



**UNIJUÍ - UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL**

**DeFEM - Departamento de Física, Estatística e Matemática.**

**DeTEC – Departamento de tecnologia**

**Curso de Mestrado em Modelagem Matemática**

**VANDERLEI HENRIQUE PÖTTKER**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM DO MILHO EM  
SECADOR DE LEITO FIXO.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**IJUÍ – RS, Brasil, 2006.**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**VANDERLEI HENRIQUE POTTKER**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM DO MILHO  
EM SECADOR DE LEITO FIXO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**IJUÍ (RS), 2006**

**UNIJUÍ-UNIVERSIDADE DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE  
DO SUL  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATEMÁTICA**

**Á comissão examinadora, abaixo assinada, aprova a dissertação.**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM DO MILHO  
EM SECADOR DE LEITO FIXO**

Elaborada por **Vanderlei Henrique Pöttker**

como requisito para obtenção de grau  
de **Mestre em Modelagem Matemática**

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Profº. Dr. João Paulo Lukaszczyk -  
(orientador).

---

Profº. Dr. Oleg A. Khatchourian -  
(co-orientador).

---

Profº. Dr. Antônio Carlos Lyrio Bidel

---

Profª.Dr. Fabiane Avena de Oliveira

IJUÍ, JULHO DE 2006.

**VANDERLEI HENRIQUE PÖTTKER**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE SECAGEM  
DO MILHO EM SECADOR DE LEITO FIXO.**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em matemática- Área de Concentração em Modelagem Matemática da UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (RS), como requisito para obtenção do título de MESTRE EM MODELAGEM MATEMÁTICA.**

**IJUÍ (RS) 2006.**

## AGRADECIMENTO

Quando realizamos um trabalho de conclusão, sentimos uma satisfação, realização e de prazer de mais uma etapa e um sonho realizado da vida. Neste momento importante sempre vem lembrar dos momentos bons e das pessoas que contribuíram para que este estudo tomasse sua finalização.

Quero agradecer a todas as pessoas que me ajudaram e me deram apoio para que acontecesse a conclusão desse estudo. Quero agradecer do modo muito especial: ao meu orientador Professor Dr. João Paulo Lukaszczyk, pela sua orientação e contribuição que o objetivo fosse alcançado; ao Co-orientador Professor Dr. Oleg A. Khatchatourian, que com sua sabedoria incontestável sempre soube me orientar de tal forma que este trabalho fosse realizado e alcançado; a todos os professores do mestrado pela sua dedicação.

A minha família, esposa Carla e filho Henrique, pais Valdir e Saletti Pöttker, aos sogros Celci Henn e Élio Frey, irmãos, cunhados (as) e demais familiares, pelo apoio, incentivo, contribuição e compreensão pela minha ausência enquanto estava estudando para alcançar este objetivo.

Aos funcionários do departamento em especial a Geni, que sempre estiveram presentes dando apoio e trabalhando em prol da minha formação.

Aos meus colegas de mestrado com os quais trocamos idéias, estudamos, fizemos amizades, nos divertimos e com os vossos auxílios e companheirismo pude concluir mais essa jornada. São eles: João Candido Neves, em especial por sua paciência de nos dar explicações, Erno, Wilson, Lidiane, Elaine, Eliane, Ângela, Minéia, Adriano, Alcione, Marilene e Mônica.

Aos professores e funcionários do laboratório de física pelos materiais cedidos e compartilhados, um muito obrigado a todos que direta e indiretamente contribuíram para a minha formação.

## RESUMO

A cultura do milho é uma das principais atividades econômicas do Estado de Santa Catarina. As condições climáticas na região não são apropriadas na época da colheita, ocasionando grãos com elevados teores de umidade e necessitando com isso, de secagem artificial para preservar a qualidade do grão armazenado.

A otimização do processo de secagem de grãos de milho em secadores exige um conhecimento profundo dos fenômenos envolvidos neste processo, modelos matemáticos adequados e algumas propriedades físicas para simulações necessárias.

Neste trabalho foi estudada experimentalmente a dinâmica de secagem do grão de milho em camada fina e espessa para várias temperaturas iniciais e velocidades do ar pré-aquecido. Foi desenvolvido um equipamento experimental que permitiu realizar os experimentos para temperaturas iniciais de 50°C, 70°C, 90°C e 110°C e velocidades do ar de 0,5 m/s, 0,9 m/s, 1,5 m/s e 3 m/s para mesmo teor de umidade inicial do grão de milho de 0,27 b.u. Foi mostrado que o aumento de temperatura e de velocidade acelere o processo de secagem.

Foram analisados vários modelos matemáticos disponíveis na literatura sobre processo de secagem. Para realizar as simulações numéricas neste trabalho foi escolhido o modelo desenvolvido por Lasseran e Courtóis. O modelo é baseado nas leis de Fick e Fourier aplicadas para diferentes camadas de grão e formado por um sistema de seis equações diferenciais parciais quase-lineares acopladas. Para resolução do sistema foi utilizado o método de diferenças finitas. Foram comparados vários esquemas numéricos de primeira e segunda ordem. As simulações feitas mostraram uma coincidência satisfatória com dados experimentais obtidos.

## ABSTRACT

One of the main economic activities of the State of Santa Catarina is the corn culture. However, the climatic conditions in the region are not favorable during the harvest time, which has caused the grains to have elevated moisture levels and as a consequence, artificial drying to preserve the quality of the stored grain has been required.

Optimizing the process of drying corn seeds in dryers demands extensive knowledge of the phenomena involved in the process, appropriate mathematical models and some physical properties for necessary simulations.

The dynamic of corn seed drying in both its thick and fine layers has been experimentally studied at different initial temperatures and preheated air velocities. An experimental equipment has been developed, allowing the performance of experiments at initial temperatures of 50°C, 70°C, 90°C and 110°C and air velocities of 0,5 m/s, 0,9 m/s, 1,5 m/s and 3 m/s, in which the initial grain moisture level was 0.27 b.u. . It's been shown that the increase of temperature and velocity speed up the corn seed drying process.

Several available mathematical models based on the seed drying process have been analyzed. In order to perform the numerical simulations, the model developed by Lasseran and Courtóis has been chosen. This model is based on the Fick and Fourier laws applied on different grain layers and formed by a system of six partial differential quasi-linear equations and has been solved using the method of finite differences. Several numerical schemes of first and second order have been compared and the performed simulations have shown satisfactory coincidence with the experimental obtained data.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- GRÁFICO 01** – Dinâmica de secagem de grão de milho em camada fina para várias velocidades do ar e umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 66%, pressão atmosférica 739 mmHg, temperatura ambiente 16°C e temperatura de 50°C de secagem.....90
- GRÁFICO 02** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada fina para várias velocidades do ar e umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 70%, pressão atmosférica 740 mmHg, temperatura ambiente 14°C e temperatura de 70°C de secagem.....91
- GRÁFICO 03** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada fina para várias velocidades do ar e umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 67%, pressão atmosférica 725 mmHg, temperatura ambiente 22°C e temperatura de 90°C de secagem.....91
- GRÁFICO 04** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada fina para várias velocidades do ar e umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 70%, pressão atmosférica 726 mmHg, temperatura ambiente 22°C e temperatura de 110°C de secagem.....92
- GRÁFICO 05** – Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada fina para várias temperaturas de secagem com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 66%, pressão atmosférica 739 mmHg, temperatura ambiente 16°C com velocidade do ar 0,5 m/s.....92.

- GRÁFICO 06** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada fina para várias temperaturas de secagem com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 66%, pressão atmosférica 730 mmHg, temperatura ambiente 22°C com velocidade do ar 0,9 m/s.....93
- GRÁFICO 07** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada fina para várias temperaturas de secagem com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 70%, pressão atmosférica 716 mmHg, temperatura ambiente 22°C com velocidade do ar 1,5 m/s.....93
- GRÁFICO 08** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada fina para várias temperaturas de secagem com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 76%, pressão atmosférica 727 mmHg, temperatura ambiente 20°C com velocidade do ar 3m/s.....94
- GRÁFICO 09** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 66%, pressão atmosférica 724 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 0,5m/s,temperatura de secagem 50C° .....94
- GRÁFICO 10** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 66%, pressão atmosférica 723 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 0,9m/s,temperatura de secagem 50C° .....95
- GRÁFICO 11** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 67%, pressão atmosférica 725 mmHg, temperatura ambiente 25°C com velocidade do ar 1,5m/s,temperatura de secagem 50C° .....95
- GRÁFICO 12** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 60%, pressão atmosférica 723 mmHg, temperatura ambiente 28°C com velocidade do ar 3m/s,temperatura de secagem 50C° .....96
- GRÁFICO 13** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 723 mmHg, temperatura ambiente 28°C com velocidade do ar 0,5m/s,temperatura de secagem 70C° .....96

- GRÁFICO 14** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 65%, pressão atmosférica 725 mmHg, temperatura ambiente 28°C com velocidade do ar 0,9m/s, temperatura de secagem 70C°.....97
- GRÁFICO 15** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 63%, pressão atmosférica 724 mmHg, temperatura ambiente 29°C com velocidade do ar 1,5m/s, temperatura de secagem 70C°.....97
- GRÁFICO 16** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 62%, pressão atmosférica 724 mmHg, temperatura ambiente 29°C com velocidade do ar 3m/s, temperatura de secagem 70C°.....98
- GRÁFICO 17** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 728 mmHg, temperatura ambiente 28°C com velocidade do ar 0,5m/s, temperatura de secagem 90C°.....98
- GRÁFICO 18** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 725 mmHg, temperatura ambiente 28°C com velocidade do ar 0,9m/s, temperatura de secagem 90C°.....99
- GRÁFICO 19** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 724 mmHg, temperatura ambiente 30°C com velocidade do ar 1,5m/s, temperatura de secagem 90C°.....99
- GRÁFICO 20** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 728 mmHg, temperatura ambiente 29°C com velocidade do ar 3m/s, temperatura de secagem 90C°.....100
- GRÁFICO 21** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 728 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 0,5m/s, temperatura de secagem 110C°.....100

- GRÁFICO 22** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 728 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 0,9m/s, temperatura de secagem 110°C.....101
- GRÁFICO 23** - Dinâmica de secagem de grãos de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 728 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 1,5m/s, temperatura de secagem 110°C.....101
- GRÁFICO 24** – Dinâmica de variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 65%, pressão atmosférica 723,7 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidades do ar 0,5, 0,9, 1,5 e 3 m/s e temperatura de secagem 50°C .....102
- GRÁFICO 25** - Dinâmica de variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 62,7%, pressão atmosférica 724 mmHg, temperatura ambiente 28,5°C com velocidades do ar 0,5, 0,9, 1,5 e 3 m/s e temperatura de secagem 70°C .....102
- GRÁFICO 26** - Dinâmica de variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 725,7 mmHg, temperatura ambiente 29°C com velocidades do ar 0,5, 0,9, 1,5 e 3 m/s e temperatura de secagem 90°C .....103
- GRÁFICO 27** - Dinâmica de variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 60,6%, pressão atmosférica 728,3 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidades do ar 0,5, 0,9, 1,5 e 3 m/s e temperatura de secagem 110°C .....103
- GRÁFICO 28** - Dinâmica de variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 60,6%, pressão

atmosférica 728,3 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidades do ar 0,5m/s e temperaturas de secagem 50°C,70°C,90°C e 110°C.....104

**GRÁFICO 29** - Dinâmica de variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 60,6%, pressão atmosférica 728,3 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidades do ar 0,9m/s e temperaturas de secagem 50°C,70°C,90°C e 110°C.....104

**GRÁFICO 30** - Dinâmica de variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 60,6%, pressão atmosférica 728,3 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidades do ar 1,5m/s e temperaturas de secagem 50°C,70°C,90°C e 110°C.....105

**GRÁFICO 31** - Dinâmica de variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 60,6%, pressão atmosférica 728,3 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidades do ar 3m/s e temperaturas de secagem 50°C,70°C e 90°C.....105

**GRÁFICO 32** - Dinâmica de variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada fina com a espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 64,6%, pressão atmosférica 725,3 mmHg, temperatura ambiente 23°C com velocidades do ar 0,5m/s e temperaturas de secagem 50°C,70°C,90°C e 110°C.....106

**GRÁFICO 33** - Dinâmica da variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com a simulação do programa matemático computacional com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 64,6%, pressão atmosférica 725,3 mmHg, temperatura ambiente 23°C com velocidade do ar 0,5m/s, temperatura de secagem 50°C,70°C,90°C e 110°C.....107

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 01</b> – Espécies <i>Aspergillus spp</i> , <i>Penicillium sp</i> e <i>Fusarium spp</i> .....	30
<b>FIGURA 02</b> – Corte esquemático de um grão de milho. ....	34
<b>FIGURA 03</b> – Representação esquemática da proporção de água e matéria seca numa amostra de grão.....	36
<b>FIGURA 04</b> – Representação esquemática dos tipos de água presente no grão de milho a 15°C .....	41
<b>FIGURA 05</b> – Isotermas de dessecção de milho (RODRIGO ARIAS U.S.A. 1965) .....	44
<b>FIGURA 06</b> – Esquema de um secador de leite fixo.....	53
<b>FIGURA 07</b> – Esquema de secadores quanto ao fluxo de ar do grão .....	57
<b>FIGURA 08</b> – Partes de um secador tipo torre de fluxo mito (Weber, 1998).....	59
<b>FIGURA 09</b> – O esquema da circulação do ar em um secador tipo torre de fluxo mito.....	60
<b>FIGURA 10</b> – Fluxo de ar na torre de secagem .....	62
<b>FIGURA 11</b> – Representação esquemática na parte interna do grão de milho no modelo de Courtois.....	63
<b>FIGURA 12</b> – Representação de uma camada espessa de grão em qualquer posição de um secador.....	66
<b>FIGURA 13</b> - Métodos numéricos para resolução do sistema de equações do modelo Courtois.....	73
<b>FIGURA 14</b> – Foto do equipamento utilizado nos experimentos .....	81

<b>FIGURA 15</b> – Fotografia do equipamento experimental usado no experimento.....	81
<b>FIGURA 16</b> – Fotografia da câmara de secagem com as telas de secções de secagem e dos aparelhos utilizados para fazer as leituras e o controle do equipamento experimental.....	82
<b>FIGURA 17</b> – Foto da placa do manômetro com inclinação de $30^{\circ}C$ .....	82
<b>FIGURA 18</b> – Foto do painel de controle dos aquecedores e as ligações com a câmara de aquecimento.....	83
<b>FIGURA 19</b> – Foto da estufa com as respectivas amostras de 282, 16 gramas e os sacos de grãos de milho para completar o restante da câmara de secagem .....	84
<b>FIGURA 20</b> – Foto da geladeira com as amostras de 282 gramas e sacos de grão de milho pra preencher o restante da câmara de secagem .....	84
<b>FIGURA 21</b> – Câmera de secagem utilizada para secagem em camada fina.....	85
<b>FIGURA 22</b> – Equipamento em funcionamento com a câmara de secagem em camada fina .....	86

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01</b> – Influência da temperatura de armazenagem no processo respiratório de grãos..	32
<b>Tabela 02</b> – Composição química do grão de milho em suas diferentes partes. ....	33
<b>Tabela 03</b> – Teor de umidade de diversos grãos em equilíbrio com diferentes níveis de umidade relativa do ar à temperatura de 25°C.....	46
<b>Tabela 04</b> – Constantes para o grão de milho e equação da atividade da água (aw) para o modelo.....	89



## LISTA DE SÍMBOLOS

**a** – área superficial dos grãos

**A<sub>g</sub>** – área superficial de um único grão

**A<sub>w</sub>** – atividade da água na camada # 3

**b** – constante da equação de Langmuir

**c** – constante da equação B.E. T.

**c<sub>w</sub>** – entalpia específica da água (Kj/Kg .°K)

**ρ<sub>g</sub>** – Massa específica aparente instantânea do produto (kg/m<sup>3</sup>)

**ρ<sub>a</sub>** – Densidade (massa específica) do ar;

**G<sub>a</sub>** - Taxa fluxo de massa de água do ar (kg/m.s)

**c<sub>v</sub>** - Calor específico do vapor de água (J/kg .°K)

**c<sub>p</sub>** – calor específico à pressão constante

**d** – constante da equação de Hakins-

**D** – coeficiente de difusão

**D<sub>o</sub>** – coeficiente de difusão para energia de ativação nula

**D<sub>ij</sub>** – taxa de fluxo d'água entre as camadas #i e #j

**e** – constante da equação de Hakins-

**E** – energia de ativação

**h** – constante da equação de Henderson ou entalpia

**i** – constante da equação de Henderson

**J** – fluxos de calor usados na termodinâmica.

**K<sub>h</sub>** – condutividade hidráulica

**K<sub>ij</sub>** – coeficiente de troca d'água entre as camadas #i e #j

$L_v$  – calor latente de vaporização

$m$  – constante da equação de Chung-Pfost

$p$  – pressão

$R$  – constante de vapor d'água

$r$  – raio

$R_o$  – constante universal dos gases

$V_m$  – volume uma camada

$t$  – tempo

$T$  – temperatura

$v$  – velocidade

$V$  – volume

$W$  – razão de umidade

$X$  – teor de umidade do grão

$XR$  – razão de umidade para o produto

$Y$  – umidade absoluta do ar

$z$  – abscissa ao longo do eixo no fluxo do ar

**Letras gregas:**

$\alpha$  – coeficiente de transferência de calor por convecção

$\beta_p$  – coeficiente de transferência de massa relacionado à pressão

$\varepsilon$  – porosidade

$\Phi_m$  – densidade de fluxo entre ar e grão

$\Phi_h$  – densidade de fluxo de calor entre ar e grão

$\varphi$  – umidade relativa

$\rho$  – massa específica

$\sigma$  – tensão superficial

$\tau_i$  – razão de volume da camada #i

$\psi$  – potencial hidráulico capilar

### **Subscrito**

**o** – inicial

**1** – camada central

**2** – camada intermediária

**3** – camada periférica

**a** – ar

**ahc** – ar fora da camada de grãos

**e** – equilíbrio

**g** – grão

**l** – água na fase líquida

**s** – sólido ou superficial

**vsat** – vapor de saturação

**v**- vapor

**w** – água

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
	<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>I</b>	<b>NOÇÕES PRELIMINARES DA SECAGEM DE GRÃOS DE MILHO.....</b>	<b>28</b>
<b>I.1</b>	<b>Processo respiratório sob condições aeróbicas e anaeróbicas .....</b>	<b>28</b>
<b>I.2</b>	<b>Fatores que afetam a identidade da respiração .....</b>	<b>30</b>
<b>I.2.1</b>	<b>Espécies de fungos.....</b>	<b>30</b>
<b>I.3</b>	<b>Temperatura .....</b>	<b>31</b>
<b>I.3.1</b>	<b>Características do Grão de Milho .....</b>	<b>32</b>
<b>I.3.1.1</b>	<b>Morfologia e composição química do milho.....</b>	<b>32</b>
<b>I.4</b>	<b>Teor de umidade dos grãos .....</b>	<b>34</b>
<b>I.5</b>	<b>Difusão da água líquida.....</b>	<b>37</b>
<b>I.5.1</b>	<b>Comportamento da água no Grão.....</b>	<b>39</b>
<b>I.5.2</b>	<b>Comportamento higroscópico do grão .....</b>	<b>41</b>
<b>I.5.3</b>	<b>Equilíbrio higroscópico dos grãos .....</b>	<b>45</b>
<b>I.5.4</b>	<b>Umidade relativa do ar .....</b>	<b>49</b>
<b>I.6</b>	<b>Massa porosa.....</b>	<b>50</b>
<b>I.7</b>	<b>Umedecimento dos grãos de milho.....</b>	<b>51</b>

<b>I.8</b>	<b>Tipos de secadores .....</b>	<b>52</b>
I.8.1	Quanto ao tipo de fabricação .....	52
I.8.2	Quanto ao tipo de secador e funcionamento.....	53
I.8.3	Características importantes de um secador.....	55
I.8.4	Quanto ao fluxo de ar os secadores podem ser.....	56
I.8.5	Quanto ao sistema de carga os secadores podem ser.....	57
I.8.6	Secador do tipo torre .....	58

## **CAPÍTULO II**

<b>II</b>	<b>MODELOS MATEMÁTICOS. ....</b>	<b>63</b>
<b>II.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>63</b>
<b>II.2</b>	<b>Simulação matemática – Método das diferenças Finitas.....</b>	<b>72</b>

## **CAPÍTULO III**

	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>78</b>
<b>III.1</b>	<b>Objetivo .....</b>	<b>78</b>
<b>III.2</b>	<b>Experimentos de secagem em camada espessa .....</b>	<b>78</b>
III.2.1	O equipamento experimental.....	78
III.2.2	Experimentos de secagem em camada fina .....	85

III.2.2.1 Descrição do equipamento.....	85
<b>III.3 Velocidade do ar.....</b>	<b>86</b>
III.3.1 Relato dos experimentos.....	88
III.3.2. Medidas do teor de umidade dos grãos.....	89
III.3.3 Dado experimental da camada fina com variação da temperatura e velocidade constante em relação ao tempo com a função .....	90
III.3.4 Dados experimentais da camada fina.....	90
<b>IV. CONCLUSÃO.....</b>	<b>108</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>109</b>

## I INTRODUÇÃO

A secagem de produtos agrícolas é uma prática dos primórdios da civilização, quando não havia qualquer preocupação com a armazenagem, e diminuição de umidade dos grãos ocorrendo no próprio campo. A secagem era feita em condições naturais do ambiente, ditadas principalmente pela energia solar incidente e o movimento do ar. Mais tarde, tentou-se controlar parcialmente as condições de secagem, e esta passou a ser feita em fogões especiais ou salas aquecidas.

Entre a Primeira e Segunda Guerra, diversas unidades experimentais de secagem foram construídas. Nessa época, apenas algumas unidades comerciais estavam trabalhando e destinavam-se, basicamente, à secagem de frutas, vegetais e feno, além da secagem de sementes de milho.

Após a Segunda Guerra Mundial, tornaram-se comuns as grandes unidades comerciais de secagem, bem como grandes quantidades de grãos passaram a ser secas nas fazendas.

No Brasil, parte significativa da produção de grãos ainda é secada de forma primitiva, ou seja, secagem natural no campo por longos períodos. Os métodos utilizados para se processar a secagem de grãos são bastante diversos. Eles podem ser classificados das seguintes maneiras: a) Secagem Natural (no campo e no terreiro), b) Secagem Artificial em baixas temperaturas (ambientes ou levemente aquecidos), em altas temperaturas (provocadas por fluxos de aquecimentos artificiais).

A definição quanto ao uso do melhor método depende de diversos fatores, dentre eles, do nível de instrução tecnológica do produtor, do seu poder aquisitivo, do volume de produção, da velocidade de colheita e do fim a que se destinam os grãos.

Os grãos e sementes podem ser extremamente duráveis, mas são também altamente perecíveis. Se forem colhidos em boas condições e subseqüentemente mantidos com baixos teores de umidade e baixa temperatura, eles podem reter seu poder de germinação e outras qualidades por longos períodos.

O objetivo de armazenamento e secagem adequada de grãos é manter a sua duração, as qualidades biológicas, químicas e físicas que os grãos possuem, imediatamente após a colheita. A operação de secagem é uma parte importante do processamento que antecede a armazenagem.

Segundo Brooker et al. (1974), a qualidade dos grãos não pode ser melhorada durante o armazenamento. Grãos colhidos inadequadamente serão de qualidade baixa, não importando como são armazenados. Dois fatores afetam de modo especial a qualidade dos grãos: alto teor de umidade e colheita inadequada.

Os principais agentes que causam redução da qualidade e diminuição da quantidade de produtos armazenados são os roedores, insetos, pássaros e fungos. A respiração pode, em menor escala, contribuir para a perda de matéria seca durante a armazenagem.

De acordo com estudos, a quantidade de grãos de milho perdidos por armazenagem, transportes e má regulagem das colheitadeiras em fazendas e pequenas propriedades no Brasil, foi estimada em 30 á 35 % dependendo o estado. Nos Estados Unidos, onde condições de clima e facilidades de transporte e armazenagem são menos propícias ao desenvolvimento de insetos, as perdas causadas por esses agentes não são tão elevadas quanto no Brasil, enquanto do ponto de vista econômico da região oeste catarinense precisamente do município de Iporã do Oeste do estado de Santa Catarina, sofre com a falta de unidades de



secagem, possuindo uma e com métodos antigos de secagem dependendo de outros municípios e de grandes empresas cerealistas. Sabendo que nenhum grupo de alimentos atinge a importância dos cereais como os grãos do milho e soja, considerando o volume e o conjunto das necessidades, querem pelo consumo in natura, quer como matéria prima para atender a maior parte da agroindústria, incluindo-se as rações para a alimentação animal. Assim, a consequência da falta da disponibilidade de secadores modernos de melhores condições de armazenagem, é perceptível pelo homem comum com grandes perdas sócio-econômicas.

Somente há algumas décadas os fungos foram reconhecidos como os mais importantes causadores de danos às sementes. Os principais tipos de danos causados pelo desenvolvimento de mofo em grãos armazenados são: diminuição da percentagem de respiração, descoloração de parte ou de todo o grão, alterações biológicas, produção de toxinas que podem ser prejudiciais aos homens e animais e perda de peso.

As condições principais que influenciam no desenvolvimento de fungos em produtos armazenados são: teor de umidade dos grãos, temperatura, tempo de armazenagem, grau de infestação por fungo no campo, presença de material estranho e atividade de insetos e roedores.

O alto teor de umidade é o fator isolado mais importante no desenvolvimento do mofo. Os fungos não são afetados diretamente pelo teor de umidade do produto, mas pela umidade relativa de equilíbrio do ar superficial.

Temperaturas elevadas também favorecem o crescimento de mofo que se desenvolvem melhor em temperaturas entre 10°C e 35°C e em umidades relativas elevadas. O desenvolvimento prolongado de fungos em grãos de milho, com elevado teor de umidade, com temperaturas na faixa de 2°C a 7°C, pode resultar na formação de potente micro toxinas.

Na fase de colheita, os grãos estão sujeitos a impactos mecânicos que podem levar as rachaduras e quebras, as quais servem de entrada para a invasão de fungos e insetos. Sob

condições desfavoráveis de colheita e armazenamento, o teor de umidade do produto pode ser alto e suficiente para permitir, além do desenvolvimento de fungos, aquecimento e outros tipos de danos aos grãos.

A quantidade de umidade contida no grão tem um efeito concreto na germinação, colheita, armazenagem e processamento dos produtos. Para cada uma destas fases, há um teor de umidade ótimo ou crítico, acima ou abaixo do quais os resultados não são satisfatórios. Os produtos agrícolas devem ser secos por diferentes métodos, devido as suas características inerentes aos seguintes fatores:

- **Tolerância à temperatura:** As temperaturas elevadas podem reduzir a percentagem de germinação, cozinhar parcialmente o produto ou alterar a sua característica química ou física.
- **Resposta a Umidade:** Grãos que sofrem alterações fisiológicas ou de outra natureza durante a secagem devem ser secos com ar e uma umidade específica.
- **Secagem de Grãos para ração animal:** O milho e a soja são os dois principais componentes de ração animal. Alguns aspectos relativos a secagem desses produtos em relação ao efeito da temperatura de secagem sobre o valor nutricional, estão sendo estudados. Através desse estudo foi detectado um decréscimo na energia disponível do milho e em sua palatabilidade quando o produto era secado com temperaturas superiores a 60°C.
- **Secagem de milho para moagem:** A secagem inadequada de milho destinado à moagem pode criar problemas diversos, como a perda de amido como subproduto, devido à dificuldade de moagem e separação incompleta do amido e da proteína nas centrifugas, resultando em uma baixa recuperação do amido que também é de baixa qualidade.
- **Secagem de grãos para sementes** Em geral, as técnicas usadas para secar sementes são diferentes daquelas utilizadas para secar grãos de um modo geral. Há

necessidade de preservar uma elevada porcentagem de germinação e devem ser tomados cuidados especiais na seleção do secador, nos controles e no manuseio do empregado.

Algumas medidas práticas para reduzir as perdas durante a secagem e armazenagem dos grãos nas propriedades, podem adotar a secagem artificial utilizando modelos matemáticos que possibilitem um melhoramento da qualidade do grão e antecipação da colheita com baixo custo. É uma ferramenta eficiente e prática para tornar mais. Deve-se objetivar a minimização das perdas quantitativas e qualitativas que ocorrem no campo, pelo atraso da colheita ou durante o armazenamento em locais inadequados.

O estudo do processo de secagem baseia-se no desenvolvimento de modelos matemáticos para descrever o fenômeno físico, ou seja, no emprego da simulação visando a avaliação, o desenvolvimento, a otimização e o projeto de secadores. Existem dois métodos usados para analisar a secagem de produtos higroscópios: O método empírico e o método teórico.

O método empírico de análise de secagem consiste na formação de grandezas físicas adimensionais que podem ser facilmente investigados por experimentos laboratoriais. Tal método, geralmente, baseia-se nas condições externas, como temperatura, umidade e velocidade de ar secante. Entretanto, esse método não oferece indicações sobre o transporte de energia e umidade no interior dos grãos.

Os métodos teóricos, por sua vez, consideram não somente as condições externas, mas também os mecanismos de movimento de água e seus efeitos. Muitas mudanças durante a secagem são internas - mudanças na forma e estrutura do produto, quebra e transformações enzimáticas em geral dentre outros. Assim, é necessário desenvolver modelos teóricos.

Estes modelos teóricos juntamente com a técnica de imitar um processo físico, isto é, a simulação, torna o processo de projeção e avaliação de um secador mais rápido e com custo mais baixo que a experimentação.

Neste trabalho foi escolhido para simular o secador de leito fixo devido a sua popularidade entre os operadores de grãos e o aumento de sua demanda. Inicialmente, usando um modelo teórico de fluxo ideal, serão desenvolvidos e simulados os modelos unidimensionais que levam em conta os processos de transferência de calor e massa no secador. Nesta etapa, serão feitas simulações experimentais e comparações de dados apurados pelo processo de secagem feitas por Lebert A Courtois em referência.

O modelo matemático utilizado, neste estudo, leva em conta a não-homogeneidade, o aquecimento e o desprendimento da umidade dos grãos. O modelo, formado pelo sistema de seis equações diferenciais parciais quase-lineares acopladas baseadas nas equações de continuidade e nas Leis de Fick e Fourier, aplicadas para as camadas diferentes de grão (fina e espessa) e, foi resolvido pelo método de diferenças finitas. Foram comparados vários esquemas numéricos de segunda ordem.

Para validar o modelo considerado, foi feita a comparação entre dados simulados e obtidos experimentalmente para diversas temperaturas e velocidades do ar.

## CAPÍTULO I

### I NOÇÕES PRELIMINARES DA SECAGEM DE GRÃOS DE MILHO

#### 1.1 Processo respiratório sob condições aeróbicas e anaeróbicas

O fenômeno da respiração das plantas foi descoberto por Saussure, em 1797 *Puzzi*, (1977). A partir daí foram iniciados estudos dos fatores que dão origem às transformações fisiológicas que ocorreu nos grãos armazenados.

A respiração sob condições aeróbicas (em presença do oxigênio livre) é o processo pelo quais as células vivas do vegetal, através do oxigênio atmosférico, oxidam os carboidratos e gorduras, produzindo gás carbônico e água e liberando energia na forma de calor. Quando é interrompido o acesso de oxigênio em uma massa de grãos, estes passam a respirar de forma anaeróbica. Sob condições anaeróbicas (sem a presença de oxigênio livre) os produtos finais da respiração se compõem de gás carbônico e alguns compostos orgânicos simples como o álcool etílico. Na respiração anaeróbica, também o oxigênio toma parte ativa nas reações de oxigenação, entretanto, as células não recebem o oxigênio do exterior. O oxigênio é obtido em seu próprio organismo.

Algumas espécies de levedos (fungos unicelulares) que respiram na ausência de oxigênio são encontradas na massa de grãos e aceleram a decomposição dos carboidratos.

Esses fungos, também denominados mofos ou bolores, são microorganismos multicelulares e filamentosos que, ao infectarem os grãos e alimentos, podem produzir substâncias tóxicas, tais como micro toxinas. E estas ao serem ingeridas, inaladas ou

absorvidas pela pele podem causar: estado de letargia, perda de peso, intoxicações, câncer e óbito em homens e animais.

No caso de grãos, estes podem ser infestados durante o cultivo ou no período pós-colheita. Desta forma, os fungos são classificados em Fungos do Campo e Fungos do Armazenamento.

Os fungos do campo contaminam os grãos durante o cultivo por estes requererem ambientes com umidade relativa superior a 80%, enquanto fungos do armazenamento demandam menor quantidade de água. Desta forma, proliferam em maior intensidade na massa de grãos no período pós-colheita.

Materiais biológicos como grãos, sementes e alimentos, possuem a característica de serem higroscópios, pois, entre estes e o ar são ocorre a troca de água, principalmente na forma de vapor. Deste modo, sobre as superfícies dos produtos são estabelecidos micro climas, que têm suas situações de estado influenciadas principalmente pelo teor de umidade dos produtos.

Sendo assim, no espaço formado entre os grãos, denominado como espaço intergranular, durante o período de armazenagem, é estabelecido um ambiente, que tem suas condições de estado afetadas principalmente pelo teor de umidade da massa grãos. O que pode favorecer ou não o desenvolvimento de micro organismos.

As bactérias desenvolvem-se em produtos cuja taxa de umidade no grão é superior a 0,90 b.s, enquanto para fungos os valores variam de 0,65 b.s a 0,90 b.s, faixa que os grãos podem possuir teor de umidade de 14 a 22%. Por isto, na conservação de grãos é empregado o processo de secagem. Este visa reduzir o teor de umidade dos produtos a níveis que a atividade aquosa não propicie a proliferação de fungos.

Em situações de equilíbrio higroscópio a umidade relativa do ar intergranular (massa porosa) corresponde a 100 vezes ao valor da atividade aquosa. Para esta situação a

umidade relativa do ar é denominada como umidade relativa de equilíbrio e a umidade do grão umidade de equilíbrio.

## I.2 Fatores que afetam a identidade da respiração

Os principais fatores que afetam o grau de identidade do processo respiratório são: os tipos de fungos associadas à massa dos grãos que causam danos e ação ao grão de milho são a:

(a) redução do potencial de germinação, (b) descoloração, (c) geração de focos de aquecimento e de migração de umidade na massa de grãos, (d) aceleração das trocas químicas (e) redução da quantidade de matéria seca, a temperatura de armazenagem, o teor de umidade na massa de grãos.

### I.2.1 Espécies de fungos

Muitas espécies de fungos podem se desenvolver utilizando os grãos como substrato, no entanto as espécies *Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.* e *Fusarium-spp.* (Figura 1), são as mais encontradas, em maior destaque as duas primeiras. Sob condições de armazenagem as espécies *Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.* Proliferam caso ocorram às condições apresentadas no Quadro 1.



Figura 01 - Espécies *Aspergillus spp.*, *Penicillium sp* e *Fusarium spp.*

**QUADRO 1** - Condições para o Crescimento de Fungos em Grãos para Temperaturas de 25 A 27°C

<b>Espécie</b>	<b>Umidade relativa do ar intergranular (camada porosa) - %</b>	<b>Teor de umidade dos grãos - %</b>
<i>Aspergillus halophilieus</i>	<b>68</b>	<b>12-14</b>
<i>Aspergillus restrictus</i>	<b>70</b>	<b>13-15</b>
<i>Aspergillus glaucus</i>	<b>73</b>	<b>13-15</b>
<i>A. candidus, A. ochraeus</i>	<b>80</b>	<b>14-16</b>
<i>A. flavus, parasiticus</i>	<b>82</b>	<b>15-18</b>
<i>Penicillium spp.</i>	<b>80-90</b>	<b>15-18</b>

Fonte: BAKKER-ARKEMA (1999)

### **I.3 Temperatura**

A deterioração dos grãos armazenados pode ser lenta se conservados em baixas temperaturas. Segundo *Puzzi*, (1977), experiências realizadas por N.J. Burrell e outros, mostram que grãos de cevada, conservados em temperaturas mais baixas que 5°C, podem ser armazenadas por um período de mais de um ano, sem perder o poder germinativo, mesmo quando apresentam um alto teor de umidade. O poder germinativo dos grãos constitui um dos índices para determinar o grau de deterioração dos grãos.

A temperatura de armazenagem influencia no processo respiratório e, conseqüentemente, na deterioração dos grãos, conforme tabela (1). Um estudo realizado por Milner e Geddes *Puzzi*, (1977) sobre a influência da temperatura entre 25 a 45°C, na respiração da soja com teor de umidade 18,5%, considerada alta, sob condições de aeração (renovação do ar atmosférico na massa de grãos), constatou que a atividade respiratória



calculada em miligramas de CO<sub>2</sub> produzidas por 100g de matéria seca, durante 24 horas apresentou os seguintes dados:

**TABELA 1** - Influência da Temperatura de Armazenagem no Processo Respiratório dos Grãos.

<b>Temperatura °C</b>	<b>Respiração mg de CO<sub>2</sub> / 24h</b>
<b>25</b>	<b>33,6</b>
<b>30</b>	<b>39,7</b>
<b>35</b>	<b>71,8</b>
<b>40</b>	<b>154,7</b>
<b>45</b>	<b>173,1</b>

Apesar dos resultados favoráveis em altas temperaturas, é importante que a temperatura seja mantida baixa, pois, com temperaturas elevadas podemos sim terminar com o processo respiratório, mas podemos danificar certas propriedades do grão e assim baixar sua qualidade, ou até inutilizá-lo para certos fins de alimentação animais e humanas.

### I.3.1 Características do Grão de Milho

#### I.3.1.1 Morfologia e composição química do milho

O grão de milho é constituído de quatro partes principais (Figura 2):

- O pericarpo ou invólucro celulósico exterior;
- O funículo ou resto do tecido de ligação entre o grão e espiga, sob o qual aparece

o hilo ou ponto preto.

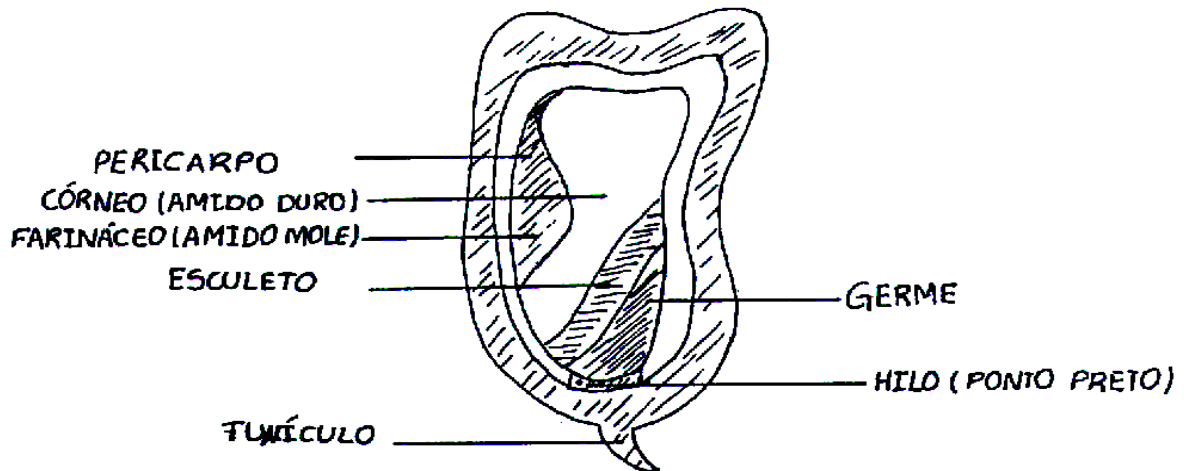


Figura 2 - Corte Esquemático de um Grão de Milho

A composição química quantitativa das sementes é definida geneticamente, apesar de ser, até certo ponto, influenciada pelas condições ambientais a que foram submetidas as plantas que as originam (Tabela 2). O conhecimento da composição química é do interesse prático, porque tanto o vigor, como o potencial de armazenamento de sementes são influenciados pelo teor dos compostos presentes.

**TABELA 2** - Composição Química do Grão de Milho em suas Diferentes Partes

(Porcentagem atribuída à substância seca de cada fração)

Parte do Grão	Porcentagem ponderada (%)	Glicídios Amido (%)	Glicídios Açúcares (%)	Proteínas (%)	Cinzas (%)	Lipídios (%)	Celulose Bruta (%)
Endosperma	82,3	86,4	0,6	9,4	0,3	0,8	-
Germe	11,5	8,2	10,8	18,8	10,1	34,5	-
Pericarpo	5,3	7,3	0,3	3,7	0,8	1,0	-
Funículo	0,8	5,3	1,6	9,1	1,6	3,8	-
<b>Grão inteiro</b>	<b>100,0</b>	<b>71,5</b>	<b>2,0</b>	<b>10,3</b>	<b>1,4</b>	<b>4,8</b>	<b>2,2</b>

Fonte: Earle, 1946.

Os amidos, principais hidratos de carbono dos cereais, estão concentrados no endosperma. Os outros constituintes, açúcares livres, lipídios e cinzas, estão concentrados no embrião. A celulose é o principal constituinte das paredes celulares do pericarpo e do funículo.

As proteínas são os componentes básicos de toda célula viva. Funcionam como enzimas, componentes estruturais e materiais de reserva. No caso dos cereais, as maiores concentrações são encontradas no embrião e na camada de aleurona sob o pericarpo. No processo de secagem, as proteínas são particularmente expostas para sofrer o choque térmico, por serem os constituintes químicos, os mais termos sensíveis a mudanças de temperatura. No processo de secagem, sob o ponto de vista nutricional, as proteínas são as mais danificadas ou desnaturadas.

A água é considerada também como um constituinte químico do grão, pois, após a secagem, seu teor fica, geralmente, compreendido entre 14 e 15,5%. (Earle, 1946).

#### **1.4 Teor de umidade dos grãos**

Uma técnica muito antiga de armazenagem de cereais era guardar bem secos em lugares secos. Os grãos armazenados secos, entre 11 e 13% de umidade, segundo a espécie (milho 13 a 15,5%) segundo Behlen, *Puzzi*, (1977), mantém um processo respiratório discreto. No entanto, se aumentarmos o teor de umidade, a respiração é acelerada consideravelmente e, em consequência disso, ocorre sua deterioração.

O teor de umidade tem origem no fato dos grãos serem constituídos de uma substância sólida, denominada matéria seca e de certa quantidade de água variável dentro de determinadas camadas.

A água está presente no interior do grão de várias formas: água líquida ou constituição: são moléculas individuais de água ligadas a grupos moleculares da matéria biológica. Pode ser removida mediante rigorosas condições de temperatura e longo período de tempo; água adsorvida: são grupos de moléculas de água que aderem sobre as camadas de águas precedentes. É a água não solvente, fortemente adsorvida; água líquida sob pressão osmótica. É retida no grão com certa dificuldade; água absorvida: é a água livre mantida por capilaridade nos poros dos grãos evaporando facilmente.

Pode-se dizer que o teor de umidade dos grãos exprime a relação da massa de água contida numa amostra de grãos, seja quanto à massa total (massa de matéria úmida), seja quanto à massa de matéria seca, sendo definido como segue:

**Umidade do grão** em porcentagem ou "umidade" representa o teor de umidade referente à matéria úmida, isto é:

$$H = \frac{m_E}{m_H} \cdot 100 = \frac{m_E}{m_E + m_{MS}} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Onde:

$m_E$  = massa de água

$m_{MS}$  = massa da matéria seca

$m_H$  = massa total ( $m_E + m_{MS}$ )

Teor de umidade representa a umidade do grão em relação à matéria seca, isto é:

$$X = \frac{m_E}{m_{MS}} \quad (1.2)$$

Para a mesma amostra de grãos, o teor de umidade contido em base seca é sempre maior, numericamente, que a umidade apresentada em base úmida. No comércio do milho

geralmente é usada à definição em base úmida e em trabalhos científicos é usada a definição em base seca.

A determinação da umidade pode ser feita por métodos diretos ou indiretos. A forma direta da obtenção da umidade é realizada em laboratório, onde os grãos de milho são colocados em uma estufa para a retirada da umidade ( $H_2O$ ) até que a variação da massa seja mínima. Pela diferença das massas dos grãos úmidos e secos, podemos obter o teor de umidade do grão pelo método direto. Os métodos indiretos usam a influência da umidade em alguma outra propriedade ou fenômeno físico. Uma propriedade muito comum e muito usada, até mesmo nos aparelhos utilizados no comércio de cereais, é a condução de corrente elétrica. *Puzzi (1977)* e *Brooker et al. (1982)* descrevem bem sobre esses métodos.

No comércio e na indústria, a expressão em base úmida ou teor de umidade é tradicionalmente usado, enquanto que em estudos científicos utiliza-se a taxa de umidade.

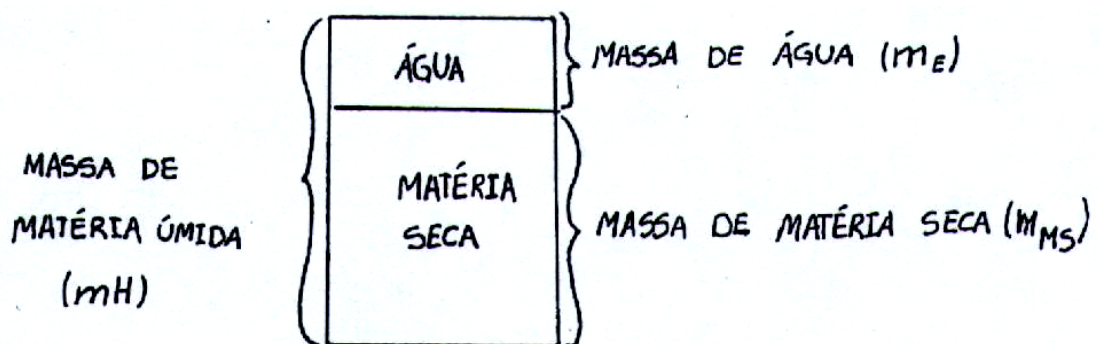


Figura 03 - Representação esquemática da proporção de água e matéria seca numa amostra de grão.

Entre o teor de umidade  $H$  em percentagem e a taxa de umidade  $X$  há as seguintes relações:

$$X = \frac{H}{100-H} \quad (1.3)$$

$$H = \frac{X}{1+X} \times 100 \quad (1.4)$$

Os grãos armazenados secos entre 11 a 15,5% de umidade, segundo a espécie (milho), mantêm um processo respiratório discreto. Portanto o teor de umidade é o fator que governa a conservação dos grãos e sementes.

Além da temperatura e o teor de umidade que atuam sobre todos os processos bioquímicos, a composição do ar ambiente de armazenagem (taxa de gás carbônico e oxigênio) afeta o processo respiratório de uma massa de grãos. Quanto maior a taxa de  $CO_2$  e menor a taxa de oxigênio, menor será a intensidade respiratória de uma massa de grãos depositada em uma célula do silo. O próprio armazenamento em silos a granel possibilita a modificação do ar existente nos espaços intersticiais numa camada de grãos pela própria respiração da semente e pela falta de circulação do ar.

Quanto mais elevado o teor de umidade ou temperatura da massa de grãos, mais intenso é o processo respiratório o qual provoca o consumo de substâncias orgânicas de forma mais acelerada deteriorando assim, com maior intensidade, o produto, resultando perda de peso e qualidade.

### **1.5 Difusão da água líquida**

O primeiro autor a propor experimentalmente o modelo da difusão da água líquida para descrever a migração da água do interior do sólido à sua superfície foi *Lewis* (1921).

Depois *Nascimento* (1979) propôs a difusão de água através do sólido e *Luikov* (1961), baseou-se nesse mecanismo para desenvolver um modelo matemático geral para secagem de produtos capilares porosos. Esse modelo, após ser adaptado para grãos de produtos agrícolas, é:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} X + \nabla^2 K_{12} T + \nabla^2 K_{13} P \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} X + \nabla^2 K_{22} T + \nabla^2 K_{23} P \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31} X + \nabla^2 K_{32} T + \nabla^2 K_{33} P \quad (1.7)$$

Onde:

**X**= teor de umidade do produto, base seca;

**T**= temperatura absoluta de secagem;

**t**= tempo;

$K_{11}$ ,  $K_{22}$  e  $K_{33}$  = coeficientes fenomenológicos;

$\nabla^2$  = operador Laplaciano

**P** = pressão

Poucos coeficientes de transferência de massa e de calor para os grãos de cereais são conhecidos. Portanto, a modelagem da secagem artificial de grãos de cereais ocorre sob circunstâncias que permitem simplificações das equações de secagem de *Luikov*.

As primeiras pesquisas negligenciavam a transferência de energia, assumindo a migração de umidade por difusão líquida ou por capilaridade. Mais tarde consideraram-se os efeitos simultâneos de energia e de massa, aplicando-se a teoria da vaporização condensação, supondo a migração da água inteiramente na fase de vapor devido ao gradiente de temperatura *Fortes e Okos* (1980 – 1981).

### I.5.1 Comportamento da Água no Grão

Pode-se separar a água contida no grão, segundo os fisiologistas, em quatro categorias principais esquematizadas na Figura 4, em função da natureza das ligações físico-químicas existentes entre os componentes da matéria e as moléculas de água, correspondentes aos diferentes níveis de hidratação do produto.

O primeiro tipo de água é denominada água ligada ou de constituição, não tendo papel biológico. Constitui-se de uma camada monomolecular, ligada a certos agrupamentos moleculares de matéria biológica, fortemente polarizadas como o grupo das hidroxilas ( $OH^-$ ).

A água do segundo tipo, denominada água absorvida, é representada por uma camada polimolecular, que se *fixa* sobre a camada monomolecular precedente. Essas camadas estão ligadas à matéria que constitui o grão por meio de ligações eletromagnéticas (forças de Van Del Waals), e constituem-se em água “pseudo-líquida”, não solvente, sem papel biológico e fortemente adsorvida.

Esses dois tipos de água correspondem à níveis de hidratação relativamente baixos, de 0 a 13,0% de teor de umidade, para o milho a 15<sup>0</sup>C. É um limite um pouco “didático” entre a água do tipo 2 e do tipo 3. Alguns autores estimam que, na fase de hidratação, 13%<H<16,5%, uma parte da água, segundo sua localização no grão, seria ainda do tipo 2 - água adsorvida com características solventes. Na realidade, não há descontinuidade entre os diferentes tipos de água. A água dos tipos 1 e 2 não é retirada na secagem, uma vez que ela está totalmente inerte sob o ponto de vista biológico. O terceiro tipo de água - água líquida sob tensão osmótica - trata-se de água solvente, retém diferentes substâncias



dissolvidas - açúcares, ácidos, amidos, sais e outros. Apresenta-se fracamente adsorvida, tem papel biológico e pode permitir as reações enzimáticas, bem como o desenvolvimento de fungos.

Esse tipo de água corresponde aos níveis de hidratação H que vão de 13,0% a 27% para milho a 15<sup>o</sup>C, sendo em grande parte retirada na secagem, porém não totalmente, uma vez que limitando a secagem, por exemplo, a 15%, deixam-se 2 pontos percentuais de água osmótica no grão.

A água osmótica não apresenta dificuldades em ser evaporada, mas em razão da espessura dos grãos, a migração desse tipo de água no interior da amêndoa, no momento da secagem, é causada por diferença de pressão osmótica da célula para célula. Defronta-se, assim com um problema de difusão de água por ocasião da evaporação dos 10 últimos pontos de umidade, tendo em vista que as paredes celulares semipermeáveis constituem uma espécie de obstáculo ao escoamento da água.

O último tipo de água, denominada água absorvida, de impregnação (“água livre”), é mantida fracamente no sistema por forças capilares, ou seja, encontra-se livremente nos espaços correspondentes aos poros existentes no grão. Ela se evapora facilmente por ocasião da secagem, sendo retirada mecanicamente pelas paredes celulares. Essa água, juntamente com a água “osmótica”, igualmente solvente, deixa o grão suscetível aos ataques de fungos e a ocorrência de reações químicas, tomando-o inapto à conservação.

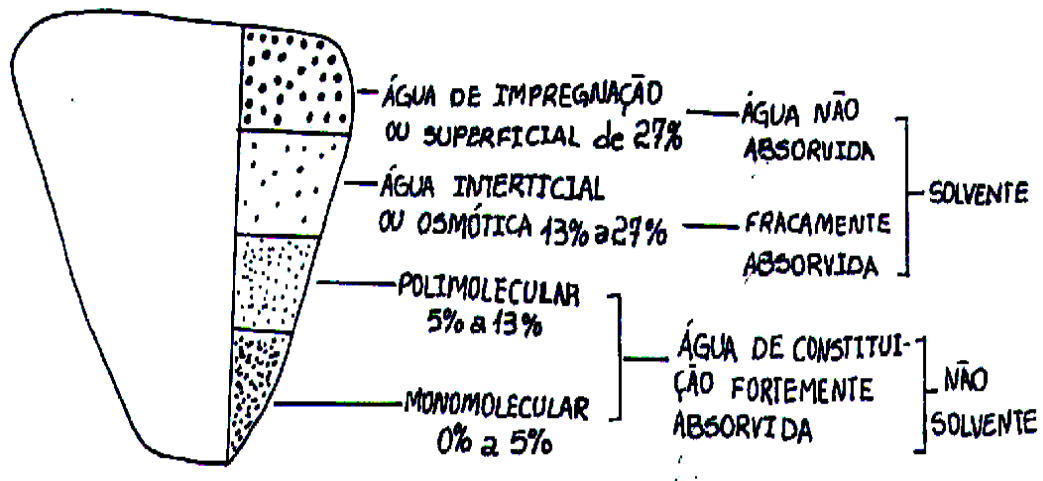


Figura 04 - Representação esquemática dos tipos de água presentes no grão de milho a 15°C.

### I.5.2 Comportamento higroscópico do grão

Como todo o material higroscópico, os grãos têm a propriedade de ceder ou absorver umidade do ar que os envolve (Behlen, Puzzi, (1977)). Os grãos, depositados em ambiente onde a umidade oscila, vão absorvê-la ou cedê-la. Quando a umidade relativa do ambiente sofre aumento ou diminuição há sempre a tendência para um ponto de equilíbrio. No ponto de equilíbrio a pressão de vapor d'água dentro do grão é igual a pressão de vapor d'água contida no ar, denominado teor de umidade de equilíbrio, que constitui um parâmetro importante na secagem.

O teor de umidade de equilíbrio é definido como a umidade que um certo produto atinge ao ser deixado por um tempo suficientemente longo, sob condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar. A umidade de equilíbrio depende do produto, ou seja, da espécie, variedade e maturidade bem como da umidade e temperatura do ar.

Um determinado produto pode atingir a sua umidade de equilíbrio perdendo umidade ao ar e o processo inverso, no qual o ar cede umidade ao grão é denominado de absorção<sup>1</sup>. O mesmo produto colocado sob condições ambientais idênticas pode apresentar

diferentes teores de umidade de equilíbrio, se o processo de migração ocorrer por dessorção ou adsorção. Em geral, o valor obtido no primeiro é maior do que aquele obtido no segundo. Este fenômeno é chamado de histerese e tem sido explicado através das teorias baseadas no estudo da capilaridade.

Normalmente, o teor de umidade de equilíbrio de um produto é apresentado na forma de um gráfico do teor de umidade de equilíbrio versus a umidade relativa do ambiente para uma temperatura fixa. Este gráfico, é denominado de isoterma ou curva isoterma ou também curva de equilíbrio higroscópico, que varia de produto para produto, devido a diferença de composição química do grão. Na Figura 5 estão representadas as isotermas de dessorção do milho.

Outro aspecto relativo aos fenômenos de absorção<sup>1</sup> é o grau de interação da água com os componentes do produto biológico e sua contribuição na textura do produto, determinados pela Atividade Termodinâmica da Água, que é definida como:

$$a_w = \frac{P_{vg}}{P_{vs}} \quad (1.8)$$

onde,

$P_{vg}$  : pressão parcial do vapor d'água existente no micro-ambiente (camada limite de ar) em contato com o grão (Pa);

$P_{vs}$  : pressão de vapor saturante

A atividade termodinâmica da água está relacionada com o potencial químico. O conceito de potencial químico é fundamental para o estudo de fenômenos de transporte em meios capilares porosos. No meio celular, e em qualquer sistema no qual osmose ou

---

<sup>1</sup> O termo absorção é usado para denotar a interação entre a água e a substância adsorvedora.

fenômenos causados por gradiente de pressão parcial ou total ocorrem, a umidade só pode deslocar-se de regiões de maior para de menor potencial químico (Moore). A relação está expressa por:

$$\mu = \mu_o + R T \ln a_w \quad (1.9)$$

Sendo,

$\mu$  = potencial químico da água ( $J / Kg$ );

$\mu_o$  = potencial químico padrão da água numa superfície livre ( $J / Kg$ );

R = constante do vapor d'água ( $J / Kg \text{ } ^\circ C$ );

T = temperatura ( $^\circ C$ )

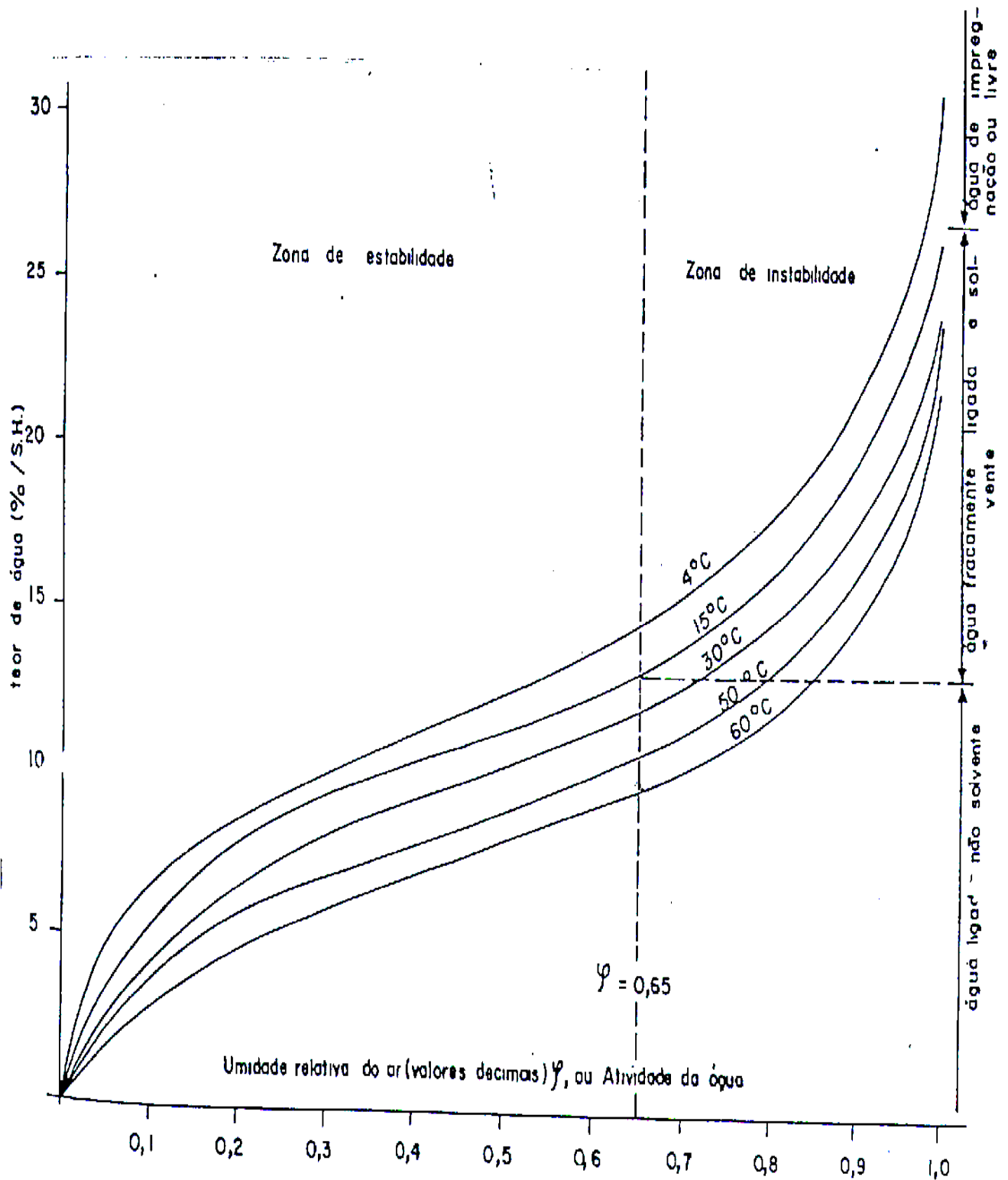


Figura 05 – Isothermas de desorção do milho. (RODRIGUES – ARIAS U.S.A. 1965)

Em equilíbrio higroscópico, a atividade da água no grão  $a_w$  é idêntica à umidade relativa do ar  $\phi$ . O exame das curvas de perda de umidade (Figura 5) mostra que, para  $\phi = 1$  há um teor de umidade chamado teor de umidade crítico ( $H_c$  ou  $X_c$ , segundo a definição de teor de umidade), abaixo do qual se tem sempre  $a_w = 1$ . Quando o teor de umidade do grão é superior a determinado valor, a pressão de vapor emitida pelo grão é idêntica à emitida pela água livre. E, quando o teor de umidade do grão é inferior à umidade crítica, a atividade da água é inferior a 1, isto é, a pressão de vapor emitida pelo grão é inferior à pressão de vapor saturante, o que quer dizer que, o produto pode retornar ao domínio da higroscopicidade e que uma parte de sua água pode ser retirada ou fixada pela matéria. Assim, o teor de umidade do grão é baixo, a tensão de vapor que ele emite é reduzida e a atividade da água é fraca. Para que haja secagem, qualquer que seja o nível de teor de umidade do grão e sua atividade da água, é necessário que a umidade relativa do ar seja constantemente inferior à atividade da água ( $a_w > \phi$ ), de maneira que a pressão de vapor d'água da camada limite de ar em contato com o grão é maior que a pressão de vapor d'água no ar (Rodrigues – Arias U.S.A. 1965).

### 1.5.3 Equilíbrio higroscópico dos grãos

Segundo *Puzzi*, (1977), pelo fato da massa de grãos serem porosa, os grãos ficam com um teor de umidade em o equilíbrio com a umidade relativa do ar intergranular.

Para cada espécie de grãos há uma relação definida entre a umidade relativa do ar e o teor de umidade do grão. Portanto, o grão pode ser armazenado com certa umidade uma vez que a umidade do ar seja adequada. Em um armazenamento, para cada percentual de umidade do grão, há uma determinada umidade do ar onde o grão não perde e não ganha umidade.

**TABELA 3 - Teor de umidade de diversos grãos em equilíbrio com diferentes níveis de umidade relativa do ar à temperatura de 25°C.**

**PORCENTAGEM**

<b>Umidade Relativa do ar (%)</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>75</b>	<b>90</b>	<b>100</b>
<b>Cevada</b>	<b>6,0</b>	<b>8,4</b>	<b>10,0</b>	<b>12,1</b>	<b>14,4</b>	<b>19,5</b>	<b>26,8</b>
<b>Milho</b>	<b>6,4</b>	<b>8,4</b>	<b>10,5</b>	<b>12,9</b>	<b>14,8</b>	<b>19,1</b>	<b>23,9</b>
<b>Milho pipoca</b>	<b>6,8</b>	<b>8,5</b>	<b>9,8</b>	<b>12,2</b>	<b>13,6</b>	<b>18,3</b>	<b>23,0</b>
<b>Aveia</b>	<b>5,7</b>	<b>8,0</b>	<b>9,6</b>	<b>11,8</b>	<b>13,8</b>	<b>18,5</b>	<b>24,1</b>
<b>Centeio</b>	<b>7,0</b>	<b>8,7</b>	<b>10,5</b>	<b>12,2</b>	<b>14,8</b>	<b>14,8</b>	<b>26,7</b>
<b>Sorgo</b>	<b>6,4</b>	<b>8,6</b>	<b>10,5</b>	<b>12,0</b>	<b>15,2</b>	<b>18,8</b>	<b>21,9</b>
<b>Trigo</b>	<b>6,6</b>	<b>8,5</b>	<b>10,0</b>	<b>11,5</b>	<b>14,1</b>	<b>19,3</b>	<b>26,6</b>
<b>Linho</b>	<b>4,4</b>	<b>5,6</b>	<b>6,3</b>	<b>7,9</b>	<b>10,0</b>	<b>15,2</b>	<b>21,4</b>
<b>Amendoim</b>	<b>2,6</b>	<b>4,2</b>	<b>5,6</b>	<b>7,2</b>	<b>9,8</b>	<b>13,0</b>	<b>-</b>
<b>Soja</b>	<b>4,3</b>	<b>6,5</b>	<b>7,4</b>	<b>9,3</b>	<b>13,1</b>	<b>18,8</b>	<b>-</b>
<b>Feijão</b>	<b>5,6</b>	<b>7,7</b>	<b>9,2</b>	<b>11,1</b>	<b>14,5</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Fonte: *Puzzi*, (1977).

Pela tabela podemos verificar que os grãos que contém maior quantidade de óleo, como a soja, o amendoim e o linho, entram em equilíbrio com teor de umidade mais baixo nos diferentes níveis de umidade relativa do ar.

O tempo necessário para obter o equilíbrio higroscópico dos grãos varia muito de acordo com o volume de grãos. Quanto maior o volume, maior será o tempo necessário para que ocorra o equilíbrio higroscópico.

*Puzzi*, (1977) observou que a temperatura também influencia no tempo necessário para ocorrer o equilíbrio higroscópico. Quanto maior a temperatura, menor o tempo necessário. Para um processo que leva 30 dias para entrar em equilíbrio a 22,5°C, a 0°C o processo pode levar 70 a 80 dias.

Um depósito de grãos em silo, normalmente, apresenta variações de temperatura em diferentes pontos internos do mesmo. A camada de grãos próxima às paredes do silo e na superfície adquire uma temperatura mais alta ou mais baixa dependendo da temperatura do ambiente externo. Nos espaços intersticiais o ar circula através das correntes de convecção sob temperaturas diferentes, causadas pela diferença de densidade do ar quente e frio. O ar quente que migra para as regiões intersticiais mais frias tem maior umidade relativa e o ar cede então parte da umidade para os grãos até atingir o equilíbrio higroscópico. O movimento do ar intergranular se processa até que os grãos das regiões frias tornam-se mais úmidos e os grãos das regiões mais quentes, até atingir o equilíbrio higroscópico.

Outros aspectos relativos aos fenômenos de sorção, são os graus de interação da água com os componentes do produto biológico e sua contribuição na textura do produto, determinados pela atividade termodinâmica da água.

A atividade termodinâmica da água está relacionada com o potencial químico. O conceito de potencial químico é fundamental para o estudo de fenômenos de transporte em meios capilares porosos.

No meio celular, e em qualquer sistema no qual osmose ou fenômenos causados por gradiente de pressão parcial ou total ocorrem, a umidade só pode deslocar-se de regiões de maior para um menor potencial químico, *Moore (Puzzi, 1977)*.

O Teor de Umidade de Equilíbrio (*X<sub>e</sub>*) (*equilibrium moisture content*, e.m.c), segundo *Parry*, (1985), é o teor de umidade limite admitido por um material sujeita a um meio ambiente estável (o ar em volta do material tem umidade e temperatura constantes)



durante um período de tempo "suficientemente longo", ou simplesmente, é o teor de umidade correspondente à pressão de vapor de equilíbrio entre o material e o meio.

As trocas de água entre o material e o meio são explicadas, analisando como se dá a absorção (processo onde a água do meio ambiente entra no grão) e a de sorção (processo no qual a água do grão passa para o meio ambiente). Alguns pesquisadores obtiveram experimentalmente curvas isotermas de  $X_e$  por umidade relativa ( $UR$ ) e constataram que os processos de absorção e de sorção ocorrem com diferentes valores do teor de umidade do grão. Ou seja, a curva de umedecimento de um material é diferente da curva de secagem deste mesmo material, cujo fenômeno é chamado de histerese.

Segundo *Parry*, (1985), os modelos teóricos e semi-empíricos, geralmente não são aplicáveis a todos os tipos de grãos e sobre largas faixas de umidade relativa. Para *Parry* pareceria razoável seguir o trabalho de *Brooker*, (1982) e usar somente modelos empíricos até que um entendimento melhor do processo físico da sorção fosse conseguido.

As expressões acima mencionadas usam um  $X_e$  estático em relação ao tempo. *Simmonds* (1953) usou um teor de umidade de equilíbrio dinâmico para expressar a lei de secagem logarítmica.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -k(X - X_e) \quad (1.10)$$

*Bakker-Arkema e Hall*, (1965), contestaram esta proposição e *Nellist*, (1974), introduziu um termo dependente da temperatura, obtendo:

$$X_e = a - b \cdot \ln(1 - UR) - c \cdot \ln T \quad (1.11)$$

Os experimentos mostram que existem duas fases no processo de secagem de um material. Na primeira, a evaporação da água ocorre com uma taxa constante quase como a

taxa de um líquido livre em uma superfície. Na segunda fase, a taxa de evaporação cai continuamente. O ponto de separação destas fases é conhecido como o teor de umidade crítico ( $X_{crit}$ ). Para grãos de cereais o  $X_{crit}$  está fora da faixa de umidade de interesse para armazenamento. *Simmonds et al*, mostraram que para o trigo, o teor de umidade crítico está entre 69% e 85% (b.s.) aproximadamente. Portanto, somente a segunda fase interessa para a pesquisa dos processos reais de secagem.

#### I.5.4 Umidade relativa do ar

A umidade relativa é a porcentagem de umidade contida no ar numa determinada temperatura. A umidade relativa do ar varia com a temperatura.

O ar, para uma determinada temperatura, só pode conter uma quantidade limitada de vapor de água. Quando atingir a capacidade máxima, dizemos que o ar está saturado e a sua umidade relativa é de 100%. Então, a Umidade Relativa é, em percentual, a quantidade de água que o ar contém numa determinada temperatura em relação à capacidade máxima que poderia conter.

Na agroindústria ou comércio, também é muito importante a Umidade Relativa do ar de equilíbrio para o desenvolvimento de microflora. Com condições de umidade relativa de equilíbrio acima de 70%, os fungos se desenvolvem durante o armazenamento e então ocorrerá o aquecimento da massa de grãos.

Então podemos concluir que o teor de umidade dos grãos, a temperatura e a umidade relativa do ar precisam estar inter-relacionados.

Através dos estudos de Kososki, *Puzzi* (1977) sobre o equilíbrio higroscópico de vários tipos de cereais, inclusive a milho, verificou-se que, no nível de 70% de UR, os teores

de umidade dos grãos observados diminuiram em torno de 1 % com um aumento de 10°C, isto é, de 20°C a 30°C.

## 1.6 Massa porosa

A massa porosa é constituída pelos grãos e os espaços intersticiais, também chamados intergranular, espaços que aparece entre os grãos.

Segundo *Puzzi*, (1977), uma massa de cereais como o trigo, arroz ou milho, apresenta um espaço intersticial de 40-45% do volume ocupado pelos grãos.

Para medir os espaços intersticiais toma-se um recipiente graduado, coloca-se uma determinada quantidade do produto (milho) e preenchem-se os espaços intergranulares com um líquido. *Puzzi* (1977) sugere que o líquido a ser usado seja óleo para que ele não penetre imediatamente no grão, dando-nos um tempo mínimo para fazer a leitura mais precisa dos espaços intersticiais.

Num volume de milho precisamos considerar três partes importantes já que entre os grãos existem espaços com ar.

Então:

- Volume dos grãos ( $V_g$ );
- Volume dos espaços entre os grãos;
- Volume global é a soma do volume dos grãos e do volume entre os grãos ( $V_g$ ).

A porosidade é a relação entre o volume dos espaços intersticiais e o volume global:

$$\mathcal{E} = \frac{V_g - V_a}{V_g} \quad (1.12)$$

Após manipulação algébrica, é expressa por:

$$\mathcal{E} = 1 - \frac{V_a}{V_g} \quad (1.13)$$

A partir de certo teor de umidade dos grãos, a porosidade aumenta (0, 17, base seca) para o milho.

### 1.7 Umedecimento dos grãos de milho

Segundo *Hustrulid, A.*, (1962), sob as mesmas condições, não há diferença significativa entre o meio-tempo (tempo necessário para remover metade do teor de umidade livre que, por sua vez, é definido como a diferença entre o teor de umidade inicial e o teor de umidade de equilíbrio) de cada amostra, e assim as taxas de secagem são as mesmas para as amostras umedecidas naturalmente e congeladas. As amostras re-umedecidas, entretanto, secam com uma taxa média levemente superior, estatisticamente significativa, durante os primeiros estágios do que as amostras naturalmente umedecidas. Pode-se concluir que o uso do milho re-umedecido pode ser usado para secagem experimental sem grandes erros e que as amostras congeladas podem ser usadas depois de descongeladas, para obter os mesmos resultados das amostras naturalmente umedecidas. Com base nestas pesquisas e observando de que a estrutura do grão de milho (massa interna e película de revestimento) tem semelhanças com a do grão de soja, acreditamos que o re-umedecimento da soja também não trará conseqüências que possam proporcionar grandes variações na secagem de grãos re-umedecidos e umedecidos naturalmente.

## 1.8 Tipos de secadores

Existem vários tipos de secadores classificados segundo a sua utilidade, o seu porte e o seu modo de funcionamento. Entre os diversos tipos, classificamos:

### 1.8.1 Quanto ao tipo de fabricação

#### Secadores Móveis

São secadores pequenos que podem ser transportados de um lugar para outro. O seu sistema de secagem geralmente é intermitente.

#### Secadores fixos

São secadores de grande porte e que não podem ser transportados de um lugar para outro. Estes secadores que geralmente são instalados em grandes propriedades ou em postos de recebimento de grãos. Este tipo de secador geralmente é construído em forma de silo e serve para armazenagem depois da secagem. São também considerados secadores de leito fixo uma vez que o produto fica em repouso durante a secagem.

O secador é constituído de uma câmara de secagem, dotado de uma chapa perfurada por onde passa o ar de secagem insuflado por um ventilador.



Figura 06 - Esquema de um secador de leito fixo

Os secadores em forma de torre são estáticos, verticais e podem operar nos dois sistemas de secagem, ou seja, secagem intermitente e secagem contínua. Nestes secadores, tanto o ar como o grão podem estar em movimento durante a secagem.

### I.8.2 Quanto ao tipo de secador e funcionamento

Existem diversos tipos de secadores e cada um deles tem características que podem ser mais indicadas para um ou outro tipo de produto e condição da cultura ou do local. Os processos de secagem mais eficazes são os mecânicos e são listados a seguir:

a) Secagem em silos: o produto é carregado úmido num silo com aeração onde é ventilado até secar. O ar da ventilação pode ser aquecido ou não. Atualmente existem

sistemas computadorizados que podem controlar adequadamente tanto ventiladores quanto aquecedores de ar, de tal forma a proceder à secagem com o menor risco possível e da maneira mais econômica. De qualquer forma, podem ser esperadas perdas de 0,5% em matéria seca e algum prejuízo na qualidade.

b) Secagem em silos com misturadores: este processo é semelhante ao anterior, mas conta com dispositivos que ficam misturando os grãos no interior do silo na medida em que ele é ventilado com ar aquecido. A mistura é feita por meio de roscas verticais que varrem a superfície do silo. Este sistema homogeneiza a massa de grãos e elimina potenciais problemas de sobre ou sub-secagem. Como no sistema anterior, opera por bateladas e, uma vez concluída a secagem, o produto pode ficar armazenado no próprio silo.

c) Secagem em silo secador Top-Dry: trata-se de um silo dotado de uma superfície perfurada sob o teto do mesmo, onde camadas seqüenciais de grãos são secas em camada fixa. Os grãos quando secos, ainda quentes, são descarregados no silo onde passam a ser resfriados. Este ar de resfriamento adicionado de ar aquecido é utilizado para secagem da camada fixa seguinte. É um sistema com bom rendimento térmico, consumindo menos de 1000 kcal por kg de água evaporada.

d) Secagem em secadores intermitentes com câmara de repouso: são secadores onde o produto a ser secado circula no interior da máquina, com ventilação de ar quente, até que se alcance a umidade desejada. É um secador muito apropriado para produtos com altos graus de umidade. Trata-se de um sistema de secagem muito seguro, pois, por dispor de câmara de repouso, só uma pequena parcela do volume de grãos está sofrendo secagem a cada instante, limitando o potencial agressivo da mesma. Funciona bem com cargas parciais, o que o torna um sistema apropriado para pequenas produções ou onde haja descontinuidade de produção.

e) Secagem intermitente em secadores convencionais: um secador contínuo convencional é carregado com produto úmido e re-circula o mesmo até que a umidade desejada seja alcançada. É mais utilizado para remoção de grandes quantidades de umidade, como no caso do milho e do arroz. Permite a segregação de cargas com umidades diferentes, bem como uma regulação precisa da taxa de remoção de umidade a ser providenciada.

f) Secagem contínua: um secador contínuo, ventilado com ar aquecido, é carregado com produto úmido que, após ficar um determinado tempo em seu interior, sai seco, de forma contínua, pronto para os processos subseqüentes. Os secadores podem ser de fluxo cruzado (coluna ou cavalete) ou fluxo concorrente. Podem ter ou não sistema de resfriamento incorporado, dependendo de o resto da instalação dispor ou não de dispositivos para resfriamento.

Secadores podem ser colocados em seqüência e, quando antecedendo silos ventilados, podem ser utilizados em processos de seca-aeração.

### I.8.3 Características importantes de um secador

Conforme já mencionado, a eficiência térmica de um secador é um atributo de elevada importância. Como o recomendável é a secagem imediata de grãos colhidos tão proximamente quanto possível da maturidade fisiológica, muita água deve ser evaporada, fazendo com que a eficiência no uso da energia seja um fator muito relevante. Há que se observar ainda à capacidade do equipamento em proporcionar tratamento homogêneo a todo e cada um dos grãos que processa. Sistemas ou equipamentos que tratem de forma desigual grãos que estejam em locais ou caminhos distintos devem ser vistos com cuidado para verificar se esta não-homogeneidade pode ou não causar problemas ao produto ou parte dele.



Também se espera que os sistemas de secagem não causem danos mecânicos no produto que processem. Neste aspecto, os principais vilões são os dispositivos de carga e de descarga.

Secadores devem ainda atender a questões atinentes à facilidade de limpeza e manutenção.

Vale dizer que devem ter acesso fácil e franco às zonas onde haja peças móveis e elementos de desgaste ou consumo, bem como a lugares onde haja acumulação de sujeira e rejeitos. Também é importante que sejam dotados de sistemas de comando automáticos, que permitam uma operação mais adequada, cuidadosa e eficiente do secador. Finalmente há que se mencionarem as questões ambientais. Secadores, por seu princípio de funcionamento, emitem ar contendo partículas de cereal, o que pode ser um inconveniente. Para contornar este problema, os secadores devem possibilitar a instalação de acessórios que reduzam a emissão destas partículas para a atmosfera.

#### I.8.4 Quanto ao fluxo de ar os secadores podem ser

##### Secadores de fluxo concorrente

Nestes secadores o ar de secagem e o grão se movimentam dentro do secador no mesmo sentido. O ar quente é levado para o secador por via de calhas enquanto o grão é conduzido para o secador através de elevadores.

##### Secadores de fluxo contracorrentes

Neste tipo de secadores o fluxo de ar e o movimento dos grãos são sentidos opostos. O fluxo de ar sobe dentro do secador por entre os grãos enquanto o grão desce dentro da câmara de secagem.

##### Secadores de fluxo cruzado

Neste tipo de secadores o grão também desce dentro da câmara de secagem enquanto o fluxo de ar tem direção perpendicular ao grão.

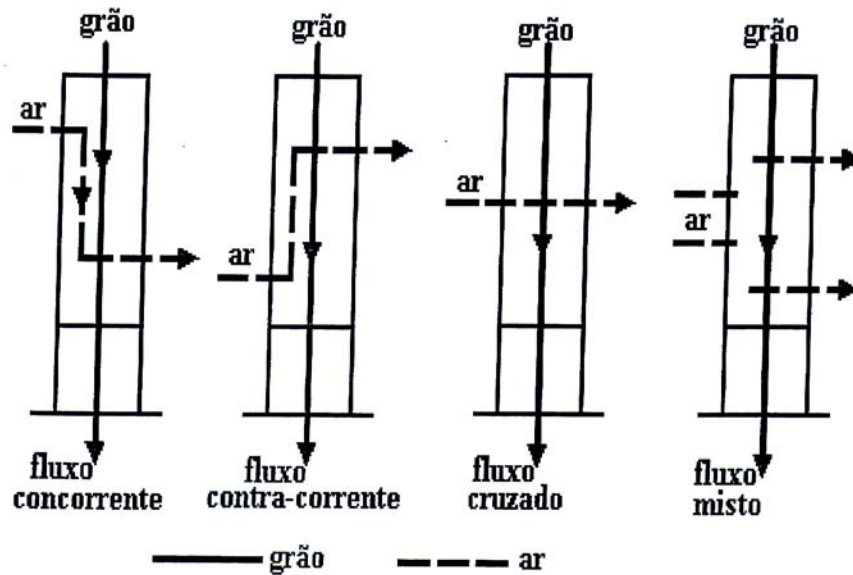


Figura 07 - Esquemas de secadores quanto ao fluxo do ar e do grão

I.8.5 Quanto ao sistema de carga os secadores podem ser

#### Secadores com secagem contínua

Nestes secadores a secagem acontece continuamente. O grão entra na câmara de secagem e só sai de dentro dela seca e resfriada. O grão só passa uma vez dentro da câmara de secagem.

#### Secadores com secagem intermitente

É um processo de secagem não contínuo. O grão pode passar várias vezes dentro do secador durante a secagem. Durante a descida do grão dentro da câmara de secagem o grão entra em contato com o ar aquecido e enquanto é conduzido para a parte superior do secador. Segundo *Puzzi*, (1977), este tipo de secagem se torna mais econômico porque consome menos energia, uma vez que o contato do ar quente com a massa de grãos faz perder a massa de água que se encontra na superfície dos grãos, que é mais fácil de ser liberada. No intervalo de

tempo em que o grão não está em contato com o ar quente, mas o grão ainda está quente, outra quantidade de água pode se deslocar para a superfície dos grãos.

#### I.8.6 Secador do tipo torre

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

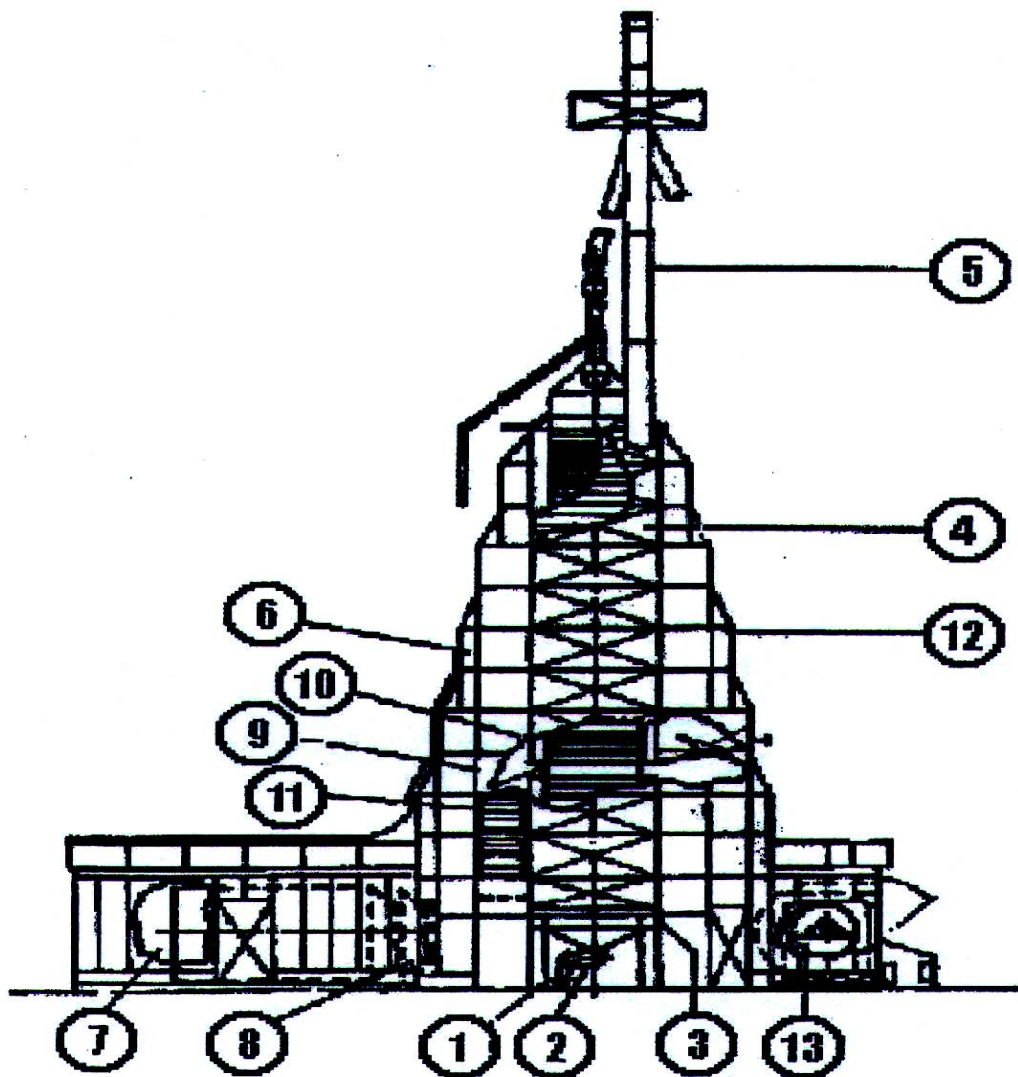
Esses secadores são fabricados com capacidade de secagem entre 10 e mais de 100 ton/h. Ocupam uma área de 25 a 100 m<sup>2</sup> e a altura da torre chega próximo de 27 m. O produto é colocado na parte superior pelos elevadores (5) (ver numeração das partes do secador na Fig.8 e cai por gravidade, passando pelas calhas horizontais da torre (4). O controle do fluxo dos grãos é feito com o fechamento/abertura da mesa de descarga (3). O ar aquecido na fornalha (7) é misturado com o ar ambiente (9) e conduzido pela lateral da torre até a entrada das calhas (6), como se pode observar nas Fig. 8 e 9. As calhas de entrada de ar são fechadas no outro lado, obrigando o ar a sair por baixo e passar pela massa de grãos (ver Fig. 10 e 11).

Como esse ar tem baixo teor de umidade e temperatura em torno de 100<sup>0</sup>C, bem maior que a dos grãos que estão a temperatura ambiente, ocorre o aquecimento dos grãos e a conseqüente vaporização da água presente nestes. Com a migração do vapor de água dos grãos para o ar ocorre o processo de secagem do produto.

O ar úmido é recolhido pelas calhas de saída, conduzido para o difusor de saída de ar (12) e retirado da torre por um escoamento de ar forçado produzido por um exaustor

localizado na parte superior do secador (n<sup>o</sup> 13 da Fig. 8) ou por um ventilador colocado na parte inferior (n<sup>o</sup> 13 da Fig. 8), conforme o modelo do equipamento.

Depois de passar pela câmara de secagem (parte superior, 2/3 da torre), produto passa pela câmara de resfriamento (parte inferior, 1/3 da torre) na qual é submetido a um fluxo de ar com temperatura ambiente.



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

Figura 08 - Parte de um secador tipo torre de fluxo mito [Weber, 1998].

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

Em secadores com recirculação o ar utilizado para o resfriamento é misturado com o ar aquecido na entrada de ar da câmara de secagem (ver setas da Fig.9). Este processo torna o secador mais eficiente em termos de consumo de energia

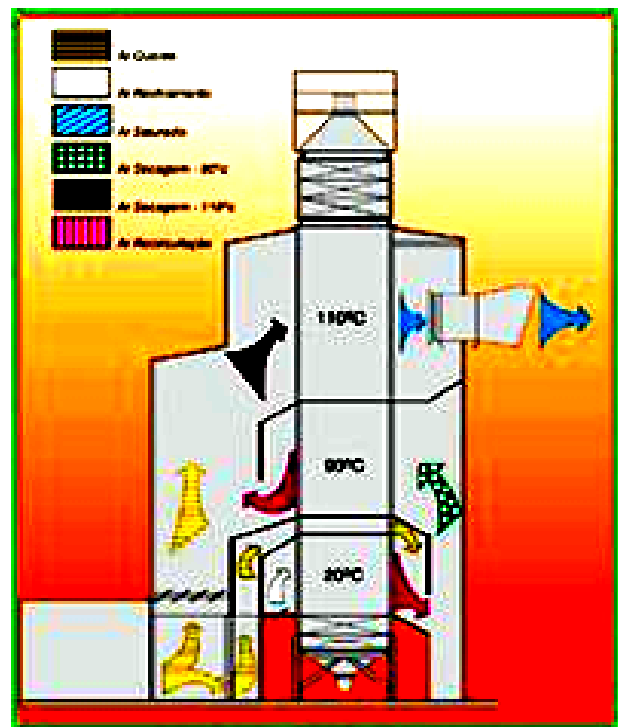


Figura 09 - O esquema da circulação do ar em um secador tipo torre de fluxo misto

O esquema de fluxos de ar depende do sistema de secagem utilizado. Para secagem contínua a torre é dividida em duas partes: os dois terços Superiores recebem ar quente e são usados para secar o produto; o terço inferior é usado para resfriamento, como

ilustra a Fig. 9. Como os grãos descem e passam uma só vez pela torre, esse sistema é recomendado para grãos com baixo teor de umidade.

Para secagem contínua e de corpo inteiro o ar quente é distribuído para toda a torre. Nesse caso, não há a etapa de resfriamento, possibilitando maior capacidade de secagem. O produto deve ser resfriado por aeração, posteriormente no silo ou armazém. Para secagem intermitente, toda a torre é preenchida com grãos, que começam a ser movimentados (abrindo o registro de descarga) quando o sistema de ventilação é acionado. Como o tempo de exposição à corrente de ar quente é diferente para as várias camadas de grãos, uma nova passagem pela torre se faz necessária, para homogeneização do teor de umidade. Esse sistema é utilizado para iniciar a operação no sistema contínuo e para produtos com alto teor de umidade. Para a secagem em lotes ou carga parcial usa-se somente parte da área de secagem da torre. Nesse caso, as entradas de ar, que não são cobertas com grãos, são devidamente fechadas para evitar um caminho mais fácil para o fluxo de ar. Esse sistema é usado para secar cargas pequenas, que não completam o volume total da torre.

Comparando as direções e sentidos dos fluxos dos grãos e do ar, pode-se identificar quatro tipos de fluxo: Concorrente, contra-corrente, cruzado e misto, ilustrados na Fig.7 e 10.

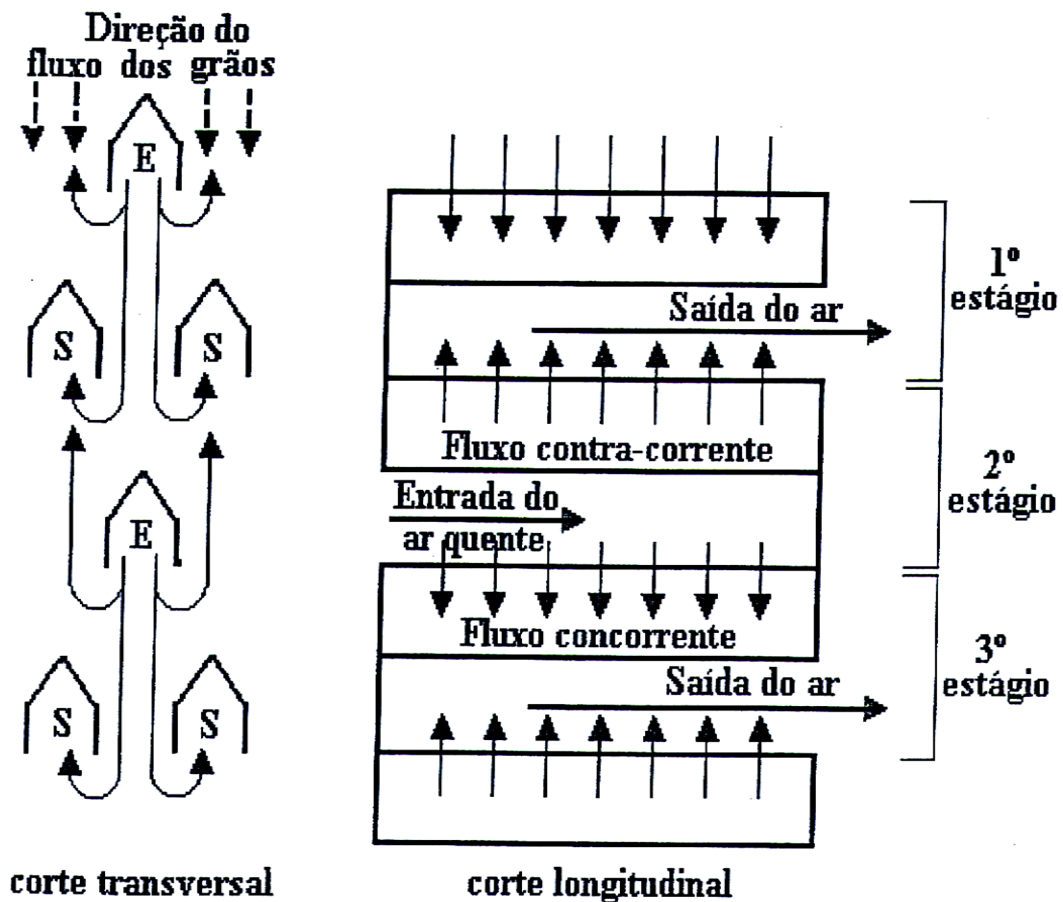


Figura 10 – Fluxo de ar na torre de secagem

A Figura 10 mostra esquematicamente um corte transversal onde se pode observar as calhas de entrada e saída de ar, assim como a trajetória sinuosa dos grãos ao descer pela torre e passar entre as calhas. Nas regiões imediatamente abaixo das calhas ocorre o fluxo cruzado. No corte longitudinal pode-se observar os fluxos do ar, Concorrente e contra-corrente. Foi considerado um estágio, o espaço entre uma calha de entrada e uma de saída de ar.

Os secadores de torre apresentam todos os tipos de fluxos entre as calhas de entrada e saída na torre de secagem. Por isso são chamados de secadores de fluxo misto. Em geral, as zonas de fluxo cruzado são relativamente pequenas comparadas às de fluxo concorrente e contracorrente, apesar de que esta relação depende do espaçamento entre as calhas nas direções horizontal e vertical.

## CAPÍTULO II

### II MODELO MATEMÁTICO PARA SECAGEM DE MILHO

#### II.1 Introdução

*Lasseran e Courtois*, (1993) apresentaram um modelo matemático para simulação secagem de milho, levando em conta as leis de Fick e de Fourier.

Para modelar os fenômenos de transporte em milho considera-se o gradiente de teor de umidade no interior do grão, através da representação discreta do grão de milho em três camadas concêntricas (conforme figura 11). Para simplificar o modelo, a temperatura é considerada uniforme.

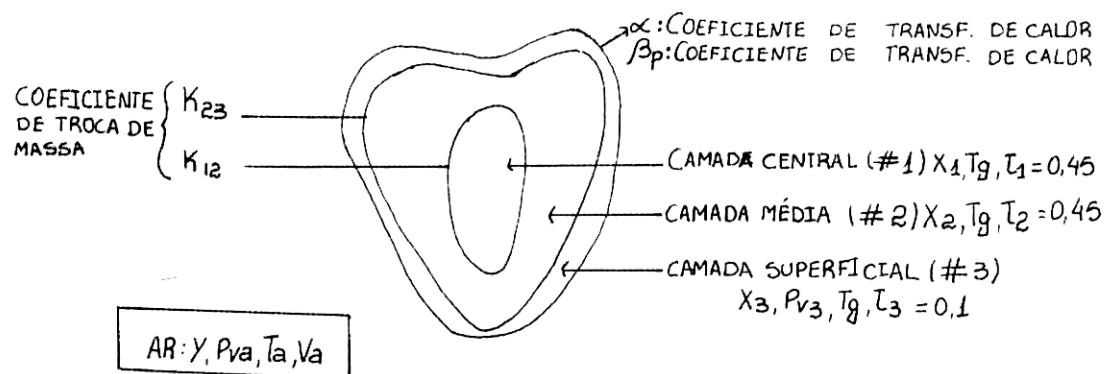


Figura 11 - Representação esquemática na parte interna do grão de milho no modelo de Courtois

Então, as seguintes equações de balanço para um grão são:



Acúmulo de água na camada #i

é igual

a Taxa de fluxo de água da camada #i-1

menos

a Taxa de fluxo de água para a camada #i+1

Para as camadas #1,2e3.

Considerando as transferências de calor do ar e o grão, as densidades de fluxo de calor são:

$$\phi_m = \beta_p (P_{v3} - P_{va}) \quad (2.1)$$

onde,

$$P_{v3} = a_w P_{vsat}$$

$$\phi_h = \alpha (T_g - T_a) \quad (2.2)$$

Para a camada #1, tem-se:

a) massa de água

$$\rho_g V_g \tau_1 X_1$$

b) taxa de variação de massa de água

$$\frac{\partial(\rho_g V_g \tau_1 X_1)}{\partial t}$$

c) variação de intervalo de tempo  $\Delta t$ :

$$\frac{\partial(\rho_g V_g \tau_1 X_1)}{\partial t} \cdot \Delta t$$

Assim, a equação de balanço de massa para camada #1 é.

$$\frac{\partial(\rho_g V_g \tau_1 X_1)}{\partial t} = -D_{12} \quad (2.3)$$

Analogamente, para a camada #2.

$$\frac{\partial(\rho_g V_g \tau_2 X_2)}{\partial t} = D_{12} - D_{23} \quad (2.4)$$

e para a camada #3

$$\frac{\partial(\rho_g V_g \tau_3 X_3)}{\partial t} = D_{23} - A_g \phi_m \quad (2.5)$$

Considerando que

$X = X_1 \tau_1 + X_2 \tau_2 + X_3 \tau_3$ , representa a taxa média de umidade do grão.

O parâmetro  $D_{12}$  é obtido da equação (2.4), onde.

$$K_{12} = B_1 \cdot V_g \quad (2.6)$$

e o parâmetro  $D_{23}$  é obtido da equação (2.5), onde

$$K_{23} = B_2 \cdot V_g \quad (2.7)$$

Na equação de balanço de calor para o grão considera-se:

a) a massa de grão úmido

$p_g V_g + p_g V_g X$ , sendo que a primeira parcela da adição representa a massa seca

e a segunda parcela o teor de umidade do grão de milho e onde

$$X = X_1 + X_2 + X_3 = \frac{\text{teor de umidade no grão}}{\text{massa seca do grão}} \quad (2.8)$$

b) entalpia ou quantidade de calor que fica no grão, considerando a massa do grão úmido.

$$h = \rho_g V_g T_g (c_{pg} + c_{pa} X) \quad (2.9)$$

Seja a mudança no intervalo de tempo  $\Delta t$ , então,  $\Delta h$  (esta mudança é causada pelas transferências de massa e calor)

$$\Delta h = -A_g \phi_h \Delta t - A_g \phi_m H_v \Delta t \quad (2.10)$$

Esta mudança é causada pelas trocas de massa e de calor.

Dividindo (2.10) por  $\Delta t$  e levando ao limite com  $\Delta t \rightarrow 0$ , obtém-se.

$$\frac{\partial [\rho_g V_g (c_{pg} + c_{pw} X) T_g]}{\partial t} = -A_g \phi_h - A_g \phi_m H_v \quad (2.11)$$

Considere uma camada espessa de grãos conforme a figura 12, onde o ar entra com umidade  $Y$  definida como:

$$Y = \frac{\text{umidade do ar}}{\text{massa de ar seco}}$$

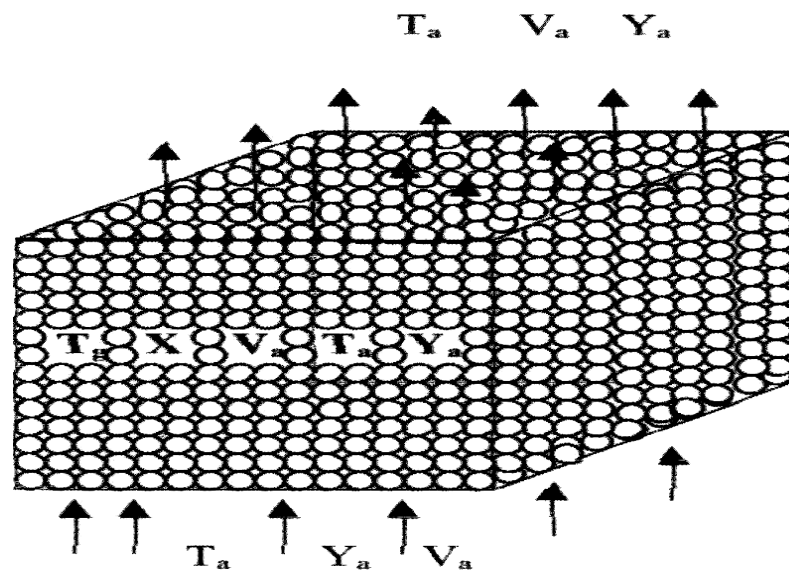


Figura 12 – Representação de uma camada espessa de grão em qualquer posição de um secador.

A quantidade de água no ar que entra neste volume por  $\Delta t$  é

$F = A_{vazia} \cdot V_a' \cdot \Delta t \cdot p_a' \cdot Y'$ , onde a expressão  $(A_{vazia} \cdot V_a' \cdot p_a')$  represente a massa de ar seco.

Assim, na saída, tem-se:

$$F_s = F + \frac{\partial F}{\partial z} \Delta z$$

Variação por tempo  $\Delta t$  é dada pela expressão

$$\Delta(\rho_a \cdot \Delta z \cdot A_{vazia} \cdot Y) = F_s - F + F_g$$

Sendo a quantidade de água que sai do grão  $F_g$  definida como:

$$F_g = A_g \cdot \phi_m \cdot \Delta t$$

E  $A_g$  representa a área da superfície de todos os grãos em  $\Delta z$ , ou seja,

$$A_g = a \cdot A_{total} \cdot \Delta z \cdot (1 - \varepsilon) = a \cdot \frac{A_{vazia}}{\varepsilon} \cdot \Delta z \cdot (1 - \varepsilon)$$

Onde  $\varepsilon$  representa o coeficiente de porosidade e  $a = \frac{A_g}{V_g}$ .

Seja o acréscimo de umidade do ar na passagem pela camada, isto é, a quantidade de água no ar dentro da camada  $\Delta z$  mais a quantidade de água que sai do grão, ou seja,

$$\Delta(\rho_a \cdot \Delta z \cdot A_{vazia} \cdot Y) = - \frac{\partial(\rho_a \cdot \Delta t \cdot A_{vazia} \cdot V_a \cdot Y)}{\partial z} \cdot \Delta z + a \frac{A_{vazia}}{\varepsilon} \cdot \Delta z \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \phi_m \cdot \Delta t$$

Simplificando, dividindo por  $\Delta t$  e levando ao limite ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) a expressão acima, obtém a equação de balanço de massa para o ar, ou seja,

$$\frac{\partial(\rho_a Y)}{\partial t} = - \frac{\partial(V_a \cdot \rho_a Y)}{\partial z} + \phi_m a \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \quad (2.12)$$

$$\text{Onde } V_a = \frac{V_{ahc}}{\varepsilon}$$

A equação de balanço de calor do ar para o mesmo pedaço  $\Delta z$  considera a entalpia dada por:

$$h = p_a (cp_a + Ycp_v) T_a \cdot V_a .$$

Sendo que  $h$  varia com o tempo, a perda de calor do ar para o grão é dada pela seguinte equação de balanço:

$$\frac{\partial(p_a (cp_a + Ycp_v) T_a)}{\partial t} = - \frac{\partial(V_a p_a (cp_a + Ycp_v) T_a)}{\partial z} + a \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} (\phi_m H_v + \phi_h) \quad (2.13)$$

Ajustando-se para camadas delgadas, obtém-se:

$$K_{12} = V_g \cdot 0,004 \cdot \exp(0,0335 \cdot T_g) \quad (2.14)$$

$$K_{23} = V_g \cdot 0,0086 \cdot \exp(0,0421 \cdot T_g) \quad (2.15)$$

$$\alpha = -19,72 + 0,5152 \cdot T_a + 379 \cdot Y \quad (2.16)$$

Alem disso,  $\beta_p$  pode ser obtido da seguinte relação:

$$\frac{\alpha}{\beta_p \cdot L_v} = 64,7 \quad (2.17)$$

portanto

$$\beta_p = -1,293 \cdot 10^{-7} + 3,378 \cdot 10^{-9} \cdot T_a + 2,485 \cdot 10^{-6} \cdot Y \quad (2.18)$$

Levando-se em consideração as suposições acima feitas e reorganizadas nos termos, a simulação do processo de secagem de milho é feita resolvendo um sistema, que pode ser dividido em dois subsistemas representando a variação de seis incógnitas.

O subsistema grão é matematicamente descrito por um conjunto de quatro equações diferenciais acopladas:

$$\frac{\partial X_1}{\partial t} = \frac{B_1}{\rho_g \tau_1} (X_2 - X_1) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial X_2}{\partial t} = \frac{\beta_1}{\rho_g \tau_2} (X_1 - X_2) - \frac{B_2}{\rho_g \tau_2} (X_3 - X_2) \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial X_3}{\partial t} = \frac{B_2}{\rho_g \tau_3} (X_3 - X_2) + \frac{\phi_m \cdot a}{\rho_g \tau_3} \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{-\phi_h \cdot a - \phi_m \cdot a \cdot L_v}{\rho_g (c p_g + X c p_w)} \quad (2.22)$$

E o subsistema ar é matematicamente descrito por um conjunto de duas equações diferenciais parciais com a hipótese de um fluxo “plug-type” para o ar:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -V_a \frac{\partial Y}{\partial z} + \frac{\phi_m \cdot a \cdot (1 - \varepsilon)}{\rho_a \cdot \varepsilon} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -V_a \frac{\partial T_a}{\partial z} + \frac{a \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{\phi_m \cdot c p_v (T_g - T_a) + \phi_h}{\rho_a (c p_g + Y c p_v)} \quad (2.24)$$

O sistema pode ser escrito na forma matricial,

$$\frac{\partial \vec{X}}{\partial t} = \vec{F}_1(t, z, \vec{X}, \vec{Y}) \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial \vec{Y}}{\partial t} = -\frac{1}{V_a} \cdot \frac{\partial \vec{Y}}{\partial z} + \vec{F}_2(t, z, \vec{X}, \vec{Y}) \quad (2.26)$$

onde,

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ T_g \end{pmatrix} \quad \vec{Y} = \begin{pmatrix} Y \\ T_a \end{pmatrix}$$

O sistema aqui obtido é o mesmo de Courtois (1989), descrito no capítulo anterior no item referente às teorias de secagem. Courtois em seus cálculos considerou que a velocidade do ar não depende da variação da umidade do mesmo no processo de secagem.

Na bibliografia analisada não foi mencionado se o autor levou em consideração as variações da densidade e da velocidade do ar provocadas pelas mudanças de temperatura do ar no processo de secagem. Neste trabalho levam-se em consideração tais variações, ou seja, usando a equação de continuidade para obter a velocidade do ar,

$$\rho_{a0} \cdot V_{a0} = \rho_a \cdot V_a$$

tem-se

$$V_a = \frac{[29 \cdot (1 - Y_0) + 18 \cdot Y_0] \cdot T_a}{[29 \cdot (1 - Y) + 18 \cdot Y] \cdot T_{a0}} \cdot V_{a0} \quad (2.27)$$

E para a densidade do ar usa-se o seguinte

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{273}{T_a} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{18}{29} \right) \cdot \frac{Y}{0,622 + Y} \right] \quad (2.28)$$

Os outros parâmetros e constantes necessários no modelo são encontrados na literatura e alguns estão expressos na tabela 04.

**TABELA 04** - Constantes para o Grão de Milho e Equação da Atividade da Água ( $A_w$ ) para o Modelo

$A_w$	$1 - \exp [-0,6876 \cdot (T_g + 45,55555) \cdot X^2]$
$P_g$	$1350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$C_{pg}$	$1122 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
$E$	$0,45$ (adimensional)
$A$	$800 \text{ m}^{-1}$

Fonte: F. Courtois et all (1991)

As equações (2.19), (2.20), (2.21) representam as trocas de massa no interior do grão e ar/grão, (2.22) a transferência de calor ar/grão e (2.23) e (2.24) a variação das características do ar através da camada delgada de grãos.

Os termos não-lineares das equações são essencialmente devido a:

- $B_1$  e  $B_2$ , coeficientes de troca de massa entre as camadas do grão, são funções exponenciais da temperatura  $T_g$ , ajustados para dados experimentais;
- $P_{v3}$ , pressão parcial de vapor na camada limite (#3), é uma função muito complexa da taxa de umidade  $X$  e da temperatura  $T_g$  do grão;
- $P_{va}$ , pressão parcial de vapor no ar<sup>1</sup>, uma função da umidade absoluta do ar  $Y$ ;
- as equações de balanço (2.22) e (2.24) onde aparecem ligadas as transferências de massa e de calor.

Note que, nas equações (2.23) e (2.24), a derivada em relação ao tempo  $t$  é resultante de uma diferença entre dois termos de mesma ordem e magnitude. Este ponto é muito importante para entender os problemas de estabilidade numérica. Por esta razão, uma solução analítica não é possível. Portanto, os métodos numéricos são necessários para efetivar a simulação.

Observando as equações (2.23) e (2.24) as seguintes hipóteses são admitidas:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} \text{ é negligenciado comparado com } -V_a \frac{\partial Y}{\partial z} e \frac{\phi_m \cdot a \cdot (1 - \varepsilon)}{p_a \cdot \varepsilon}$$

e

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} \text{ é negligenciado comparado com } -V_a \frac{\partial T_a}{\partial z} e \frac{a \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{\phi_m \cdot c p_v \cdot (T_g - T_a) + \phi_h}{\rho_a \cdot (c p_a + Y c p_v)} .$$

Considerando as simplificações acima, as equações (2.23) e (2.24) podem ser rescritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial Y}{\partial z} = \frac{\phi_m \cdot a \cdot (1 - \varepsilon)}{V_a \cdot \rho_a \cdot \varepsilon} \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{a \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{\phi_m \cdot c p_v \cdot (T_g - T_a) + \phi_h}{V_a \cdot \rho_a \cdot (c p_a + Y c p_v)} \quad (2.30)$$



## II.2 Simulação matemática – Método das diferenças finitas

O método das diferenças finitas é freqüentemente utilizado na integração numérica de sistemas de equações diferenciais. Sua dedução pode ser encontrada em textos de análise matemática, sendo aqui mostrado um rápido resumo desta técnica.

Considere-se um problema unidimensional. Seja  $x_0$  um número real qualquer e  $h$  um número positivo. Define-se malha de passo associado à  $x_0$  como um conjunto dos pontos

$$x_i = x_0 \pm ih, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N.$$

Nos pontos dessa malha serão calculadas as aproximações de uma função  $y(x)$ . A idéia geral do método de diferenças finitas é a discretização do domínio e a aproximação das derivadas de  $y(x)$  que aparecem na equação diferencial. Diz-se, assim, que o problema foi discretizado. É interesse, portanto, o cálculo aproximado das derivadas nos pontos da malha.

A ferramenta matemática básica no cálculo de aproximações para as derivadas é a série de Taylor. Ela diz como obter uma aproximação numa vizinhança de  $X$ , ou seja  $y(x+h)$ , incorporando informações no ponto  $x$ . assumindo que  $y(x)$  tem derivadas até a ordem de  $n+1$  em  $x$ , obtem-se:

$$y(x+h) = y(x) + hy'(x) + \frac{h^2}{2!} y''(x) + \dots + \frac{h^n}{n!} y^{(n)}(x) + \frac{h^{n+1}}{(n+1)!} y^{(n+1)}(\zeta) \quad (2.31)$$

generalização para mais de uma variável é imediata. Neste trabalho, tem-se o caso de duas variáveis  $x$  e  $t$ . Considere a malha no plano  $xt$  como sendo conjunto de pontos  $(x_i, t_j) = (x_0 + ih, t_0 + jk)$ , com espaçamento  $h$  em  $x$  e  $k$  em  $t$ .

A diferença finita já obtida em uma dimensão pode agora ser utilizada em cada variável pra gerar aproximações para as derivadas parciais. Assim

$$y'(x) = \frac{y(x+h) - y(x)}{h} - \frac{h}{2} y''(\zeta) \quad (2.32)$$

Vários são os métodos de diferenças finitas aplicados à simulação do processo de secagem em secadores de fluxo misto permitem uma decomposição da camada espessa numa serie de camadas delgadas (modelo unidimensional: figura), sendo este o método mais utilizado por Bakker Arkema et al. em 1974, Daudin em 1982, Courtois em 1991, entre outros. A sua aplicação na resolução das equações do modelo matemático de simulação do processo de secagem em secador de fluxo misto será objeto do parágrafo seguinte.

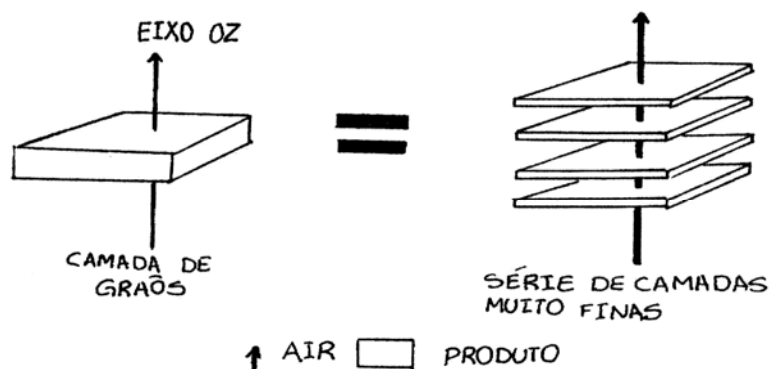


Figura 13 - Métodos numéricos para Resolução do Sistema de Equações do Modelo Courtois

O método matemático de simulação para ser discretizado é formado pelo conjunto de equações diferencias parciais de primeira ordem:

$$\frac{\partial X_1}{\partial t} = \frac{B_1}{\rho_g \tau_1} (X_2 - X_1)$$

$$\frac{\partial X_2}{\partial t} = \frac{B_1}{\rho_g \tau_2} (X_1 - X_2) - \frac{B_2}{\rho_g \tau_2} (X_3 - X_2)$$

$$\frac{\partial X_3}{\partial t} = \frac{B_2}{\rho_g \tau_3} (X_3 - X_2) + \frac{\Phi_m \cdot a}{\rho_g \tau_3}$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{-\phi_h \cdot a - \phi_m \cdot a \cdot L_v}{\rho_g (cp_g + Xcp_w)}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial z} = \frac{\phi_m \cdot a \cdot (1 - \varepsilon)}{v_a \cdot \rho_a \cdot \varepsilon}$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{a \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{\phi_m \cdot cp_v \cdot (T_g - T_a) + \phi_h}{v_a \cdot \rho_a \cdot (cp_a + Ycp_v)}$$

e as demais equações auxiliares.

Sendo as condições iniciais:  $X_1, X_2, X_3 = X_0$  e  $T_g = T_{g0}$  para o grão e  $Y = Y_0$  e  $T_{g0}$ , para o ar, com  $t = 0$  e para  $z > 0$ ; e as condições de contorno:  $Y = Y_0$  e  $T_a = T_{oa}$  para  $z = 0$ , então  $t \geq 0$ .

A integração numérica espaço-tempo do modelo unidimensional é obtida pelos métodos baseados no passo de tempo  $k$  e no passo espacial  $h$ . dividindo o intervalo  $[0, h]$ , da variável espacial  $z$ , em  $N$  partes iguais de comprimento  $h$ , tem-se  $N + 1$  pontos  $z_i + ih$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, N$ , onde  $h = H/N$  e, tomando um passo de tempo  $k$ , obtêm-se uma aproximação da solução nos pontos  $(z_i, t_j)$  da malha.

Considere uma camada espessa com uma série de camadas delgadas com espessuras  $h$  ( eixo  $0z$  e a trajetória do ar são paralelos, na mesma direção) e fazendo  $k$  bastante pequeno as equações (2.25) e (2.26) podem ser escritas na forma de diferenças finitas:

$$\frac{Y(t, z + h) - Y(t, z)}{h} = \frac{a \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \phi_m(t, z)}{v_a \cdot \varepsilon \cdot \rho_a(t, z)} \quad (2.33)$$

$$\frac{T_a(t, z + h) - T_a(t, z)}{h} = \frac{a \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \cdot \frac{\phi_m(t, z) \cdot cp_v \cdot (T_g(t, z) - T_a(t, z)) + \phi_h(t, z)}{v_a \cdot \rho_a(t, z) \cdot (cp_a + Y(t, z) \cdot cp_v)} \quad (2.34)$$

As equações (2.29) e (2.30) estão ligadas às equações (2.19) a (2.22), discretizadas pelo método de Euler, pelos parâmetros SIMBOLO  $m(t, z)$  e  $T_g(t, z)$ . Ou seja,

$$\frac{X_1(t+k, z) - X_1(t, z)}{k} = \frac{B_1(t, z)}{\rho_g \cdot \tau_1} (X_2(t, z) - X_1(t, z)) \quad (2.35)$$

$$\frac{X_2(t+k, z) - X_2(t, z)}{k} = \frac{B_1(t, z)}{\rho_g \cdot \tau_2} \cdot (X_1(t, z) - X_2(t, z)) + \frac{B_2(t, z)}{\rho_g \cdot \tau_2} \cdot (X_3(t, z) - X_2(t, z)) \quad (2.36)$$

$$\frac{X_3(t+k, z) - X_3(t, z)}{k} = \frac{B_2(t, z)}{\rho_g \cdot \tau_3} \cdot (X_2(t, z) - X_3(t, z)) - \frac{\phi_m(t, z) \cdot a}{\rho_g \cdot \tau_3} \quad (2.37)$$

$$\frac{T_g(t+k, z) - T_g(t, z)}{k} = \frac{-a \cdot \phi_h(t, z) - a \cdot \phi_m(t, z) \cdot L_v}{\rho_g \cdot (cp_g + X(t, z) \cdot cp_w)} \quad (2.38)$$

Para aumentar a estabilidade e a robustez do método, integrações do tempo e espaço são combinadas. A cada passo de tempo  $k$  constante, para valores crescendo de  $z$ , calcula-se:

1 – os novos valores de  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $T_g$ ,  $\Phi_m$  e  $\Phi_h$  com  $t$  e  $z$  a partir dos valores de  $t-k$  e  $z$ , sendo as equações (2.19) a (2.22) discretizadas pelo método de Euler;

2 – os novos valores de  $Y$  e  $T$ , com  $t$  e  $z$  a partir dos valores de  $t$  e  $z-h$  e a partir de  $m(t, z)$  calculado em 1, sendo utilizado as equações (2.29) E (2.30).

O modelo discreto de uma camada de grãos de 0,16m de espessura, por exemplo, é matematicamente representado por 120 equações ligadas (com  $h=0,005m$ ). Para simular uma hora, com um passo de tempo de 1s, tem-se 3600 x 140 recirculações da variável estada com a forma discreta do sistema de equações (2.19) a (2.22) e (2.24) a (2.25).

O método de resolução do sistema acima descrito foi proposto por Courtois et all (1991). Além do método de Euler exposto, busca-se a solução do sistema pelo método implícito de Adams, inicialmente para as equações (2.19) a (2.22) com as mesmas condições iniciais, sendo discretizadas pela formula dos trapézios. Considerando a molécula

computacional pelo o método implícito de Adams de segunda ordem é iterativo e para cada passo de tempo  $k$  consiste em:

1 - partindo-se de uma aproximação inicial  $X^0 = (X_1^0, X_2^0, X_3, T_g^0)$  e das demais variáveis auxiliares, determinadas pelo método de Euler,

2 - calcula-se a seqüência de aproximações  $X^{(1)}, X^{(2)}, X^{(3)}, \dots, X^{(m)}, \dots$  utilizando-se as equações:

$$X_1^{m+1}(t+k, z) = X_1(t, z) + \frac{k}{2} \left[ \frac{B_1(t, z)}{\rho_g \cdot \tau_1} \cdot (X_2(t, z) - X_1(t, z)) + \frac{B_1^m(t+k, z)}{\rho_g \cdot \tau_1} \cdot (X_2^m(t+k, z) - X_1^m(t+k, z)) \right] \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} & \frac{B_1(t, z)}{\rho_g \cdot \tau_2} \cdot (X_1(t, z) - X_2(t, z)) + \frac{B_2(t, z)}{\rho_g \cdot \tau_2} \cdot (X_3(t, z) - X_2(t, z)) + \\ & + \frac{B_1^m(t+k, z)}{\rho_g \cdot \tau_2} \cdot (X_1^m(t+k, z) - X_2^m(t+k, z)) + \frac{B_2^m(t+k, z)}{\rho_g \cdot \tau_2} \cdot (X_3^m(t+k, z) - X_2^m(t+k, z)) \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} X_3^{m+1}(t+k, z) &= X_3(t, z) + \frac{k}{2} \cdot \\ & \left[ \frac{B_2(t, z)}{\rho_g \cdot \tau_3} \cdot (X_2(t, z) - X_3(t, z)) + \frac{\phi_m(t, z) \cdot a}{\rho_g \cdot \tau_3} + \frac{B_2^m(t+k, z)}{\rho_g \cdot \tau_3} \cdot (X_2^m(t+k, z) - X_3^m(t+k, z)) + \frac{\phi_m^m(t+k, z) \cdot a}{\rho_g \cdot \tau_3} \right] \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$T_g^{m+1}(t+k, z) = T_g(t, z) + \frac{k}{2} \left[ \frac{-\phi_h(t, z) \cdot a - \phi_m(t, z) \cdot a \cdot L_v}{\rho_g \cdot (cp_g + X(t, z) \cdot cp_w)} + \frac{-\phi_m^h(t+k, z) \cdot a - \phi_m^m(t+k, z) \cdot a \cdot L_v}{\rho_g \cdot (cp_g + X^m(t+k, z) \cdot cp_w)} \right] \quad (2.42)$$

Continua-se a gerar aproximações até que o critério  $|X^m - X^{m+1}| < \varepsilon$  seja satisfeito, sendo  $\varepsilon$  a tolerância aceitável.

Encontrada a tolerância e previamente determinada para o método iterativo descrito acima, determinam-se os valores de  $Y$  e  $T_a$  com  $t$  e  $z$  a partir dos valores de  $t$  e  $z-h$ , utilizando as equações (2.33) e (2.34).

Outra forma usada neste trabalho para resolver as equações (2.19) à (2.22), (2.29) e (2.30) é usar o método de Adams de segunda ordem para todas as equações. Para as equações (2.19) a (2.22) o método foi descrito acima e para as equações (2.29) e (2.30) procede-se como segue para cada passo espacial  $h$ :

- 1 - considere a aproximação inicial  $Y^0 = (Y^0, T_a^0)$  determinada pelas equações (2.33) e (2.34),
- 2 - calcula-se a seqüência de aproximações  $Y^{(1)}, Y^{(2)}, Y^{(3)}, \dots, Y^{(n)}, \dots$  utilizando-se das seguintes equações:

$$Y^{n+1}(t, z + h) = Y(t, z) + \frac{h}{2} \left[ \frac{a \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \phi_m(t, z)}{v_a \cdot \varepsilon \cdot \rho_a(t, z)} + \frac{a \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \phi_m^n(t, z + h)}{v_a \cdot \varepsilon \cdot \rho_a^n(t, z + h)} \right] \quad (2.43)$$

$$T_a^{n+1}(t, z + h) = T_a(t, z) + \frac{h}{2}$$

$$\left[ \frac{a \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \phi_m^n(t, z) \cdot cp_v \cdot (T_g(t, z) - T_a(t, z)) + \phi_h(t, z)}{\varepsilon \cdot v_a \cdot \rho_a^n(t, z + h) \cdot (cp_a + Y^n(t, z + h) \cdot cp_v)} + \frac{a \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \phi_m^n(t, z + h) \cdot cp_v \cdot (T_g^n(t, z + h) - T_a^n(t, z + h)) + \phi_h^n(t, z + h)}{\varepsilon \cdot v_a \cdot \rho_a^n(t, z + h) \cdot (cp_a + Y^n(t, z + h) \cdot cp_v)} \right] \quad (2.44)$$

Continuam-se as aproximações ate que o critério  $|S^n - S^{n+1}| < \varepsilon$  seja satisfeito, sendo  $\varepsilon$  a tolerância aceitável.

A resolução das equações do modelo matemático de simulação do processo de secagem do secador de fluxo misto é feita numericamente pelo programas EULER\_EX (método desenvolvido por Courtois et al, 1991), EULER\_I1 e EULER\_I2 (desenvolvidos neste trabalho), escritos em pascal.

## **CAPÍTULO III**

### **III RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

#### **III.1 OBJETIVO**

Obter dados experimentais próprios observando vários fenômenos físicos para validar o modelo matemático do capítulo II fazendo comparativos dos dados experimentais com os dados obtidos numericamente com o modelo matemático.

#### **III.2 Experimentos de secagem em camada espessa**

##### **III.2.1 O equipamento experimental**

Baseado no equipamento já existente no Laboratório de Física da Unijuí, foi construída uma nova câmara de secagem de grãos de milho, para evitar perdas durante a secagem, utilizou um cano de PVC de 15 cm diâmetro por 30 cm de altura (conforme figura 16). Dessa forma, por ser de plástico bom isolante térmico para evitar perdas de energia pelas laterais do secador durante a secagem. Todo secador foi vedado com silicone e fita crepe para evitar escapamento de ar durante o experimento. Uma das faces foram colocadas três aberturas da câmara de secagem móvel para fazer a troca de grãos 4cm, 14cm e 24cm (conforme figura 16).

No interior do secador foi instalado um sensor termopar de temperatura para medir a temperatura do ar durante a secagem. Este sensor é fixo e a aparelhagem é ligada a eles por meio de conexão devidamente isolados termicamente para que a câmara de secagem pudesse ser manuseada mais facilmente na hora de retirar as amostras de grãos e repor outros grãos. Dessa forma evitamos perdas de umidade na hora da retirada das amostras.

A câmara também ficou bem maior para podermos trabalhar com velocidades mais baixas e, com isso também conseguimos um maior controle da temperatura de entrada do ar na câmara de secagem. A estabilidade da temperatura ocorria nos instantes iniciais da secagem sem que alguém precisasse ficar controlando a temperatura o tempo todo.

A nova câmara de secagem também foi dividida em três secções para podermos observar a umidade do grão ao longo da câmara.

Quanto à umidade do grão, objetivou medir pela diferença de massa. Como a câmara de secagem ficou bem maior e as balanças de precisão operam apenas com pequenas amostras, foi preciso construir pequenas caixinhas de tela para obter apenas uma pequena amostra de grãos de milho para cada secção.

O protótipo se assemelha a um modelo real de secador de leito fixo (figura 15), composto por um sistema de ventilação, uma fonte de aquecimento de ar, tubulação de ar e uma câmara de secagem.

O equipamento conta com um ventilador movido por um motor de  $\frac{3}{4}$  de HP, com rotação máxima de 3450 RPM. Para mudar a vazão de ar foi usada uma fonte de energia CFW-04-IGBT da fábrica Weg. O motor foi ligado a essa fonte para controlar e regular a rotação do motor e assim obter a vazão desejada sem que fosse preciso usar uma válvula para controlar a vazão. O ar gerado pelo ventilador foi canalizado por um tubo de PVC 50 mm de diâmetro e 1,5 metros de comprimento.



Para obter a velocidade do ar foi instalado, a um metro do ventilador, no tubo de PVC um medidor de vazão (diafragma) (figura 15). A vazão será calculada pela diferença de pressão exercida sobre uma coluna de água (colorida) a ele acoplada em tubulação de vidro com escala milimétricas (figura 17).

Para aquecer o ar foram instaladas oito resistências de aquecedor elétrico, cada uma com potência nominal de 400 Watts (figura 18). As resistências foram ligadas a uma diferença de potencial de 220 Volts, sendo que quatro delas tinham interruptores individuais e as outras quatro resistências foram ligadas a dois reostatos, duas resistências para cada reostato, permitindo um controle e estabilidade da temperatura do ar desejada.

O ar, ao sair do cano de aquecimento, passa por uma conexão de 70 cm de comprimento contendo uma curva acentuada de 90° que faz ligação com outra conexão que conduz o ar à câmara de secagem (figura 19). Os encaixes das conexões entre si e com o cano de aquecimento foram bem vedados.

A câmara de secagem tem 15 cm de diâmetro, 30 cm de altura, todas as medidas internas. O cano de PVC (150 mm) foi dividido em três compartimentos de caixinha de tela, formando assim três regiões iguais denominadas neste trabalho de secções (figura 16). Foi usada placa de tela para permitir a passagem do ar.

Um termopar foi ligado a um controle eletrônico com um computador com um programa desenvolvido pelo departamento de engenharia elétrica da UNIJUI que registra as medidas de temperaturas especialmente para este fim.

Nas figuras 14 – 22 são apresentadas às fotografias do equipamento e suas partes.



Figura 14 – Foto do equipamento utilizado nos experimentos.



Figura 15 – Fotografia do equipamento experimental usado nos experimento.



Figura 16 – Fotografia da câmara de secagem com as telas de secções de secagem e dos aparelhos utilizados para fazer as leituras e o controle do equipamento experimental.



Figura 17 – Foto da placa do manômetro com inclinação de  $30^\circ$



Figura 18 - Foto do painel de controle dos aquecedores e as ligações com a câmara de aquecimento.

A umidade inicial da massa de grãos de milho foi obtida por um aparelho de uso do laboratório de semente da UNIJUI, sendo o aparelho do tipo Detector de Umidade Universal nº 2000/00231 do fabricante Unimaq Máquinas e Equipamentos.

A obtenção da umidade dos grãos no interior de cada secção no final de cada secagem, como já tinha colocado anteriormente, foi feita pela diferença de massa. Importante salientar é que os grãos colocados nas caixinhas de telas para amostragem eram grãos com as mesmas condições de umidade, temperatura e tamanho dos que eram colocados apenas para completar (encher) a câmara de secagem (figura 16). Estas amostras eram pesadas antes e depois da secagem. Antes de colocar o milho no secador as amostras, eram colocadas em uma estufa em pré-aquecido conforme a temperatura desejada, junto com a amostra que vai à caixinha com a temperatura que seria feita a experiência (conforme figura 19), ao serem retiradas da câmara de secagem eram colocadas rapidamente sobre a balança e repesadas. As caixinhas de telas da amostragem tinham dimensões muito semelhantes entre si e dentro delas eram colocadas quantidades praticamente iguais. Em cada amostra foi colocadas cerca de

282,16 gramas de milho úmida antes da secagem. Após a medição da umidade o milho foi colocado em saquinhos plásticos com o peso da amostra anteriormente citado, lacrado e colocado na geladeira a 4°C para conservar o grau de umidade. A precisão da balança analítica é de 0,01 gramas, do Laboratório de física e química da Unijuí.



Figura 19 – Foto da estufa com as respectivas amostras de 282,16 gramas e os sacos de grãos de milhos para completar o restante da câmara de secagem.



Figura 20 - Foto da geladeira com as amostras de 282 gramas e sacos de grão de milho para preencher o restante da câmara de secagem.

### III.2.2 Experimentos de secagem em camada fina

#### III.2.2.1 Descrição do equipamento

Os experimentos em camada fina foi utilizados os mesmos equipamentos das figuras (fotos 14 a 22) menos a câmara de secagem que foi menor, medindo de 8 cm de altura e 15 cm de diâmetro (conforme figura 21) e as amostras (saquinhos de grãos de milho figura 20) foi utilizado 100 gramas o que equivalia a 1,5 cm de altura na câmara de secagem, com um termopar instalado abaixo da tela entrada de ar para registrar a temperatura do ar. As demais medidas de temperatura e velocidade eram as mesmas do experimento anterior.



Figura 21 - Câmera de secagem utilizada para secagem em camada fina



Figura 22 – Equipamento em funcionamento com a câmara de secagem em camada fina.

### III.3 Velocidade do ar

Foi obtida pela diferença de pressão instalando no interior do duto de ar um diafragma, placa cilíndrica com um orifício de  $0,001017 \text{ m}^2$  no seu centro. Ao diafragma acoplado a um manômetro (figura 17), uma placa com tubo de vidro, com escala milimétrica. Uma parte do manômetro tinha sua posição vertical e a outra formava um ângulo de  $30^\circ$  com a horizontal. No interior do manômetro colocamos água destilada colorida até um ponto. Pela diferença de pressão, antes e depois da válvula, a água subia no tubo de vidro. Pela variação da água no tubo conseguimos calcular a vazão do ar utilizando-nos da equação:

$$Q = C A_0 \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (3.1)$$

onde:

Q= vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$C$ = coeficiente da placa

$A_0$ = área do orifício

$\Delta p$ = variação de pressão (N/m<sup>2</sup>)

$\rho$ = massa específica do fluido (Kg/m<sup>3</sup>).

Para calcular a vazão foi preciso determinar o coeficiente  $C$  da equação (3.1). Considerando uma secção transversal no tubo cilíndrico onde ocorre o escape do fluxo de ar, a velocidade varia de um ponto do diâmetro para o outro.

Para calcular a velocidade do ar em cada ponto tomado foram utilizadas as equações do escoamento isentrópico para gases perfeitos conforme segue:

$$V = \lambda \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1} R \cdot T} \quad (3.2)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{k+1}{K-1} (1 - \pi^{(k-1)/k})} \quad (3.3)$$

$$\pi = \frac{P_a}{P_t} \quad (3.4)$$

$P_a$  =pressão atmosférica (N/m<sup>2</sup>)

$P_t$ = pressão total (N/m<sup>2</sup>)

$K=1,4$

$R=287,3$  (m.N/Kg.k)

$T$ = temperatura (k)



### III.3.1 Relato dos experimentos

O objetivo da realização destes experimentos foi obter dados sobre a secagem do grão de milho, indisponíveis na literatura, para as temperaturas de 50°, 70°, 90° e 110°C sobre a influência de velocidade do ar em 0, 5, 0, 9, 1,5 e 3 m/s em função dos tempos 5', 10', 15', 20', 30', 45', 60', 75', 90', 120', na determinação do coeficiente de transferência de massa e do coeficiente de calor sobre a secagem. O estudo foi realizado com base na teoria e em dados experimentais para grãos de milho em camada espessa e camada fina.

O equipamento foi projetado para obter os campos de temperatura e velocidade uniforme na entrada da câmara de secagem.

Veja as etapas que apresenta o resumo dos procedimentos e as medidas efetuadas.

1ª Etapa: Pré-aquecimento:

1- Definir a temperatura de secagem ( $T_s$ ) do experimento

2- Definir os tempos nos quais as medidas serão feitas. O pré-aquecimento é de 2hs, para todas as amostras.

3- Separar o nº planejado de amostras de 282,16 gramas para camada espessa e 100 gramas para camada fina em sacos plásticos fechados. Aquecê-las na estufa até  $T_s$ . ( $m_g = g$  e  $T = ^\circ C$ ).

4- Anotar a umidade relativa e a temperatura do ar ambiente ( $\varphi$  e  $T_{amb}$  em % e  $^\circ C$ ).

2ª Etapa: Secagem:

1- Regular a  $T_s$  e  $W_a$  para os valores desejados (medida da coluna da água colorida) ( $T_s$  e coluna de água  $^\circ C$  e mm).

2- Retirar cada amostra da estufa após o tempo de pré-aquecimento na câmara de secagem em camada espessa (amostra 1,2,3) e camada fina, medir precisamente a massa de cada amostra. ( $m_{go}$  em g).

3- Colocar a amostras na câmara de secagem e acionar a contagem do tempo.

Passando o tempo, retirar a amostra e medir a massa. ( $m_g = g$ ).

4- Repetir os procedimentos 2 e 3 com as outras amostras para os respectivos tempos planejados. ( $m_g = g$ )

**OBS:** O encerramento dos experimentos para cada temperatura, devendo ocorrer quando o teor de umidade estiver próximo de 11 á 13 % de umidade nos grãos.

### III.3.2 Medidas do teor de umidade dos grãos

A medida do teor de umidade dos grãos pode ser feita por métodos diretos e indiretos. Os métodos indiretos medem alguma propriedade da massa dos grãos ou do ar, que é uma função da umidade do grão, tal como a resistência elétrica. Aparelhos tais como DOLE-500 é universal e são usados em pontos de recebimento de milho ou até em laboratórios, porém, para fins científicos, sua precisão é contestada.

Neste trabalho foi feita a medição indireta do teor de umidade inicial dos grãos ( $M_0$ ). As medidas de massa foram feitas usando uma balança analítica digital com precisão 0,01 g. Esse processo foi feito em amostras de 60 gramas levados ao aparelho no laboratório de sementes da UNIJUI e feito a umidade do grão.

Para determinar o teor de umidade dos grãos ( $M_t$ ) para cada instante de tempo foi medida a massa dos grãos no instante de tempo desejado, interrompendo o processo de secagem. Esse procedimento foi repetido para cada tempo  $t$ , desde o instante inicial, sem interrupções. Foi realizado o calculo do teor de umidade para cada instante de tempo.

A massa dos grãos secos é a diferença da massa dos grãos úmidos ( $m_{go}$ ) e a massa de água inicial ( $m_{wo}$ ) presentes nos grãos  $m_{gs} = m_{go} - m_{wo}$ .

III.3.3 Dado experimental da camada fina com variação da temperatura e velocidade constante em relação ao tempo com a função

**Perda de massa:  $m_{gs} = m_{go} - m_{gf}$**

**$m_{gs}$ : massa de grão seca**

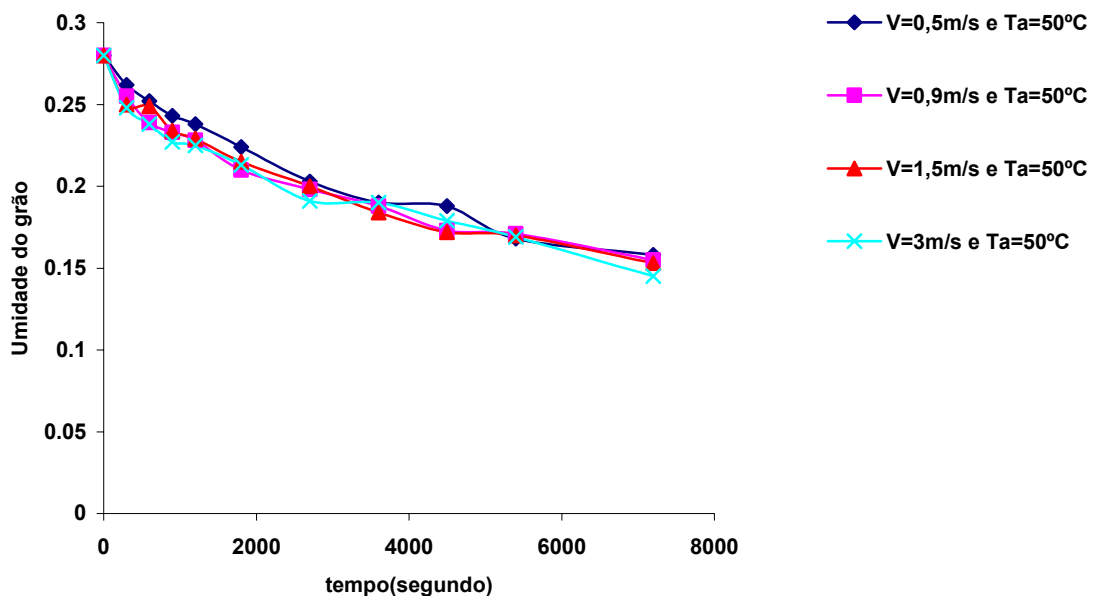
**$m_{go}$ : massa de grão inicial**

**$m_{gf}$ : variação de massa**

Com os dados experimentais construímos e analisamos os gráficos.

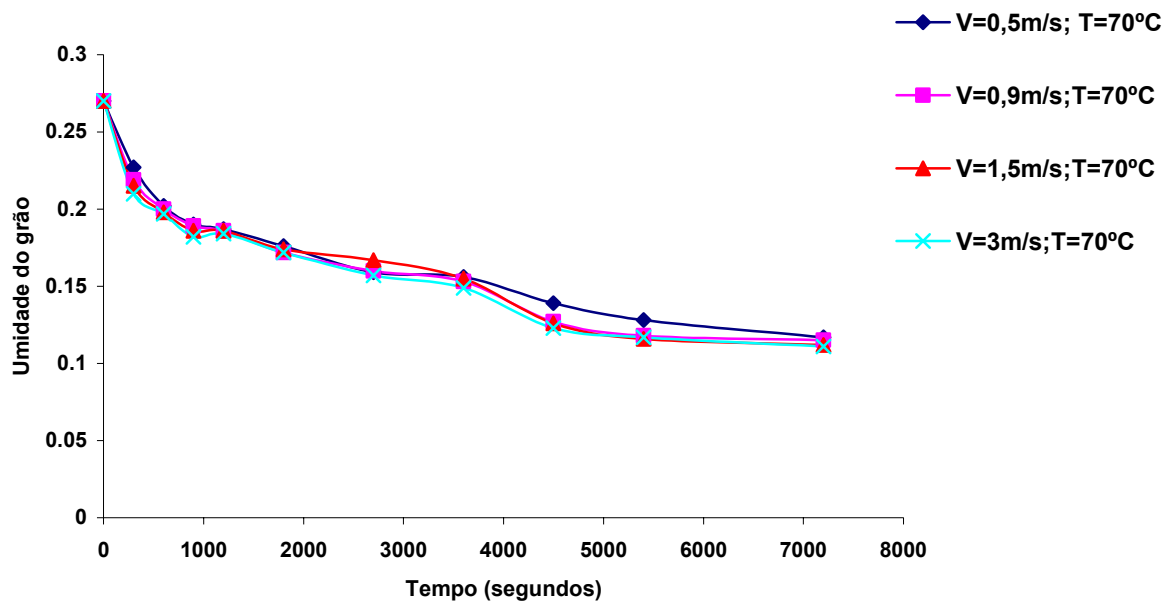
III.3.4 Dados experimentais da camada fina

**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho**



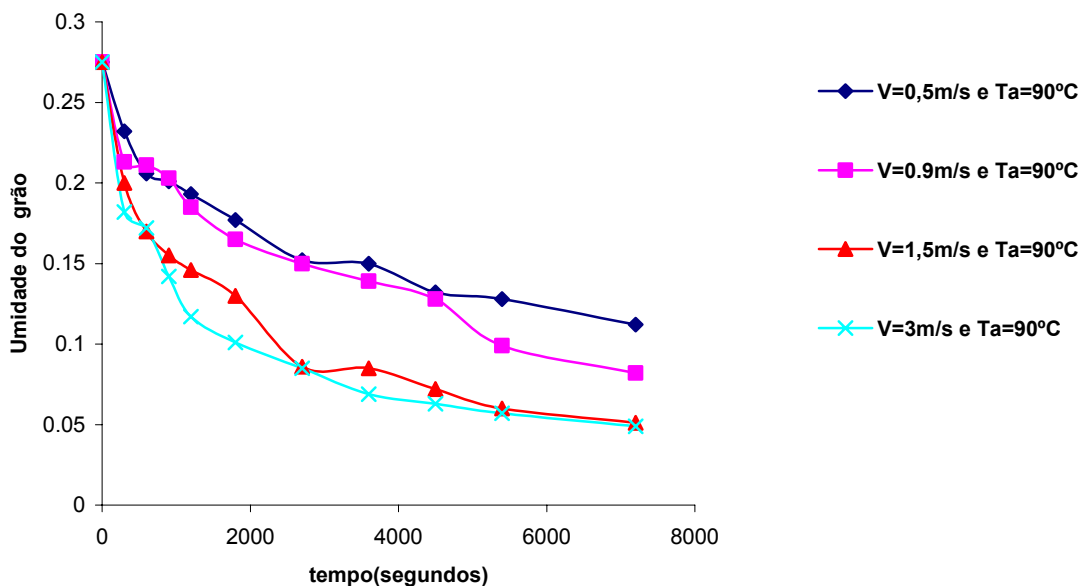
**GRÁFICO 01** – Dinâmica de secagem de grão de milho em camada fina para várias velocidades do ar e unidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 66%, pressão atmosférica 739 mmHg, temperatura ambiente 16°C e temperatura de 50°C de secagem.

### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho



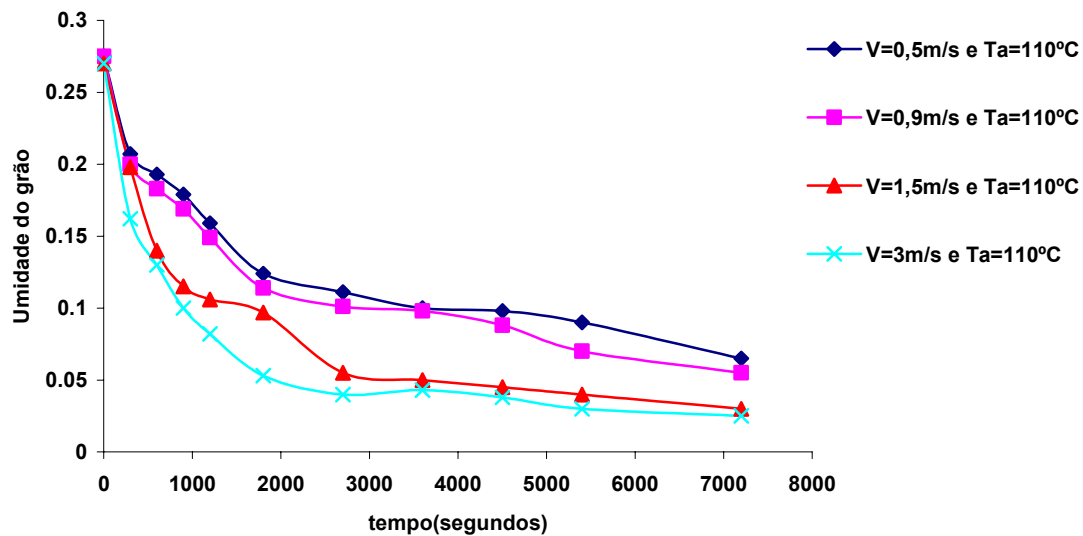
**GRÁFICO 02**-Dinâmica de secagem de grão de milho em camada fina para várias velocidades do ar e unidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 70%, pressão atmosférica 740 mmHg, temperatura ambiente 14°C e temperatura de secagem de 70°C.

### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho



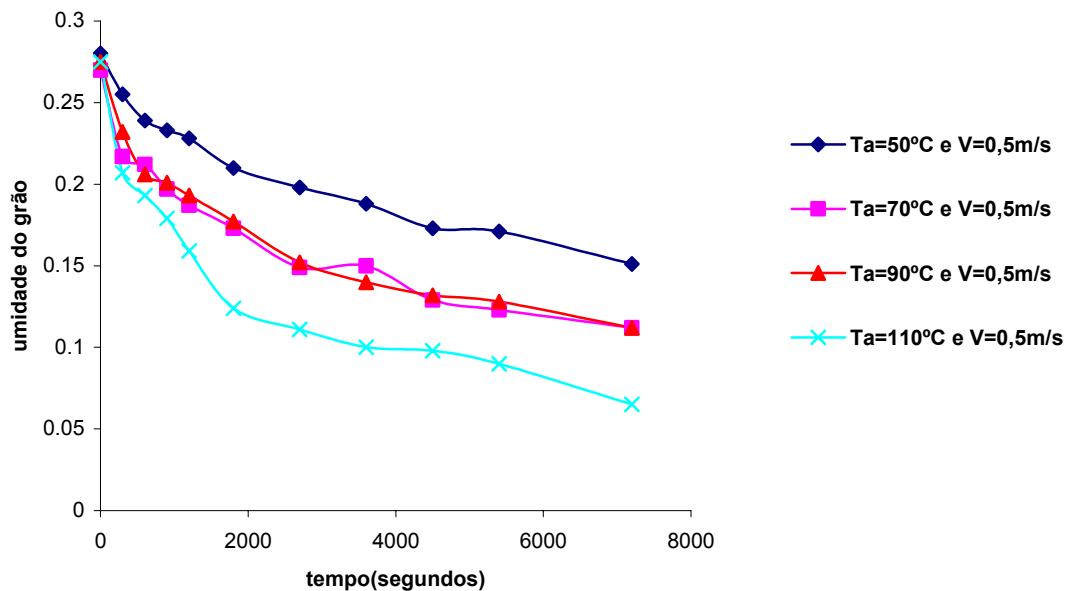
**GRÁFICO 03**-Dinâmica de secagem de grão de milho em camada fina para várias velocidades do ar e unidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 67%, pressão atmosférica 725 mmHg, temperatura ambiente 22°C e temperatura de secagem de 90°C.

### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho



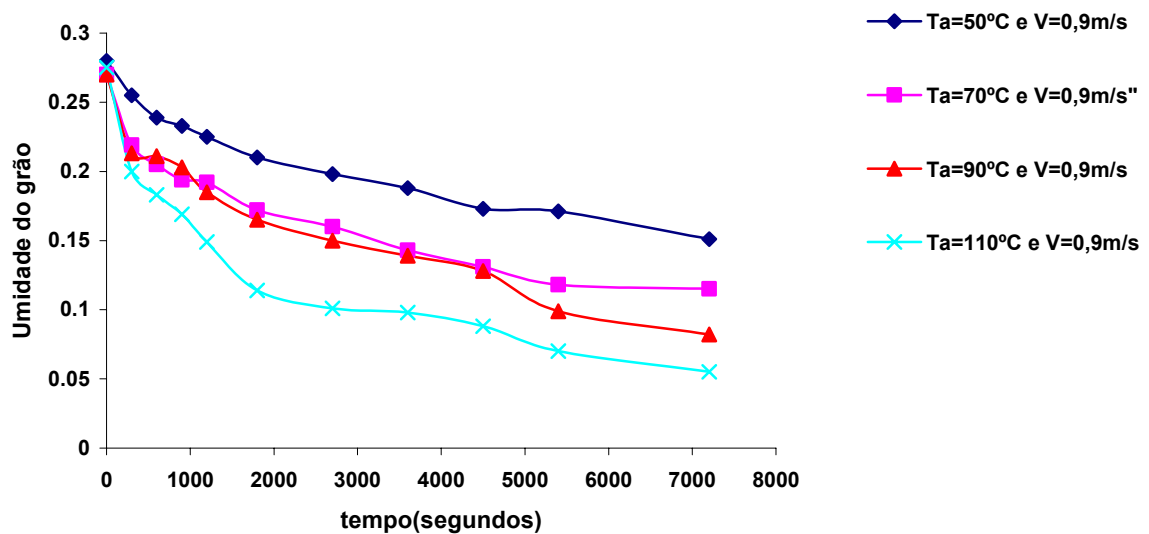
**GRÁFICO 04** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada fina para várias velocidades do ar e unidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 70%, pressão atmosférica 726 mmHg, temperatura ambiente 22°C e temperatura de 110°C de secagem

### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho



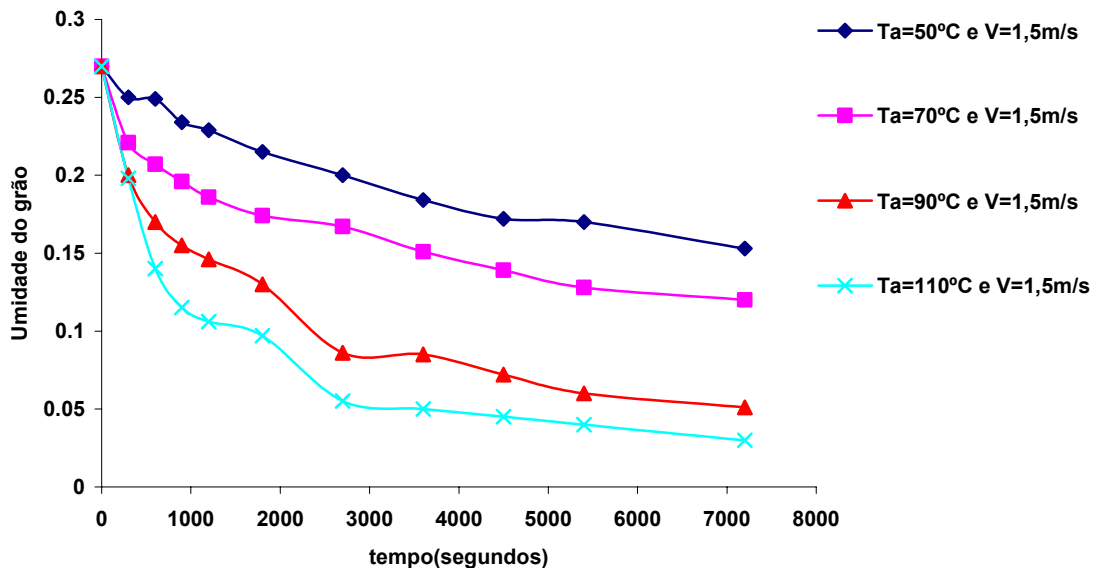
**GRÁFICO 05** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada fina para várias temperaturas de secagem com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 66%, pressão atmosférica 739 mmHg, temperatura ambiente 16°C e temperatura com velocidade do ar 0,5m/s.

### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho



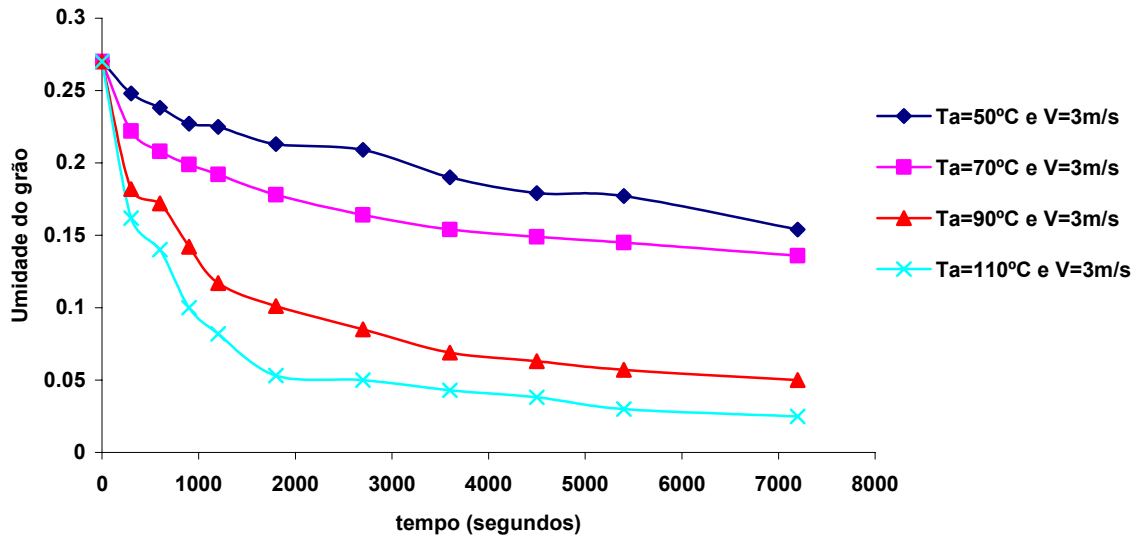
**GRÁFICO 06** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada fina para várias temperaturas de secagem com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 66%, pressão atmosférica 730 mmHg, temperatura ambiente 22°C e temperatura com velocidade do ar 0,9m/s.

### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho



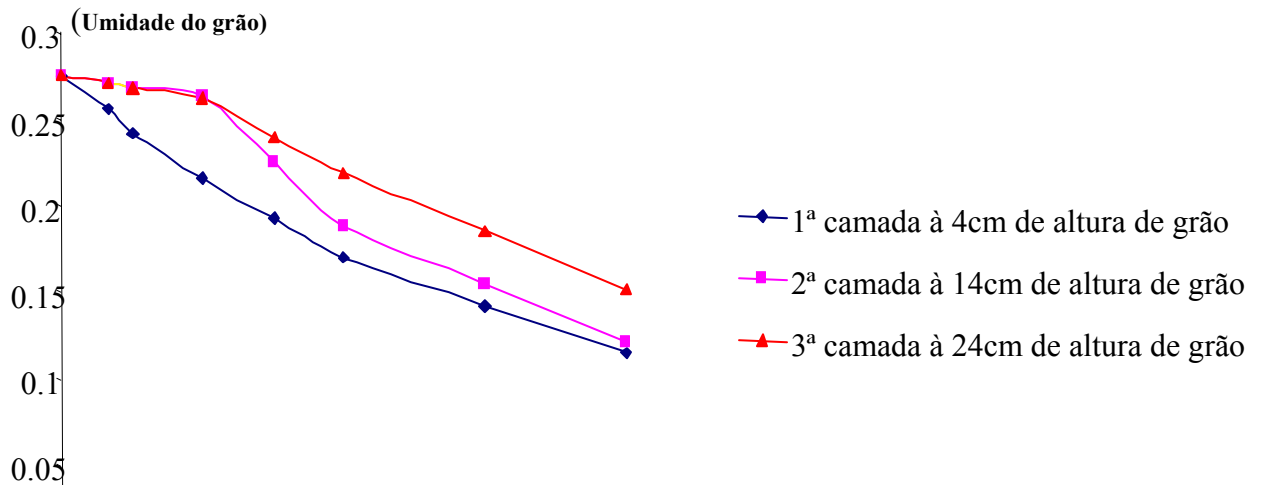
**GRÁFICO 07** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada fina para várias temperaturas de secagem com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 70%, pressão atmosférica 716 mmHg, temperatura ambiente 22°C e temperatura com velocidade do ar 1,5m/s.

**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho**



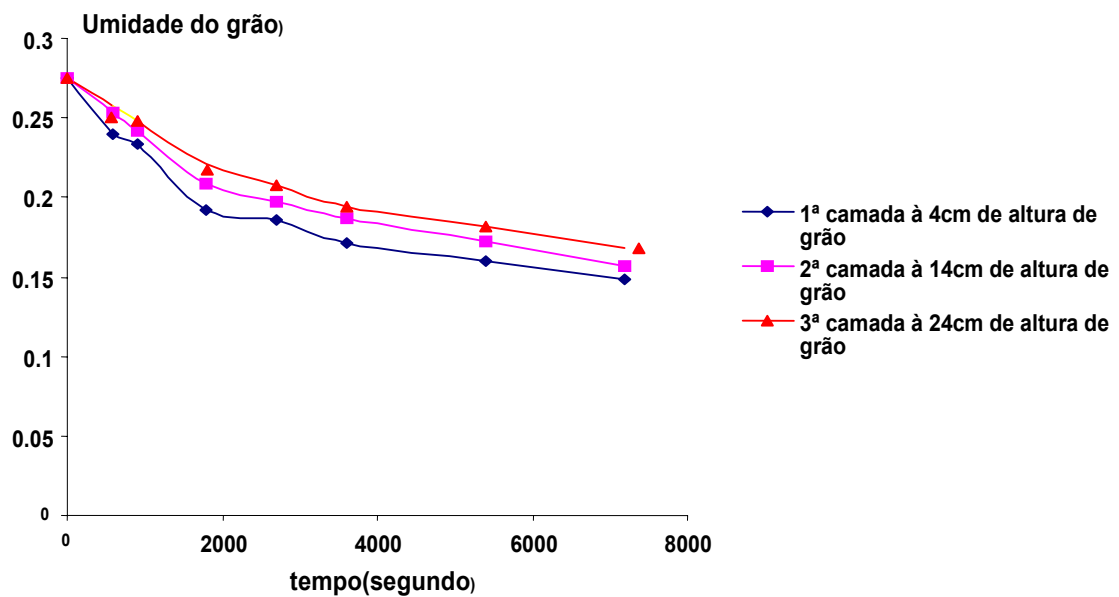
**GRÁFICO 08** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada fina para várias temperaturas de secagem com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 76%, pressão atmosférica 727 mmHg, temperatura ambiente 20°C e temperatura com velocidade do ar 3m/s.

**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa**



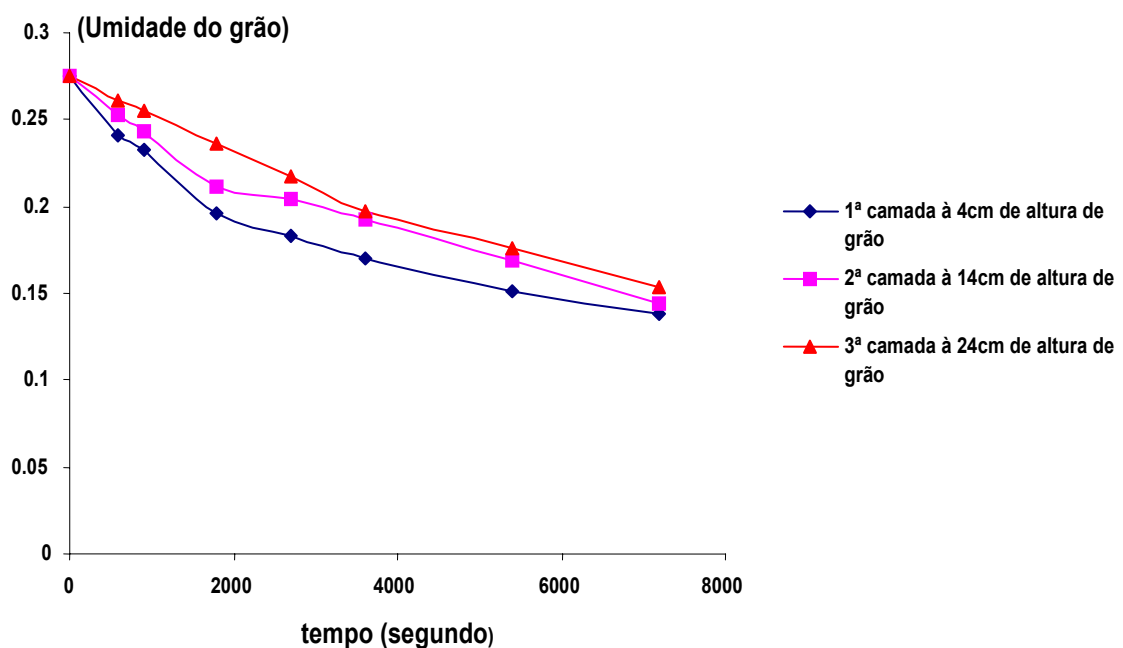
**GRÁFICO 09** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 66%, pressão atmosférica 727 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 0,5m/s, temperatura com velocidade do ar 3m/s.

### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa



**GRÁFICO 10** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 66%, pressão atmosférica 723 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 0,9m/s, temperatura de secagem 50°C

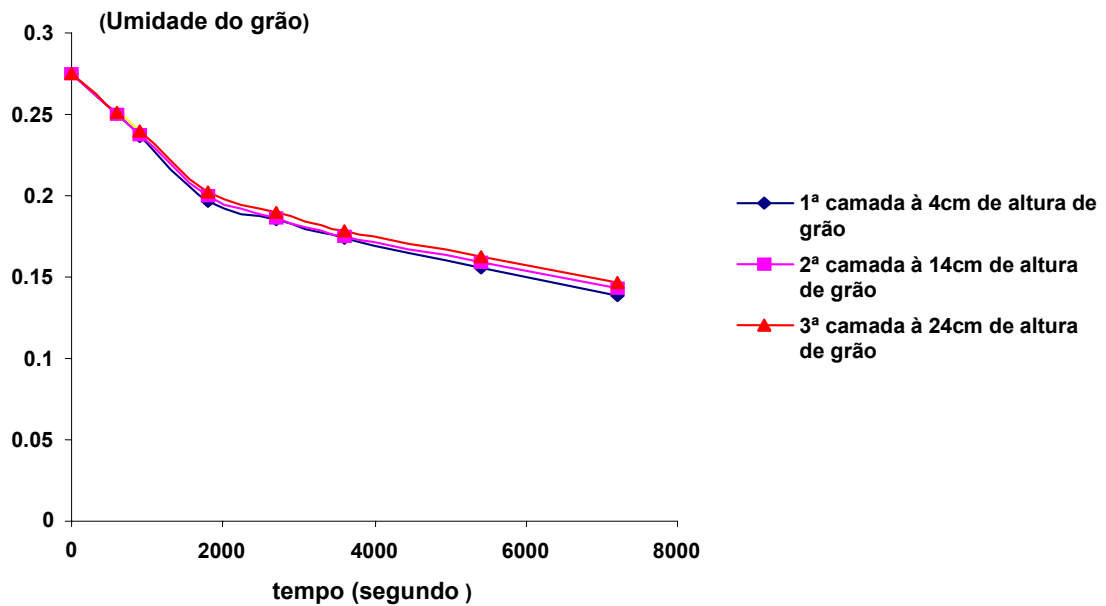
### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa



**GRÁFICO 11** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 67%, pressão atmosférica 725 mmHg, temperatura ambiente 25°C com velocidade do ar 1,5m/s, temperatura de secagem 50°C

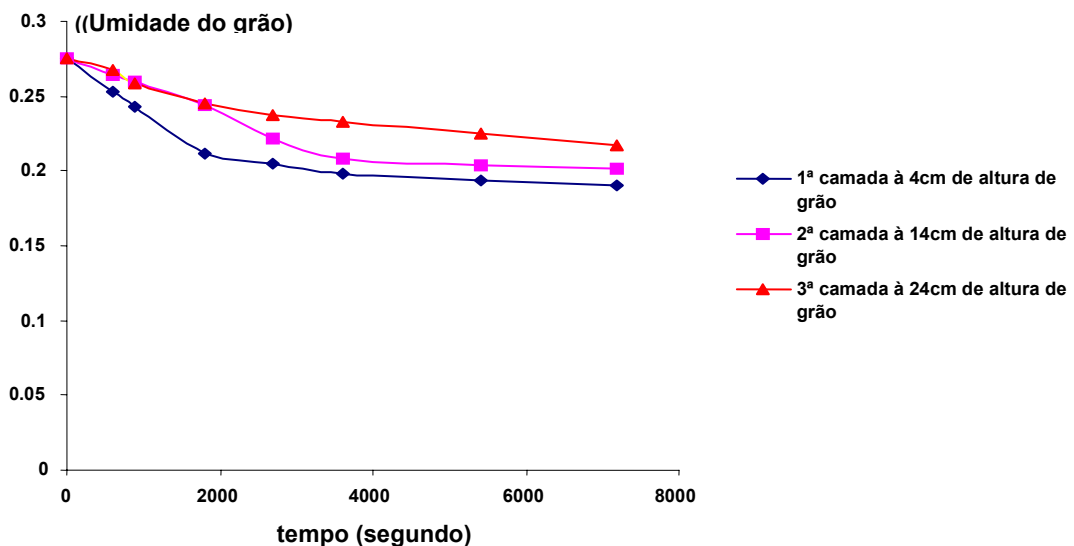


**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.**



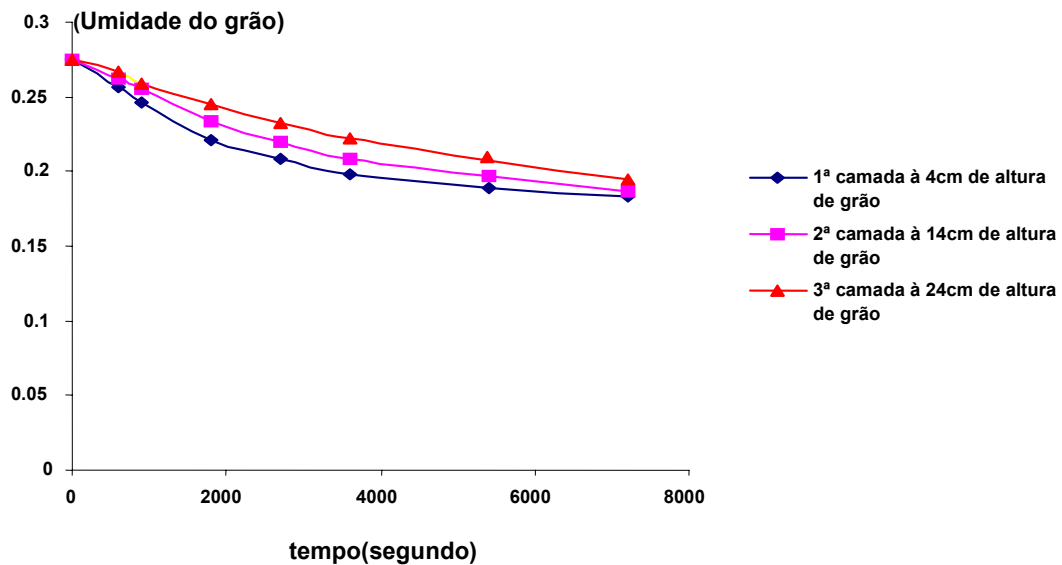
**GRÁFICO 12** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 60%, pressão atmosférica 723 mmHg, temperatura ambiente 28°C com velocidade do ar 3m/s, temperatura de secagem 50°C

**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.**



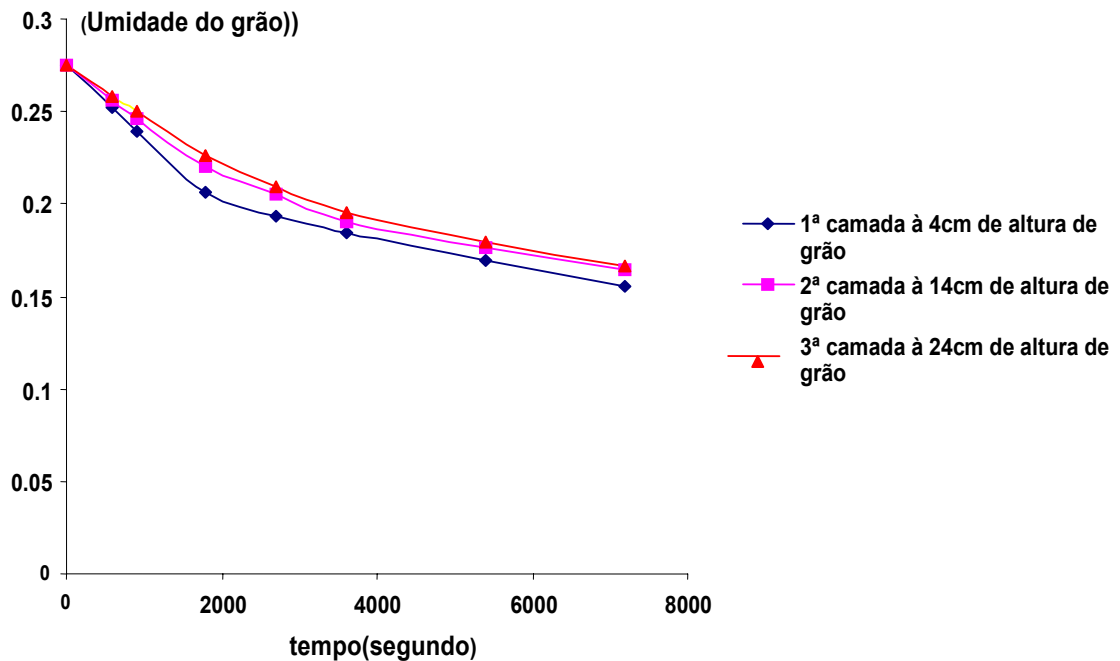
**GRÁFICO 13** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 723 mmHg, temperatura ambiente 28°C com velocidade do ar 0,5m/s, temperatura de secagem 70°C

**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em cada espessa.**



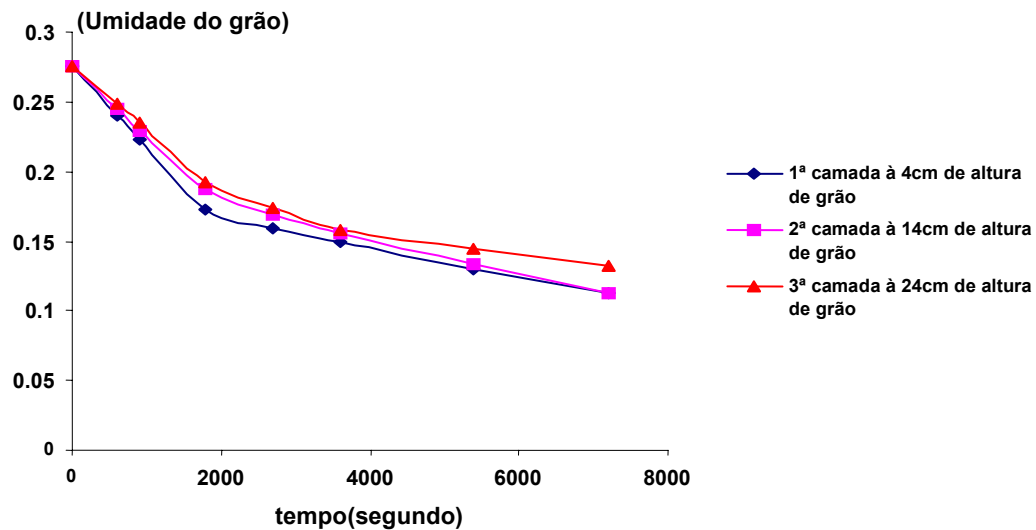
**GRÁFICO 14** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 65%, pressão atmosférica 725 mmHg, temperatura ambiente 28°C com velocidade do ar 0,9m/s, temperatura de secagem 70°C.

**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.**



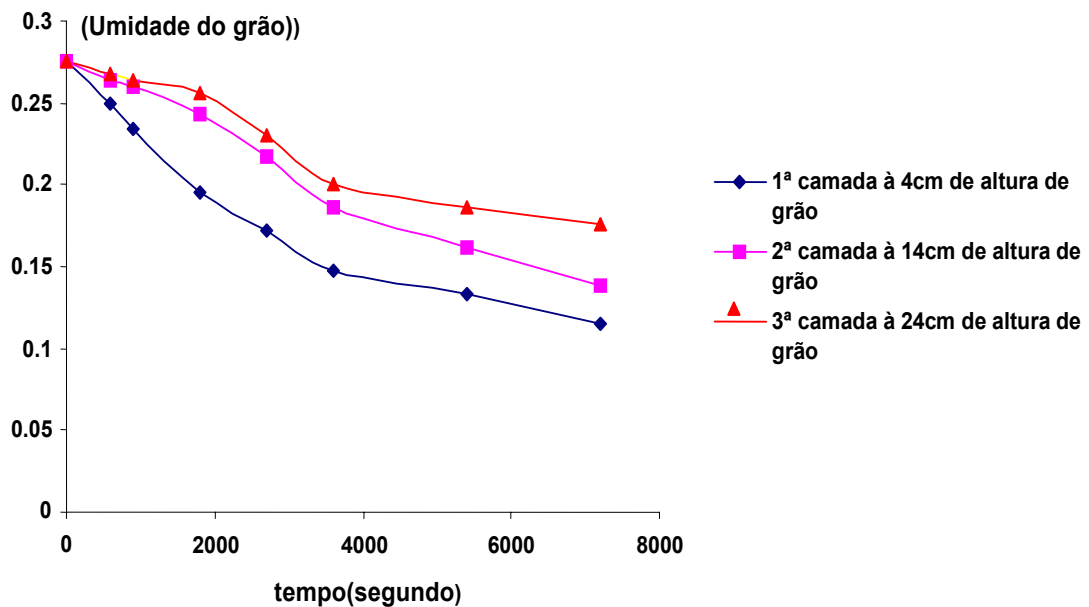
**GRÁFICO 15** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 63%, pressão atmosférica 724 mmHg, temperatura ambiente 29°C com velocidade do ar 1,5m/s, temperatura de secagem 70°C

Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.



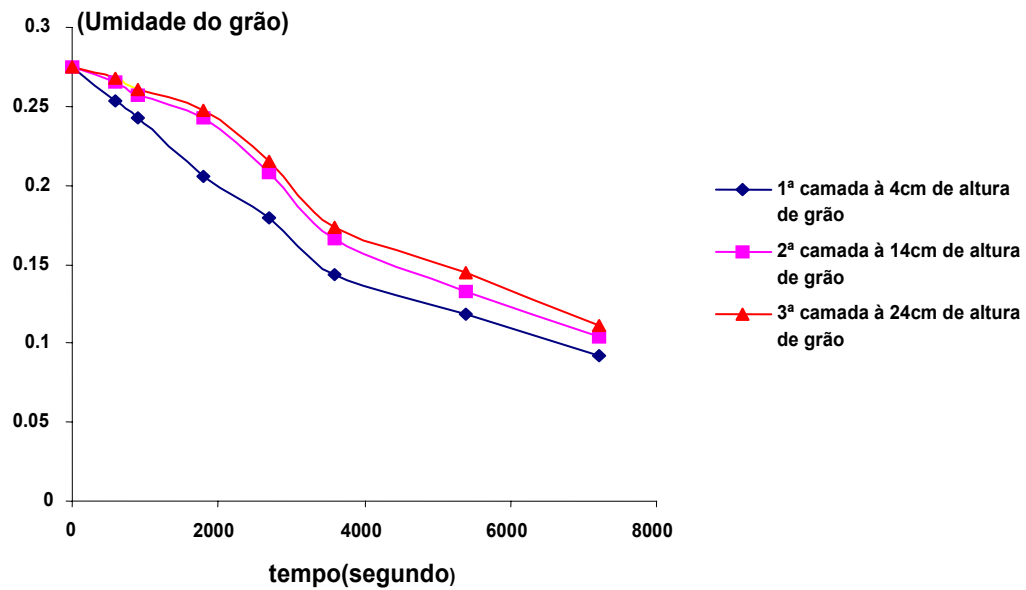
**GRÁFICO 16** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 62%, pressão atmosférica 724 mmHg, temperatura ambiente 29°C com velocidade do ar 3m/s, temperatura de secagem 70°C

Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.



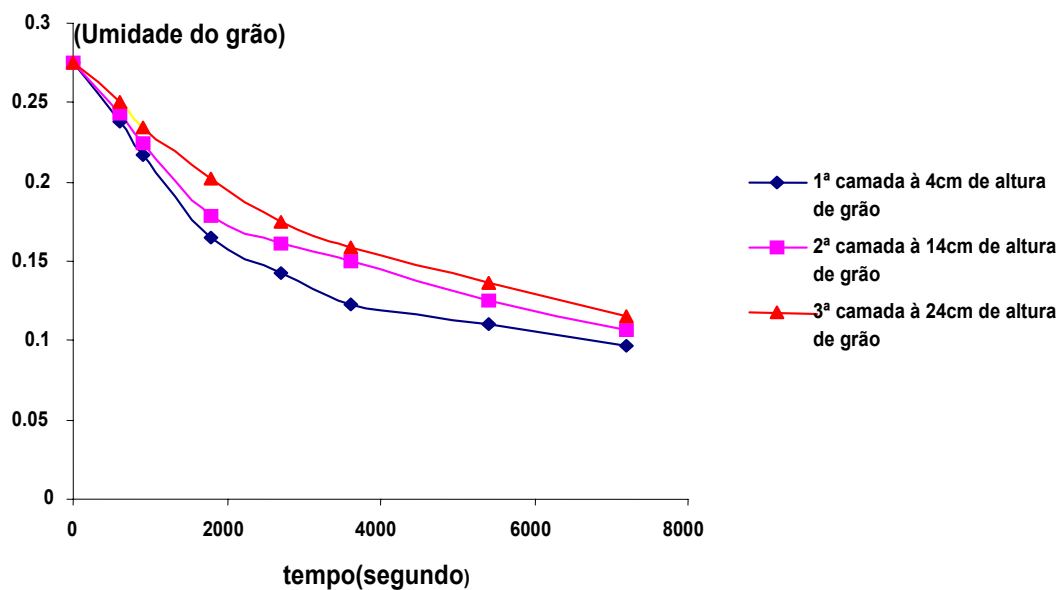
**GRÁFICO 17** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 728 mmHg, temperatura ambiente 28°C com velocidade do ar 0,5m/s, temperatura de secagem 90°C

**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.**



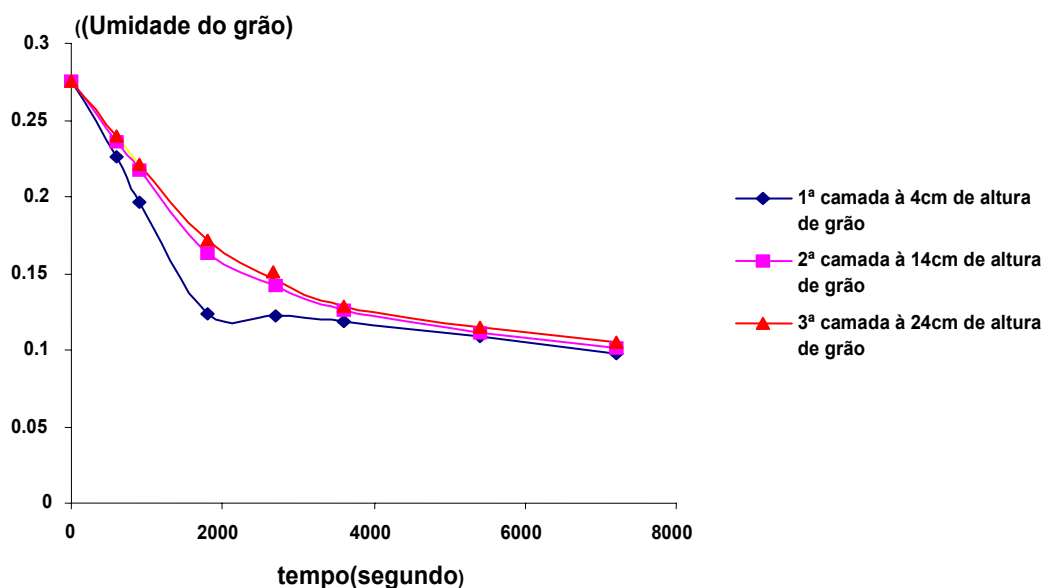
**GRÁFICO 18** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 725 mmHg, temperatura ambiente 28°C com velocidade do ar 0,9m/s, temperatura de secagem 90°C

**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.**



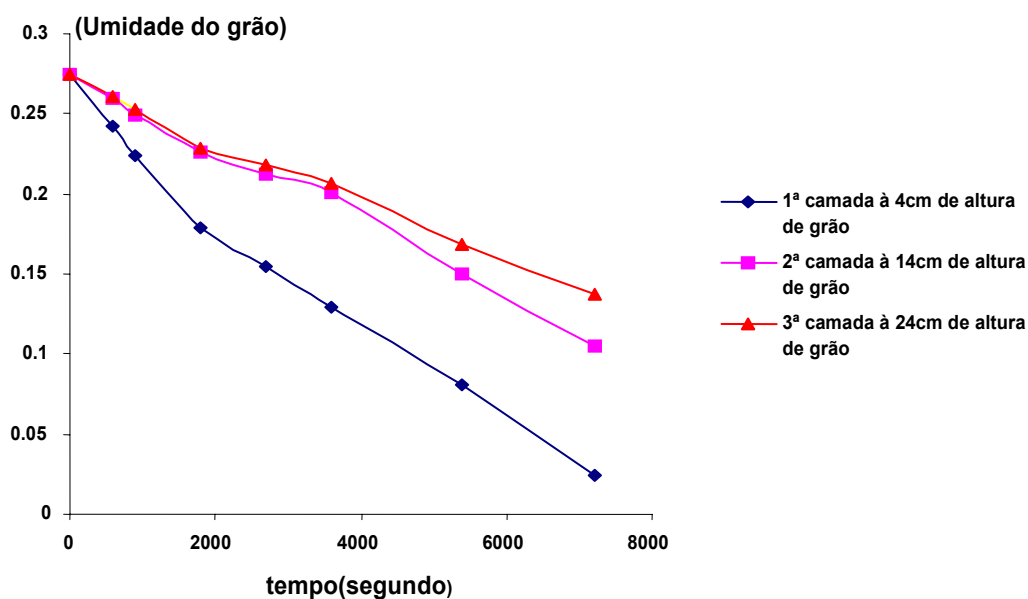
**GRÁFICO 19** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 724 mmHg, temperatura ambiente 30°C com velocidade do ar 1,5m/s, temperatura de secagem 90°C

### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.



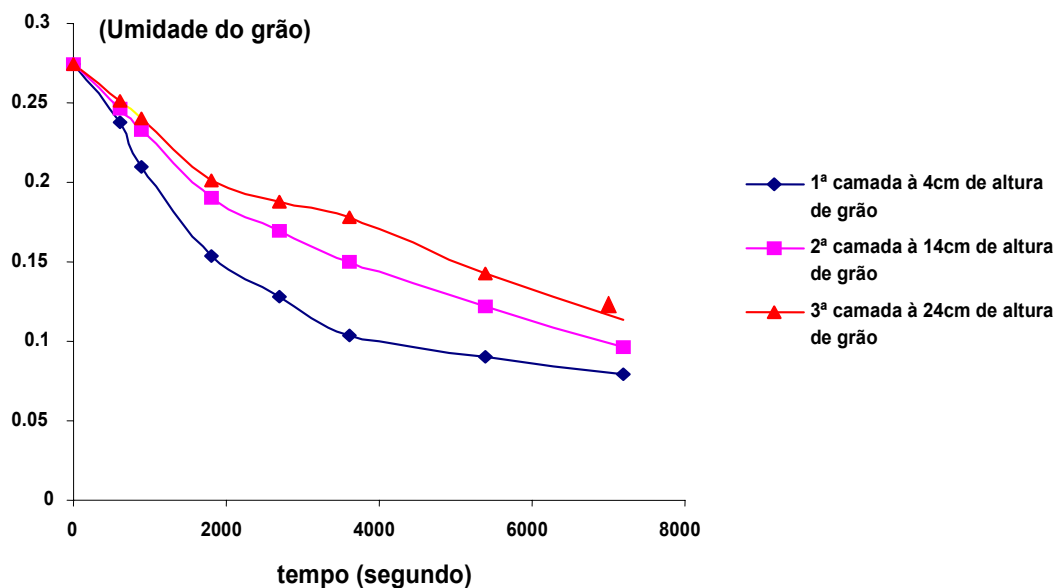
**GRÁFICO 20** Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 728 mmHg, temperatura ambiente 29°C com velocidade do ar 3m/s, temperatura de secagem 90°C

### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.



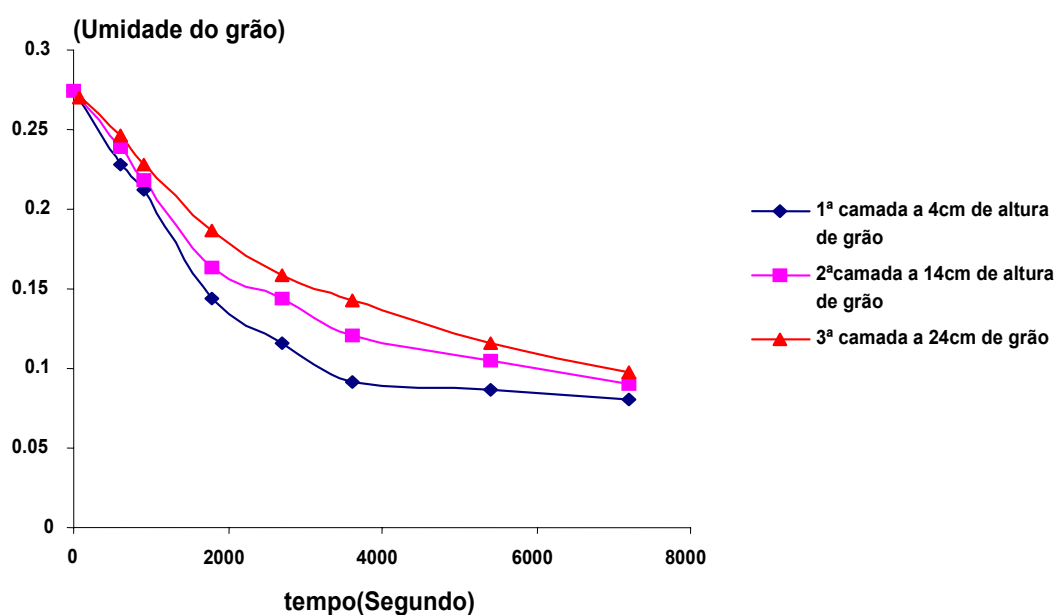
**GRÁFICO 21** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 62%, pressão atmosférica 728 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 0,5m/s, temperatura de secagem 110°C

**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.**



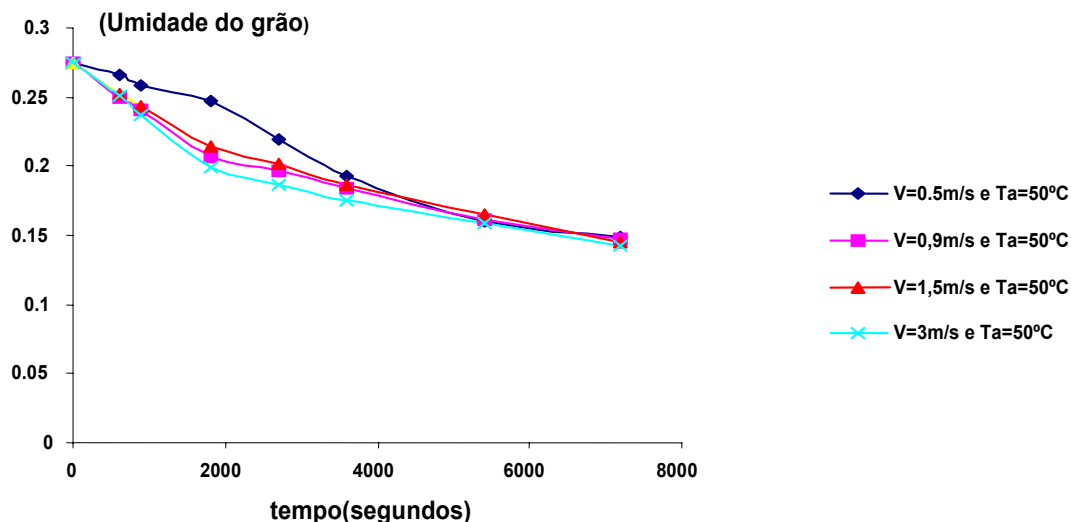
**GRÁFICO 22** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 62%, pressão atmosférica 728 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 0,9m/s, temperatura de secagem 110°C

**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.**



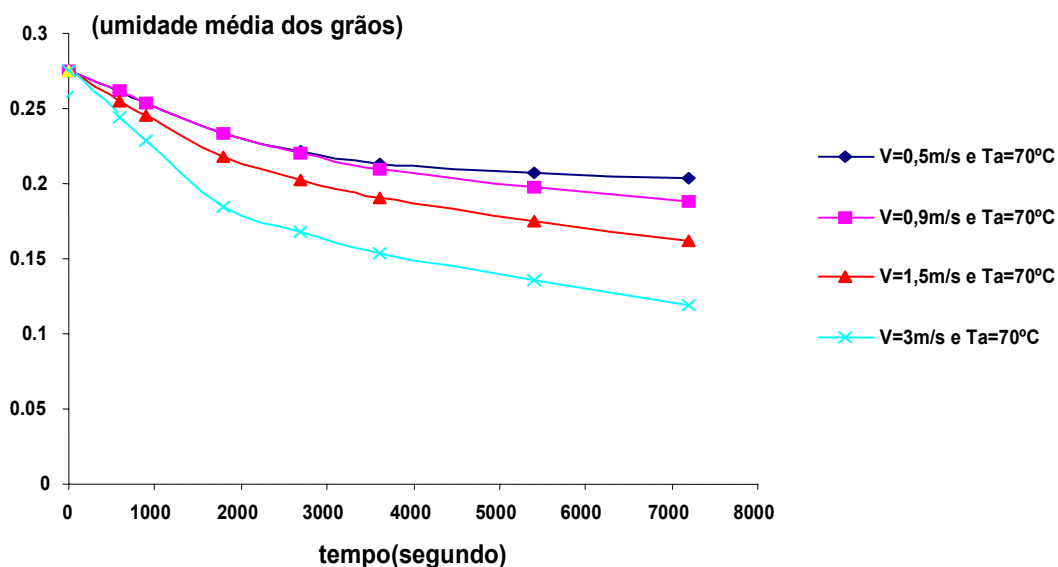
**GRÁFICO 23** - Dinâmica de secagem de grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 728 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 1,5m/s, temperatura de secagem 110°C

### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.



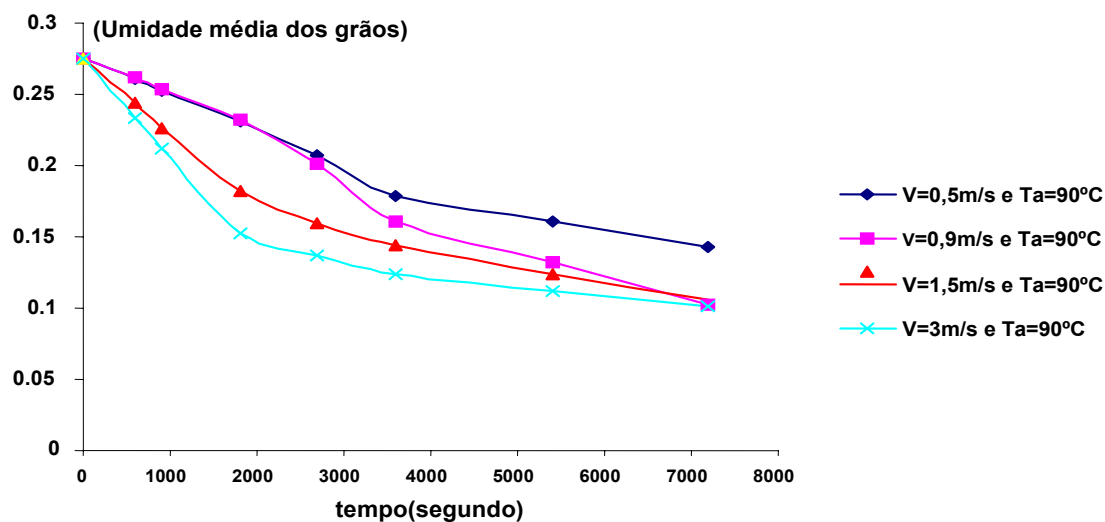
**GRÁFICO 24** - Dinâmica da variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 65%, pressão atmosférica 723,7 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 0,5 , 0,9 , 1,5 ,3m/s, temperatura de secagem 50°C

### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.



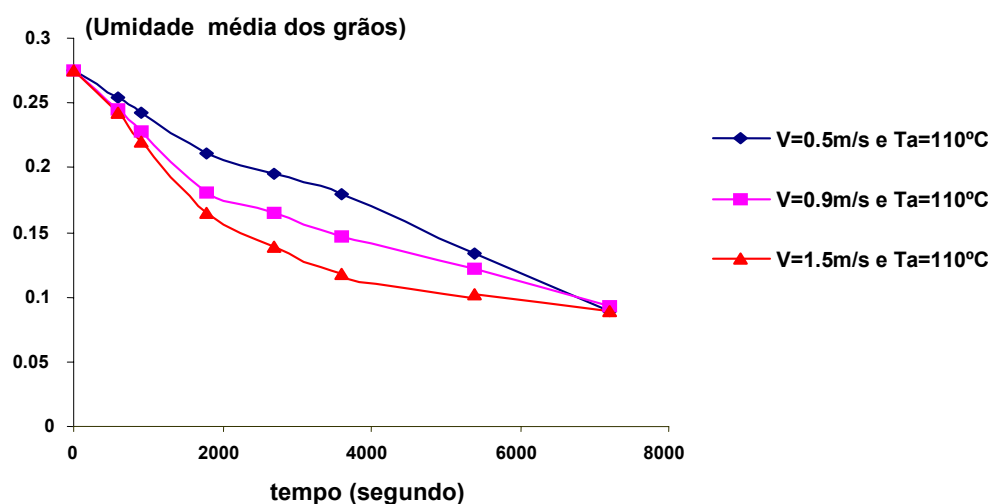
**GRÁFICO 25** - Dinâmica da variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 62,7%, pressão atmosférica 724 mmHg, temperatura ambiente 28,5°C com velocidade do ar 0,5 , 0,9 , 1,5 ,3m/s, temperatura de secagem 70°C

### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.



**GRÁFICO 26** - Dinâmica da variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 725,7 mmHg, temperatura ambiente 29°C com velocidade do ar 0,5 , 0,9 , 1,5 ,3m/s, temperatura de secagem 90°C

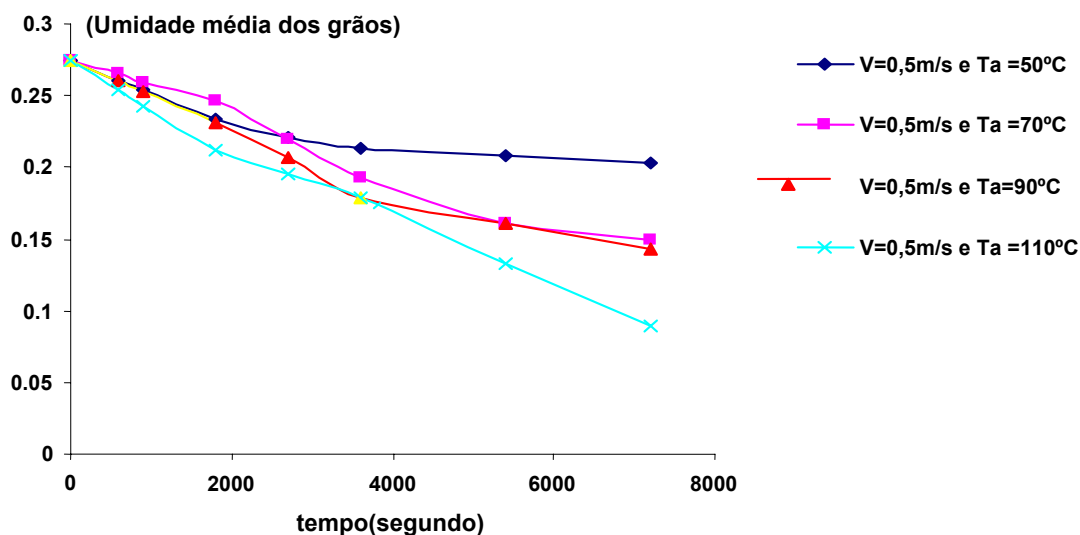
### Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.



**GRÁFICO 27** - Dinâmica da variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 60,6%, pressão atmosférica 728,3 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 0,5 , 0,9 , 1,5 ,3m/s, temperatura de secagem 110°C

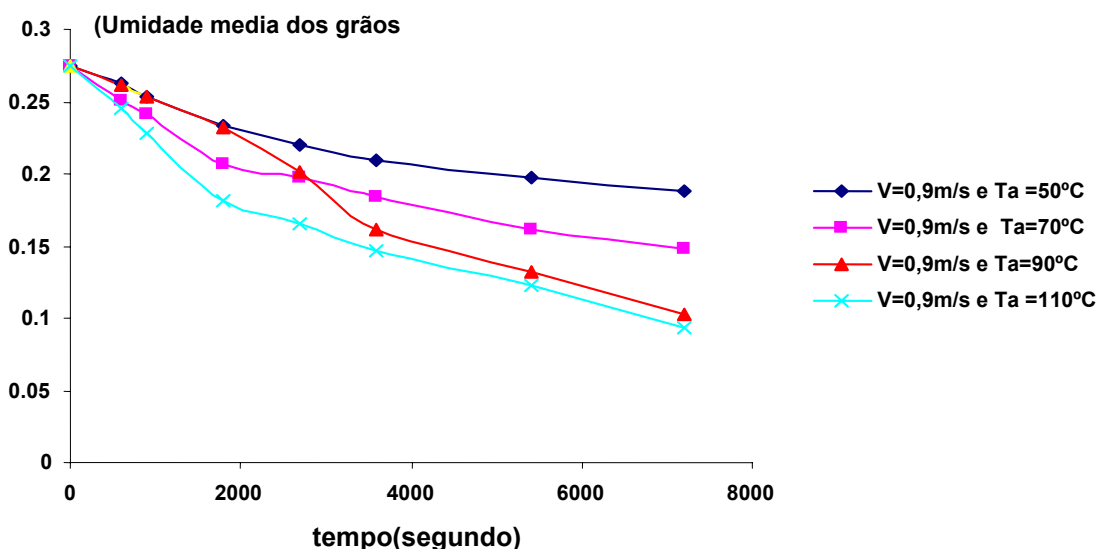


**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa**



**GRÁFICO 28** - Dinâmica da variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 61%, pressão atmosférica 728,3 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 0,5m/s, temperatura de secagem 50°C,70°C,90°C e 110°C.

**Influência da velocidade do ar na secagem do grão do milho em camada espessa.**



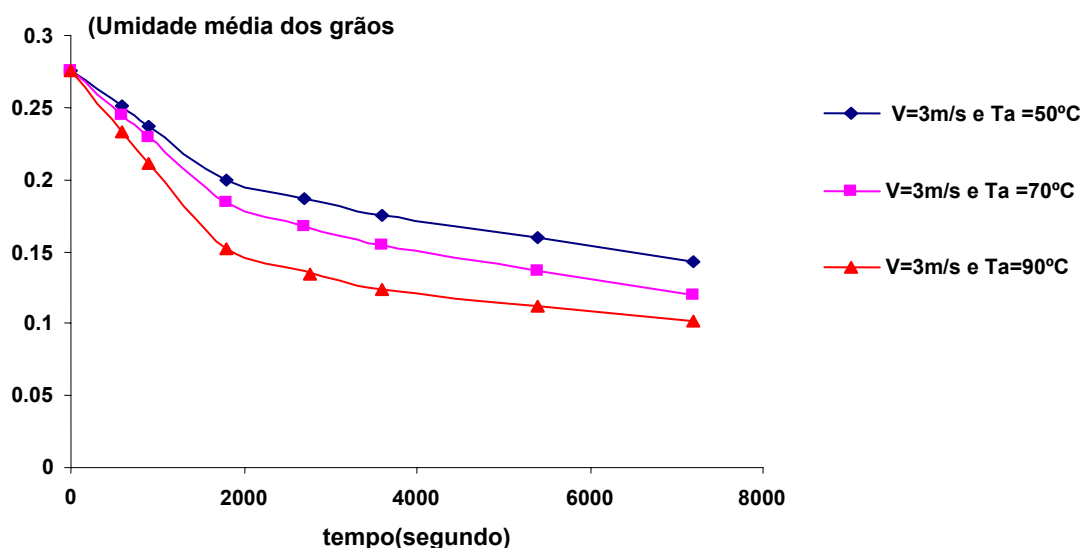
**GRÁFICO 29** - Dinâmica da variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 60,6%, pressão atmosférica 728,3 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 0,9m/s, temperatura de secagem 50°C,70°C,90°C e 110°C.

**Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.**

0.3 (Umidade média dos grãos

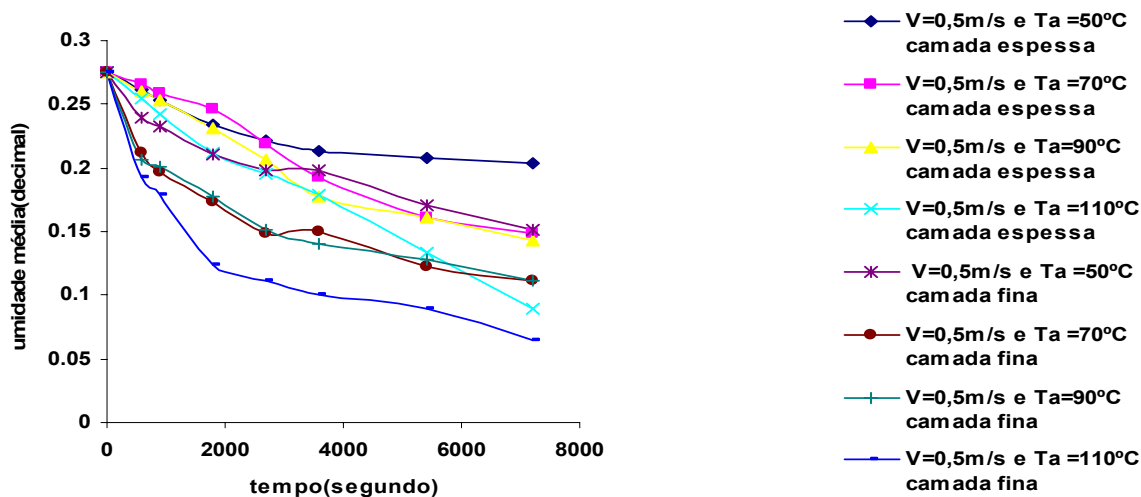
**GRÁFICO 30** - Dinâmica da variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 60,6%, pressão atmosférica 728,3 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 1,5m/s, temperatura de secagem 50°C,70°C,90°C e 110°C.

Influência da velocidade do ar na secagem do grão de milho em camada espessa.



**GRÁFICO 31** - Dinâmica da variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 60,6%, pressão atmosférica 728,3 mmHg, temperatura ambiente 26°C com velocidade do ar 3m/s, temperatura de secagem 50°C,70°C,90°C e 110°C.

**Comparação da diminuição média da umidade nas camadas espessa e fina do grão de milho influenciada pela velocidade do ar de 0,5m/s com variação temperatura de 50°C, 70°C e 90°C e 110°C em relação ao tempo.**



**GRÁFICO 32** - Dinâmica da variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada fina com a espessa com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 64,6%, pressão atmosférica 725,3 mmHg, temperatura ambiente 23°C com velocidade do ar 0,5m/s, temperatura de secagem 50°C, 70°C, 90°C e 110°C.

No Gráfico 33 pode se ver que os valores escolhidos da temperatura e tempo, têm os resultados teóricos e experimentais com boa coincidência com os da simulação computacionais com velocidade 0,5m/s e a variação de temperatura.

Podemos perceber que a umidade média aos 2000 segundos obteve a maior quantidade de água retirada dos compartimentos do grão de milho, é a parte da água que não absorvida facilmente solvente no grão. Enquanto a partir do tempo 2000 segundos podemos perceber que certa estabilidade, mostrando assim que esta água contida nos compartimentos do grão está mais fortemente absorvida na constituição do grão de milho.

**Dinâmica da secagem em camada espessa da temperatura sobre a umidade do grão em relação ao tempo**

**GRÁFICO 33** - Dinâmica da variação do teor médio de umidade do grão de milho em camada espessa com a simulação do programa matemático computacional com umidade inicial do grão 27,5%, umidade do ar de 64,6%, pressão atmosférica 725,3 mmHg, temperatura ambiente 23°C com velocidade do ar 0,5m/s, temperatura de secagem 50°C,70°C,90°C 110°C.

#### IV CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo teórico/experimental de secagem artificial de milho em camada fina e espessa para várias temperaturas iniciais e velocidades do ar pré-aquecido. Para obtenção de dados experimentais foi desenvolvido, construído e testado um equipamento experimental que permitiu realizar os experimentos para temperaturas iniciais de 50°C, 70°C, 90°C e 110°C e velocidades do ar de 0,5 m/s, 0,9 m/s, 1,5 m/s e 3 m/s para mesmo teor de umidade inicial do grão de 0,27 b.u. A altura de camada fina foi de 1,5cm. A altura da camada espessa foi 30 cm com medições feitas em subcamadas de 4 cm, 14cm e 24cm.

Foi mostrado que o aumento de temperatura do ar de secagem e de velocidade do ar acelere o processo de secagem. Para as temperaturas mais baixas a velocidade tem menor influência para intervalo de variação dos parâmetros estudados, enquanto para as temperaturas mais elevadas o aumento da velocidade do ar acelera a secagem dos grãos.

Foram analisados vários modelos matemáticos disponíveis na literatura sobre processo de secagem. Para realizar as simulações numéricas neste trabalho foi escolhido o modelo desenvolvido por Lasseran e Courtóis. O modelo é baseado nas leis de Fick e Fourier aplicadas para diferentes camadas de grão e formado por um sistema de seis equações diferenciais parciais quase-lineares acopladas. Para resolução do sistema foi utilizado o método de diferenças finitas. Foram comparados vários esquemas numéricos de primeira e segunda ordem. As simulações feitas mostraram uma coincidência satisfatória com dados experimentais obtidos

## REFERÊNCIAS

ALVARENGA, Luiz Carlos. **Transporte de Água em Grãos de Feijão-Preto sob Condições de Secagem e Repouso**. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 1979. Dissertação (mestrado em engenharia agrícola).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: Informações e documentação: Referências: Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 14727: Trabalhos acadêmicos: Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ARNOSTI Jr., SARTORI, D. J. M.. **Processo de Secagem de Semente em Leito Deslizante: Fluidodinâmica e Temperatura do Ar**. In: XX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROS, 1992, São Carlos, SP. **Anais....** UFSCar, São Carlos, 1992. 685 p, 451-462p.

ARTHUR, JF. And Rumsey, T. R., **Two-dimensional drying model for estationary bin walnut dryers**. *Transaction of the ASAE*. 1991, 34(1):193-200.

BABIT, J. D. Observation on the differebcuak eqyatuibs if diffusion. **Canadian Journal of Research**, v.18, p.419-4742, 1950.

BAKKER-ARKEMA, F. W., **High-Temperature Grain Drying**. FAO TECHNICAL SYMPOSIUM ON GRAIN DRYING AND STORAGE IN LATIN AMERICA, Porto Alegre-RS, October, 1993.

BARROSO, L.C. **Calculo Numérico**. São Paulo: Harper & Row, 1983, 283p.

BORGES, P. A P., KHATCHATOURIAN, O. A E VIELMO, H. A. **A modelagem matemática de secagem de grãos: aplicação do método dos volumes finitos**. XXIII CNMAC/2000, Santos SP, 2000.

BOYCE, D. S. Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 1965, **10** (4) 333-341.

BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA AND HALL, C. W. 1982 (5<sup>a</sup> pr.). **Drying cereal grains**. Westport, The Avi Publishing Company

BUNN, J.M; HUKILL, W.V., **Pressure Pattern Predictions for Non-Linear Air Flow Trough Porous Media**. *Transaction of the ASAE*, 1963, p.32-36.

CALADO, V. M. A., BISCAIA Jr, E. C.. **Modelagem e Simulação de Secadores de Grãos em Leito Fixo**. In: XX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROS, 1992, São Carlos, SP. **Anais....** UFSCar São Carlos, 1992. 685p, 381-391p.

CALADO, V. M. A., MASSARANI, G. **Secagem de Material Sólido particulado V**. In: XX ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROS, 1992, São Carlos, SP. **Anais....** UFSCar São Carlos, 1992. 685p, 397-407p.

CALÇADA, L. A., SOUZA JR., M. B. **Estudo de Secadores de Leito Fixo “Otimização Energética”**. Resumo.

CHINNAM, M. S.; YOUNG, J. H. **A study of diffusion equations describing moisture movement in peanut pods – I: simultaneous vapor na liquid diffusion of equations**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Mich., 20(4): 749-753, 757, 1977.

\_\_\_\_\_. **A study of diffusion equations describing moisture movement in peanut pods – II: simultaneous vapor na liquid diffusion of moisture**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Mich, 20(4): 749-753, 757, 1977.

CORSO, J. **Modelagem matemática do processo de secagem de soja em secador contínuo de leito fixo**. UNIJUÍ. Unijuí/RS 1997. Dissertação de mestrado.

\_\_\_\_\_. **Modelagem Matemática do Processo de Secagem de Soja em Secador Contínuo de Leito Fixo**. UNIJUÍ. Ijuí/RS, 1997. Dissertação de Mestrado.

CRANK, J. AND NICOLSON, P. **A Partial Method for Numerical Evaluation of Solutions of Partial Differential Equations of the Heat-Conduction Type** – Proc. Cambridge Philos. Soc., v. 43. p.50-67, 1947.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion.** Oxford: Oxford University Press, 1975.

COURTOIS, F., LEBERT, A., LASSERAN, J. C. AND BIMBENET, J. J. **Simulation of industrial dryers: solving numerical and computer problems.** *Drying Technology*, 9(4), 927-945. 1991.

COURTOIS, F., LEBERT, A., LASSERAN, J.-C., et al. **Simulation of Industrial Dryers: Solving Numerical and Computer Problems.** In: 8<sup>th</sup> INTERN. DRYING SYMP. IDS'92, Montreal, Canadá, 1992.

ECKERT, E. R. G., DRAKE Jr., Robert M. **Analysis of Heat and Mass Transfer.** New York: Mac Graw-Hill Kogakusha Ltda, 1972. 806p.

FRANÇA, A.S., FORTES, M. AND HAGHIGHI, K. **Numerical simulation of intermittent and continuous deep-bed drying of biological materials.** *Drying Technology*, vol.12(7), 1537-1560. 1994.

FRANÇA, A. S. **Simulação bidimensional de secadores de grãos e cereais.** Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, MG, Brasil, 1991. Dissertação de Mestrado.

FORTES, M., OKOS, M.R. **Heat and mass transfer in hygroscopic capillary extruded products.** Paper Presented at the 71<sup>st</sup> ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS, Miami Beach, U. S. A, 1995.

FORTES, M. AND OKOS, M. R. **Drying theories: their basis and limitations as applied to foods and grains,** pp 119-154, in A.S. Mujumdar(ed) *Advances in Drying.* Hemisphere. New York, 1980.

FORTES, M; OKOS. M. R; PINHEIRO, Filho. **Modeling of dryer operation process.** In: *International Symposium on drying*, 2, Montreal, Anais, Montreal McGill University: 1980.

GUELLI, Selele M. A. **Modelagem e Simulação da Dinâmica do Escoamento Grãos-Sólido Vertical Contracorrente e Concorrente.** Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 1985. 127p. Dissertação (mestrado em engenharia química).

GUNTHER, P.A.S. **Secagem de Semente de Sorgo Forrageiro em Leito Fixo** Escola Politécnica da USP, São Paulo:1984.Iv. Tese (Doutorado).



HARA, T. Teor de Umidade de Grãos Armazenados. **Revista Brasileira de Armazenagem**, Ano 2, nº2, Dez/1977.

HAQUE, E.; CHUNG, D. S; FOSTER, G. H. **Pressure and velocity field in airflow through packed bed of corn mixed with fines under non-Darcy flow conditions.** *Transaction of ASAE*, p.1595-1599.

HAWLADER, M. N. A; HO, J.C. **A mathematical model for drying of shrinking materials.** *Drying technology*, ol, Combined Issues 1-2, p.27-47, 1999.

HENDERSON, S. M. **A basic concept of equilibrium moisture.** *Agriculture Engineering*, 1952, **33** 20-32

HENDERSON, S. M. **Progress in developing the thin layer drying equation.** *Transaction of the ASAE*, 1974 16 (6): 1167-1172.

HUSTRULID, A. 1962. **Comparative drying rates of naturally moist, remoistened, and frozen corn.** *Transactions of the ASAE*. 5(1): 64-67.

HUKILL, W. V, **Grain Dryng.** In *Storage of Cereal Grains and their Products* (ed. Anderson, J. A and Alcock, A W.). American Association Cereal chemistry, ST. Paul, Minn., 1954.

JUDIAL, VK; TOMPSON, T. L. **Air pressure paterhns na flow path in two-dimensional triangular-shaped pels of sorghum using forced convection.** *Transaction of the ASAE*. 15 (4): 737-741, 1972.

KHATCHATOURIAN, O.A.; TONIAZZO, N. A.; BORGES, P.A.P. **Estudo teórico/experimental e simulação numérica do escoamento do ar em silos.** *Mercofrio* 98.Porto Alegre: 1998.

KHATCHATOURIAN, O.A.; TONIAZZO, N. A.; BORGES, P.A.P.**Um modelo simples para análise do processo de secagem de soja em camada móvel de fluxo contrário de ar.** *Cilamce/99*. 1999. CD-ROM, São Paulo.

KHATCHATOURIAN, O.A.**Modelagem matemática do processo de secagem de soja: ar e grão em fluxos contrários.** ENCIT/2000. Porto Alegre: 2000.

KHATCHATOURIAN, O.A.. **Simulacion numérica Del flujo de aire em silos para el almacenamiento de granos.** *Informacion tecnológica*, vol.11, nº4, 2000.

KHATCHATOURIAN, O.A..**A modelagem matemática do processo de secagem de grão de soja em camada móvel com fluxo contrario de ar.** 20 th Iberian Latin-American Congresso n Computational Methods in Engineering. XX Cilame, CD-ROOM, pp.0531-053.8, São Paulo:1999.

KHATCHATOURIAN, O.A..**Dinâmica de Secagem de Grãos de Soja em Câmara de Leito Fixo:** Modelo Matemático e Análise Comparativa dos Métodos Numéricos de Resolução. *Anais do MERCOFRIO 2000 – Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do MercoSul.* Porto Alegre, 2000. CD-ROM.p.01-10.

KHATCHATOURIAN, O.A.. (b), Simulación numérica Del flujo de aire em silos para el almacenamiento de granos. **Información Tecnológica**, vol. 11, nº 4, 2000.

KHATCHATOURIAN, O.A..**Simulação numérica do processo de secagem de soja em secador de fluxo contínuo.** In: Proceedings of the 16<sup>th</sup> Brazilian Congress of Nechanical Engineering XVI COBEM. Vol 9, p.300-307. Uberlândia, 2001.

KHATCHATOURIAN, O.A., BORGES, P. A. P., FISCHER, L. **Estudo teórico/experimental de secagem de soja em camada fina.** XXV CNMAC 2002. Nova Friburgo, RJ-Brasil.

LAWS, N.; PARRY, J. L. **mathematical modeling of heat and massa transfer in agricultural grain drying.** *Proc. R. soc. Lond. A*, 1983 **385** 169-187.

LEWIS, W. K. **The rate of druing of solid materials.** *Industr. Engng Chemistry.*, 1921 (13) 427.

LUIKOV, A. V. **Heat and mass transfer in capillary-porous bodies.** New York: Pergamon, 1966.

LUIKOV, A. V. **Transferência de calor e massa em processo de secagem.** Moscou. Lemingrado. Ed. Estatal Energia. 1956 (em Russo).

LUIKOV, A. V. AND MIKHAYLOV, Y. **Theory of energy and mass transfer.** Pretice Hall Inc. N.Y., 1961.

LASSERAN, Jean-Claude. **Princípios Gerais de Secagem .** Ver. Brás. De Armaz,Viçosa, ano 3, n.3, p. 17-46, jul. 1978.

LASSERAN, J. -C., COURTOIS, F.. **A CAD. Software to Improve the Heat Energy Efficiency of Mixed-Flow Maize Dryers.** In: CESA/FAO LATIN AMERICAN TECHNICAL MEETING ON GRAIN DRYING AND STORAGE, Porto Alegre, RS, Brasil: Paper No IV-5, october 1993.

MACCORMAK, R.W.; PAULLAY, A. J., **Computacional efficiency achieved by time splitting of finite difference operators.** - AIAA, Paper 72-354, San Diego, California 1972.

MACCORMAK, R.W. **The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering** – AIAA, Paper 69-354, Cincinnati, Ohio, 1969.

MALISKA, C.R, **Transferência do calor e mecânica dos fluidos computacional.** LTC, Rio de Janeiro: 1985.

MANUAL KEPLER WEBER S. A. Panambi, RS, 1995.

MARTINS, R.R.; FRANCO, J.B.R; OLIVEIROA, P. A. **Tecnologia de secagem de grãos.** Passo Fundo: RS, EMBRATER/EMBRAPA – RS, 1999.

MUJUMBAR, A. S., **International drying symposium series (IDS): A personal perspective.** *Thessaloniki, Halkidiki*, Grécia, 1998.

MAIZE. *Drying Technology*. 9(4), 927-945, 1991.

PARRY, J.L., **Mathematical modelling and computer simulation fo heat mass transfer in agricultural grain drying: A review.** *J. Agric. Eng. Research*, vol. 32, 1-29, 1985.

PARTI, M. **Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers.** *J. Agric. Eng. Research*, vol. 54, 339-352, 1993.

PARTIL, N.D., **Improvement of deep-bed crossflow model by a diffusion component for the grain particle an log model for avaluation of recirculating crossflow dryer,** *Drying Tecnology*, vol.5 (1), 87-106, 1986.

PETRY, V. **Modelagem matemática do processo de secagem de soja em secadores de leito fixo.** Dissertação de mestrado, UNIJUÍ, IJUÍ/RS, 2000.

PERRÉ, P., **Transpore: a Generic heat and mass transfer computational model for understading an visualizing the drying of porous media.** *Drying Tecnology*, vol.17, Combined Issues 7-8, p.1273-1289, 1999.

PIERCE, R. O; THOMPSON, T. L. **Air flow patterns in conical shaped piles of grain.** *Transaction of the ASAE*. Paper No. 74-3015, St. Joseph, 1998.

PRIANTE Filho, Nicolau, et al. **Coefficiente de Troca de Calor para o Plenum de um Secador de Grãos por Convecção Natural.** In: IV ENCONTRO NACIONAL DE CIENCIAS TERMICAS, 1992, Rio de Janeiro.

PUZZI, D. **Manual de armazenamento de grãos.** São Paulo: Ed. Agronômica Ceres. Ramasway, S. And Holm, R. A., 1999. High Intensity Drying. *Drying Tecnology*, vol.17, Combined Issues 1-2, p. 73-95, 1977.

PUZZI, Domingos. **Abastecimento e Armazenagem de Grãos.** Campinas, SP: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986, 603p.

PUZZI, D. **Manual de armazenamento de grãos.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1973.

QUEIROZ, Daniel M., et al. Simulação de Secagem de Milho em Secadores de Fluxo Concorrente de um Estágio. **Rev. Bras. de Armaz.,** Viçosa, 19 e 14 (1,2): 7-10, 1988-89.

QUEIROZ, Daniel M., DALPASQUALE, Valdecir A., PEREIRA, José A. M. Simulação de Secagem de Milho em Secadores de Fluxos Contracorrentes de Múltiplos Estágios com Resfriamento em Fluxos Contracorrentes. **Rev. Bras. de Armaz.,** Viçosa, 9 e 10(1,2): 30-34, 1984/85.

QUEIROZ, Daniel M., PEREIRA, José A. M., MELO, Evandro C. . **Modelos Matemáticos de Simulação de Secagem de Grãos.** Viçosa: Centreinar. (Apostila).

REDDY. J. N. **Na Introduction to the Finite Element Methods** . Vírginia, U. S. A.: Mc Graw-Hill Book Company, [198...]

RIBEIRO, Carlos A. A.S. **Solução, por Elementos Finitos, da Equação Não-Linear de Laplace, Aplicada à Análise de Fluxo de Ar em Silo.** Universidade Federal de Viçosa, 1983. Dissertação ( mestrado em Engenharia Agrícola).

RIBEIRO, Carlos A. A. S., FORTES, Mauri, HARA, Tetro. Escoamento de Ar em Silos. **Rev. Bras. de Armaz.,** Viçosa, 8(1,2): 28-31,1983.

ROBERTS, S. M.; SHIPMAN, J.S. **Two-point boundary value problems: shooting methods.** New York, American Elsevier Publishing Company, INC., 1972.

ROBERTS, Sanford M., SHIPMAN, Jerome S. **Two-Point Boundary Value Problems: Shooting Methods**. New York: American Elsevier Publishing Company, INC., 1972, 269p.

ROSSI, José S., ROA, Gonzalo. **Secagem e Armazenamento de Produtos Agropecuários com Uso de Energia Solar e Ar Natural**. Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia.

SEDD, C. K. **Resistance of grains and seeds to air flow**. Agricultural Engineering. 349) 616-619, Semptember, 1983.

SILVA, J. S.. **Estado da arte de secagem e armazenamento de grãos no Brasil**. *Engenharia na Agricultura*. Série: Armazenamento, Vol. 3(6), p. 1-17janeiro, 1993.

SINÍCIO, Roberto, ROA, Gonzalo. **Simulação Matemática de Secagem**. Viçosa: CENTREINAR. (Apostila)

SISSOM, Leighton, PITTS, Donald R. **Fenômenos de Transporte**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 765p.

SHIMIZU, P. A., **Estudo da secagem de sementes de sorgo em secador contínuo em contra-corrente; Modelagem Matemática**. Engenharia Química, Escola Politécnica da USP, 1974, 208p. Dissertação (mestrado em engenharia).

SIMMNS, W.H.C; Ward, G.T.; McEwen, E. **The drying of wheat grain. I. The mechanisms of wheat drying;II Though drying of deep beds**. Transactions Institute Chemistry Engineers, 1953 31 (3) 265-288.

SOARES, J.B. **Curvas de secagem em camada fina e propriedades físicas de soja (Glycine max L.)**. Universidade de Viçosa, MG, Dissertação de Mestrado,1986.

SONGTAO, H.; XUQUAN, L. GUODAN, L.; LEMING, L. **Cross-effect of Heat and Mass Transfer of Luikov Equation: Measurement and Analysis**. *Drying Technology* vol. 17, Issue 9, p. 1859-1877, 1999.

SOUZA, J. L. F., FERREIRA, W. R. **Simulação de Secadores Reais Bidimensionais**. In: XIV CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 1996, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABCM, 1996.

SUHARGO, BAKKER-ARKEMA, F. W. **Sun-Drying of Grain**. In: FAO TECHICAL SYMPOSIUM ON GRAIN DRYING AND STORAGE IN LATIN AMERICA. Porto Alegre, RS, Brasil: Paper No IV-4, october, 1993.

THOMPSON, T. L; PEART, R.M; FOSTER, G.H. 1986. **Mathematical simulation of corn drying** – a New Model. *Transaction of the ASAE*. 11(4): 582-586.

TONIAZZO, N. A. **Modelagem matemática do escoamento do ar em sistemas de armazenagem de grãos**. UNIJUÍ. Ijuí (RS),1997.Dissertação de Mestrado.

VAN ARSDEL, W. B. **Simultaneous heat and mass transfer in a ninisothermal system: through-flow drying in the low-moisture range**. *Chem. Eng. Prog. Symp. Series*, 51(16)47-58, 1955.

WHITAKER, S.. **Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying**. In: *Advances in Heat Transfer*. Vol. 13, Academic Press, New York, 1977.

WEBER, E.A. **Armazenagem Agrícola**. Porto Alegre: Kepler Weber Industrial, 1998.

WEBER, E.A. **Armazenagem Agrícola**. Porto Alegre: Kepler Weber Industrial, 1995, 400p.

YOUNG, J. H. **Simultaneous heat mass transfer in a porous, higroscopic solid**. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Mich., n. 12, v.5, p.720-725, 1969.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)