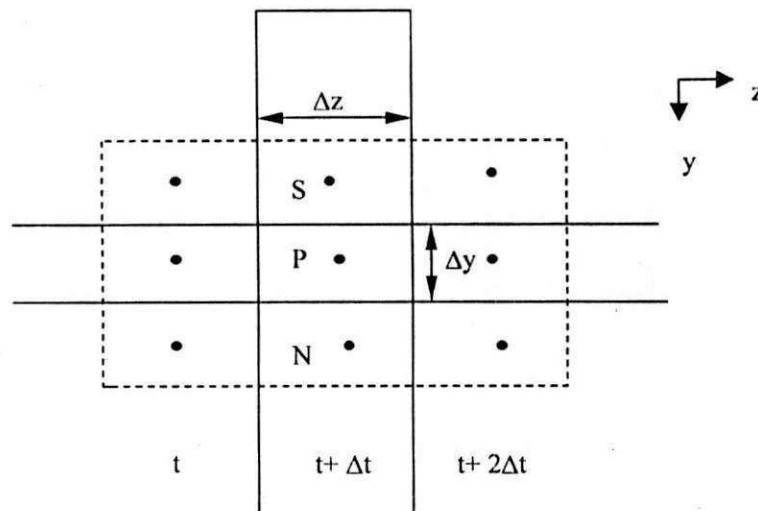


Figura 3.3 Esquema numérico e o volume de controle utilizado.

Após a integração das equações diferenciais parciais, (equações 3.1 – 3.4), no volume e no tempo, tem-se como resultado um sistema de equações lineares, na sua forma discretizada como segue.

• Balanço de energia para o ar.

$$A_p T_p = A_s T_s + A_p^o T_p^o + S_c^T \quad (3.5a)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{w_a}{\varepsilon} + \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \quad (3.5b)$$

$$A_s = \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.5c)$$

$$A_p^o = \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \quad (3.5d)$$

$$S_c^T = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.5e)$$

• Balanço de energia para o produto

$$A_p \bar{\theta}_p = A_p^o \bar{\theta}_p^o + S_c^0 \quad (3.6a)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} + \frac{h_c A^* \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} + \frac{c_v \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \quad (3.6b)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.6c)$$

$$S_c^0 = \frac{(h^*_{ig} + c_v T_p) \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t}}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \Delta z + \frac{h_c A^* \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \quad (3.6d)$$

Sendo  $\Delta t_m = (npy-1) \Delta t$  e , npy o número de pontos nodais na direção y.

• **Balço de massa do ar**

$$A_p x_p = A_s x_s + A_p^o x_p^o + S_c^x \quad (3.7a)$$

onde:

$$A_p = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} + \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.7b)$$

$$A_s = \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.7c)$$

$$A_p^o = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.7d)$$

$$S_c^x = -\frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy \quad (3.7e)$$

• **Balço de massa do produto**

$$A_p \bar{M}_p = A_p^o \bar{M}_p^o + S_c^M \quad (3.8a)$$

onde:



$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} + \frac{\Delta z}{3600(A^2 + \frac{Bt}{900})^{1/2}} \quad (3.8b)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.8c)$$

$$S_c^M = \frac{M_e \Delta z}{3600(A^2 + \frac{Bt}{900})^{1/2}} \quad (3.8d)$$

Nas equações 3.1 e 3.3 utilizou-se o esquema upwind como função de interpolação para os termos convectivos e um procedimento parabólico na direção z (Patankar, 1980; Maliska, 1995).

### 3.4 Propriedades termo-físicas do grão de milho, do ar e da água

O calor latente de vaporização, umidade de equilíbrio, densidade, calor específico, porosidade e área específica do produto, foram determinados como segue (Brokker et al., 1992).

$$h_{fg}^* = (2502.2 - 2.39T)[1 + 1.2925e^{-16.981M}].10^3 \text{ J/kg} \quad (3.9)$$

$$M_e = \frac{1}{100} \left[ -\frac{\ln(1-x)}{8.6541.10^{-5}(T+49.81)} \right]^{1/1.8634} \quad (3.10)$$

$$\rho_p = 650 \text{ kg/m}^3; \quad A^* = 784 \text{ m}^2/\text{m}^3; \quad \varepsilon = 0,44$$

$$c_p = \left[ 1.361 + 3.97 \frac{\bar{M}}{(1+\bar{M})} \right].10^3 \text{ J/kgK}; \quad (3.11)$$

O calor específico (Jumah et al, 1996), densidade, pressão de vapor saturado e atmosférica, umidade relativa, temperatura absoluta e a constante particular do ar (Rossi, 1987), foram dadas por:

$$c_a = 1,00926 - 44,04033 \cdot 10^{-5} T_a + 6,17596 \cdot 10^{-7} T_a^2 - 4,0972 \cdot 10^{-10} T_a^3 \text{ kJ / kgk} \quad (3.12)$$

$$\rho_a = \frac{P_{atm} M_a}{R \cdot T_{abs}} \quad (3.13)$$

$$T_{abs} = T_a + 273,15 \text{ K}; \quad R = 8314,34 \text{ J/ Kg}; \quad P_{atm} = 101325 \text{ Pa}$$

$$P_{vs} = 22105649,25 \text{ Exp}\{-27405,53 + 97,5413 T_{abs} - 0,146244 T_{abs}^2 + 0,12558 \cdot 10^{-3} T_{abs}^3 - 0,48502 \cdot 10^{-7} T_{abs}^4\} / [4,34903 T_{abs} - 0,39381 \cdot 10^{-2} T_{abs}^2] \quad (3.14)$$

$$UR = \frac{P_{atm} x_a}{(x_a + 0,622) \cdot P_{vs}} \quad (3.15)$$

Os calores específicos do vapor de água e água líquida foram dados por (Jumah et al., 1996/):

$$c_v = 1,8830 - 0,16737 \cdot 10^{-3} T_{abs} + 0,84386 \cdot 10^{-6} T_{abs}^2 - 0,26966 \cdot 10^{-9} T_{abs}^3 \text{ kJ / kgK} \quad (3.16)$$

$$c_w = 2,82232 + 1,18277 \cdot 10^{-2} T_{abs} - 3,5047 \cdot 10^{-5} T_{abs}^2 + 3,6010 \cdot 10^{-8} T_{abs}^3 \text{ kJ / kgK} \quad (3.17)$$

O coeficiente de transferência de calor utilizado nas equações foi obtido por (Brokker et al., 1992):

$$h_c = \begin{cases} 101,4(\rho_a w_a)^{0,59} & \text{para } \rho_a w_a \geq 0,68 \\ 99,6(\rho_a w_a)^{0,49} & \text{para } \rho_a w_a < 0,68 \end{cases} \text{ (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)} \quad (3.18)$$

### 3.5 Simulação da condensação de água

Depois de  $\bar{M}$ ,  $\bar{\theta}$ ,  $T$  e  $x$  serem calculados em cada posição no leito e em qualquer tempo do processo, a umidade relativa é calculada. Se o seu valor é maior do que 1, a saturação ou a supersaturação é assumida e a condensação é modelada. A condensação pode ocorrer quando uma alta quantidade de umidade é carregada pelo ar, o qual é resfriado quando passa através dos grãos.

Para modelar a condensação, o seguinte procedimento é executado:

- Em um determinado ponto do leito, calculados  $\bar{M}$ ,  $\bar{\theta}$ , T e x, determina-se,  $P_{vs}$  e UR usando as equações 3.14 e 3.15.
- Se  $UR > 1$ , faz-se  $x_a = x_a - \Delta x_a$  e prossegue-se ao passo c, se  $UR \leq 1$  para a condensação e vá para um novo ponto nodal.
- Com o novo  $x_a$ , determina-se os novos valores de  $\bar{M}$ ,  $\bar{\theta}$ , e x.
- Com os novos valores de T, determina-se  $P_{vs}$  e a UR e retorna-se ao passo b.

O novo valor de  $\bar{M}$  é dado por:

$$\bar{M} = \bar{M}_{ant} + \left( \frac{\rho_a W_a \Delta z}{\rho_p u_p \Delta y} \right) \cdot (x_{ant} - x) \quad (3.19)$$

O novo valor de T é calculado por:

$$T = \frac{\rho_a W_a \Delta z (c_a + c_v x) T_{ant} + \rho_p \Delta y (c_p + c_w \bar{M}_{ant}) \bar{\theta}_{ant}}{\rho_a W_a \frac{dz}{u_p} (c_a + c_v x)} + \frac{-\rho_p \Delta y (c_p + c_w M_o) T_{ant} - \rho_a W_a \left( \frac{\Delta z}{u_p} \right) h^*_{fg} (x_{ant} - x)}{\rho_a W_a \frac{\Delta z}{u_p} (c_a + c_v x)} \quad (3.20)$$

O subscrito ant significa o valor calculado da grandeza antes de ser verificado a existência da condensação. ( $UR < 1$ )

Um  $\Delta x_a = 10^{-8}$  kg/kg foi usado na simulação.

Para a obtenção dos resultados foi desenvolvido um programa no ambiente *Mathematica*<sup>®</sup>. tal programa se encontra em anexo.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para analisar os efeitos das condições do ar de secagem na remoção da água do grão de milho amarelo, seis condições foram escolhidas para simulação. As Tabelas de 4.1 à 4.6 apresentam todas as condições de secagem usadas neste trabalho.

Tabela 4.1 Dados usados onde se variou apenas a temperatura do ar.

T (°C)	30	40	50	60	70	80
U.R (%)	10	10	10	10	10	10
H (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$\theta_o$ (°C)	25	25	25	25	25	25
$w_a$ (m/s)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
x (kg de água / kg de ar seco)	0.002628163	0.004583815	0.007698948	0.01251413	0.01977672	0.03052605

Para validar a metodologia, foram comparados resultados numéricos do conteúdo de água média do grão de milho amarelo com dados experimentais obtidos, na literatura (Fortes, 1978) para secagem em leito fixo. A comparação é possível porque a velocidade do produto é muito pequena com relação a velocidade do ar, ou seja a  $u_p = 0,005\text{m/s}$ . A Figura 4.1 ilustra esta comparação durante processo de secagem em  $y \approx 0,0\text{m}$ . Verifica-se que baixos erros

foram obtidos. Na Figura 4.2 encontra-se a evolução da temperatura do milho ao longo do tempo para as condições da Figura 4.1.

Tabela 4.2 Dados usados onde se varia a umidade relativa do ar e a temperatura do ar de secagem é de  $T=50^{\circ}\text{C}$

U.R (%)	1	5	10	20	40	60
T ( $^{\circ}\text{C}$ )	50	50	50	50	50	50
$\theta_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	25	25	25	25	25	25
H (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$w_a$ (m/s)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
x (kg de água / kg de ar seco)	0.000761409	0.00382578	0.00769894	0.0155909	0.0319839	0.0492423

Tabela 4.3 Dados usados onde se varia a umidade relativa do ar e a temperatura do ar de secagem é de  $T=80^{\circ}\text{C}$

U.R (%)	1	5	10	20	40	60
T ( $^{\circ}\text{C}$ )	80	80	80	80	80	80
$\theta_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	25	25	25	25	25	25
H (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
$w_a$ (m/s)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
x (kg de água / kg de ar seco)	0.002923429	0.0148973	0.0305260	0.0642042	0.1431951	0.2427453

Nas Figuras 4.3 e 4.4 observa-se o efeito das condições do ar de secagem na entrada do leito, na remoção da água e a temperatura do grão de milho. Verifica-se que a temperatura do ar de secagem acarreta variações na temperatura do grão, mais que no teor de umidade. Porém, o aumento da temperatura do ar aumenta a taxa de secagem e o grão alcança mais depressa a temperatura do ar e sua umidade de equilíbrio. Esta situação pode causar danos à qualidade do grão.

Tabela 4.4- Dados usados onde se varia a altura da camada de produto para uma temperatura do ar de secagem de  $T=80^{\circ}\text{C}$

H (m)	0.1	0.2	0.3	0.5	1
T ( $^{\circ}\text{C}$ )	80	80	80	80	80
$\theta_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	25	25	25	25	25
U.R (%)	5	5	5	5	5
$w_a$ (m/s)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
x (kg de água / kg de ar seco)	0.01489732	0.01489732	0.01489732	0.01489732	0.01489732

Tabela 4.5 Dados usados onde se varia a altura da camada de produto para uma temperatura do ar de secagem de  $T=50^{\circ}\text{C}$

H (m)	0.1	0.2	0.3	0.5	1
T ( $^{\circ}\text{C}$ )	50	50	50	50	50
$\theta_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	25	25	25	25	25
U.R (%)	5	5	5	5	5
$w_a$ (m/s)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
x (kg de água / kg de ar seco)	0.003825788	0.003825788	0.003825788	0.003825788	0.003825788

Tabela 4.6- Dados usados onde se varia a velocidade do ar de secagem

H (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
T ( $^{\circ}\text{C}$ )	50	50	50	50	50
$\theta_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	25	25	25	25	25
U.R (%)	5	5	5	5	5
x (kg de água / kg de ar seco)	0.003825788	0.003825788	0.003825788	0.003825788	0.003825788
$v_a$ (m/s)	0.1	0.3	0.5	1.0	1.5

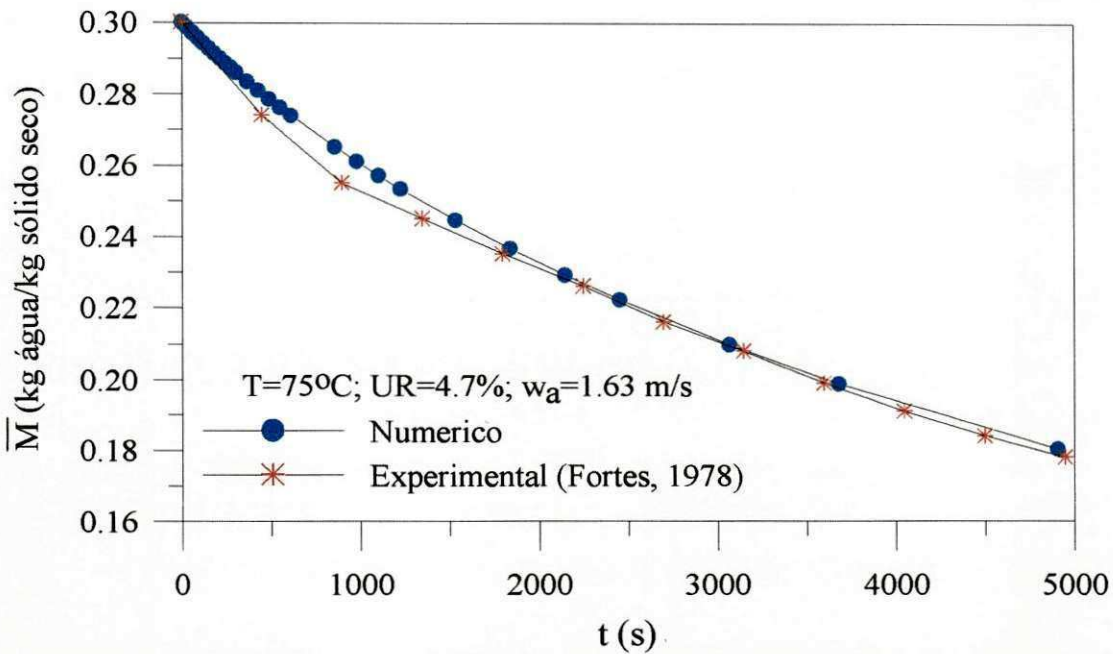


Figura 4.1 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Fortes, 1978) do conteúdo médio de água, durante processo de secagem de grão de milho amarelo em  $y \approx 0.0\text{m}$  e  $H=0,1\text{ m}$ .

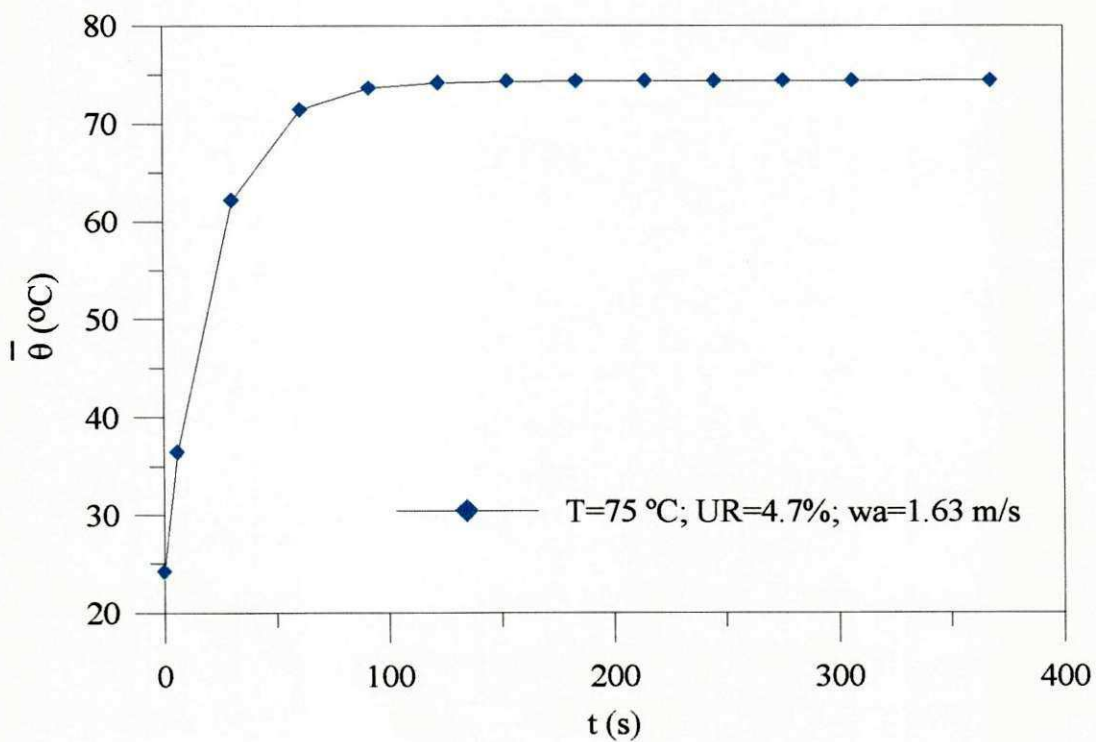


Figura 4.2 - Temperatura dos grãos de milho amarelo, durante o processo de secagem para as condições de  $y \approx 0.0\text{m}$  e  $H=0,1\text{ m}$ .

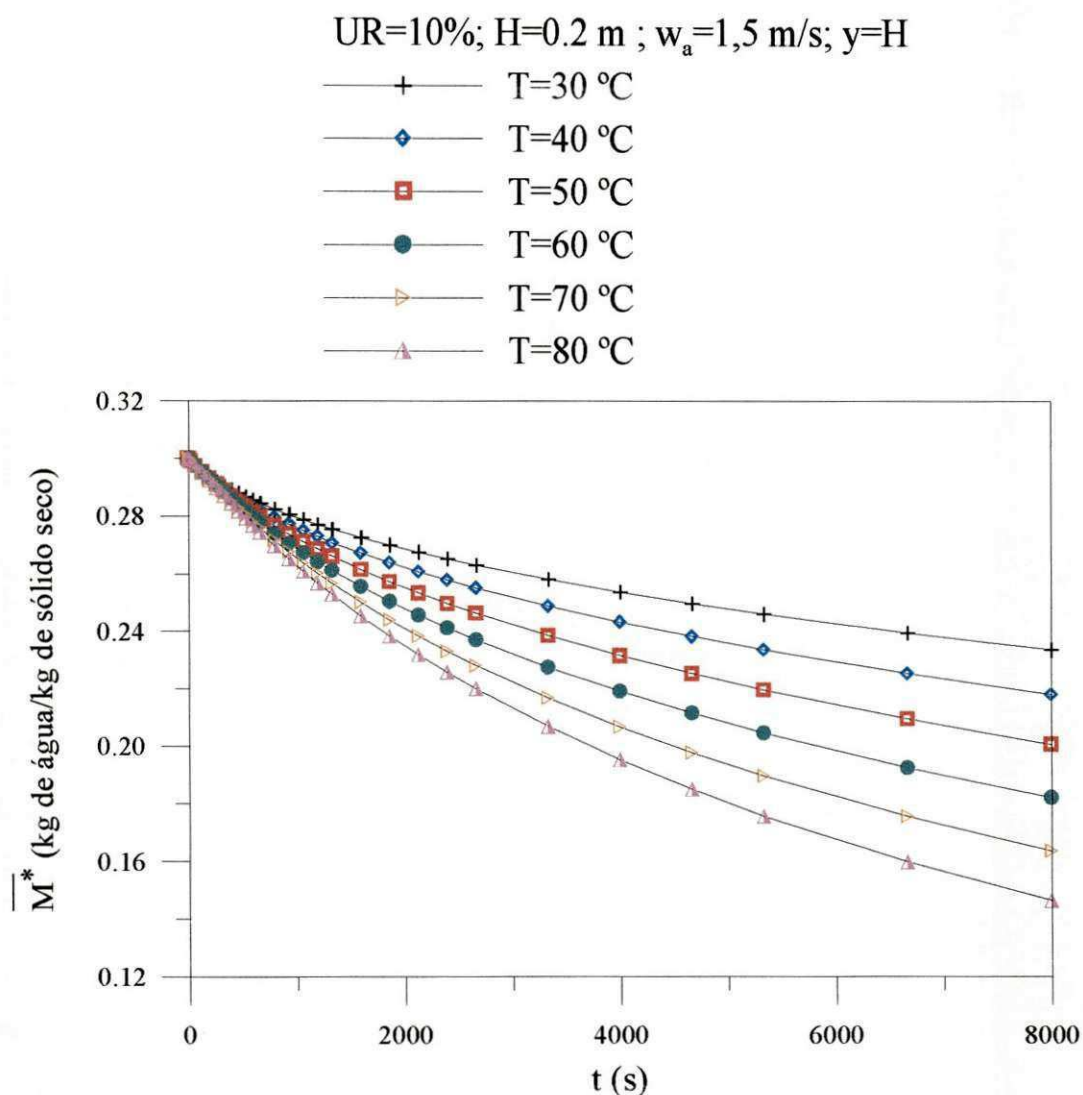


Figura 4.3- O efeito da temperatura do ar no conteúdo de água do grão de milho durante o processo de secagem.

Figuras 4.5-4.8 mostram temperatura do ar e do grão de milho dentro do leito em nove tempos de secagem. Para duas umidades relativas (1% e 10%), é verificado que os gradientes mais altos de temperatura acontecem no grão em poucos instantes de secagem e nas camadas de grãos mais próximas da entrada do ar de secagem, similarmente ocorre para o ar.

Não são recomendados altos gradientes térmicos ao longo do leito porque isto produz uma secagem não uniforme e grande tensão térmica no grão de milho, o que pode causar rachaduras, fissuras, deformação no sólido, comprometendo sua qualidade no fim do processo de secagem. O fato da temperatura do ar dentro do leito se elevar levemente, é devido ao



método de aproximação da umidade absoluta, que gera erros durante a condensação de água na determinação da umidade relativa máxima (UR = 100%).

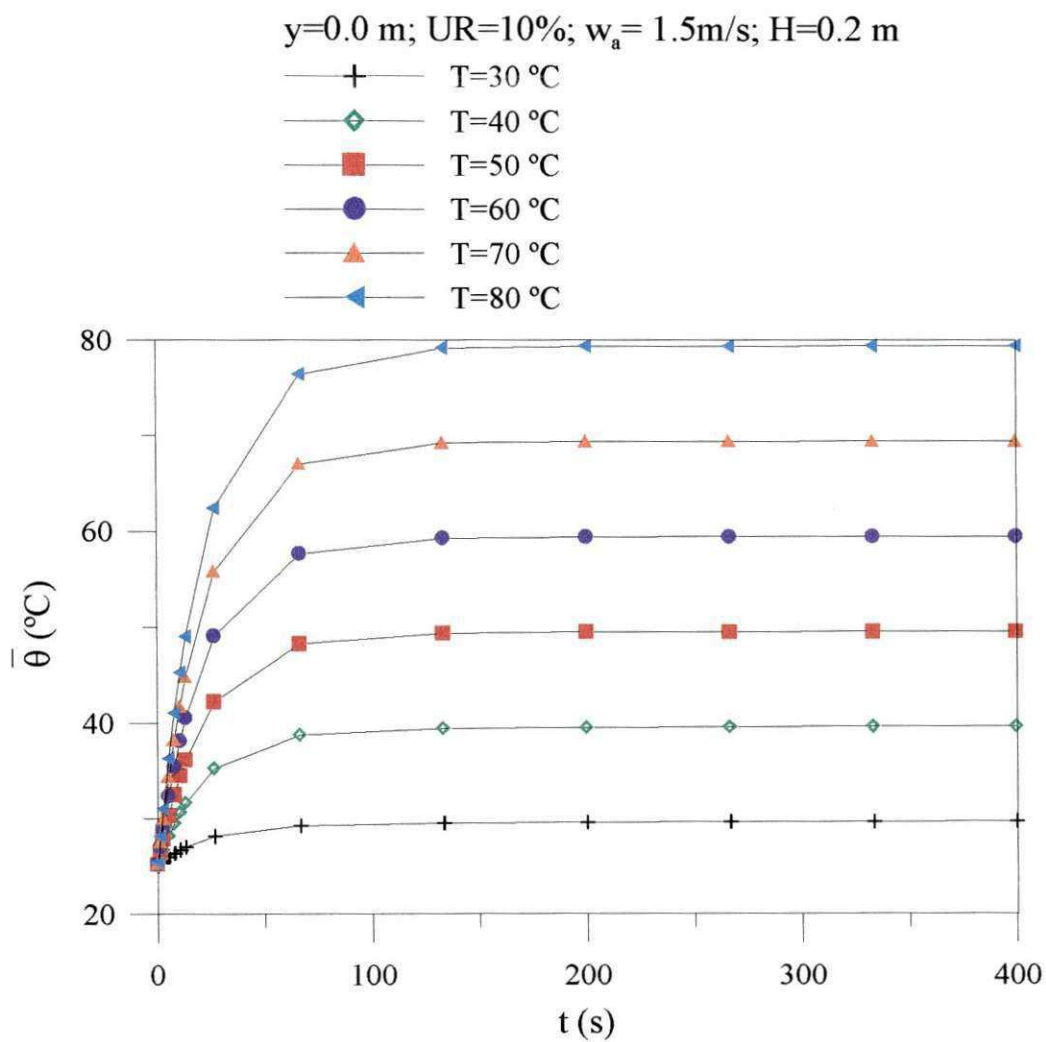


Figura 4.4 – Efeito da temperatura do ar de secagem na temperatura do produto durante o processo secagem.

As Figuras 4.9 e 4.10, ilustram as temperaturas do ar e do grão de milho dentro do leito em nove tempos de secagem, com uma umidade relativa alta (60 %). Pode-se observar que no caso do ar, as temperaturas só chegam até um certo limite, em função de a umidade relativa no interior do leito chegar perto do seu máximo. O mesmo observa-se para a temperatura do grão que sofre pequenos gradientes térmicos.

A umidade relativa alta faz com que a temperatura do grão atinja rapidamente uma temperatura média próxima temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, estabilizando-se em seguida. Vale salientar que na superfície do produto, a temperatura do milho é igual a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem.

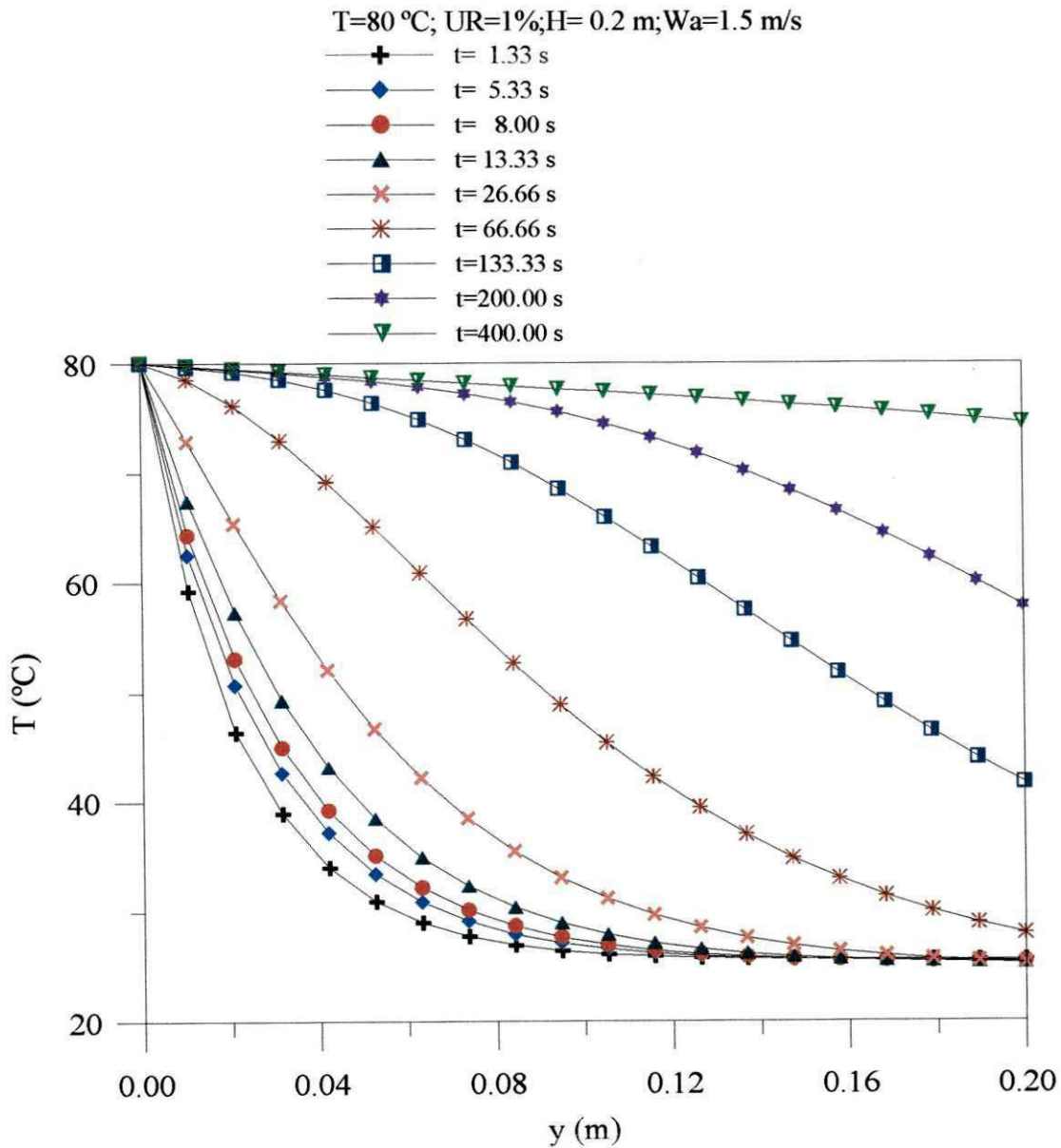


Figura 4.5 –Variação da temperatura do ar dentro do leito de 0,20m, para nove tempos de secagem.e UR=1%

Na Figura 4.10, nas primeiras camadas de produtos, a temperatura se eleva levemente, devido ao aquecimento do ar e depois permanece constante para os demais pontos. Isto ocorre tendo em vista o ar possuir uma umidade relativa de 100% nestas posições. Para tempos superiores, 13 e 26 segundos, o comportamento da temperatura do produto no início da camada se inverte. Desta vez ocorre um leve decréscimo da temperatura que é devido o fato da temperatura de bulbo seco do ar decrescer até a sua temperatura de bulbo molhado. Isto ocorre para manter a conservação da energia do volume de controle.

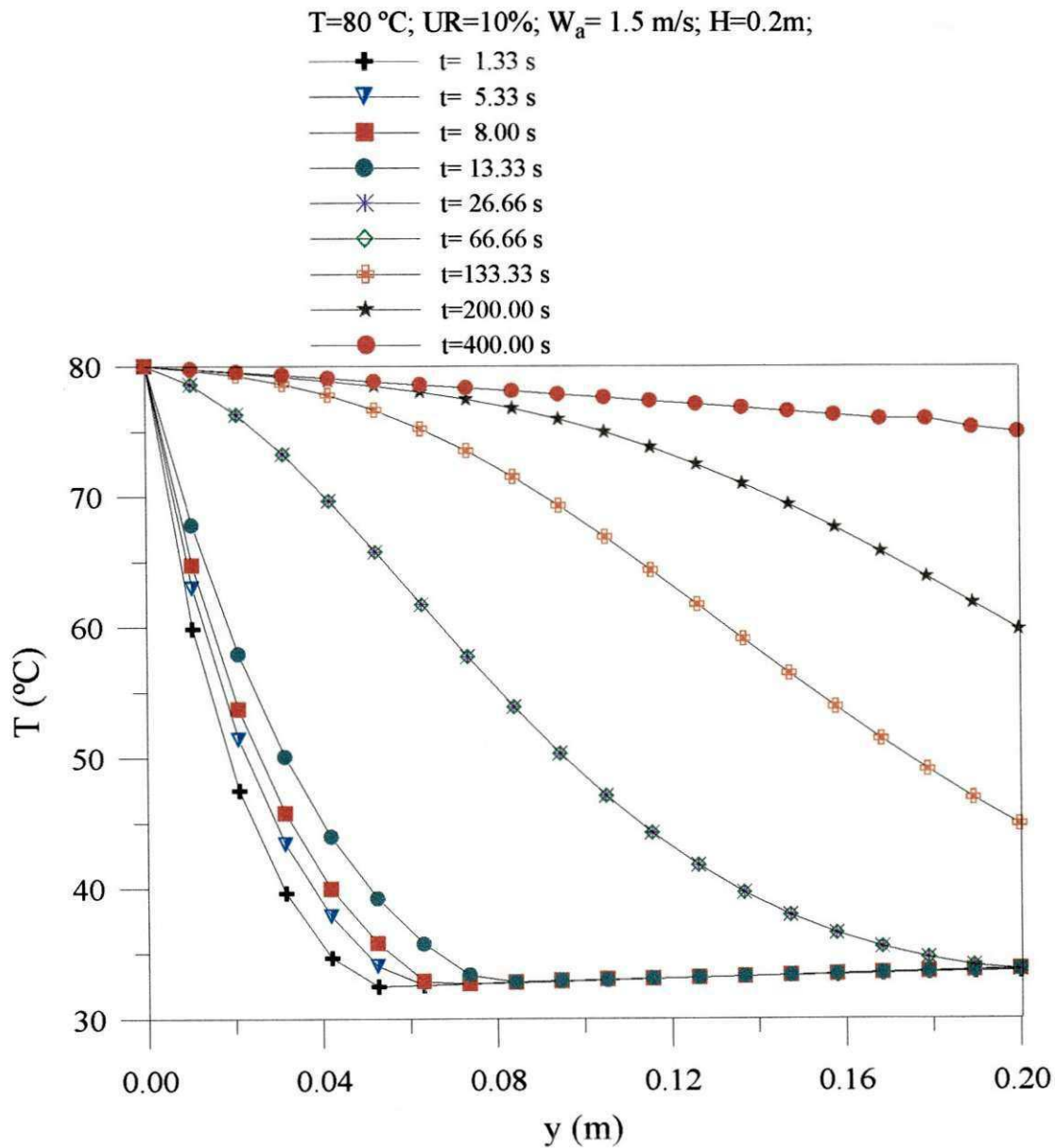


Figura 4.6 –Variação da temperatura do ar dentro do leito de 0,20m, para nove tempos de secagem.e UR=10%

As Figuras 4.11 e 4.12 encontra-se o efeito da altura da camada de produto em função do conteúdo de água do grão e da sua temperatura. Na Figura 4.11 observa-se que o aumento da altura da camada proporciona uma menor taxa de secagem do produto, o que já era esperado, pois o ar vai se tornando saturado a medida em que penetra na camada de produto.

A Figura 4.12 evidencia que mesmo com a variação da altura da camada, o produto atinge a temperatura do ar, poucos segundos após o início do processo de secagem, sem sofrer praticamente influencia desta grandeza.

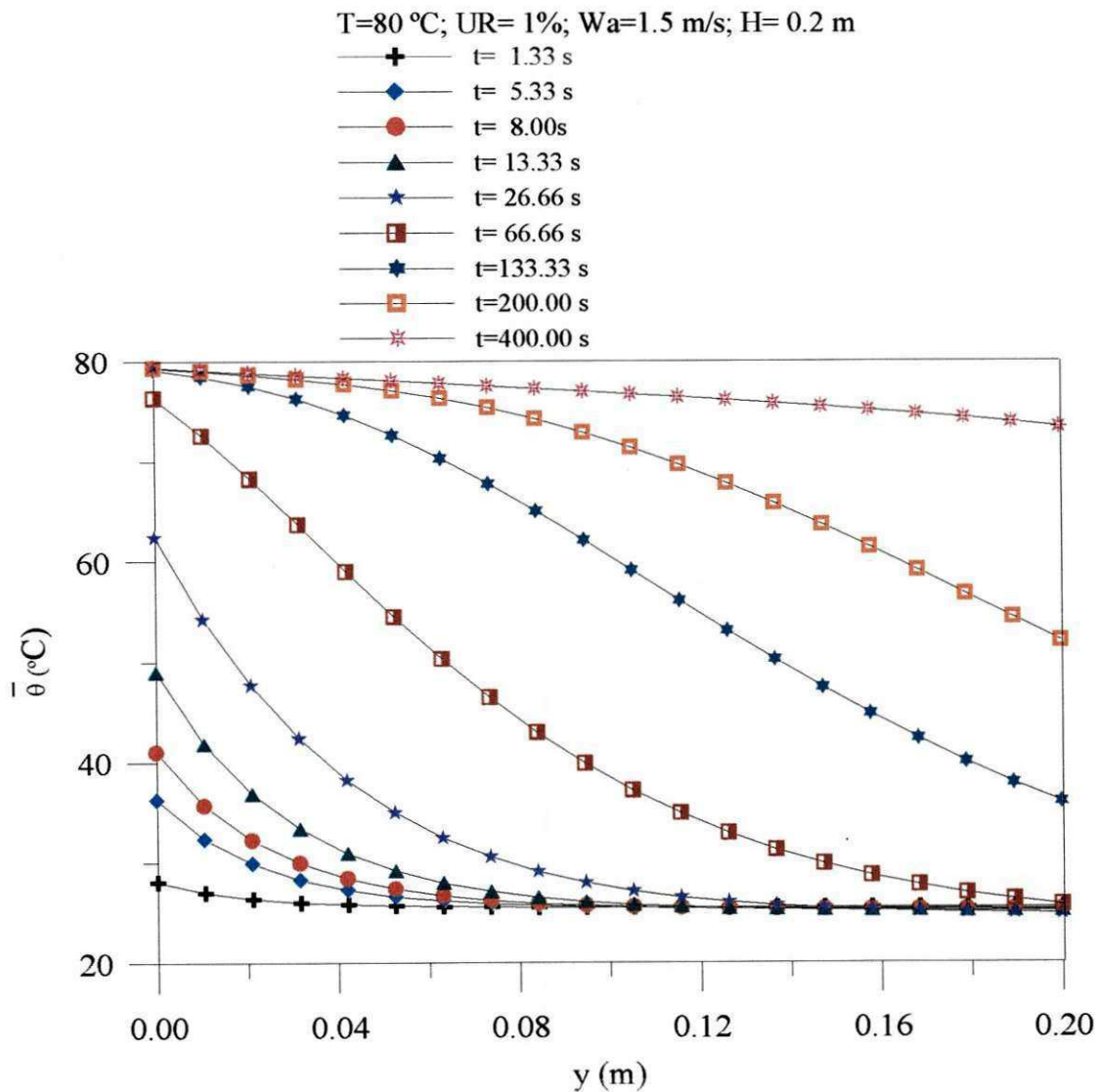


Figura 4.7 - Variação da temperatura do grão de milho dentro do leito, para nove tempos de secagem e UR=1%

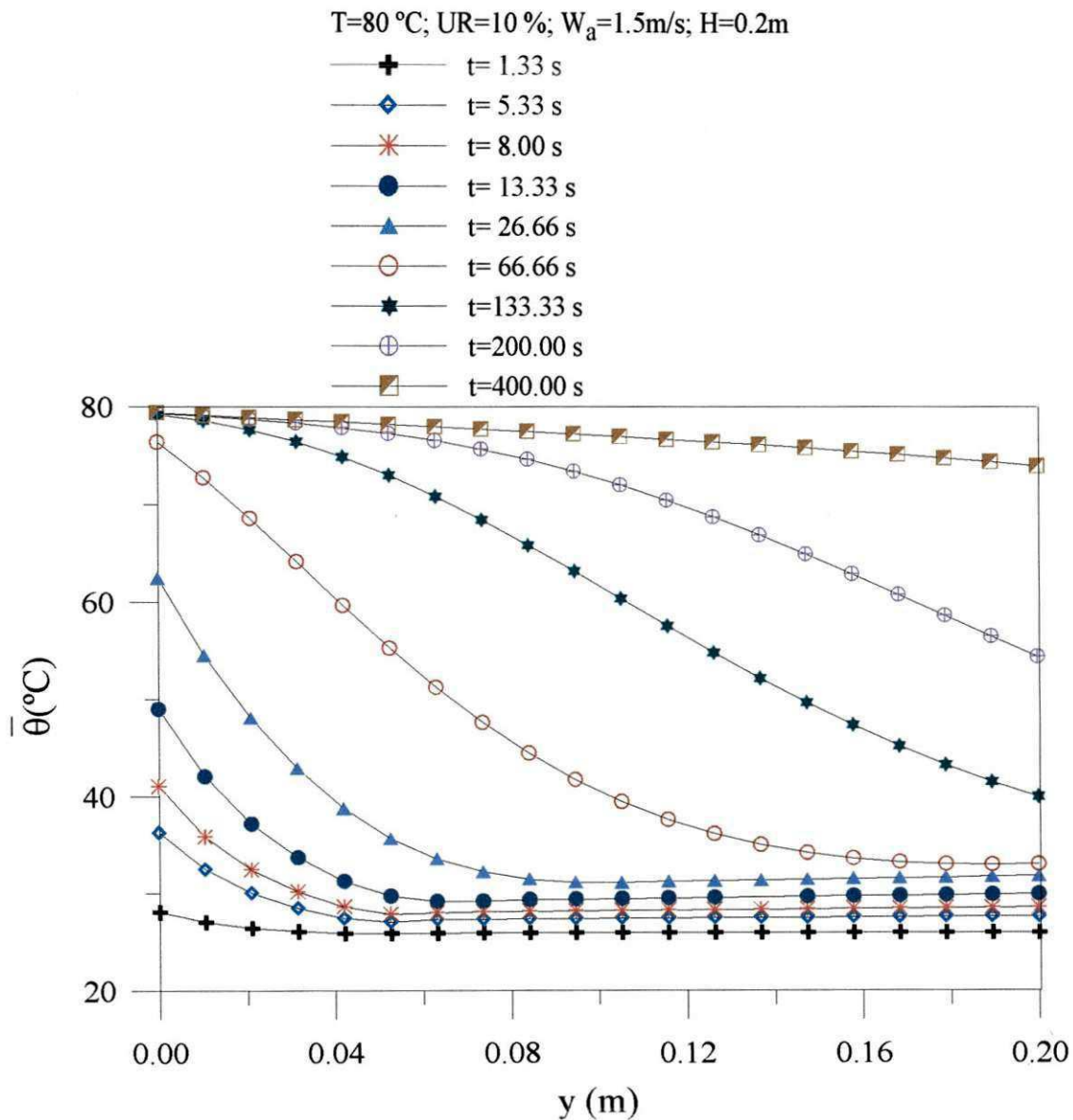


Figura 4.8 - Variação da temperatura do grão dentro do leito, para nove tempos de secagem.e UR=10%

Figuras 4.13 a-b mostram o efeito da umidade relativa sob a temperatura do grão de milho, observa-se que o grão atinge a temperatura do ar poucos instantes após o início do processo porém, mesmo com o aumento da umidade relativa não se constata efeito apreciável sob a temperatura do grão.

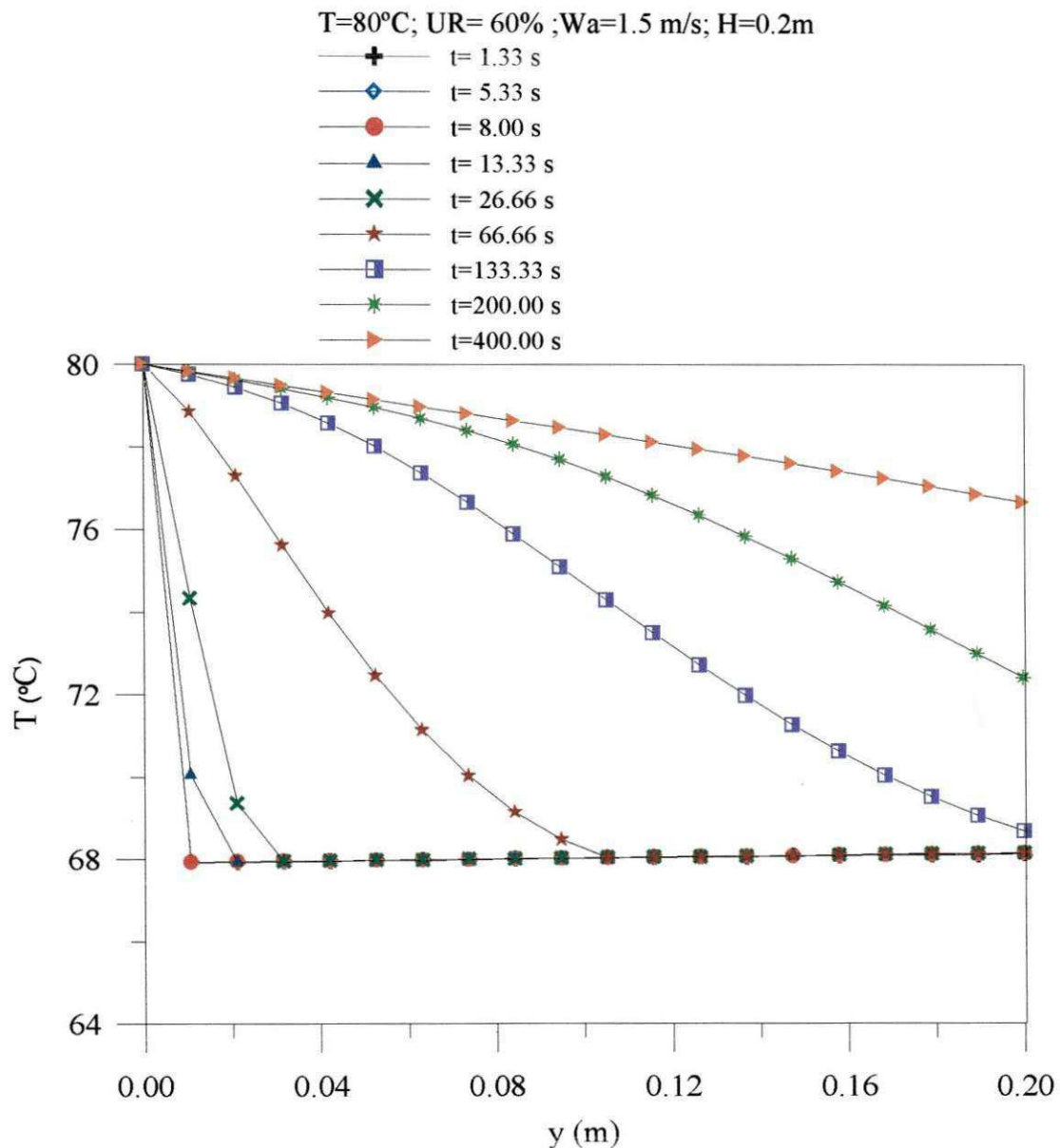


Figura 4.9 – Variação da temperatura do ar dentro do leito, para nove tempos de secagem e  $UR= 60\%$  .

Nas Figuras 4.14 a-b, observa-se o efeito da umidade relativa no conteúdo de água média do grão de milho para duas temperaturas iniciais,  $50^{\circ}\text{C}$  e  $80^{\circ}\text{C}$ , verifica-se que a umidade relativa provoca uma variação no conteúdo de água do grão, mais elevado do que sob sua temperatura. O aumento da umidade relativa diminui a taxa secagem como esperado.

Então com a diminuição da UR, o conteúdo de água do grão de milho decresce mais rapidamente ao longo do processo: Isto diminui a temperatura do ar no leito, em qualquer tempo exceto para os primeiros 200 segundos de processo. Neste caso, a temperatura do ar no início do processo, atinge sua temperatura de bulbo molhado, produzindo alto gradiente de temperatura nas primeiras camadas do leito (Figuras 4.5-4.6).

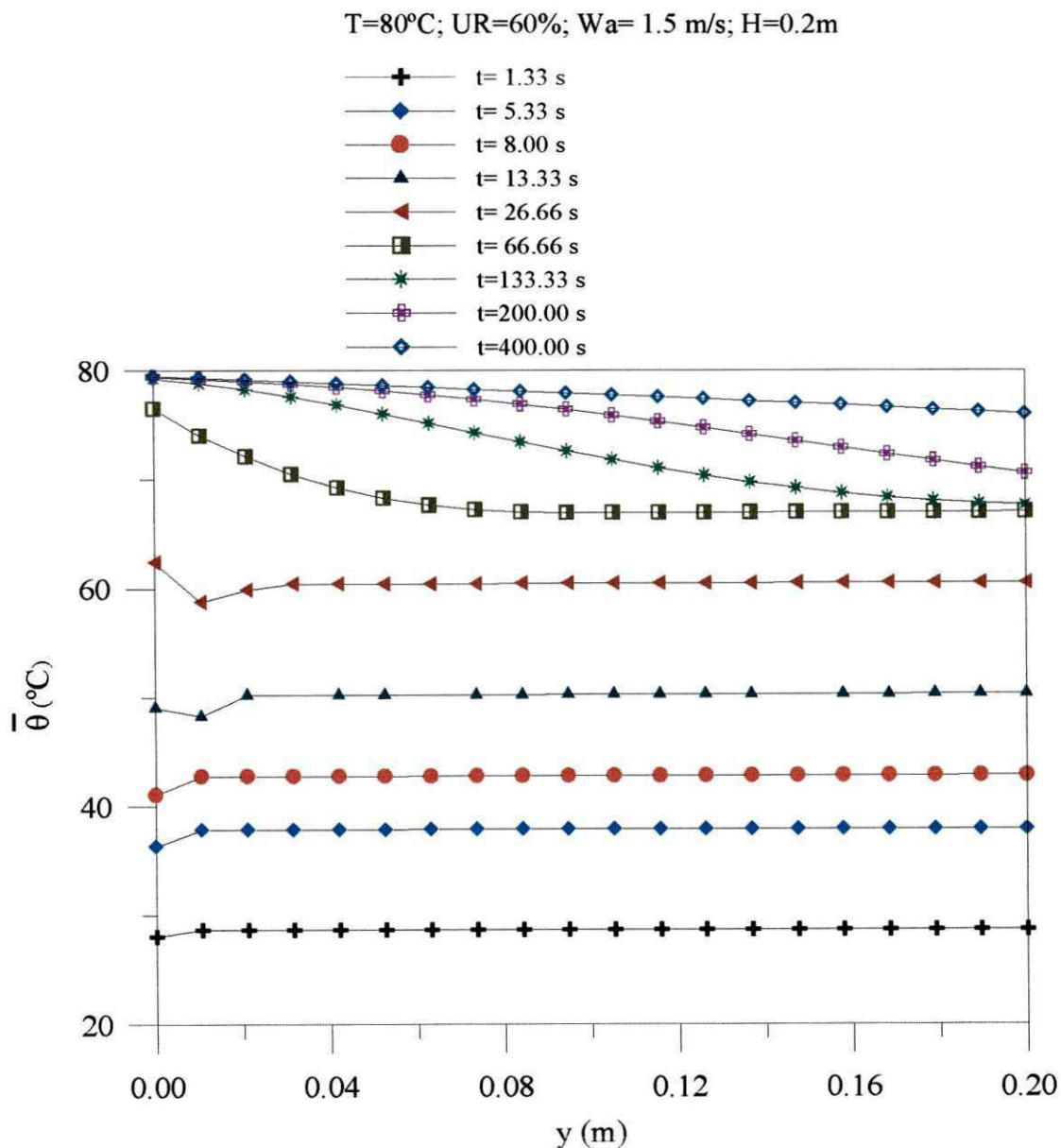


Figura 4.10 - Variação da temperatura do grão de milho dentro do leito, para nove tempos de secagem e UR = 60%.

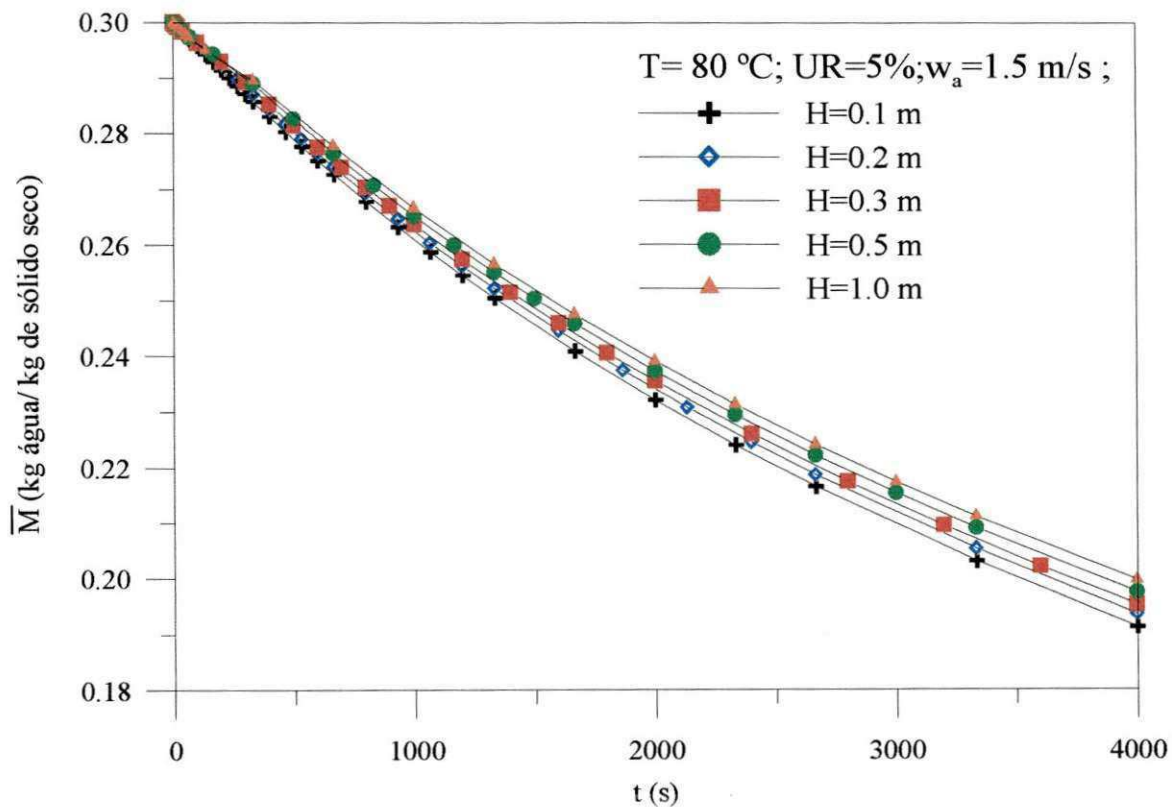


Figura 4.11 - O efeito da altura da camada de grãos de milho sob o conteúdo de água do produto, durante o processo de secagem

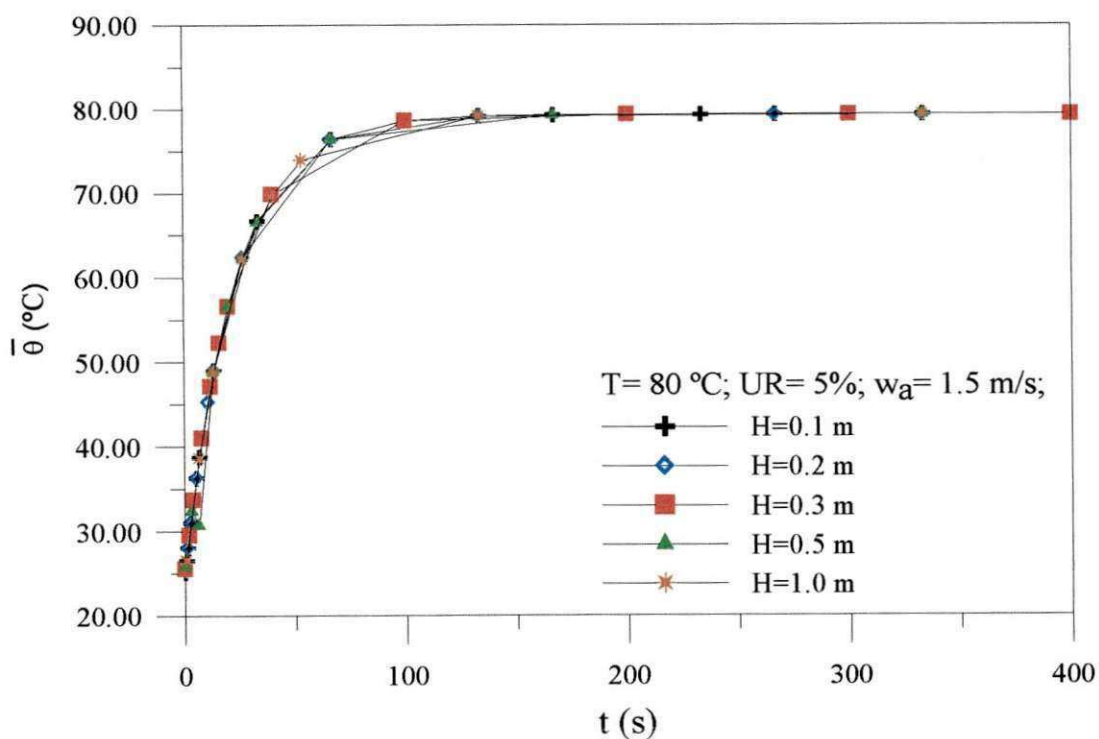


Figura 4.12 - O efeito da altura da camada de grãos de milho sob a temperatura do produto, durante o processo de secagem



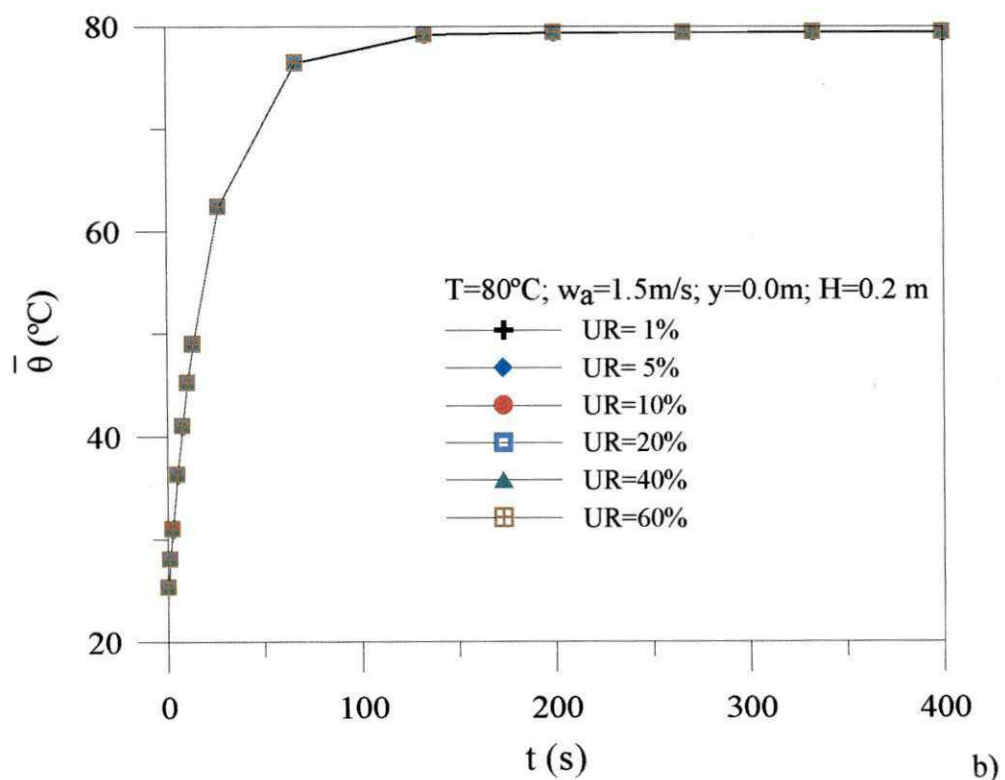
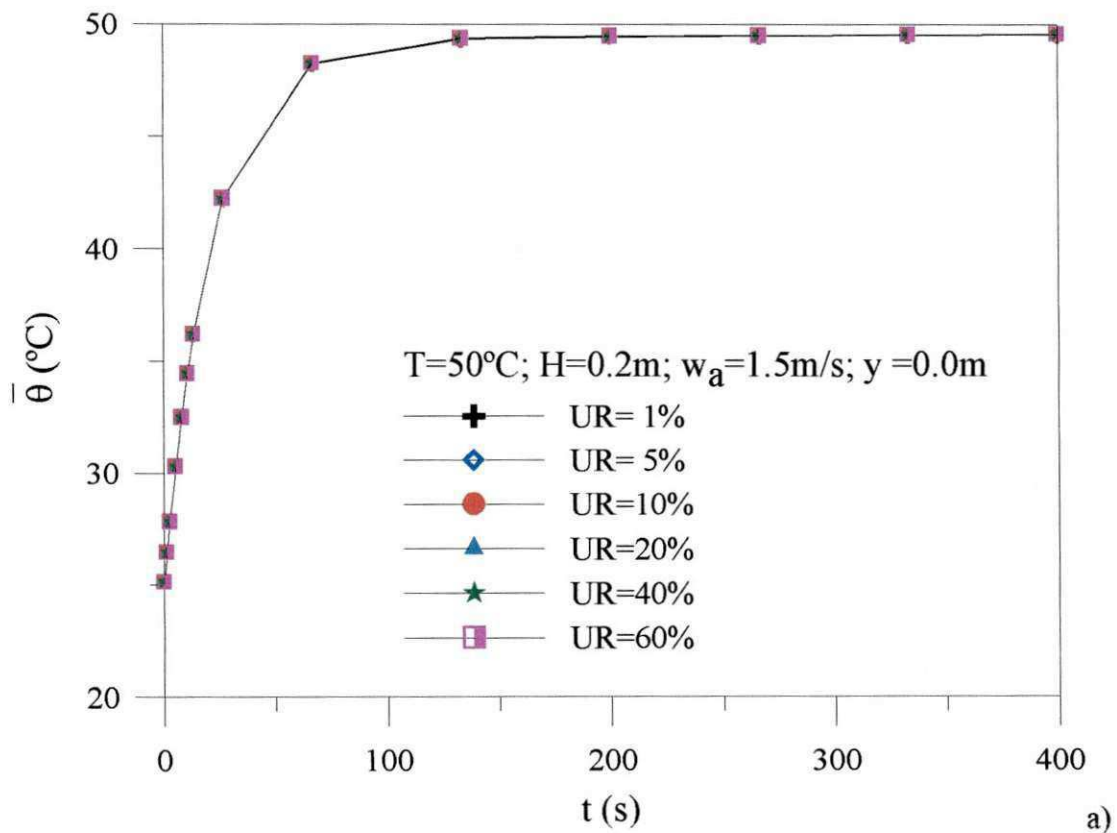


Figura 4.13 - O efeito da umidade relativa do ar de secagem, sob a temperatura do grão de milho: a)  $T=50^\circ\text{C}$  e b)  $T=80^\circ\text{C}$

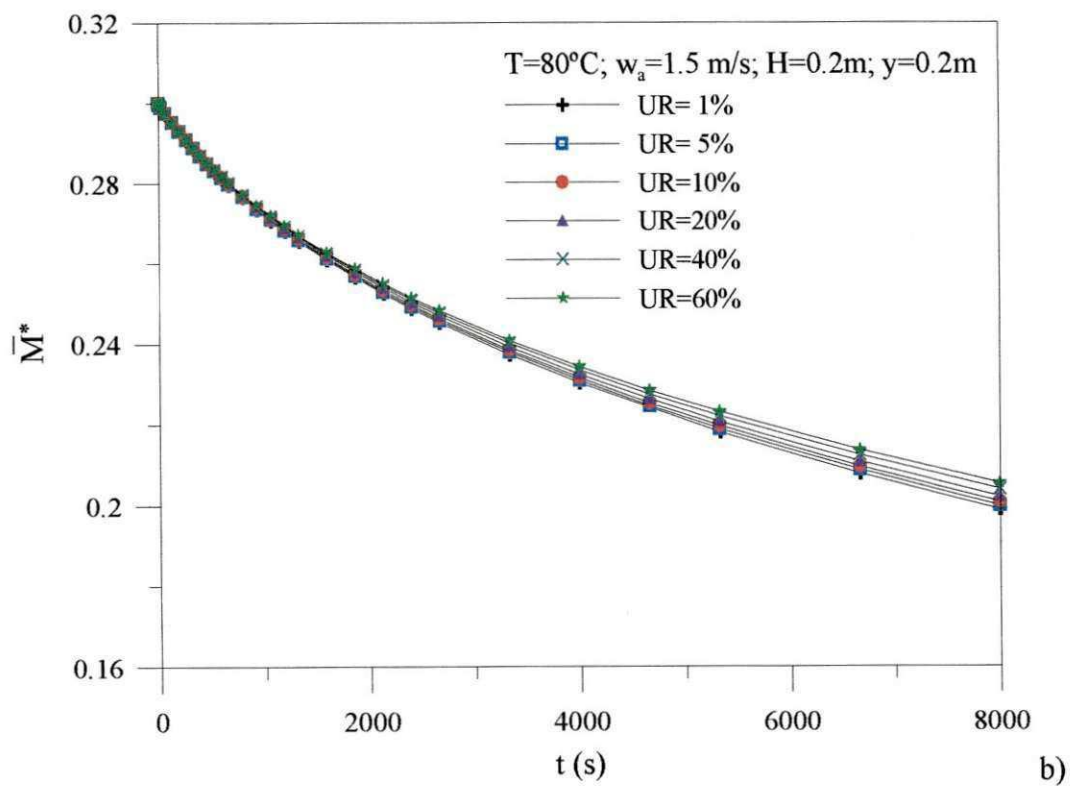
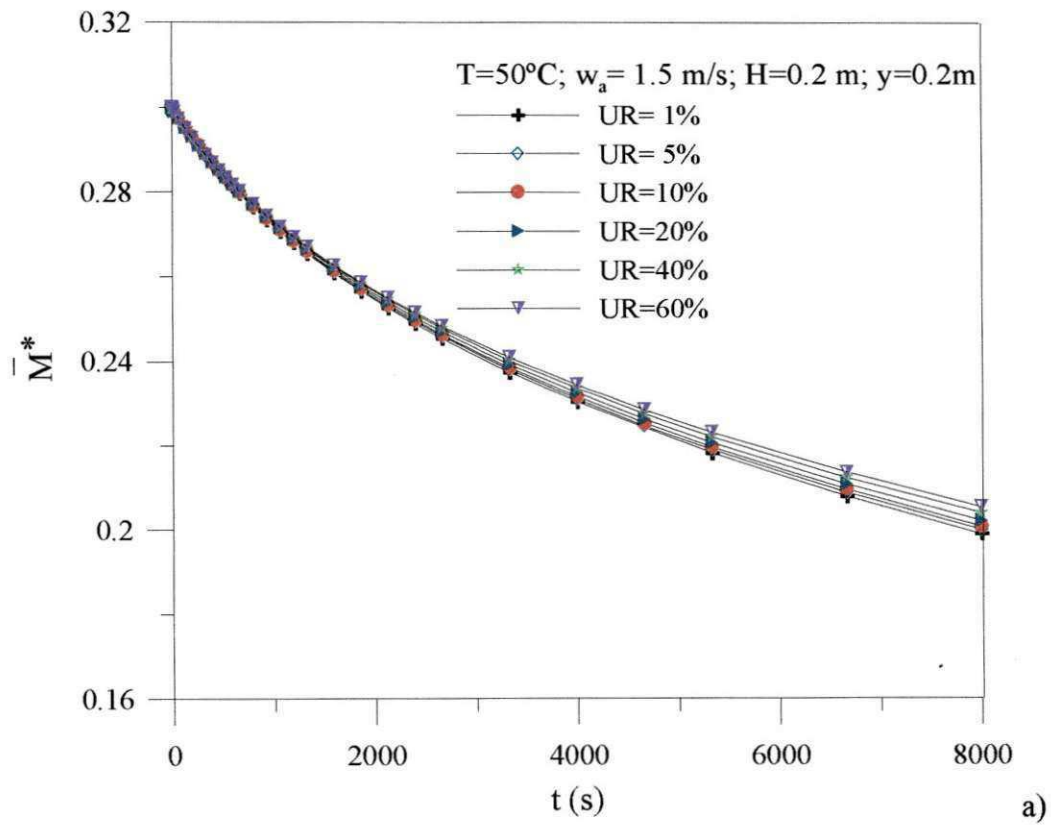


Figura 4.14 – O efeito da umidade relativa do ar de secagem sob o conteúdo de água do grão.

Para as temperaturas de: a)  $T=50^\circ\text{C}$ ; b)  $T=80^\circ\text{C}$

As Figuras 4.15 e 4.16 mostram o efeito da velocidade do ar sob o conteúdo de água do grão de milho e o efeito da velocidade do ar sob a temperatura do grão respectivamente, o aumento da velocidade do ar, com o conseqüente aumento do fluxo de ar no leito causou uma diminuição dos gradientes de umidade e aumento da taxa de secagem do produto, proporcionando um efeito considerável na taxa secagem e aquecimento do grão.

A Figura 4.16 mostra que com o aumento da velocidade do ar, o produto alcança a temperatura de equilíbrio mais rapidamente.

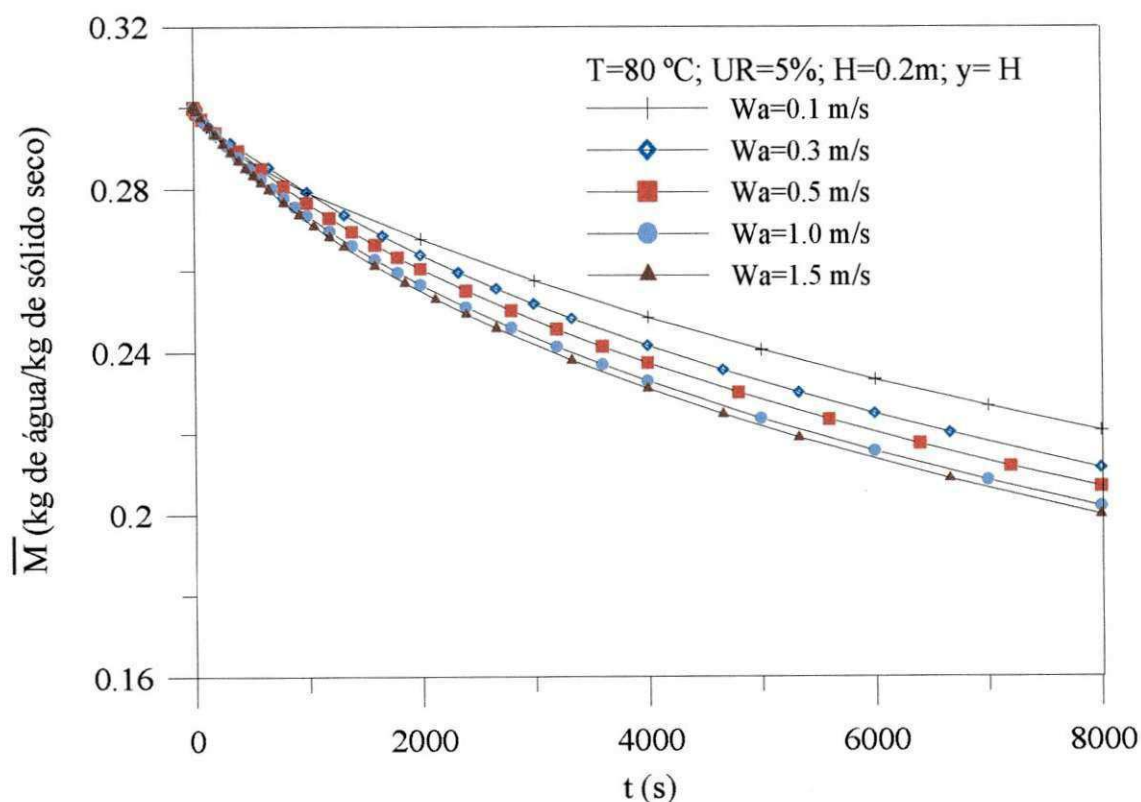


Figura 4.15 - O efeito da velocidade do ar no conteúdo de água do grão de milho, durante o processo de secagem

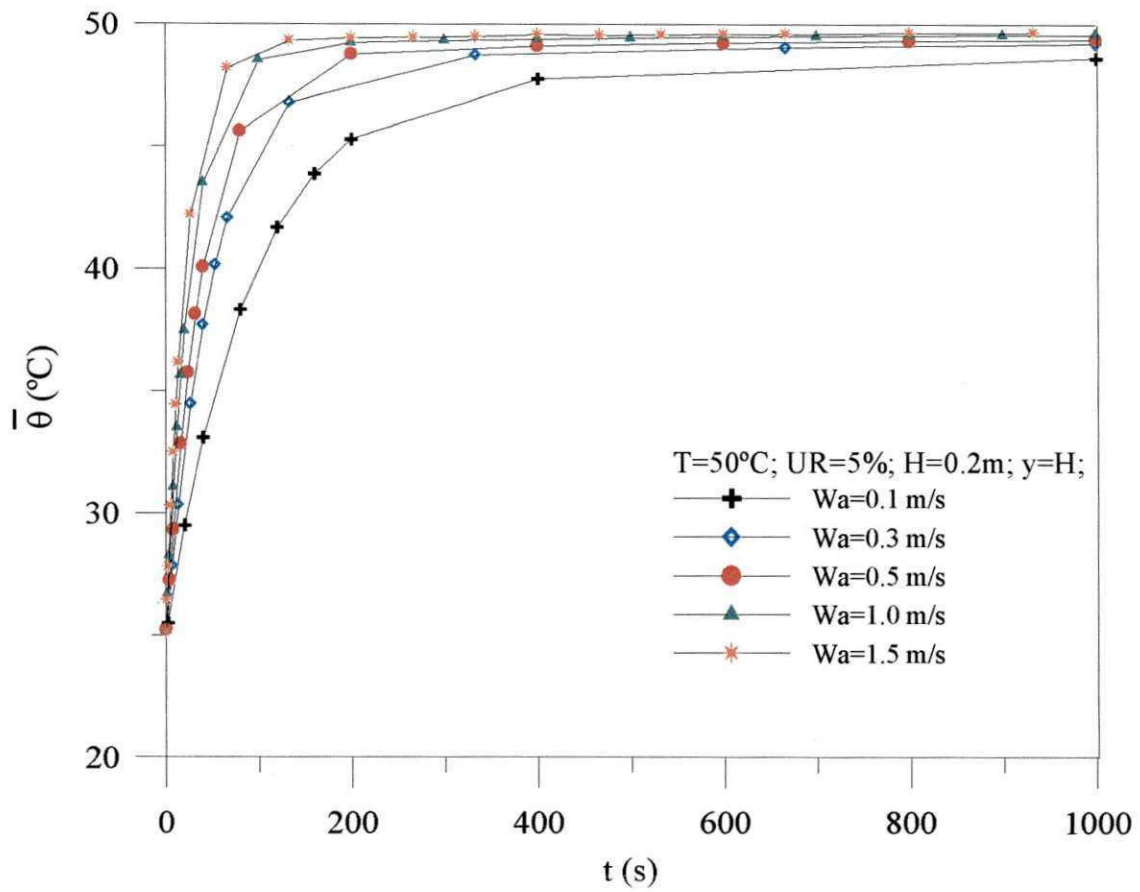


Figura 4.16 - O efeito da velocidade do ar sob a temperatura do grão de milho durante o processo de secagem.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

#### **5.1 Conclusões**

As seguintes conclusões podem ser afirmadas:

- O método dos volumes finitos pode ser usado para simular processo de secagem em um secador de fluxo cruzado, porque se obteve um bom ajuste através da comparação entre dados numéricos e experimentais;
- A temperatura do ar tem efeito na taxa de secagem do grão de milho mais que a taxa de fluxo de ar;
- A transferência de massa é controlada por difusão interna e externa, isto devido ao fato de que a taxa de fluxo de ar afeta a taxa de secagem. Quanto maior a velocidade do ar de secagem (para um certo intervalo), maior a perda de umidade do grão de milho ao longo do processo;
- O grão alcança a temperatura do ar de secagem em poucos segundos de iniciado o processo para qualquer temperatura e umidade relativa do ar de secagem;
- Durante processo de secagem, baixos gradientes do conteúdo de água foram obtidos dentro do leito. Isto se deve a fina espessura da camada de grão;

- Os gradientes da temperatura do ar, mais altos,entretanto estando, dentro do leito, ocorrem nos primeiros instantes de processo ( $\approx 400,00s$ ), para qualquer umidade relativa do ar;
- Para umidades relativas altas ( em torno de 100%) tem-se condensação de água e a temperatura do ar, neste ponto do leito, se iguala a temperatura de bulbo molhado do ar, principalmente nos primeiros instantes de secagem;
- A medida que a altura da camada de produto (grão de milho) e a umidade relativa do ar de secagem aumentam, tem-se um decréscimo na taxa de secagem do dos grãos de milho, no entanto, praticamente, não afeta a taxa de aquecimento do produto.

## 5.2 Sugestões para futuros trabalhos

Como sugestões podem ser citados os seguintes trabalhos:

- Modelar matematicamente a secagem de sólidos em outros tipos de secadores;
- Aplicar a metodologia desenvolvida neste trabalho à simulação da secagem de outros tipos de sólidos;
- Comparar a metodologia de volumes finitos com outras metodologias tais como: diferenças finitas; elementos finitos, etc. para simular a secagem de sólidos em secadores de fluxos cruzados;
- Aplicar a metodologia apresentada neste trabalho para otimizar secadores de fluxos cruzados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, L. C.; FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J. B.; HARA, T. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.5, n.1, p.5-18, Junho 1980.

BAKKER-ARKEMA, F. W.; LEREW, L. E.; DE BOER, S. F.; ROTH, M. G. **Grain drier simulation**. Research Report, n.224, p.2-23, 1974.

BARONI, A. F.; HUBINGER, M. D. Drying of onion: effects of pre-treatment on moisture transport. In: Inter-American Drying Conference (IADC), 1997, Itu. **Proceedings...** v.B, p.419-426. Itú S.P.

BARRE, H. J.; BAUGHMAN, R.; HAMDY, M. Y. Application of the logarithmic model to cross-flow deep-bed grain drying. **Transactions of the ASAE**, p.1061-1064, 1971.

BEKE, J.; VAS, A. Testing the drying process of shelled corn on aspects of nutritional quality and thermal efficiency. **Drying Technology**, Special Issue, v.5, p.1007-1027, 1994.

BERNAUER, W.; ROCHA, M. A. da, Secadores: dos clássicos aos não convencionais. **Máquinas e Metais**, São Paulo, n.223, p.20-24, Abr, 1984.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI Book, 1992, 450 p.

CARMO, J. E. F. **Difusão em sólidos esféricos e oblatos: modelagem e simulação**. 2000 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande.

COSTA, S. M.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. Drying of soybean seeds in countercurrent and concurrent moving. In: Inter-American Drying Conference (IADC), Itu. **Proceedings...** v. B, p. 561-568. 1997.

CAVALCANTE MATA, M. E. R. M.; MENEGAGALLI, F. C. Influence of the initial moisture contents and air velocity in the drying rate in thin layers of bean grains. In: Inter American Drying Conference (IADC), v.B, p 569-577. **Proceedings...** Itú – S.P. 1997a.

ELTIGANI, A Y.; BAKKER-ARKEMA, F. W. Automatic control of commercial crossflow grain dryers. **Drying Technology**, v. 5, n. 4, p. 561-575, 1987.

EZEIKE, G. O I.; OTTEN, L. Theoretical analysis of the tempering phase of a cyclic drying process. **Transactions of the ASAE**, v. 24, p.1590-1594, 1981.

FARIAS, S. N. **Secagem de sólidos esféricos usando o método de Galerkin**. 2002. 60 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FASINA, O. O.; SOKHANSANJ, S.; TYLER, R. T. Optimizing the drying and cooling of alfalfa pellets. In: Inter-American Drying Conference (IADC), 1997, Itu. **Proceedings...** v. B, p. 530-537. Itú S.P.

FIGLIOLA, R.; ROSSI, S. J.; KLUPPEL, R. P. Simulação de secagem de camadas espessas de raspas de mandioca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.9 e 10, n.1 e 2, p.19-22, Jun/Dez 1984/1985.



FORTES, M.; OKOS, M. R. **Advances in drying**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, Chapter Five: Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains, v.1, p. 119-154. 1980.

FORTES, M. **A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary-porous media with special reference to drying of grains and foods**. Ph.D. Thesis. Purdue University. 1978.

FRANCA, A. S., FORTES, M., HAGHIGHI, K. Numerical simulation of intermittent and continuous deep-bed drying of biological materials, **Drying Technology**, v.12, n.7, p.1537-1560, 1994.

FREIRE, E. S.; CHAU, K. V. Simulation of the drying process of fermented cacao beans. In: Inter-American Drying Conference (IADC), 1997. Itu. **Proceedings...** v. B, p.356-363. Itú-SP. 1997.

GINER, S. A.; MASCHERONI, R. H.; NELLIST, M. E. Cross-flow drying of wheat: a simulation program with a diffusion-based deep-bed model and a kinetic equation for viability loss estimation. **Drying Technology**, v.14, n.10, p.2255-2292, 1996.

HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Connecticut: AVI publishing company, Inc. 1980 381p.

IBRAHIM, M. H.; DAUD, W. R. W.; TALIB, M. Z. M. Drying characteristics of oil palm kernels. **Drying Technology**, v 15, n.3-4, p.1103-1117, 1997.

JAYAS, D. S.; CENKOWSKI, S.; PABIS, S.; MUIR, W. E. Review of thin-layer drying and rewetting equations. **Drying Technology**, v.9, n.3, p.551-588, 1991.

JAYARAMAN, K. S.; DASGUPTA, D. K. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker, Inc. , 1995. Chapter: Drying of fruits and vegetables, v.1, p.643-690.

JUMAH, R. Y.; MUJUMDAR, A S.; RAGHAVAN, G. S. V. A mathematical model for constant and intermittent batch drying of grains in a novel rotating jet spouted bed. **Drying Technology**, v.14, n.3-4, p.765-802, 1996.

KAMEOKA, T.; HOSOKAWA, A.; MORISHINA, H. Simulation of heat and mass transfer during through-drying process of rough rice. **Drying of Solids**. Recent International Developments. New York: John Wiley & Sons, 1986, p. 271-278.

KEEY, R.B. **Drying of loose and particulate materials**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992. 502 p.

LI, Ye-Bo; CAO, C.W.; LIU, D.Y. Simulation of recirculating circular grain dryer with tempering stage. **Drying Technology**, v. 15, n. 1, p. 201-214, 1997.

LIMA, A.G.B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas**. 1999. 256 p. Tese (Doutorado), UNICAMP, S.P.

LIMA, A. C. C., ROCHA, S. C. S. Bean drying in fixed spouted and spoute-fluid beds - comparison and empirical modeling. In: Inter-American Drying Conference (IADC), 1997, Itu. **Proceedings...** v.A, p.165-173. Itú S. P.

LIMA, A. G. B. **Estudo da secagem e dimensionamento de secador de casulos do bicho-da-seda**. Campina Grande: Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 1995. 190 p. Dissertação (Mestrado).

LIU, J. Y.; SIMPSON, W. T. Solutions of diffusion equation with constant diffusion and surface emission coefficients. In: Inter-American Drying Conference (IADC), 1997, Itu. **Proceedings...** v.A, p.73-80. Itú S.P.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995, 424 p.

MARTINS, J. H. **Simulação da secagem de milho em camada estacionária**. Dissertação (Mestrado). 97p. Universidade Federal de Viçosa. 1982.

MARIZ, THOMPSON FERNANDES. **Secagem da casca de caroço de algodão em leito fixo**. Campina Grande: Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 1986. 139p. Dissertação (Mestrado).

MARTINEZ, C.; VIZCARRA, M. G.; RUIZ, R. S. On the simulation of batch fluidized bed dryers. In: Inter-American Drying Conference (IADC), 1997, Itu. **Proceedings...** v. B.p.364-371.

MARTINEZ-VERA, C.; VIZCARRA-MENDONZA, M.; GALÁN-DOMINGO, O.; RUIZ-MARTINEZ, R. Experimental validation of a mathematical model for the batch drying of corn grains. **Drying Technology**, v.13, n.1-2, p.333-350, 1995.

MARTINS, J. H.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.. **Introdução à teoria e simulação matemática de secagem de grãos**. UFPB/CCT - Núcleo de Tecnologia e Armazenagem. Campina Grande, 1984, 104p.

MATA, S. F. **Estudo do dimensionamento de coletor solar e secador**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 1985. 252p. Tese (Doutorado).

MISRA, M. K., BROOKER, D. B. Thin-layer drying and rewetting equation for shelled yellow corn. **Transactions of the ASAE**, p. 1254-1260, 1980.

MOTTA-LIMA, O.C. ;PINTO J.C.;MASSARANI, G. **Parameter estimation in cross-flow sliding bed drying**. International Drying Symposium, Krakow,pp.283-290,v.A. 1996.

NASCIMENTO, J. J. S. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de caso: secagem de matérias cerâmicas**. 2002. 205 p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

NEBRA, SILVIA. AZUCENA **Secagem pneumática de bagaço de cana**. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas- SP. 1985, 120p.

NGANHOU, J.; LECOMTE, D.; DUMARGUE, P. Heat and mass transfer through a thick bed of cocoa beans under stationary and transient inlet conditions. In: International Drying Symposium (IDS'92), 1992, Montreal: **Proceedings...** Part B, p. 1515-1523.

OLIVEIRA, V. A. B. **Difusão em sólidos esféricos prolatos: uma solução analítica.** 2001 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

PARK, K. J., GODOI, L. F. G., ALONSO, L. F. T., CORRÊA JR., W. A. Drying behavior parameters in a continuous vertical annular static mixer dryer. In: Inter-American Drying Conference (IADC).. **Proceedings...** v. A. p. 204-209. Itú – S. P. 1997.

PARK, K. J.; BROD, F. P. R. Comparative study of grated coconut (cocos nucifera) drying using vertical and horizontal dryers. In: Inter-American Drying Conference (IADC), **Proceeding...** v. B, p. 469-475. Itú – S.P. 1997.

PARTI, M. Evaluation of selected mathematical models for grain drying. In: International Drying Symposium (IDS"/CHISA"). **Proceeding...** v.3 p 153-162 Praha 1990.

PARTI, M. Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.54, p.339-352, 1993.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**, New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980, 197 p.

PIMENTEL, R. ; SARTORI, D.T. M. **Drying of grass seeds in cross-flow band dryer.** International Drying Symposium, Halkidiki, p. 1350-1357. Vol. B.1998.

QUINTANA-HERNANDEZ, P.; RODRIGUES-RAMIREZ, J.; MENDES-LAGUNAS, L.; CORNEJO-SERRANO, I. Humidity diffusion within sugarcane fibers. In: Inter-American Drying Conference (IADC), **Proceedings...** v. B, p. 538-542. Itú – S.P. 1997.

RAPUSAS, R. S., DRISCOLL, R. H. The thin-layer drying characteristics of white onion slices. **Drying Technology**, v.13, n.8-9, p.1905-1931, 1995.

ROSSI, S. J. **Psicrometria**. João Pessoa: FUNAPE, 1987. 60p.

SABADINI, E., CARVALHO, B. C. JR., SOBRAL, P. J. A., HUBINGER, M. D. Mass transfer and diffusion coefficient determination in salted and dried meat pieces. In: Inter-American Drying Conference (IADC). **Proceedings...** v. B, p. 441-447. Itú – S.P. 1997

SANTOS, VIRGÍNEA. M. S. **Simulação e otimização de secagem de frutas em secador tipo túnel, concorrente**. Tese (Mestrado de Engenharia Mecânica). 115p Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1997.

SARAVACOS, G. D., **Engineering properties of foods**. New York: Marcel Dekker, Inc., Chapter. Mass transfer properties of foods, p. 169-221. 1995.

SARKER, N. N., KUNZE, O. R., STROUBOLIS, T. Finite element simulation of rough rice drying. **Drying Technology**, v. 12, n. 4, p. 761-775. 1994.

SOKHANSANJ, S.; WOOD, H. C. Simulation of thermal and disinfestations characteristics of forage dryer. **Drying Technology**, v.9,n.3,p. 643-656. 1991.

SOKHANSANJ, SHAHAD. **Advances in drying**. New York: Hemisphere Publishing Corporation. v.3. chapter four: Grain drying simulation with respect to energy conservation and grain quality. p.121-179. 1984

SOKHASANJ, Shahab; JAYAS. Digvir S. Drying of foodstuffs. **Handbook of industrial drying**. New York: Arun S. Mujumdar, v,1 p.589-625. 1995.

SOPONRONNARIT, S.; PRACHAYAWARAKORN, S.; SRIPAWATAKUL, O. Development of cross-flow fluidized bed paddy dryer. **Drying Technology**, v.14,n.10, p.2397-2410, 1996.

STEFFE, J. F., SINGH, R. P. Liquid diffusivity of rough rice components. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.3, p.767-774, 1980a.

STRUMILLO, C., KUDRA, T. **Drying: principles, science and design**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986, 448p.

TOLABA, M. P., AGUERRE, R. J., SUAREZ, C. Drying of corn with tempering: simulation and experimental verification. In: Inter-American Drying Conference (IADC), **Proceedings...** v. B, p.516-523. Itú – S.P. 1997.

VASCONCELOS, L. G. S., ALSINA, O. L. S. Drying simulation of “carioca” beans in cross-flow. In: International Drying Symposium (IDS'92), Montreal: **Proceedings...** Part B, p. 1501-1507. 1992.

YANG, W.; SIEBENMORGEN, T. J. Cross-Flow drying of rough rice as mapped on its glass transition state diagram. In: International Drying Symposium, **Proceedings...** Noordwijkerhout, 2000, CD ROM.

WALKER, L. P.; BAKKER-ARKEMA, F. W. Energy efficiency in concurrent flow rice drying, **Transactions of the ASAE**. v. 24, p.1352-1356, 1981.

ZHANG, Q., LITCHFIELD, J. B., An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. **Drying Technology**, v.9, n.2, p. 383-395, 1991.

ZOGZAS, N. P., MAROULIS, Z. B. Effective moisture diffusivity estimation from drying data: a comparison between various methods of analysis. **Drying Technology**, v.14, n.7 e 8, p.1543-1573, 1996.

**ANEXOS**  
**(Código Computacional no Ambiente Mathematica®)**

```

Remove["Global' *"]
(*PROGRAMA ESCRITO POR VOLUMES FINITOS*)
npy = 20;
npx = 1;
eps = 0.44;
H = 1.;
L = 25;
a = 784;
Mpo = 0.30;
Tpo = 24;
rop = 650;
up = 0.005;
Tao = 75;
xao = 0.05130456;
wa = 1.63;
ka = 0.02827;
mia = 19.75213 * 10^(-6);
dy = H / (npy - 1);
dt = dy / wa;
dz = up * (npy - 1) * dt;
auxR = 22105649.25;
auxA = -27405.53;
auxB = 97.5413;
auxC = -0.146244;
auxD = 0.12558 * 10^(-3);
auxE = -0.48502 * 10^(-7);
auxF = 4.34903;
auxG = 0.39381 * 10^(-2);
Patm = 101325;
Mfa = 28.96;
Runiv = 8314.34;
auxroa = Patm * Mfa / Runiv;
qa = roa * wa;
If[qa < 0.68,
  hc = 99.6 * qa^0.49;
,
  hc = 101.4 * qa^0.59;
]
Mp = Array[Mpo &, {npy}];
Tp = Array[Tpo &, {npy}];
xa = Array[xao &, {npy}];
Pvs = Array[0 &, {npy}];
Ur = Array[0 &, {npy}];
Ta = Array[Tao &, {npy}];
graf = Array[0 &, {npy}];
y = Array[0 &, {npy}];
i = 1;

```



```

Do[
  Y[[j]] = (j-1) * dy;
  , {j, 1, npy}];
Mpold = Mp;
Taold = Ta;
Tpold = Tp;
xaold = xa;
graf[[1]] = {0, Mp[[1]], Tp[[1]], xa[[1]], Ta[[1]]};
imax = 10001;
z = 0;
ii = 0;
apup = Array[0 &, {npY}];
apomp = Array[0 &, {npY}];
scup = Array[0 &, {npY}];
aptp = Array[0 &, {npY}];
apotp = Array[0 &, {npY}];
sctp = Array[0 &, {npY}];
apta = Array[0 &, {npY}];
apota = Array[0 &, {npY}];
asta = Array[0 &, {npY}];
scta = Array[0 &, {npY}];
apxa = Array[0 &, {npY}];
apoxa = Array[0 &, {npY}];
asxa = Array[0 &, {npY}];
scxa = Array[0 &, {npY}];
While[z < L && ii < imax,
  Do[
    Mpold[[j]] = Mp[[j]];
    Taold[[j]] = Ta[[j]];
    Tpold[[j]] = Tp[[j]];
    xaold[[j]] = xa[[j]];
    , {j, 1, npy}];
  z = z + dz;
  t = z / up;
  ii = ii + 1;
  Do[
    ca = (1.00926 - 4.04033 * 10^(-5) * Ta[[j]] +
      6.17596 * 10^(-7) * Ta[[j]]^2 - 4.09723 * 10^(-10) * Ta[[j]]^3) * 10^3;
    cv = (1.8830 - 0.16737 * 10^(-3) * (Ta[[j]] + 273.15) +
      0.84386 * 10^(-6) * (Ta[[j]] + 273.15)^2 - 0.26966 * 10^(-9) * (Ta[[j]] + 273.15)^3) * 10^3;
    cw = (2.82232 + 1.18277 * 10^(-2) * (Ta[[j]] + 273.15) -
      3.5047 * 10^(-5) * (Ta[[j]] + 273.15)^2 + 3.6010 * 10^(-8) * (Ta[[j]] + 273.15)^3) * 10^3;
    cp = (1.361 + 0.0397 * (100 * Mp[[j]] / (1 + Mp[[j]]))) * 10^3;
    roa = auxroa / (Ta[[j]] + 273.15);
    hfg = (2502.2 - 2.39 * Ta[[j]]) * (1 + 1.2925 * Exp[-16.961 * Mp[[j]]) * 10^3;

```

```

Me = (1/100) * ( Log[1 - xa[[j]]] / (-8.6541*10^(-5) * (Ta[[j]] + 49.81)) ) ^ (1/1.8634);
Alin = -1.7054824 + 0.00087917 * Ta[[j]];
Blin = 148.60862 * Exp[ -5.9418 * 10^(-2) * Ta[[j]] ];
dmdt = ( (Me - Mp[[j]]) / ( 3600 * ( Alin^2 + (1/900) * Blin * t) ^0.5 ) );
dmdt = Re[dmdt];
apomp[[j]] = dz / ((npy - 1) * dt);
scmp[[j]] = Me * dz / ( 3600 * ( Alin^2 + (1/900) * Blin * t) ^0.5 );
apmp[[j]] = apomp[[j]] + dz / ( 3600 * ( Alin^2 + (1/900) * Blin * t) ^0.5 );
apotp[[j]] = dz / ((npy - 1) * dt);
sctp[[j]] = ( a * hc * Ta[[j]] + (hfg + cv * Ta[[j]]) * rop * dmdt ) / (rop * cp + rop * cw * Mp[[j]]) * dz;
aptp[[j]] = apotp[[j]] + ( a * hc + cv * rop * dmdt ) / (rop * cp + rop * cw * Mp[[j - 1]]) * dz;
asta[[j]] = wa / eps;
apota[[j]] = dy / dt;
apta[[j]] = apota[[j]] + asta[[j]] + a * hc * dy / (eps * (roa * ca + roa * xa[[j]] * cv));
scta[[j]] = a * hc * dy / (eps * (roa * ca + roa * xa[[j - 1]] * cv) * Tp[[j - 1]]);
asxa[[j]] = roa * wa / eps;
apoxa[[j]] = roa * dy / dt;
apxa[[j]] = asxa[[j]] + apoxa[[j]];
scxa[[j]] = -rop * dmdt * dy / eps;
Mp[[j]] = (apomp[[j]] * Mpold[[j]] + scmp[[j]]) / apmp[[j]];
Tp[[j]] = (apotp[[j]] * Tpold[[j]] + sctp[[j]]) / aptp[[j]];
Ta[[j]] = (asta[[j]] * Ta[[j - 1]] + apota[[j]] * Taold[[j]] + scta[[j]]) / apta[[j]];
xa[[j]] = (asxa[[j]] * xa[[j - 1]] + apoxa[[j]] * xaold[[j]] + scxa[[j]]) / apxa[[j]];
Pvs[[j]] = auxR * Exp[ (auxA + auxB * (Ta[[j]] + 273.16) +
    auxC * (Ta[[j]] + 273.16)^2 + auxD * (Ta[[j]] + 273.16)^3 + auxE * (Ta[[j]] + 273.16)^4) /
    (auxF * (Ta[[j]] + 273.16) - auxG * (Ta[[j]] + 273.16)^2)];
Ur[[j]] = xa[[j]] * Patm / ((xa[[j]] + 0.622) * Pvs[[j]]);
If[Ur[[j]] > 1,
    iterlin = 0;
    iterlinmax = 100000;
    Uraux = Ur[[j]];
    xalin = xa[[j]];
    dxalin = 10^(-8);
    Mpln = Mp[[j]];
    Taln = Ta[[j]];

```

```

While[Uraux > 1 && iterlin < iterlinmax,
  iterlin = iterlin + 1;
  ca = 1.00926 - 4.04033 * 10^(-5) * Talin +
    6.17596 * 10^(-7) * Talin^2 - 4.09723 * 10^(-10) * Talin^3;
  cv = 1.8830 - 0.16737 * 10^(-3) * (Talin + 273.15) +
    0.84386 * 10^(-6) * (Talin + 273.15)^2 - 0.26966 * 10^(-9) * (Talin + 273.15)^3;
  cw = 2.82232 + 1.18277 * 10^(-2) * (Talin + 273.15) -
    3.5047 * 10^(-5) * (Talin + 273.15)^2 + 3.6010 * 10^(-8) * (Talin + 273.15)^3;
  cp = (1.361 + 0.0397 * (100 * Mplin / (1 + Mplin))) * 10^3;
  roa = auxroa / (Talin + 273.15);
  hfg = (2502.2 - 2.39 * Talin) * (1 + 1.2925 * Exp[-16.961 * Mplin]) * 10^3;
  Me = (1 / 100) * ( Log[1 - xalin] / (-8.6541 * 10^(-5) * (Talin + 49.81)) )^(1 / 1.8634);
  Alin = -1.7054824 + 0.00087917 * Talin;
  Blin = 148.60862 * Exp[ -5.9418 * 10^(-2) * Talin ];
  dmdt = ( (Me - Mplin) / ( 3600 * ( Alin^2 + (1 / 900) * Blin * t) ^0.5 ) );
  dmdt = Re[dmdt];

  apotp[[j]] = dz / ((npy - 1) * dt);
  sctp[[j]] = ( a * hc * Talin + (hfg + cv * Talin) * rop * dmdt ) / (rop * cp + rop * cw * Mplin) * dz;
  aptp[[j]] = apotp[[j]] + ( a * hc + cv * rop * dmdt ) / (rop * cp + rop * cw * Mp[[j - 1]]) * dz;

  Tplin = (apotp[[j]] * Tpold[[j]] + sctp[[j]]) / aptp[[j]];
  Mplin = Mp[[j]] + (roa * wa * dz / (rop * up * dy)) * (xa[[j]] - xalin);
  Talin = (roa * wa * dz / up * (ca + cv * xa[[j]]) * Ta[[j]] +
    rop * dy * (cp + cw * Mp[[j]]) * Tp[[j]] -
    rop * dy * (cp + cw * Mplin) * Tp[[j]] -
    roa * wa * (dz / up) * hfg * (xalin - xa[[j]]) ) / (roa * wa * dz / up * (ca + cv * xalin));
  Pvsaux = auxR * Exp[ (auxA + auxB * (Talin + 273.16) +
    auxC * (Talin + 273.16)^2 + auxD * (Talin + 273.16)^3 +
    auxE * (Talin + 273.16)^4) / (auxF * (Talin + 273.16) - auxG * (Talin + 273.16)^2) ];
  Uraux = xalin * Patm / ((xalin + 0.622) * Pvsaux);

  (*
  Print[Talin, " ", Uraux, " ", iterlin, " ", j, " ", ii];
  *)
  xalin = xalin - dxalin;
];

```

```

Ur[[j]] = Uraux;
  Ta[[j]] = Talin;
  xa[[j]] = xalin;
  Mp[[j]] = Mplin;
  Tp[[j]] = Tplin;
  Pvs[[j]] = Pvsaux;
]; (*Fim do If*)

, (j, 2, npy)];
ca1 = (1.00926 - 4.04033*10^(-5) * Ta[[1]] +
  6.17596*10^(-7) * Ta[[1]]^2 - 4.09723*10^(-10) * Ta[[1]]^3) * 10^3;
cv1 = (1.8830 - 0.16737*10^(-3) * (Ta[[1]] + 273.15) +
  0.84386*10^(-6) * (Ta[[1]] + 273.15)^2 -
  0.26966*10^(-9) * (Ta[[1]] + 273.15)^3) * 10^3;
cw1 = (2.82232 + 1.18277*10^(-2) * (Ta[[1]] + 273.15) -
  3.5047*10^(-5) * (Ta[[1]] + 273.15)^2 + 3.6010*10^(-8) * (Ta[[1]] + 273.15)^3) * 10^3;
roa1 = auxroa / (Ta[[1]] + 273.15);
cpl = (1.361 + 0.0397 * (100 * Mp[[1]] / (1 + Mp[[1]]))) * 10^3;
hfg1 = (2502.2 - 2.39 * Ta[[1]]) * (1 + 1.2925 * Exp[-16.961 * Mp[[1]]) * 10^3;
Me1 = (1/100) * ( Log[1 - xa[[1]]] / (-8.6541*10^(-5) * (Ta[[1]] + 49.81)) )^(1/1.8634);
Alin1 = -1.7054824 + 0.00087917 * Ta[[1]];
Blin1 = 148.60862 * Exp[ -5.9418 * 10^(-2) * Ta[[1]] ];
dndt1 = ( (Me1 - Mp[[1]]) / ( 3600 * ( Alin1^2 + (1/900) * Blin1 * t) ^0.5 ) );
dndt1 = Re[dndt1];
apomp[[1]] = dz / ((npy - 1) * dt); (*o dt na direção z diferente do dt da direção y*);
scmp[[1]] = Me1 * dz / ( 3600 * ( Alin1^2 + (1/900) * Blin1 * t) ^0.5 );
apmp[[1]] = apomp[[1]] + dz / ( 3600 * ( Alin1^2 + (1/900) * Blin1 * t) ^0.5 );
Mp[[1]] = (apomp[[1]] * Mpold[[1]] + scmp[[1]]) / apmp[[1]];
apotp[[1]] = dz / ((npy - 1) * dt);
sctp[[1]] = ( a * hc * Ta[[1]] + (hfg1 + cv1 * Ta[[1]]) * rop * dndt1 ) / (rop * cpl + rop * cw1 * Mp[[1]]) * dz;
aptp[[1]] = apotp[[1]] + ( a * hc + cv1 * rop * dndt1 ) / (rop * cpl + rop * cw1 * Mp[[1]]) * dz;
Tp[[1]] = (apotp[[1]] * Tpoldd[[1]] + sctp[[1]]) / aptp[[1]];
Pvs[[1]] = auxR * Exp[ (auxA + auxB * (Ta[[1]] + 273.16) + auxC * (Ta[[1]] +
  273.16)^2 + auxD * (Ta[[1]] + 273.16)^3 +
  auxE * (Ta[[1]] + 273.16)^4) / (auxF * (Ta[[1]] + 273.16) - auxG * (Ta[[1]] + 273.16)^2)];
Ur[[1]] = xa[[1]] * Patm / ((xa[[1]] + 0.622) * Pvs[[1]]);
If[ii = 1 || ii = 10 || ii = 20 || ii = 40 || ii = 60 || ii = 80 ||
  ii = 100 || ii = 200 || ii = 500 || ii = 1000 || ii = 1500 ||
  ii = 2000 || ii = 2500 || ii = 3000 || ii = 3500 || ii = 4000 ||
  ii = 4500 || ii = 5000 || ii = 6000 || ii = 7000 || ii = 8000 ||
  ii = 9000 || ii = 10000 || ii = 12000 || ii = 14000 || ii = 16000 ||
  ii = 18000 || ii = 20000 || ii = 25000 || ii = 30000 || ii = 35000 ||
  ii = 40000 || ii = 50000 || ii = 60000 || ii = 80000 || ii = 100000 ||

```

```

ii = 120000 || ii = 140000 || ii = 160000 || ii = 180000 || ii = 200000 ||
ii = 210000 || ii = 220000 || ii = 230000 || ii = 240000 || ii = 250000 ||
ii = 260000 || ii = 270000 || ii = 280000 || ii = 290000 || ii = 300000 ||
ii = 350000 || ii = 400000 || ii = 450000 || ii = 500000 || ii = 550000 ||
ii = 600000 || ii = 650000 || ii = 700000 || ii = 750000 || ii = 800000 ||
ii = 850000 || ii = 900000 || ii = 950000 || ii = 1000000 ||
ii = 1100000 || ii = 1200000 || ii = 1300000 || ii = 1400000 ||
ii = 1500000 || ii = 1600000 || ii = 1700000 || ii = 1800000 ||
ii = 1900000 || ii = 2000000 || ii = 2100000 || ii = 2200000,
Print[" "];
Print["          ", "t=", t, "s          ", "z=", z, "m"];
Print[" "];
Print["y(m)", MatrixForm[y], " ", "M(kg/kg)", MatrixForm[Mp],
" ", "e(oC)", MatrixForm[Tp], " ", "x(kg/kg)",
MatrixForm[xa], " ", "T(oC)", MatrixForm[Ta], " ",
"Pvs(Pa)", MatrixForm[Pvs], " ", "UR", MatrixForm[Ur] ];
, ];
];

```