



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINAGRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**SECAGEM DE GRÃOS DE ARROZ EM LEITO FIXO:
MODELAGEM, SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO**

AUTOR: José Vieira da Silva

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande, fevereiro de 2016



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINAGRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**SECAGEM DE GRÃOS DE ARROZ EM LEITO FIXO:
MODELAGEM, SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, como requisito para a obtenção o do título de Doutor em Engenharia de Processos.

AUTOR: José Vieira da Silva

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande, fevereiro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586s Silva, José Vieira da.

Secagem de grão de arroz em leito fixo: modelagem, simulação e experimentação / José Vieira da Silva. – Campina Grande, 2016.

120 f. : il. color.

Tese (Dissertação em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".

Referências.

1. Tecnologia de Secagem de Arroz. 2. Arroz em Casca – Secagem – Simulação. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 664.782.4(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO D
JOSÉ VIEIRA DA SILVA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO D
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPIN,
GRANDE

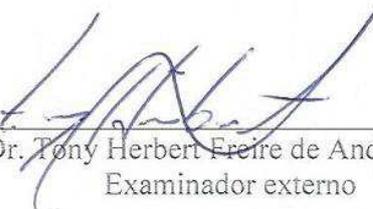
Tese de Doutorado Aprovada em 24/02/2016.



Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima (UFCG)
Orientador



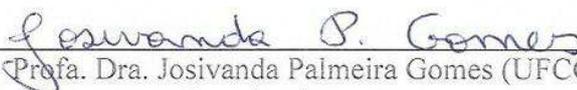
Prof. Dr. Vital Araújo Barbosa de Oliveira (UEPB)
Examinador externo



Prof. Dr. Tony Herbert Freire de Andrade (UFCG)
Examinador externo



Profa. Dra. Fabiana Pimentel Macedo Farias (UFCG)
Examinador externo



Profa. Dra. Josivanda Palmeira Gomes (UFCG)
Examinador externo

Campina Grande, Fevereiro de 2016.

DEDICATÓRIA

A Deus, todo poderoso, por ter me concedido a oportunidade de realizá-lo, dando-me sabedoria, coragem, humildade e principalmente perseverança nas adversidades encontradas pelo caminho.

Dedico esse trabalho a minha esposa Zenaide Lacerda Coelho Pereira Vieira e aos meus filhos Sean Connery Vieira da Silva, Mcdarwin Vieira da Silva e Ângela Cecília Lacerda Coelho de Oliveira. Estes, em todos os momentos, deram-me apoio, confiança e amor.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima pelo caráter, profissionalismo, dedicação e paciência em me orientar.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me dar saúde fôlego para suportar as provações e pela oportunidade de ter concluído mais uma etapa na minha vida.

Ao CNPq, a FINEP e a CAPES pelo apoio financeiro concedido ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (CCT/UFCG).

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, na pessoa do Professor Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto no período de realização deste trabalho, pelo apoio e atenção.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos pela valiosa atenção.

Aos colegas da pós-graduação pela amizade, companheirismo e colaboração, os quais me proporcionaram uma motivação para realização deste trabalho. Especialmente aos colegas de doutorado Iran Rodrigues, João Paulo, Evaldo Marcos, Aginaldo Araújo, Célia Maria a a prof^a. Edna.

Aos membros da Banca Examinadora, professores Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Dr. Tony Herbert Freire de Andrade, Dr. Vital Araújo Barbosa de Oliveira, Dra. Fabiana Pimentel Macêdo Farias e a Dra. Josivanda Palmeira Gomes.

Ao Prof. Dr. Severino Rodrigues, professor amigo ao longo de toda minha trajetória acadêmica do doutorado na UFCG.

Por fim, agradeço a todos que estiveram comigo durante este período e que ainda continuarão, agora, auxiliando-me na busca de novos e desafiadores objetivos.

*“Olhar é uma coisa. Ver o que se olha é outra coisa. Compreender o que se vê é uma terceira. Aprender com o que se compreender é ainda outra coisa. Mas **AGIR** segundo o que se aprende é tudo o que realmente interessa.”*

(Harvard Business Review)

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Características botânicas das plantas de <i>Oryza sativa</i>	8
Figura 2.2	Grão de arroz em casca	8
Figura 2.3	Arroz de terra alta (BRSMG – CONAI).....	13
Figura 2.4	Grão de arroz BRSMG-CONAI quebrado e seco a 60°C.....	22
Figura 2.5	Fissuras no grão de arros descascado, seco na temperatura de 70°C.....	24
Figura 2.6	Exemplo de malha não estruturada.....	44
Figura 3.1	O arroz de sequeiro ou terra alta (BRSMG - CONAI).....	46
Figura 3.2	Estufa com circulação mecânica de ar de fabricação da FANEM mod. 320E com controlador digital de temperatura.	47
Figura 3.3	Plantio do arroz em canteiros de 1m x 2 m x 40 cm entre linhas (arroz com 32 dias de plantados)	48
Figura 3.4	O arroz (BRSMG CONAI) início da floração (71 dias plantados), maturação completa com 117 dias.	48
Figura 3.5	Colheita manual do arroz no campo	49
Figura 3.6	Medições dos grãos de arroz BRSMG-CONAI.....	49
Figura 3.7	Bandeja removível com tela de arame	50
Figura 3.8	Medição da temperatura dos grãos logo após a retirada da bandeja de dentro da estufa.....	50
Figura 3.9	Medição da temperatura dos grãos logo após a retirada da bandeja de dentro da estufa.....	51
Figura 3.10	Grãos de arroz em casca, representação geométrica, (elipsóide de revolução).....	55
Figura 3.11	Definição de pontos e curvas da malha do grão de arroz.....	60
Figura 3.12	Representação da blocagem do grão de arroz.....	60

Figura 3.13	Blocagem do grão de arroz.....	61
Figura 3.14	Visualização da geometria do grão de arroz.....	61
Figura 3.15	Geometria do problema físico, Malha numérica e detalhe da superfície da geometria.....	62
Figura 4.1	Variação do teor de umidade médio em função do tempo para as temperaturas do ar de secagem de: (a) 40, e (b) 50°C	67
Figura 4.2	Variação do teor de umidade médio em função do tempo para a temperatura do ar de secagem de: (a) 60 e (b) 70°C	68
Figura 4.3	Curva de temperatura média em função do tempo para a temperatura do ar de secagem de: (a) 40 e (b) 50°C	70
Figura 4.4	Curva de temperatura média em função do tempo para a temperatura do ar de secagem de: (a) 60 e (b) 70°C.....	70
Figura 4.5	Grão de arroz sem casca pós-colheita com trincas e fissuras seco a 70°C.	73
Figura 4.6	Trincas entre o lema e a pálea do grão de arroz BRSMG-CONAI	75
Figura 4.7	Micrografias dos grãos de arroz translúcidos (<i>in natura</i>) com aumento de (a) 20x e (b) 50x em microscópio eletrônico de varredura.....	76
Figura 4.8	Micrografias dos grãos de arroz translúcidos e microestruturas do grão gessados visualizadas em aumento de 200x após secagem a T = 60°C.....	77
Figura 4.9	Micrografias de grãos de arroz visualizada em aumento de 1000x	78
Figura 4.10	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) grão de arroz <i>in natura</i> da cultivar BRSMG - CONAI com aumento de 500x.	78
Figura 4.11	Comparação entre os valores preditos e experimentais do teor de umidade médio em função do tempo para as temperaturas do ar de secagem de 40 e 50°C.	80
Figura 4.12	Comparação entre os valores preditos e experimentais do teor de umidade médio em função do tempo para a temperatura do ar de secagem de: (a) 60 e (b) 70°C.....	81

Figura 4.13	Distribuição do teor de umidade em planos transversais para temperatura do ar de secagem igual a 40°C em tempos distintos.....	83
Figura 4.14	Distribuição do teor de umidade em planos transversais para temperatura do ar de secagem igual a 70°C em tempos distintos.....	84
Figura 4.15	Campo de temperatura em plano transversais para as temperaturas do ar de secagem de 40 e 70°C nos tempos de 5, 15 e 25 minutos.....	85
Figura 4.16	Grão com teor de umidade de 22%, (a) antes e (b) depois da secagem na temperatura de 40°C.	86
Figura 4.17	Grão com teor de umidade de 34%, (a) antes e (b) depois da secagem na temperatura de 60°C.....	86
Figura 4.18	Grão com teor de umidade de 36%, (a) antes e (b) depois da secagem na temperatura de 70°C.....	87
Figura 4.19	Queima do grão de arroz BRSMG CONAI após a secagem.....	88
Figura 4.20	Figura 4.20 – Comparação entre os valores preditos e experimentais do teor médio de umidade em função do tempo para temperaturas de ar de secagem de 40 e 50°C (Modelo II).	89
Figura 4.21	Comparação entre os valores preditos e experimentais do teor médio de umidade em função do tempo para temperaturas de ar de secagem de 60 e 70°C (Modelo II).....	89
Figura 4.22	Teor de umidade (b.s.) em função do tempo para as temperaturas do ar de secagem de 40 e 70°C nos tempos de: (10, 300, 480, 600 e 810 minutos.....	91
Figura 4.23	Teor de umidade (b.s.) em função do tempo para as temperaturas do ar de secagem de 50 e 60°C nos tempos de: 10, 300, 600 e 750 minutos.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Características físicas do grão de arroz BRSMG – CONAI.....	14
Tabela 2.2	Análise físico-química do arroz BRSMG Conai.....	15
Tabela 2.3	Cultivares de arroz de terra alta recomendadas para Minas Gerais por ocasião do seu lançamento.....	18
Tabela 2.4	Teor de umidade (% b.u.) para colheita mecanizada e armazenamento seguro.....	39
Tabela 3.1	Parâmetros experimentais do ar e do arroz em casca para cada experimento de secagem realizado.....	51
Tabela 3.2	Condições médias de temperatura e umidade relativa do ar ambiente ao longo dos quatro experimentos de secagem do grão de arroz BRSMG-CONAI.....	52
Tabela 3.3	Valores médios das propriedades termofísicas do grão de arroz BRSMG-CONAI.....	52
Tabela 3.4	Parâmetro geométrico e gravimétrico do grão de arroz BRSMG-CONAI.	53
Tabela 3.5	Parâmetros físicos usados nas simulações.....	58
Tabela 3.6	Dimensões médias do grão de arroz in natura com casca utilizado para a geração da geometria.....	59
Tabela 3.7	Parâmetros utilizados para calcular os coeficientes de transferência de calor e massa.	64
Tabela 4.1	Características físicas do grão de arroz BRSMG – CONAI.....	65
Tabela 4.2	Média do arroz <i>in natura</i> com casca seco a 40°C.....	68
Tabela 4.3	Média do arroz seco a 40°C, sem casca.....	69
Tabela 4.4	Temperatura do ar de secagem e tempo de equilíbrio higroscópico.....	94
Tabela 4.5	Coefficiente de transporte estimados para cada teste experimental (Modelo I e Modelo II).....	95

NOMENCLATURA

\bar{M} Teor de umidade médio (base seca)	[kg kg ⁻¹]
\vec{q} Fluxo de calor por unidade de área	[J m ⁻¹ s ⁻²]
c_p Calor específico à pressão constante	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
D Coeficiente de difusão	[m ² s ⁻¹]
D_0 Fator de Arrhenius	[m ² s ⁻¹]
D_{ef} Coeficiente de difusão efetivo de massa	[m ² s ⁻¹]
D_{AB} Difusividade de vapor no ar	[m ² s ⁻¹]
d_p Diâmetro da partícula	[m]
h_m Coeficiente de transferência de massa por convecção	[m s ⁻¹]
h'_m Coeficiente de transferência de massa (produto)	[m s ⁻¹]
h_c Coeficiente de transferência de calor	[m s ⁻¹]
k Condutividade térmica	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]
m_{eq} Massa de equilíbrio	[kg]
M_{eq} Teor de umidade de equilíbrio (base seca)	[kg kg ⁻¹]
M_i Teor de umidade inicial (base seca)	[kg kg ⁻¹]
MR Razão de umidade	[-]
m_s Massa seca	[kg]
R Constante universal dos gases ideais	[J mol ⁻¹ k ⁻¹]
Re Número de Reynolds	[adimensional]
S Termo fonte da equação de difusão	[-]
\vec{V} Vetor velocidade do meio	[m ² /s]
K_a Condutividade térmica do ar	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]
T Temperatura	[°C]
X Umidade absoluta do ar	[adimensional]
X_{sat} Umidade absoluta do ar saturado	[adimensional]
t Tempo	[s]
UR Umidade relativa do ar	[%]
V Volume	[m ³]

x, y, z	Coordenadas cartesianas	[-]
θ_o	temperatura inicial do grão	[°C]
θ_f	temperatura final do grão	[°C]

Sub - índices

a – ar

c – câmara de resfriamento

ef – Efetiva

eq – Equilíbrio

g – grão

m – médio

o – valor inicial

s – ar seco

u – úmido

v – vapor

w – água

x, y, z – coordenadas cartesianas

eq – equilíbrio

i – inicial

s – seco

b.s. – base seca

ef - efetiva

eq - equilíbrio

Lista de letras

a - Comprimento

b - Largura

c - Espessura

Letras gregas

α - Difusividade térmica	$[\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$
Γ^Φ - Coeficiente de transporte	[-]
λ - Coeficiente de transporte	[-]
Δ - Variação	[-]
ρ - Densidade (massa específica)	$[\text{kg m}^{-3}]$
ρ_s - Densidade do produto	$[\text{kg m}^{-3}]$
t - Tempo no domínio transformado	[s]
Φ - Variável de transporte	[-]
Φ_i - Valor inicial da variável de transporte .	[-]
∇ - Operador Nabla	[-]
∇^2 - Laplaciano	[-]

RESUMO

SILVA, José Vieira, *Secagem de Grãos de arroz em leito fixo: Modelagem, simulação e experimentação*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. 138p. Tese (Doutorado)

Este trabalho teve como objetivo estudar numericamente e experimentalmente a transferência de calor e massa durante a secagem de grãos de arroz em casca da cultivar BRSMG-CONAI. Um modelo matemático tridimensional transiente foi apresentado para prever a transferência de massa e calor e simular a distribuição do teor de umidade e temperatura no interior do sólido, considerando a simetria do sólido, propriedades termofísicas e volume constantes. Foram realizados experimentos de secagem com grão de arroz em casca nas temperaturas de secagem de 40, 50, 60 e 70°C doados pelo IPA (Instituto Agrônomo de Pernambuco), localizado no município de Goiana-PE. O grão foi considerado como um elipsóide de revolução. Os resultados de teor de umidade obtido via CFD foram comparados com dados experimentais de secagem. Verificou-se que para baixas temperaturas a velocidade de secagem é menor, diminuindo os riscos de defeitos no produto e que, para temperaturas elevadas surgem altos gradientes de temperatura e umidade no interior do grão que geram tensões termo-hídricas, ocasionando grandes fissuras e trincas, principalmente no início do processo. Foram feitas comparações entre os dados teóricos e experimentais do teor de umidade médio e um bom ajuste foi obtido, que resultou na estimativa do coeficiente de difusão de massa em diversas condições de secagem.

Palavras Chave: arroz em casca, secagem, simulação, experimentação, CFX.

ABSTRACT

SILVA, José Vieira, *Drying of rough rice grains in fixed bed: Modeling, simulation and experimentation*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. 138p. Tese (Doutorado)

This work aims to study numerically and experimentally heat and mass transfer during drying of rice grains (BRSMG-CONAI cultivar). A transient three-dimensional mathematical model to predict mass and heat transfer and simulate the moisture content and temperature distributions inside the solid considering solid symmetry, and constants thermophysical properties and volume is presented. Were performed drying experiments with rough rice grain in the drying temperatures 40, 50, 60 and 70°C supported by IPA (Agronomic Institute of Pernambuco), placed in Goiana-PE, Brazil. The grain was considered as an ellipsoid of revolution. Results of moisture content obtained via CFD were compared to experimental. It was found that at low temperatures the drying rate is lower, decreasing of risks in defects on the product and that for higher temperatures we have higher temperature and moisture content gradients inside the grain which generate thermal-hydric stresses, causing cracks and fissures mainly in the early stages of the process. Were made comparisons between theoretical and experimental data of average moisture content and a good fit was obtained, which resulted in the estimation of the mass diffusion coefficient in several drying conditions.

Keywords: rough rice, drying, simulation, experimentation, CFX.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Organização	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 O arroz em casca	7
2.1.1 Características do grão.....	7
2.1.2 Características do arroz de terra alta ou sequeiro (BRSMG - CONAI).....	11
2.1.3 Umidades de colheita e trincas nos grãos.....	19
2.2 Fenômeno de difusão mássica	25
2.3 Secagem de grãos	27
2.3.1 Fundamentos	27
2.3.2 Métodos de secagem	33
2.3.3 Modelagem de secagem e simulação.....	36
2.3.4 Simulação.....	40
2.3.5 Características do software ANSYS CFX®	42
2.3.6 Simulação via software comerciais	43
METODOLOGIA	46
3.1 Metodologia experimental	46
3.1.1 Material e equipamento.....	46
3.1.2 Procedimentos experimentais.....	47

3.1.2.1 Secagem	47
3.1.2.2 Parâmetros auxiliares e dados de secagem	55
3.2 Metodologia teórica	55
3.2.1 Modelo matemático.....	55
3.2.2 Estimativa do coeficiente de difusão de massa	64
RESULTADOS E DISCUSÕES.....	66
4.1 Experimental	66
4.1.1 Características físicas e cultivo do grão BRSMG CONAI	66
4.1.2 Cinética de secagem	67
4.1.3 Curvas de temperaturas experimentais de secagem	70
4.1.4 Análise estrutural do grão (trincas e fissuras)	73
4.1.5 Características morfológicas do grão de arroz BRSMG - CONAI	76
4.2 Simulação	80
4.2.1 Modelo I: Condição de contorno de 1ª espécie.....	80
4.2.2 Modelo II: Condições de contorno de 3ª espécie.....	89
4.2.3 Estimativa do coeficiente de difusão.....	96
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	98
5.1 Conclusões	98
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A secagem de sólidos é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas nos mais diversos setores das indústrias agrícola, cerâmica, química, alimentícia, farmacêutica, de papel e celulose, mineral e de polímeros. É também uma das operações mais complexas e menos entendida, devido à dificuldade e deficiência da descrição dos fenômenos envolvidos na transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento. Portanto, vários fenômenos físicos devem ser considerados no modelo matemático desenvolvido para o estudo da secagem, pois os mesmos podem ter um efeito significativo na difusividade de massa e calor, conseqüentemente, na taxa de remoção de umidade e aquecimento do sólido (Lima, 1999).

Várias pesquisas feitas com secagem de grão utilizam o modelo de Fick unidimensional considerando o grão como esfera. Nesse trabalho foi feita uma análise tridimensional considerando a própria geometria do grão, como também análise de trinca do material em estudo. Utilizou-se o grão de terra alta cultivado em nossa região o estudo incorporou transferência de calor e transferência massa, utilizou-se o *software* ANSYS CFX[®] como ferramenta principal.

O curto espaço de tempo entre a colheita e a secagem desse grão têm estimulado a investigação de métodos para aumentar a produtividade das instalações de pré-processamento, a maior eficiência dos secadores e novas tecnologias de secagem sem prejuízo na qualidade final dos grãos, na redução do tempo de secagem, eficiência energética, otimização dos processos e da matéria prima, na redução de desperdícios, além do condicionamento das operações em relação ao meio ambiente.

Na literatura se observa uma preferência dos pesquisadores pelos modelos de difusão líquida, aplicados na sua maioria, a produtos com formas bem conhecidas tais como: esferas, cilindros, paralelepípedos (OLIVEIRA et al.; 2006). No entanto, existe a necessidade de

modelos que envolvam outras geometrias conhecidas, tais como esferóides prolato e oblato, e que incorporem ao modelo o transporte simultâneo de calor e massa.

Portanto, a necessidade de estudos de processos de secagem, com reflexos na qualidade do produto final a custos mais acessíveis, faz deste trabalho de pesquisa uma atividade importante não só para a região nordeste como também para o parque industrial brasileiro e, numa perspectiva otimista, para o parque industrial mundial. Assim, um vasto número de estudos tem sido conduzido para analisar o processo de secagem: uns consideram as condições externas do ar, tais como temperatura, umidade relativa e velocidade, relacionadas à taxa de secagem do sólido, enquanto outros consideram as condições internas do produto com ênfase nos mecanismos de movimento de umidade e seus efeitos sobre o mesmo. Ressalta-se também que a secagem de um sólido depende de sua estrutura, teor de umidade inicial, teor de umidade da superfície exposta, como também de parâmetros de secagem como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar.

O controle do processo de desumidificação do produto e o conhecimento do mecanismo do movimento de umidade são fundamentais, uma vez que com dados de simulação e/ou experimentação, pode-se obter condições ótimas no processo, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia (SULZBACHER et al., 2010). Para isso, inúmeros modelos matemáticos têm sido estudados com o objetivo de projetar, controlar e aperfeiçoar unidades de secagem (ROCHA et al., 2005).

Diante da importância que o processo de secagem representa, torna-se necessário um estudo mais aprofundado sobre o mesmo. O uso das ferramentas tecnológicas é fundamental para que se possa projetar equipamentos mais eficientes sem que haja desperdícios relacionados à energia e tempo, proporcionando assim uma secagem de qualidade e a preservação de grãos por longos períodos de armazenamento. Pois, o setor agroindustrial brasileiro cresce significativamente a décadas, resultado da expansão da área de produção e, principalmente, do aumento da produtividade com o uso dessas tecnologias (DALL'AGNOL e HIRAKURI, 2008).

Hoje, com o uso de modelos matemáticos e os avanços computacionais é possível simular este processo com precisão, permitindo prever o tempo de secagem, a evolução da temperatura e da concentração de água, tanto no ar como nos grãos. Geralmente os modelos matemáticos de simulação levam em conta: (i) as características dos elementos do sistema; (ii) as variáveis de entrada; (iii) as medidas de performance do sistema com o meio externo (SILVA, 2006).

A simulação numérica do processo de secagem de arroz em casca permite a análise de diversas variáveis e condições de secagem distintas, permitindo obter respostas quanto à influência dos parâmetros de processos na cinética de secagem que venham a contribuir para o entendimento mais detalhado do fenômeno físico e alguns aspectos relevantes sobre o processo simultâneo de transferência de calor e massa do grão de arroz, a partir de uma geometria complexa.

Neste contexto, é fundamental conhecer os tipos e 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 (VIEIRA et al., 2003; ALMEIDA, 2009; SILVA, 2009). Na escolha do método de secagem, o fator quantidade de sementes é limitante e, quando necessita-se secar grandes quantidades, é imprescindível a utilização de secagem artificial, cujos custos de operação estão relacionados, principalmente, com volume, velocidade de secagem e temperatura do ar.

No desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, é de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água (RESENDE et al. 2008). No processo de secagem o transporte de água ocorre do interior para a superfície do grão, através dos principais mecanismos de transporte: difusão líquida, difusão de vapor e transporte de líquido e vapor (PARK et al., 2007). Assim, diversas situações físicas de interesse utilizam a teoria da difusão para descrever o transporte de matéria e/ou energia em um meio (FARIAS, 2011).

Naturalmente que o estudo do mecanismo da difusão pressupõe a proposição de um modelo matemático para a descrição do processo. É possível encontrar, na literatura, inúmeras soluções analíticas e/ou numéricas da equação de difusão para diversas geometrias e condições de contorno, tratando os coeficientes difusivos constantes ou variáveis (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992; LIMA, 1999; LIMA et al., 2004; SILVA., 2007; HACIHAFIZOĞLU et al., 2008; SILVA et al., 2008a; SAYKOVA et al., 2009; FARIAS et al., 2010a).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo geral estudar numericamente e experimentalmente a transferência de calor e massa que ocorre durante o processo de secagem de arroz em casca. Como objetivos específicos pode-se citar:

a) Estudar experimentalmente a secagem de grão de arroz em diversas condições experimentais;

b) Analisar o efeito das condições de temperatura do ar de secagem, teor de umidade e temperatura do produto sobre o tempo de secagem, consumo de energia e a qualidade do produto no final do processo de secagem;

c) Caracterizar morfológicamente os grão de arroz via microscopia eletrônica de varredura;

d) Avaliar a incidência de grãos de arroz trincados antes, durante e após o processo de secagem;

e) Modelar matematicamente e simular em 3D a secagem de um produto agrícola (grão de arroz) via Software ANSYS CFX[®], considerando o sólido como um elipsóide de revolução;

f) Simular as distribuições de temperatura e umidade do produto e suas respectivas cinéticas de secagem e aquecimento em várias condições de processo;

g) Comparar os resultados teóricos e experimentais do teor de umidade e estimar o coeficiente de difusão de massa em várias condições experimentais.

Tecnologicamente esta pesquisa orienta-se para a redução do tempo de secagem, a otimização dos processos e da matéria prima, a redução de desperdícios, além do condicionamento das operações em relação ao meio ambiente. De um modo geral, o estudo proposto abordará diversos aspectos que o diferenciam dos trabalhos existentes na literatura, os quais estão listados abaixo:

- Acopla os fenômenos de transferência de calor e massa no grão de arroz em casca;
- Aplicado para a uma geometria complexa (elipsoide de revolução);
- Incorpora o efeito das variações dimensionais do produto;
- Analisa a estrutura do produto antes e após o processo.

1.2 Organização

No Capítulo 1, inicialmente é feita uma introdução sobre o assunto desta pesquisa. E por fim, os objetivos geral e objetivos específicos desta pesquisa foram destacados.

No Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica dos temas abordados na tese, o processo e os mecanismos de secagem de grãos de arroz em casca, com suas diversas classificações e características particulares, principalmente em secador de leito fixo (estufa) que é bastante utilizado para a secagem de arroz, bem como os modelos matemáticos de secagem de grãos em camada fina. Além de tópicos e características do software CFX, ferramenta indispensável nas atividades envolvidas ao longo da pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta-se a metodologia. Na experimental reportam-se os materiais utilizados nos experimentos e seus respectivos procedimentos. O capítulo ainda traz a matéria-prima investigada, descrição e procedimentos dos experimentos, e determinação das propriedades físicas e físico-químicas do grão de arroz em casca, parâmetros auxiliares, dados de secagem, umidades de colheita e fissuras. Na metodologia teórica apresenta-se a

modelagem matemática, a metodologia teórica, às considerações adotadas para o modelo matemático da transferência de calor e massa que ocorre no grão de arroz em casca, condições de contorno inicial e coeficiente de difusão mássica.

Alguns resultados obtidos são apresentados e discutidos no Capítulo 4, tais como: a verificação dos parâmetros básicos de secagem, como temperatura e umidade relativa do ar de secagem, forma e dimensões geométricas do arroz em casca. Cinéticas de secagem, Campo de umidades, campo de temperaturas experimental. Na simulação apresenta-se os ajuste de curvas entre as cinéticas de secagem preditas e experimentais, os erros mínimos quadráticos, curvas de temperaturas e os tempos encontrados para a secagem do grão de arroz.

No Capítulo 5 lista-se as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O arroz em casca

2.1.1 Características do grão

O arroz é uma planta herbácea pertencente à família das gramíneas. Os grãos de cereais são substâncias higroscópicas. A higroscopia caracteriza a capacidade que o grão possui de ceder ou absorver umidade do ar e representa uma das mais importantes características físicas dos grãos. A higroscopia do grão determina a sua capacidade de estar em permanente troca de água com o ar circundante (BORTOLAIA, 2011). As espécies do gênero *Oryza*, em geral, estão distribuídas em quase todos os continentes, incluindo espécies silvestres, híbridos naturais, cultivares comerciais, variedades tradicionais, híbridos, mutantes e linhagens de programa de melhoramento genético (FONSECA et al., 2006). A *Oryza* é uma espécie hidrófila, cujo processo evolutivo tem levado à sua adaptação às mais variadas condições ambientais.

O gênero *Oryza* possui duas espécies cultiváveis de arroz e 21 espécies silvestres. As duas espécies cultiváveis são *Oryza sativa* L. e *Oryza glaberrima* Steud. A primeira presume-se ser originária da Ásia e a segunda, da África Ocidental (ADORIAN, 2010). As espécies silvestres são encontradas em todas as regiões tropicais e subtropicais do mundo, cada uma com sua distribuição geográfica característica.

Segundo Gurgel (2006), duas formas silvestres são apontadas na literatura como precursoras do arroz cultivado: a espécie *Oryza rufipogon*, procedente da Ásia, originando a *Oryza sativa* e a *Oryza barthii*, derivada da África Ocidental, dando origem à *Oryza glaberrima*. A Figura. 2.1 ilustra as características da planta de arroz *Oryza sativa*.

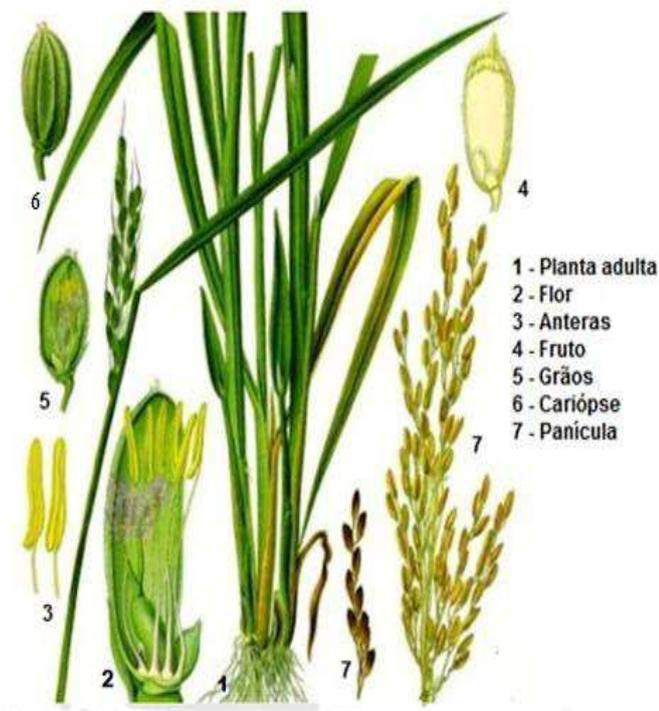


Figura 2.1 Características botânicas das plantas de *Oryza sativa* (Fonte: EPAMIG, 2012)

Para entender as características nutricionais do arroz, precisa-se saber que este cereal pode ser dividido em diferentes partes, dependendo da complexidade desejada. Para avaliarmos o processamento do arroz e suas implicações. Representando 89 a 93% da cariópse, o endosperma é o principal componente do arroz branco polido, sendo formado por grânulos de amido, algumas proteínas e outros constituintes como mostrado na Figura 2.2.

A Figura 2.2 mostra o grão de arroz e suas subdivisões segundo dados da EMBRAPA (2009).

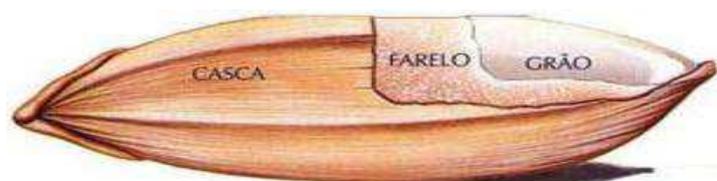


Figura 2.2 - Grão de arroz em casca (Fonte: <http://www.clicmercado.com.br/>).

A composição química do arroz varia em função das condições de pré-armazenamento, de armazenamento, da variedade e do sistema de beneficiamento (AMATO e ELIAS, 2005). A primeira delas, a casca, representa 22% do volume de cada grão. O germe (ou farelo) compõe 8% de cada grão, e é a parte mais nutritiva dele. O farelo é considerado subproduto obtido no polimento do grão descascado, sendo constituído de pericarpo, tegumento, aleurona, germe e porções superficiais e/ou pequenas partículas de endosperma amiláceo. O grão ou miolo é a parte mais consumida do cereal e representa cerca de 70% dele (ICTA/UFRGS, 2010). O arroz com casca contém, em média, de 6,7 a 8,3% de proteínas, de 2,1 a 2,7% de lipídeos, de 3,4 a 6,0% de cinzas e de 70,5 a 84,2% de carboidratos.

Há várias classificações para o arroz, dentre elas citam-se: a) Tipo I, que são grãos altamente selecionados onde se tem até 10% no máximo de grãos quebrados; b) Tipo II, onde o critério de seleção é de 11 a 20% de grãos quebrados, e c) Tipo III, onde se tem uma seleção média, com 21 a 30% de grãos quebrados (NEVES e PEREIRA, 2007).

Dentre os fatores que influenciam na qualidade do grão de arroz, é importante destacar: as características varietais, as condições de desenvolvimento da cultura, o manejo e as condições climáticas, a época as condições de colheita; os métodos, os sistema de secagem; os sistema de armazenamento; os métodos de conservação, os processos e as operações de beneficiamento industrial dos grãos.

Krishnan et al. (2011) comentam que a maior parte do arroz está atualmente cultivada nas regiões em que as temperaturas estão acima do ótimo para o crescimento (28/22 °C). Qualquer aumento da temperatura média ou episódios de altas temperaturas durante as fases sensíveis podem reduzir drasticamente a produção de arroz. Em ambientes tropicais, a temperatura elevada já é uma das principais tensões ambientais limitantes da produtividade do arroz; temperaturas relativamente mais altas provocam reduções no peso dos grãos e na sua qualidade.

As características fisiomorfológicas dessa cultivar (*Oryza sativa* L.) estão descritas em Heinemann et al. (2009). Essa cultivar foi parametrizada e validada para o modelo

ORYZA/APSIM 2000 e os seus coeficientes fenológicos (Ramo da Ecologia que estuda os fenômenos periódicos das plantas e suas relações com as condições ambientais como temperatura, luz e umidade) (LORENÇONI et al., 2010). O sistema de produção mais adequado para cada uma das cultivares, os seus pontos fortes e os seus pontos fracos devem ser demonstrados para serem cultivados de modo mais racional (BRAZ et al., 2005).

De uma maneira mais abrangente, considera-se dois grandes ecossistemas para a cultura do arroz que são: o de várzeas e de terras altas, também conhecido como arroz de sequeiro, englobando todos os sistemas de cultivo de arroz no país (STONE, 2007). O arroz é um dos cereais mais produzidos no mundo, caracterizando-se como principal alimento para mais da metade da população mundial (FAO, 2010).

Atualmente, o cultivo de arroz de terras altas encontra-se em um vasto número de ambientes, que envolve desde grandes áreas mecanizadas até pequenas propriedades rurais, em produção de subsistência. Dados do (IBGE, 2014) indicam que em 2014, houve um acréscimo de 0,7% na produção de arroz, 10,6 % na produção de soja e diminuição de 3,1% na produção do milho. O volume de produção desses cereais está concentrado nas regiões: a) centro-oeste com 40,5% da produção nacional, b) região sul responde por 38%, c) o nordeste com 9,4% da produção e d) sudeste 9,1% do total e o restante é produzido no norte, cerca de 6 milhões de toneladas de grãos.

Diante dessa situação, é necessário que a cadeia orizícola dirija esforços na geração de incentivos para aumento na demanda, na agregação de valor ao produto final, na oferta de tipos especiais de arroz, como busca de novos mercados e estímulo para aumento do consumo pela população brasileira com ações de *marketing* mais eficientes (BARATA, 2005; WANDER, 2006; ZAMBERLAN e SONAGLIO, 2011). Segundo Morais et al. (2006), a forte atuação do programa brasileiro na melhoria da qualidade de grãos do arroz de terras altas ocorreu devido à maior preferência pela característica longo fino, a classe de grão agulhinha, que passou a ser caracterizada como “arroz de boa qualidade”.

Breseghello et al. (2011) comentam que além da melhoria na qualidade de grãos, a introdução de germoplasma do Programa de Recursos Genéticos do CIAT (International Center for Tropical Agriculture) no programa brasileiro contribuiu significativamente para a melhoria da arquitetura da planta de arroz de terras altas. Isto se deveu à redução da altura média, maior perfilhamento, folhas eretas e curtas, e panículas abaixo do dossel, características que contribuíram sobremaneira para a redução do acamamento, constituindo, assim, o ideótipo almejado pelos melhoristas brasileiros. Outra característica importante no melhoramento dessa cultura consistiu na redução de seu ciclo, uma vez que a precocidade está atrelada à viabilidade de rotação com outras culturas para realização de safrinha.

2.1.2 Características do arroz de terra alta ou sequeiro BRSMG - CONAI

Escolher uma cultivar a ser semeada é uma tarefa importante no planejamento de uma lavoura; as principais características a serem observadas são: ciclo, altura da planta, resistência a doenças, qualidade do produto colhido e potencial de produção de grãos. A ‘Conai’ é oriunda do cruzamento entre as cultivares Confiança e Aimoré, realizado na Embrapa Arroz e Feijão em 1998. Procurou-se, com esse cruzamento, reunir em uma só cultivar as características de precocidade da ‘Aimoré’ com a qualidade de grão longo-fino da ‘Confiança’, o que foi obtido com a ‘Conai’. Essa mesma cultivar (BRSMG-CONAI) foi plantada para esta pesquisa no Assentamento Florestan Fernandes – Goiana-PE no período de 01/06/2013 a 06/10/2013.

A planta de arroz é bastante exigente em nutrientes, sendo necessário que eles estejam prontamente disponíveis nos momentos de demanda, para não limitar a produtividade. Depois do potássio (K) e do (P) fósforo, o nitrogênio (N) é o nutriente que a planta de arroz mais acumula (EMBRAPA, 2009).

Os solos do assentamento caracterizam-se por ser limitado quanto à disponibilidade de nutrientes, sendo ácidos, com baixa retenção de água, mesmo sendo uma região com período regular de chuva. Este solo, por ser bastante intemperizado e argissolo, apresenta-se bastante deficiente em P e K, o que torna a prática da adubação fosfatada e potássica imprescindível à obtenção de ótimos níveis de produção (CRUSCIOL et al., 2006).

Tonello et al. (2013) comentam sobre a importância desses dois elementos químicos (K e P) para o plantio do arroz de terra alta: o fósforo (P) é o nutriente que apresenta menor disponibilidade no solo devido, principalmente aos processos de fixação e adsorção que o indisponibiliza para as plantas. Dentre os macronutrientes primários exigidos pela cultura do arroz, é o elemento requerido em menor quantidade, porém sua deficiência acarreta grandes decréscimos no desenvolvimento e na produtividade, ou seja, tem papel fundamental no metabolismo da planta. Já o potássio (K), fisiologicamente tem ação somente funcional, sendo de extrema importância na regulação osmótica da planta, na ativação enzimática e na absorção iônica. Desta forma, com adubações adequadas possibilita maior resistência às doenças, ao acamamento, favorece a formação de grãos, minimizando o efeito negativo da deficiência hídrica e, conseqüentemente, proporcionando maiores rendimentos na produção.

Fageria (2007) verificou que a utilização de adubação fosfatada na cultura do arroz promove incremento de produtividade, maior perfilhamento e número de panículas por m², aumenta a altura de plantas e número de folhas, além de auxiliar o melhor desenvolvimento radicular. O nitrogênio (N) é componente da clorofila com expressiva participação no aumento da área foliar da planta, a qual aumenta a eficiência na interceptação da radiação solar e a taxa fotossintética e, conseqüentemente, a produtividade de grãos (FAGERIA, 2007). Na maior parte das áreas onde o arroz é cultivado, o sulfato de amônia (NH₄)₂SO₄, é um composto inorgânico usado como fertilizante e o principal fator limitante à produtividade por ser um fertilizante nitrogenado constitui a maior fração do custo total de produção do grão.

Ahlgren et al. (2008) afirmam que o elevado custo dos adubos nitrogenados, em muitas situações, tem inviabilizado o aumento da produção de pequenos agricultores, principalmente em regiões com algum tipo de limitação para o cultivo. No entanto, especialmente em regiões desenvolvidas, onde maiores quantidades de N são aplicadas nos solos, ocorrem problemas devido ao uso excessivo desse nutriente, principalmente nas áreas da saúde e do meio ambiente, devido ao seu grande potencial poluidor.

Cancellier et al. (2011) e Fidelis et al. (2012) avaliaram a eficiência no uso de nitrogênio em solos de terras altas de cultivares de arroz e verificaram existência de

variabilidade genética entre os genótipos avaliados. Os autores também avaliaram a eficiência no uso de N em cultivares de arroz irrigado verificando ao final do estudo diferenças entre os genótipos quanto a eficiência de absorção do nutriente. Portanto, o uso racional da adubação nitrogenada é fundamental, não somente para aumentar a eficiência de recuperação, mas também para aumentar a produtividade da cultura, diminuir o custo de produção e os riscos de poluição ambiental.

Assim, no momento de se escolher uma cultivar é necessário analisar suas características visando otimizar seu uso dentro da região e do sistema agrícola desejado (CASTRO et al., 2013). Além disso, ainda são escassas as informações sobre o comportamento das cultivares lançadas recentemente, em cada região de cultivo.

A Figura 2.3 mostra o plantio do arroz de terra alta (BRSMG – CONAI) ao longo de seu ciclo vegetativo.

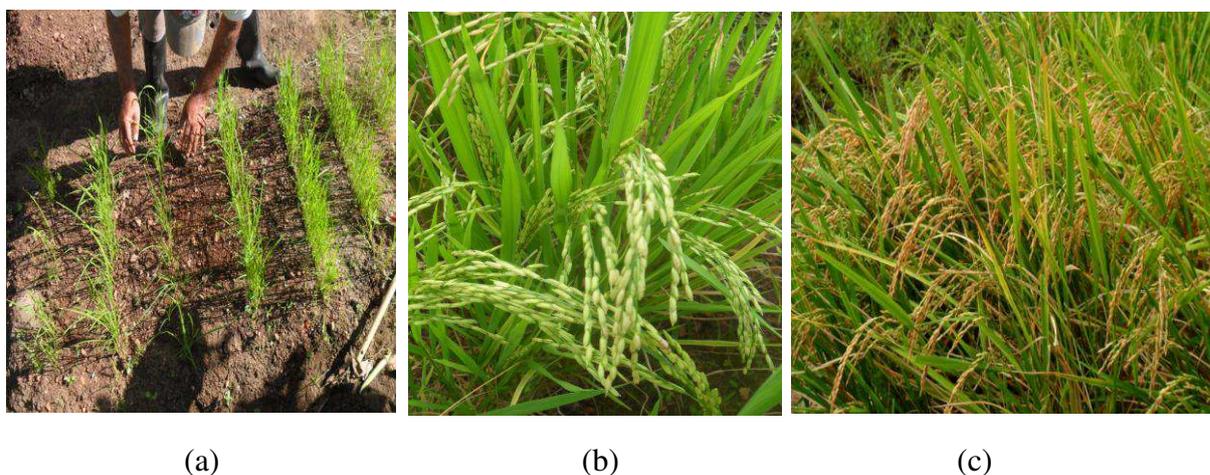


Figura 2.3 - Arroz de terra alta (BRSMG – CONAI), (a) 15 dias, (b) 82 dias (c) 103 dias após o plantio.

A Tabela 2.1 mostra os dados experimentais submetidos à análise individual das características físicas do grão de arroz BRSMG – CONAI avaliados pela Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (Epamig), no ano de 2012.

Tabela 2.1 Características físicas do grão de arroz BRSMG – CONAI

Características da planta	Descrição
Cor das folhas	Verde-escuro
Floração média - 50%	76 dias
Maturação Completa	108 dias
Altura da planta	87 cm
Acamamento	Resistente
Comprimento do grão descascado	7,42 mm
Largura do grão descascado	2,30 mm
Espessura do grão descascado	1, 88 mm
Relação comprimento/largura	3,23
Peso de 1000 grãos com casca	29,0 g
Classe	Longo Fino
Rendimento de grãos inteiros	54%
Colheita	30 a 40 dias após o florescimento bem depois da maturação fisiológica dos grãos

Fonte: Epamig (2012)

A Tabela 2.2 mostra os dados da análise físico-química do arroz in natura BRSMG-CONAI realizada pela SCIENTEC (2014).

Com base nos constituintes apresentados na Tabela 2.2 constata-se a riqueza das partículas com elevado teor de proteínas, Cálcio e carboidratos. A amostra de 600g do grão de arroz foi retirada do campo de forma manual e separados cuidadosamente, os grãos danificados por ataque de insetos, com fissuras entre a pálea e o lema ou devido ao próprio manuseio. Os grãos intactos, após a seleção foram colocados em sacos plásticos herméticos e enviados para o laboratório de análise Físico-Química SCIENTEC – (2014). A primeira amostra foi colhida no campo após 16 dias do período de maturação do grão. Isto é, 24 dias a mais que o prazo ideal para colheita recomendado pela literatura. Os grãos na forma que

foram adquiridos, com teor de umidade reduzido no campo contêm materiais inertes e sementes quebradas devido às operações a que foram submetidos.

Tabela 2.2 - Análise físico-química do arroz BRSMG-CONAI.

Análise	Resultados 1	Resultados 2	Resultados 3	Média
Umidade (%)	10,42	10,15	10,75	10,44
Minerais (%)	4,00	3,86	3,84	3,90
Proteínas (%)	6,65	6,71	6,73	6,70
Lipídios (%)	3,25	3,39	3,67	3,44
Acidez total (%)	1,58	1,58	1,58	1,58
pH	6,35	6,35	6,35	6,35
Sódio (mg/100g)	21,92	22,87	21,77	22,18
Cálcio (mg/100g)	178,00	174,00	176,00	176,00
Carboidrato (%)	75,68	75,89	75,01	75,53
Energia (kcal/100g)	358,57	360,91	359,99	359,82

Fonte: SCIENTEC (2014)

No processo de maturação fisiológica do arroz, podem ser distinguidos basicamente três estágios. O primeiro é denominado estágio leitoso, caracterizando-se pelo fato de a cariopse apresentar-se tipicamente verde, com elevado conteúdo de água. O segundo é o estágio de massa, começando quando a cariopse se torna mais consistente e vai até quase completar seu desenvolvimento total. No último, denominado estágio de maturação propriamente dito, a semente se encontra completamente madura, o endosperma completou seu desenvolvimento e se apresenta branco, sem pontuações verdes. A maturação, assim como a floração, se processa das espiguetas do ápice para as da base da panícula.

Brusone, doença que provoca severos danos à qualidade do grão de arroz, ao lesionar o colmo da planta, especialmente na base da panícula, interrompe a passagem da seiva e impede o processo normal de enchimento (EMBRAPA, 2009). Apesar das importantes inovações tecnológicas conseguidas nas décadas de 80 e 90, a pesquisa agrônômica brasileira

segue com muitos desafios no que se refere ao arroz de terras altas, e a busca de soluções para os problemas da cultura é um ponto de destaque. O maior desafio parece ser a consolidação da cultura, de forma sustentável, como um componente dos sistemas de produção de grãos, especialmente em sistema de plantio direto.

Apesar do cultivo BRSMG - CONAI ser uma variedade superprecoce, isto é, seu ciclo vegetativo (semeadura à colheita) é mais rápido do que as demais variedades de arroz. Ela possui alto potencial genético para produtividade de grãos com teor de amilose intermediário (27,5%), tornando-se uma excelente opção para os produtores de arroz de sequeiro do estado de Pernambuco. É a primeira cultivar de arroz de sequeiro superprecoce que possui grãos do tipo agulhinha, os preferidos e os mais valorizados do mercado. O teor de amilose está relacionado com as propriedades texturais do arroz, como maciez e coesão, e ainda com sua cor, brilho e volume de expansão, fornecendo informações sobre as mudanças que ocorrem durante o processo de cocção. Arroz com alto teor de amilose, normalmente, apresenta grãos secos e soltos, que após o resfriamento podem ficar endurecidos (SOUZA e AZEVEDO 1994). O arroz de terras altas que antes já foi chamado de arroz de sequeiro foi uma das culturas mais importantes na abertura das fronteiras agrícolas (CARVALHO, 2006).

O arroz (BRSMG - CONAI) é uma espécie hidrófila, cujo processo evolutivo levou-a a se adaptar a diferentes condições do ambiente, podendo ser cultivado no sistema de terras altas, no qual a cultura poderá ser conduzida sem irrigação, dependendo da água provinda da chuva, ou com irrigação suplementar, através de aspersão (GUIMARÃES et al., 2008). A cultivar BRSMG-CONAI foi lançado para o Estado de Minas Gerais, é um exemplo de material melhorado geneticamente para obter tolerância ao estresse do ambiente, cujas características de precocidade e tolerância à seca, a recomendam para cultivo neste Estado, que é bastante vulnerável aos veranicos (SOARES, 2005).

Avaliando o progresso do melhoramento genético do arroz de terras altas no período de 1950 a 2001, Souza et al. (2007) observaram que os cultivares precoces reduziram a altura média em 21 cm e os tardios em 38 cm, além de o ciclo ter tido acréscimo médio de dez dias para os precoces e redução de 13 dias para os tardios, no período avaliado. Contudo, o

aumento da produtividade foi de 0,3 e 2,09% ao ano, nos grupos precoce e tardio, respectivamente. (SOARES et al., 2005; BRESEGHELLO et al., 2006) consideram cultivares de arroz de terras altas com a floração próxima aos 76 dias após o plantio são considerados como cultivares precoces.

Para uma ótima produção da cultivar BRSMG-CONAI, o espaçamento de 30 cm entrelinhas proporciona a maior produtividade de grãos, independente da densidade de semeadura. Contudo, a densidade de 80 sementes por metro linear é a que mais contribuiu para a produtividade de grãos (LACERDA, 2012). Em arroz de terras altas, tem-se recomendado espaçamento na faixa de 40 a 50 cm entrelinhas e densidade de semeadura de 60 a 70 sementes, por metro (SOARES, 2005).

Nesse sistema, o arroz era cultivado por um ou dois anos, em áreas recém desmatadas, com baixo índice tecnológico, o que concorria para uma decrescente produtividade no segundo ou terceiro ano de cultivo. Esgotadas essas áreas, o produtor partia em busca da abertura de novas glebas e, assim, caracterizou-se o arroz de sequeiro como sendo uma cultura nômade, principalmente na região do cerrado brasileiro, onde os solos são geralmente distróficos-álícos (solos de fertilidade média ou baixa) características muito bem suportada pelo gênero “ORYZA”. Assim, definiram-se para cada cultivar, as regiões homogêneas de adaptação, as épocas de semeadura, as principais exigências quanto às condições físicas e químicas dos solos, o adequado manejo cultural bem como, quanto aos principais riscos biológicos (pragas ou doenças) que podem influenciar diretamente na performance agrônômica destas cultivares de arroz como visto na Tabela 2.3.

As exportações mundiais de arroz são lideradas pela Tailândia, seguida do Vietnã, Índia, Paquistão e Estados Unidos. Estes 5 maiores exportadores globais respondem por 80% de todo o comércio mundial. Comparando os períodos de agosto a julho de 2012/13 e 2013/14, observa-se que o montante das exportações de arroz cresceu 7,8%, destacando-se o aumento de 46,1% na comercialização do arroz. (CONAB, 2014). No Brasil a produção projetada desse cereal (arroz) para 2020/2021 é de 13,7 milhões de toneladas. Esse acréscimo de produção deverá ocorrer especialmente por meio do crescimento de produção do arroz

irrigado, já que o arroz de terras secas tem reduzido sua expansão no Brasil devido à menor incorporação de novas terras em áreas de fronteira agrícola. A Tabela 2.3 a seguir, apresenta algumas cultivares que podem se adaptarem em outros estados do Nordeste brasileiro.

Tabela 2.3 - Cultivares de arroz de terra alta recomendadas para Minas Gerais por ocasião do seu lançamento.

Cultivar	Tipo de cultura	Ano de lançamento
Caiapó	Sequeiro tradicional	1992
	Irigada por aspersão	
Canastra	Sequeiro tradicional	1996
Confiança	Sequeiro tradicional	1996
Carisma	Sequeiro tradicional	1999
Primavera	Sequeiro tradicional	2000
BRSMG CONAI	Sequeiro tradicional	2004
BRSMG Curinga	Sequeiro tradicional	2004

Fonte: Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG).

Para produtores que se interessam em plantar uma dessas variedades, as recomendações técnicas serão feitas de maneira diferenciada, levando-se em conta, basicamente, a intensidade da tecnologia aplicada pelo produtor. Para isso, deve-se considerar dois sistemas ou usos de tecnologia: um de baixa tecnologia, para agricultores com baixo uso de insumos, máquinas e equipamentos e mão de obra basicamente familiar. A produção obtida destina-se ao consumo familiar e o excedente é comercializado. Outro de média tecnologia onde o uso de insumos e mecanização é mais intenso. A partir deste conjunto de informações técnicas, espera-se sobretudo, a redução das perdas de produção do grão de terra alta, a elevação da produtividade de cada variedade e o aumento da rentabilidade nas diferentes regiões agrícolas do Estado de Pernambuco pode ser melhorada.

Walter et al. (2008) enfatizam que, cada vez mais, o arroz se destaca não somente como um dos principais alimentos para a população, mas também como um alimento de qualidade, que pode auxiliar na manutenção da saúde, devendo ser incentivada a produção desse cereal e a continuidade das pesquisas. A isto se junta também a exigência, cada vez maior dos consumidores nacionais, de padrões mais elevados de qualidade, obrigando os setores de produção e de pesquisa serem cada vez mais eficientes.

Apesar de toda a capacidade produtiva do Brasil, muito ainda tem que ser feito para melhor atender à exigência dos mercados nacional e internacional quanto à qualidade dos grãos, preocupação primordial, fazendo com que as práticas adotadas da colheita ao armazenamento sejam as mais adequadas (FERRARI FILHO, 2011).

De maneira geral, a qualidade de grãos de arroz pode ser classificada em quatro grandes grupos: comportamento no beneficiamento; qualidade comestível, de cocção, de processamento; valor nutritivo; e adequação do produto aos padrões de comercialização (STONE, 2007). O arroz (*Oryza sativa* L), originário do Sudeste Asiático, por exemplo, destaca-se por suas qualidades nutricionais como suporte alimentar para mais de 50% da população mundial, em cuja dieta alimentar provê 20% das calorias, superando o trigo e o milho que participam com 19% e 5%, respectivamente (FAO, 2010). Após o trigo, é o cereal mais produzido no Mundo sendo cultivado em todos os continentes.

De acordo com os dados da FAO (2010), cerca de 150 milhões de hectares de arroz são cultivados anualmente no mundo, produzindo 590 milhões de toneladas, sendo que mais de 75% desta produção é oriunda do sistema de cultivo irrigado. Aproximadamente 90% de todo o arroz do mundo é cultivado e consumido na Ásia. A América Latina ocupa o segundo lugar em produção e o terceiro em consumo.

2.1.3 Umidades de colheita e trincas nos grãos

Produtos agrícolas como arroz, milho e soja são utilizados em larga escala em todo o mundo em função de seu alto valor alimentício. Assim, com a utilização desses produtos em larga escala é crescente a preocupação com seu armazenamento e conservação e, para a

manutenção de sua alta qualidade, entre outras recomendações, é necessário a priori que o produto seja colhido sadio e antecipadamente, tendo em vista minimizar as perdas causadas no campo.

Após a colheita, toda a safra deve ser destinada a local de armazenamento. Geralmente, quando produzidos em grande escala, os produtos são acondicionados em silos ou armazéns. Para a utilização dessas unidades armazenadoras os produtos agrícolas devem atender a uma margem de segurança quanto à umidade, pois umidade combinada com temperaturas elevadas intensifica o processo de deterioração dos grãos armazenados (ALENCAR et al., 2009).

O teor de umidade do grão pode ser representado em base úmida (b.u.) ou base seca (b.s.). O primeiro é usado na comercialização e o segundo em cálculos específicos. O arroz colhido tardiamente, com umidade muito baixa, afeta a produtividade pela degrana natural, ocorrendo o trincamento dos grãos e a redução do rendimento de grãos inteiros no beneficiamento. Enquanto que a colheita antecipada, com umidade elevada, aumenta a proporção de grãos malformados e gessados (SMIDERLE e DIAS, 2008).

Quanto menos tempo decorrer entre a colheita e a secagem, menores serão os prejuízos para a qualidade do produto, seja ele destinado a grão ou a semente. Neste trabalho, o teor de umidade do grão de arroz BRSMG-CONAI, variou de 17 a 36% devido a mudança climática e dias diferentes para as cada colheita da amostra. No processo de secagem, os produtos biológicos apresentam ou atingem os seguintes teores de umidade: teor de umidade inicial, teor de umidade crítico e teor de umidade de equilíbrio.

Bihain (2011) argumenta que o teor de umidade pode ser considerado o fator mais importante na manutenção da qualidade dos produtos armazenados, pois a conservação da umidade em nível adequado para a armazenagem minimiza o desenvolvimento de microorganismos e pragas. Ou seja, quando não ocorre mais a transferência de massa (neste caso água), o grão atinge a umidade de equilíbrio.

Segundo Puzzi (2000), os grãos ou sementes alcançam sua maturidade fisiológica (momento que possuem o máximo de matéria seca) em níveis de umidade que impedem a colheita mecânica, além de não permitirem armazenamento seguro. Na maioria dos grãos, estes níveis de umidade estão acima de 30%. Neste caso, a função dos secadores é essa: reduzir a umidade do produto para cerca de 13%.

A deterioração de grãos ocorre devido ao elevado teor de água por ocasião da colheita, e entre as técnicas envolvidas na conservação das qualidades desejáveis de produtos de origem vegetal, a secagem constitui uma das operações de suma importância (CORREA et al., 2006).

O arroz em casca fisiologicamente maduro, recém-colhido pode conter umidade entre 18 e 28% em base úmida. Medir a distribuição de umidade dentro do grão de arroz é muito difícil, devido ao seu pequeno tamanho. Por meio da secagem artificial, o excesso de água do grão é removido até limites adequados, minimizando alterações metabólicas e danos pela ação de insetos e fungos (OLIVEIRA et al., 2010). Para obter alta qualidade do arroz e evitar problemas no armazenamento, o teor de umidade do produto deve ser reduzido para 12 a 14% em base úmida, em qualquer que seja o método de secagem utilizado. Pois, quando o arroz é colhido muito úmido ou tardiamente, com baixo teor de umidade, a produtividade e a qualidade dos grãos são prejudicadas.

A fissura no grão, pode ser definida como pequenas trincas decorrentes de uma ação mecânica interna ao grão, originada por condições externas não mecânicas e que não ocasionam a separação do grão. A quebra é o efeito decorrente da aplicação de uma força mecânica externa ao grão, consistindo de sua divisão em pequenos pedaços (BRASIL, 2009). Se a taxa de transporte de água do interior para a superfície torna-se inferior à taxa de evaporação da água na superfície, aumenta o gradiente de umidade entre o interior e a superfície dos grãos, gerando tensões internas que pode provocar danos mecânicos por trincamento além aumentam a suscetibilidade à quebra dos grãos que podem constituir-se em porta de entrada para microrganismos como fungos e outros. Assim, os choques térmicos, em que a temperatura de secagem é elevada ou baixada muito rapidamente, devem ser reduzidos

ao máximo, pois podem provocar maior incidência de grãos quebrados, depreciando o produto final (EMBRAPA, 2004). Essa quebra fica bem mais perceptível ao se retirar a casca do grão de arroz como mostrado na (Figura 2.4).

A casca do grão tem função protetora, reguladora e delimitante, ou seja, controla a velocidade de e desidratação evitando ou diminuindo os possíveis danos causados pelas pressões desenvolvidas durante o processo de secagem.



Figura 2.4 - Grão de arroz BRSMG - CONAI quebrado e seco a 60°C.

Tendo em vista a umidade do arroz, que é decrescente na fase de maturação, pode ser alterada, na fase final, por condições ambientais, com reflexos negativos ou positivos na aparência do grão beneficiado. O arroz que amadurece rapidamente em condições de elevada temperatura tende a ficar opaco, enquanto que o arroz que amadurece lentamente em condições amenas tende a ser mais translúcido e resistente ao trincamento e a quebra.

Outros pesquisadores afirmam também, que o arroz colhido com grau elevado de umidade dos grãos requer secagem imediata para evitar fermentação, afetando custos com mão de obra e energia na secagem além de ocorrência de defeitos, tais como grãos verdes, gessados e mal formados (BINOTTI et al., 2007).

Por sua vez, a colheita de grãos realizada com baixo grau de umidade provoca aumento de degrane natural (queda natural das sementes da panícula do arroz), acamamento de plantas e ataque de insetos, além da diminuição do percentual de grãos inteiros no beneficiamento, afetando também a germinação e o vigor das sementes (SMIDERLE e DIAS, 2008). As panículas dos grãos passam por períodos sucessivos de umedecimento e secamento no campo, causando fissuras ou trincas, que são a causa principal dos grãos quebrados no beneficiamento (CAZETTA et al., 2006). A quebra dos grãos ocorre, principalmente, durante as operações de descascamento e de brunimento, sendo que a maioria dos grãos quebrados durante o beneficiamento já apresenta fissuras anteriores ao processo, decorrentes de alterações climáticas e ocorrências fitossanitárias na pré-colheita e de efeitos operacionais da colheita e da secagem principalmente (ELIAS e OLIVEIRA, 2011).

Em condições usuais de processamento, os grãos trincados quebram durante o descasque, dependendo da quantidade e tamanho das trincas existentes no grão. Isso leva a crer, que a resistência do grão de arroz a quebra, pode está relacionada com suas características físico-químicas, condições ambientais e do processo aos quais o grão é submetido. (HENDERSON, 1958), trabalhando com arroz em casca, mostrou que um aumento da temperatura de secagem e, conseqüentemente, o aumento do gradiente interno de temperatura, causava o acréscimo de grãos fissurados. O autor não levou em consideração o gradiente interno de umidade. Enquanto que neste trabalho, o número maior de grãos fissurados foram causados não somente pela ação do ar de secagem a 70°C, mas também pelo alto teor de umidade dos grãos, provocado pelas chuvas e garoas no momento da colheita para a amostra. Ou seja, a qualidade do grão é o somatório de todos os atributos genéticos, físicos e fisiológicos que afetam a capacidade dos grãos de originar o produto de alta produtividade ou seja, A qualidade desse produto deve ser buscada em todas as etapas do processo de secagem.

O arroz colhido tardiamente, com umidade muito baixa, afeta a quantidade de grãos inteiros, ocorrendo o trincamento dos grãos e a redução do rendimento de grãos inteiros no beneficiamento (EMBRAPA, 2009). Ribeiro et al. (2012) comentam que toda a estrutura do grão de arroz encontra-se envolvida pela lema e pálea, que constituem a casca, sendo que a

abertura na casca (fissura) é determinante para que ocorra infestação de grãos armazenados. Segundo Lopes (1989) um sólido higroscópico, como é o caso de grão de arroz, quando exposto a um ambiente cuja pressão de vapor de água é maior ou menor que a pressão de vapor da água no seu interior sofre, respectivamente, um processo de adsorção ou desorção de água. Esses processos tendem a gerar, no interior do sólido, um gradiente de umidade. Este gradiente tende a desaparecer com o tempo à medida que todo o sólido atinge uma condição de equilíbrio, na qual permanece. A não ser que as condições externas sejam novamente alteradas.

Pesquisadores da EMBRAPA (2009) afirmam que a quebra dos grãos, verificada durante o processo de beneficiamento, é causada por fissuras e/ou regiões de menor resistência dos grãos. Embora as causas que as determinem não estejam bem elucidadas, sabe-se que o manejo inadequado da lavoura (semeadura, adubação e colheita), fatores de clima (temperatura, umidade do ar e precipitação pluvial) e característica varietal contribuem para o desenvolvimento das mesmas, provocando quebra dos grãos inteiros, redução da qualidade física e do preço do produto.

A temperatura de secagem influencia também na quantidade e tipo de fenda e os inclina a rachar as sementes de arroz além de afetar a germinação, principalmente quando as fendas estão associadas com dano fisiológico, presumivelmente causado pela alta temperatura de secagem (MENEZES et al., 2011). No caso em que a velocidade de secagem é maior do que a taxa admissível, os grãos vão ser submetidos a um choque térmico e, conseqüentemente, irão aumentar o número de trincas e em seguida, as fissuras nos grãos como mostrado na Figura 2.5

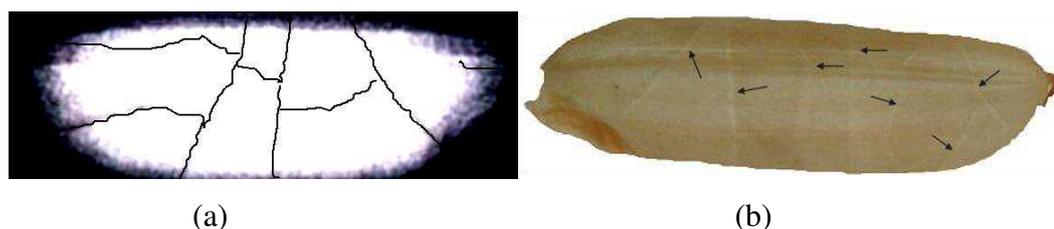


Figura 2.5 Fissuras no grão de arroz sem casca, seco na temperatura de 70°C. a) vista em 2D e b) vista em 3D.

Iguaz et al. (2006) observaram que grande quebra em arroz pode ocorrer porque os grãos já foram enfraquecidos por rachaduras (fissuras) de estresse causado pela rápida absorção de umidade ou dessorção durante a colheita, manuseio e / ou processamento. Os autores destacaram também que a principal causa de quebra está relacionada à absorção de água, mais especificamente, quando a umidade dos grãos está em torno de 16%, em (b.s.), pois, ocorrendo chuva, os grãos reidratam bruscamente, o que causa o trincamento e posterior quebra no beneficiamento.

Kunze e Choudhury (1972) argumentam que compreender os efeitos desses processos sobre fissuras grão de arroz é importante para controlar e otimizar as condições de secagem para maximizar a qualidade do grão. Teorias sobre a formação de trincas, como resultado da secagem, baseiam-se na resposta de sementes de arroz para tração e de compressão tensões, devido aos gradientes de teores de umidade dentro do núcleo. Os gradientes de umidade criados durante o período de secagem fornecem o potencial para possíveis trincas mais tarde.

2.2 Fenômeno de difusão mássica

O fenômeno de redução do teor de água 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 (GONELI et al., 2007). Fortes e Okos (1981) descrevem detalhadamente a teoria da difusão, da capilaridade e da vaporização para os materiais porosos. Nas equações governantes destes modelos, a difusividade mássica da água através do grão é um parâmetro que necessita ser conhecido e é específico para cada tipo de material empregado. Em função de sua importância tecnológica, a secagem de grãos ainda hoje continua sendo alvo de pesquisas, sendo que na literatura existem poucos dados referentes a valores de difusividade mássica em grãos, entre eles, o grão de arroz.

Devido à complexidade da geometria considerada nesta pesquisa (elipsóide de revolução), a solução analítica das equações que regem o fenômeno físico se torna complexa. Neste caso, uma solução numérica é mais apropriada. Pois, os modelos de difusão de líquido para a secagem de arroz em casca foi analisado por diversos estudiosos entre eles, estão

Hacihafizoğlu et al. (2008) e Cihan et al. (2008). Mariani et al. (2008) concluíram que a difusividade térmica na secagem de um produto diminui linearmente com o teor de umidade e que recentemente tem despertado interesse crescente na evidência e na análise e solução de problemas inversos de transferência de calor.

Vários trabalhos têm sido reportados na literatura para descrever o transporte difusivo de calor e/ou massa utilizando os modelos de secagem baseados na teoria da difusão líquida, tais como: Carmo e Lima (2008), Cihan et al. (2008) e Goneli (2008). Park et al. (2007) enfatizam que a difusão baseada na segunda Lei de Fick, descreve que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. Esse fenômeno ocorre em líquidos e sólidos, assim como em gases. Entretanto, uma vez que a transferência de massa é altamente influenciada pelo espaçamento molecular, a difusão ocorre mais facilmente em gases do que em líquidos e mais facilmente em líquidos do que em sólidos.

Carmo e Lima (2008) consideraram a teoria de difusão líquida no estudo da simulação numérica da transferência de massa no interior de sólidos esferoidais oblatos, via método dos volumes finitos, e concluíram que o mesmo foi consistente e que pode ser utilizado também para resolver casos como aqueles que incluem discos e esferas com propriedades variáveis ou constantes.

Cihan et al. (2008) estudaram o comportamento da secagem intermitente de arroz com casca através do modelo de difusão líquida com base em uma geometria esferoidal prolato e outra cilíndrica. Os autores observaram que os resultados do modelo baseado na difusão líquida com a geometria esferoidal prolato foi mais precisa em comparação a outra geometria.

Goneli (2008) comenta que a teoria da difusão líquida assume que não há influência da capilaridade e despreza os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, dada a dificuldade de quantificar esses múltiplos efeitos na massa de produto, e também considera que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente, o que pode induzir discrepâncias entre os resultados encontrados. Portanto, a transferência de massa pode ser definida como a massa em trânsito, resultado da diferença de concentração de uma espécie

em uma mistura ou a migração de uma ou mais espécies químicas em um dado meio, podendo esse ser sólido, líquido ou gasoso. O transporte das espécies químicas pode ser realizado por dois mecanismos: difusão e/ou convecção. Portanto, deve-se considerar que a difusão em produtos agrícolas durante a secagem é um complexo processo que pode envolver diferentes mecanismos, como a difusão molecular, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica.

Oliveira et al. (2006) comentam o seguinte, como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem, e por não ser intrínseca ao material, convencionou-se chamá-la, então, de difusividade efetiva. Assim, todas as considerações, tais como: teor de umidade inicial do produto, teor de umidade final que o produto pode chegar (equilíbrio), modo como a água está relacionada com a estrutura do sólido e como o transportes de água é feito do interior para a superfície do sólido durante a secagem, servem para fundamentar o fenômeno da secagem.

2.3 Secagem de grãos

2.3.1 Fundamentos

A secagem é uma operação de retirada forçada da umidade pela passagem de ar aquecido pelos grãos; é realizada geralmente em secadores mecânicos. Sua finalidade maior é reduzir o teor de umidade do produto a nível adequado à sua estocagem por um período prolongado, mantendo ao máximo a sua qualidade. Portanto, a secagem é caracterizada pela evaporação da água do material biológico. Ou seja, a secagem, seja por qualquer sistema, baseia-se na propriedade pela qual o aumento da temperatura do ar diminui a sua umidade e o torna capaz de absorver a umidade disponível em outros corpos. As considerações sobre como água é transportada do interior do sólido à superfície fundamentam as teorias existentes na secagem.

Respeitando-se os parâmetros técnicos e operacionais, a secagem pode ser realizada nos sistemas, processos e/ou métodos que utilizem ar não aquecido (também denominados

métodos de secagem com ar natural, com ar ambiente ou com ar frio) e/ou naqueles com ar aquecido (também denominados métodos de secagem artificial ou forçada). Estas técnicas estão sendo constantemente estudada e aperfeiçoada para obtenção de produtos com maior qualidade e menor tempo de processamento.

Dalpasquale et al. (2010) comentam que ao atingir a maturidade fisiológica, a maioria dos grãos apresenta um teor de matéria seca máximo. A colheita do material nesse ponto de desenvolvimento seria recomendável sob os aspectos de rendimento máximo da produção. Vários fatores, entretanto, limitam essa possibilidade. Um deles é a umidade, que precisa ser reduzida a níveis seguros de armazenagem. Além de ser um processo que requer alto consumo de energia, as técnicas de secagem de grãos ainda estão sendo pouco difundidas na América Latina, em geral. Nas regiões onde estas técnicas já são conhecidas, ainda percebe-se há elevadas perdas de grãos durante o processo de beneficiamento e armazenagem desses produtos.

A preservação de um alimento entre outros fatores depende da quantidade da água presente no mesmo. Existem muitos métodos para determinar a umidade em alimentos. A escolha do método vai depender da forma pela qual a água está presente na amostra, a natureza da amostra, da quantidade relativa de água, rapidez desejada na determinação e equipamento disponível.

Segundo Park et al. (2007), a água pode estar presente em uma determinada amostra sob três formas:

- Água livre: é a água que está simplesmente adsorvida no material, e a mais abundante. É perdida facilmente às temperaturas em torno da ebulição.
- Água adsorvida: na sua maior parte está associada às substâncias adsorventes do material sólido, presa pelo sistema de atração molecular.

- Água ligada: É a água da constituição, que faz parte da estrutura do material, ligada a proteínas, açúcares e adsorvida na superfície de partículas coloidais, e necessita de níveis elevados de temperatura para sua remoção.

No entanto, devido à elevada umidade contida no grão de arroz em casca, torna-se necessária a secagem imediata logo após a colheita. Pois, o excesso de umidade favorece a elevação da fermentação excessiva, resultando em grãos amarelo e danificados. O processo respiratório nos produtos armazenados é acelerado pela própria reação, a qual aumenta o teor de umidade (transpiração) do produto e temperatura (reação) (PARK et al., 2007). Portanto, quanto mais elevado o teor de umidade ou temperatura, mais intenso é o processo respiratório do grão, o qual provoca o consumo de substâncias orgânicas provocando mais rapidez na deterioração do produto e, conseqüentemente, verifica-se com mais facilidade a perda de peso da matéria seca. Então, para evitar a deterioração da casca, por exemplo, o teor de umidade elevado da casca deve ser reduzido para 13% (b.s) por secagem com ar quente (KHANALI et al., 2012).

Lima et al. (2013) comentam que a secagem é um processo importante pelos seus vários benefícios na produção e comercialização de produtos agrícolas, dos quais pode-se citar: a antecipação da colheita, redução da perda dos grãos ainda na lavoura pelos ataques das pragas, armazenamento por longos períodos de tempo, mantendo excelência na qualidade do produto, além de impedir o desenvolvimento de microorganismos e insetos, permitindo também a formação de estoques e propiciando ao produtor melhores preços no período de entressafra.

Existem diversos métodos de secagem utilizados para a secagem do arroz em casca. Elas envolvem diversas tecnologias de secagem de diferentes escalas e complexidade. Os métodos de secagem são classificados quanto ao uso de equipamentos (natural ou artificial), à periodicidade no fornecimento de calor (contínuo ou intermitente) e à movimentação da massa de sementes (estacionário ou contínuo). A secagem natural é baseada nas ações do vento e do sol para a remoção da umidade das sementes. Na secagem artificial, a fonte de

calor pode ser variável e produzida artificialmente em estufas ou galpões (armazéns climatizados) preparados para esta finalidade (ELIAS et al., 2007).

Cihan et al. (2007) simulou a secagem intermitente de camada fina arroz em casca por vários modelos. Mas há poucos dados disponíveis sobre a distribuição de umidade dentro de grãos de arroz durante a secagem de têmpera. Elias e Oliveira (2010) Enfatizam que na secagem intermitente pode utilizar temperaturas de 60 a 100 °C, na entrada do secador, quando os grãos estiverem muito úmidos, e de até 120 °C, no final do processo. Argumentam também que durante o período de repouso, ocorre a reidratação das camadas superficiais dos grãos, reduzindo o gradiente interno de umidade, liberando gradativamente as tensões internas geradas por esse gradiente.

A temperatura do ar na massa de grãos não deve ultrapassar 40°C para a secagem do arroz para processamento. Não é recomendável remover mais que 2% de umidade por hora de secagem. A secagem estacionária de arroz pode ser feita com ar forçado, à temperatura de até 45°C, para camadas não superiores a 1,0 m (EMBRAPA, 2005).

Para evitar danos ao arroz, quando se destina ao plantio, a temperatura de secagem deve se situar entre 42 e 45°C. Na secagem de grãos para consumo, a temperatura do ar não deve ultrapassar a 70°C. No armazenamento, o arroz para ser melhor conservado deve estar limpo e com teor de umidade entre 13 e 14% (NUNES, 2012). Portanto, entender como se processa distribuições de umidade dentro de um grão de arroz são importantes para analisar as características de secagem e formação de fissura. Uma descrição precisa dos processos de secagem e de têmpera é altamente relacionada com uma descrição precisa da distribuição de umidade dentro de um núcleo (YANG et al., 2003; WU et al., 2004). Com isto, a difusão da água do centro para a periferia do grão e a evaporação da água superficial se dão de maneira mais branda e equilibrada (FAGUNDES et al., 2005; ELIAS, 2007; ELIAS et al., 2010).

Bortolaia (2011) enfatiza que a secagem é o processo que consiste na retirada de água dos grãos por evaporação até um nível que possibilite a armazenagem com conservação segura. Durante o processo de secagem ocorre o transporte de água, nas formas de líquido e

vapor, do interior para a superfície do grão e desta para o ar, por convecção. Neste contexto, ressalta-se que a secagem de um sólido depende de sua estrutura, teor de umidade inicial, teor de umidade da superfície exposta, como também de parâmetros de secagem como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar.

Na visão de Sulzbacher et al. (2010), a operação de secagem de grãos e sementes é etapa fundamental no recebimento de produtos agrícolas e sua correta aplicação assegura menores perdas qualitativas durante as etapas de beneficiamento e armazenamento até a utilização final, seja na semeadura das sementes, seja no processamento industrial de grãos.

O teor de umidade dos grãos, então, acompanhará o período decrescente de umidade do ar quando são submetidos a uma corrente de ar quente, tendendo ao equilíbrio higroscópico (CASEMEG, 2011). Na secagem consegue-se remover a umidade superficial e reduzir a intersticial, permanecendo a umidade de constituição, que representa cerca de 8 a 10% da umidade total (WEBER, 2006). Essa redução do teor de água é obtida pela movimentação da água decorrente de uma diferença de pressão de vapor d'água, entre a superfície do produto a ser seco e o ar que o envolve. A condição para que um produto seja submetido ao processo de secagem é que a pressão de vapor sobre a superfície do produto seja maior que a pressão do vapor d'água no ar de secagem. Essa importância dada à secagem de grãos é um fenômeno facilmente compreendido quando se leva em consideração que os grãos são, em nível mundial, uma das mais importantes fontes de alimentação.

Nem sempre os tratos de lavoura são bem conduzidos, visto que as operações com as colheitadeiras não são capazes de colher grãos com uma umidade muito alta, por isso os grãos são colhidos mais secos, o que resulta em alguma perda. Cuidados na colheita, no manuseio e condições de secagem e estocagem apropriadas são imprescindíveis para garantir a qualidade e aproveitamento da produção de grãos. Meneghetti (2008) comenta que a qualidade de um produto depende do uso final do mesmo que, por sua vez, define qual a característica necessária da qualidade que deverá ser conservada.

Segundo Almeida et al. (2009), muitos agricultores, por falta de informações, várias vezes desenvolve 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.

Para que o processo seja realizado de forma rápida, segura e econômica é fundamental conhecer e monitorar os fenômenos físicos existentes que ocorre durante a secagem (MARTINAZZO et al., 2007). O ar, por exemplo, 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). Portanto, as considerações básicas de secagem de materiais biológicos são aqueles que expressam os relacionamentos de umidade e sólido. Ou seja, a secagem é uma das etapas do processamento dos produtos agrícolas que tem a finalidade de retirar parte da água contida no produto afim de conservar sua qualidade como já definido por vários pesquisadores da área de secagem como (LIMA (1999), SANTOS et al. (2006), PETRY (2007), MARTINAZZO et al. (2008) e ABIAP (2011). Segundo esses autores, o processo de secagem, baseado na transferência de calor e de massa do grão, pode ser dividido em dois períodos distintos: um de taxa constante e o outro de taxa decrescente.

O primeiro período representa o início da secagem. Nesse período ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água).

No segundo período, a taxa de secagem é decrescente. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa; o fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto.

No processo de secagem, o calor é transferido do ar para o grão elevando a temperatura do mesmo e evaporando a água. A transferência de massa ocorre como líquido ou vapor dentro do grão e como vapor na sua superfície. Esse processo é realizado através dos principais mecanismos de transporte de água nos grãos de arroz com casca. (PARRY, 1985; PARK et al., 2007; MARTINAZZO et al., 2007; BORTOLAIA, 2011).

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

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

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

Borém (2008) relatam que a secagem é geralmente causada por convecção forçada de ar, permitindo a manutenção de sua qualidade durante o armazenamento e pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de energia e massa entre o produto e o ar de secagem. Ou seja, o processo de secagem de grãos leva em consideração dois tipos básicos de parâmetros. Os denominados parâmetros externos, que se referem às propriedades do ar de secagem e os parâmetros internos, referentes às relações existentes entre o grão e o seu teor de umidade.

2.3.2 Métodos de secagem

Existem vários métodos que podem ser utilizados para fornecer calor para o material, dentre eles, existe a secagem convectiva (em leito fixo ou móvel) é uma das mais utilizadas para remover a umidade de uma grande variedade de materiais biológicos, incluindo grãos e sementes. Os coeficientes de transporte convectivos de calor e massa na superfície do material estão relacionados com uma pequena camada de ar que envolve o material durante o processo de secagem, denominada camada limite. Esse processo, consiste na redução do teor de água

do produto por meio da passagem forçada de ar aquecido, com baixa umidade relativa, através do produto. A redução do teor de água provoca diminuição da massa, do volume, do crescimento de fungos e da atividade enzimática e microbiana (VILLA-CORRALES et al., 2010).

Durante o processo de secagem convectiva ocorrem transferências simultâneas de calor e massa, onde água é transferida por difusão de dentro do grão para a interface ar-grão e da interface para a corrente de ar por convecção. O calor é transferido por convecção do ar para a interface ar-grão e por condução para o interior do grão. De modo geral, o equipamento de secagem utiliza condução, convecção ou radiação para transferir energia de uma fonte de calor para o material, para o qual o calor é transferido diretamente a partir de um gás quente ou indiretamente através de uma superfície metálica.

Para Ferreira e Pena (2010), a secagem convectiva envolve dois fenômenos fundamentais e simultâneos, onde o calor é transferido do fluido de secagem para o sólido, evaporando o líquido contido na superfície do material e a massa é transferida em fase líquida ou vapor no interior do material, ocorrendo à transferência do vapor da superfície para a vizinhança do sólido. A secagem convectiva deve ser conduzida em condições ótimas para alcançar uma elevada taxa de secagem, mantendo a qualidade (HERNANDEZ-DIAZ et al., 2008). Um modelo de secagem eficaz e fisicamente significativa é útil para o projeto de um secador, avaliar o desempenho do secador, prever a qualidade do produto e avaliar o consumo de energia.

A secagem em estufa, leito fixo, por exemplo, consiste em uma câmara de isolamento térmico apropriado e com sistemas de aquecimento e ventilação do ar circulante sobre as bandejas ou através das bandejas. Neste tipo de secador o produto é colocado em bandejas ou outros acessórios similares sendo exposto a uma corrente de ar quente em ambiente fechado. As bandejas contendo o produto se situam no interior de um armário, onde ocorre a secagem pela exposição ao ar quente. O ar circula sobre a superfície do produto a uma velocidade relativamente alta para aumentar a eficácia da transmissão de calor e da transferência da matéria.

Fellows (2006) comenta que muitas vezes a secagem convencional é realizada em uma estufa. A transferência de calor em estufas ocorre por meio da convecção, através da troca de calor entre um fluido e um sólido. Assim, o ar, aquecido por uma fonte de energia, transfere calor para a superfície sólida do produto a ser seco. O gradiente de temperatura entre esta superfície aquecida e o centro do material provoca, então, a troca de calor entre estas duas regiões, agora por condução térmica.

Estufas com ventilação forçada de ar quente consistem de uma cabine com parede dupla e isolamento térmico entre elas, Figura 2.7. A câmara de secagem possui apoios para as bandejas onde os produtos previamente preparados são desidratados. A distância entre uma bandeja e outra, a dimensão das bandejas e a quantidade de material a ser colocada, dependem do tipo de produto a ser desidratado (COSTA, 2005). Os fatores que devem ser observados no processo de secagem em estufa são (DIAS, 2013):

- a) Temperatura de secagem;
- b) Umidade relativa e movimentação do ar dentro da estufa;
- c) Vácuo da estufa;
- d) Tamanho das partículas e espessuras da amostra;
- e) Número e posição das amostras na estufa;
- f) Formação de crosta seca na superfície da amostra.

Com o conhecimento físico e o manuseio adequado desses e de outros secadores, acredita-se que a secagem artificial dos grãos permite uma série de vantagens que são descritas a seguir (BROOKER et al., 1992):

- a) Colheita prematura, que reduz as perdas de campo devido a perdas naturais;
- b) Planejamento da época da colheita para fazer melhor uso da mão-de-obra, porque a colheita depende do conteúdo de água do grão no campo;
- c) Armazenamento por tempo longo sem deterioração;
- d) Permite aos agricultores armazenar o produto e em poucos meses depois da colheita, além de conseguir alto preço na sua produção;

e) Mantém a viabilidade das sementes, pois devido à remoção da umidade, evita-se a possibilidade de aquecimento do produto com subsequente redução ou destruição da germinação;

f) Permite ao agricultor vender um produto de melhor qualidade.

2.3.3 Modelagem de secagem e simulação

A modelagem matemática da secagem é complexa haja vista que além de considerar que ocorrem simultaneamente processos de transferência de calor e massa, os mesmos devem ser ajustados para o formato do produto e tipo de secagem. Os estudos acerca de modelos matemáticos para descrever o processo de secagem têm sido constantemente objetos de inúmeros pesquisadores. Cada vez mais surgem novos modelos mais sofisticados capazes de representar o mais fiel possível os fenômenos físicos do processo, visto que a secagem envolve diversos fenômenos de transferência simultânea de calor, massa e '*momentum*', gerando a necessidade de modelos efetivos para simulação do processo.

Os modelos matemáticos são desenvolvidos para representar o comportamento de um sistema. O grau de complexidade de um modelo depende dos objetivos da simulação, estes podem ser: projeto, controle e otimização do resultado final do produto. O modelo matemático tem como objetivo a determinação das equações diferenciais de camada espessa considerando as variáveis temporal e espacial para as variações da umidade e da temperatura do ar e do grão, através da aplicação das equações da conservação da massa e da energia (BORTOLAIA, 2011).

Existem diferentes tipos de modelos do processo de secagem. Todos eles têm a variável temporal. A complexidade do processo depende entre outras coisas da espessura da camada do material. Pode-se então classificá-los em modelos de camada fina (camada do material de espessura muito fina) e em camada espessa (modelos que se referenciam a altura do secador). Do ponto de vista prático a secagem em camada fina é muito limitada. Para Borges (2002), os modelos que não consideram a variável espacial são chamados modelos de camada fina. Os modelos que consideram as variáveis espaciais são chamados modelos de leito profundo.

Nos modelos de camada fina toda a massa de grãos a ser secada está sob condições uniformes. Ou seja, os parâmetros do grão (temperatura e teor de umidade) e do ar (temperatura e umidade) em todo o volume considerado são iguais, em cada instante de tempo. Os modelos de camada espessa (ou leito profundo) consideram simultaneamente as variáveis temporal e espacial. Pode ser de uma, duas ou três dimensões, sendo que a temperatura e o teor de umidade, para o grão e para o ar, variam de acordo com a posição espacial (PARRY, 1985; GUIMARÃES, 2005).

Embora os modelos sejam bem estabelecidos, para que possam ser validados há, ainda, a necessidade de que sejam realizados testes em unidades de laboratório com os materiais em estudo para as determinações das propriedades físicas, umidade de equilíbrio, cinética de secagem e variáveis de processo. Assim, é muito importante o procedimento experimental que leva à busca de informações sobre as variáveis de processo como temperaturas do sólido e do fluido, velocidade e umidade relativa do fluido de secagem e velocidade e umidade do sólido em um leito.

Uma boa parte dos trabalhos encontrados na literatura sobre transferência de calor e massa usam modelos baseados em um conjunto de equações diferenciais parciais. Muitas simplificações ou modelos semi-empíricos são utilizados no intuito de facilitar a solução dos sistemas. Para resolver numericamente um conjunto de equações diferenciais parciais, estas podem ser discretizadas por inúmeros métodos, dentre eles: diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos.

Existem diversos processos de secagem que tem sido descrito e modelado matematicamente por muitos pesquisadores, por décadas. Para fazer uma correlação dos dados experimentais da secagem de um produto a um modelo matemático, os estudiosos da área de secagem vêm difundindo uma série de modelos que representam a cinética de secagem para cada tipo de produto. Para modelos de difusão, as condições de contorno apropriadas devem ser identificadas na descrição do processo de secagem. Embora o uso de condições de contorno do terceiro tipo seja mais comum, alguns trabalhos usando condições

de contorno do primeiro tipo são também encontrados na literatura (CHEMKHI e ZAGROUBA, 2005).

Como mencionado, dependendo da espessura da camada do material os modelos de secagem podem ser classificados em modelos de secagem em camada fina (modelos ao nível de partícula) e em camada espessa (modelos ao nível de secador). Os modelos de camada fina são aqueles que consideram a variável temporal e desconsideram a variável espacial. Nesse modelo, as temperaturas e os teores de umidade do ar e do grão em todo o volume são iguais, em cada instante de tempo. Os modelos de secagem em camada fina podem ser divididos em três grupos principais, com alguma superposição entre eles: modelos de parâmetros distribuídos, modelos de parâmetros concentrados e equações de secagem em camada fina (PARRY, 1985; GUIMARÃES, 2005).

Além disso, os modelos ao nível de partículas também podem ser classificados, segundo (PETRY et al., 2005), em empíricos, teóricos e semi-empíricos. Os primeiros são resultado do ajuste de curvas a partir de valores experimentais. Esse modelo consiste em formar grupos físicos adimensionais que podem ser facilmente investigados por experimentos de laboratório e baseia-se nas condições externas, como temperatura, razão da mistura e velocidade do ar de secagem.

Enquanto que nos métodos teóricos normalmente se consideram as condições externas sob as quais a operação ocorre, como também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos (BORÉM et al., 2008), os métodos teóricos são baseados unicamente nas equações de transporte de calor e de massa e os semi-empíricos são uma mescla dos outros dois.

Novaes (2010) comenta que as equações empíricas possuem uma relação direta entre o teor de água no produto e o tempo de secagem. As semi-empíricas são análogas à lei de Newton para o resfriamento, assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de água do produto e seu o respectivo teor de água e de equilíbrio para as condições de secagem especificadas. As equações teóricas, geralmente, levam em

consideração a difusão de líquido e/ou vapor dentro do produto. Devido à sua baixa porosidade, a transferência de umidade do arroz em casca pode ser definida pela equação de difusão líquida.

Carlesso et al. (2007) enfatizam que os modelos teóricos utilizam os fundamentos da matemática da difusão e da transferência de calor e massa e podem descrever de forma aceitável o perfil da distribuição de água no interior de determinado produto agrícola desde que seja possível correlacionar sua forma à geometria de um sólido perfeito, além da exigência do estabelecimento de uma relação funcional entre o coeficiente de difusão, o teor de água e a temperatura.

Nos últimos anos, foram desenvolvidos diferentes simuladores comerciais adequados para diversos processos industriais, contudo escassos são aqueles relacionados à secagem. Dificuldades na elaboração de simuladores de secadores são observadas devido às características peculiares do processo, conforme já descrito. Conseqüentemente as tarefas de otimização e controle de secadores são dificultadas pela inexistência de eficientes simuladores. Devido às dificuldades apresentadas na colheita mecânica e aos danos mecânicos, a grande maioria dos grãos necessita secar no campo até atingir um grau de umidade entre 11 e 13%. Isto acontece, em condições favoráveis num período de quinze a vinte dias depois de alcançar a maturidade fisiológica (PESKE et al., 2003). A Tabela 2.4 mostra o teor de umidade (% b.u.) do arroz com casca para colheita mecanizada e armazenamento seguro.

Tabela 2.4 - Teor de umidade (% b.u.) para colheita mecanizada e armazenamento seguro.

Produto	Colheita		Ideal Após secagem	Armazenamento seguro	
	Máximo	Ótimo		1 ano	5 anos
Arroz	21%	17 – 19%	11%	11 – 12%	9 – 11%

Fonte: Silva et al. (2005).

Rocha (2010) apresentou o estudo das dinâmicas da secagem e os parâmetros de qualidade industrial e tecnológicos em grãos de arroz em casca com umidade próxima a 20%

e seco até 13% pelo método de seca-aeração, utilizando secador de coluna com três manejos térmicos na etapa inicial até 16%, com transferência para silo-secador em estudos de dois tempos de repouso na etapa final da secagem. Os resultados mostraram que, na seca-aeração do arroz, os manejos térmicos que utilizam crescentes temperaturas do ar na etapa inicial, associados com maiores tempos de repouso resultam em menores tempos de secagem na etapa final, sem comprometer os rendimentos de grãos inteiros sem defeitos, nem a qualidade industrial e nem a qualidade tecnológica.

O método de seca-aeração tem como características, aumentar a cadência operacional dos secadores, reduzir custos na aplicação de energia térmica e melhorar o aproveitamento das instalações. Elias (2007) evidencia que neste método os grãos passam inicialmente por uma secagem preliminar convencional, quando perdem parte da água, sofrendo uma secagem parcial. Esta etapa de secagem convencional é seguida por uma etapa de secagem estacionária, com ar sem aquecimento, após um período de repouso, finalizando a secagem dos grãos.

2.3.4 Simulação

A utilização de um simulador ou de um método numérico torna-se importante, quando não é possível a obtenção da solução analítica das equações diferenciais que formam o modelo matemático, conforme citado por Maliska (2004). Dessa forma, a função do método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas por expressões algébricas que envolvem a função de interesse. Tendo em vista que em uma simulação numérica os resultados obtidos são uma aproximação da equação diferencial, quanto maior o número de pontos analisados, mais próximo da solução exata estará a solução numérica. A primeira etapa do desenvolvimento de um simulador numérico consiste na formulação do problema físico que se deseja representar matematicamente. Em seguida, são feitas as suposições e simplificações compatíveis com o grau que se espera do modelo. Formulam-se as equações matemáticas que descrevem o problema físico desejado, considerando as hipóteses adotadas. Por fim, a resolução das equações é obtida.

A simulação se baseia em modelos, ou seja, em conjuntos de suposições, geralmente na forma de relações lógicas ou matemáticas, utilizadas para descrever como um sistema se comporta. Enquanto que a secagem é realizada com o objetivo de preparar um produto para a armazenagem, e envolve fenômenos de transferência de calor e de massa entre os grãos e o ar de secagem. A credibilidade de uma simulação somente é alcançada através da validação da mesma simulação, ou seja, se o modelo avaliado representa com acurácia um fenômeno físico real, e para isso é necessária sua comparação com dados experimentais.

Esta pesquisa tem como um dos objetivos modelar e simular a transferência de calor e massa que ocorre durante o processo de secagem de arroz em casca, admitindo condição de contorno de primeira espécie (temperatura e teor de umidade prescrita) na superfície do grão, e de terceira espécie (convecção), sendo este considerado um elipsóide de revolução. Ela depende de condições do ar (temperatura, velocidade, umidade relativa do ar) e na forma do grão de arroz e rugosidade da superfície dos grãos.

Geralmente, a simulação é utilizada pelos engenheiros e cientistas para prever o comportamento de um produto, de um equipamento ou de um processo sobre determinadas condições. Por meio da simulação, a avaliação do modelo pode ser realizada de maneira mais rápida e eficiente, gerando resultados que possibilitam estimar as características reais do processo. Dentre as principais razões que justificam a ferramenta de simulação estão o alto custo dos experimentos ou até mesmo a impossibilidade de número significativo de experimentos.

Portanto, uma maneira conveniente para realizar tal processo (a simulação) com mais rapidez é desenvolver ou ajustar um modelo matemático a um software adequado que simule as transferências de calor e de umidade em massas do grão durante a secagem. Segundo (2007), utilizando o ANSYS CFX[®], um software de simulação de engenharia, em todo o ciclo de desenvolvimento, permite prever com confiança como seus produtos irão se comportar e como processos de fabricação irá operar em um ambiente do mundo real. Este programa apresenta uma nova abordagem na forma de exibir os resultados da simulação, facilitando a manipulação e a análise dos dados gerados.

Por meio da simulação, a avaliação do modelo pode ser realizada de maneira mais rápida e eficiente, gerando resultados que possibilitam estimar as características reais do processo. Dessa forma, evitam-se gastos exagerados na execução de um determinado experimento, gasta-se menos tempo, e diferentes possibilidades podem ser analisadas para um mesmo processo (LAW e KELTON, 1991).

A simulação numérica apresenta poucas restrições, sendo utilizada para resolver problemas em domínios complexos e gerando resultados com tempo de processamento aceitável. No entanto, visando aplicações em diversas áreas da engenharia, foram desenvolvidos vários pacotes computacionais voltados para pesquisadores e engenheiros, e dentre eles pode-se citar o ANSYS CFX[®]. Mirade et al., (2004) enfatiza que o ANSYS CFX[®] é um desses diversos programas CFD disponíveis no mercado, sendo bastante utilizado na pesquisa do meio acadêmico, quanto em empresas que trabalham com alta tecnologia. Suas aplicações incluem desde problemas que envolve mecânica dos fluidos, transferência de calor e massa.

2.3.5 Características do software ANSYS CFX[®]

O software ANSYS CFX[®] tem a versatilidade de aceitar inúmeras condições de contorno e iniciais, permitindo a atualização do modelo computacional para diversas situações diferentes. O programa computacional ANSYS CFX[®] resolve a equação padrão de transporte e de energia em meios porosos somente com modificações para o fluxo de condução e o termo transiente. No meio poroso, o fluxo de condução utiliza a condutividade efetiva e o termo transiente inclui a inércia térmica da região sólida do meio poroso (KRAMER et al., 2011).

Atualmente, as ferramentas de CFD começam a ser integradas com outras ferramentas numéricas, criando um ambiente de trabalho interativo, em que se chega a praticamente ao projeto final do equipamento através de computadores, limitando as experiências finais de ajuste e teste do equipamento em protótipos. Uma vantagem significativa no uso de um determinado software é a obtenção da solução em forma fechada, requerendo reduzido tempo

de computação. Nessas ferramentas, técnicas de simulação computacional são frequentemente utilizadas para modelar e investigar fenômenos físicos nestes sistemas.

A técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD) tem se destacado nas aplicações da área de engenharia, especialmente em mecânica dos fluidos. Existem duas maneiras básicas de se analisar um problema de CFD: uma é através do desenvolvimento de um código específico para a situação física de interesse com modelos e programas numéricos; e a outra, através da utilização de um código comercial aplicável à grande gama de situações físicas (LOURENÇO, 2006). O ICEM CFD, por exemplo, é utilizado para aplicações de engenharia tais como dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e análise estrutural.

2.3.6 Simulação via software comerciais

As ferramentas de geração de malha oferecem a capacidade de se criar malhas parametrizáveis multi-bloco estruturadas, hexaédricas não estruturadas, tetraédricas, malhas híbridas compostas de células hexaédricas, tetraédricas, piramidais e prismáticas a partir da geometria.

Um dos principais parâmetros a se analisar para garantir a confiabilidade nos resultados numéricos é a análise da influência da malha. A precisão das soluções em CFD é governada pelo número de células da malha. Portanto, a malha escolhida para as simulações foi a com menor número de elementos devido ao tempo de simulação ter sido menor quando esta foi utilizada. Assim, o tempo de simulação e o esforço computacional também são dependentes do refinamento da malha, visto que uma malha de boa qualidade pode tornar os códigos CFD mais robustos quando bem construída, independente do fluxo utilizado. Sendo assim, a etapa de geração da malha tem se tornado a etapa mais importante e que demanda mais tempo na análise de CFD.

A Figura 2.6 apresenta as características da geometria e da malha não estruturada. Para obtenção desse tipo de malha faz-se necessário montar uma matriz de conectividade, em que cada elemento não tem ligação com o elemento ao lado. A ideia principal é que uma malha

deve ser construída de tal forma que promova uma certa interação entre os nós, os quais são a base da formulação destes métodos numéricos convencionais. Outra definição para diferenciar malhas estruturadas de não estruturadas é dada por Maliska (2004). As malhas não-estruturadas têm a característica de se adaptarem aos limites do domínio, permitindo uma construção quase perfeita do mesmo. O autor comenta também que uma malha bem gerada, respeitando-se as concentrações de células no local requerido pelo problema físico, evitando-se elementos distorcidos e com variação suave de espaçamento entre os elementos, não é uma tarefa fácil de realizar. É necessário, portanto, conhecer os métodos de geração de malhas para escolher o que mais se adequa ao problema estudado.

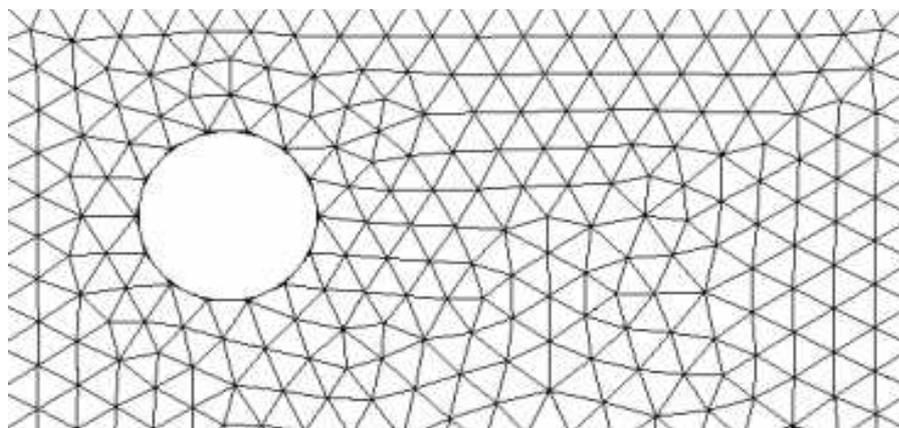


Figura 2.6 - Exemplo de malha não estruturada.

Fonte: http://www.fc.up.pt/fcup/contactos/teses/t_050370159.pdf

Teoricamente, estas malhas podem ser usadas com qualquer método de discretização, porém, adaptam-se melhor às aproximações por volumes finitos ou por elementos finitos. O método dos volumes finitos consiste na integração formal das equações de conservação que regem os fenômenos que se deseja estudar. Esses fenômenos são basicamente o escoamento (descrito pelas equações da continuidade, de conservação de quantidade de movimento e pelo modelo de turbulência) e a troca de calor (descrita pela equação de conservação de energia). Os elementos ou volumes de controle podem ter qualquer forma e não há qualquer restrição ao número de elementos vizinhos ou vértices. Na prática, malhas feitas de triângulos ou

quadriláteros em 2D e tetraedros ou hexaedros em 3D são mais frequentemente usadas em trabalhos com geometria complexa.

A vantagem de métodos de malha não estruturada é que eles se moldam facilmente a geometrias complexas, por apresentarem número ímpar de pontos de amarração, habilitando a solução destes problemas em um período relativamente curto de tempo. A desvantagem é que das malhas não estruturadas é a falta de controle do usuário sobre a disposição da malha, que se limita a definir os limites e tamanho das células da malha. A malha ainda apresenta a característica de ser isotrópica. Além disso, simulações utilizando malhas não estruturadas demandam mais tempo e memória computacional do que as malhas estruturadas (SANTOS, 2008).

Um dos principais parâmetros a se analisar para garantir a confiabilidade nos resultados numéricos é a análise da influência da malha. A metodologia consiste na construção de diferentes malhas com números de elementos distintos, com o objetivo de se determinar se o número de elementos da malha está influenciando nos dados obtidos. Neste trabalho foram geradas três malhas, duplicando o número de elementos de uma em relação à outra.

A geração de uma malha se torna necessário para resolver o sistema de equações utilizando uma metodologia numérica, onde o domínio de estudo é dividido em vários subdomínios, e os valores das grandezas de interesse obtidos discretamente no espaço e no tempo, gerando assim um campo da variável de interesse. Uma malha é definida como os espaços abertos ou interstícios entre as margens de uma rede que é formada pela conexão de nós de uma maneira pré-definida. A terminologia de redes, volumes, células e elementos carregam certos significados físicos, tais como eles forem definidos para diferentes problemas. Todavia, todas essas redes, volumes, células e elementos podem ser chamados de malhas de acordo com a supracitada definição.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Experimental

3.1.1 Material e equipamentos

A matéria-prima investigada neste trabalho é o arroz de terra alta ou arroz de sequeiro agulhinha (BRSMG - CONAI). Na Figura 3.1, é apresentada o canteiro e a amostra do arroz em casca selecionado para os experimentos.



Figura 3.1 - O arroz de sequeiro ou terra alta (BRSMG - CONAI).

Para a determinação dos parâmetros de secagem os seguintes equipamentos foram utilizados:

- a) Paquímetro digital da marca Messen com precisão de 0,01 mm;
- b) Balança digital KC-01 com divisão de 1 grama;
- c) Termômetro de infravermelho com escala de -50 à 1000°C TI 890;
- d) Termohigrômetro de fabricação da ICEL, mod. HT 208;
- e) Estufa com circulação mecânica de fabricação da FANEM mod. 320E com controlador digital de temperatura como visto na Figura (3.2).



Figura 3.2 - Estufa com circulação mecânica de ar de fabricação da FANEM mod. 320E com controlador digital de temperatura.

3.1.2 - Procedimentos experimentais

3.1.2.1 Secagem

Todos os experimentos secagem foram realizados no Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande - PB, no período de abril a agosto de 2013. No início, os 300g de grãos de arroz selecionados e disponibilizado pelo Instituto de Pesquisa Agropecuária (IPA) foi levado em um saco plástico hermético para o local do plantio no Assentamento Florestan Fernandes em Goiana-PE.

O grão de arroz em casca apresentava um teor de umidade de 14%, com um grande poder germinativo. Em seguida, foram feitos os canteiros medindo 1m x 2m; não foi feito análise de solo, nem utilizou-se adubação química. Como recomendado na literatura, o espaçamento entre linhas para os sulcos foi de 40 cm e semeadura de 70 a 75 grãos por metro linear onde foram plantadas as sementes, como mostrado na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Plantio do arroz em canteiros de 1m x 2 m x 40 cm entre linhas (arroz com 32 dias de plantados - 3/04/2013).

A Figura 3.4 (a) e (b) mostra os dois estágio do arroz, o leitoso e o de maturação.



Figura 3.4 – O arroz (BRSMG-CONAI) (a) início da floração (71 dias plantados) (b) maturação completa com 117 dias.

Após 117 dias do plantio (Figura 3.5) a colheita foi feita no campo manualmente e levado para a pré-limpeza, isto é, separação das espiguetas das folhas e anteras.



Figura 3.5 - Colheita manual do arroz no campo.

A amostra foi transportada para o laboratório onde foram medidos, (comprimento, largura e espessura (Figura 3.6). Essas medidas foram confrontadas com dados da literatura como: Brooker et al. (1992) e Hacıhafizoğlu et al. (2008), e serviram para a geração da geometria e a malha no ICFM CFD. Logo após as medições dos grãos, as amostras foram pesadas, colocadas nas bandejas feitas com telas de arame como mostrado na Figura 3.7, e colocadas no interior da estufa onde foram secadas em diferentes temperaturas (40, 50, 60 e 70°C).



Figura 3.6 - Medições dos grãos de arroz BRSMG-GONAI.



Figura 3.7 - Bandeja removível com tela de arame.

Com intervalos pré-definidos a amostra era retirada da estufa, possibilitando a medição da temperatura, em princípio as medições foram feitas de 5 em 5 minutos de 10 em 10 minutos e em seguida, as medições passaram ser de 30 em 30 minutos até que o grão tendesse ao estágio de equilíbrio higroscópico. No final de cada período (de 5, de 10 e de 30 minutos), as amostras eram retiradas da estufa, com a finalidade de serem feitas as medições da temperatura do grão (com o termômetro infravermelho digital, Figura 3.8), e a massa da amostra (pesava-se a bandeja com a amostra) e em seguida, recolocava-se de volta na estufa. Quando as massas das amostras atingissem o nível de umidade próximo da umidade de equilíbrio, encerrava-se as medições e em seguida, mantinham-se as amostras no interior da estufa nas mesmas condições de secagem por um período de 24 h para obtenção da massa de equilíbrio. Na sequência, mantinha-se o grão no interior da estufa a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ de temperatura por mais um período de 24 h para a obtenção da massa de equilíbrio e de seco do produto.



Figura 3.8 - Medição da temperatura dos grãos logo após a retirada da bandeja de dentro da estufa.

Todo esse procedimento de secagem foi feito para as quatro amostras nas temperaturas de (40, 50, 60 e 70°C). A Figura 3.9 - ilustra as amostras expostas no interior da estufa.



Figura 3.9 - Amostra do arroz no interior das bandejas dentro da estufa.

A Tabela 3.1 - Mostra as condições experimentais realizadas, onde, (a) representa o comprimento do grão, (b) largura do grão e (c) a espessura do grão.

Tabela 3.1 - Parâmetros experimentais do ar e do arroz em casca para cada experimento de secagem realizado.

Experimentos	Ar			Arroz em casca seco							t (min)
	T (°C)	UR (%)	v (m/s)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	M _o (b.s.)	M _e (b.s.)	θ _o (°C)	θ _f (°C)	
1	40	28,44	0,04	9,14	2,29	1,76	22,5	0,83	26,8	39,80	1.260
2	50	15,77	0,05	9,15	2,28	1,80	17,0	0,54	26,7	48,90	1.260
3	60	10,38	0,06	9,15	2,30	1,82	34,5	0,44	24,5	58,80	960
4	70	6,73	0,07	9,22	2,31	1,85	36,3	0,10	26,6	67,80	840

onde,

T = temperatura do ar de secagem;

UR = umidade relativa dentro da estufa;

v = velocidade do ar de secagem;

M_o = umidade inicial;

M_e = umidade de equilíbrio;

θ_o = temperatura inicial do grão;

θ_f = temperatura final do grão; t = tempo.

Durante a secagem do grão de arroz foram monitoradas a temperatura e umidade relativa do ar ambiente, por meio de um termohigrômetro digital. Os dados estão citados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Condições médias de temperatura e umidade relativa do ar ambiente ao longo dos quatro experimentos de secagem do grão de arroz BRSMG-CONAI.

Experimentos	Temperatura do ar de secagem (°C)	Temperatura média do ar ambiente (°C)	Umidade relativa média do ar ambiente (%)
1	40	26,5 ± 0,29	60,2 ± 2,21
2	50	26,4 ± 0,26	60,3 ± 2,25
3	60	27,3 ± 0,26	59,5 ± 2,16
4	70	27,2 ± 0,28	59,8 ± 3,54

As propriedades termofísicas como condutividade térmica, calor específico, difusividade térmica, densidade ou massa específica, inseridas no software ANSYS CFX®, estão expostas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3, Valores médios das propriedades termofísicas do grão de arroz BRSMG-CONAI.

Dados do arroz em casca BRSMG-CONAI	
Condutividade térmica k	0,11042 W / m°C
Calor específico c _p	1916,4 J / kg.K
Densidade ρ	869,56 kg/m ³
Difusividade térmica α = k / ρcp	6,6261x10 ⁻⁸ m ² / s
Densidade casca ρ	490,48 kg/m ³
Densidade polpa ρ	1080,43 kg/m ³
Densidade média	$\rho_{\text{méd}} = \rho_{\text{polpa}} \left(\frac{\text{vol. polpa}}{\text{vol. total}} \right) + \rho_{\text{casca}} \left(\frac{\text{vol. casca}}{\text{vol. total}} \right) = 868,56 \text{ kg/m}^3$
Calor específico polpa c _p = $\frac{k}{\rho\alpha}$	1,290 kJ/kg°C
Calor específico casca c _p = $\frac{k}{\rho\alpha}$	2,842 kJ/kg°C

Fonte: própria pesquisa

A Tabela 3.4 resume os parâmetros geométricos e gravimétricos do grão de arroz BRSMG-CONAI.

Tabela 3.4 - Parâmetro geométrico e gravimétrico do grão de arroz BRSMG-CONAI.

Dados do arroz em casca BRSMG-CONAI <i>in natura</i>	
Massa da polpa	0,01980g = 0,00001980 kg
Massa da casca	0,0049999g = 0,0000049999kg
Peso por unidade do grão de arroz	0,0247999g.

Fonte: A própria pesquisa

Área da superfície da polpa:

$$A = 2\pi L_1 L_2 \left(\frac{L_1}{L_2} \right) + \frac{\arcsen \sqrt{1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2}} = 44,125 \text{ mm}^2 = 44,125 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Área da superfície da casca:

$$A = 2\pi L_1 L_2 \left(\frac{L_1}{L_2} \right) + \frac{\arcsen \sqrt{1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2}} = 56,687 \text{ mm}^2 = 56,687 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\text{Volume total} = V = \frac{4}{3} \pi L_2 L_1^2 = 28,520 \text{ mm}^3 = 2,852 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$\text{Volume da polpa} = V = \frac{4}{3} \pi L_2 L_1^2 = 18,326 \text{ mm}^3 = 1,8326 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

Volume da casca:

$$\text{Volume total} = V = 1,0194 \times 10^{-8} \text{ m}^3$$

3.1.2.2 Parâmetros auxiliares e dados de secagem

Após a secagem de todas as amostras do grão de arroz em casca, foram feitos alguns cálculos auxiliares para determinação de novos parâmetros, que são considerados importantes para a obtenção dos resultados e discussão do presente trabalho. O cálculo da quantidade de água em cada amostra (m_a) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa inicial da amostra (m_0) e na massa seca (m_s) do grão. As relações de conversão entre os teores de umidade de base seca e base úmida são expressas pelas seguintes equações:

$$M_{bu} = \frac{M_{bs}}{100 + M_{bs}} \quad (3.1)$$

$$M_{bs} = \frac{M_{bs}}{100 - M_{bu}} \quad (3.2)$$

O cálculo do teor de umidade adimensional de cada amostra (M^*) e em cada tempo de medição foi feito com base no valor do teor de umidade (M), do teor de umidade inicial (M_o) e do teor de umidade de equilíbrio (M_e), em base seca, da seguinte forma:

$$M^* = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (3.3)$$

3.2 Metodologia teórica

3.2.1 Modelo matemático

As considerações adotadas para o modelo matemático da transferência de calor e massa que ocorre no grão de arroz em casca são:

- O grão é considerado homogêneo e com propriedades termo-físicas constantes durante o processo;

- A variação volumétrica do grão durante o processo de secagem foi desconsiderada;
- O coeficiente de difusão de massa é constante para uma dada temperatura e independe do teor de umidade;
- O mecanismo de transporte de umidade no interior do grão é apenas de difusão líquida;
- Os campos de temperatura e teor de umidade são uniformes no início da secagem;
- A solução das equações de transferência de calor e massa não são acopladas;
- Na superfície do grão ocorre os fenômeno de evaporação e convecção.

Os trabalhos disponíveis na literatura, em sua grande maioria, simplificam a geometria do grão de arroz em casca a uma esfera ou cilindro. Nesta pesquisa, o arroz em casca é considerado como um elipsóide de revolução, que se aproxima mais da forma do grão como mostrado na Figura 3.10.

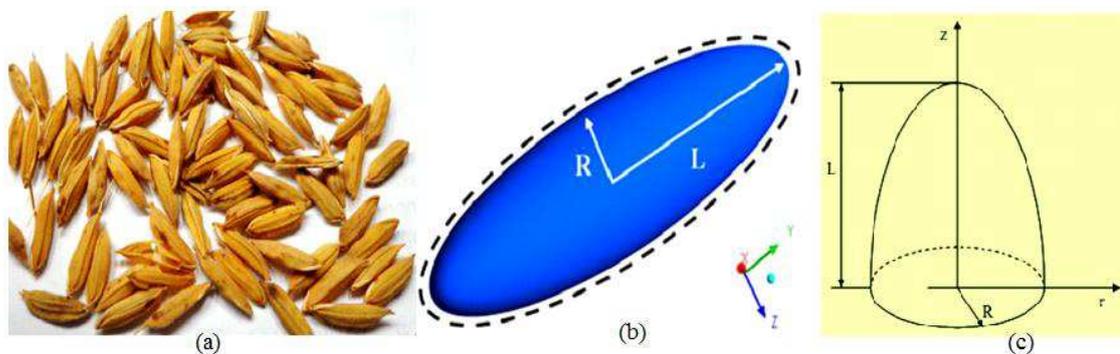


Figura 3.10 - (a) Grãos de arroz em casca e sua (b) representação geométrica (c) (elipsóide de revolução).

A expressão geral da equação de transporte, na forma infinitesimal para um volume elementar, pode ser escrita do seguinte modo:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \vec{v} \Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi \quad (3.4)$$

em que:

Φ é a variável dependente de interesse;

Γ^Φ e λ são coeficientes de transporte;

t é o tempo;

\vec{V} é o vetor velocidade do meio;

S^Φ é o termo fonte.

Na Equação (3.4), o primeiro termo representa a variação temporal da grandeza sob estudo em um volume infinitesimal, sendo conhecido como termo transiente ou termo de acúmulo. O segundo termo, denominado termo advectivo, indica o quanto a grandeza varia na unidade de tempo devido ao seu movimento junto com o meio; ambos se movem com a velocidade \vec{V} . O terceiro termo representa a variação da grandeza na unidade de tempo por difusão (termo difusivo), enquanto o último termo, denominado de termo fonte, dá a geração (ou sorvedouro) da grandeza em um volume infinitesimal.

A equação geral de difusão para a determinação de uma grandeza genérica Φ é da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) \quad (3.5)$$

Para resolver a Equação (3.5) com o objetivo de descrever um processo de secagem, devem ser definidas as condições iniciais e de contorno, como segue:

$$\Phi = \Phi_i \quad \text{no interior do sólido, } t = 0 \quad (3.6)$$

$$-\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial n} = h(\Phi - \Phi_e) \quad \text{sobre a superfície do sólido, } t \geq 0 \quad (3.7)$$

onde Φ_e representa a condição de equilíbrio; $n =$ é o vetor normal à superfície dos grãos, e h é o coeficiente de transferência convectiva (calor ou de massa). A difusão de massa no interior do sólido é obtido a partir da Equação (3.6) definindo $\Phi = M$ e $\Gamma^\Phi / \lambda = D$, em que D é o coeficiente de difusão de massa e M é o teor de umidade dos grãos, em base seca (b.s). A

transferência de calor no interior do grão é dada pela Equação (3.6) substituindo $\Phi = \theta$ e $\Gamma^{\Phi} / \lambda = \alpha = k / \rho c_p$, onde α é a difusividade térmica, k é a condutividade térmica, ρ é a densidade, θ é a temperatura e c_p é o calor específico do material.

A simulação matemática permite a otimização do processo de secagem, em muito menos tempo e com baixo custo. O estudo numérico da transferência de calor e massa no grão de arroz em casca foi feita utilizando o software ANSYS CFX[®]. Para a análise do processo de secagem de grãos de arroz também são necessários os conhecimentos de alguns parâmetros básicos tais como: tamanho do grão, o volume, a área de superfície, densidade média, a condutividade térmica, o calor específico, difusividade térmica, o coeficiente de difusão em massa, os teores de umidade e de equilíbrio, entre outros.

As equações utilizadas para obter os coeficientes de transferência de calor e massa calculado para o ar, são dadas por Incropera e Dewitt (1990), como segue:

$$h_c = \frac{k_a}{d_p} (2.0 + 0.552 Re^{1/2} Pr^{1/3}) \quad (3.8)$$

$$h_m = \frac{D_{AB}}{d_p} [2.0 + 0.552 Re^{1/2} Sc^{1/3}] \quad (3.9)$$

onde,

D_{AB} - Difusividade de vapor no ar;

d_p - Diâmetro da partícula.

Para descrever o coeficiente de transferência de massa calculado para o produto, baseando-se no teor de umidade do produto, utilizou-se a seguinte equação:

$$\rho_s h'_m (M_o - M_e) = h_m \rho_{ar} (X_{sat} - X) \quad (3.10)$$

onde,

h_m	Coeficiente de transferência de massa (ar);
h'_m	Coeficiente de transferência de massa (produto);
Re	Número de Reynolds;
Pr	Número de Prandtl;
Sc	Número de Schmidt;
ρ_s	Densidade do produto;
X	Umidade absoluta do ar;
X_{sat}	Umidade absoluta do ar saturado;
M_o	Teor de umidade inicial do produto;
M_e	Teor de umidade de equilíbrio do produto;
h_c	Coeficiente de transferência de calor;
K_a	Condutividade térmica do ar.

Os valores de temperatura (T_a), do ar umidade relativa (UR), velocidade do ar de secagem (v), coeficiente de transferência de massa convectivo (h_m), o coeficiente de transferência de calor por convecção (h_c) e coeficiente de transferência de massa (h'_m) (produto); utilizado nas simulações são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Parâmetros físicos usados nas simulações.

Ar			Grão		
T_a (°C)	UR %	v_a (m/s)	h_m (m/s)	h_c (W/m ² .K)	h'_m (m/s)
40	28,44	0,04	36,86585	34,42191	$1,19 \times 10^{-5}$
50	15,77	0,05	39,04597	36,49368	$3,09 \times 10^{-5}$
60	10,38	0,06	40,98446	38,39177	$2,34 \times 10^{-5}$
70	6,73	0,07	42,81557	40,17627	$3,75 \times 10^{-5}$

Desta forma, a simulação numérica do processo de secagem do arroz em casca fornece uma maneira de analisar o efeito de diferentes variáveis de grãos, condições de secagem distintas, respostas sobre as cinéticas de secagem e aquecimento que podem contribuir para a

compreensão mais detalhada do fenômeno físico de calor e transferência de massa em sólidos, principalmente quando o estudo está relacionado com geometria complexa.

3.2.2 Modelo Geométrico

Os valores das dimensões do grão de arroz com casca foram dados por Brooker et al. (1992) e Hacıhafizoğlu et al. (2008). Estes últimos autores propuseram uma média destes valores após realizar a medição de 100 grãos de arroz em casca. As dimensões da geometria são mostradas na Tabela. (3.6) foram realizadas.

Tabela 3.6 - Dimensões médias do grão de arroz in natura com casca utilizado para a geração da geometria.

Arroz (em casca)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	V (mm ³)	Razão de aspecto
	9,15	2,30	1,82	160,35	3,978

Razão de aspecto caracteriza os valores do comprimento e largura do produto e pode ser usados para caracterizar os aspectos dimensionais da partícula, além de fornecer informações adicionais na geometria das partículas e de sua curvatura.

A geometria do problema no plano bidimensional foi gerada a partir da equação da elipse, Eq. (3.11), onde foram definidos pontos, curvas e superfícies, seguindo de uma revolução desta geometria para se obter o elipsoide 3D.

$$\frac{X^2}{L^2} + \frac{Y^2}{R^2} = 1 \quad (3.11)$$

Nesta pesquisa, para gerar a malha representativa do grão de arroz inicialmente foi necessário criar a geometria definindo-se pontos e curvas de referência de acordo com o método adotado para se criar as curvas e superfícies que definem as fronteiras ou paredes do grão como mostrado na Figura 3.11.

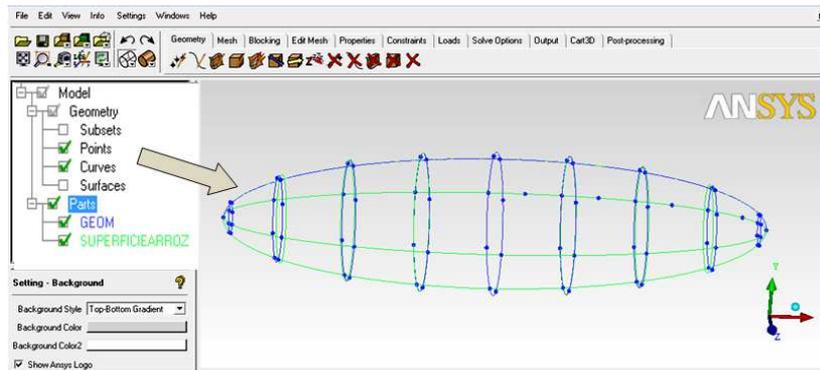


Figura 3.11 - Definição de pontos e curvas da malha do grão de arroz.

De posse da geometria foi definido uma estratégia de blocagem, Figura 3.12, que assegura o refinamento ou distribuições dos elementos nas proximidades das paredes do sólido e em regiões onde os gradientes de velocidade, pressão e/ou temperatura são importantes. Foram utilizadas várias blocagens até se chegar àquela que foi utilizada nas simulações. A Figura 3.12 apresenta o bloco único envolvendo a geometria definida.

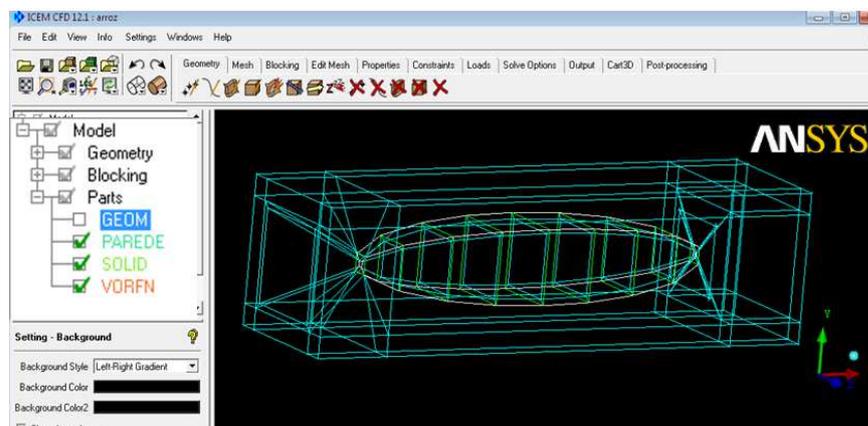


Figura 3.12 - Representação da blocagem do grão de arroz.

A Figura 3.13 apresenta as características da geometria e da blocagem concluída. Esse trabalho, conhecido como blocagem não é simples de realizar, pois envolve uma série de regras e uma sequência lógica de etapas que devem ser respeitadas. Ou seja, quando a geometria é complexa o suficiente, usa-se o gerador de malha não estruturada. A Figura 3.14 - Ilustra a geometria do grão de arroz.

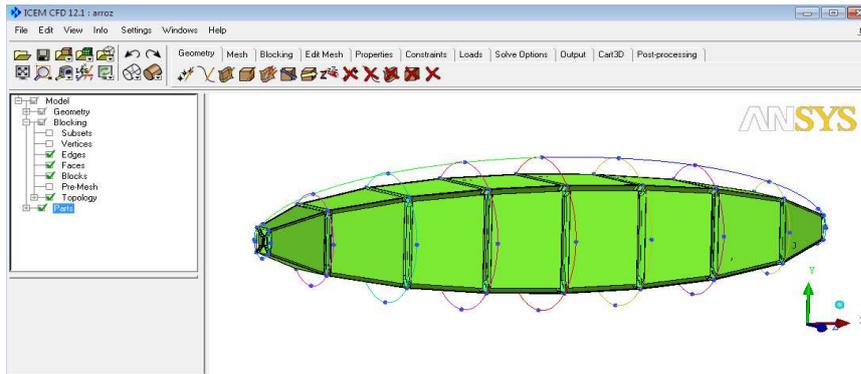


Figura 3.13 - Blocagem do grão de arroz.

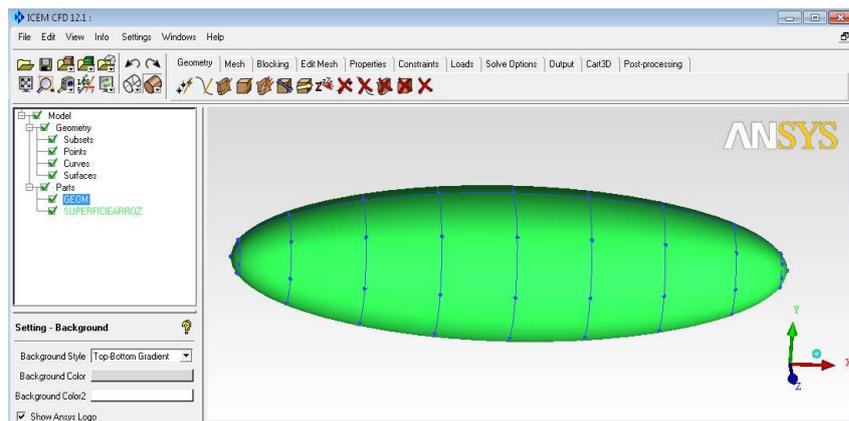
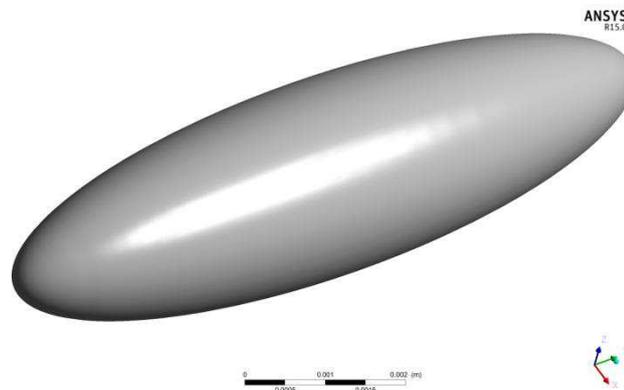
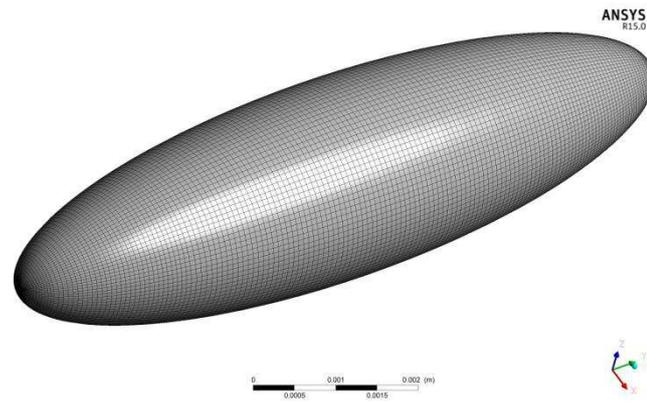


Figura 3.14 - Visualização da geometria do grão de arroz.

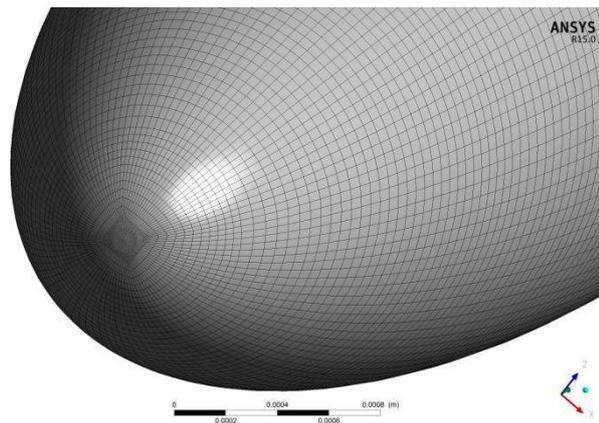
A Figura 3.15 ilustra a malha numérica usada nesta pesquisa. Ela é formada por 251.160 elementos hexaédricos e 260.347 nós, gerada a partir do *software* ANSYS ICEM[®].



(a)



(b)



(c)

Figura 3.15 - (a) Geometria do problema físico, (b) Malha numérica e (c) detalhe da superfície da geometria.

Os valores das grandezas de interesse obtidos discretamente no espaço de tempo de 60s, gerando assim um campo da variável de interesse com critério de convergência RMS de 10^{-8} .

3.2.2 Estimativa do coeficiente de difusão de massa

Para estimar inicialmente o coeficiente de difusão, utilizou-se a Equação (3.12) considerando que a partícula era uma esfera. Porém, esse coeficiente de difusão foi obtido comparando-se os resultados experimentais com os resultados da solução da Lei de Fick onde

obteve-se uma estimativa razoável do coeficiente de difusão que representa a primeira tentativa de descrever e quantificar a secagem do arroz em casca da variedade BRSMG-CONAI. E a partir dele, entrou-se no ambiente do software ANSYS CFX[®], onde foram feitos através do método de tentativas e erros, os ajustes reais do problema considerando a geometria do grão como ela é, um elipsóide de revolução.

A solução analítica (Equação 3.12) baseada na 2ª Lei de Fick, com coeficiente de difusão constante, para geometria esférica, foi descrita por Crank (1992), conforme segue.

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{\tilde{R}^2}\right) \quad (3.12)$$

onde \bar{M} é o teor de umidade médio, \tilde{R} é o raio da esfera equivalente do grão de arroz em casca, D é o coeficiente de difusão e t o tempo de secagem em horas. O raio equivalente (\tilde{R}) foi determinado por comparação do volume real do grão de arroz (V) com o volume da esfera equivalente do grão como segue:

O valor da difusividade de massa real para cada temperatura de ar de secagem (40, 50, 60 e 70°C) foi obtido pelo método de tentativa e erro minimizando o erro dos quadrados mínimos entre dados experimentais e numéricos do teor de umidade médio utilizando o software ANSYS CFX[®].

Os valores dos parâmetros térmicos e físicos dos grãos de arroz utilizados neste trabalho para calcular os coeficientes de transferência de calor (h_c) e massa (h_m) variaram de acordo com as temperaturas como mostrado na Tabela 3.7. Esta tabela contém as informações descritivas dos dados inerentes ao processo da secagem e estruturada segundo a modelagem.

$$\tilde{R} = \left(\frac{3}{4\pi} V\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.13)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi abc \quad (3.14)$$

Tabela 3.7 - Parâmetros utilizados para calcular os coeficientes de transferência de calor e massa.

T (°C)	M (b.s.,%)	M (b.u.,%)	C _p (kJ/kg.K)	k (W/m°C)	ρ _{ar} (kg/m ³)
40	22,5	18,367	1,9318	0,110911	1,607 x 10 ⁻⁹
50	17,0	14,513	2,2556	0,120597	1,576 x 10 ⁻⁹
60	34,5	25,650	2,2581	0,120671	1,545 x 10 ⁻⁹
70	36,3	26,632	2,3021	0,121986	1,502 x 10 ⁻⁹

Parâmetros operacionais intimamente ligado aos danos térmicos podem provocar nos grãos danos imediatos e latentes cujos resultados se expressam mais em trincamentos e incidência de defeitos nos grãos de arroz, respectivamente. Quando o fluxo de calor que entra no sólido, é maior que a energia necessária para evaporar todo o líquido do interior desse sólido, esse demora mais para aquecer-se e leva menos tempo para evaporar o líquido em seu interior; já quando acontece o inverso, o corpo se aquece mais rápido e demora mais para evaporar o líquido em seu interior. Aumentar a temperatura do ar de secagem durante o processo, implica em menor gasto de energia por unidade de água removida e maior velocidade na taxa de secagem, e maior gradiente de temperatura e umidade, enquanto que um aumento no fluxo de ar reduz a eficiência energética, mas também aumenta a velocidade de secagem. Apesar de seu custo elevado da energia gasta, a secagem artificial de grãos de modo geral, é amplamente necessária por razões de produtividade agrícola, ou de disponibilidade de mão-de-obra.

Outros parâmetros que influenciam fortemente a taxa de secagem com utilização de ar forçado, são principalmente, a temperatura e a umidade relativa do ambiente, temperatura e fluxo do ar de secagem, umidade inicial, final e de equilíbrio do produto, a temperatura e velocidade do produto no secador, bem como a variedade e a história do produto do plantio até a colheita. Estes parâmetros de secagem não são independentes, pois influem na taxa e eficiência de secagem como um conjunto de fatores e não isoladamente.

CAPITULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Experimental

4.1.1 Características físicas e cultivo do grão BRSMG CONAI

A Tabela 4.1 faz comparações entre características físicas dos grãos de arroz BRSMG-CONAI obtidos através de pesquisas feitas pela EPAMIG - Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais em 2012 e os grãos de arroz BRSMG-CONAI obtidos através dos experimentos realizados em 3 (três) canteiros de arroz BRSMG-CONAI medindo 1x2 m plantados no Assentamento Florestan Fernandes na cidade de Goiana, PE, Brasil. Os resultados mostram bastante semelhanças entre os dados da literatura com os dados do experimento e estão dentro dos padrões exigidos para o plantio em larga escala. Algumas diferenças como, Floração média, maturação, altura, comprimento, largura e espessura do grão plantado em nossa região, estão associadas ao clima, a região, época de plantio adubação e outros fatores.

Tabela 4.1- Características físicas do grão de arroz BRSMG – CONAI.

Dados da literatura (EPAMIG, 2012)		Dados do experimento para este trabalho (Goiana-PE, 2013)
Cor das folhas	Verde-escuro	verde-escuro
Floração média - 50%	76 dias	78 dias
Maturação completa	108 dias	112 dias
Altura da planta	87 cm	76 cm
Comprimento do grão com casca	7,42 mm	7,21 mm
Largura do grão sem casca	2,30 mm	2,16 mm
Espessura do grão sem casca	1,88 mm	1,71 mm
Peso de 1000 grãos com casca	202,0 g	198,4 g
Colheita	A partir de 35 dias	----

Fonte: Epamig e a pesquisa em estudo.

4.1.2 Cinética de secagem

A Figura (4.1) ilustra a cinética de secagem experimental do grão de arroz para diferentes temperaturas do ar de secagem. Os valores do teor de umidade médio atinge o estado permanente quando este valor se iguala a umidade de equilíbrio a uma determinada temperatura. Analisando-se as curvas de secagem contidas nas Figuras 4.1 a 4.4 observa-se que não há diferença significativa entre a secagem obtida através das velocidades de 0,04 a 0,07 m/s (experimento 1 a 4), conforme a Tabela 3.1. As curvas de secagem mostradas nessas Figuras 4.1 a 4.4 apresentam comportamento bastante semelhante. Porém, verifica-se uma redução no tempo total de secagem do experimento 3 e o experimento 4. Nesse caso, pode-se afirmar que a redução no tempo de secagem do experimento 3 foi causado, não só pelo aumento da velocidade mas, também, pela elevação e efeito da temperatura do ar de secagem de 60 para 70°C.

Para as condições dadas, pode-se afirmar que o aumento isolado da velocidade do ar não foi suficiente para diminuir o tempo de secagem. Observa-se também que o experimento feito com velocidade de 0,07 m/s apresentou uma taxa de secagem maior que o experimento feito com velocidade de 0,04 m/s, ou seja, acredita-se o aumento isolado da velocidade do ar pode surtir efeito sobre a taxa de secagem. Vale salientar que a cinética de secagem possibilita também a determinação do mecanismo predominante na transferência de massa do material para o fluido e as respectivas equações matemáticas correspondentes.

Na Figura 4.1, observa-se que o grão com teor de água inicial de 22,5% necessitou de 1260 minutos para atingir a umidade de equilíbrio, enquanto que o grão com teor de água inicial de 36,3 % (Figura 4.2) só precisou apenas de 840 minutos. No entanto, o produto com teor de água inicial de 22,5%, a velocidade do ar de secagem não causou alteração no comportamento da curva de secagem, ou seja, o tempo necessário para que o produto atingisse a umidade de equilíbrio não foi alterado, conforme o resultado obtido durante o processo. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram o comportamento da evolução do teor de umidade médio em função do tempo quando os grãos de arroz com casca estão sendo secos nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C. As Figuras mostram também, a influência implícita da

temperatura do coeficiente de difusão mássica, ver-se que quando esta aumenta a difusividade mássica também aumenta reduzindo o tempo necessário para a secagem do arroz em casca.

Na Figura 4.1 (b), percebe-se que o tempo necessário para o grão atingir o equilíbrio higroscópico, foi praticamente igual mesmo mostrando um teor de umidade mais baixo. Pelo fato da umidade relativa (UR) ser mais baixa na temperatura do ar de secagem de 50°C, isto pode ter interferido no tempo final de secagem.

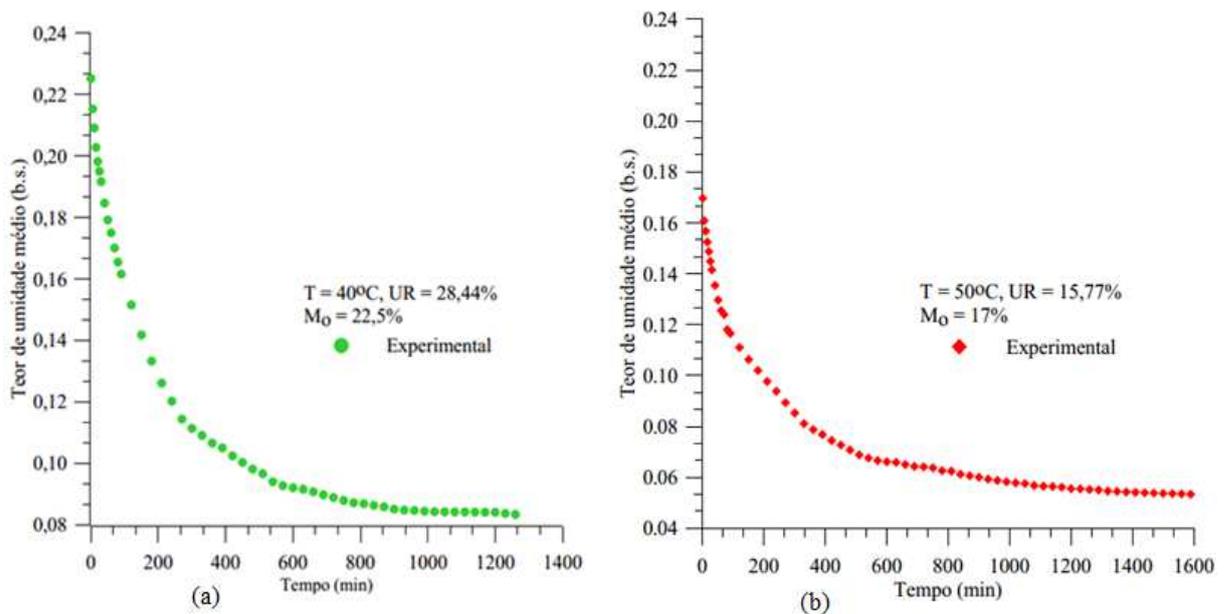


Figura 4.1- Variação do teor de umidade médio em função do tempo para as temperaturas do ar de secagem de: (a) 40°C e (b) 50°C.

Observando as duas primeiras curvas (Figura 4.1 e 4.2), verifica-se que para temperaturas menores as curvas são mais suaves, implicando numa tendência que a difusividade térmica seja menor para uma menor temperatura. Verifica-se também que a secagem dos grãos de arroz ocorre no período de taxa de secagem decrescente, indicando que ocorre uma maior resistência à transferência de calor e massa do interior do produto para sua superfície.

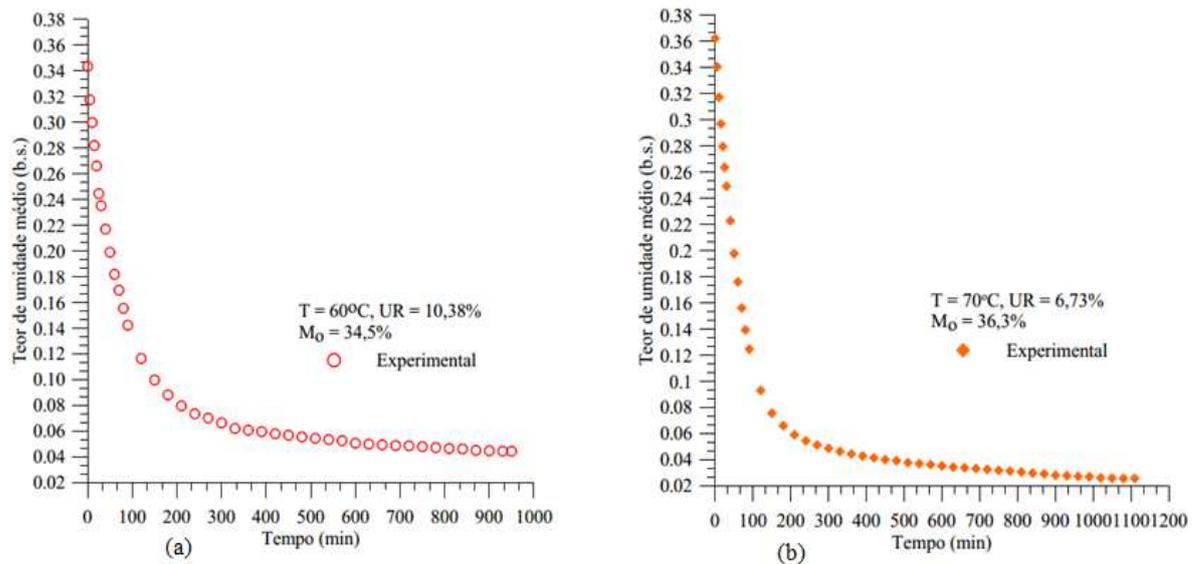


Figura 4.2 -Variação do teor de umidade médio em função do tempo para a temperatura do ar de secagem de: (a) 60 e (b) 70°C.

As Tabelas 4.2 e 4.3 resumem as medidas do grão de arroz da cultivar BRSMG-CONAI, matéria-prima estudada. Analisando esses valores, verifica-se que o grão estudado apresenta em sua composição, pouca diferença entre o comprimento, largura e espessura do grão de arroz *in natura* casca seco a 40°C e, grão *in natura* colhido seco no campo com casca. Essa diferença entre (comprimento, largura e espessura) aumenta quando o grão foi descascado, como visto nas tabela à seguir. Essas dimensões do grão de arroz com casca e sem casca, pode influenciar nas medidas da malhas das peneiras de beneficiamento dos secadores.

Tabela 4.2 – Média do arroz *in natura* com casca seco a 40°C.

Média do arroz <i>in natura</i> seco colhido seco no campo (mm)	Média do arroz <i>in natura</i> com casca seco a 40°C (mm)	Variação em % (úmido e seco)
Comprimento	9,49	3,58%
Largura	2,46	6,5%
Espessura	2,16	15,74%
Encolhimento volumétrico =		24,04%

Fonte: a própria pesquisa

Apenas as medidas do arroz *in natura* seco colhido no campo com casca foram utilizadas no software ANSYS CFX[®] durante a simulação.

Tabela 4.3 – Média do arroz seco a 40°C, sem casca.

Média do arroz <i>in natura</i> úmido sem casca (mm)		Média do arroz seco sem casca (mm)		Variação em % (úmido e seco)
Comprimento	7,21	Comprimento	6,89	4,43%
Largura	2,16	Largura	2,03	6,01%
Espessura	1,85	Espessura	1,71	0,7%
Encolhimento volumétrico =				16,98 %

Apenas as medidas do arroz seco nas temperaturas de 40 e 70°C sem casca foram utilizadas para a verificação visual de trincas e fissuras.

4.1.3 Curvas de temperaturas experimentais de secagem

Nas Figuras 4.3 e 4.4 são plotadas as curvas que representam as temperaturas da massa de grãos de arroz em casca, no decorrer das secagens, resultantes das médias dos valores obtidos entre as repetições na estufa como as variações da temperatura superficial do grão de arroz com o tempo, para todos os experimentos de secagem realizados. Verifica-se que num primeiro estágio, as taxas de variação de temperatura são mais pronunciados nos primeiros 100 minutos de secagem, em comparação com as taxas de variação do teor de umidade.

Percebe-se que tanto nas Figuras 4.3 com 4.4 que, com o aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa do ar de secagem a taxa de secagem aumenta e o grão de arroz tende alcançar o equilíbrio térmico mais rapidamente. Porém, não são recomendados altos gradientes térmicos ao longo do grão porque isto produz uma secagem não uniforme e grandes tensões térmicas, hídricas e mecânica dentro do produto que pode causar trincas e fissuras e deformação no produto comprometendo sua qualidade final no processo de secagem, tornando assim, um produto impróprio para o plantio e para o comércio.

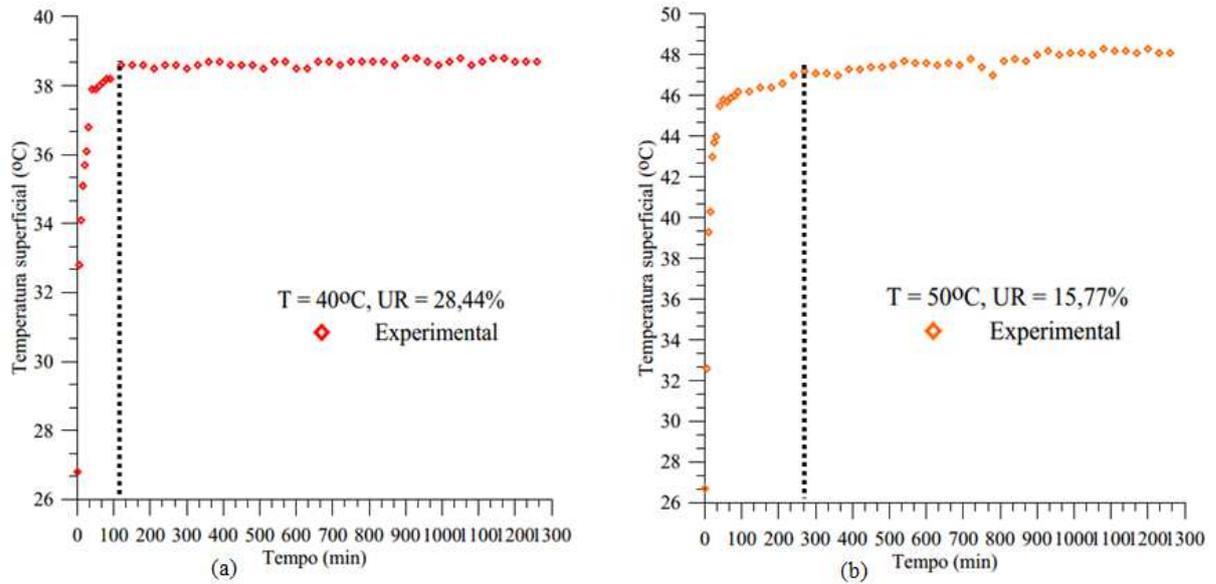


Figura 4.3 - Curva de temperatura média em função do tempo para a temperatura do ar de secagem de: (a) 40°C e (b) 50°C .

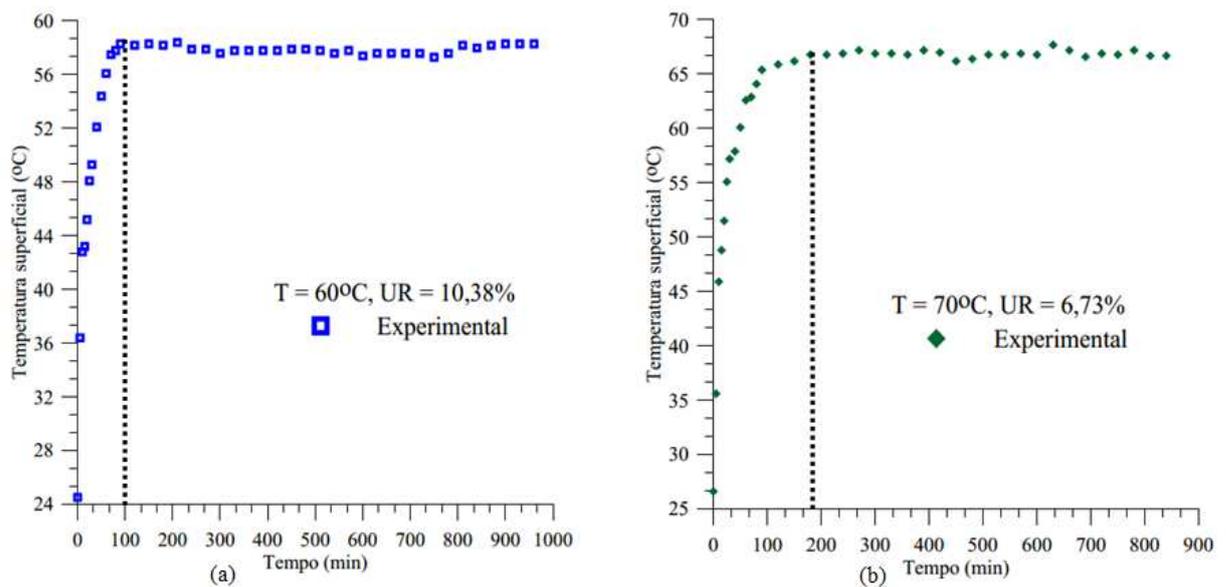


Figura 4.4 Curva de temperatura média em função do tempo para a temperatura do ar de secagem de: (a) 60°C e (b) 70°C .

Observa-se que as quatro curvas apresentam bastantes semelhanças entre si. Isto demonstra que o manuseio técnico com os grãos de arroz na operação de secagem foi adequada. Ao comparar os dados entre as quatro curvas, pode-se observar que a temperatura

do ar de secagem influencia fortemente no tempo de secagem, o que pode dar origem a gradientes de temperatura elevada na fase sólida, o que induz tensões térmicas e aquecimento rápido de todo sólido tornando algumas regiões mais vulneráveis a fendas e trincas, reduzindo a qualidade do produto final.

Percebe-se também que em todos os tratamentos, as temperaturas da massa dos grãos crescem mais nas duas primeiras horas, tendendo à estabilização, uma vez que o processo de secagem é composto de duas etapas hidrotérmicas distintas e complementares que incluem a difusão da água do interior do grão para a periferia e a evaporação da água periférica. A primeira é endotérmica e a segunda é isoentálpica, em acordo com os princípios da termodinâmica (MENEGHETTI et al., 2012). Então, à medida que a umidade dos grãos vai diminuindo, a troca de energia em forma de calor por água evaporada decresce e, consequentemente, a temperatura da massa de grãos tende a aumentar.

A temperatura da massa de grãos é o parâmetro operacional intimamente ligado aos danos térmicos que podem ocorrer nos grãos em função da operação de secagem e/ou com o choque térmico, sendo esses responsáveis pelos danos imediatos e latentes cujos resultados se expressam mais em trincamentos e incidência de defeitos nos grãos de arroz, respectivamente.

Para a faixa de temperatura investigada, nas condições descritas, foi possível detectar grãos com trincas e severas fissuras nas amostras do arroz estudadas, causado pelo período de 52 horas após o processo de secagem, tempo em que o grão de arroz ficou exposto a temperatura ambiente dentro da bandeja. O grão exposto ao ar natural absorve umidade, e por sua vez permite que a ação enzimática ative o metabolismo dos próprios grãos e dos organismos associados após a secagem. Esses fatores associados, resultaram no aparecimento de defeitos de origem metabólica e/ou em sua intensificação de trincas e fissuras como será visto no tópico a seguir.

4.1.4 Análise estrutural do grão (trincas e fissuras)

Para analisar o índice de grãos de arroz com trincas, foi colhida no campo uma amostra aleatória de grão de arroz BRSMG - CONAI *in natura*, na qual retirou-se 100 grãos com casca e, em seguida, foi feito o descasque para verificar os grãos com trincas e fissuras. Procedimento semelhante foi feito para os grãos pós-secagem. Os grãos retirados para a amostra foram classificados em: (a) - grãos com pequenas trincas; (b) - grãos com trincas não severas e (c) - grãos com trincas severas. As análises foram feitas visivelmente e por meio de microscopia eletrônica de varredura. Na amostra, antes da secagem, observou-se que dos 100 grãos *in natura* sem casca, 9 grãos apresentavam pequenas trincas longitudinais, 6 grãos apresentavam trincas transversais e 17 grãos quebrados. Na mesma amostra, foi feito o cálculo do teor de umidade e constatado que a amostra analisada apresentava-se com 19% de umidade em base úmida (b.u.).

O aumento da temperatura de secagem proporcionou aumento da porcentagem de grãos com trincas e quebrados da cultivar BRSMG - CONAI; as trincas severas pode também afetar negativamente a germinação do grão. Constatou-se também neste estudo, que o índice de trincas foi agravada, 52 horas após a secagem nas temperaturas de 70°C, em que a amostra permaneceu em uma bandeja de arame fora da estufa, a uma temperatura ambiente de 24,5°C e 63% de umidade relativa ambiente. Após esse tempo, uma segunda sub-amostra com 100 grãos foi retirado da bandeja e descascado onde, verificou-se através de visão microscópica e visual que dos 100 grãos da amostra, cerca de 29 desses grãos apresentavam trincas, como mostrado nas Figuras 4.5. Para avaliação das trincas internas e externas, os grãos foram classificados conforme o tipo de trinca existente no endosperma: trincas simples (aqueles que apresentam uma única trinca), trincas duplas (apresentam duas trincas) e trincas múltiplas (apresentam três ou mais trincas).

Nesse processo, pode-se argumentar também que o aumento da temperatura e a diminuição da umidade relativa do ar de secagem aumentam a taxa de secagem e o produto alcança mais rapidamente a temperatura e sua umidade de equilíbrio. Não são aconselháveis altos gradientes térmicos e hídricos ao longo do grão porque isto produz uma secagem não

uniforme e grandes tensões térmica, hídrica e mecânica no arroz, o que pode causar rachaduras, trincas, deformação no sólido, comprometendo sua qualidade no fim do processo e conseqüentemente inviabilizando a sua comercialização. É de grande importância uma secagem prévia, controlada. Esse efeito também foi evidenciado por Eichelberger e Portella (2003) ao comparar um total de grãos trincados de milho colhidos secos. Inclusive, a utilização de temperaturas mais baixas, como 40 e 70°C, que causou elevada porcentagem de grãos trincados. Os grãos colhidos com o teor de umidade 18% e seco na temperatura do ar de secagem de 40°C, resultou em 20% dos grãos trincados.

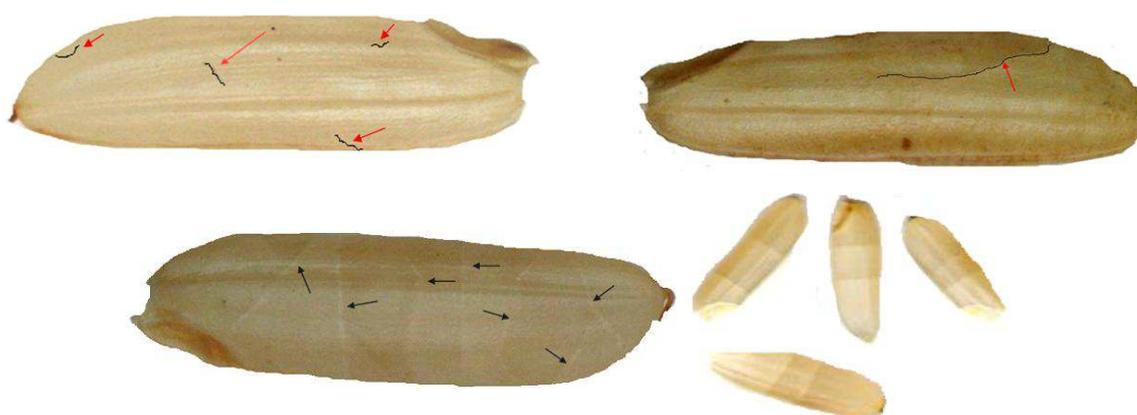


Figura 4.5 - Grão de arroz sem casca pós-colheita com trincas e fissuras seco a 70 °C.

Fonte: própria pesquisa.

Neste contexto, fica claro que o aumento de trincas do arroz pode ser influenciada por vários fatores, por exemplo, variedade do arroz, gestão de operação pós-colheita temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e tempo de secagem do grão. A porcentagem de trincas no grão de arroz antes do processo de secagem neste trabalho, não foi determinada mas, sabe-se que a manutenção do arroz no campo após a maturação fisiológica expõe os grãos para alternar processos naturais de secagem e reidratação, o que pode provocar à trincas. No entanto, o percentual de trincas provenientes do campo é geralmente menor do que decorre durante ou depois da secagem principalmente em temperaturas elevadas.

Iguaz et al. (2006) verificaram o efeito da secagem e tratamentos de têmpera na produtividade de arroz com fissuras, e os resultados mostraram que a porcentagem de grãos

fissurados aumentou à medida que a temperatura e a capacidade de evaporação do ar foi aumentada. Eles afirmam que estes grãos fissurados são mais suscetíveis a ataques de insetos e micróbios e diminuição da proporção de germinação das sementes. Onde, as fissuras de arroz é influenciada por vários fatores. Ou seja, A quebra de grãos ocorre, principalmente, durante o processo de remoção da lema e da pálea (descascamento) e por ocasião do brunimento dos grãos. É reconhecido que a maioria dos grãos partidos durante o beneficiamento já apresentam fissuras ou trincas provenientes de determinadas práticas de manejo utilizadas na lavoura, na colheita e na secagem.

A resistência à fissura pode ser causada por diferenças entre as variedades e as áreas em que foram cultivadas. Isso justifica que o trincamento fragiliza os grãos favorecendo a quebra, ocasionando o aumento da quantidade de grãos partidos durante o processo de secagem e, conseqüentemente, diminui a qualidade comercial do produto. Geralmente, a quebra dos grãos ocorre, principalmente, durante os processos de descascamento e de brunimento. Quando o aquecimento acontece no grão, também aumentam a evaporação e as pressões internas. Ou seja, enquanto seca, contrariamente, sua pressão interna aumenta e as camadas mais centrais do grão tendem à expansão. A superfície do arroz não tem plasticidade ou capacidade elástica para suportar tensões mecânicas muito elevadas, podendo nesses casos sofrer fissuras na superfície, trincamento ou até mesmo quebra (ruptura do grão) (ELIAS, 2008).

Neste trabalho, a taxa inicial de fissuramento também mostrou uma relação direta com a variação do teor de umidade ao qual foi submetido o grão de arroz. Às menores variações do teor de umidade de 17%, seco na temperatura de 50°C corresponderam as menores taxas de fissuramento. Assim sendo, pode-se dizer que o gradiente interno de umidade é um parâmetro que afeta o processo de fissura. ou seja, a ocorrência de fissura no grão de arroz é função da diferença da umidade de equilíbrio à qual o grão é submetido quando da alteração das condições ambientais. Todavia, a variações na ocorrência e intensidade de baixos rendimentos de grãos inteiros no beneficiamento são mais frequentes no arroz de terras altas, uma vez que nesse sistema de cultivo o arroz está mais sujeito aos efeitos das variações climáticas que no sistema irrigado. Nos experimentos realizados para esta pesquisa, as amostras dos grãos de

arroz submetidos à secagem nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, o número de grãos trincados aumentaram significativamente após o término do processo quando os grãos ficaram exposto a temperatura ambiente por um período de 52 horas.

Após 21 dias do período de colheita do arroz BRSMG - CONAI escolhido como matéria prima para esta tese, observou-se em uma amostra de 25g de grãos, cerca de 1011 grãos colhidos aleatoriamente em um dos canteiros do experimento, constatou-se que 103 grãos desta amostra apresentavam fissuras entre o lema e a pálea como mostrado Figura 4.6. A principal causa de aparecimento de rachaduras nos grãos ainda no campo, antes do processo de beneficiamento, decorre da reidratação dos mesmos após terem atingido umidade abaixo de um determinado ponto crítico. Esse ponto é variável em função da cultivar mas, para a maioria delas, situa-se em torno de 15% (EMBRAPA, 1999).

Submeteu-se as 25g de grãos à temperatura citada durante 24 horas, intervalo de tempo suficiente para que não ocorra mais a variação de massa entre as últimas medidas da massa de grãos. A amostra colhida apresentava um teor de umidade 15% (b.s.). Desses 103 grãos foram descascados 28 grãos apresentavam coloração escura e pequenas trincas nas pontas do grão. Provavelmente, essas trincas estão relacionadas com a incidência de temperaturas e reidratação provocadas pelas variações climáticas provocado pela ação da chuva, do orvalho ou da umidade relativa do ar muito elevada. Como mostrado na Figura 4.6 como segue.



Figura 4.6 - Trincas entre o lema e a pálea do grão de arroz BRSMG-CONAI.

4.1.5 Características morfológicas do grão de arroz BRSMG - CONAI

A aparência do arroz é um dos principais fatores que determinam seu valor comercial, que é amplamente definida em termos de tamanho do grão, forma, translucidez e uniformidade do grão (SMIDERLE e DIAS, 2008). Isso implica dizer que a aparência do endosperma do arroz também pode ser uma característica importante para o consumidor, o que torna igualmente importante para o produtor e para a indústria de beneficiamento e armazenamento do grão. A Figura 4.7 (a) mostra a estrutura morfológica organizada do grão *in natura* colhido seco manualmente no campo com 115 dias do plantio. Na Figura 4.7 (b) mostra a parte ventral do grão seco a 40°C após o processo de secagem, onde, o grão permanece sem trinca ou fissura com aumento de 50x, sua estrutura permanece compacta, sem apresentar trincas e com boa aparência superficial.

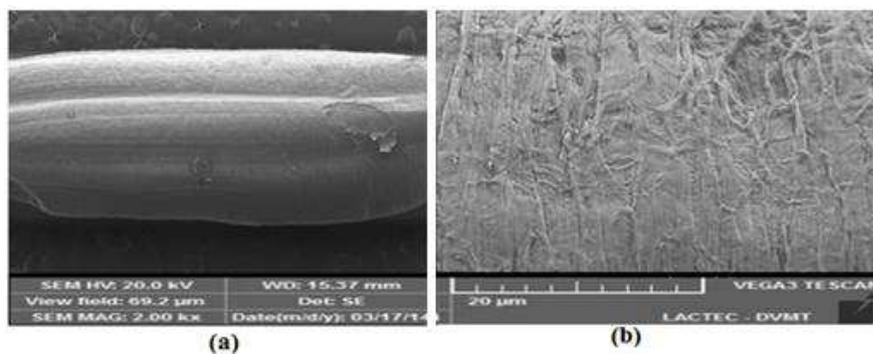


Figura. 4.7 - Micrografias dos grãos de arroz translúcidos (*in natura*) com aumento de (a) 20x e (b) 50x em microscópio eletrônico de varredura.

Consumidores do arroz de diversos tipos de mercado preferem grãos uniformes e com endosperma translúcido, sem áreas opacas, livre de manchas, trincas e fissuras, que podem ser causadas pelo excesso de grão gessado, ataque de insetos ou por mau manuseio de secagem. É perceptível, nas micrografias da Figuras 4.8 (a), a diferença da microestrutura entre um grão de arroz *in natura* da cultivar BRSMG - CONAI translúcido e seco na temperatura de 60°C e um grão gessado seco na mesma temperatura. Observa-se nas micrografias com aumento de 200x, que os grãos translúcidos apresentam estrutura uniforme bem compacta, enquanto que o grão gessado Figura 4.8 (b), apresenta grânulos isolados, com pequenos furos espalhados por todo amido comprometendo e desordenando da estrutura granular. Além disso, os grânulos do grão gessado são maiores e tendem a apresentar algumas trincas durante a secagem.

Concordando com a literatura, os grãos gessados são indesejáveis porque reduzem a aparência global, além de resultarem em menor rendimento no beneficiamento, pelo fato de serem grãos mais frágeis, que tendem a ser mais propensos à quebra durante o processo de beneficiamento. portanto, deve-se estar atento, entretanto, para as exigências específicas de cada variedade, uma vez que algumas podem ser mais exigentes quanto ao ponto de colheita. A colheita de grãos com teor de umidade média acima de 26% contribui para aumentar a ocorrência de grãos imaturos na massa de grãos, o que constitui uma das principais causas de aparecimento de grãos gessados.

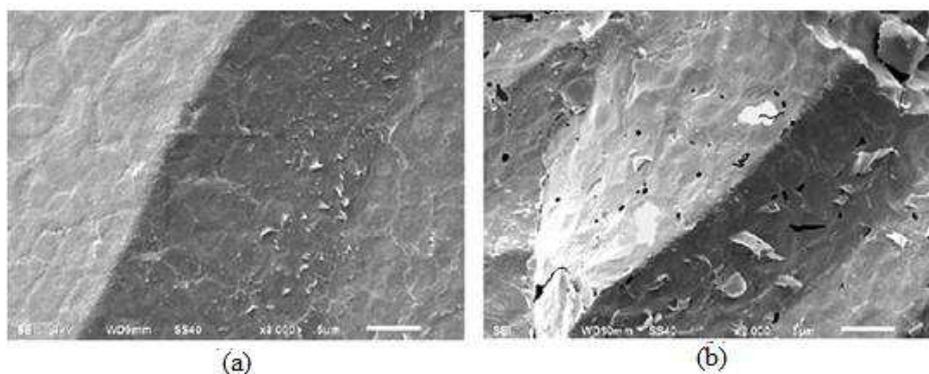


Fig. 4.8 - (a) Micrografias dos grãos de arroz translúcidos e (b) microestruturas do grão gessados visualizadas em aumento de 200x após secagem a $T = 60^{\circ}\text{C}$.

Genkawa et al. (2011), ao estudarem as características de fissuras do arroz parboilizado e do arroz integral, concluíram que o tratamento hidrotérmico da parboilização permitiu a restauração de todas as fissuras. Eles argumentam também que, além da eliminação de fissuras, o processo beneficia o descascamento, promove maior retenção dos nutrientes e oferece resistência a insetos e microrganismos. A opacidade do grão é causada pelo arranjo dos grânulos de amido e proteína nas células. Zonas opacas ou gessadas são áreas onde o arranjo se dá de forma não compacta, formando espaços de ar entre si, devido ao acondicionamento mais frouxo das partículas de amido e proteína (YOSHIOKA et al., 2007; ZHOU et al., 2009), (Figura 4.9).

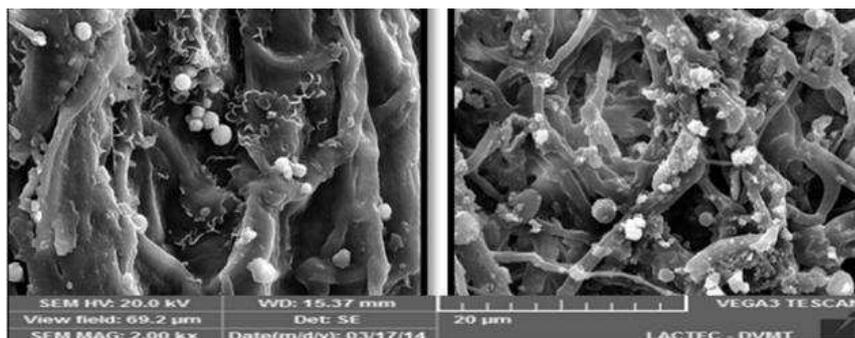
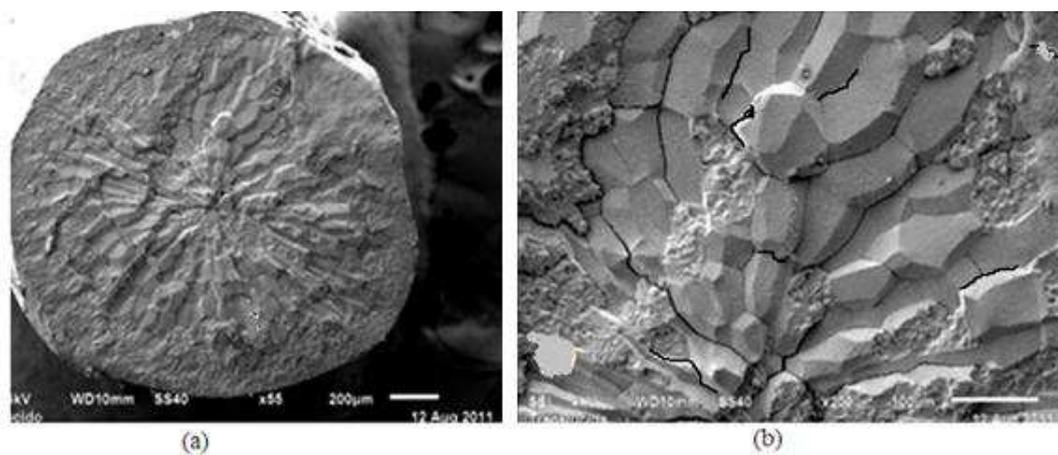
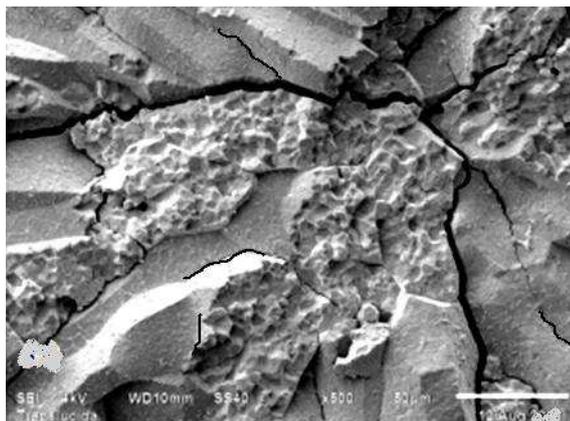


Figura 4.9 - Micrografias de grãos de arroz visualizada em aumento de 1000x.

Fonte: Ishimaru et al. (2009).

Através do emprego da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura foi compreendido que o grão *in natura* da cultivar testada (Figura 4.13) mostra espaços intermoleculares no grão que pode ser preenchidos através da parboilização, possibilitando uma estrutura sólida e de alto grau de compactação. Para uma melhor visualização das trincas no interior do grão de arroz, uma amostra de 30 grãos de arroz BRSMG - CONAI *in natura* sem casca foi enviado para o Laboratório de Caracterização de Materiais da UFCG, e empregando a técnica de MEV (Figura 4.10) foi possível observar que, em parte da amostra estudada, o endosperma de alguns grãos apresenta várias trincas fissuras, a partir do centro do grão com estrutura não compacta.





(c)

Figura 4.10 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) grão de arroz *in natura* da cultivar BRSMG - CONAI com aumento de 500x.

Observa-se na Figura 4.10 (a) o endosperma de um grão translúcido apresentando boa compacidade do endosperma. Enquanto que outra parte da amostra estudada (Figura 4.10 (b) e (c)), o endosperma dos grãos apresentam várias trincas e fissuras a partir do centro do grão que tem um preenchimento interno de forma mal estruturada. O aparecimento de grãos com trincas e grãos quebrados ficou mais evidente após 52 horas após a secagem onde os grãos seco ficaram expostos à temperatura ambiente dentro de uma bandeja com tela de aço dentro do próprio laboratório.

4.2 Simulação

4.2.1 Modelo I: Condição de contorno de primeira espécie

A condição de contorno do primeiro tipo, implica dizer que sólido entra em equilíbrio instantaneamente com o meio ambiente que é o ar da estufa. Ou seja, o modelo I é uma condição ideal para o processo de secagem. barroso et al. (2006) comentam que na solução de modelos difusionais, aplicados à secagem, em geral, são consideradas muitas suposições simplificadoras, como difusividade invariável com o teor de umidade, e resistência externa à transferência de massa desprezível, ou seja: a umidade na superfície do sólido instantaneamente alcança o valor de umidade de equilíbrio de grãos.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 observa-se o comportamento do teor de umidade de 22, 17, 34 e 36% e temperatura do ar de secagem de 40, 50, 60 e 70°C do grão de arroz em casca BRSMG - CONAI em relação ao tempo, submetido as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60 e 70°C com condições de contorno de primeira espécie. Variando a umidade relativa do ar dentro da estufa para cada temperatura. Percebe-se que na secagem em 40 e 50°C, o teor de umidade varia lentamente com o tempo. Nota-se que, para todas as temperaturas de secagem avaliadas, no início do processo há uma grande remoção de umidade, assim, as dimensões sólido também tendem mudar. No entanto, nessa pesquisa não foi considerado tal encolhimento. Porém comparando-se os gráficos, observa-se que, para temperaturas de secagem baixas como, por exemplo, 40 e 50°C (Figura 4.11 (a) e (b)) a variação do teor de umidade ocorre de forma mais uniforme, devido ao fato da retirada de água ser mais lenta, promovendo a secagem e aquecimento do produto mais demorado, como foi mencionado anteriormente, porém sem causar danos muito sério ao produto.

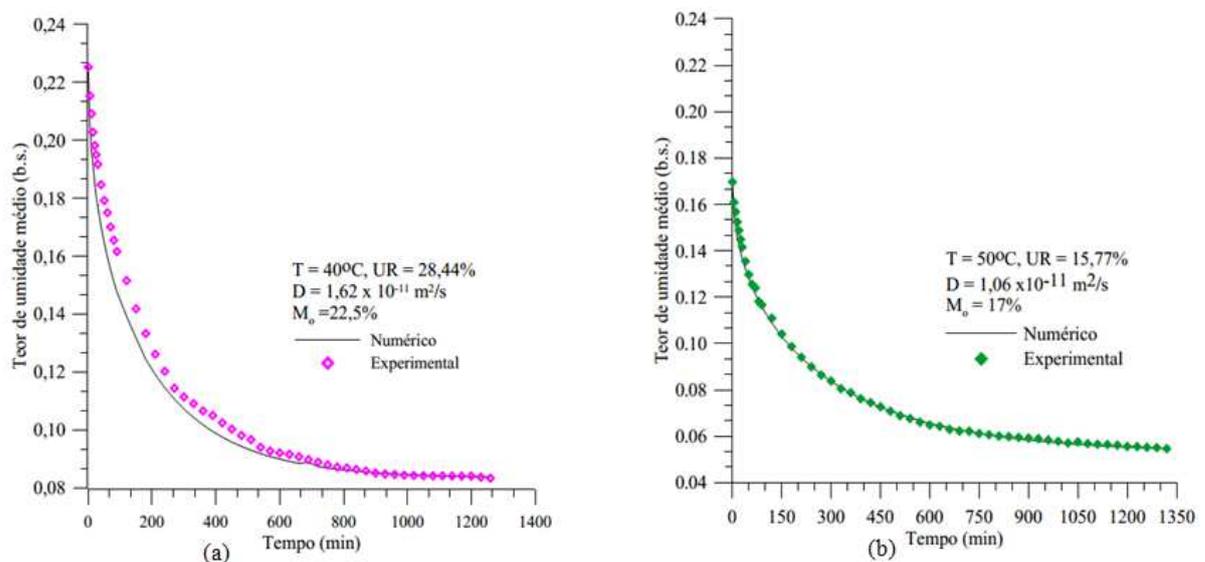


Figura 4.11 - Comparação entre os valores preditos e experimentais do teor de umidade médio em função do tempo para as temperaturas do ar de secagem de 40 e 50°C.

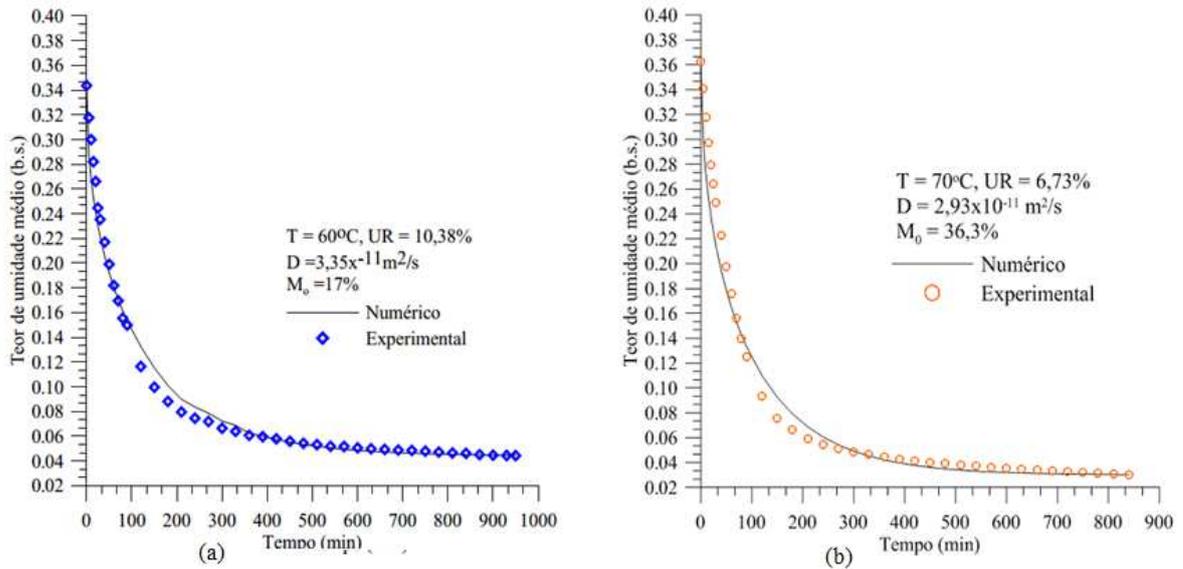


Figura 4.12 - Comparação entre os valores preditos e experimentais do teor de umidade médio em função do tempo para a temperatura do ar de secagem de: (a) 60 e (b) 70°C.

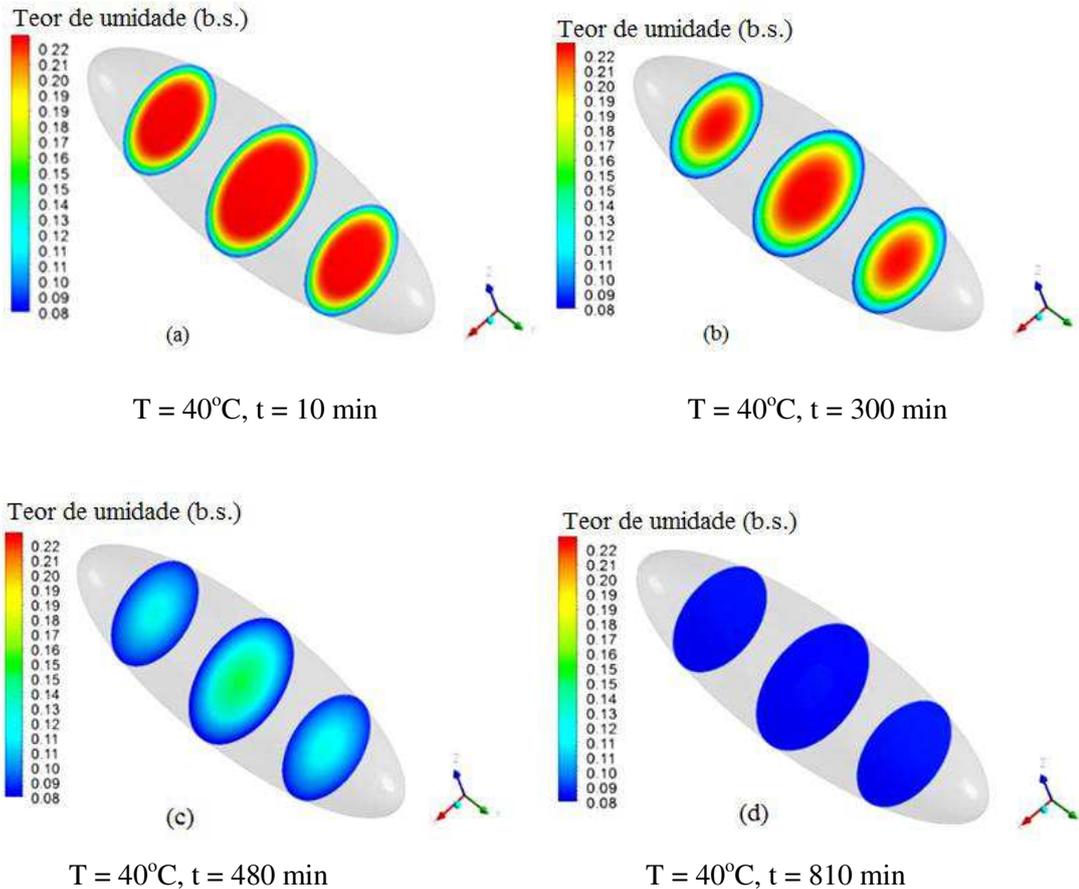
A Figura 4.12 (a) e (b) ilustra as variações do teor de umidade sofrida pelo grão de arroz ao longo do tempo, para as temperaturas constantes de secagem utilizadas na estufa de 60 e 70°C. Observa-se que, o teor de umidade na secagem com temperaturas mais elevadas, as variações de temperaturas e de umidades são mais bruscas pois, ocorre uma maior aceleração da desumidificação do produto em estudo. Observa-se, ainda a elevada concordância entre os valores de razão de umidade observados experimentalmente e os valores estimados pelo modelo da equação de Fick, para todas as condições estudadas, o que confirma o ajuste satisfatório desse modelo para descrever a cinética, para o tipo de processamento, nas condições estudadas.

No caso da curva de 40°C, Figuras 4.11 (a), o produto demorou mais tempo para atingir o equilíbrio, todavia, quando comparadas com a curva de 70, Figuras 4.12 (b), observa-se que o período de decrescência a curva de secagem foi bem mais rápida e o tempo mais curto. Enquanto que na Figura 4.11 (b), o produto com menor teor de água demorou mais tempo para atingir o equilíbrio. Portanto, para as condições em que foram feitos os experimentos, o produto com teor de água muito alto apresentou maior taxa de secagem em função da quantidade de água livre contida no grão. Assim, as curvas mostraram a variação da

temperatura da massa de grãos durante a secagem nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C que podem ser visualizadas nas Figuras 4.11 (a e b) e 4.12 (a e b), verificou-se que para as quatro temperaturas estudadas, a temperatura da massa de grãos leva em média 1080 minutos, aproximadamente, para entrar em equilíbrio com a temperatura do ar de secagem.

Verifica-se também nos gráficos, que o nível de temperatura exerce grande influência na secagem do produto. As curvas da cinética de secagem das Figuras 4.11 e 4.12, apresentam comportamentos similares obtidos entre a simulação numérica e experimental onde o tempo necessário para o grão atingir o teor de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 a 70°C, variou de 14 a 22 horas. Nesse trabalho, os tempos encontrados para a secagem do grão de arroz foram de 1260, 1260, 960 e 840 min para as secagens nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, respectivamente. Essas diferenças nos tempos de secagem podem estar relacionadas com as características físicas e químicas dos produtos, que variam em função das variedades, condições de cultivo e clima e também com o teor de água inicial. Evidencia-se também que o teor de água e o tempo de secagem diminuem consideravelmente com o aumento da temperatura do ar de secagem.

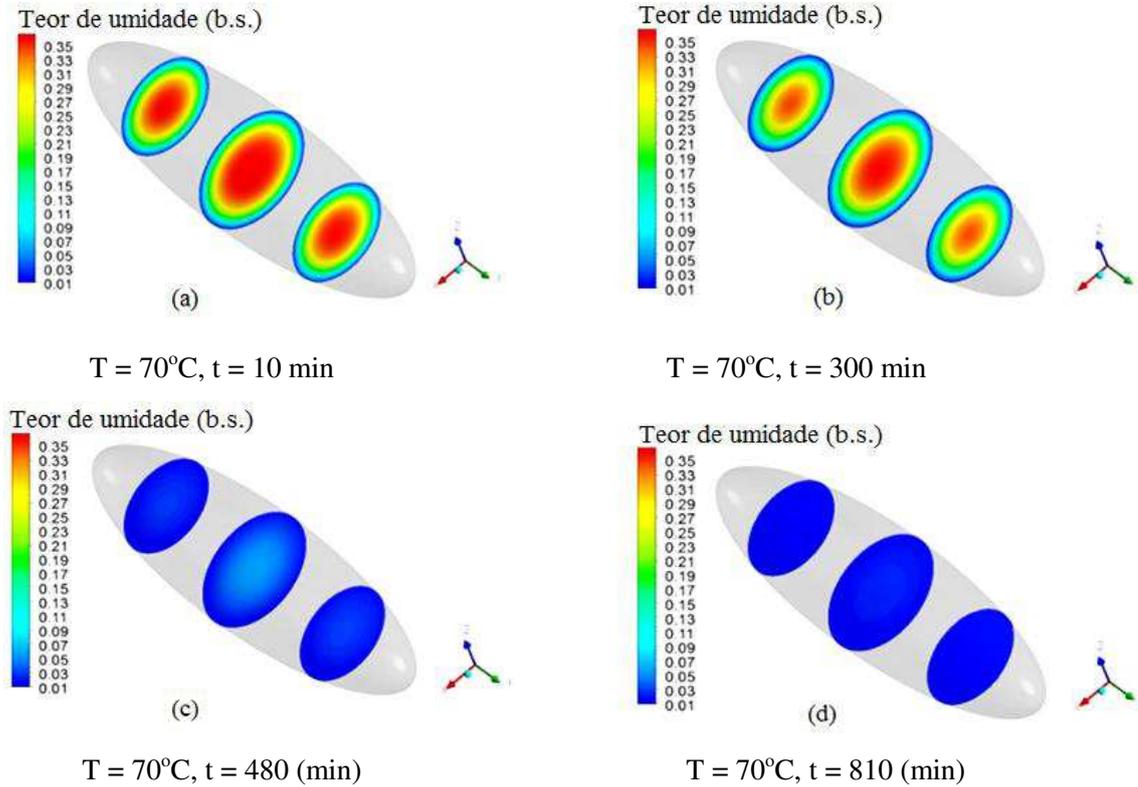
Os resultados do ajuste das curvas simuladas às curvas experimentais, obtidas quando considera a variação da difusividade com a temperatura do produto foram satisfatórios em todos os casos. Assim, com os bons resultados obtidos para a cinética de secagem nas variadas condições do ar de secagem de 40, 50, 60 e 70°C, utilizando-se o modelo da equação de Fick, a distribuição do teor de umidade e o campo de temperatura no interior do corpo também foram obtidos usando-se o software ANSYS CFX[®] em diferentes tempos de secagem como mostrados nas Figuras 4.13 (a, b, c e d) como segue.



Figuras 4.13 - Distribuição do teor de umidade em planos transversais para temperatura do ar de secagem igual a 40°C em tempos distintos.

As Figuras 4.13 (a - d) ilustram o campo do teor de umidade do grão no plano YZ em $X = 0$ para diferentes tempos de secagem, para as temperaturas do ar de secagem igual a 40°C . 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. Já no núcleo do grão, os teores de umidade reduzem-se lentamente. Nota-se também os mesmos efeitos implícitos da temperatura do ar de secagem de 70°C durante o processo de secagem nas Figuras 4.14 (a - d), onde, o grão tende atingir a umidade de equilíbrio mais rapidamente na temperatura mais elevada. Ou seja, mesmo com o teor de umidade inicial mais elevado, como é o caso na temperatura do ar de secagem de 70°C , a umidade do grão reduz-se mais rapidamente das extremidades do grão para o seu núcleo. Enquanto que na temperatura do ar de secagem de 40°C , o núcleo do grão apresenta-se com maior concentração de umidade fazendo com que o processo de secagem se torne mais lento. Isso implica dizer que, para os

mesmos instantes de tempo, a temperatura do ar de secagem tem grande influência no resultado final do processo fazendo com que o grão atinja o equilíbrio higroscópico com mais rapidez.



Figuras 4.14 - Distribuição do teor de umidade em planos transversais para temperatura do ar de secagem igual a 70°C em tempos distintos.

As Figuras (4.15) de (a) a (f) ilustram o campo de temperatura em planos transversais a geometria do arroz para diferentes tempos de secagem nas temperaturas de 40 e 70°C . Percebe-se que os valores da temperatura são mais elevados inicialmente nas extremidades do grão o que pode-se chamar efeito de ponta. Onde, a transferência de calor para o interior do grão ocorre em curto espaço de tempo até que a temperatura média atinja o valor da temperatura do ar de secagem. O equilíbrio térmico ocorre bem mais rápido para a temperaturas do ar de secagem igual a 70°C . Pelo fato das extremidades do grão aquecerem mais rapidamente do que no centro, pode surgir algumas trincas devido às tensões térmicas e reduzir o valor comercial do grão de arroz.

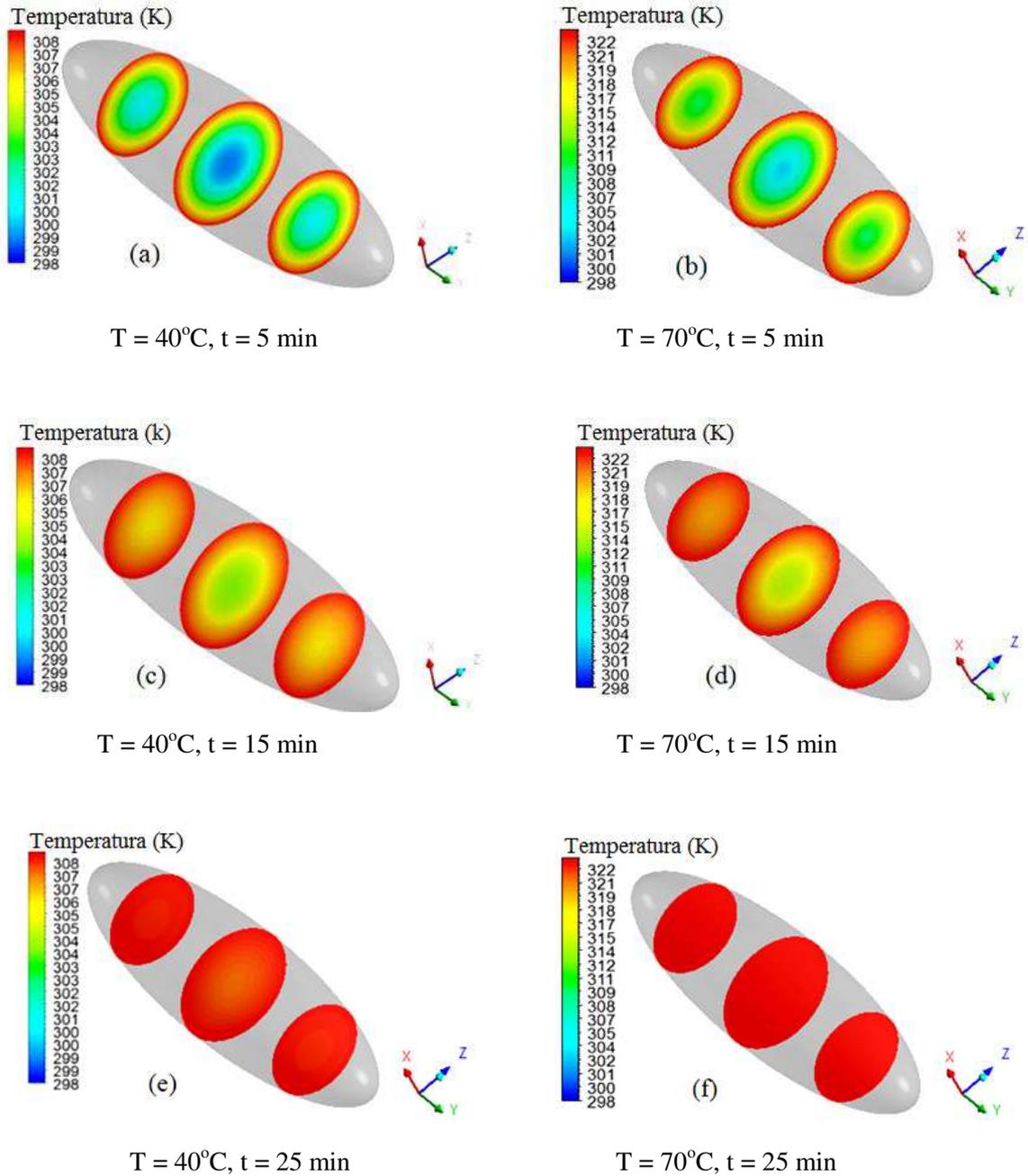


Figura 4.15- Campo de temperatura em plano transversais para as temperaturas do ar de secagem de 40 e 70°C nos tempos de 5, 15 e 25 minutos.

Observa-se que o equilíbrio térmico ocorre mais rápido para as temperaturas do ar de secagem igual a 40°C, devido a temperatura inicial do grão ser 26°C. Comparando o tempo necessário para o equilíbrio térmico em relação ao mássico, observa-se que o tempo necessário para que o grão entre em equilíbrio higroscópico com o meio é bem superior.

Diante do que foi observado nas Figuras (4.15) de (a) a (f) fica evidente que para a temperatura de 70°C, encontramos os maiores gradientes de temperatura, o que favorece a trinca e deformação no produto, comprometendo sua qualidade.

Ao longo dos experimentos realizados com as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, onde o fluxo do ar quente com velocidade entre 0,4 a 0,7 m/s e baixa umidade relativa foi utilizado para a transferência de calor por difusão para as amostras do arroz em casca, o mecanismo de transferência de calor por convecção também ocorre. Durante o processo de secagem, dependendo da temperatura do ar de secagem em que o grão está sendo aquecido dentro da estufa, esse grão muda a cor da casca e consequentemente a massa do grão como mostrado nas Figuras 4.16 a 4.19.



Figura 4.16 - Grão com teor de umidade de 22%, (a) antes e (b) depois da secagem na temperatura de 40°C.



Figura 4.17 - Grão com teor de umidade de 34%, (a) antes e (b) depois da secagem na temperatura de 60°C.



Figura 4.18 - Grão com teor de umidade de 36%, (a) antes e (b) depois da secagem na temperatura de 70°C.

Na Figura 4.16, com o grão seco na temperatura de 40°C e teor umidade de 22% (b.s.), a diferença na cor da casca do grão é muito pequena, antes e depois da secagem. Na Figura 4.17, mesmo os grão apresentando teor de umidade mais elevado (34% b.s), no final da secagem a cor do grão fica nitidamente mais escura: Esse fato pode está associado não só a elevação da temperatura para 60°C como também com o aumento do fluxo do ar de secagem. Esse processo fica mais evidente, na Figura 4.19, quando eleva-se a temperatura do ar de secagem para 70°C. Percebe-se que a casca do grão tende a escurecer mais ainda, aumentando o número de grãos com trincas e quebrados. Uma das alternativas para não enfraquecer o grão e aumentar o número de trincas, é não ultrapassar o tempo pós equilíbrios higroscópico, manter o limite máximo de temperatura tolerável pelo grão de arroz em casca, monitorar o fluxos de ar e umidade relativa de secagem.

Na Figura 4.19 , percebe-se que a maioria dos grãos não apresentam condição mínima para suportar o processo final de beneficiamento (descasque, brunimento e armazenamento), pois, nesse estágio da secagem, o grão é considerado queimado, ou seja, o grão está impróprio tanto para o plantio (perda do poder germinativo) como para a comercialização. Portanto, o excesso de secagem resulta em grãos muito suscetíveis a danos mecânicos nas operações subsequentes a serem realizadas na Unidade de Beneficiamento. Então, deve-se ficar atento à temperatura de secagem e ao tempo de exposição do produto, fatores estes que devem ser estritamente controlados.



Figuras 4.19 - Queima do grão de arroz BRSMG CONAI após a secagem.

Os grãos exposto na Figura 4.19, foram secos na temperatura de 70°C do ar de secagem. 24 horas pós alcançar o teor de umidade de equilíbrio ($M_e = 0,024$ (b.s.)), uma das bandejas com a amostra dos grãos, permaneceu dentro da estufa por mais 03 horas na temperatura de $105 \pm 3^\circ\text{C}$. Esse tempo a mais que a bandeja ficou dentro da estufa, foi deixada propositalmente para verifica as características estruturais dos grãos.

4.2.2 Modelo II: Condições de contorno do terceiro tipo

Para descrever o transporte de umidade, a geometria do sólido poroso deve ser definida. Em muitos estudos sobre secagem de produtos agrícolas são usados corpos de teste na forma de elipsóide. Assim, na simulação do processo de secagem, os parâmetros termo-físicos devem ser conhecidos. Uma vez que, em muitas situações de interesse, tais parâmetros são avaliados na literatura e podem ser usados na simulação da cinética de secagem; no entanto, se esses parâmetros ainda não são conhecidos, eles devem ser determinados de alguma forma, através de otimização ou experimentos permitindo realizar a simulação do processo de secagem. Os resultados da simulação matemática com condições iniciais e de contorno de terceiro tipo, permite a otimização do processo de secagem, em tempo mais demorado, porém, bem mais satisfatório por apresentar uma transparência real do processo de secagem como mostrado nas Figuras 4.20 e 4.21.

Nas Figuras 4.20 (a e b) apresentam-se as curvas do teor de umidade médio do grão em função do tempo para diferentes temperaturas do ar de secagem.

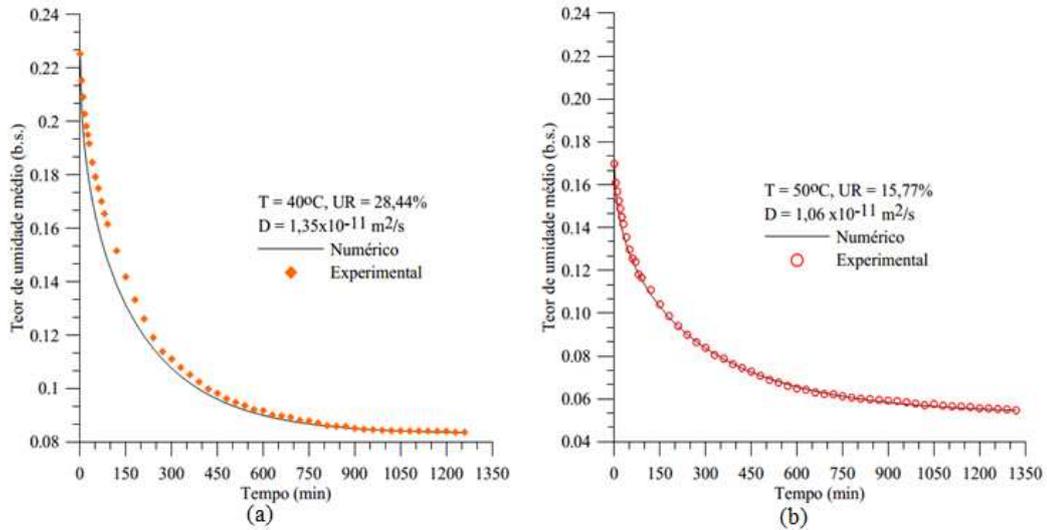


Figura 4.20 – Comparação entre os valores preditos e experimentais do teor médio de umidade em função do tempo para temperaturas de ar de secagem de 40 e 50°C (Modelo II).

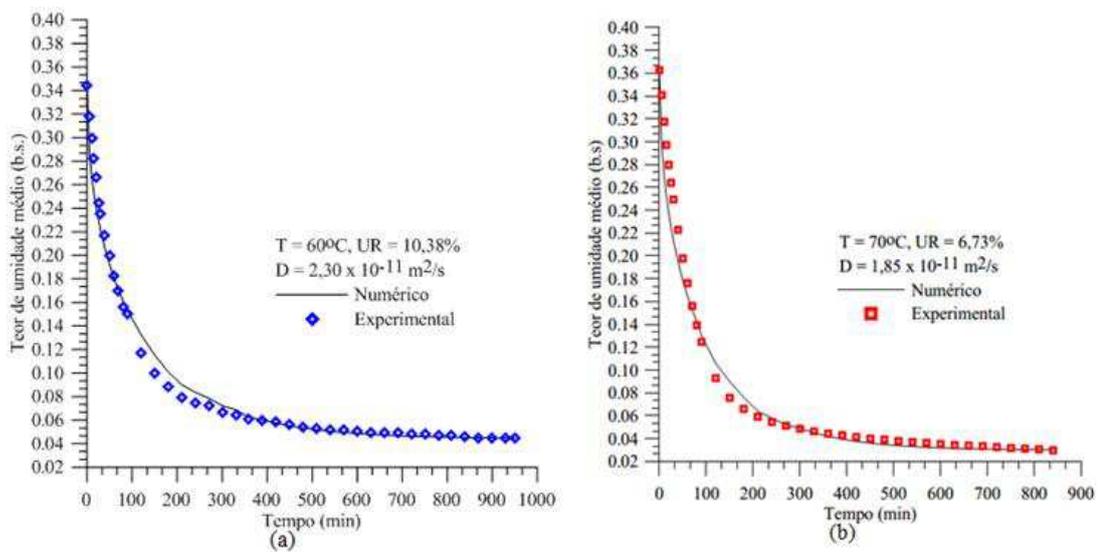


Figura 4.21 – Comparação entre os valores preditos e experimentais do teor médio de umidade em função do tempo para temperaturas de ar de secagem de 60 e 70°C (Modelo II).

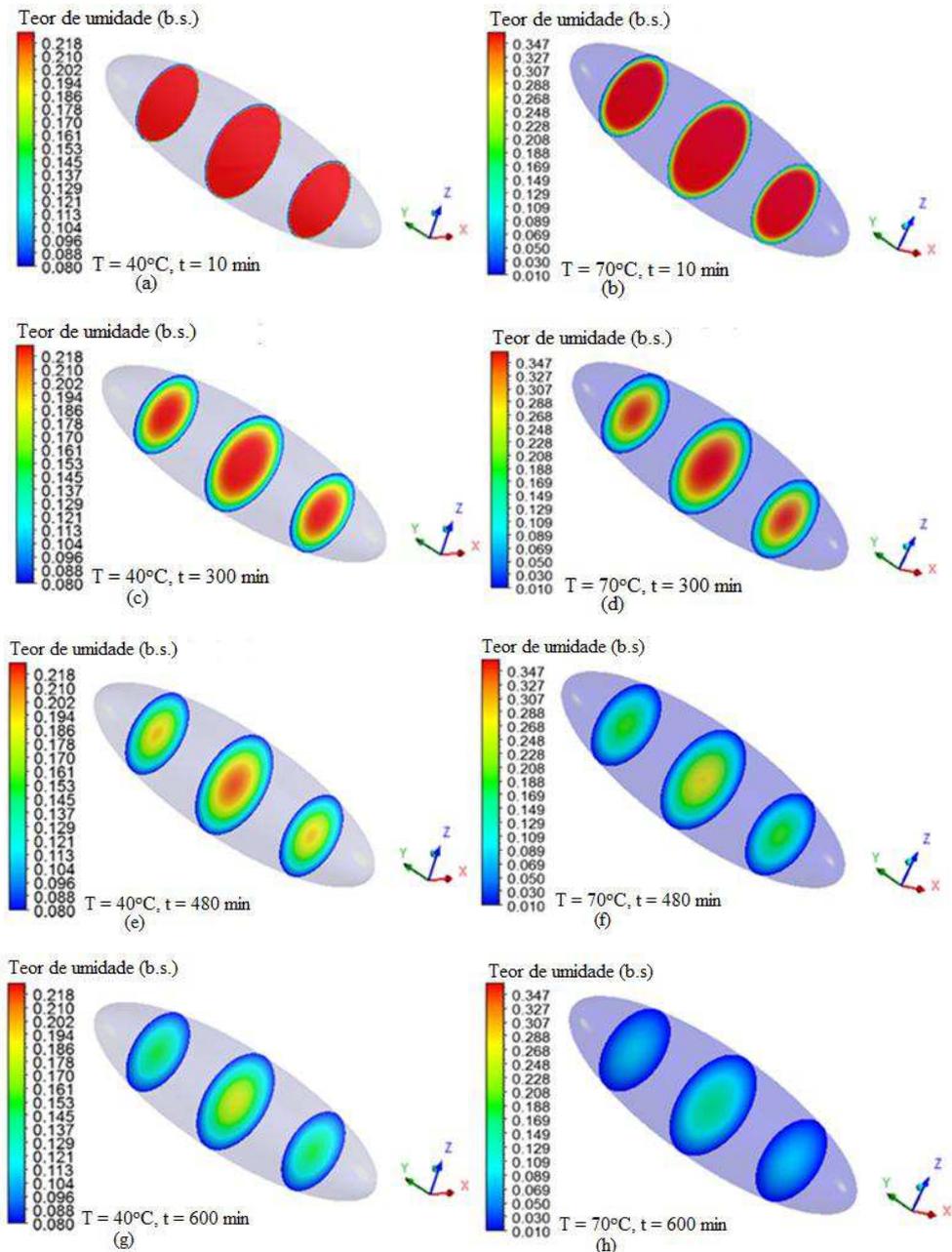
Observa-se nas Figuras 4.20 e 4.21, que os valores do teor de umidade médios atingiram o estado estacionário, quando este valor iguala-se ao teor de umidade em equilíbrio

a uma dada temperatura. Evidencia-se nesse processo que a curva de secagem é mais rápida para temperaturas mais elevadas do ar de secagem, por fornecer maior redução no teor de umidade até que se alcance o teor de umidade comercial, otimizando o processo de secagem do arroz em casca. De maneira geral, constata-se que todas as amostras nas diferentes temperaturas alcançaram o teor de umidade de equilíbrio em tempos distintos. Mostrou-se também, que a de menor temperatura tem o segundo maior tempo de processo. Ou seja, o período de taxa decrescente da secagem indica que as resistências internas à transferência de massa, associadas à estrutura da partícula, governa o processo de secagem dos grãos do arroz. Fisicamente, a migração interna de umidade não consegue suprir a taxa de evaporação na superfície e a taxa de secagem diminui com a remoção de umidade.

Como comentário final, pode ser dito que apesar do bom ajuste apresentado neste trabalho pelo modelo de Fick, quando aplicado ao grão de arroz, é necessário dar maior atenção ao estudo quantitativo das variações de área superficial e volume durante o processo de desidratação, especialmente com considerações mais complexas. Segundo Hacıhafizoğlu et al. (2008) e Brooker et al. (1992), o tempo necessário para o grão atingir o teor de umidade comercial (12 a 13%) fica em torno de 5 a 6 horas para uma temperatura do ar de secagem igual a 50°C, enquanto neste trabalho este tempo foi de aproximadamente 21 horas para a temperatura do ar de secagem de 40°C e de 14 horas para a temperatura do ar de secagem de 70°C. Esse tempo mais prolongado pode ter sido devido as condições de secagem, tipo de grão, teor de umidade inicial, umidade de equilíbrio e umidade relativa serem diferentes.

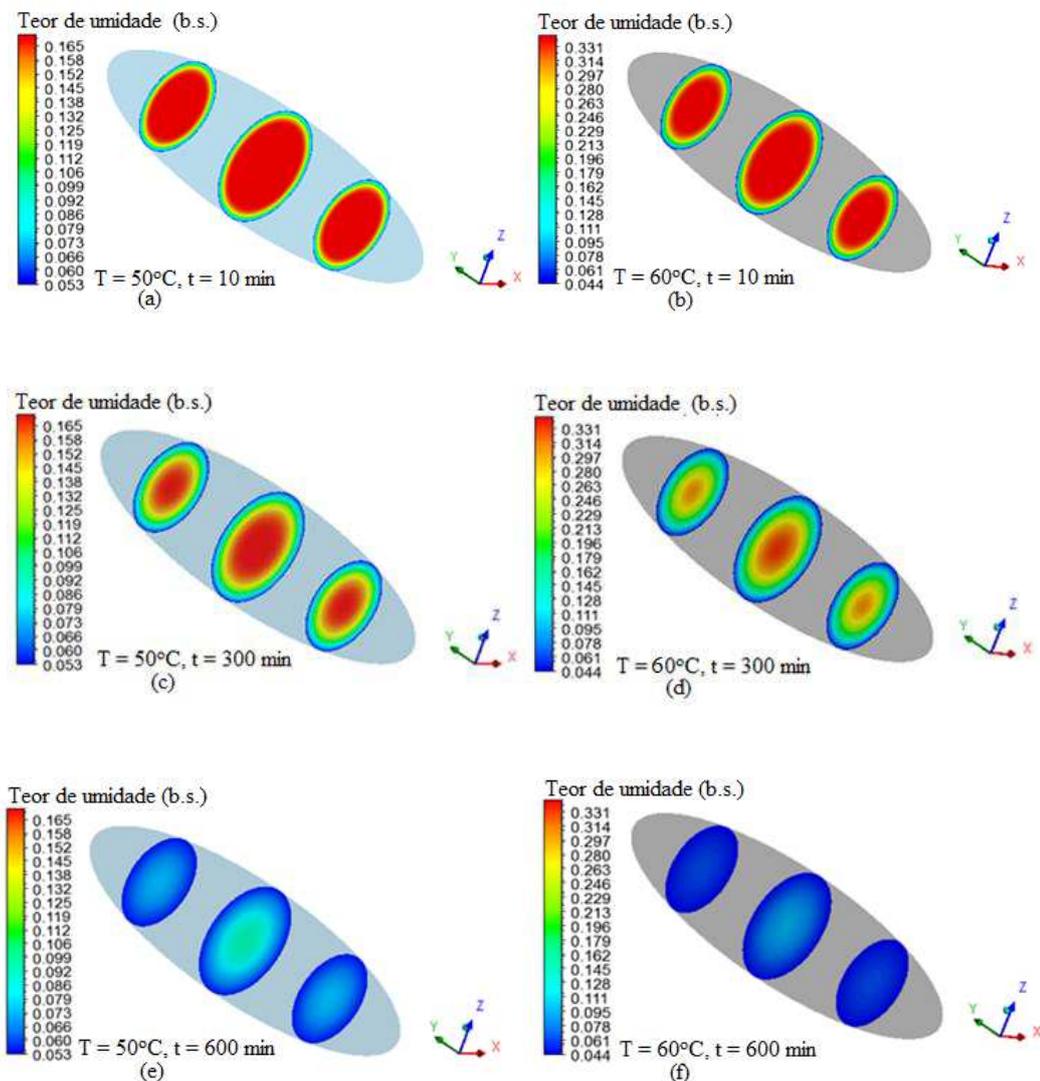
As simulações numéricas realizadas tiveram como objetivo determinar o tempo de equilíbrio mássico para diferentes condições na superfície do grão. A faixa de temperatura para as simulações variou de 40 a 70°C. Também teve como objetivo determinar a cinética de secagem de arroz considerando a geometria um elipsóide de revolução. Para isto foram traçadas os planos transversais relacionando o teor de umidade médio e temperatura em função do tempo onde, os parâmetros físicos variaram de acordo com cada temperatura da simulação. As Figuras (4.22, (a - h) e (4.23, (a - h)), ilustram os campos do teor de umidade em planos transversais da geometria do grão de arroz para diferentes tempos de secagem nas temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60 e 70°C. Os planos expostos paralelamente de 40

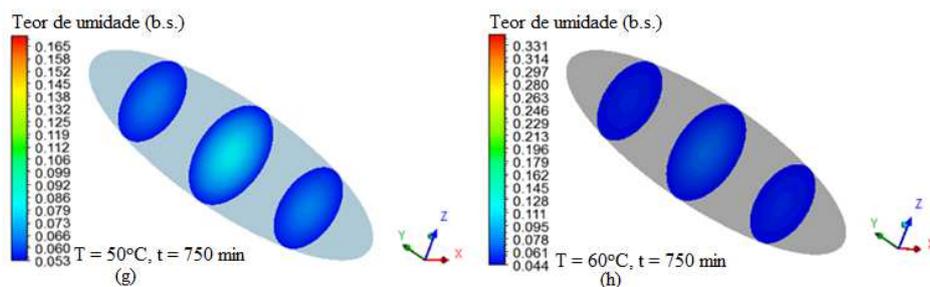
e 70°C, mostram a diferença da distribuição do teor de umidade no interior do grão em tempos distintos. Observa-se nas figuras que para os mesmos tempos de secagem, o teor de umidade difere para os dois casos, sendo menor para a temperatura mais alta. Isto comprova a influência implícita da temperatura no coeficiente de difusão mássica, pois, à medida que aumenta a temperatura do ar de secagem, reduz-se o tempo para que o grão entre em equilíbrio higroscópico.



Figuras 4.22 - Teor de umidade em função do tempo para as temperaturas do ar de secagem de 40 e 70°C nos tempos de 10, 300, 480 e 600 minutos.

A Figura (4.23, (a - h)), ilustra o campo do teor de umidade do grão nos planos transversais para diferentes tempos de secagem, para as temperaturas do ar de secagem igual a 50 e 60°C. 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. Já no núcleo do grão, os teores de umidade reduzem-se lentamente. Nota-se também o efeito implícito da temperatura no processo de secagem. Para os mesmos instantes de tempo, o teor de umidade máximo é maior para a temperatura do ar de secagem igual a 60°C (34,4%) em relação ao teor de umidade para a temperatura do ar de secagem de 50°C (17,0%). A diferença é devido aos diferentes teores de umidade inicial da amostra.





Figuras 4.23 - Teor de umidade em função do tempo para as temperaturas do ar de secagem de 50 e 60°C nos tempos de 10, 300, 600 e 750 minutos.

Percebe-se que tanto nas Figura (4.24) como Figura (4.25), o valor do teor de umidade nos instantes de tempos subsequentes reduz-se no centro do grão até tender ao valor da umidade de equilíbrio no tempo final de secagem. O processo ocorre mais lento com a temperatura de 50°C, comparado com a temperatura de 60°C que apresenta o teor de umidade mais elevado, o grão atinge o equilíbrio higroscópico com mais facilidade mostrando que a temperatura do ar de secagem tem grande influência no processo de secagem.

❖ Fases de representação da secagem nos planos transversais

i) – Na primeira fase, observa-se que no início do processo de secagem ocorrem à adaptação do grão às condições ambientais (temperatura e pressão), nas quais foram efetuadas a secagem nas temperaturas de 40 a 70°C.

ii) - Na segunda fase do processo, inicia-se a evaporação da água livre mais próxima da superfície do grão. Nesse momento, dependendo da temperatura e do tipo de grão podem ocorrer variações sensíveis das dimensões do produto devido à sua microestrutura. Ainda nesta fase a água constantemente migra até a superfície do grão, formando constantemente pequenas bolhas úmidas saturadas que então se evapora, tornando assim a velocidade de evaporação aproximadamente constante em função principalmente da porosidade do grão.

iii) Na terceira fase ocorre o desaparecimento das bolhas de água na superfície do grão, que mudam de cor de fora para dentro do grão. Esta diminuição da quantidade de água

que se desloca por capilaridade, ou difusão, acaba por formar vazios no interior do grão e a quantidade de água evaporada decresce gradativamente, havendo uma conseqüente redução da velocidade de evaporação e de secagem devido à diminuição do gradiente hídrico.

iv) Na última fase da secagem, acontece equilíbrio higroscópico. Ela informa qual é o limite do teor de umidade do grão que pode ser obtido em função das condições da atmosfera secante (temperatura e umidade relativa do ar). Com elas, pode-se estimar o tempo de secagem de certo produto agrícola, o que é de fundamental importância para o planejamento de produção. Pois, os grãos como qualquer material higroscópico, mantêm equilíbrio de sua umidade com determinada umidade relativa do ar, a uma dada temperatura. (VILELA e ARTUR, 2008).

A Tabela 4.4 mostra o tempo em horas necessário para secagem completa do arroz em casca para alcançar o equilíbrio higroscópico nas várias temperaturas do ar de secagem.

Tabela 4.4 - Temperatura do ar de secagem e tempo de equilíbrio higroscópico.

T(°C)	40	50	60	70
Tempo de secagem (min)	1.260	1.260	960	840

Observa-se na Tabela 4.4, que o processo de secagem de modo geral, torna-se mais rápido com o aumento da temperatura do ar de secagem.

4.2.3 Estimativa do coeficiente de difusão

Os processos físicos de difusão de massa no interior do produto obedeceu às leis da conservação de massa. Durante a secagem o calor é transferido principalmente por convecção na superfície material e por condução até o centro. Neste período a umidade migra para a superfície externa do material. Modelos matemáticos são usados para descrever as características cinéticas do processo de secagem, visando melhorar, projetar e controlar os sistemas de secagem. Nesta pesquisa, modelos baseados na análise distribuída foram usada

para prever a perda de água e aquecimento dos grãos de arroz. Isso mostra que os modelos matemáticos desenvolvidos neste trabalho permitem simular diferentes condições de secagem possibilitando otimizar o processo com o objetivo de se obter um grão seco de boa qualidade no menor tempo possível. A simulação do processo, tornou-se mais fácil em virtude de termos dados experimentais confiáveis e conhecimento dos mecanismos de transferência de calor e massa no interior do produto.

Os passos de tempos utilizados nas simulações foram 60 s para a equação da transferência de massa e 0,01 s para a equação da transferência de calor. Foram feitos testes variando os passos de tempo e comparando os resultados, com o objetivo de garantir que estes não iriam influenciar na solução numérica. Dentre os vários modelos existentes nas literaturas, o modelo de difusão de Fick foi considerado satisfatório para estimar as curvas de cinética de secagem das amostras dos grãos de arroz em todas as temperaturas, apresentando os menores valores do erro mínimo quadrático ($< 0,002$). A Tabela 4.5 resume os parâmetros experimentais de secagem dos grãos de arroz.

Tabela 4.5 - Coeficiente de transporte estimados para cada teste experimental (Modelo I e Modelo II)

T (°C)	Modelo I		Modelo II				
	D ($\times 10^{-11}$) (m^2/s)	Erro mínimo quadrático	D ($\times 10^{-11}$) (m^2/s)	Erro mínimo quadrático	h_m (m/s)	h_c ($W/m^2.K$)	h'_m (m/s)
40	1,62	0,0022962	1,35	0,002768	36,86585	34,42191	$1,19 \times 10^{-5}$
50	1,13	0,0033412	1,06	0,000306	39,04597	36,49368	$3,09 \times 10^{-5}$
60	3,35	0,0180793	2,30	0,005066	40,98446	38,39177	$2,34 \times 10^{-5}$
70	2,93	0,0130179	1,85	0,012822	42,81557	40,17627	$3,75 \times 10^{-5}$

A análise a seguir pressupõe que os dados estabelecidos na Tabela 4.5 para o modelo difusivo (I) ou convectivo (II) são aceitáveis para o processo de secagem em investigação. Percebe-se que, para os dados explícitos na Tabela 4.5, os valores dos coeficientes de difusão para o modelo I (ideal), são maiores que os coeficientes de difusão obtida para o modelo II (real), logo, a estimativa da propriedade é maior que no processo real. ou seja, se o coeficiente

de difusão é maior, o tempo de secagem torna-se menor, enquanto que no processo convectivo (real), a secagem é mais lenta. No entanto, quanto mais a geometria considerada está próxima da geometria real do grão de arroz, melhores são os resultados. Portanto, pode-se comprovar que a escolha das condições de contorno e geometria apropriada do grão são cruciais na descrição do processo de secagem.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Em função do trabalho realizado nesta pesquisa, pode-se concluir que:

a) A secagem de arroz em casca ocorre em um período de taxa decrescente, independente da temperatura e geometria da amostra;

b) A temperatura e a geometria do arroz em casca têm forte efeito na cinética de secagem. Quanto maior a temperatura mais rápida ocorre à secagem, fixado em menos de 100% a umidade relativa do ar;

c) O tempo necessário para o grão de arroz em casca atingir o teor de umidade de equilíbrio, diminui com o aumento da temperatura do ar de secagem, sendo de 1260 minutos para 40°C e de 840 minutos para 70°C;

d) O tempo necessário para o grão de arroz em casca atingir o equilíbrio térmico experimental variou entre 120 para a temperatura de 40°C e 200 minutos para 70°C e o numérico, o tempo foi de 25 minutos.

e) Verificou-se que a micrografia do grão de arroz *in natura* se diferenciou das imagens obtidas das amostras submetidas à secagem. A análise micrográfica possibilitou verificação das alterações na estrutura morfológica do grão em relação à ocorrência das trincas e fissuras no interior do grão; tanto aos grão de arroz *in natura* como os submetidos a secagem;

f) Verificou-se que o número de fissuras no grãos de arroz aumenta a medida que o grão de arroz fica exposto por mais tempo a temperatura ambiente após o processo de secagem;

g) O modelo matemático proposto, disponível no *software* ANSYS CFX[®] representou bem a física do problema e as distribuições de temperatura e do teor de umidade no interior do material ao longo do processo;

h) Os resultados numéricos apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais do teor de umidade do grão de arroz submetido à secagem, mostrando que a metodologia usada para estimar os coeficientes de transporte foram satisfatórias;

i) Verificou-se que a umidade migra do centro para a superfície do grão, enquanto que o calor flui da superfície para o centro, que geram gradientes térmicos e hídricos responsáveis pela ocorrência de tensões, trincas e deformações que podem comprometer a qualidade final do produto.

j) Os coeficientes de difusão de massa do modelo I (difusivo) variaram de $1,62 \times 10^{-11}$ m²/s a $2,93 \times 10^{-11}$ m²/s, enquanto que no modelo II (convectivo), os coeficientes de difusão variaram de $1,35 \times 10^{-11}$ m²/s a $1,85 \times 10^{-11}$ m²/s, quando a temperatura do ar de secagem variou de 40 até 70°C. Pelo fato do modelo II incluir os fenômenos convectivo e difusivo, os resultados são mais confiáveis.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Descrever o movimento de umidade, com precisão, para um material biológico pequeno e complexo como o arroz em casca é muito desafiador. Apesar de décadas de trabalhos com modelagem e simulação, muitas premissas nesses modelos e simulações devem testados com vistas a fornecer um amplo horizonte. Neste contexto, as seguintes sugestões para futuras pesquisas, são dadas:

- ❖ Aprofundar estudos sobre a distribuição de umidade dentro do núcleo do arroz, pois raramente tem sido validada por técnicas experimentais. A incerteza sobre o verdadeiro mecanismo de migração de umidade ainda não está completamente resolvido;
- ❖ Desenvolver pesquisas para determinar valores limites de gradientes de umidade que devem ser evitados para minimizar trincas e fissuras no grão de arroz;
- ❖ Aplicar os modelos apresentados neste trabalho à secagem de outros produtos biológicos;
- ❖ Estudar a secagem de arroz em casca em outras condições experimentais;
- ❖ Avaliar a secagem de arroz em casca submetido à pré-tratamentos e outras técnicas de aquecimento, como micro-ondas e radiação infravermelho;
- ❖ Desenvolver novos modelos matemáticos e utilizar os dados experimentais desta pesquisa para validá-los.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIAP. Associação Brasileira das Indústrias de Arroz Parboilizado. Arroz branco ou parboilizado? Disponível em: <<http://www.abiap.com.br>>. Acesso em: 30 nov. (2011).

ADORIAN, G. C. Caracterização da diversidade fenotípica existente em uma coleção nuclear de arroz de terras altas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Tocantins UFT, 2010.

AHLGREN, S.; BAKY, A.; BERNESSON, S.; NORDBERG, A.; NORÉN, O.; HANSSON, P. A. Ammonium nitrate fertilizer production based on biomass – environmental effects from a live cycle perspective. *Bioresource Technology*, v.99, p.8034-8041, 2008.

ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. D. L.; FILHO, A. F.; PETERNELLI L. A.; COSTA, A. R. Qualidade dos grãos de soja armazenados em diferentes condições. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.13, n.5, p.606–613, 2009.

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

ALMEIDA, G. S. Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 191p. 2009.

AMATO, G. W.; ELIAS, M. C. A Parboilização do arroz. 1. ed. Porto Alegre: Ricardo Lenz Editor, v. 1. 160 p. 2005.

ANSYS. ANSYS CFX 11 - Program and Program Documentation, Release 11.0, ANSYS Inc. 2007.

BARATA, T. S. Caracterização do consumo de arroz no Brasil. Dissertação de Mestrado. apresentada no Curso de Mestrado em Agronegócios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2005.

BARROZO, M. A. S.; HENRIQUE, H. M.; SARTORI, D. J. M., FREIRE, J. T. The use of the orthogonal collocation method on the study of the drying kinetics of soybean seeds. *Journal of Stored Products Research* v.42, p.348–356, 2006.

BIHAIN, A. L. J. Modelagem matemática da influência da umidade do ar, sobre a dinâmica de secagem de grãos de soja em camada fina. Dissertação de Mestrado – Universidade Regional do Noroeste do estado do RS. – UNIJUI. Ijuí. 138 f. 2011.

BINOTTI, F. F. S.; ARF, O.; FERNANDES, F. A.; SÁ, M. E. Momento de colheita e períodos de armazenamento no rendimento industrial e na qualidade fisiológica do arroz de terras altas. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.29, n.2, p.219-226, 2007.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Transport phenomena*. 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc, New York, 912 p. 2001.

BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R.; ANDRADE, E. T. Processamento do café. In - *Pós-Colheita do Café*. Lavras - MG, Editora UFLA 1ª ed. 631 p. 2008.

BORGES, P. A. P. Modelagem dos processos envolvidos nos sistemas de secagem e armazenamento de grãos. 2002, p.123. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BORTOLAIA, L. A. Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo. Tese de Doutorado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2011.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 6, de 16 e fevereiro de 2009. Aprova o regulamento técnico do arroz, definindo o seu padrão oficial de classificação, com os requisitos de identidade e qualidade, a amostragem, o modo de apresentação e a marcação ou rotulagem. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, Seção 1, p. 3, 2009.

BRAZ, A. J. B. P.; KLIEMANN, H. J.; SILVEIRA, P. M. da. Produção de fitomassa de espécies de cobertura em Latos solo Vermelho distroférico. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v.35, n.1, p. 55-64, 2005.

BRESEGHELLO, F.; MORAIS, O. P. D.; CASTRO, E.D.M. Cultivo do arroz de terras altas no Estado de Mato Grosso. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 161p. 2006.

BRESEGHELLO, F.; MORAIS, O. P.; PINHEIRO, P. V.; SILVA, A. C. S.; CASTRO, E. M.; GUIMARÃES, E. P.; CASTRO, A. P.; PEREIRA, J. Á.; LOPES, A. M.; UTUMI, M. M. OLIVEIRA, J. P. Results of 25 years of upland rice breeding in Brazil. Crop Science, Madison, v. 51, n. 3, p. 914-923, 2011.

BROOKER, D B.; ARKEMA, F. W. B.; HALL, C. W. Drying and storage of grains and oilseeds, New York, AVI Book, 1992.

BUNYAWANICHAKUL, P. Development of a cyclone rice dryer, Ph.D. Thesis, University of Tasmania, Tasmania, Australia v.96, n.6, p.335-344, 2007.

CADÉ, M. A.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. de. Secagem de tijolos cerâmicos vazados: Uma aproximação por volumes finitos. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v.10, n.3, p.443–453, 2005.

CAMELLI, F.; LOHNER, R.; MESTREAU, EL de. 2007: Tempos de um Código CFD Unstructured-Grid em plataformas de hardware comuns e Compiladores. Papel AIAA 2007-1107.

CANCELLIER, E. L.; BARROS, H. B.; KISCHEL, E.; GONZAGA, L. A. M.; BRANDÃO, D. R.; FIDELIS, R. R. Eficiência agronômica no uso de nitrogênio mineral por cultivares de arroz de terras altas. *Revista Brasileira Ciências Agrária, Recife*, v.6, n.4, p.650-656, 2011.

CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; VIANA, A. P.; DETMANN, E.; DIONELLO, R. G. Secagem de sementes de maracujá em camada delgada. *Revista Brasileira de Fruticultura, Revista Brasileira de Sementes*, v.29, n.2, p.28-37, 2007.

CARMO, J. E. F. Fenômenos de difusão transiente em sólidos esferoidais oblatos. Estudo de caso: secagem de lentilhas. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil. 139p. 2004.

CARMO, J. E. F., LIMA, A. G. B. de. Modelling and simulation of mass transfer inside the oblate spheroidal solids, In: *Inter-American drying conference, México, Proceedings v.8* p.173-183. 2008.

CARVALHO, J. A. Espaçamento e densidade de semeadura para arroz de terras altas de ciclo superprecoce. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras UFLA. 83p. 2006.

CASEMEG - Companhia de Armazéns e Silos do Estado de Minas Gerais. Ministério de Agricultura, Pecuária e abastecimento, 2011. Disponível em:
Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT - <http://www.ciat.cgiar.org> . Acesso em 21/10/2015.

CASTRO, E. da M. de; BRESEGHELLO, F.; MORAIS, O. P. de. Cultivares. In: KLUTHCOUSKI, J.; PINHEIRO, B. da S. (Eds.). *Cultivo de arroz de terras altas*. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 25 abr. 2013.

CAZETTA, D. A.; ARF, O.; BUZETTI, S.; SÁ, M. E. de; RODRIGUES, R. A. F. Industrial quality of an upland rice variety cultivated in rotation with several crops and nitrogen doses in a no-till system. *Científica*, Jaboticabal, v.34, n.2, p.155-161, 2006.

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

CIHAN, A.; KAHVECI, K.; HACIHAFIZOĞLU, O. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. *Journal of Food Engineering*, v.79, p.293–298, 2007.

CIHAN, A.; KAHVECI, K.; HACIHAFIZOĞLU, O.; LIMA, A. G. B. de. A diffusion based model for intermittent drying of rough rice. *Heat and Mass Transfer*, v.44, n.8, p.905-911, 2008.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://conab.gov.br>. Acesso em: junho de 2013.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento v.1 - Safra 2013/14. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_09_10_14_35_09_boletim_graos_s_eteembro. Acesso em julho de 2014.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* l.) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.2, p.50-510, 2007.

CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F. M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campinas Grande, v.10, n.3, p.665-670, 2006.

COSTA, E. C.; Ventilação. São Paulo: Edgard Blücher, 36p, 2005.

COSTA, L. M.; OSVALDO R.; KELLY A. S. e DOUGLAS N. G. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.15, n.10, p.1089-1096, 2011.

CRANK, J. The mathematics of diffusion. Clarendon Press, Oxford, UK, 1992, 414 p.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; ARF, O.; MATEUS, G. P. Yield of upland rice cultivars in rainfed and sprinklerirrigated systems in the Cerrado region of Brazil. Australian Journal of Experimental Agriculture, Collingwood, v.46, n.9, p.1515-1520, 2006.

DALL'AGNO, A.; HIRAKURI, M. H. Realidade e perspectivas do Brasil na produção de alimentos e agroenergia, com ênfase na soja. Circular Técnica 59. Embrapa Soja. Londrina, PR, 2008.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D.; SPERANDIO, S. D. Secagem de grãos, Engenharia. Agrícola. v.30. p.726, 2010.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D., MONKEN E SILVA, L. H.; e KOLLING, E. Fixed-bed drying simulation of agricultural products using a new backward finite difference scheme, Applied Mathematics and Computation, p.590–595, 2008.

DENARDIN, C. C.; WALTER, M.; SILVA, L. P. Influência do beneficiamento na composição nutricional em farelo de arroz. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE QUALIDADE DE ARROZ, 2, Anais...Pelotas: ABRAPÓS, 660p. 2005.

DIAS, L. G. Estudo do processo de secagem em estufa e por microondas de compósitos cerâmicos de argila e resíduos de esteatito. 2013, 111p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de são João Del Reis – UFSJ.

EICHELBERGER, L. e PORTELLA, J. A. Atividade enzimática de genótipos de arroz irrigado sob diferentes condições ambientais. Pesquisa. Agropecuária. Gaúcha, v.9, n.1-2, p.85-91, 2003.

ELIAS, M. C. Pós-colheita de arroz: Secagem, armazenamento e qualidade. 1. ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária UFPEL, v.1. 424p, 2007.

ELIAS, M. C.; LOPES, V.; GUTKOSKI, L. C.; OLIVEIRA, M.; MAZZUTT, S.; DIAS, A. R. G. Operações de pré-armazenamento, armazenamento e conservação de grãos. Pelotas: Edgraf UFPEL, p.147-244. 2007.

ELIAS, M.C; OLIVEIRA, M. Sistema nacional de certificação de unidades armazenadoras de grãos e fibras: Tecnologia e Legislação. Ed. Santa Cruz, Pelotas, 477p. 2010.

ELIAS, M. C. Pós-colheita de arroz: Secagem, armazenamento e qualidade. 3.ed. Pelotas: UFPEL, 437p. 2007.

ELIAS, M.C. Manejo tecnológico da secagem e do armazenamento de grãos. Pelotas: Ed. Santa Cruz, 367p. 2008.

ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M.; SCHIAVON, R. A. Qualidade de arroz na pós-colheita: Ciência, tecnologia e normas. Pelotas: Santa Cruz, 543 p. 2010.

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Secagem, armazenamento e beneficiamento, Sistemas de Produção, n.3. Versão eletrônica, 2004. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrigadoTocantins/secagem_armaz_beneficiamento.htm > Acesso em novembro de 2015.

EMBRAPA: Cultivo do arroz irrigado no Brasil. 2009. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrigadoBrasil/cap16.htm>>. Acesso em: 02 julho. 2012.

EPAMIG - Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais. Texto disponível em: www.redemineirapi.com/.../empresa-de-pesquisa-agropecuaria-de-minas. 2012. Acesso em: 18/10/2014.

FAGERIA, N. K. Yield physiology of rice. *Journal of Plant Nutrition*, London, v.30, n.6, p.843-879, 2007.

FAGUNDES, C. A. A.; ELIAS, M. C.; BARBOSA, F. F. Desempenho industrial de arroz secado com ar aquecido por queima de lenha e de GLP. *Revista Brasileira de Armazenamento*, v.30, p.8-15, 2005.

FAO - Food and Agriculture Organization of United nations: Disponível em: www.fao.org. Acesso em: 11 de abril de 2010.

FARIAS, R. P. Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande. 136 p, 2011.

FARIAS, V. S. O. Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas - Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2011.

FARIAS, V. S. O.; SILVA, C. M. D. S.; SILVA, W. P.; LIMA, A. G. B. Influência da geometria na simulação do processo de secagem de telhas cerâmicas através do modelo de difusão usando soluções analíticas e método inverso. *Anais do VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, CD ROOM, 2010.

FELLOWS, P. J. *Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática*. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 602p. 2006.

FERRARI FILHO, E. Métodos e temperaturas de secagem sobre a qualidade físico-química e microbiológica de grãos de milho no armazenamento. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia Ênfase Horticultura). Universidade Federal do Rio Grande do Sul Faculdade de Agronomia. 109p. 2011.

FERREIRA, M. F. P.; PENA, R. S. Estudo da secagem da casca do maracujá amarelo. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.12, n.1, p.15-28, 2010.

FIDELIS, R. R.; RODRIGUES, A. M.; SILVA, G. F.; BARROS, H. B.; PINTO, L. C.; AGUIAR, R. W. S. Eficiência do uso de nitrogênio em genótipos de arroz de terras altas. Pesquisa. Agropecuária. Tropical, Goiânia, v.42, n.1, p.124-128, 2012.

FONSECA, J. R.; BRONDANI, C.; BRONDANI, R. P. V.; RANGEL, P. H. N. Recursos genéticos. In.: SANTOS, A. B. dos; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. de A. A Cultura do Arroz no Brasil. Embrapa Arroz e Feijão, 2ª Ed. rev. ampl. p 257-288. Santo Antônio de Goiás, 2006.

FORTES, M.; OKOS, M. R.; BARRETT JÚNIOR. R. Heat and mass transfer analysis of Intra-kernel. Wheat Drying and Rewetting. Journal Agrícola. Engenharia Revista. v. 26 p. 109-125, 1981.

GENKAWA, T.; TANAKA, F.; HAMANAKA, D.; UCHINO, T. Incidence of open crack formation in short-grain polished rice during soaking in water at different temperatures. Journal of Food Engineering, v.103, p.457– 463, 2011.

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

GONELI, A. L. D. Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento. Tese (Doutorado em

Engenharia Mecânica) Departamento de Engenharia Mecânica , UNICAMP, Campinas 168 f, 2008.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; NEVES, P. de C. F. Eficiência produtiva de cultivares de arroz com divergência fenotípica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.12, n.5, p.465–470, 2008.

GUIMARÃES, D. S. Desenvolvimento de módulo computacional para secagem estacionária de sementes. Tese apresentada à Universidade Federal de Pelotas, 2005.

GURGEL, F. de L. Grandes culturas. (2006). Arroz brasileiro. Disponível em: <<http://www.arroz.agr.br/site/index.php> > Acesso em: 25/03/2012.

HACIHAFIZOĞLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K.; LIMA, A. G. B. A liquid diffusion model for thin-layer drying of rough rice. *Food and bioproducts processing*. v.26, n.4, p.787-793, 2008.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; FAGERIA, N. K.; CASTRO, L. M. de. Evaluation of physiological traits in upland rice for adaptation to no-tillage system. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, Londrina, v. 21, n.2, p.113-122, 2009.

HENDERSON, S. M. The causes and characteristics of rice check:ing, *Rice Journal*, v.57, n.6, p 16, 1958.

HERNÁNDEZ, D. W.; RUIZ, L.; CERVANTES, S.; RODRÍGUEZ, J. G. C.; ALVARADO, G. A. Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry. *Journal of Food Engineering*, v.86, n.1, p.1-9, 2008.

IBGE, - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estatística da Produção Agrícola. Disponível em: www.ibge.gov.br/home/estatistica/ acessado em 27 de julho de 2015.

ICTA/ UFRGS - Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos. Relatório Anual; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

IGUAZ, A.; RODRÍGUEZ, M.; VÍRSEDA, P. Moisture desorption isotherms of rough rice at high temperatures . Journal of Food Engineering, v.6. n.77, p.803-809, 2006.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentos de transferência de calor e de massa, 3a edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., R. J. 1990.

ISHYMARU, T.; RORIGANE, A. K.; IDA, M.; IWASAWA, N.; SAN-OH, Y.; NAKASONO, N.; NISHISAWA, N. K.; MASUMURA, T.; KONDO, M.; YOSHIDA, M. Formation do grain chalkiness and changes in water distribution in developing rice caryopses grown under high-temperature stress. Journal of Cereal Science, London, v.50, n.2, p.166-174, 2009.

KHANALI, M.; RAFIEE, S. H.; JAFARI, A.; HASHEMABADI, S. H. and ANISHARIF, A, B. Mathematical modeling of fluidized bed drying of rough rice (*Oryza sativa* L.) Journal of Agricultural. Techology, v.8, n.3, p.795-810, 2012.

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.

KUNZE, O. R. e CHOUDHURY, M. S. U. Moisture adsorption related to the tensile strength of rice. Cereal Chemisrtry, v.19, p. 684-96, 1972.

LACERDA, V. L. A. Manual para publicações da EPAMIG. - 4.ed. - Belo Horizonte, 41p. 2012.

LAW, A. M.; KELTON, D. W. Simulation modeling and analysis. 2. ed. New York. McGraw-Hill, 1991.

LIMA, A. G. B. Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Minas Gerais – Brasil. 256 f, 1999.

LIMA, D. R.; FARIAS, S. N.; LIMA, A. G. B. de. Mass transport in spheroids using the Galerkin method. Brazilian Journal of Chemical Engineering, São Paulo, v.21, n.1, p.667-680, 2004.

LIMA, R. F.; FAORO, V.; WINIK, S. V.; KHATCHATOURIAN, O. Armazenamento e secagem de grãos de soja. Relatório técnico-científico, XVIII Jornada de Pesquisa. UNIJUÍ, 2013.

LOPES, D. C. Estudo do mecanismo de quebra em grãos de arroz. Tese de Doutorado em Engenharia de Alimentos da universidade Estadual de Campinas São Paulo – Brasil. 182p. 1989.

LORENÇONI, R.; DOURADO N, D.; HEINEMANN, A. B. Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil. Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v.41, n.4, p.605-613, 2010.

LOURENÇO, R. O. Identificação e monitoramento de regimes de escoamento em leito de jorro. Uberlândia: Engenharia Química, UFU, Dissertação de Mestrado. 109 p. 2006.

LUIKOV, A. V. Analytical heat diffusion theory. Academic press, inc. Ltd, London, 184p. 1968.

KRAMER, J.; RAVNIK, J.; JECL, R.; ŠKERGET, L. Simulation of 3D flow in porous media by boundary element method. Engineering Analysis with Boundary Elements v.35 n.12, p.1256-1264, 2011.

KLAUTAU, J. V. P. Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo cocorrente para secagem de grãos. Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná, 2008. 193p. Dissertação de Mestrado.

KRISHNAN P.; RAMAKRISHNAN B.; RAJA R. K.; REDDY V. R. Advances in Agronomy, v.111, p.87-206, 2011.

KASHANINEJAD, M. MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. Journal of Food Engineering, v.78, n.1, p.98-108, 2007.

KHANALI1. M.; RAFIEE1, S. H.; JAFARI1, A.; HASHEMABADI, S. H. and ANISHARIF, A. B. 2012. Mathematical modeling of fluidized bed drying of rough rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Agricultural. Technology, v.8 n.3. p.795-810. <http://www.ijat-aatsea.com>

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C., RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, v.11, n.3, p. 301–306, 2007.

MARIANI, V. C.; LIMA, A. G. B.; COELHO, L. S. Apparent thermal diffusivity estimation of the banana during drying using inverse method. Journal of Food Engineering. v.85, p.569-579, 2008.

MALISKA, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. LTC Editora S. A., Rio de Janeiro, 453 p. 2004,

MENEGHETTI, V. L. Parâmetros industriais e qualidade de consumo do arroz na secagem e no armazenamento. Pelotas, Dissertação de Mestrado. 92p. 2008.

MENEGHETTI, V. L.; ELVIO, J. C. R.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M. C.; POHNDORF, R. S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.16, n.10, p.1115–1120, 2012.

MENEZES, N. L. de; CICERO, S. M.; VILLELA, F. A. Identificação de fissuras em sementes de arroz após a secagem artificial, por meio de raios-X. *Ciencia Rural*, Santa Maria, v.35, n.5, p.1194-1196, 2011.

MIRADE, P. S.; DAUDIN, J. D.; DUCEPT, F.; TRYSTRAM, G.; CLEMENT, J. Characterizations and CFD modeling of air temperature and velocity profiles in Industrial Biscuit Baking Tunnel Oven. *Food Research International*, v.37, p.1031-1039, 2004.

MORAIS, O. P.; RANGEL, P. H. N.; FAGUNDES, P. R. R.; CASTRO, E. M.; NEVES, P. C. F.; CUTRIM, V. A.; PRABHU, A. S.; BRODANI, C.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. Melhoramento genético. In: SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. S. (Ed.). *A cultura do arroz no Brasil*. 2. ed. rev. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, p.97-116, 2006.

NEVES, R. de S.; PEREIRA, J. I. A. Processamento de imagens digitais, medição do tamanho do grão de arroz. Trabalho de Projeto Final de Curso, Universidade Católica de Goiás, 2007.

NOVAES, T. L. C. C. Simulação da secagem de arroz em secador de leito fixo via volumes finitos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2010.

NUNES, J. L. S. Colheita & pós-colheita. (2012). Disponível em:
<http://www.agrolink.com.br/culturas/arroz/colheita.aspx> . Acesso em: 08/06/2013.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.26, n.1, p.181-189, 2006.

OLIVEIRA, G. H. H. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). *International Journal of Food Science and Technology*, Oxford, v.45, n.3, p.546-554, 2010.

OLIVEIRA, L. da C.; GUTKOSKI, L. C.; ELIAS, M. C.; MAZUTTI, S.; AOSANI, E.; ROCHA, J. C. da. Efeito da temperatura de secagem na qualidade de grãos de aveia branca. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.34, n.2, p.313-319, 2010.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. 2007. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. CT&EA – Centro de Tecnologia e Engenharia Agroindustrial. Disponível em:
http://www.casemg.com.br/servicos/secag_processo.htm acesso em 21/06/2012.

PARRY, J. L. Mathematical Modeling and computer Simulation of Heat and mass transfer in Agricultural Grain Drying: A Review, *journal j. Agriculture. Engenharia. Revista*, v.32, n.1 p. 29, 1985.

PESKE, S. T.; ROSENTHAL, M. D.; ROTA, G. R. M. Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos. 1 ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária, 415p, 2003.

PETRY, V. J. Desenvolvimento de um modelo para a transferência de calor e massa em meios granulares. Tese em Matemática Aplicada. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007.

PETRY, V. J.; BORTOLI, A. L.; SEFIDVASH, F. Passive cooling of a fixed bed nuclear reactor. *Lavoisier*, Paris, p.305-308, 2005.

PUZZI, D. Abastecimento e armazenagem de grãos. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. Campinas, SP: 2000.

QI-HUA, L.; XUE-BIAO, Z.; LIAN-QUN, Y.; TIAN, L. Effects of chalkiness on cooking, eating and nutritional qualities of rice in two indica varieties. *Rice Science*, Hangzhou, v.16, n.2, p.161-164, 2009.

ROCHA, J. C. da. Parâmetros industriais e tecnológicos do arroz na seca-aeração e no armazenamento. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Agroindustrial. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 79 p. 2010.

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.

RENJIE, D.; ZHANHUI L.; ZHUQING, L. e WEI, C. Moisture distribution in a rice kernel during tempering drying. *Journal of Food Engineering*, v.91, p.126-132. 2009.

RIBEIRO, C. S. N.; MARTINS, G. V.; GUIMARÃES, J. F. R.; SILVA, E. F. Resistência de genótipos de arroz a pragas de grãos armazenados. *Revista Caatinga*, Mossoró, v.25, n.1, p. 183-187. 2012.

ROCHA, D. C.; SANTOS, B. M.; SCHEID, C. M.; CALÇADA, L. A. Determinação dos coeficientes de difusão e convectivo na secagem de sementes de *Nasturtium officinale* (agrião). *Anais do VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*, Campinas-SP. 2005.

SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. A cultura do arroz no Brasil. 2 ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 312p. 2006.

SANTOS, K. G. Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 128p. 2008.

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, Sofia, Bulgaria, v.44, n.1, p.44-49, 2009.

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

SILVA, J. B. Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. 2009.

SILVA, J. B. Transferência de calor e massa de sólidos com geometria arbitrária em camada fina. Campina Grande-PB. 2002.

SILVA, J. S.; NOGUEIRA, R. M.; ROBERTO, C. D. Tecnologias de secagem e armazenagem para a agricultura familiar. Viçosa: Suprema Gráfica e Editora, v.1, 138p, 2005.

SILVA, J. S.; QUEIROZ, D. M.; SOUSA, F. F. Estudo da secagem em camada espessa. Citado por: SILVA, J. S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. 1. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, p.139-167. 2000.

SILVA, L. C. da. Modelagem e simulação. Boletim Técnico, Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Rural, 2006.

SILVA, L. C. da. Secagem de grãos. Boletim Técnico: AG: 04/05 em 29/03/2005 Campus de Alegre – Alegre: ES.

SILVA, W. P. Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil. 263 p. 2007.

SILVA, W. P.; PRECKER, J. W.; SILVA, D. D. P. S.; SILVA, C. D. P. S.; LIMA, A. G. B. Numerical simulation of diffusive processes in solids of revolution via finite volume method and generalized coordinates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 52, n. 21-22, p.4976-4985, 2009.

SILVA, W. P.; SILVA, D. D. P. S.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, C. D. P. S. Numerical simulation of the water diffusion in cylindrical solids. *International Journal of Food Engineering*, v.4, n.2, iss. 2, article 6, 2008.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R.; *Introduction to Food Engineering*, Academic Press Inc, 2008.

SMIDERLE, O. J.; DIAS, C. T. S. Época de colheita e qualidade fisiológica de sementes em arroz irrigado (*Oryza sativa* L. cv. BRS Roraima). *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 38, n. 3, p. 188-194, 2008.

SOARES, A. A. *Cultura do arroz*. 2. ed. Lavras: UFLA/ FAEPE, 2005. 130p. (Textos acadêmicos, 7).

SOUZA, A. F. de.; AZEVEDO, S. M. de. Influência do espaçamento e densidade de semeadura na cultura do arroz sob irrigação por aspersão (pivô central). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.29, n.12, p.1969-1972, 1994.

SOUZA, M. A. de; MORAIS, O. P. de; HERÁN, R. E. C.; CARGNIN, A.; PIMENTEL, A. J. B. Progresso genético do melhoramento de arroz de terras altas no período de 1950 a 2001. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.42, n.3, p.371-376, 2007.

STEFFE, J. F.; SINGH, R. P. Edited by A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corp., Washington D.C., 1980.

STEFFE, J.F. e SINGH R. P. J. Diffusion coefficients for predicting rice drying behaviour. Agriculture. Engineering. Res. v.27. 493p. 1982.

STEIDLE FILHO, A. J. Simulação da secagem de grãos com baixas temperaturas utilizando-se o Modelo de Hukill: Uma nova abordagem. Centro Universitário Nove de Julho (UNINOVE Exacta, volumen 3) São Paulo, Brasil, pp. 85-93, 2005.

STONE, L. F. e SANTIAGO, C. M. Arroz: O produtor pergunta e a Embrapa responde. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2007. 232p. disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html> > Acesso em 10 abr. 2008 (citado por Bortolaia, (2011).

STRUMIŁŁO, C.; KUDRA, T. Drying: principles, applications and design. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 448p. 1986.

SULZBACHER, A. L.; GOLTZ, V.; VILLELA, F. A. (2010). Procedimentos operacionais na secagem com alta temperatura, 2010. Disponível em: www.seednews.inf.br/_html/site/content/reportagem.../index.php?.. acesso em 18/8/2012.

TONELLO, L. P.; SILVA, J. ; RAMOS, D. P.; SOUZA, S. A.; FIDELIS, R. R. Eficiência do uso de fósforo em genótipos de arroz cultivados em solos de terras altas. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Mossoró, v.7, n.2, p.25-32, 2013.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. Computational fluid dynamics: A practical approach, Butterworth-Heinemann (2008).

ZAMBERLAN, C. O.; SONAGLIO, C. M. A produção orizícola brasileira a partir da década de 1990: evolução e perspectivas econômicas. *Qualit@s Revista Eletrônica*, Campina Grande, v.11, n.1, p.1-15, 2011.

ZHOU, L.; CHEN, L.; JIANG, L.; ZHANG, W.; LIU, L.; LIU, X.; ZHAO, Z.; LIU, S.; ZHANG, L.; WANG, L.; WAN, J. Fine mapping of the grain chalkiness QTL qPGWC- 7 in rice (*Oryza sativa* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, Berlin, v.118, n.3, p.581 -590, 2009.

YANG, W.; JIA, C.C.; SIEBENMORGEN, T. J.; Howell, T. A.; Cnossen, A. G. Intra-kernel moisture responses of rice to drying and tempering treatments by finite element simulation. *Transactions of the ASAE*, 45 p. 1037–1044. 2003.

YOSHIOKA, Y.; IWATA, H.; TABATA, M.; NINOMIYA, S.; OHSAWA, R. Chalkiness in rice: potential for evaluation with image analysis. *Crop Science*, Madison, v.47, n.5, p.2113-2120, 2007.

WANDER, A. E. A competitividade do agronegócio brasileiro de arroz. *Custos e @gronegócio on line*, Recife, v. 2, n. 1, p. 2-15, 2006.

WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. Arroz: composição e características nutricionais – *Revista Ciência Rural*, v.38, n.4, p.1184 – 1192, 2008.

WEBER, E. A. Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos. Canoas, RS: Editora Salles, 2006.

WU, B.; YANG, W.; JIA, C. A Three-dimensional numerical simulation of transient heat and mass transfer inside a Single Rice Kernel during the Drying Process. *Biosystems Engineering*, v.87, n.2, p.191-200, 2004.

VIEIRA, C. M. F.; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S. N. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot. *Cerâmica Industrial*, v.8, n.1, p.42-46, 2003.

VIEIRA, N. R. de A.; RABELO, R. R. Qualidade tecnológica. In: SANTOS, A. B. dos; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. de A. (Ed.). *A cultura do arroz no Brasil*. 2. ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. p. 869-900.

VILLA-CORRALES, L.; FLORES-PRIETO, J. J.; XAMÁN-VILLASEÑOR, J.P.; GARCÍAHERNÁNDEZ, E. Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango. *Journal of Food Engineering*, v. 98, p. 198–206, 2010.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O., Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos, (2008). Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612008000200018. Acesso em: 18 de abril de 2015.