

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

**Secagem Convectiva de Sólidos com Forma  
Complexa Usando o Método Integral  
Baseado em Galerkin**

**Autor: João Paulo da Silva Santos**

**Orientador: Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Campina Grande, Fevereiro de 2013.

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

# **Secagem Convectiva de Sólidos com Forma Complexa Usando o Método Integral Baseado em Galerkin**

**Autor: João Paulo da Silva Santos**

**Orientador: Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte e Energia

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

Campina Grande, Fevereiro de 2013.

PB - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

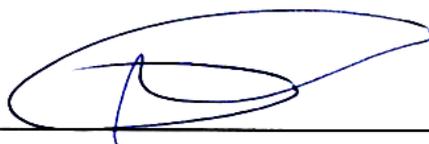
- S237s Santos, João Paulo da Silva.  
Secagem convectiva de sólidos com forma complexa usando o método integral baseado em Galerkin / João Paulo da Silva Santos. -- 2012.  
90 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro Ciências e Tecnologia.
- "Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".  
Referências.
1. Secagem. 2. Analítico. 3. Simulação. 4. Trigo. 5. Esferóide Prolato.  
6. Método GBI. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 621:631.365(043)

**“SECAGEM CONVECTIVA DE SÓLIDOS COM FORMA COMPLEXA USANDO O  
MÉTODO INTEGRAL BASEADO EM GALERKIN”.**

**JOÃO PAULO DA SILVA SANTOS**

Dissertação Aprovada em 22/02/2013 pela banca examinadora constituída dos  
seguintes membros:



---

**Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**

**Orientador**

**PPGEM/UAEM/CCT/UFCG**

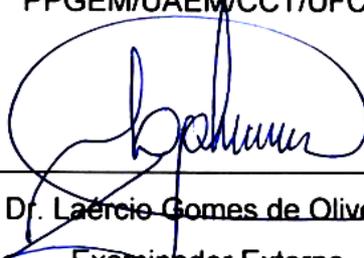


---

**Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho**

**Examinador Interno**

**PPGEM/UAEM/CCT/UFCG**



---

**Dr. Laércio Gomes de Oliveira**

**Examinador Externo**

**UAEQ/CCT/UFCG**

## **DEDICATÓRIA**

Ao meu pai Djalma Teixeira dos Santos (in memorian) pelos ensinamentos.

A minha mãe (Francisca Maria) pelo amor, carinho apoio e todos os ensinamentos.

A minha esposa (Patrícia Carla) pelo amor, compreensão, paciência, apoio e incentivo.

Aos meus irmãos (Cícero Manoel) e (Djalma Júnior) pelo apoio.

A toda minha família pelo apoio incondicional.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao senhor Deus, por ter me concedido esta benção e ter me iluminado todos os dias de minha vida.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima pela oportunidade, orientação, paciência, ensinamento e amizade que possibilitaram a elaboração deste trabalho.

Aos professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, em especial aos do mestrado pelos ensinamentos.

À Universidade Federal de Campina Grande.

Aos colegas Ivonete, Iran, José vieira, Evaldo, Aguinaldo, João Carlos, Brasileiro, Elder (mano) Helder Giuseppe, Jéssica e Anderson pela amizade e colaboração para elaboração deste trabalho.

A todos os colegas de curso, pela amizade e convivência agradável.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

A todos do UAEM/CCT/UFCG, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

*O temor do Senhor é o princípio da sabedoria, os tolos  
desprezam sabedoria e disciplina.  
(Provérbios de Salomão)*

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Revisão da literatura .....	4
2.1	– A secagem .....	4
2.1.1	Aspectos gerais de secagem .....	4
2.1.2	- Teores de umidade .....	7
2.1.3	- Métodos de secagem .....	8
2.1.4	- Curvas de secagem.....	11
2.1.5	- Modelos matemáticos para prever a umidade de equilíbrio.....	14
2.1.6	- Teoria da difusão líquida aplicada em sólidos esferoidais oblatos e prolatos....	15
2.2	- Trigo.....	18
2.2.1	- Histórico .....	18
2.2.2	- Características e estrutura do grão de trigo .....	19
2.2.3	- O comércio mundial de trigo.....	20
2.2.4	- Aspectos atuais do trigo no Brasil. ....	22
2.2.5	- Secagem de trigo .....	24
3	Modelagem matemática.....	27
3.1	A equação de difusão e solução analítica.....	27
3.2	Modelagem da transferência de calor e de massa .....	33
3.2.1	Modelagem da transferência de massa .....	34
3.2.2	Modelagem da transferência de calor .....	35
3.3	Geometria do problema.....	36
3.4	Aplicações da metodologia a secagem de grãos de trigo .....	39
4	Resultados e discussões .....	43
4.1	- Comentários iniciais.....	43
4.2	– Validação da solução analítica .....	43
4.3	Aplicação a secagem de grãos de trigos.....	46
4.3.1	Transferência de massa no grão de trigo .....	46
4.3.2	- Transferências de calor no grão de trigo .....	54

5 Conclusões e Sugestões para futuros trabalhos .....	62
5.1 - Conclusões .....	62
5.2 - Sugestões para futuros trabalhos.....	63
Referências bibliográficas .....	64

## RESUMO

Santos, João Paulo da Silva, **Secagem Convectiva de Sólidos com Forma Complexa Usando o Método Integral Baseado em Galerkin**, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2013, 90 p. Dissertação (Mestrado).

Diversos autores vêm dando ênfase ao fenômeno de transferência de calor e massa durante o processo de secagem. Numerosos modelos matemáticos têm sido propostos para descrever o aquecimento do sólido e a perda de umidade durante a secagem, entretanto poucos trabalhos incorporam os fenômenos simultâneos de transporte de calor e massa aplicados a sólidos elipsoidais. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo simular a secagem de sólidos com forma complexa. Uma solução analítica da equação de difusão transiente para descrever o processo, tendo como base o modelo matemático que baseou-se na teoria da difusão líquida, usando o método de integral de Galerkin, considerando condições de contorno convectiva e propriedades termofísicas constantes é apresentada. Como aplicação da metodologia foi utilizada para descrever a secagem o grão de trigo. Resultados do teor de umidade e temperatura do grão trigo durante a secagem são apresentados e comparados com os dados da literatura, e uma boa aproximação foi verificada. Os resultados obtidos são consistentes e o modelo apresentado pode ser usado para resolver problemas de transferência de calor e massa simultâneos em produtos agrícolas com geometria de um esferóide prolato. Observou-se que, no processo de secagem, a perda de massa é mais lenta que o aquecimento do sólido, uma vez que a condutividade térmica do material é bem superior a difusividade de massa.

Palavras Chave: Secagem, Analítico, simulação, trigo, esferóide prolato, método GBI.

## **ABSTRACT**

Santos, João Paulo da Silva, **Convective Drying Solids with Complex Shape Using the Galerkin-Based Integral Method**, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2013, 90 p. Dissertação (Mestrado).

Several authors has studied the phenomenon of heat and mass transfer during the drying process. Numerous mathematical models have been proposed to describe the heating of solid and moisture loss during drying, however worth pointing out that few studies incorporate the phenomena of simultaneous heat and mass transport applied to ellipsoidal solids. Thus, this study aims to simulate the drying of solids with complex shape. An analytical solution of the diffusion equation to describe the transient process, based on the, theory of liquid diffusion, using the Galerkin-based integral method considering convective boundary conditions and constant thermophysical properties is presented. Application of the methodology has been done to describe drying the wheat grain. Results of the moisture content and temperature of the wheat grain during drying are presented and compared with the literature and a good agreement was verified. The results are consistent and the model presented here can be used to solve problems of simultaneous heat and mass transfer in agricultural products with prolate spheroidal geometry such as wheat. It was observed that, on the drying process, the mass loss of solid is smaller than the heating, one since heat thermal conductivity of is higher than the mass diffusivity.

Keywords: Drying, Analytical, simulation, wheat, prolate spheroid, GBI method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema da transferência de calor e massa. ....	5
Figura 2.2 - Secagem em terreiro. ....	9
Figura 2.3 - Esquemas de funcionamento de um secador de fluxo cruzado. ....	11
Figura 2.4 - Taxa de evaporação versus tempo. ....	12
Figura 2.5 - Teor de umidade versus tempo. ....	13
Figura 2.6 - Taxa de evaporação versus teor de umidade. ....	13
Figura 2.7 - Temperatura versus tempo. ....	13
Figura 2.8 - Seção Transversal de um grão trigo. ....	20
Figura 3.1 - a) grão de trigo e b) representação geométrica esferóide prolato e suas características. ....	37
Figura 4.1 - Comparação entre resultados do teor de umidade no centro de um esferóide prolato com razão de aspecto de 2,00 para número de $Bi = (hma)/D = 4,00$ sobre a linha de simetria ( $r = 0$ ), obtidos neste trabalho e os reportados na literatura (analítico). ....	44
Figura 4.2 - Comparação entre os resultados do teor de umidade no centro de um esferóide prolato com razão de aspecto de 2,00 para $Bi = 0,50$ sobre a linha de simetria ( $r = 0$ ), obtidos neste trabalho e os reportados na literatura (analítico). ....	44
Figura 4.3 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional do grão de arroz em função do tempo, obtidos na literatura (numérico, $T=35^{\circ}C$ ). ....	45
Figura 4.4 - Comparação entre os resultados da temperatura média adimensional do grão de arroz em função do tempo, obtidos neste trabalho e os reportados na literatura. (numérico, $T = 35^{\circ}C$ ). ....	46

Figura 4.5 - Comparação entre resultados do teor de umidade médio adimensional do grão de trigo em função do tempo obtidos neste trabalho e os reportados na literatura (numérico e experimental, $T=87,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).....	47
Figura 4.6 - Distribuição do teor de umidade adimensional para o grão de trigo em quatro tempos diferentes: a) $t = 500\text{ s}$ ( $Fo = 0,01981$ ), b) $t = 1000\text{ s}$ ( $Fo = 0,03962$ ), c) $t = 2000\text{ s}$ ( $Fo = 0,07925$ ) e d) $t = 4000\text{ s}$ ( $Fo = 0,15849$ ) ( $T=87,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).....	48
Figura 4.7 - Comparação entre os resultados do teor de umidade médio adimensional do grão de trigo em função do tempo, obtidos neste trabalho e reportado na literatura (experimental, $T=67,5^{\circ}\text{C}$ ).....	49
Figura 4.8 - Distribuição do teor de umidade adimensional no plano longitudinal para o grão de trigo em quatro intervalos de tempo diferentes: a) $t = 800\text{ s}$ ( $Fo = 0,01848$ ), b) $t = 1800\text{ s}$ ( $Fo = 0,04158$ ), c) $t = 2500\text{ s}$ ( $Fo=0,05776$ ) e d) $t = 4000\text{ s}$ ( $Fo=0,0924$ ) ( $T=67,5^{\circ}\text{C}$ ).....	51
Figura 4.9 - Comparação entre os teores de umidade adimensionais em função do tempo, obtidos neste trabalho e reportados na literatura (experimental $T=47^{\circ}\text{C}$ ).....	52
Figura 4.10 - Distribuição do teor de umidade adimensional no plano longitudinal para o grão de trigo em quatro intervalos de tempo diferentes: a) $t = 900\text{ s}$ ( $Fo = 0,03566$ ), b) $t = 1300\text{ s}$ ( $Fo = 0,05151$ ), c) $t = 2000\text{ s}$ ( $Fo=0,07925$ ) e d) $t = 3500\text{ s}$ ( $Fo=0,13869$ ) ( $T=47^{\circ}\text{C}$ ).....	53
Figura 4.11 - Comparação entre os resultados da temperatura adimensional no centro do grão de trigo com razão de aspecto de 2,00 em função do tempo obtidos neste trabalho e reportados na literatura (numérico e experimental, $T = 87,8^{\circ}\text{C}$ ).....	54
Figura 4.12 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do grão de trigo em quatro instantes de tempo diferentes: a) $t = 2\text{ s}$ ( $Fo = 0,0680453$ ), b) $t = 4\text{ s}$ ( $Fo=0,136091$ ), c) $t = 8\text{ s}$ ( $Fo = 0,272181$ ) e d) $t = 12\text{ s}$ ( $Fo = 0,408272$ ).....	56
Figura 4.13 - Comparação entre os resultados da temperatura adimensional no centro do grão de trigo com razão de aspecto de 2,00 em função do tempo obtidas neste trabalho e reportados na literatura (experimental, $T=67,5^{\circ}\text{C}$ ).....	57
Figura 4.14 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do grão de trigo em quatro instantes de tempo diferentes: a) $t = 4\text{ s}$ ( $Fo = 0,131846$ ), b) $t = 8\text{ s}$ ( $Fo= 0,263692$ ), c) $t = 10\text{ s}$ ( $Fo = 0,329615$ ) e d) $t = 14\text{ s}$ ( $Fo = 0,461461$ ) ( $T=67,5^{\circ}\text{C}$ ).....	58
Figura 4.15 - Comparação entre os resultados experimental da temperatura adimensional no centro do grão de trigo em função do tempo, obtidos neste trabalho e reportados na literatura (experimental, $T=47^{\circ}\text{C}$ ).....	59

Figura 4.16 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do grão de trigo em quatro instantes de tempo diferente: a)  $t = 6$  s ( $Fo = 0,204136$ ), b)  $t = 8$  s ( $Fo = 0,272181$ ), c)  $t = 10$  s ( $Fo = 0,340227$ ) e d)  $t = 12$  s ( $Fo = 0,408272$ ) ( $T = 47^\circ\text{C}$ ). .....60

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Modelo matemático utilizado para predição de umidade de equilíbrio. ....	15
Tabela 2.2 - Principais países produtores de trigo e sua produção mundial no período de 2005 a 2011, em toneladas. ....	21
Tabela 2.3 - Quantidade de grão de trigo importado pelo Brasil entre os anos de 2006 e 2011, em toneladas. ....	23
Tabela 2.4 - Quantidade de farinha de trigo importada pelo Brasil entre os anos de 2006 e 2011, em toneladas. ....	24
Tabela 3.1 - Condições do ar de secagem e do trigo .....	39
Tabela 3.2 - Parâmetros termofísicos usado nas simulações. ....	40
Tabela 3.3 - Parâmetros termofísicos .....	41

## NOMENCLATURA

### *Letras Latinas*

$C_p$ - Calor específico do produto	[J / kg / K]
D - Coeficiente de difusão	[m <sup>2</sup> / s]
Fo - Número de Fourier	[-]
hc - Coeficiente de transferência de calor	[W/m <sup>2</sup> /K]
hm - Coeficiente de transferência de massa	[m / s]
k - Condutividade térmica	[W / m /K]
a, b - Dimensões do esferóide prolato	[m]
M - Teor de umidade	[kg / kg]
$\bar{M}$ - Teor de umidade médio	[kg / kg]
M* - Razão de umidade	[kg / kg]
t – Tempo	[s]
UR - Umidade relativa	[%]

### *Letras Gregas*

$\theta$ - Temperatura do produto	[K]
$\rho$ - Densidade (massa específica)	[kg / m <sup>3</sup> ]
$\alpha$ - Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> / s]
$\nabla$ - Gradiente	[-]
$\nabla$ - Operador nabla	[-]
$\Gamma^\Phi$ - Propriedade do material	[-]

$\lambda$ - Propriedade do material

[-]

### *Siglas*

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande.

LCTF - Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

A secagem nas indústrias utiliza processos de transferência de calor condutivo e/ou convectivo para reduzir a concentração de componentes residuais voláteis, que sejam ricos em compostos não voláteis. Os princípios de secagem de sólidos são semelhantes àqueles de outros processos térmicos, como evaporação. A secagem por convecção é um dos métodos mais comuns, onde o calor sensível é transferido para o material por convecção. O agente de secagem (ar pré-aquecido) passa sobre a superfície do sólido, evaporando a umidade e transportando-a do mesmo.

Assim a remoção da umidade se dá por dois processos fundamentais:

- a) Transferência de calor do ar para o produto devido ao efeito da diferença de temperatura;
- b) Transferência de massa para o ar decorrente de uma diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre a superfície do produto e o ar que o envolve.

Neste contexto, é importante considerar que na secagem convectiva dos alimentos, a remoção de água do material úmido seja realizada até um nível onde a deterioração provocada por micro-organismos possa ser minimizada (LIMA et al., 2004). O processo de secagem

deve ocorrer de maneira controlada, para que ela possa ocorrer de maneira uniforme, evitando elevados gradientes de umidade e temperatura no interior do material que podem provocar a perda da qualidade do produto.

Diversos produtos agrícolas tem sido submetido a secagem, em particular o grão de trigo, pelo seu uso como matéria prima para a confecção de produtos alimentares para o ser humano, tais como pão, farinha, etc.

A qualidade do grão de trigo pode ser definida como resultado da interação que a cultura sofre no campo, do efeito das condições do solo, do manejo da cultura, da cultivar, bem como das operações de colheita, armazenamento e estocagem (EDWARDS, 2004).

Os grãos de trigo normalmente são colhidos com cerca de 18% de umidade em base úmida. Desta forma é de grande importância que estes grãos colhidos passem por um processo de secagem adequado para que ocorra a eliminação parcial da água até uma umidade em torno de 13%, evitando alterações nos grãos tais como produção de bactérias e microorganismos que venham a danificar o produto.

Devido a sua importância, diversos trabalhos têm sido reportados na literatura relacionada a secagem de grãos de trigo, com abordagens teórica e experimental. Geralmente, na abordagem teórica, as pesquisas são realizadas usando modelos matemáticos considerando o grão como partícula esférica e pouquíssimos trabalhos são relacionados a corpos com forma complexa, como por exemplo, sólidos elipsoidais.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo estudar a transferência de calor e massa em sólidos de forma complexa, usando o método integral baseado em Galerkin. De forma específica, o presente trabalho propõe atingir os seguintes objetivos:

- ❖ Modelar matematicamente o fenômeno e apresentar solução analítica para o problema de difusão transiente, em corpos com forma complexa, baseando-se na teoria da difusão líquida e lei de Fourier.
- ❖ Aplicar o estudo à secagem de grão de trigo, considerando o mesmo como um elipsóide de revolução.

- ❖ Simular a distribuição de temperatura e teor de umidade no interior de um grão de trigo e suas cinéticas de secagem e aquecimento.
- ❖ Comparar os resultados obtidos com aqueles reportados na literatura a fim de validar a metodologia apresentada.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO DA LITERATURA**

#### **2.1 - A secagem**

##### **2.1.1 - Aspectos gerais de secagem**

A secagem é um dos métodos mais antigos utilizados para preservação e armazenamento de produtos após a colheita. Contudo, dentre os processos que se aplicam para o trato pós-colheita, conservação e armazenagem adequada de grãos, a secagem é o de maior consumo energético. Existem diversas maneiras de secagem que podem ser aplicadas para secar vários produtos. Geralmente, o ar é usado, na maior parte dos sistemas de secagem, como elemento que entrega calor aos grãos ao mesmo tempo em que extrai a umidade. Assim sendo, as diferentes estratégias diferem apenas na forma como o ar e a energia transitam pelo sistema de secagem (KLAUTAU, 2008).

Do ponto de vista técnico científico, o processo de secagem consiste em uma operação unitária muito importante em muitas indústrias, tais como: alimentos, farmacêutica, química e de tratamento de resíduos (LOULOU et al., 2006). Esta operação envolve calor e vários mecanismos de transferência de massa. No entanto, o movimento de água no interior do

produto é geralmente considerado o fator de controle, muitas vezes descrito por um mecanismo de difusão com base na segunda lei de Fick (KOPTYUG et al., 2000; PUYATE e LAWRENCE, 2006; SRIKIATDEN e ROBERTS, 2007; ARRIECHE et al., 2009)

O processo de secagem demanda gasto de energia térmica para a evaporação da água e esta, ao evaporar, esfria o ar de secagem pela perda de calor sensível, contudo o ar recupera a energia perdida, na forma de vapor de água (calor latente). A Figura (2.1) mostra de forma simplificada o processo de secagem, na qual o ar quente com baixa umidade relativa chega até a superfície do material, e provoca a retirada de uma parcela de umidade deste produto. Este processo diminui a temperatura do ar e aumenta sua umidade relativa (MÖHLER, 2010).

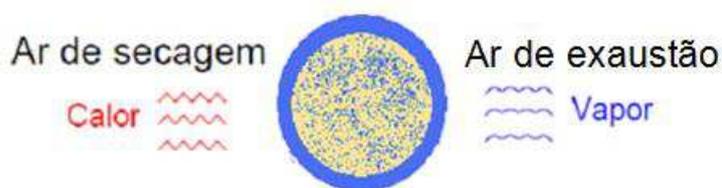


Figura 2.1 - Esquema da transferência de calor e massa.

Fonte: Möhler (2010).

Conforme OLIVO et al. (2010), verificações das variações no teor de umidade inicial dos grãos e a adoção de mecanismos de controle automático na etapa de secagem são procedimentos capazes de propiciar tanto obter um produto final mais homogêneo quanto evitar um consumo excessivo de energia durante o processo.

Os grãos quando são colhidos apresentam umidade elevadas. Quando estes são colhidos com excesso de umidade, sua secagem ocorre com gasto extra em energia e a perda na qualidade do produto. Por outro lado, colheitas realizadas com umidades muito baixas resultam em grãos mais suscetíveis à quebra e com maior quantidade de defeitos metabólicos (SIMIONE et al., 2008).

Diversos produtos biológicos, durante a secagem individual ou em camada ao atingir o ponto de maturidade fisiológica, apresentam uma perda de umidade. Essa umidade, que pode ser removida do material sem alteração da estrutura molecular do sólido, provavelmente é o fator mais relevante a afetar a germinação, o crescimento da planta e o desenvolvimento de fungos.

Todavia, a secagem dos produtos agrícolas é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e estabilidade considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (RESENDE et al., 2008). Neste contexto, é fundamental conhecer os efeitos da secagem e o seu controle, uma vez que estes alteram as propriedades físicas e químicas do produto, e tais alterações afetam sensivelmente o processo de transferência de calor e massa (ALMEIDA et al., 2009; SILVA, 2010).

Segundo ALMEIDA et al. (2009), muitos agricultores por falta de informações, várias vezes desenvolvem um manejo inadequado tanto na cultura quanto nos grãos e sementes colhidas ou mesmo nos armazéns, aumentando assim os riscos de infestação que depende de uma série de fatores, como tipo do grão ou sementes, condições de estocagem, qualidade e quantidade da microflora, clima e localização dos armazéns, volume e período de estocagem.

A presença da água no produto pode ser medida de diferentes formas, mas nem todos os métodos indicam a disponibilidade da água para os microrganismos, uma vez que nem toda a água do grão está igualmente disponível. O fenômeno de redução do teor de umidade envolve o movimento hidráulico do interior para a superfície do grão através de mecanismos distintos de transferência de calor e massa, que podem alterar de forma substancial a qualidade e as propriedades físicas do produto, dependendo do método e das condições de secagem (GONELLI et al., 2007).

O mecanismo pelo qual ocorre a difusão da água nos produtos agrícolas é muito complexo devido à diversidade da composição química e estrutura física dos produtos. Na literatura sobre secagem envolvendo o fenômeno da difusão de água, são encontradas grandes variações nos valores da difusividade de massa, não só devido à complexidade dos produtos, como também em função dos diferentes métodos de predição, tipo de material, teor de água, processo de secagem e a metodologia utilizada para sua obtenção.

### 2.1.2 - Teores de umidade

O conceito de grau de umidade tem origem no fato de os grãos serem constituídos de substâncias sólidas, denominada de matéria seca, e de certa quantidade de líquido (água). O teor de umidade contido nos grãos é o principal fator que governa a qualidade do produto, e sua determinação deve ocorrer desde a colheita até o beneficiamento. Os grãos são produtos higroscópicos e, como tais, sofrem variações no seu teor de umidade, de acordo com as condições do ar ambiente que o circunda.

O teor de umidade de um material pode ser definido de duas formas: tanto em base úmida como em base seca. O teor de umidade em base úmida é a relação entre a massa de água contida no produto e a sua massa total, como descrito pela equação (2.1).

$$M_{bu} = m_a / m_t \quad (2.1)$$

onde,

$M_{bu}$  é o teor de umidade em base úmida;

$m_a$  é a massa de água contida no produto;

$m_t$  é a massa total do produto, ou seja, massa do produto seco mais massa de água.

O teor de umidade em base seca é a relação entre a massa de água contida no produto e a massa de matéria seca, deste produto. pode ser obtido equação (2.2), como segue:

$$M_{bs} = m_a / m_{ms} \quad (2.2)$$

sendo,

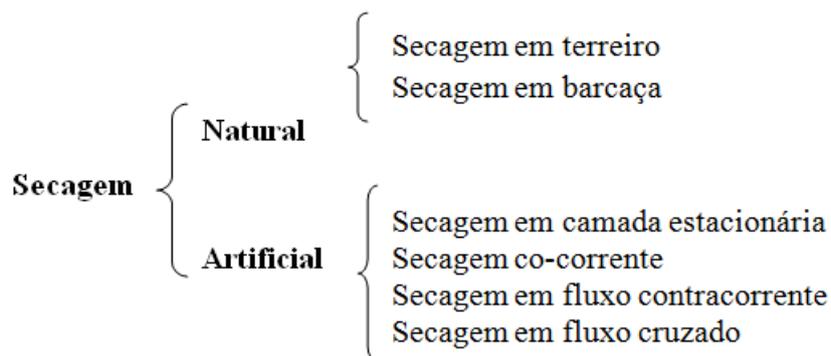
$M_{bs}$  é o teor de umidade em base seca;

$m_a$  é a massa de água contida no produto;

$m_{ms}$  é a massa do produto seco.

### 2.1.3 - Métodos de secagem

Existem vários métodos de secagem citados na literatura. Dentre esses, destacam-se: por congelamento, leito de jorro, por infravermelho, por microondas e a convectiva (ar quente). A secagem convectiva pode ainda ser subdividida como segue:



a) **Secagem natural:** A secagem natural é entendida como aquela em que o ar que promove a secagem, provém da ação dos ventos e a energia utilizada emana da incidência direta ou indireta da energia solar para remoção de umidade das sementes. Este método, em geral, é pouco suscetível à danificação mecânica e térmica. Sendo, no entanto, dependente das condições psicrométricas do ar ambiente, que diversas vezes não são adequadas para a secagem das sementes.

Para FRANKE et al. (2008), a principal desvantagem desse método reside na necessidade de mão de obra intensiva humana, que por sua vez apresenta um desempenho operacional de baixo custo. No entanto, quando conduzida diretamente sob a ação de sol ou sombra, a secagem natural é um fator de grande importância na produção de sementes, uma vez que traz consistência, a maturação das sementes homogênea pós-colheita.

- ❖ *Secagem em terreiros:* Nesta técnica a secagem é realizada pela exposição do produto ao sol em terreiros conforme a Figura (2.2). Apesar desta energia solar não apresentar custo real na operação de secagem, existem algumas desvantagens como o seu baixo rendimento, condicionado à necessidade de um período prolongado para a secagem, exigência de extensas áreas de terreiro, além do produto estar sujeito a variações climáticas, podendo ser re-umedecido. Desse modo, os parâmetros climáticos de

temperatura, umidade relativa do ar e teores de umidade inicial e final do produto devem ser monitorados durante a secagem (BORÉM et al., 2008). Por sua vez, sob o ponto de vista ambiental, a principal vantagem da secagem em terreiros reside no fato da não utilização da queima de combustíveis (RESENDE et al., 2007).



Figura 2.2 - Secagem em terreiro.

Fonte: [www.google.com.br/imgres?q=FOTOS+DE+SECAGEM+EM+TERREIRO&hl](http://www.google.com.br/imgres?q=FOTOS+DE+SECAGEM+EM+TERREIRO&hl)

- ❖ *Secagem em barcaça*: A barcaça é um dos principais símbolos da economia do cacau (região Sul da Bahia). A barcaça é uma estrutura fundamental no processamento do cacau. Ela é usada para a secagem das sementes, que ficam expostas ao sol por cerca de uma semana. São feitas de madeira, ferro e zinco. Ficam em cima de trilhos que são usados para mover o teto para fora, deixando o lastro (chão) da barcaça exposta ao sol, onde ficam as sementes. A barcaça se tem aparência de uma estufa, a diferença é que esta não tem forno em baixo.
  
- b) **Secagem artificial**: A alternativa para a secagem natural no campo ou terreiro é a utilização de técnicas de secagem artificial. A secagem artificial pode ser executada em baixas e/ou altas temperaturas. É o tipo de secagem mais frequente e adapta-se bem aos esquemas de

produção de sementes, sendo a secagem rápida e capaz de remover elevadas quantidades de água. Permite manter a qualidade das sementes, quando empregado com critérios técnicos, como, por exemplo, a não exposição prolongada a elevadas temperaturas e a elevação da temperatura das sementes até determinados limites (BERTI et al., 2005).

- ❖ *Secagem em camada estacionária:* Consiste efetivamente em insuflar o ar quente através da massa do produto que permanece em repouso. Esse tipo de secagem se processa, por exemplo, da base para o topo da camada de grãos, em um secador de fundo falso perfurado, e do centro para a periferia, em secador de tubo central perfurado (sementes). A impossibilidade do uso de grãos com alto teor de umidade, período longo de operação e não uniformidade na secagem são as características mais indesejáveis neste sistema.
- ❖ *Secagem em fluxo co-corrente:* Nesta modalidade de secagem, o ar e o grão fluem no mesmo sentido. O ar aquecido encontra o grão mais úmido, e a alta taxa de evaporação causam rápido decréscimo da temperatura no ar de secagem possibilitando o uso de temperaturas mais elevadas que as utilizadas em secadores de fluxos cruzados.
- ❖ *Secagem em fluxo contracorrente:* A secagem em fluxo contracorrente é realizada de forma que o ar aquecido e a massa do produto movimentem-se de forma inversa. Assim, à medida que a massa do produto decresce, sua temperatura é aumentada, atingindo valores muito próximos aos da temperatura do ar de secagem. Esta modalidade de secagem caracteriza-se pela menor susceptibilidade a danos mecânicos e pouco período de exposição ao ar de secagem.
- ❖ *Secagem em fluxo cruzado:* Esta modalidade caracteriza-se por fazer com que o fluxo de ar passe perpendicularmente a camada do produto que permanece em colunas verticais construídas em chapas perfuradas. A Figura (2.3) mostra o esquema de funcionamento dos secadores de fluxo cruzado que pode trabalhar de forma contínua. Hoje essa secagem em fluxo cruzado é a mais utilizada em todo o mundo por ser, os secadores, de simples construção e operação, e apresentar menor custo inicial em relação a outros modelos. Os modelos existentes no Brasil, geralmente são de baixa

capacidade e trabalham de forma intermitente, processando um lote do produto de cada vez.

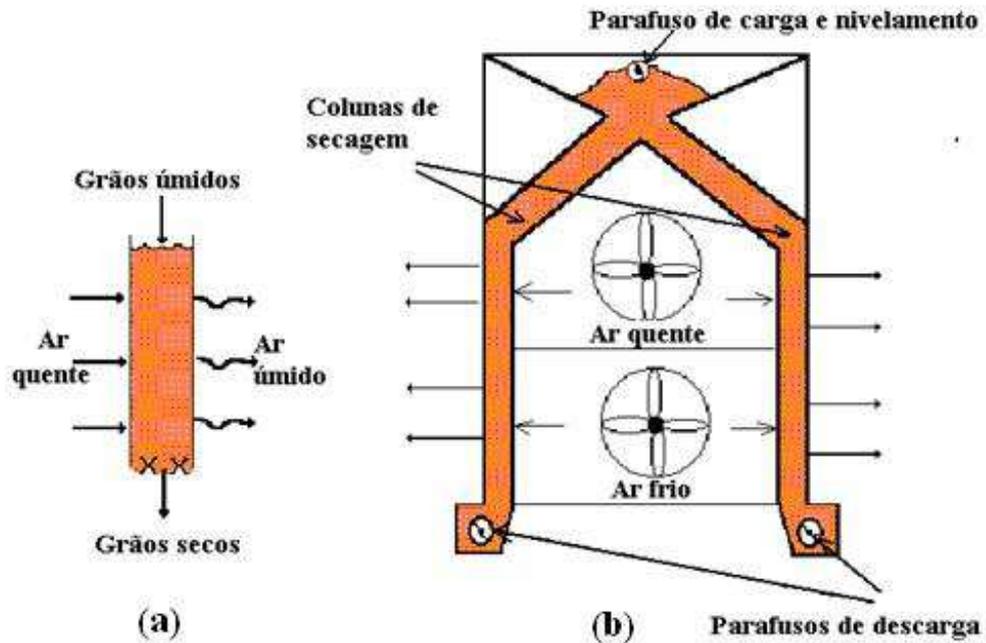


Figura 2.3 - Esquemas de funcionamento de um secador de fluxo cruzado.

Fonte: SILVA et al. (2000).

#### 2.1.4 - Curvas de secagem

A melhor forma de apresentar os dados coletados a partir de experimentos e simulações é através de curvas de secagem podendo estas ser apresentada de três formas diferentes:

- taxa de evaporação versus teor de umidade médio;
- teor de umidade médio versus tempo;
- taxa de evaporação versus tempo.

Para produtos agrícolas que possuem uma estrutura complexa quando comparados com materiais homogêneos podem ser definidas duas fases distintas para sua secagem:

- taxa constante de secagem;

- taxa decrescente de secagem.

A fase de taxa constante pode ser observada na secagem de produtos biológicos com umidade inicial bastante elevada. Normalmente, quando a umidade é elevada, a resistência interna ao transporte de água é muito menor que a resistência externa à remoção de umidade da superfície. A fase de taxa decrescente caracteriza-se pela descontinuidade do fluxo de água na superfície de evaporação. A resistência externa a transferência de massa, ou resistência convectiva, é fortemente influenciada pela agitação do meio (MOREIRA e SERENO, 2003).

Durante a secagem, é na superfície do material que ocorre a evaporação da água livre, a qual foi transportada do interior do sólido. Os mecanismos mais importantes desse transporte são: difusão líquida, difusão de vapor e fluxo de líquido e de vapor. A energia envolvida neste processo de secagem é proveniente de uma diferença de pressão parcial do vapor de água, existente entre o ar e a superfície do produto, permitindo que a água migre sob a forma de vapor do interior do alimento até à superfície, e desta para o meio envolvente (PARK et al., 2007). Assim a transferência de calor e massa entre o ar de secagem e o produto é um fenômeno comum em diversas condições de secagem.

As Figuras (2.4) - (2.7): ilustram as curvas de secagem na forma esquemática, que tem sido utilizada para análise do processo.

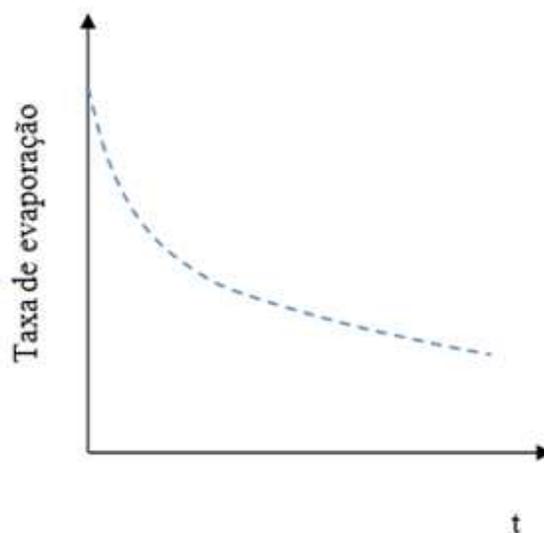


Figura 2.4 - Taxa de evaporação versus tempo.

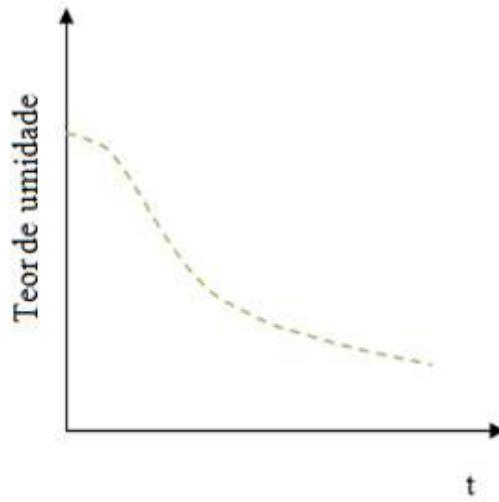


Figura 2.5 - Teor de umidade versus tempo.

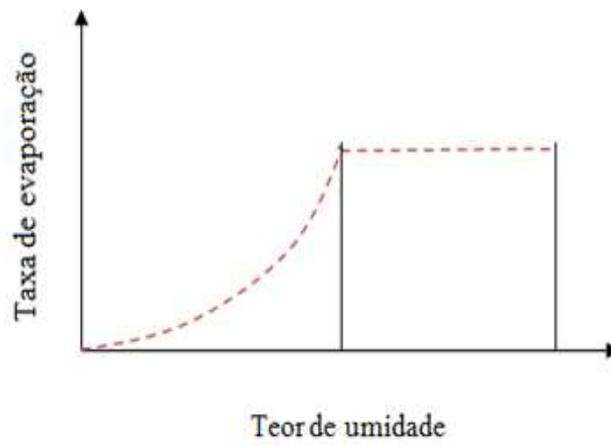


Figura 2.6 - Taxa de evaporação versus teor de umidade.

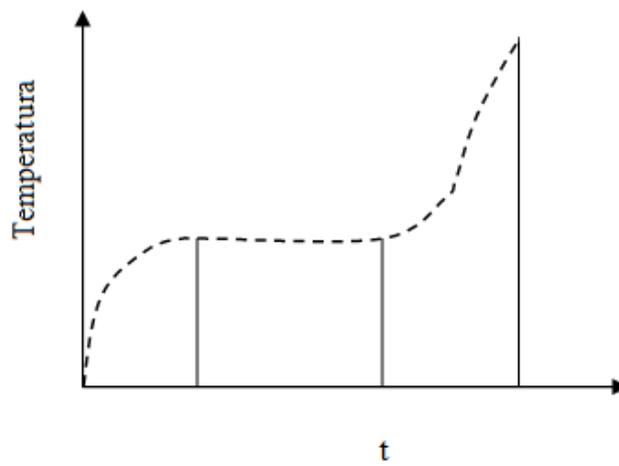


Figura 2.7 - Temperatura versus tempo.

Na Figura (2.4) tem-se a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, em relação ao tempo  $t$ , numa determinada condição de secagem onde a curva é obtida através da pesagem do produto em intervalos de tempos distintos. A Figura (2.5) representa a variação do teor de umidade do produto por tempo  $t$ . Finalmente na Figura (2.6) A taxa de evaporação em função do teor de umidade. A variação da temperatura do produto durante a secagem evoluindo com o tempo esta ilustrada na Figura (2.7). Ela pode ser obtida medindo-se a temperatura do produto durante a secagem, em determinados intervalos de tempo.

### **2.1.5 - Modelos matemáticos para prever a umidade de equilíbrio**

Para a modelagem das curvas de umidade de equilíbrio, têm sido utilizadas relações matemáticas semiteóricas e empíricas, uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido tem sido capaz de prever com precisão o teor de umidade de equilíbrio de grãos em todas as faixas de temperatura e umidade relativa do ar (BROOKER et al., 1992). Esta umidade de equilíbrio está diretamente relacionada com a secagem e armazenagem de produtos agrícolas, sendo útil para determinar se o produto ganhará ou perderá umidade, de acordo com as condições de temperatura e umidade relativa do ar que o circunda.

Então, é de fundamental importância a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água. Estas informações podem ser obtidas de forma experimental ou teórica, utilizando-se modelos matemáticos satisfatórios que representem essa perda durante todo o processo de secagem.

Estes modelos matemáticos têm sido utilizados em estudos de cinética de secagem de muitos tipos de alimentos, como banana, trigo, caju, feijão, goiaba, maracujá amarelo, pequi, soja, tamarindo (BAINI e LANGRISH, 2006; CARLESSO et al., 2007; GURJÃO et al., 2008; FURTADO et al., 2008)

No entanto, para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa satisfatoriamente a perda de umidade do produto durante o período de secagem (GOUVEIA et al., 2011). Embora vários modelos e teorias tenham sido propostas para prever o comportamento da secagem de grãos e sementes na maioria das vezes, estes modelos, geralmente, baseiam-se em variáveis

externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. (RESENDE et al., 2008; RESENDE et al., 2009; RESENDE et al., 2010).

A Tabela (2.1) apresenta alguns destes modelos matemáticos para determinação da umidade de equilíbrio. A partir destas equações e das metodologias são traçadas as curvas de isotermas. As isotermas descrevem, para uma temperatura específica, a relação entre a umidade de determinado produto e a correspondente umidade relativa no equilíbrio.

Tabela 2.1 - Modelo matemático utilizado para predição de umidade de equilíbrio.

Nome	Modelo
Bet	$M_e = \{1/[(1 - a_w)(1/a_1 a_2 + ((a_1 - 1)/a_1 a_3))]\}$
Copace	$M_e = \exp [a_4 - (a_5 T) + (a_6 a_w)]$
Gab	$M_e = (a_7 a_8 a_9 a_w) / [(1 - a_9 a_w)(1 - a_9 a_w + a_8 a_9 a_w)]$
Gab modificada	$M_e = (a_{11} a_{12} (a_{13}/T) a_w) / [(1 - a_{12} a_w)(1 - a_{12} a_w + a_{12} (a_{13}/T) a_w]$
Sigma Copace	$M_e = \exp \{a_{14} - (a_{15} T + [a_{16} \exp(a_w)])\}$
Oswim	$U_e = (a_{17} + a_{18} T) / [(1 - a_w) / a_w]^{1/a_{19}}$
Sabbah	$U_e = a_{20} (a_{1w}^{a_{21}} / T^{a_{22}})$

Fonte: MORAIS (2010).

### 2.1.6 - Teoria da difusão líquida aplicada em sólidos esferoidais oblatos e prolatos

A difusão é um dos mecanismos de transporte onde a transferência de matéria ou energia ocorre pelo movimento molecular devido à existência de um gradiente de concentração de uma substância ou temperatura, enquanto o meio permanece estacionário (FARIAS, 2011). Este processo descreve a velocidade de saída de água do grão. Como a

difusividade varia conforme mudam as condições de secagem, ela não é intrínseca ao material, e assim, convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva (OLIVEIRA et al., 2006).

A geometria do corpo é uma das relações que requer muitas vezes a necessidade de se estabelecer certas hipóteses na descrição do processo físico. Na literatura diversos trabalhos que utilizam corpos com forma geométrica comuns, são reportados, tais como: cilindros e esferas (CHEMKHI e ZAGROUBA, 2005; LOPEZ et al., 2005; UKRAINCZYK, 2009; SILVA, C., 2010; SILVA, C. et al., 2010). Efetivamente é possível também reportar na literatura diversas pesquisas sobre corpos com formas geométricas elipsoidais podendo ser estas oblatos e/ou prolatos (LIMA e NEBRA, 2000; CARMO e LIMA, 2005; OLIVEIRA, 2006; HACIHAFIZOĞLU et al., 2008; MELO et al., 2008; CARMO e LIMA, 2008; SANTOS et al., 2010).

Para geometrias mais simplificadas, o problema pode ser resolvido analiticamente, o que normalmente pressupõe propriedades termofísicas constantes para o meio (AMENDOLA e QUEIROZ, 2007; SAYKOVA et al., 2009). Assim ao se considerar geometrias uni e bidimensionais para descrever processos de secagem de sólidos com forma arbitrária, algumas discrepâncias são encontradas em virtude dos modelos matemáticos não representarem fielmente a geometria do corpo.

Então, é de suma importância considerar o fator forma do corpo no desenvolvimento dos modelos. Neste caso, espera-se que os desvios entre os resultados teóricos e experimentais sejam minimizados (SANTOS et al., 2010). Estas simplificações geométricas também facilitam a solução numérica da equação de difusão. Entretanto, este procedimento, embora normalmente apresente bons resultados, às vezes não descreve de forma satisfatória os processos envolvidos, caso a forma geométrica do objeto em estudo seja significativamente diferente da considerada (FARIAS, 2011).

Nesse contexto, observa-se que vários estudos de difusão aplicados a sólidos esferoidais têm sido reportado por diversos autores,

LIMA (1999) apresentou soluções analíticas e numéricas da equação de difusão para corpos com forma de um esferóide prolato, com condições de contorno diferentes e utilização das mesmas para o estudo de secagem de bananas.

CARMO (2004) apresentou uma solução numérica da equação de difusão que descreve a transferência de calor e massa no interior de esferóide oblato, incluindo o efeito do encolhimento, considerando condição de contorno convectiva e propriedades constantes ou variáveis. Diversos resultados do teor de umidade médio e temperatura dentro do esferóide são apresentados e analisados. Como aplicação a metodologia foi usada para descrever a secagem de lentilha.

OLIVEIRA (2006) apresenta uma solução numérica para a descrição das trocas de energia e massa durante o processo de secagem, em corpos com geometria esferoidal prolato, baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis. Como aplicação, a metodologia foi utilizada para a secagem grãos de trigo. O mesmo autor reporta que os resultados obtidos são consistentes e o modelo apresentado pode ser usado para resolver problemas de transferência de calor e massa (líquido e vapor) simultâneos em produtos agrícolas com qualquer teor de umidade alto.

CARMO e LIMA (2008) apresentaram uma solução numérica da equação de difusão bidimensional transiente para descrever a transferência de massa dentro de esferóides oblatos, considerando o coeficiente de difusão constante e condição de contorno convectiva. De acordo com os autores, o modelo matemático apresentado é consistente e pode resolver outros problemas de difusão, incluindo os corpos com forma de discos ou esferas, como casos particulares de esferóides oblatos.

HACIHAFIZOĞLU et al. (2008) estudaram, o comportamento de secagem de arroz bruto com um teor de umidade entre 22 e 24%, utilizando-se do modelo de difusão de líquido, com base em uma geometria esferoidal prolata. Para este estudo, a solução da equação de difusão líquida foi ajustada de acordo com os dados experimentais do teor de umidade para as temperaturas do ar de secagem entre 40 e 60 ° C e velocidade do ar de 1,5 m/s. Desta comparação, os coeficientes de difusão foram obtidos, de tal maneira a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os resultados experimentais e as predições teóricas.

SANTOS et al. ( 2010) apresentaram uma solução analítica e numérica da equação de difusão para o estudo teórico da secagem de sólidos com geometria arbitrária, onde utilizou-se o método integral baseado em Galerkin e considerou-se um esferóide prolato, com condições de contorno convectiva.

## **2.2 - Trigo**

### **2.2.1 - Histórico**

O trigo é uma das culturas alimentares do mundo todo e um dos primeiros a ser cultivado. O desenvolvimento da agricultura do trigo é creditado com a divisão da idade antiga a partir da idade do homem civilizado. Hoje, o trigo é o 2º produto mais consumido do mundo, atrás da dieta do arroz, mas à frente do milho e das bananas, respondendo por 19 por cento de todas as calorias que a humanidade consome, em comparação com 20 por cento para o arroz (FAO, 2011).

O grão de trigo ocupa o primeiro lugar em volume de produção mundial, sendo aplicado a uma enorme diversidade de produtos tais como pão, macarrão e cuscuz. Devido à importância mercadológica e à vasta aplicabilidade do trigo, pesquisas são cada vez mais incentivadas, com o propósito de implementar melhorias focadas em determinadas áreas de atuação, como nutrição e saúde, pesquisa e desenvolvimento de novos produtos e ciência e tecnologia (SCHEUER, 2011).

O Brasil foi o primeiro país das Américas a exportar trigo, graças às plantações que possuía em São Paulo, Rio de Janeiro e outras regiões. As primeiras sementes foram trazidas por Martim Afonso de Sousa, em 1534, para a capitania de São Vicente (São Paulo) onde se aclimataram muito bem. Aos poucos foram se expandindo para o Nordeste, sendo plantado em Garanhuns (Pernambuco), Texeiras (Paraíba), Meruoca (Ceará), chegando até a Ilha de Marajó, no Pará.

Conforme SCHEEREN et al. (2007) A produção mundial de trigo aumentou rapidamente entre os anos de 1951 a 1990 sem haver aumento considerável na área semeada.

Assim, a grande parte do aumento da produção mundial foi devido ao aumento na produtividade. Esse aumento da produtividade foi devido ao melhoramento genético (genótipos de porte mais baixo, ciclo precoce e com maior potencial de rendimento de grãos, além da resistência ou tolerância às principais doenças) e um manejo mais adequado do solo.

Já no período de 1987 a 2002, a produtividade permaneceu crescendo graças ao avanço da tecnologia direcionada ao cereal, chegando à média de 1541 quilos por hectare, porém, ainda insuficiente para manter o cultivo de forma sustentável no Rio Grande do Sul. Nos países onde a cultura do trigo se encontra bem desenvolvida, a produtividade média situa-se em torno de 8000 quilos por hectare. (BRUM e HECK, 2005).

### **2.2.2 - Características e estrutura do grão de trigo**

O trigo, pertencente à família Poaceae, subfamília Pooideae e ao gênero *Triticum*, é classificado em diferentes espécies, conforme o número de cromossomos: *Triticum monococcum* com 14 cromossomos, *Triticum durum* com 28 cromossomos e *Triticum aestivum* com 42 cromossomos (POPPER et al., 2006) . Trata-se de uma espécie semeada e cultivada durante o período de inverno ou primavera dependendo de sua resposta à baixas temperaturas durante a fase de florescimento e períodos de chuvas excessivas no período de maturação, o que prejudica a qualidade do grão (CUNHA e BACALTCHUK, 2000).

A cultura, o trigo estar amplamente adaptada aos mais diversos locais do mundo, sendo cultivado entre as latitudes de 30°S a 60°N e até altitudes superiores a 3.000 m (BÖRNER et al., 2005). Esta ampla adaptação da cultura do trigo é devido ao seu complexo genoma, que proporciona a alta plasticidade desta cultura.

O grão de trigo (Figura 2.8) é considerado um dos mais nobres alimentos e responde atualmente por cerca de 30% da produção mundial de grãos. É o produto mais utilizado no mundo como alimento, dado às suas características. Possui excelente balanceamento de proteínas, calorias e boa digestibilidade. Utilizado na fabricação dos mais variados alimentos, possui destaque para o pão, um alimento de fácil consumo e relativamente barato no mundo todo. Em grão ou farinha pode ser armazenado por longo período. Por todas essas características o trigo é, do ponto de vista alimentar, o mais importante produto, representando segurança alimentar de muitos países (SAFRAS e MERCADO, 2012).

No caso estrutural, o grão de trigo possui semente única, com 3 a 4 milímetros de largura e de 6 a 8 milímetros de comprimento sendo constituído, basicamente, por pericarpo (7,8 a 8,6%), endosperma (87 a 89%) e gérmen (2,8 a 3,5%) (QUAGLIA, 1991).

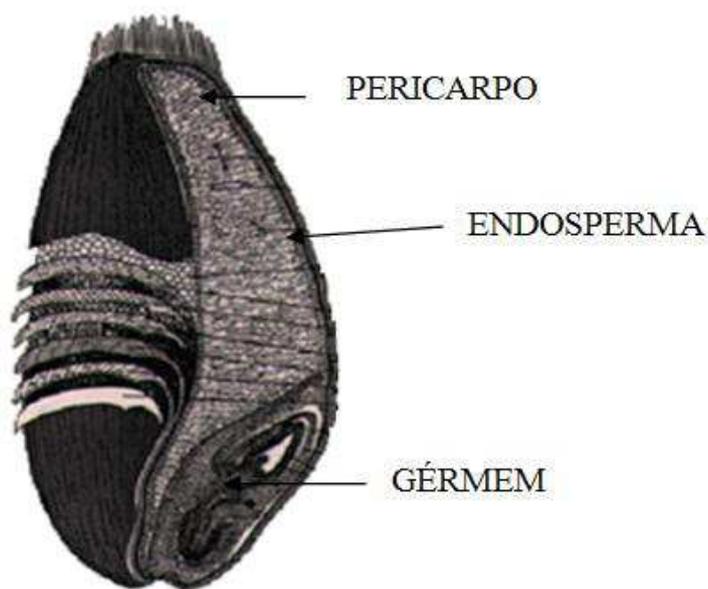


Figura 2.8 - Seção Transversal de um grão trigo.

Fonte: Embrapa - Trigo (2011).

O pericarpo é rico em fibras e sais minerais. Constitui a camada mais externa e protetora do grão (POPPER et al., 2006). O endosperma é constituído de uma matriz protéica, no qual está inserido grande número de grânulos de amido, enquanto que o gérmen exerce sobre o organismo uma importante função antioxidante, promovendo o combate aos radicais livres.

### 2.2.3 - O comércio mundial de trigo

Conforme a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação FAO (2011), a produção mundial de trigo em 2011 atinge 674 milhões de toneladas, representando um acréscimo de 3,4 a partir de 2010, Este nível ainda está abaixo em relação ao das colheitas de 2008 e 2009. A produção de trigo em muitos países aumentou ou devem aumentar este ano em resposta aos preços fortes, enquanto as recuperações de rendimento estão previstas em

áreas que foram afetadas pela seca em 2010. Assim a produção de trigo de inverno e grãos grosseiros no norte da África é favorável, exceto na Tunísia, onde as condições em janeiro são secas, mas a esperança é de umedecimento de uma mudança de clima para que haja uma recuperação robusta na produção de trigo.

A abertura da produção dos principais países nos mostra que a União Européia, EUA, Índia, China, e Rússia representam um percentual entre 65 e 69% da safra mundial de trigo. Na tabela 2.2, apresenta-se os países com maiores produções mundiais de trigo, cuja participação média na produção total, entre as safras 2005/2006 e 2009/2010, foi de 85%. Na safra 2010/2011, a previsão de menor produção mundial deve-se principalmente à redução esperada para as safras da Rússia (-20,2 mil toneladas, provocada pela pior seca em um século), da Ucrânia e do Canadá, (ROSSI E NEVES, 2010).

Tabela 2.2 - Principais países produtores de trigo e sua produção mundial no período de 2005 a 2011, em toneladas.

País	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011
União europeia	132.356	124.870	120.133	151.122	138.051	136.528
China	97.445	108.466	109.298	112.464	115.120	114.500
Índia	68.640	69.350	75.810	78.570	80.680	80.710
EUA	57.243	49.217	55.821	68.016	60.366	60.103
Rússia	47.700	44.900	49.400	63.700	61.700	41.500
Austrália	25.173	10.822	13.569	21.420	21.923	25.000
Paquistão	21.612	21.277	23.295	20.959	24.033	23.900
Canadá	25.748	25.265	20.054	28.611	26.848	23.167
Turquia	18.500	17.500	15.500	16.800	18.450	17.000
Ucrânia	18.700	14.000	13.900	25.900	20.900	16.850
Irã	14.308	14.500	15.000	10.000	12.000	14.400
Outros	91.797	95.948	99.422	86.593	102.583	91.750
Mundo	619.222	596.115	611.202	684.155	682.654	645.408

Fonte: world Agricultural Supply and Demand Estimates-USD-February/2011

Segundo ALMEIDA et al. (2009), no período de 2000 a 2007, as exportações mundiais de trigo passaram de um montante superior a 1,6 bilhões de dólares, no ano 2000, para mais de 3,3 bilhões em 2007, ou seja, houve uma elevação nessas exportações em mais de 106%.

Nesse mesmo período, os cinco principais exportadores, em ordem de importância, foram Turquia, Bélgica, França, Alemanha e Cazaquistão.

Quanto aos importadores de trigo, os países que mais se destacaram foram: Indonésia, Inglaterra, Estados Unidos, China e França (United Nations Commodity Trade Statistics Database – UNCOMTRADE, 2009). Com todos esses países importadores, o Brasil destaca-se como um dos maiores importadores de trigo e vem dando preferência ao produto argentino.

Normalmente, a produtividade média argentina não é muito melhor em relação a brasileira. Essa maior competitividade da produção argentina em relação à brasileira não vem da maior produtividade ou maior qualidade, mas sim do menor custo em relação a produção e o menor uso de fungicidas e fertilizantes (CUNHA et al., 2009).

#### **2.2.4 - Aspectos atuais do trigo no Brasil.**

No Brasil existe um grande número de genótipos de trigo recomendados para diferentes regiões e finalidades, sendo, o fator preponderante para o sucesso da lavoura, o clima. Na região Sul, a produtividade média fechou em 2.490 kg/ha no Rio Grande do Sul, 2.891 kg/ha no Paraná e 2.755 kg/ha em Santa Catarina. Na região Centro-Oeste, embora a maior parte da lavoura seja irrigada, a produtividade ficou em 2.765 kg/ha, devido à baixa produtividade do Mato Grosso do Sul (1.900 kg/ha) e Goiás, acarretadas pela estiagem (CONAB, 2011).

Já na região Sudeste, a produtividade alcançou 2.943 kg/ha, devido a recuperação do Estado de São Paulo que perdeu quase toda a safra em 2009. A produtividade média geral foi de 2.736 kg/ha, superando em 32,2% a produtividade da safra passada que foi de 2.070 kg/ha. O aumento se deve a recuperação da produtividade no Paraná e em São Paulo que enfrentaram problemas climáticos na safra passada e o aumento em quase todos os Estados produtores, ficando a exceção com Minas Gerais e o Distrito Federal, que diminuíram a área das lavouras irrigadas (CONAB, 2011).

No Brasil, a produção anual oscila entre 5 e 6 milhões de toneladas. São cultivados nas regiões Sul (RS, SC e PR), Sudeste (MG e SP) e Centro-oeste (MS, GO e DF). O consumo anual no país tem se mantido em torno de 10 milhões de toneladas (Embrapa 2011). Após a produção, esses grãos apresentam diferentes destinos e estes podem ser comercializados para

alimentação animal, produtos integrais, sementes e fabricação de farinha, sendo este último o que obtém a melhor cotação no mercado. O consumo de trigo através da indústria se divide em panificação, uso doméstico, biscoitos, massas e outros.

A principal exigência dos moinhos para a produção da farinha que dá origem ao pão é justamente a qualidade do trigo. O famoso trigo utilizado no pão, usado para fabricar farinha e pães, é pouco produzido no País. A maior parte do trigo produzido no Brasil é o trigo brando, reconhecido pela qualidade menor e usado para a confecção de biscoitos e ração animal.

Os moinhos brasileiros, que há muito tempo importam trigo de qualidade de outros países, como Argentina, Uruguai, Paraguai e Estados Unidos, vêm sofrendo com alto custo na compra desses grãos. Com isso, atingindo valores 25% mais altos em 2011 quando comparado com anos anteriores (VARASHIN, 2011).

Entre as commodities, o trigo é o segundo item de maior participação na pauta de importações brasileiras, sendo menor apenas que a importação de petróleo. O Brasil importa em torno de 50-60% do trigo que consome. Em termos de comércio externo, as importações brasileiras na temporada 2010/11 chegaram a 6,5 milhões de toneladas (trigo e seus derivados), volume praticamente igual ao da temporada anterior (Tabelas 2.3 e 2.4) (VARASHIN, 2011).

Tabela 2.3 - Quantidade de grão de trigo importado pelo Brasil entre os anos de 2006 e 2011, em toneladas.

Origem	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11
Argentina	6.655.627	4.040.633	4.038.752	3.548.265	3.515.742
Paraguai	274.939	92.680	559.072	843.966	1.134.071
Uruguai	139.450	450.821	581.491	704.044	535.734
Canadá	8.855	864.895	419.228	319.426	382.442
EUA	85.179	477.929	78.111	450.970	230.373
Outros	0	9	14	64.916	65
Total	7.164.051	5.926.967	5.676.668	5.931.588	5.798.427

Fonte: Mdic/Secex/Sistema Alicew

Tabela 2.4 - Quantidade de farinha de trigo importada pelo Brasil entre os anos de 2006 e 2011, em toneladas.

Origem	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11
Argentina	419.362	694.187	589.344	573.405	635.418
Uruguai	24.720	27.174	38.618	34.535	36.011
Paraguai	683	953	4.912	4.519	10.145
EUA	843	1	0	-	84
Itália	343	106	84	105	277
Canadá	241	5	1	1.189	1.634
Reino unido	417	614	960	700	546
Outros	890	22	124	17	85
Total	447.498	723.062	634.043	614.470	684.199

Fonte: Mdic/Secex/Sistema Aliceweb

### 2.2.5 - Secagem de trigo

As lavouras de trigo podem ser colhidas antecipadamente, visando escapar de chuvas na maturação plena, evitando-se o problema de germinação na espiga, dentre outros. Nesse caso, para colheita com aproximadamente 20% de umidade, alguns cuidados devem ser tomados em relação à regulagem da colhedora, considerando que à medida que a colheita vai sendo processada, as condições de umidade do grão e da palha vão variando, necessitando assim de novas regulagens. Especificamente em relação ao trigo, o ponto de colheita inadequado (nível de umidade) e a secagem, sem o controle da temperatura no processo, levam a alterações indesejáveis na qualidade intrínseca dos grãos, prejudicando sua utilização na alimentação animal (OLIVEIRA, 2006).

O teor de umidade ideal para armazenar trigo colhido é da ordem de 13%. A secagem deste produto é uma operação crítica na sequência do processo de pós-colheita visto que o produto colhido com umidade superior à indicada para armazenamento deve ser submetido à secagem. Como consequência dela, podem ocorrer alterações significativas na qualidade do grão. Tal processo favorece um melhor planejamento da colheita, e o emprego mais eficiente de equipamentos e de mão de obra, mantendo a qualidade do trigo colhido. Em lotes com mais de 16% de umidade, sugere-se a secagem lenta para evitar danos físicos no grão. A

temperatura na massa de grãos de trigo nunca deve ultrapassar 60°C para manutenção da qualidade tecnológica do produto (EMBRAPA, 2011).

ELIAS et al. (2009) apresentaram um estudo envolvendo a umidade de colheita, métodos de secagem e tempo de armazenamento na qualidade tecnológica de grãos de trigo. Segundo os autores as amostras colhidas com umidade entre 16 e 18% foram submetidas à secagem artificial pelo método intermitente, com ar a 70°C; estacionário, com ar a 45°C; e estacionário, com ar sem aquecimento. Os grãos secos foram armazenados em sistema convencional, pelo período de 12 meses, com a realização de avaliações a cada quadrimestre. O trigo colhido seco na planta apresentou qualidade tecnológica inferior e menor conservabilidade ao armazenamento em comparação com o trigo colhido com umidade superior a 14% e seco em secador artificial.

DELIBERALI et al. (2010) reportaram sobre os efeitos do processo de secagem e tempo de armazenamento na qualidade tecnológica de trigo. De acordo com os autores, os parâmetros mais efetivos para avaliar o efeito dos processos de secagem de trigo intermitente e estacionário, em função do tempo de armazenamento, foram peso do hectolitro, lipídios e acidez graxa, indicando melhor qualidade tecnológica na secagem realizada em secador intermitente.

GONELI et al. (2007) fizeram um estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. Os mesmos concluíram que o modelo da difusão líquida representa satisfatoriamente a cinética de secagem dos grãos de trigo para as diversas condições de ar experimentadas. A inclusão da contração volumétrica dos grãos de trigo no modelo da difusão líquida foi insuficiente para melhorar o ajuste do modelo. O coeficiente de difusão aumenta com a elevação da temperatura do ar, apresentando valores de  $8,6775 \times 10^{-11}$  e  $42,8743 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  para a faixa de temperatura de 25°C a 55°C e considerando a contração volumétrica. A relação entre o coeficiente de difusão e a temperatura pode ser descrita pela expressão de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida nos grãos de trigo de 42,00 kJ/mol.

VAZQUEZ e VIZCARRA (2008) analisaram duas variedades de trigo, um de textura dura e glúten forte e outro de textura macia e de glúten fraco sendo estes secos num secador

de leite fluidizado. No início, a umidade de ambas as variedades de trigo foram ajustadas para 15 e 20% em base seca, e os grânulos foram secos a 40, 60, 70, 80 e 100 ° C até atingir um teor de umidade final entre 9 e 11%. Os resultados indicaram que a temperatura de secagem foi o parâmetro que apresentou um efeito significativo na qualidade do trigo. Em geral, ambas as variedades de trigo seco a 40, 60 e 70 ° C apresentaram características de qualidade similares nas respectivas temperaturas. A secagem nas temperaturas extremas de 80 e 100 ° C afetaram significativamente a qualidade do trigo. Em associação com os resultados obtidos os autores concluíram que o trigo duro e com textura de glúten forte eram mais resistentes ao tratamento térmico de secagem.

## CAPÍTULO 3

### APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Um modelo matemático consiste de um conjunto de equações que representam de uma forma quantitativa, as hipóteses que foram usadas na construção do modelo, as quais se apoiam sobre o sistema real (SODRÉ, 2007).

A seguir apresenta-se o modelo matemático baseado no método de Galerkin que descreve o comportamento de secagem de sólidos com forma arbitrária.

#### 3.1 - A equação de difusão e solução analítica

A partir da equação genérica de transporte para um volume de controle, tendo nulos o termo convectivo e o termo de geração da grandeza  $\Phi$ , obtém-se apenas a variação da grandeza dentro do volume de controle que ocorre unicamente por difusão. Sendo assim a equação passa a ser chamada de equação de difusão e é expressa por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^{\Phi} \nabla \Phi) \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1), tem-se no primeiro termo a variação temporal da grandeza sob estudo em um volume infinitesimal, sendo conhecido como termo transiente. Por outro lado, o

segundo termo, indica a variação da grandeza na unidade de tempo por difusão (termo difusivo).

Reescrevendo a Equação (3.1) em coordenadas cilíndricas, para o caso bidimensional, tem-se :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z}) \quad (3.2)$$

Para resolver-se a Equação (3.2) necessita-se de condições iniciais e de contorno. Neste caso, as condições iniciais e de contorno são dadas por:

a) condição inicial

$$\Phi = \Phi(r, z) \quad \text{para } t = 0 \quad (3.3)$$

b) condição de contorno

$$-\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial r} = h(\Phi - \Phi_e) \quad \text{na superfície do sólido para } t > 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{em } z = 0; \text{ para todo } t \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial r} = 0 \quad \text{em } r = 0; \text{ para todo } t \quad (3.6)$$

Segundo Payne et al. (1986), considerando o coeficiente de transporte  $\Gamma^\Phi$  e  $\lambda$  constantes, a solução da Equação (3.2) pode ser escrita como segue:

$$\Phi(r, z, t) = \sum_{n=1}^N C_n \psi_n(r, z) e^{-\gamma_n t} + \Phi_e \quad (3.7)$$

onde  $\Phi_e$  é a variável de interesse no equilíbrio,  $\psi_n(r, z)$  é a n-ésima autofunção,  $\gamma_n$  é o n-ésimo autovalor (independente da posição) e  $C_n$  é n-ésima constante a ser determinada. Por conveniência, assume-se que o sólido tem dimensões finitas.

Quando se substitui a Equação (3.7) na Equação (3.2), obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \sum_{n=1}^N C_n \psi_n(r, z) e^{-\gamma_n t} + \Phi_e \right] = \frac{\Gamma^\Phi}{\lambda} \nabla^2 \left[ \sum_{n=1}^N C_n \psi_n(r, z) e^{-\gamma_n t} + \Phi_e \right] \quad (3.8)$$

Considerando  $C_n, \gamma_n,$  e  $\Phi_e$  constantes e  $\psi_n(r, z)$  independente do tempo, pode-se escrever:

$$\sum_{n=1}^N C_n \psi_n(r, z) \frac{\partial}{\partial t} (e^{-\gamma_n t}) = \frac{\Gamma^\Phi}{\lambda} \sum_{n=1}^N C_n e^{-\gamma_n t} \nabla^2 \psi_n(r, z) \quad (3.9)$$

Desenvolvendo a derivada parcial do primeiro membro da Equação (3.9), pode-se escrever:

$$\sum_{n=1}^N C_n \psi_n(r, z) (-\gamma_n) e^{-\gamma_n t} = \frac{\Gamma^\Phi}{\lambda} \sum_{n=1}^N C_n e^{-\gamma_n t} \nabla^2 \psi_n(r, z) \quad (3.10)$$

Colocando os termos comuns da Equação (3.10) em evidência, obtém-se:

$$\left[ \sum_{n=1}^N \gamma_n \psi_n(r, z) + \frac{\Gamma^\Phi}{\lambda} \nabla^2 \psi_n(r, z) \right] C_n e^{-\gamma_n t} = 0 \quad (3.11)$$

Como não se está interessado numa solução trivial que seria  $C_n$  igual a zero, e por saber que, sendo  $t \geq 0$ , a exponencial jamais terá valor nulo, tem-se que a solução procurada é obtida pela resolução da equação:

$$\sum_{n=1}^N \left[ \frac{\Gamma^\Phi}{\lambda} \nabla^2 \psi_n(r, z) + \gamma_n \psi_n(r, z) \right] = 0 \quad (3.12)$$

A função  $\psi_n(\mathbf{r}, z)$  é obtida como uma combinação linear de um conjunto de funções (LIMA et al., 2004). Seus membros são linearmente independentes, de maneira que a condição de contorno na superfície do sólido imposta seja satisfeita. Esta função é dada por:

$$\psi_n(\mathbf{r}, z) = \sum_{j=1}^N d_{nj} f_j(\mathbf{r}, z) \quad (3.13)$$

onde a função  $f_j(\mathbf{r}, z)$  é um elemento de um conjunto de funções de base e, com  $j$  variando de 1 até  $N$ , tem-se um conjunto dessas funções. Esta função é chamada função de Galerkin e é obtida pela multiplicação de diversas funções  $\Phi_i(\mathbf{r}, z)$  que representam a superfície do corpo. Os parametros  $d_{nj}$  são constantes a serem determinadas.

Um conjunto adequado e selecionado de funções de base é um conjunto em que os seus membros são linearmente independentes, que satisfazem as condições de contorno homogêneas e que todos os seus pontos não se tornem zero no interior da região delimitada pelas funções de contorno.

Substituindo a Equação (3.13) na Equação (3.12), tem-se:

$$\sum_{j=1}^N d_{nj} \left[ \sum_{n=1}^N \frac{\Gamma^\Phi}{\lambda} \nabla^2 f_j(\mathbf{r}, z) + \gamma_n f_j(\mathbf{r}, z) \right] = 0 \quad (3.14)$$

Aplicando-se o método de Galerkin que consiste em multiplicar ambos os membros da equação (3.14) por  $f_i dV$  e integrar sobre o volume do sólido (KANTOROVICH e KRYLOV, 1960), obtém-se:

$$\int_v \sum_{j=1}^N d_{nj} \left[ \frac{\Gamma^\Phi}{\lambda} \nabla^2 f_j(\mathbf{r}, z) + \gamma_n f_j(\mathbf{r}, z) \right] f_i dV = 0 \quad (3.15)$$

Escrevendo de outra maneira a Equação (3.15), obtém-se:

$$\sum_{j=1}^N d_{nj} \left[ \frac{1}{v} \int_v \frac{\Gamma^\Phi}{\lambda} f_i \nabla^2 f_j(r, z) dv + \gamma_n \frac{1}{v} \int_v f_i(r, z) f_j(r, z) dv \right] = 0 \quad (3.16)$$

Na forma matricial pode-se reescrever a Equação (3.16) por:

$$(\bar{A} + \gamma_n \bar{B}) \bar{d}_n = 0 \quad (3.17)$$

onde  $\bar{A}$  e  $\bar{B}$  são matrizes quadradas de  $N \times N$  elementos.

Os elementos das matrizes  $\bar{A}$  e  $\bar{B}$  são calculados através das seguintes equações:

$$a_{ij} = \left[ \frac{1}{v} \int_v f_i(r, z) \nabla^2 f_j(r, z) dv \right] \left( \frac{\Gamma^\Phi}{\lambda} \right) \quad (3.18)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{v} \int_v f_i(r, z) f_j(r, z) dv \quad (3.19)$$

Os elementos do vetor  $\bar{d}_n$  que aparece na Equação (3.17) são exatamente os coeficientes  $d_{n1}, d_{n2}, \dots, d_{nN}$  que aparecem na Equação (3.13). Observa-se que a matriz  $\bar{B}$  é simétrica, isto é,  $b_{ij} = b_{ji}$ . A matriz  $\bar{A}$  também é simétrica. A partir da resolução da Equação (3.17) obtêm-se os coeficientes  $\gamma_n$  e  $d_{nj}$ .

Por outro lado partindo da regra da cadeia tem-se

$$\nabla \cdot (pv) = p \nabla \cdot v + \nabla p \cdot v \quad (3.20)$$

ou

$$p \nabla \cdot v = \nabla \cdot (pv) - \nabla p \cdot v \quad (3.21)$$

Fazendo  $\nabla f_i = v$  e  $p = \Gamma^\Phi$  obtem-se :

$$f_i \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla f_j) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi v) - \nabla (\Gamma^\Phi v) \quad (3.22)$$

Integrando ambos os membros encontra-se a identidade para aplicar as condições de contorno. Assim,

$$\int_V f_i \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla f_j) dV = \int_V \nabla \cdot (\Gamma^\Phi f_i \nabla f_j) dV - \int_V \Gamma^\Phi \nabla f_i \cdot \nabla f_j dV \quad (3.23)$$

Considerando  $\Gamma^\Phi$  constante, pode-se escrever:

$$\int_V f_i \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla f_j) dV = \int_S \Gamma^\Phi f_i \nabla f_j \cdot \vec{n} \cdot d\vec{S} - \int_V \Gamma^\Phi \nabla f_i \cdot \nabla f_j dV \quad (3.24)$$

ou ainda,

$$\int_V f_i \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla f_j) dV = \int_S \Gamma^\Phi f_i \left( \frac{\partial f_j}{\partial n} \right) dS - \int_V \Gamma^\Phi \nabla f_i \cdot \nabla f_j dV \quad (3.25)$$

Ao tratar-se de condições homogêneas de 1ª espécie ( $\Phi$  prescrito) tem-se que  $f_j = 0$  e para as condições homogêneas de 2ª espécie (fluxo de umidade prescrito) tem-se que  $\partial f_j / \partial n = 0$ . Assim, o primeiro termo do segundo membro da Equação (3.25) é zero e o segundo termo é sempre simétrico.

Para as condições de contorno homogêneas de 3ª espécie (convectivo) faz-se uso da Equação (3.4), onde as matrizes  $\bar{A}$  e  $\bar{B}$  obtidas com essa condição de contorno também são simétricas. Nesta última condição de contorno tem-se  $-\Gamma^\Phi \partial f_j / \partial n = hf_j$ .

Para obtenção dos coeficientes  $C_n$  da Equação (3.7), usa-se a condição inicial em  $t = 0$ . Neste caso,  $\Phi = \Phi_0$ , com isso obtêm-se a equação:

$$\Phi_0 = \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n + \Phi_e \quad (3.26)$$

Usando mais uma vez o procedimento de Galerkin, multiplicando a Equação (3.26) por  $f_i dV$  e integrando sobre o volume (KANTOROVICH e KRYLOV, 1960), obtém-se:

$$\int_V f_i (\Phi_0 - \Phi_e) dV = \int_V f_i \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n dV \quad (3.27)$$

A solução da Equação (3.27) será um conjunto de  $N$  equações algébricas lineares que permitirá encontrar os  $C_n$  e assim completando a solução do problema. O valor médio da grandeza de interesse,  $\bar{\Phi}$ , do sólido é dado por:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{V} \int_V \Phi dV \quad (3.28)$$

onde  $V$  é o volume do sólido em estudo.

### 3.2 - Modelagem da transferência de calor e de massa

Um considerável número de pesquisas em transferência de calor e massa tem sido realizada por vários pesquisadores, devido a sua grande aplicação em processos industriais. Do estudo da literatura, é aparente que somente considerações geométricas limitadas a placas, cilindros e esferas tenham sido usadas para resolver problemas de difusão, existindo, portanto, poucos estudos científicos aplicados a geometrias arbitrárias. É por este motivo que este trabalho se propõe a *descrever o processo de secagem de sólidos com forma arbitrária*, direcionando o estudo para o processamento de alimentos, especificamente para grãos (trigo).

Para modelar o processo de secagem de sólidos com forma arbitrária, as seguintes considerações foram adotadas:

- (a) O sólido é homogêneo e isotrópico;
- (b) A distribuição de umidade no interior do sólido é uniforme no início do processo;
- (c) As propriedades termofísicas são constantes durante todo o processo;
- (d) O sólido é constituído de matéria seca e água na fase líquida;
- (e) O fenômeno de secagem ocorre por difusão de água no interior do sólido e por evaporação da água na superfície do mesmo.

### 3.2.1 - Modelagem da transferência de massa

O processo de difusão transiente de massa e calor em sólidos com forma arbitrária pode ser descrito através da equação geral de difusão representando a Lei de Fick para transferência de massa e a Lei de Fourier para transferência de calor.

Baseando-se na teoria da difusão líquida, que enuncia que a movimentação de líquido dentro de um sólido poroso tem como principal agente a existência de um gradiente de concentração de umidade, a segunda Lei de Fick, Equação (3.29), vem sendo utilizada como modelo matemático na descrição de tal fenômeno (BROOKER et al., 1992).

Para descrever o transporte de massa no interior de sólidos com geometria arbitrária, considera-se na Equação (3.1),  $\lambda = 1$ ,  $\Gamma^\Phi = D$ ,  $\Phi = M$  e  $h = h_m$ , e obtém-se a equação da difusão de massa no regime transiente, sem geração de energia (Lei de Fick) como segue:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (3.29)$$

onde  $M$  é o teor de umidade no volume de controle, num instante  $t$ ,  $D$  é a difusividade de massa e  $h_m$  é o coeficiente de transferência de massa convectiva.

Deve-se observar que o termo entre parênteses no segundo membro da Equação (3.29), possibilita definir a taxa de difusão de água por unidade de área (fluxo de água em relação a um determinado referencial), o que é conhecido como primeira lei de Fick (INCROPERA e DEWITT, 1992):

$$\vec{J} = -\rho D \nabla M \quad (3.30)$$

onde  $\rho$  é a densidade do corpo e  $\vec{J}$  é o fluxo de água dado em  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ .

Sendo assim, a solução da Equação (3.29) é a Equação (3.7), substituindo  $\Phi$  por  $M$ .

O valor médio do teor de umidade do sólido, de acordo com a Equação (3.28) é dado por:

$$\bar{M} = \frac{1}{V} \int_V M dV \quad (3.31)$$

onde  $V$  é o volume do sólido em estudo.

### 3.2.2 - Modelagem da transferência de calor

O transporte de calor no interior de sólidos com geometria arbitrária será descrito, considerado-se na Equação (3.1),  $\lambda = \rho c_p$ ,  $\Gamma^\phi = k$ ,  $\Phi = T$  e  $h = h_c$ . Dessa forma, obtém-se a equação da difusão de calor no regime transiente, sem geração de energia (Lei de Fourier) como segue:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.32)$$

onde  $T$  é a temperatura;  $\rho$  é a densidade do meio,  $c_p$  é o calor específico à pressão constante, e  $k$  é a condutividade térmica do meio. O parâmetro  $h_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Na Equação (3.32), a variável dependente é a temperatura, enquanto que a grandeza transportada (caracterizada pela variável dependente) é a energia interna no volume de controle. O termo entre parênteses no segundo membro da Equação (3.32) é a taxa de transferência de calor por unidade de área perpendicular à direção de transferência (fluxo de calor) (KEEY, 1992; INCROPERA e DEWITT, 1992):

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (3.33)$$

dado, no sistema internacional de unidades, em  $J/(s.m^2)$  ou  $W/m^2$ .

Considerando  $\rho$  e  $c_p$  constantes, a Equação (3.32) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla T) \quad (3.34)$$

onde  $\alpha = k/(\rho c_p)$  é denominado difusividade térmica.

A solução da Equação (3.34) é a Equação (3.7), substituindo  $\Phi$  por  $T$ .

De acordo com a Equação (3.28), o valor médio da temperatura no interior do sólido será dado por:

$$\bar{T} = \frac{1}{V} \int_V T dv \quad (3.35)$$

### 3.3 - Geometria do problema

Os trabalhos disponíveis na literatura, em sua grande maioria, utilizam uma geometria simplificada para os grãos. Neste trabalho considerou-se um esferóide prolato cuja geometria assemelha-se a do trigo considerando propriedades termo-físicas constantes e utilizando as condições de contorno de 1ª, 2ª e 3ª espécies, como mostrado na Figura (3.1):

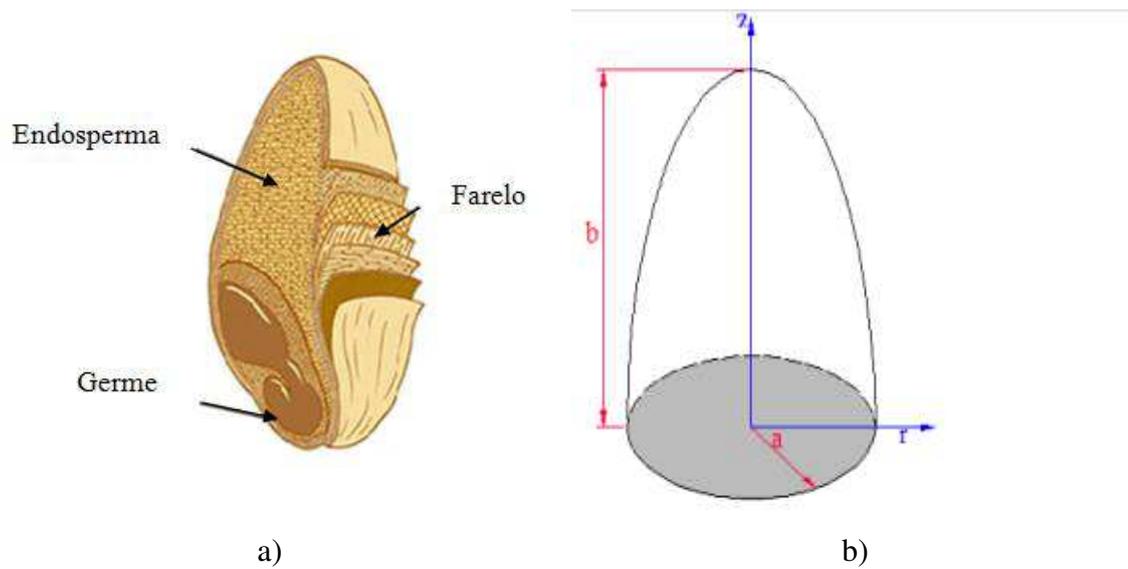


Figura 3.1- a) grão de trigo e b) representação geométrica esferóide prolato e suas características

O contorno do esferoide é definido por:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (3.36)$$

Desde que  $x^2 + y^2 = r^2$  (sólido de revolução) pode-se escrever:

$$z = b\sqrt{1 - (r/a)^2} \quad (3.37)$$

Neste caso o volume do sólido que é ilustrado na Figura 3.1 é dado por:

$$v = \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/b^2)}} r dz dr d\theta \quad (3.38)$$

ou ainda:

$$v = \frac{2}{3} \pi a^2 b \quad (3.39)$$

Portanto, usando as Equações (3.18) e (3.19), pode-se escrever:

$$a_{ij} = \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/b^2)}} f_i \nabla(D\nabla f_j) r dz dr d\theta \quad (3.40)$$

e

$$b_{ij} = \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-r^2/b^2}} f_i f_j r dz dr d\theta \quad (3.41)$$

Os valores de  $C_n$  para esferóide prolato são calculados através da seguinte equação:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-r^2/b^2}} f_i (M_0 - M_e) r dz dr d\theta = \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-r^2/b^2}} f_i \sum_{n=1}^n C_n \Psi_n r dz dr d\theta \quad (3.42)$$

Assim um conjunto de funções de base de 1ª espécie é definido, por exemplo, como segue:

$$f_j^1 = f_1 r^{m_j} z^{n_j} \quad (3.43)$$

Sendo,  $j = 0, 1, 2, 3, \dots$ ,  $m_j = 0, 2, 4, 6 \dots$  e  $n_j = 0, 2, 4, 6 \dots$  Para esferóide prolato,

$$\Phi_1 = 1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} \quad (3.44)$$

e

$$f_1 = \Phi_1 \quad (3.45)$$

As funções de base de segunda espécie são definidas por (BECK et al., 1992):

$$f_j^{(2)} = f_j^{(1)} (\Phi_1 H - 1) \quad (3.46)$$

Em que:

$$H = \frac{\nabla f_j^{(1)} \cdot \nabla \Phi_1}{f_j^{(1)} \cdot \nabla \Phi_1 \cdot \nabla \Phi_1} \Big|_{\Phi_1=0} \quad (3.47)$$

As funções de base de 3ª espécie são definidas por (BECK et al., 1992):

$$f_j^{(3)} = f_j^{(2)} \left( \Phi_1 H - \frac{D}{H} \right) \quad (3.48)$$

onde,

$$H = \frac{1}{\frac{\partial \Phi_1}{\partial \vec{n}}} \quad (3.49)$$

### 3.4 - Aplicações da metodologia - secagem de grãos de trigo

A equação de difusão requer o conhecimento prévio de algumas propriedades físicas do grão de trigo para transferência de calor e massa, conhecimentos estes reportados por FORTES et al.(1981) e LIMA (1999). Na Tabela 3.1 apresenta-se os dados usados nas simulações.

Tabela 3.1 - Condições do ar de secagem e do trigo

Ar de secagem			Trigo					
T (°C)	UR (%)	v (m/s)	a (cm)	b (cm)	M <sub>o</sub> (b.s)	M <sub>e</sub> (b.s)	θ <sub>e</sub> (°C)	θ <sub>o</sub> (°C)
87,8	5,6	1,71	0,1575	0,3276	0,2110	0,0165	87,8	26,0
67,5	13,3	1,61	0,1575	0,3276	0,256	0,0362	67,5	26,0
47,0	33,8	1,50	0,1575	0,3276	0,2110	0,0786	47,0	26,0

As propriedades termofísicas do grão de trigo e parâmetros do processo esta apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - parâmetros termofísicos usado nas simulações.

T(°C)	Parâmetros físicos				
	K (W/mk)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	C <sub>p</sub> (J/kgK)	hc (W/m <sup>2</sup> K)	hm (m/s)
87,8	0,136689	790,0	2106,63	129,413	$9,0 \times 10^{-7}$
67,5	0,140032	790,0	2223,763	82,9425	$1,03823 \times 10^{-6}$
47,0	0,136689	790,0	2106,63	80,1527	$8,89313 \times 10^{-7}$

Fonte: LIMA (1999) e FORTES (1981).

Para determinação do coeficiente de difusão de massa utilizou-se a seguinte equação matemática proposta por Fioreze et al. (1986)

$$D = 0,543\bar{M}^{(-2,8554e-5*T_a+1,6432)} \exp\left[(0,4113T_a - 30,2634)\bar{M} + (0,022776T_a - 9,7271)\right] \quad (3.50)$$

Os coeficientes de difusão de massa foram obtidos de três formas diferentes:

a) Calculado utilizando-se o teor de umidade inicial ( $M_0$ ). Neste caso obteve-se:

$$D_1 = 1,17277 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}.$$

b) Calculado utilizando-se a média aritmética dos teores de umidade inicial e de equilíbrio como segue:

$$\bar{M} = \frac{M_0 + M_e}{2} \quad (3.51)$$

dado como resultado:

$$D_2 = 2,40958 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{h}.$$

c) Calculado utilizando-se o valor médio dos teores de umidade e de equilíbrio dado por :

$$\bar{D}(\bar{M}) = \frac{1}{\Delta M} \int_{M_e}^{M_0} D(\bar{M}) d\bar{M} \quad (3.52)$$

cujo resultado foi:

$$D_3 = 3,53755 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{h} \text{ para } T = 87,8^\circ\text{C}.$$

$$D_3 = 2,06281 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{h} \text{ para } T = 67,5^\circ\text{C}.$$

$$D_3 = 9,00434 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{h} \text{ para } T = 47^\circ\text{C}.$$

Para determinação dos coeficientes convectivos de transferência de calor e massa utilizou-se as seguintes relações proposta por (FORTES et al. 1981):

$$h_m = \frac{D_{\text{atm}}}{RT_{\text{abs}} d_p} \left[ 2.0 + 0.6 \text{Re}^{1/2} \text{Sc}^{1/3} \right] \quad (3.53)$$

$$h_c = \frac{k_a}{d_p} \left[ 2.0 + 0.6 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \right] \quad (3.54)$$

onde os números de Reynolds, Schmidt e Prandtl foram calculados utilizando-se as seguintes relações:

$$\text{Re} = \frac{\rho v d_p}{\mu} \quad \text{Sc} = \frac{\left( \frac{\mu}{\rho} \right)}{D_{\text{atm}}} \quad \text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k}$$

Para se ter uma boa ideia dos parâmetros de processo usados na secagem do grão de trigo, a Tabela 3.3 resume os diversos parâmetros termofísicos usados nas simulações.

Tabela 3.3 - Parâmetros termofísicos

T(°C)	Parâmetros termofísicos
-------	-------------------------

	D(m <sup>2</sup> /h)	hm (m/s)	α (m/s)	hc (W/m <sup>2</sup> k)	α/D
87,8	3,53755×10 <sup>-7</sup>	9,0×10 <sup>-7</sup>	8,4376×10 <sup>-8</sup>	129,413	858,65
67,5	2,06281×10 <sup>-7</sup>	1,03823×10 <sup>-6</sup>	8,17444×10 <sup>-8</sup>	82,9425	1426,59
47,0	9,00434×10 <sup>-8</sup>	8,89313×10 <sup>-7</sup>	8,4376×10 <sup>-8</sup>	80,1527	3373,41

De acordo com a tabela 3.3 percebe-se que à medida que o coeficiente de difusão diminuía a relação  $\alpha/D$  aumentava devido a difusividade térmica do grão ser superior a difusividade de massa. Baseando-se ainda na Tabela 3.3 foi possível perceber que com o decréscimo da temperatura os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa apresentaram características idênticas (decréscimos).

Para simular efetivamente a secagem de um sólido com geometria arbitrária (esferóide prolato), realizada no Laboratório de Térmica e Fluidos, LCTF, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica do CCT /UFCG, foi desenvolvido um código computacional na plataforma Mathematica® 7.0. (WOLFRAM, 2009). Os resultados foram expostos na forma gráfica, utilizando os “softwares” Grapher e Surfer.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 - Comentários iniciais

Neste capítulo apresentam-se alguns resultados da cinética de secagem e distribuições de temperatura e teor de umidade no interior do sólido obtidos através da solução analítica da equação diferencial de difusão que descreve o problema físico de secagem, com particular referência para a geometria esferoidal prolata. De maneira a validar a metodologia, alguns resultados são comparados com dados teóricos e experimentais reportados na literatura.

#### 4.2 - Validação da solução analítica

As Figuras (4.1) e (4.2), foram utilizadas para validar a metodologia e os resultados obtidos no presente trabalho, ilustram a cinética de secagem no interior de um esferóide prolato em termos do teor de umidade adimensional em função do número de Fourier, para dois números de Biot ( $B_1 = \frac{h_m a}{D} = 0,50$  e  $4,00$ ), considerando condições de contorno de terceira espécie (convecção). Analisando as figuras, é possível identificar nos dois casos, uma excelente aproximação dos resultados obtidos neste trabalho com aqueles reportados por HAJI-SHEIKH e LAKSHMINARAYANAN (1987) para um esferóide prolato de razão de aspecto  $b/a = 2,00$  em dois pontos sobre a linha de simetria com coordenadas ( $r = 0; z = 0$ ) e ( $r = 0; z = 2$ ), comprovando assim, a coerência dos resultados obtidos no presente trabalho.

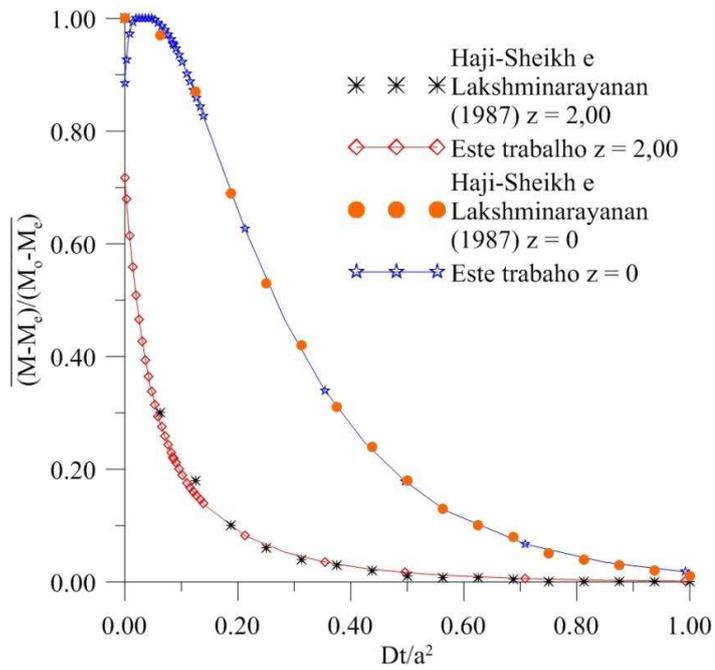


Figura 4.1 - Comparação entre resultados do teor de umidade no centro de um esferóide prolato com razão de aspecto de 2,00 para número de  $Bi = (h\alpha)/D = 4,00$  sobre a linha de simetria ( $r = 0$ ), obtidos neste trabalho e os reportados na literatura (analítico).

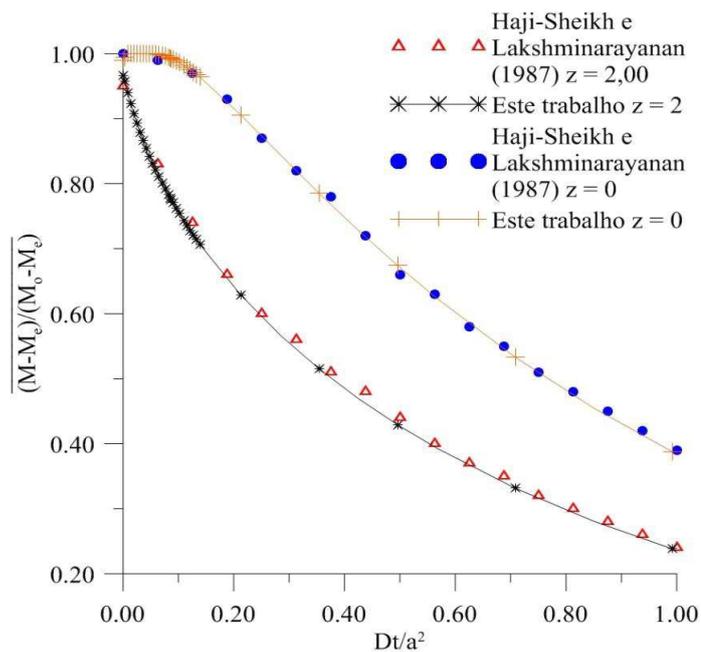


Figura 4.2 - Comparação entre os resultados do teor de umidade no centro de um esferóide prolato com razão de aspecto de 2,00 para  $Bi = 0,50$  sobre a linha de simetria ( $r = 0$ ), obtidos neste trabalho e os reportados na literatura (analítico).

Baseando-se nas Figuras (4.1) e (4.2) observa-se que, à medida que o número de Fourier aumenta, há uma queda nos níveis do teor de umidade, e que com o aumento do número de Biot, o processo de secagem é muito mais rápido.

Para validação do modelo analítico utilizaram-se também os dados numéricos do teor de umidade e temperatura de grãos de arroz fornecidos por SILVA et al. (2012). As condições do ar de secagem foram  $T=35^{\circ}\text{C}$  e  $UR = 67\%$  e condições de contorno de 1° espécie. (equilíbrio na superfície) A temperatura inicial do produto foi  $T_0=25^{\circ}\text{C}$ . Para se determinar o coeficiente de difusão mássica (D) em função da temperatura, foi utilizada a relação de Arrhenius citadas por STEFFE e SINGH (1980) onde os parâmetros A e B foram determinados, utilizando o *software Statistica*® através de um ajuste aos dados experimentais, reportados por este mesmo autor. A equação é como segue:

$$D = A \exp\left(\frac{B}{T_A}\right) \quad (4.1)$$

onde  $A = 1,2609$ ;  $B = -5385,9$ . Outros dados físicos utilizados foram o calor específico ( $c_p = 1916,4 \text{ J/kg.K}$ ), a condutividade térmica ( $k = 0,11042 \text{ W/(m.K)}$ ), a densidade ( $\rho = 658,75 \text{ kg/m}^3$ ), as dimensões do grão ( $a = 1,25 \text{ mm}$ ;  $b = 4,61 \text{ mm}$ ), e os teores de umidade inicial e final do grão de arroz ( $M_i = 0,3100 \text{ (b.s)}$  e  $M_e = 0,1359 \text{ (b.s)}$ ).

A Figura (4.3) foi utilizada para validar a metodologia e os resultados obtidos no presente trabalho, ilustra a cinética de secagem no esferóide prolato em termos do teor de umidade adimensional em função do tempo.

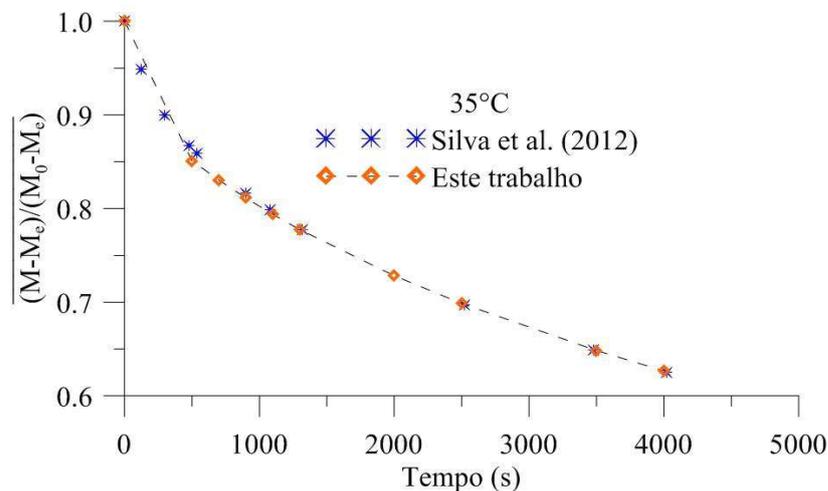


Figura 4.3 - Comparação entre os resultados do teor médio de umidade médio adimensional do grão de arroz em função do tempo, obtidos na literatura (numérico,  $T=35^{\circ}\text{C}$ ).

A Figura (4.4) foi utilizada para validar a metodologia e os resultados obtidos no presente trabalho, ilustra a cinética de aquecimento no esferóide prolato em termos da temperatura média adimensional em função do tempo.

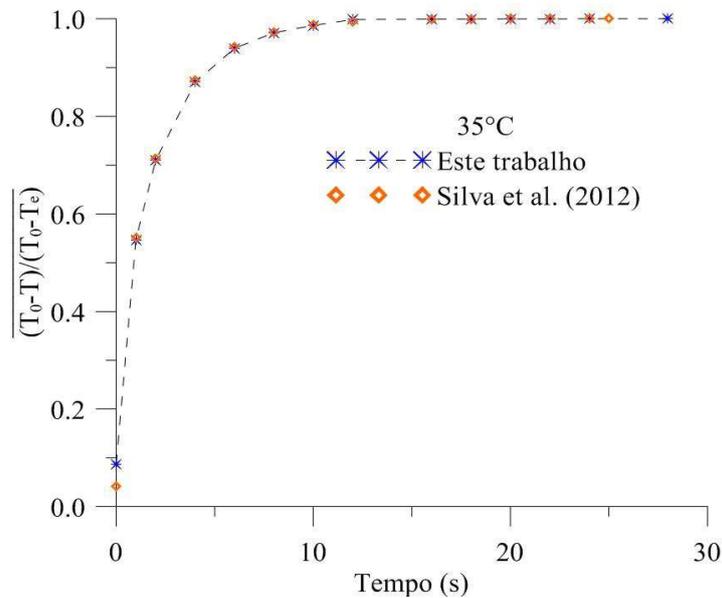


Figura 4.4 - Comparação entre os resultados da temperatura média adimensional do grão de arroz em função do tempo, obtidos neste trabalho e os reportados na literatura. (numérico, T = 35°C).

Observa-se nas Figuras (4.3) e (4.4) que os resultados analíticos do teor de umidade e temperatura no grão de arroz apresentaram excelente concordância com os valores numéricos reportado por SILVA et al. (2012).

### 4.3 Aplicação a secagem de grãos de trigos

Após verificar a validação da metodologia para a geometria esferoidal prolata realizou-se procedimentos idênticos utilizando dados específicos do grão de trigo para transferência de calor e massa, tendo em vista que este é um sólido que possui geometria muito semelhante a um esferóide prolato. A fim de explicar o comportamento do teor de umidade e temperatura desse sólido em função do tempo, dividiram-se os resultados em dois grupos: o primeiro relativo à cinética de secagem e aquecimento do sólido e o segundo referente aos perfis do teor umidade e temperatura no interior do sólido em vários instantes da secagem.

#### 4.3.1 Transferência de massa no grão de trigo

A Figura 4.5 ilustra os resultados obtidos no presente trabalho utilizando os dados específicos do trigo para transferência de massa com condição de contorno convectiva (T=87,8°C). Para a validação destes resultados fez-se uma comparação dos resultados obtidos

do teor de umidade médio com os dados experimentais de FORTES et al. (1981) juntamente com os dados numéricos de LIMA (1999), considerando os três casos analíticos com difusividades de massa diferentes, conforme descrito no capítulo anterior.

Para o caso analítico 1, o valor da difusividade de massa foi calculada com o teor de umidade inicial ( $M_0$ ). Já para o caso analítico 2, fez-se uso da média aritmética entre o teor de umidade inicial ( $M_0$ ) e o teor de umidade de equilíbrio ( $M_e$ ). Já para o caso analítico 3, a difusividade de massa foi calculada através do valor médio baseado no teor de umidade inicial e de equilíbrio, na temperatura do ar de secagem já mencionada acima. As condições de trabalho estão reportadas na tabela 3.1 e 3.2.

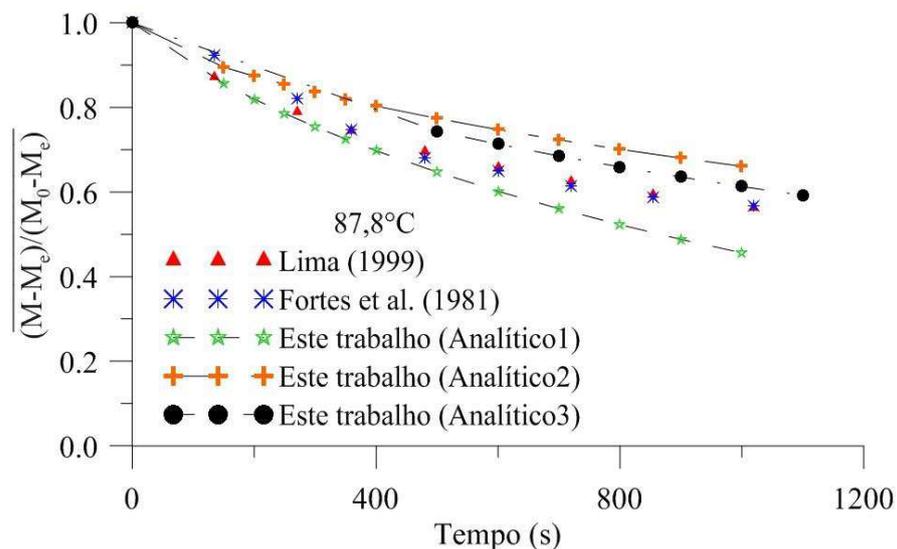


Figura 4.5 - Comparação entre resultados do teor de umidade médio adimensional do grão de trigo em função do tempo obtidos neste trabalho e os reportados na literatura (numérico e experimental,  $T=87,8^\circ\text{C}$ ).

Baseado na abordagem feita para o referente trabalho, ao observar o gráfico de cinética de secagem, torna-se perceptível que, com o caso analítico 3, obteve-se os melhores resultados. Verificou-se que, quanto maior é o coeficiente de difusão de massa do sólido, menor será o tempo de secagem, ou seja, o processo de secagem torna-se mais rápido, fixado o coeficiente de transferência de massa convectivo. Vale ressaltar que estes resultados estão na forma adimensional e independem do teor de umidade inicial.

Tendo em vista que os resultados obtidos para a cinética de secagem nas condições do ar fornecido apresentaram-se coerentes, pode-se utilizar os mesmos para obter a distribuição do teor de umidade no intuito de verificar a evolução do processo de secagem.

A Figura 4.6 representa a distribuição do teor de umidade adimensional para quatro tempos distintos (500 s, 1000 s, 2000 s e 4000 s) usando o coeficiente de difusão  $D_3 = 3,53755 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{h}$  (caso analítico 3). Como o processo de secagem para transferência de massa ocorre muito mais lento em relação à transferência de calor, o tempo para o grão atingir o equilíbrio torna-se bem mais elevado.

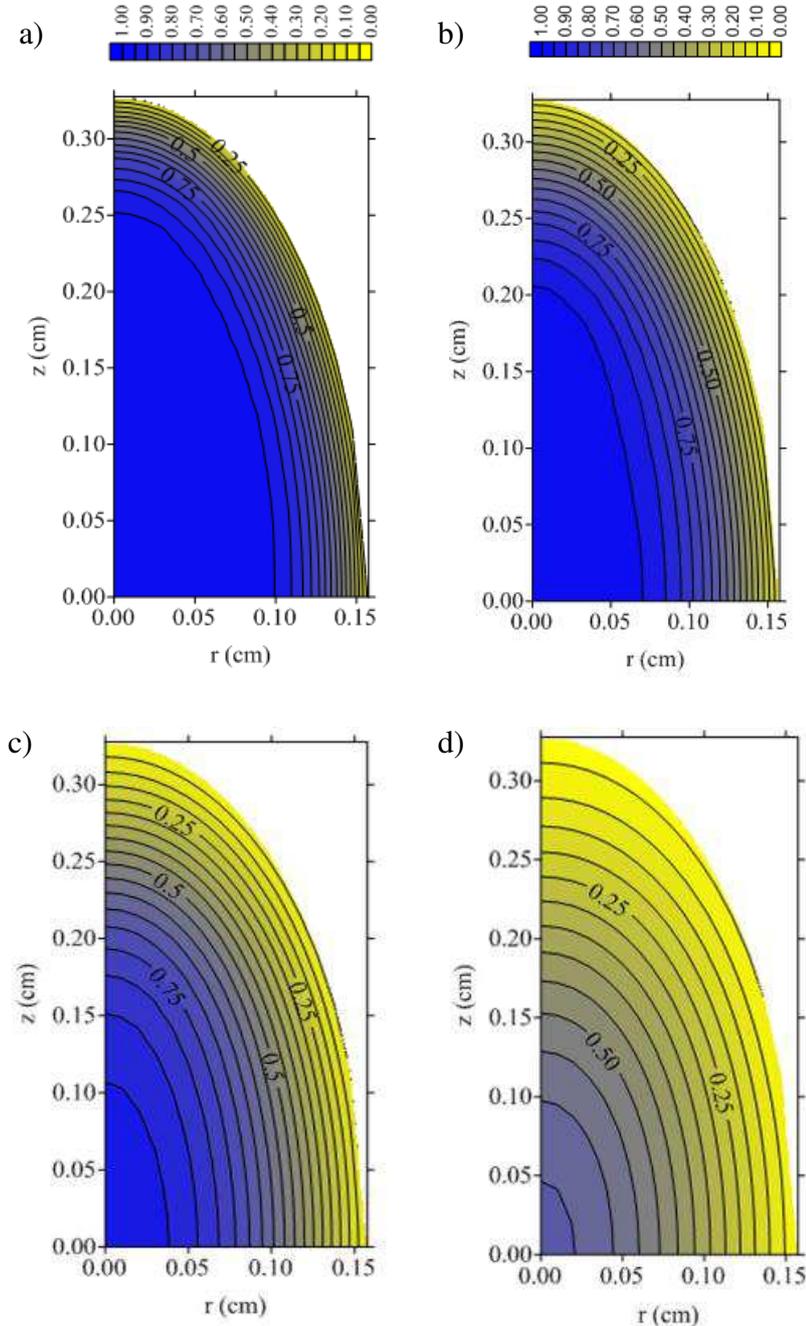


Figura 4.6 - Distribuição do teor de umidade adimensional para o grão de trigo em quatro tempos diferentes: a)  $t = 500 \text{ s}$  ( $Fo = 0,01981$ ), b)  $t = 1000 \text{ s}$  ( $Fo = 0,03962$ ), c)  $t = 2000 \text{ s}$  ( $Fo = 0,07925$ ) e d)  $t = 4000 \text{ s}$  ( $Fo = 0,15849$ ) ( $T=87,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Com base na Figura 4.6, nota-se a presença de linhas de iso-concentração, que tem a mesma forma do esferóide prolatado. Evidencia-se ainda que a movimentação de líquido se processa de dentro para fora do esferóide, ou seja, o fluxo de umidade durante o processo de secagem ocorre do centro do grão de trigo para a superfície do mesmo.

Analisando a distribuição de umidade dentro do grão de trigo nos intervalos de tempo de 500 s, 1000 s, 2000 s e 4000 s, observa-se que o teor de umidade no interior do trigo em todos os instantes verificados, ocorre de forma não-homogênea. De forma específica com relação ao tempo de 4000 s, nota-se que o teor de umidade do grão está próximo de atingir a umidade de equilíbrio, isto é, a secagem do sólido encontra-se quase completa. Quanto maior for o tempo de secagem, menor será a presença de gradientes de umidade no sólido e desta forma tem-se uma taxa de secagem mais lenta, tendendo para zero.

Após a análise da secagem a 87,8°C, fez estudo da secagem a 67,5 e 47°C. A Figura 4.7 ilustra uma comparação entre os resultados de cinéticas de secagem do grão de trigo obtidos nesta pesquisa e dados experimentais do grão de trigo reportados por FORTES et al. (1981), onde, a difusividade de massa foi calculada com temperatura do ar de secagem de 67,5 °C e através do valor médio baseado no teor de umidade inicial e de equilíbrio (caso analítico 3).

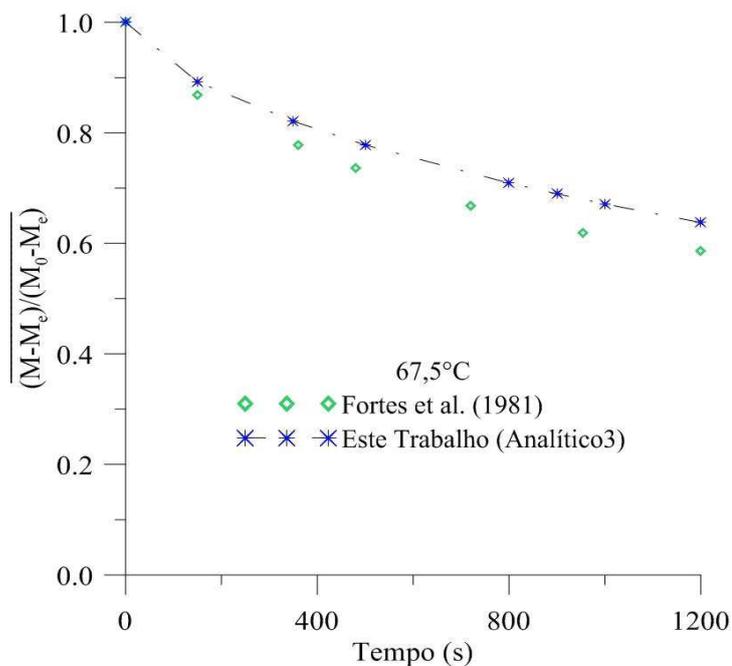


Figura 4.7 - Comparação entre os resultados do teor de umidade médio adimensional do grão de trigo em função do tempo, obtidos neste trabalho e reportado na literatura (experimental, T=67,5°C).

De acordo com a Figura 4.7, pode-se observar que a cinética de secagem é mais lenta para temperaturas menores do ar de secagem, o que possibilita alteração no teor de umidade de forma a atingir o teor de umidade comercial num maior tempo de secagem, não otimizando o processo de secagem do grão de trigo. Contudo vale salientar que temperaturas elevadas podem gerar danos ao produto afetando sua estabilidade biológica.

Verificou-se ainda que ao diminuir-se o coeficiente de difusão e o coeficiente convectivo de transferência de massa, o processo de secagem torna-se mais lento. Uma outra observação verificada é quanto ao erro obtido na comparação. Verifica-se que há certa discrepância entre os resultados, possivelmente devido a consideração do coeficiente de difusão constante adotado nesta pesquisa. Na prática, este parâmetro varia com a temperatura e teor de umidade do grão.

Segundo CARMO (2004) e OLIVEIRA (2006), o modelo que considera o fluxo de calor e massa acoplados resultam em um aquecimento mais lento para o sólido. Tais modelos podem ser usados para determinar o efeito da mudança de certos parâmetros na eficiência da secagem ou para minimizar os custos de operação do sistema.

Nestas circunstâncias, se o modelo considerar a difusividade de massa dependente da temperatura do sólido, o acoplamento entre calor e massa também apresentará considerada influência nos resultados da cinética de secagem. Assim, todos os trabalhos citados que usam os modelos concentrados supõem que o sólido é homogêneo, o que é irreal. No entanto, argumenta-se que não existe uma teoria satisfatória que permita predizer com boa exatidão a resistência térmica de contato, nem estudos que forneçam correlações empíricas perfeitamente confiáveis.

De acordo com BROOKER et al. (1992) e PARK et al. (2007), o modelo que considera apenas a difusão líquida é uma simplificação para o movimento migratório da água no interior do sólido. Esse modelo, apesar de algumas críticas, vem ganhando a preferência de um grande número de pesquisadores na área de secagem de diferentes tipos de grãos. Desta forma após a análise da cinética de secagem obtém-se a distribuição do teor de umidade em diferentes tempos de secagem.

A Figura 4.8 representa a distribuição do teor de umidade adimensional no plano longitudinal para quatro tempos distintos (800 s; 1800 s; 2500 s e 4000 s) utilizando coeficiente de difusão  $D = 2,06281 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{h}$  e temperatura do ar de secagem  $67,5^\circ\text{C}$ .

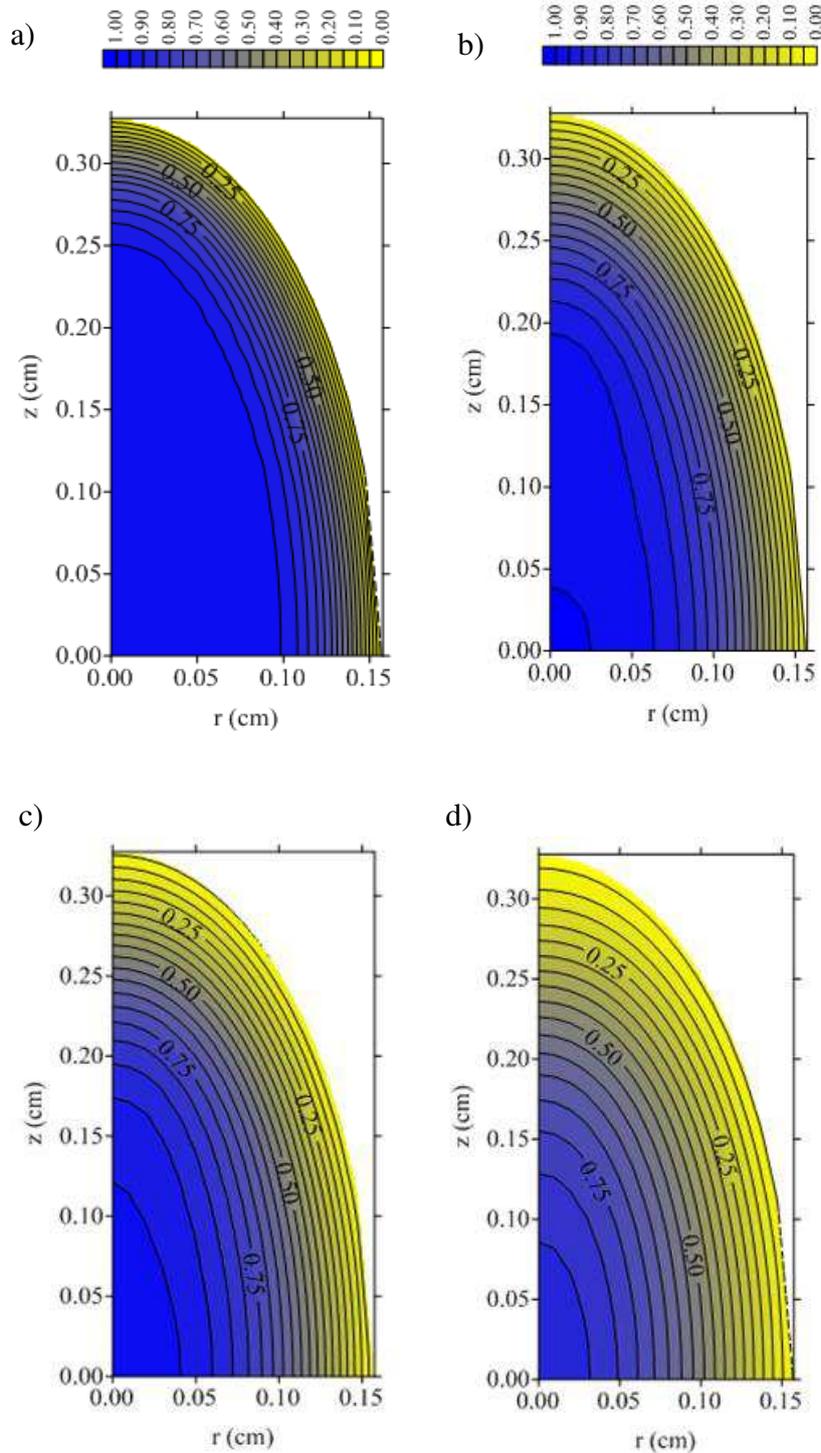


Figura 4.8 - Distribuição do teor de umidade adimensional no plano longitudinal para o grão de trigo em quatro intervalos de tempo diferentes: a)  $t = 800 \text{ s}$  ( $Fo = 0,01848$ ), b)  $t = 1800 \text{ s}$  ( $Fo = 0,04158$ ), c)  $t = 2500 \text{ s}$  ( $Fo = 0,05776$ ) e d)  $t = 4000 \text{ s}$  ( $Fo = 0,0924$ ) ( $T = 67,5^\circ\text{C}$ ).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.8, observa-se que o teor de umidade reduz-se mais rapidamente na ponta do grão, sendo essa região a mais propícia aos efeitos de fratura e empenamentos do produto, devido aos elevados gradientes de umidade nesse local.

A Figura 4.9 mostra os resultados da cinética de secagem obtidos analiticamente utilizando temperatura para o ar de secagem de 47°C e propriedades constantes para transferência de massa com condição de contorno convectiva. Para a validação destes resultados fez-se uma comparação dos resultados obtidos do teor de umidade médio com os dados experimentais de FORTES et al. (1981).

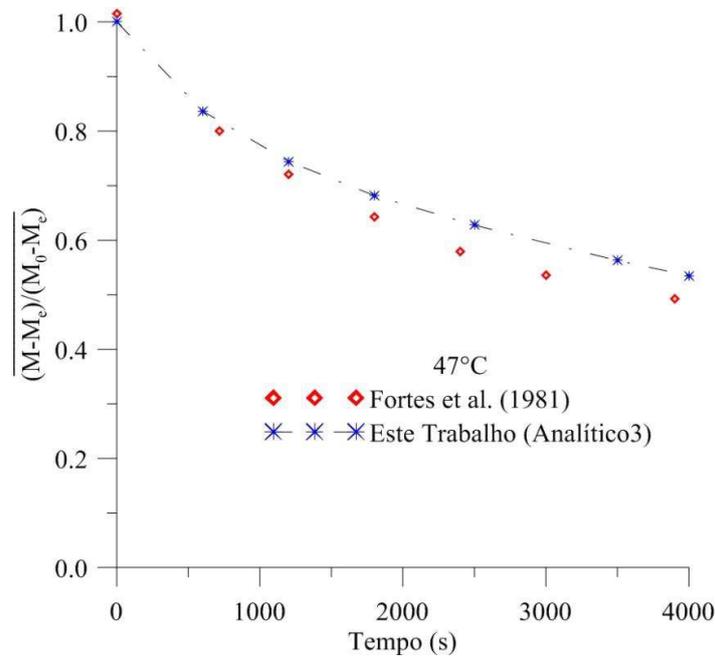


Figura 4.9 - Comparação entre os teores de umidade adimensionais em função do tempo, obtidos neste trabalho e reportados na literatura (experimental T=47°C).

Conforme a Figura 4.9, as curvas de secagem passam a apresentar apenas pequenas variações em sua forma, evidenciando que as mesmas apresentam cinéticas de secagem semelhantes. Contudo a secagem é ainda mais lenta ( $D = 9,00434 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{h}$  e  $h_m = 8,89455 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ) que nos casos anteriores. Essa variação na velocidade de secagem é devido a baixa temperatura de secagem usada.

A Figura 4.10 representa a distribuição do teor de umidade adimensional no plano longitudinal para quatro tempos distintos (900 s; 1300 s; 2000 s e 3500 s) para a temperatura do ar de secagem de 47°C.

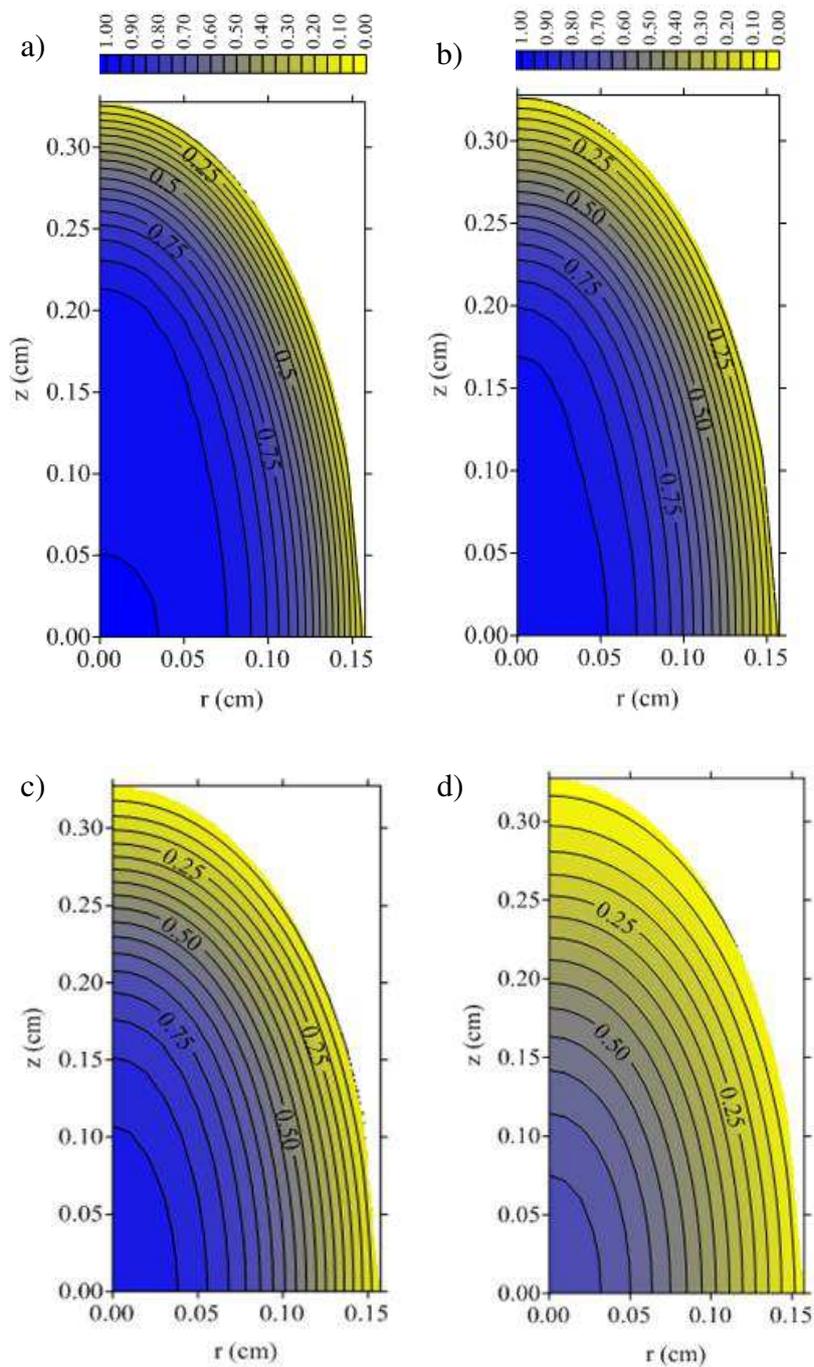


Figura 4.10 - Distribuição do teor de umidade adimensional no plano longitudinal para o grão de trigo em quatro intervalos de tempo diferentes: a)  $t = 900$  s ( $Fo = 0,03566$ ), b)  $t = 1300$  s ( $Fo = 0,05151$ ), c)  $t = 2000$  s ( $Fo = 0,07925$ ) e d)  $t = 3500$  s ( $Fo = 0,13869$ ) ( $T = 47^\circ\text{C}$ ).

Da Figura 4.10, observa-se que o teor de umidade reduz-se mais rapidamente nas extremidades do grão, devido à resistência ao movimento de líquido por difusão ser inferior nessas regiões. Porém no centro do grão, os teores de umidade reduzem-se com uma menor velocidade. Comportamento este, verificado em todos os casos analisados.

### 4.3.2 - Transferências de calor no grão de trigo

Em termos de aplicação da metodologia para a geometria esferoidal prolata, utilizou-se dados específicos do grão de trigo para verificar a transferência de calor no sólido com a condição de contorno convectiva na superfície de separação entre o produto e o ar de secagem. De posse dos valores para as propriedades do grão e do ar de secagem, foi possível então realizar a simulação. Foram obtidos os resultados necessários para a construção dos gráficos de cinética de aquecimento e distribuição de temperatura para quatro tempos distintos.

A Figura 4.11 mostra a cinética de aquecimento que corresponde a resultados do comportamento de temperatura adimensional em função do tempo no centro do grão de trigo com razão de aspecto  $b/a = 2,0802$ . Tais resultados são comparados aqui aos resultados experimentais reportados por FORTES et al. (1981), bem como aos resultados numéricos reportados por LIMA (1999), para a secagem a  $87,8^{\circ}\text{C}$ .

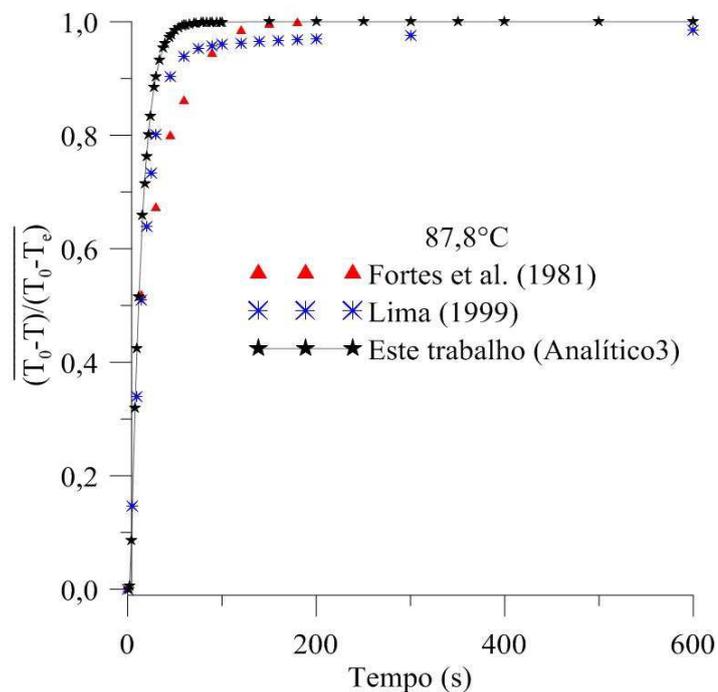


Figura 4.11 - Comparação entre os resultados da temperatura adimensional no centro do grão de trigo com razão de aspecto de 2,00 em função do tempo obtidos neste trabalho e reportados na literatura (numérico e experimental,  $T = 87,8^{\circ}\text{C}$ ).

Analisando a Figura 4.11, percebe-se que existe uma boa aproximação nos resultados, ou seja, há uma concordância entre os valores obtidos e os dados da literatura, comprovando assim que o resultado foi satisfatório. Vale ressaltar que os resultados apresentados estão na forma adimensional, portanto, são independentes da temperatura inicial e de secagem do grão.

Observando as curvas que representam a variação de temperatura adimensional em função do tempo, verifica-se que a temperatura final de equilíbrio do grão é atingida em torno de 200 s, para os três resultados apresentados. Tanto para o presente trabalho quanto para os resultados de LIMA (1999), percebe-se que a temperatura de equilíbrio é atingida de maneira mais rápida, em um menor tempo (100 s) em relação aos resultados experimentais obtidos por FORTES et al. (1981), devido ao fato de que nesta pesquisa os efeitos do acoplamento, entre calor e massa não serem considerados durante a secagem.

Ainda com base nas cinéticas de aquecimento representadas na Figura 4.11, nota-se, que a transferência de calor acontece mais rapidamente se comparada à transferência de massa, elevando a temperatura do grão num menor tempo. Tal comportamento se deve ao fato de que a difusividade térmica do grão é muito maior do que a difusividade de massa,  $\alpha/D = 858,65$ , sendo  $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ .

A Figura 4.12 representa a distribuição de temperatura no interior do grão de trigo para quatro instantes de secagem ( $T=87,8^\circ\text{C}$ ). Percebe-se que a temperatura decresce da superfície para o centro do grão à medida que o tempo se eleva durante o processo de secagem. Verifica-se ainda que os maiores gradientes ocorram nas proximidades da superfície e do ponto focal do sólido, tendendo a uma temperatura de equilíbrio com o aumento do tempo de secagem.

Desta forma a mesma análise pode ser feita para os coeficientes de transporte convectivo. Quando o grão entra em equilíbrio térmico com o ar de secagem, o processo de transferência de massa no interior do grão continua a ocorrer, porém de forma isotérmica. Diversos pesquisadores estudaram o comportamento dessa propriedade térmica com a variação do teor de umidade de vários materiais biológicos e observaram existir uma relação em que o aumento do teor de umidade provoca elevação dos valores de calor específico (ANDRADE et al. 2004).

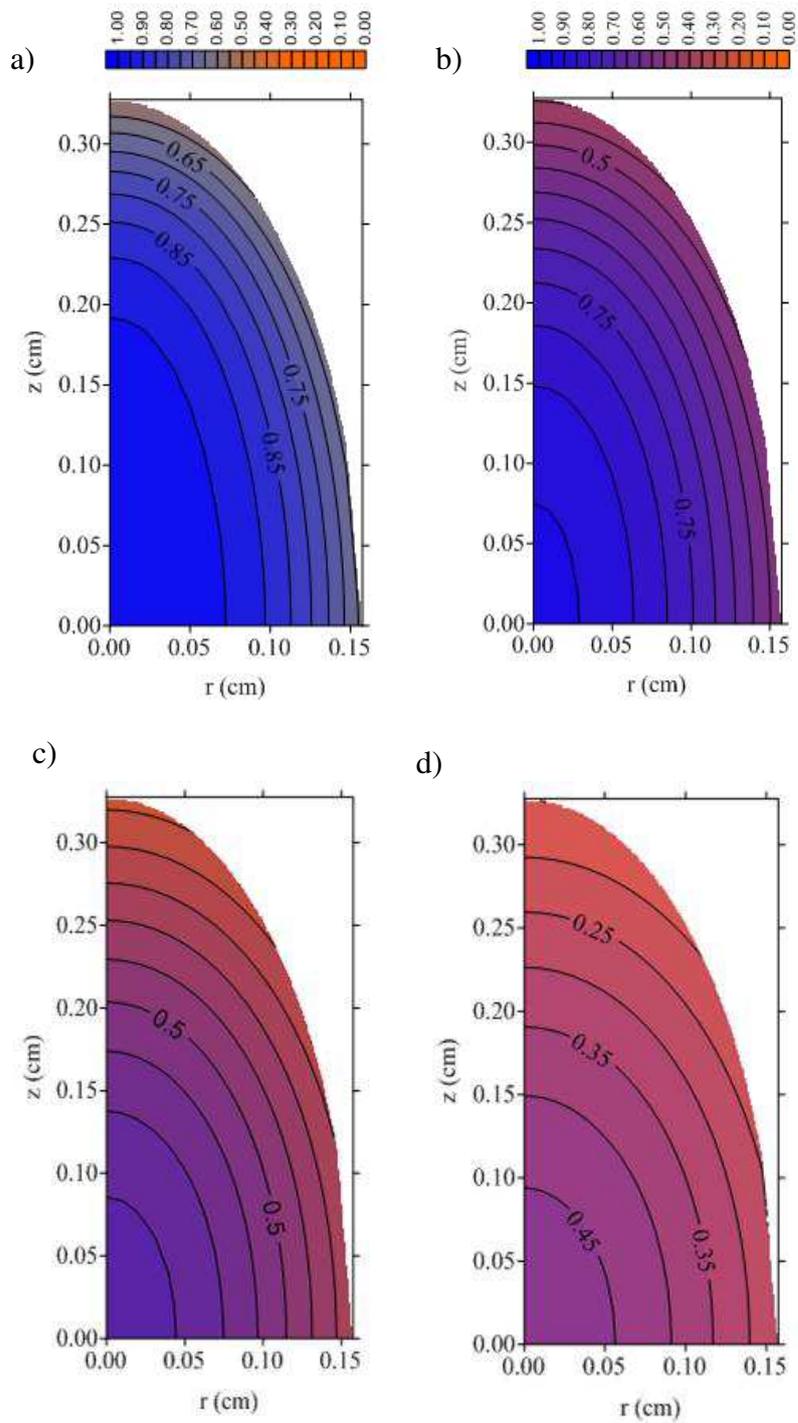


Figura 4.12 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do grão de trigo em quatro instantes de tempo diferentes: a)  $t = 2$  s ( $Fo = 0,0680453$ ), b)  $t = 4$  s ( $Fo = 0,136091$ ), c)  $t = 8$  s ( $Fo = 0,272181$ ) e d)  $t = 12$  s ( $Fo = 0,408272$ ).

A Figura 4.13 mostra a cinética de aquecimento que corresponde a resultados do comportamento de temperatura adimensional em função do tempo no centro do grão de trigo para temperatura de 67,5°C, comparados aos resultados experimentais reportados por FORTES et al., (1981),

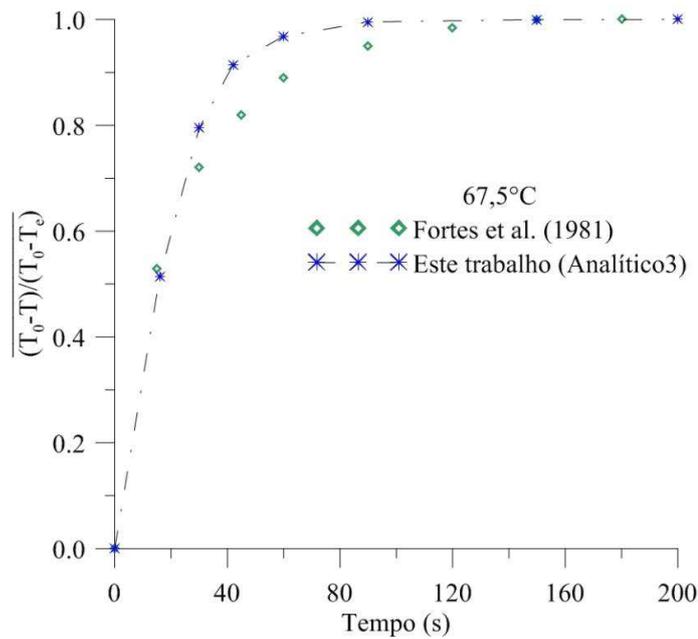


Figura 4.13 - Comparação entre os resultados da temperatura adimensional no centro do grão de trigo com razão de aspecto de 2,00 em função do tempo obtidas neste trabalho e reportados na literatura (experimental, T=67,5°C).

De acordo com as curvas que representam a variação de temperatura adimensional em função do tempo, foi possível verificar que a temperatura de equilíbrio do grão para este trabalho é atingida, bem mais rápida se comparada a temperatura de equilíbrio dos resultados experimentais obtidos por FORTES et al. (1981), que atingiu em torno de 160 s. Tal comportamento, já era esperado devido às condições de contorno usadas e as propriedades constantes consideradas.

A Figura 4.14 representa a distribuição de temperatura no interior do grão de trigo para quatro instantes de secagem a 67,5°C.

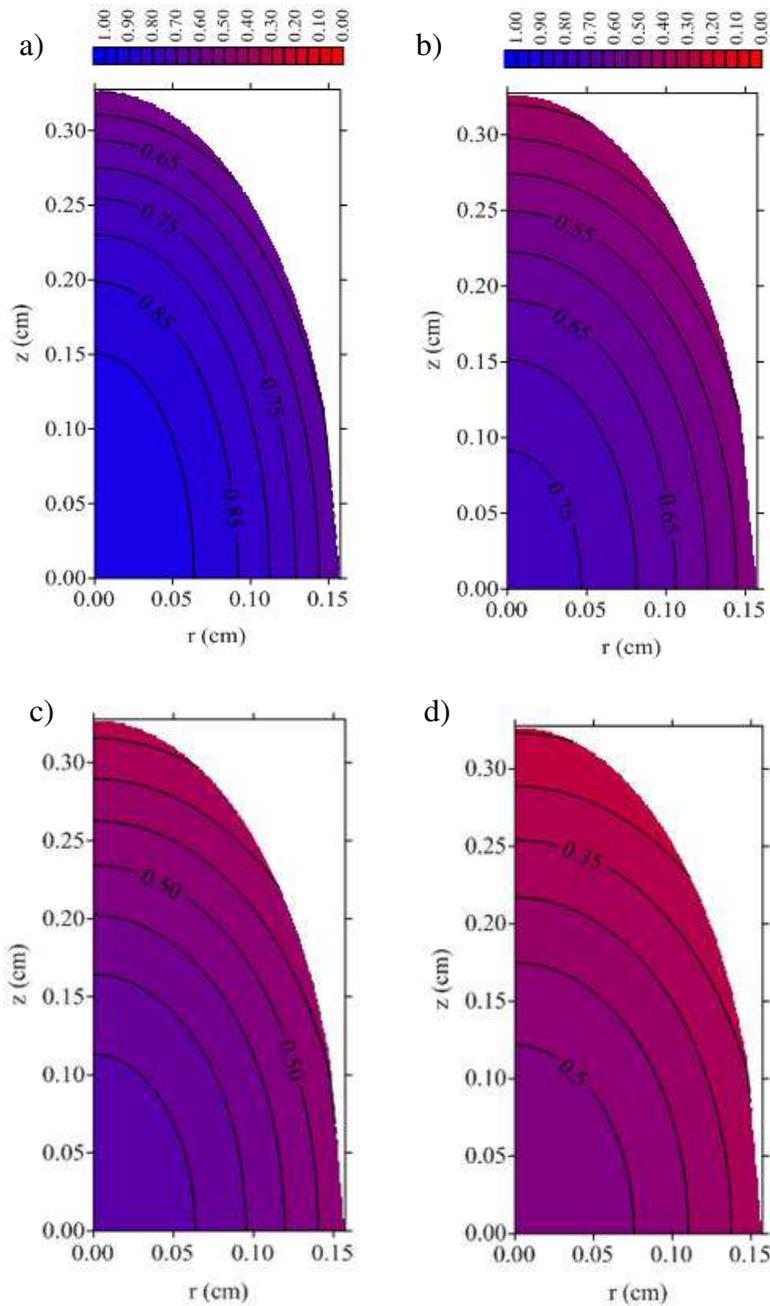


Figura 4.14 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do grão de trigo em quatro instantes de tempo diferentes: a)  $t = 4$  s ( $Fo = 0,131846$ ), b)  $t = 8$  s ( $Fo = 0,263692$ ), c)  $t = 10$  s ( $Fo = 0,329615$ ) e d)  $t = 14$  s ( $Fo = 0,461461$ ) ( $T=67,5^{\circ}\text{C}$ ).

Analisando a Figura 4.14 pode-se deduzir que, após 10 s, a secagem ainda não ocorreu em todo o grão. A camada aquecida aumentou, contudo, o centro do grão de trigo ainda não atingiu a temperatura de equilíbrio. Considerando as camadas mais próximas da superfície do grão, percebe-se que existem diferentes camadas com temperaturas diferentes no interior do grão.

Constata-se também, na Figura 4.14, que após 14 s, o centro do grão está próximo de atingir o equilíbrio térmico, equilíbrio este mostrado por diversas outras camadas no interior do grão de trigo. Conforme a representação gráfica da pode-se perceber que esse intervalo de tempo não foi suficiente para secar completamente o produto, pelo contrário a secagem ainda está se iniciando.

A Figura 4.15 mostra a cinética de aquecimento que corresponde a resultados do comportamento de temperatura adimensional em função do tempo no centro do grão de trigo para temperatura do ar de secagem de 47 °C, comparados aqui aos resultados experimentais reportados por FORTES et al. (1981).

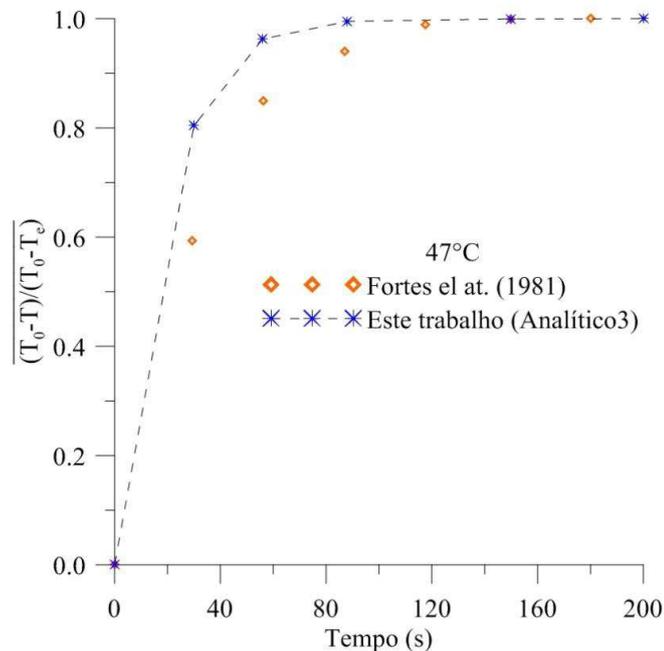


Figura 4.15 - Comparação entre os resultados experimental da temperatura adimensional no centro do grão de trigo em função do tempo, obtidos neste trabalho e reportados na literatura (experimental, T=47°C).

Analisando a Figura 4.15, foi possível perceber que os resultados mostraram-se bem próximos com pequenas variações, sendo estas acarretadas pelo decréscimo da temperatura do ar de secagem, causando assim mudanças em alguns parâmetros tais como: coeficiente convectivo de transferência de calor, calor específico e a condutividade térmica. Vale ressaltar ainda que os resultados obtidos apresentaram cinéticas de aquecimento muito semelhantes em relação as demais cinéticas abordadas, mostrando assim uma boa coerência física.

A Figura 4.16 representa a distribuição da temperatura adimensional no interior do grão de trigo para quatro instantes distintos de secagem (6 s, 8 s, 10 s e 12 s), para secagem a 47°C.

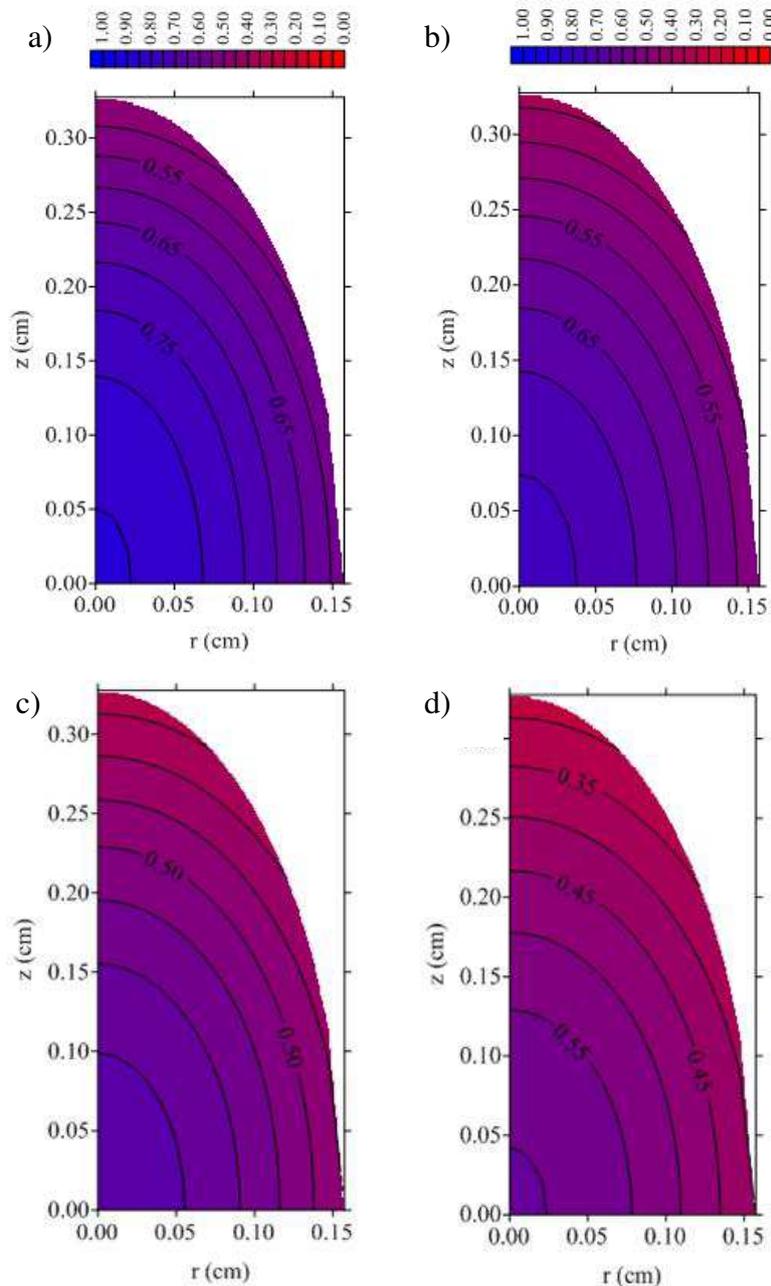


Figura 4.16 - Distribuição da temperatura adimensional no interior do grão de trigo em quatro instantes de tempo diferente: a)  $t = 6$  s ( $Fo = 0,204136$ ), b)  $t = 8$  s ( $Fo = 0,272181$ ), c)  $t = 10$  s ( $Fo = 0,340227$ ) e d)  $t = 12$  s ( $Fo = 0,408272$ ) ( $T = 47^\circ\text{C}$ ).

De acordo com a Figura 4.16 vê-se a as linhas de iso - temperaturas, não obstante pode-se observar que o aumento mais acentuado da temperatura ocorreu na extremidade superior do eixo z ( $z = b$ ), reduzindo-se este efeito gradativamente até a extremidade eixo y ( $y = a$ ). Este comportamento foi evidente em todos os elipsóides.

Como comentário final pode-se dizer que a secagem em altas temperaturas pode ser a principal causa de fissuras ou quebra dos grãos. A formação de fissuras são resultados de tensões e compressões que surgem no interior do grão devido a elevados gradientes de umidade ou de temperaturas. Desta forma torna-se perceptível que quanto mais rápido for o processo de secagem, maiores gradientes são produzidos e, desta forma, maiores possibilidades de fissuras. Para se obter uma secagem eficiente e ao mesmo tempo propiciar uma boa qualidade final do grão, o ideal é secar com temperaturas mais baixas.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

#### **5.1 - Conclusões**

Com base nos objetivos propostos e diante dos resultados obtidos neste trabalho sobre a secagem em sólidos esferoidais, pode-se concluir que:

- a) O modelo matemático utilizado adequado para descrever problemas transientes tais como resfriamento, aquecimento ou umidificação. A partir da solução do modelo, è possível obter a distribuição interna da grandeza requerida (por exemplo, teor de umidade ou temperatura), bem como analisar a cinética de difusão (secagem ou aquecimento).
- b) As difusividades de massa e térmica que afetam respectivamente a transferência de calor e massa, exerceu uma grande influência no processo de secagem, informando a velocidade em que ocorre cada processo. Temperatura mais elevada implica em difusividade de massa maior.
- c) Secagem em temperaturas mais elevadas implica numa secagem mais rápida para umidade relativa menor que 100%.

- d) Verificou-se que os maiores gradientes de umidade e de temperatura ocorrem na ponta do esferóide prolato, sendo essa região a mais afetada por tensões termo-hidro-mecânicas, tornando-se mais susceptíveis ao surgimento de defeitos, como trincas e deformações.
- e) No grão de trigo, a transferência de calor no processo de secagem ocorre de maneira mais rápida em relação a transferência de massa. Este fato contribui para que o mesmo consiga atingir a temperatura de equilíbrio em um menor tempo, proporcionando assim um rápido aquecimento do produto.
- f) O grão de trigo atinge o seu equilíbrio térmico em aproximadamente 200 s , enquanto que a secagem neste instante está apenas no início; o grão está no período de acomodação de processo.

## **5.2 - Sugestões para futuros trabalhos**

As sugestões para futuros trabalhos visando, complementar as pesquisas nesta área, seriam:

- ❖ Aplicar a modelagem matemática desenvolvida para descrever processo de secagem em outras condições de contorno.
- ❖ Investigar a influência da variação dos teores de umidade na secagem de grãos de trigo estudados no presente trabalho
- ❖ Estudar os efeitos de tensões termo-mecânicas em produtos biológicos com geometria elipsoidal.
- ❖ Aplicar o modelo desenvolvido na secagem de outros produtos agrícolas, tais como: feijão, soja e banana.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SALES, J. F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, v.2, n.1, p.72-83, 2009.

AMENDOLA, M.; QUEIROZ, M. R. Mathematical methodologies for calculating the mass diffusion coefficient of bananas during drying. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 1, n. 6, p. 623-627, 2007.

ANDRADE, E. T.; COUTO, A. M.; QUEIROZ, D. M.; PEIXOTO, A. B. Determinação de propriedades térmicas de grãos de milho. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 3, p. 488-498, 2004.

ARRIECHE, L. S., CORRÊA, R. G., e SARTORI, D. J. M. (2009). Drying stresses and strains in a spherical food model. **Computers and Chemical Engineering**, v.33, n.11, p.1805–1813, 2009.

BAINI, R., LANGRISH, T. A. G. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas. Department of Chemical Engineering, **Journal of Food Engineering** v. 79, n .1, p. 330-343, 2006.

BERTI, M.; AHRENS, D.C.; BEUSSO, D. R. Secagem estacionária de sementes de trigo com utilização de gás liquefeito de petróleo. **Revista Brasileira de Sementes**, v.27, n 2, p.81-86, 2005.

BECK, J.V.; COLE, K.D.; HAJI-SHEIKH, A.; LITKOUHI, B. **Heat conduction using Green's functions**. Hemispheric Publishing Corporation, New York, USA, Galerkin-based Green's functions and solutions, 1992, p. 293-334.

BÖRNER, A.; SCHAFFER, M.; SCHMIDT, A. ; GRAU, M.; VORWALD. J Associations between geographical origin and morphological characters in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant Genetic Resources**, v.3, n. 3, p.360-372, 2005.

BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R.; ANDRADE, E. T. Secagem do café. In: BORÉM, FLÁVIO MEIRA (ed.). Pós-colheita do café. **Lavras, MG: UFLA**, v.7, n.2, p.205-240, 2008.

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

BRUM, A.L. e HECK A economia do trigo no rio grande do sul breve histórico do cereal na economia do estado. Porto Alegre, 2005.

Disponível em: <http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/face/article/viewFile/263/212>  
Acesso: 25/09/2012.

CARLESSO, V. DE O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F. DA; DETMANN, E. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, v.29, n.2, p.28-37, 2007.

CARMO, J. E. F. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos esferoidais oblato, Estudo do caso: Secagem de lentilhas**. 2004. 140 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Departamento de Engenharia de Processo, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

CARMO, J. E. F.; LIMA, A. G. B. Drying of lentil including shrinkage: a numerical simulation. **Drying Technology**, v.23, n.1, p.1977-1992, 2005.

CARMO, J. E. F.; LIMA, A. G. B. Mass transfer inside oblate spheroidal solids: modelling and simulation. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 1, p. 19-26, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB Safra brasileira quarto Levantamento Janeiro/2011.

CHEMKHI, S.; ZAGROUBA, F. Water diffusion coefficient in clay material from drying data. **Desalination**, v. 185, n. 1-3, p.491-498, 2005.

CUNHA, R. DA.; PASINATO, A.; MEZIAT, A.; GUARIENTI, E. M.; DALMAGO, G. A.; PIRES, J. L. F.; ANJOS, J. M. DOS. ; CANZIANI, J. R.; FAYET, L. A.; JACOBSEN, L. A.; VIEIRA, R. DE C. M. T.; GUIMARÃES, V. DI ADDARIO. Oficina sobre trigo no Brasil - Bases para a construção de uma nova triticultura brasileira. Editora Embrapa, 1º Edição. p.31-54-56-63, agosto 2009.

CUNHA; G.R.; BACALTCHUK, B. Tecnologia para produzir no Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Assembléia Legislativa. **Comissão de Agricultura, Pecuária e Cooperativismo/ Passo Fundo: Embrapa Trigo**, 2000. 404p. (Série Culturas, nº02).

DELIBERALI, J.; OLIVEIRA, M.; DURIGON, A.; DIAS, A. R. G.; GUTKOSKI, L. C.; ELIAS, M. C. Efeitos de processo de secagem e tempo de armazenamento na qualidade tecnológica de trigo. **Ciências Agrotécnica**, v.34, n.5, p.1285-1292, 2010.

ELIAS M. C.; LOPES V.; GUTKOSKI L. C.; OLIVEIRA M.; MAZZUTTI S.; DIAS A. R. G. Umidade de colheita, métodos de secagem e tempo de armazenamento na qualidade tecnológica de grãos de trigo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.1, p.25-30, 2009.

Embrapa - Trigo, Publicações On-line. Disponível em <<http://cnpt.embrapa.br/i-mecan.htm>> acesso em 13/06/2011.

EDWARDS, S. G. Influence of agricultural practices on fusarium infection of cereals and subsequent contamination of grain by trichothecene mycotoxins. **Toxicology Letters**, v.153, n.1, p.29-35, 2004.

FARIAS, V. S. O. **Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas Generalizadas**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

FAO – Food Agriculture Organization. 2011. Disponível em: <[www.fao.org](http://www.fao.org)>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2012.

FIGUEROA, ROMEO **The intermittent drying agricultural crops with particular reference to energy requirements**. 1986 .Tese (Doutorado) Granfield institute of technology.

FORTES, M., OKOS, M. R. A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary porous media. **Transactions of ASAE**, v.24, n.3, p. 756-760, 1981.

FORTES, M.; OKOS, M. R.; JUNIOR, J. R. B.; Heat and mass transfer analysis of intrakernel wheat drying and rewetting. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.26, n.2, p.109-125, 1981.

FRANKE, L. B.; TORRES, M. A. P. LOPES, R. R.. Performance of different drying methods and their effects on the physiological quality of grain sorghum seeds (*S. bicolor* (L.) Moench). **Revista Brasileira de sementes**, v.30, n.3, p.177-184, 2008.

FURTADO, G. F.; PORTO, A. G.; ZELA S. P. Avaliação físico-química do pequi submetido a secagem em camada delgada. Congresso Interno de Iniciação Científica PIBIC/CNPq/PROBIC - UNEMAT, Cáceres - MT. Anais do IV Congresso Interno de Iniciação Científica PIBIC/CNPq/PROBIC - UNEMAT, 2008.

GOUVEIA, D., UGULINO, S., DUARTE, M., MATA, M. CINÉTICA DE FEIJÃO PRETO (*PHASEOLUS VULGARIS*, L.) EM SECADOR DE BANDEJA. **HOLOS**, mar. 2011.

Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/510/431>>.

Acesso em: 16/05/2012

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; NETO, S. A. R. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas, v. 27, n.1, p.135-140, 2007.

GURJÃO, K. C. de O.; SILVA, A. S.; ALMEIDA, F. de A. C.; BRUNO, R. de L. A.; PEREIRA, W. E. Cinética de secagem da polpa de tamarindo pelo método de camada de espuma (“foam-mat drying”). Congresso Brasileiro de Fruticultura. 54th Annual Meeting of the Interamerican Society for Tropical Horticulture. Centro de Convenções, Vitória-ES, 2008.

HACIHAFIZOĞLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K.; LIMA, A. G. B. A liquid diffusion model for thinlayer drying of rough rice. **European Food Research and Technology**, v.226, n.4, p.787-793, 2008.

HAJI-SHEIKH, A., LAKSHMINARAYANAN, R. Integral solution of diffusion equation: Part 2 – Boundary conditions of second and third kinds. **Journal of Heat Transfer**, v.109, n.3, P.557 – 652, 1987.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. New York: John Wiley & Sons, 1992, 455f.

KANTOROVICH, L. V. e KRYLOV, V. I. **Approximate methods of higher analysis**. Advanced Calculus, Wiley, New York, USA, 1960.

KEEY, R. B. **Drying: Principles and practice**. Oxford: Pergamon Press, 1972.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo concorrente para secagem de grãos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

KOPTYUG, I. V., KABANIKHIN, S. I., ISKAKOV, K. T., FENELONOV, V. B., KHITRINA, L. Y. A quantitative NMR imaging study of mass transport in porous solids during drying. **Chemical Engineering Science**, v.55, n.9, p.1559-1571, 2000.

LIMA, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas.** 1999 256f Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, SP.

LIMA, A. G. B.; NEBRA, S. A., Theoretical analysis of the diffusion process inside prolate spheroidal solids. **Drying Technology**, v.18, n.1-2, p. 21-48, 2000.

LIMA, D. R.; FARIAS, S. N.; LIMA, A. G. B. Mass transport in spheroids using the Galerkin method. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, 2004, v. 21, n. 4, p. 667-680.

LOPEZ, C.M.; IDIART, A.; CAROL, I. Mesomechanical analysis of concrete deterioration including time dependence. **International Conference on Computational Plasticity complas VIII**, p. 1-4, Barcelona, 2005.

LOULOU, T.; ADHIKARI, B.; LECOMTE, D. Estimation of concentration-dependent diffusion coefficient in drying process from the space-averaged concentration versus time with experimental data. **Chemical Engineering Science**, v.61, n.22, p.7185-7198, 2006.

WOLFRAM, S., **The Mathematica® Book**. Cambridge University Press, New York, 2009.

MELO, J. C. S.; LIMA, W. C. P. B.; FARIAS NETO, S.R.; LIMA, A. G. B. Resfriamento de frutas com forma esferoidal prolata via método integral baseado em Galerkin. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador, Bahia, 2008.

MÖHLER, B. C. **Avaliação das Características de Secagem dos Grãos de Soja.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química Universidade Federal do Rio Grande do Sul-Porto Alegre, Dezembro de 2010.

MORAIS, S. J. S.; **Cinética de secagem de grãos de feijão-caupi (Vigna unguiculata (L.) Walp.).** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola.). Departamento de Engenharia

Agrícola, Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis Goiás.

MOREIRA, R., SERENO, A. M. Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions. **Journal of Food Engineering**, v. 57, n.1, p.25–31, 2003.

OLIVEIRA, V. A. B. **Transferência de calor e massa no interior de sólidos com forma esferoidal prolata via termodinâmica dos processos irreversíveis**. 2006 150 p., Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

OLIVO, T.; BESSA, W.; ERRERA, M. E.; BONFIN, M.; RBEIRO, E. P. Determinação da umidade da soja por medida. Congresso Brasileiro de Automática. Bonito-MS, 2010.

PARK, K. J., ANTÓNIO, G. C., OLIVEIRA, R. A., PARK, K. J. B. (2007). Conceitos de processo e equipamentos de secagem. CTEA, Campinas: 127. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>, acesso em: 16/07/2012.

PAYNE, F. R.; CORDUNEANU, C. C.; HAJI-SHEIKH, A; HUANG, T. **Integral methods in science and engineering**. Chapter: On solution of parabolic partial differential equations using Galerkin functions. Hemisphere Publishing Corporation, New York, USA, 1986.

POPPER, L; SCHÄFER, W.; FREUND, W. Future of flour – A compendium of flour improvement. Kansas City: Agrimedia, 2006. 325p.

PUYATE, Y. T.; LAWRENCE, C. J. Sherwood's models for the falling-rate period: A missing link at moderate drying intensity. **Chemical Engineering Science**, v.61, n.21, p.7177-7183, 2006.

QUAGLIA, G. Ciencia y tecnologia de La panificación. Zaragoza: Acribia, 1991. 485p.

RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C. S. R.; KESTER, A. N. P. P. L. Influência do tipo de pavimento na secagem de clones de café (*Coffea Canephora* Pierre) em terreiros de concreto e chão batido. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.9, n.2, p.171-178, 2007.

RESENDE, O.; CORRÊA, P., C.; GONELI, A., L., D.; BOTELHO, F., M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*phaseolus vulgaris* l.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.10, n.1 p.17-28, 2008.

RESENDE, O.; ARCANJO, R. V.; SIQUEIRA, V. C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum**, v.31, p.189-196, 2009.

RESENDE, O.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V. C.; ARCANJO, R. V. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. **Acta Amazonica**, v.40, n.2, p.247-255, 2010.

ROSSI, R. M. E NEVES, M. F. Estratégias para o trigo no Brasil. Disponível em: <http://www.abitrigo.com.br/trigo.asp>. Acesso em: 28/06/ 2011.

SAFRAS E MERCADO. Cultivo e consumo do trigo no mundo , disponível no < <http://www.safra.com.br/>> acesso em :11/03/ 2012.

SANTOS, I. B.; SILVA L. P. L.; SILVA, A. A.; LIMA A. G. B. Transporte de massa em sólidos com forma arbitrária via método integral baseado em galerkin usando condições de contorno convectiva. **asociacion argentina de mecánica computacional**, v.29, n. 2, p.2865-2881, 2010.

SAYKOVA, I.; CWICKLINSKI, G.; CASTELLE, P. Analytical approach for predicting effective diffusion coefficients in multidimensional slab geometry. **Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy**, v. 44, n. 1, p. 44-49, 2009.

SCHEEREN, P. L.; CAIERÃO, E.; SILVA, M. S.; DUCA, L. J. A. D.; JUNIOR, A. N.; LINHARES, A.; EICHELBERGERET, L. Guamirim: cultivar de trigo da classe pão, precoce e de baixa estatura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 293-296, 2007.

SILVA, C. M. D. P. S. **Difusão de massa em corpos cilíndricos: modelagem e desenvolvimento de software com aplicação à secagem de bananas**. 2010, 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências e Tecnologia Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

SILVA J. V., SILVA F. N., ANDRADE T. H. F., LIMA A.G.B. Drying of rough rice: A numerical investigation. International Conference on diffusion in Solids and Liquids, Istanbul-Turkey, 2012.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L. Secagem e secadores. In: SILVA, J. S. (Ed.). **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000. p.107-138.

SILVA, C. M. D. S.; FARIAS, V. S. O.; NASCIMENTO, P. L.; SILVA, W. P.; LIMA, GOMES, J. P.; LINS, MA. A. Determinação simultânea da difusividade efetiva e do coeficiente de transferência convectivo de massa durante a secagem de bananas inteiras usando soluções analíticas e método inverso. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CD ROOM, 2010.

SIMIONE, D.; OLIVEIRA, M.; PAGNUSSATT, F. A.; DEUNER, C. C., GUTKOSKI, L. C.; ELIAS, M. C. Parâmetros operacionais na secagem intermitente de grãos 497 de aveia branca cultivar UPFA 20 teixeirinha. **Ciências agrotécnica**, v. 32, n. 2, p. 497-502, 2008.

SODRÉ, U. **Modelos Matemáticos**. Londrina, 2007. Disponível em: <http://www.mat.uel.br/matessencial/superior/pdfs/modelos.pdf>. Acesso 12/03/ 2012.

SCHEUER P. M.; FRANCISCO A.; MIRANDA M. Z. DE, LIMBERGER V. M. Trigo: características e utilização na panificação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande**, v.13, n.2, p.211-222, 2011.

SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J. S. Moisture transfer in solid food materials: A review of mechanisms, models, and measurements. **International Journal of Food Properties**. 10, 739–777, 2007,

STEFFE, J. F.; SINGH, R. P. Diffusion coefficients for predicting rice drying behaviour. **Journal Agricultural Engineering Research**. v.27, n.6, p.489-493, 1982.

STEFFE, J. F.; SINGH, R. P. SINGH. Diffusivity of starchy endosperm and bran of fresh and rewetted rice. **Journal of Food Science** v.45, n.2, p.356-361, 1980.

UKRAINCZYK, N. Thermal diffusivity estimation using numerical inverse solution for 1D heat conduction. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.52, n.25-26, p. 5675-5681, 2009.

UNCOMTRADE - United Nations Commodity Trade Statistics Database. Commodity data availability. Disponível em: <http://comtrade.un.org/db/mr/rfCommoditiesList.aspx>. Acesso em: 02/09/2012.

VARASHIN, M. J. F. C. **Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina 2010-2011**. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola - Epagri/Cepa, Florianópolis, SC, 2011.

VAZQUEZ C., L. y VIZCARRA-M., M. Secado por lecho fluidizado del trigo y su calidad. **Revista Mexicana de ingeniería Química**. 2008, v.7, n.2, p. 131-144, 2008.