



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DESCRIÇÃO DA SECAGEM CONTÍNUA E INTERMITENTE DE ARROZ EM CASCA USANDO MODELOS DE DIFUSÃO

JOAN CARLOS ALVES PEREIRA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas

ORIENTADOR: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva

Campina Grande - PB

Fevereiro - 2019

**DESCRIÇÃO DA SECAGEM CONTÍNUA E INTERMITENTE DE ARROZ EM
CASCA USANDO MODELOS DE DIFUSÃO**

JOAN CARLOS ALVES PEREIRA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas

Orientador: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva

Campina Grande - PB

Fevereiro - 2019

P436d

Pereira, Joan Carlos Alves.

Descrição da secagem contínua e intermitente de arroz em casca usando modelos de difusão / Joan Carlos Alves Pereira. - Campina Grande, 2020.

122 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva.

Referências.

1. Secagem Convectiva. 2. Razão de Intermitência. 3. Equação de Difusão. I. Silva, Wilton Pereira da. II. Título.

CDU 631.365(043)



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO

JOAN CARLOS ALVES PEREIRA

**“DESCRIÇÃO DA SECAGEM CONTÍNUA E INTERMITENTE DE ARROZ EM
CASCA USANDO MODELOS DE DIFUSÃO”**

APROVADO (A): 21 de fevereiro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Dr. Wilton Pereira da Silva
Orientador – UAF/CCT/UFCG

Dra. Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva
Examinadora – UAF/CCT/UFCG

Dr. Jossyl Amorim Ribeiro de Souza
Examinador – UAF/CCT/UFCG

Dr. Laerson Duarte da Silva
Examinador – UAF/CCT/UFCG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu avô, Carlos Pereira Dantas (*in memoriam*), que sempre incentivou toda a nossa família a batalhar pelos estudos.

A minha querida esposa que sempre esteve ao meu lado, me dando força nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, que sempre me deram todo o apoio e carinho para que eu pudesse seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado força para lutar pelos meus objetivos.

Aos meus pais, João de Sales Pereira e Ana Maria Alves Pereira por todo carinho, apoio e incentivo, por todos os sacrifícios que fizeram para me proporcionar educação, pelo ensino de valores pessoais que me ajudaram a seguir o caminho correto.

A minha esposa, Valéria Patrícia Araújo Silva, que esteve sempre ao meu lado, sendo paciente, carinhosa e compreensiva, me incentivando para que eu pudesse concluir o curso.

Aos meus irmãos, pelo carinho e apoio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva, pela orientação, confiança, paciência, amizade e ensinamentos que tornaram possível a realização deste trabalho.

A prof^a. Dr^a. Josivanda Palmeira Gomes pelo apoio e motivação.

Ao meu amigo Renato Costa, que esteve presente em todas as etapas do trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Prof^a. Dr^a. Cleide M. D. P. S. e Silva, Prof. Dr. Laerson Duarte da Silva e ao Prof. Dr. Jossyl A. R. de Souza, que se dispuseram a participar desta banca de avaliação e principalmente pelas sugestões.

Aos amigos da Pós-Graduação, pela amizade e companheirismo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos fora de sala quando preciso.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), por proporcionar a realização deste trabalho.

À CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| LISTA DE FIGURAS..... | i |
| LISTA DE TABELAS..... | v |
| NOMENCLATURA..... | vii |
| RESUMO..... | ix |
| ABSTRACT..... | x |
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 - Objetivos..... | 3 |
| 1.1.1 - Geral..... | 3 |
| 1.1.2 - Específicos..... | 3 |
| CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 2.1 - A cultura do arroz: Aspectos gerais..... | 4 |
| 2.1.1 - Morfologia e composição do grão..... | 5 |
| 2.1.2 - Aspectos gerais do consumo e produção do arroz vermelho..... | 6 |
| 2.2 - Secagem..... | 7 |
| 2.2.1 - Princípio e aspectos gerais..... | 7 |
| 2.2.2 - Curvas típicas de secagem..... | 10 |
| 2.2.3 - Métodos de secagem e secadores..... | 12 |
| 2.3 - Secagem intermitente..... | 14 |
| 2.4 - Modelagem matemática para secagem..... | 17 |
| 2.5 - Equação geral de transporte..... | 18 |
| 2.6 - Modelos de difusão..... | 19 |
| CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS..... | 22 |
| 3.1 - Local da pesquisa..... | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2 - Aquisição da matéria-prima e caracterização inicial..... | 22 |
| 3.3 - Material e procedimentos experimentais..... | 23 |
| 3.4 - Descrição da cinética de secagem por modelos empíricos..... | 27 |
| 3.5 - Modelos de difusão..... | 28 |
| 3.5.1 - Equação de difusão para a geometria do problema..... | 29 |
| 3.5.2 - Soluções analíticas da equação de difusão..... | 29 |
| 3.5.3 - Solução analítica para a condição de contorno do primeiro tipo..... | 30 |
| 3.5.4 - Otimizador para a solução analítica com condição de contorno do primeiro tipo..... | 31 |
| 3.5.5 - Solução analítica para a condição de contorno do terceiro tipo..... | 32 |
| 3.5.6 - Otimizador para a solução analítica com condição de contorno do terceiro tipo..... | 34 |
| 3.6 - Solução numérica unidimensional da equação de difusão..... | 35 |
| 3.6.1 - Volumes internos..... | 36 |
| 3.6.2 - Volume de controle 1..... | 37 |
| 3.6.3 - Volume de controle N..... | 37 |
| 3.6.4 - Otimizador para a solução numérica da equação de difusão..... | 39 |
| CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 42 |
| 4.1 - Condições ambientais e do ar de secagem..... | 42 |
| 4.2 - Cinética de secagem..... | 43 |
| 4.3 - Descrição das cinéticas de secagem utilizando modelos empíricos..... | 48 |
| 4.3.1 - Secagem contínua..... | 48 |
| 4.3.2 - Secagem intermitente..... | 52 |
| 4.3.2.1 - Intermitente com $t_{in} = 10$ min..... | 52 |
| 4.3.2.2 - Intermitente com $t_{in} = 20$ min..... | 54 |
| 4.3.3 - Taxas de secagem..... | 60 |

| | |
|---|------------|
| 4.4 - Descrição das cinéticas de secagem utilizando modelos analíticos de difusão.... | 62 |
| 4.4.1 - Cinética de secagem utilizando a condição de contorno do primeiro tipo..... | 63 |
| 4.4.2 - Cinética de secagem utilizando a condição de contorno do terceiro tipo..... | 67 |
| 4.5 - Descrição das cinéticas de secagem utilizando modelo numérico de difusão..... | 69 |
| 4.5.1 - Resultados obtidos para o modelo numérico unidimensional..... | 69 |
| 4.5.2 - Distribuição de erros pelo modelo numérico unidimensional..... | 74 |
| 4.5.3 - Simulação da distribuição de umidade no interior do grão de arroz..... | 76 |
| CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES..... | 81 |
| 5.1 - Sugestões para trabalhos futuros..... | 82 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 83 |
| APÊNDICE A..... | 96 |
| ANEXOS..... | 107 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Estrutura do grão de arroz em casca. Fonte: Vieira (2006)..... | 5 |
| Figura 2.2 - Curvas de secagem. Fonte: Park (2007)..... | 11 |
| Figura 2.3 - Esquema de classificação geral para a secagem intermitente..... | 16 |
| Figura 3.1 - Amostras de grãos de arroz vermelho em casca..... | 22 |
| Figura 3.2 - Paquímetro digital..... | 23 |
| Figura 3.3 - Cestos com os grãos de arroz em casca..... | 23 |
| Figura 3.4 - Secador convectivo de leito fixo utilizado nos experimentos..... | 24 |
| Figura 3.5 - instrumentos de medição: termômetro de mercúrio (a), anemômetro (b) e balança digital (c)..... | 24 |
| Figura 3.6 - Estufa (a) e dessecador (b) utilizados nos experimentos..... | 26 |
| Figura 3.7 - Cilindro de raio r e comprimento l (a) e esquema da malha uniforme (b). Fonte: Silva (2009)..... | 35 |
| Figura 3.8 - Volume de controle interno “P” e seus vizinhos a oeste (W) e a leste (E)..... | 36 |
| Figura 4.1 - Conjunto de dados experimentais para os processos de secagem com temperatura do ar de secagem de 50°C: contínua (a); intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c)..... | 44 |
| Figura 4.2 - Conjunto de dados experimentais para os processos de secagem com temperatura do ar de secagem de 70°C: contínua (a); intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c)..... | 45 |
| Figura 4.3 - Razão de umidade para a temperatura do ar de secagem de 50°C: Secagem contínua (a); secagem intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c)..... | 46 |
| Figura 4.4 - Razão de umidade para a temperatura do ar de secagem de 70°C: Secagem contínua (a); secagem intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c)..... | 47 |
| Figura 4.5 - Cinética de secagem contínua para a temperatura do ar de secagem de 50°C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Peleg (d); Silva et alii (e) e Wang e Singh (f)..... | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.6 - Cinética de secagem contínua para a temperatura do ar de secagem de 70°C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Peleg (d); Silva et alii (e) e Wang e Singh (f)..... | 51 |
| Figura 4.7 - Cinética de secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min para a temperatura do ar de secagem de 50°C, descrita pelas equações empíricas: Page (a), Peleg (b) e Silva et alii (c)..... | 53 |
| Figura 4.8 - Cinética de secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min para a temperatura do ar de secagem de 70°C, descrita pelas equações empíricas: Page (a), Peleg (b) e Silva et alii (c)..... | 54 |
| Figura 4.9 - Cinética de secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min para a temperatura do ar de secagem de 50°C, descrita pelas equações empíricas: Page (a), Peleg (b) e Silva et alii (c)..... | 55 |
| Figura 4.10 - Cinética de secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min para a temperatura do ar de secagem de 70°C, descrita pelas equações empíricas: Page (a), Peleg (b) e Silva et alii (c)..... | 56 |
| Figura 4.11 - Cinética de todas as secagens de arroz para a temperatura do ar de secagem de 50°C, descrita pela equação de Page..... | 57 |
| Figura 4.12 - Cinética de todas as secagens de arroz para a temperatura do ar de secagem de 70°C, descrita pela equação de Page..... | 57 |
| Figura 4.13 - Comparação entre os resultados obtidos para a cinética de secagem do arroz para a temperatura do ar de secagem de 50°C, descrita pela equação de Page: contínua e intermitente com $t_{in} = 10$ min (a); contínua e intermitente com $t_{in} = 20$ min (b)..... | 58 |
| Figura 4.14 - Comparação entre os resultados obtidos para a cinética de secagem do arroz para a temperatura do ar de secagem de 70°C, descrita pela equação de Page: contínua e intermitente com $t_{in} = 10$ min (a); contínua e intermitente com $t_{in} = 20$ min (b)..... | 59 |
| Figura 4.15 - Taxas de secagem dos grãos de arroz em casca a 50°C, descritas pela equação de Page..... | 61 |
| Figura 4.16 - Taxas de secagem dos grãos de arroz em casca a 70°C, descritas pela equação de Page..... | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.17 - Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo para a temperatura do ar de secagem de 50°C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c)..... | 64 |
| Figura 4.18 - Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo para a temperatura do ar de secagem de 70°C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c)..... | 65 |
| Figura 4.19 - Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo para a temperatura do ar de secagem de 50°C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c)..... | 67 |
| Figura 4.20 - Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo para a temperatura do ar de secagem de 70°C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c)..... | 68 |
| Figura 4.21 - Cinética de secagem descrita pelo modelo unidimensional para a temperatura do ar de secagem de 50°C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c)..... | 71 |
| Figura 4.22 - Cinética de secagem descrita pelo modelo unidimensional para a temperatura do ar de secagem de 70°C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c)..... | 72 |
| Figura 4.23 - Distribuição de erro para as secagens contínua e intermitentes na temperatura de 50°C: Contínua (a), intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e intermitente com $t_{in} = 20$ min (c)..... | 74 |
| Figura 4.24 - Distribuição de erro para as secagens contínua e intermitentes na temperatura de 70°C: Contínua (a), Intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e Intermitente com $t_{in} = 20$ min (c)..... | 75 |
| Figura 4.25 - Distribuição de umidade no interior do grão de arroz nos instantes 1 (a), 30 (b), 60 (c), 90 (d) e 135 (e) minutos a partir do início da secagem contínua a 50°C..... | 76 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.26 - Distribuição de umidade no interior do grão de arroz nos instantes 1 (a), 30 (b), 60 (c), 90 (d) e 135 (e) minutos a partir do início da secagem contínua a 70°C..... | 76 |
| Figura 4.27 - Distribuições de umidade para secagem contínua e intermitente em 45 minutos de tempo de operação efetiva a 50°C: secagem contínua (a); intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c)..... | 78 |
| Figura 4.28 - Distribuições de umidade para secagem contínua e intermitente em 180 minutos de tempo de operação efetiva a 50°C: secagem contínua (a); intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c)..... | 79 |
| Figura 4.29 - Distribuições de umidade para secagem contínua e intermitente em 45 minutos de tempo de operação efetiva a 70°C: secagem contínua (a); intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c)..... | 79 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 - Parâmetros para cada experimento de secagem de arroz em casca..... | 26 |
| Tabela 3.2 - Modelos empíricos utilizados para prever a cinética de secagem dos grãos de arroz em casca..... | 27 |
| Tabela 3.3 - Equações da taxa de secagem obtidas através dos modelos empíricos..... | 28 |
| Tabela 4.1 - Informações sobre a temperatura e velocidade do ar de secagem, temperatura e umidade relativa do ar ambiente, tempo de secagem, teor de umidade inicial e de equilíbrio do arroz para cada experimento de secagem..... | 43 |
| Tabela 4.2 - Dimensões médias do grão de arroz em casca <i>in natura</i> | 43 |
| Tabela 4.3 - Resultados dos modelos empíricos para secagem contínua nas temperaturas de 50 e 70°C..... | 49 |
| Tabela 4.4 - Resultados dos modelos empíricos para secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min, nas temperaturas de 50 e 70°C..... | 53 |
| Tabela 4.5 - Resultados dos modelos empíricos para secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min, nas temperaturas de 50 e 70°C..... | 55 |
| Tabela 4.6 - Resultados obtidos para as simulações das secagens utilizando o modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo a 50°C..... | 63 |
| Tabela 4.7 - Resultados obtidos para as simulações das secagens utilizando o modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo a 70°C..... | 65 |
| Tabela 4.8 - Resultados obtidos para as simulações das secagens utilizando o modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo a 50°C..... | 67 |
| Tabela 4.9 - Resultados obtidos para as simulações das secagens utilizando o modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo a 70°C..... | 68 |
| Tabela 4.10 - Resultado das simulações das secagens pelo modelo unidimensional.... | 70 |
| Tabela 4.11 - Difusividade efetiva de massa para as soluções analítica e numérica com condição de contorno do primeiro tipo..... | 73 |
| Tabela A1 - Dados experimentais da secagem contínua do arroz em casca para a temperatura de 50°C..... | 96 |
| Tabela A2 - Dados experimentais da secagem contínua do arroz em casca para a temperatura de 70°C..... | 97 |

| | |
|--|-----|
| Tabela A3 - Dados experimentais da secagem intermitente do arroz em casca com t_{in} = 10 min e temperatura de 50°C..... | 98 |
| Tabela A4 - Dados experimentais da secagem intermitente do arroz em casca com t_{in} = 10 min e temperatura de 70°C..... | 100 |
| Tabela A5 - Dados experimentais da secagem intermitente do arroz em casca com t_{in} = 20 min e temperatura de 50°C..... | 102 |
| Tabela A6 - Dados experimentais da secagem intermitente do arroz em casca com t_{in} = 20 min e temperatura de 70°C..... | 104 |

NOMENCLATURA

Letras latinas

A_p, A_e, A_w, A_n, A_s - Coeficientes da equação de difusão discretizada.

a, b - Parâmetros de ajuste dos modelos empíricos.

B - Termo independente de Φ na equação de difusão discretizada.

Bi - Número de Biot.

c_p - Calor específico à pressão constante.

D - Difusividade efetiva de massa.

E, W, N, S, P - Pontos nodais.

h - Coeficiente de transferência convectiva de massa.

J_0, J_1 - Funções de Bessel de primeira espécie de ordens zero e um.

k - Condutividade térmica do material.

l - Comprimento do cilindro.

m - Massa.

m_s - Massa seca.

n - Índice de parâmetro.

N - Número de termos de cada série.

N_i - Número de pontos experimentais.

S - Termo fonte.

r - Raio do cilindro.

R^2 - Coeficiente de determinação.

Δr - Largura de um volume de controle.

t - Tempo.

t_{in} - Tempo da amostra dentro do secador.

t_{out} - Tempo da amostra fora do secador.

T - Temperatura.

T_a - Temperatura ambiente.

UR - Umidade relativa do ar.

V - Volume.

v - Velocidade.

\vec{v} - Vetor velocidade.

χ^2 - Qui-quadrado.

\bar{X} - Teor de umidade médio do produto em base seca;

\bar{X}^* - Razão de umidade do produto, adimensional;

X_{eq} - Teor de umidade de equilíbrio do produto em base seca;

X_i - Teor de umidade inicial do produto em base seca.

Letras gregas

α - Razão de intermitência.

ρ - Densidade.

μ_n - Raízes da equação característica.

Δ - Variação.

∇ - Gradiente.

$\nabla \cdot$ - Divergente.

Φ - Variável dependente de interesse.

$\bar{\Phi}$ - Valor médio da grandeza de interesse.

$\Phi_P, \Phi_P^0, \Phi_E, \Phi_W, \Phi_N, \Phi_S$ - Valores da variável dependente nos pontos nodais nas equações discretizadas.

Φ_i - Variável dependente de transporte do i-ésimo volume de controle.

Φ_∞ - Valor de equilíbrio da grandeza Φ .

Φ_0 - Valor inicial da grandeza Φ .

Φ_e - Valor da grandeza Φ no contorno leste.

λ - Coeficiente de transporte.

Γ^Φ - Coeficiente de transporte relativo à variável Φ .

Γ_e^Φ - Coeficiente de transporte na interface leste.

Γ_w^Φ - Coeficiente de transporte na interface oeste.

Γ_n^Φ - Coeficiente de transporte na interface norte.

Γ_s^Φ - Coeficiente de transporte na interface sul.

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico do processo de secagem de produtos agrícolas tem papel fundamental em minimizar o desperdício de alimentos. Nesse sentido, a secagem intermitente tem apresentado bons resultados, por melhorar a qualidade final do produto e reduzir o consumo de energia. Assim, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo dos processos de secagem contínua e intermitente de arroz em casca, utilizando modelos empíricos e de difusão para descrever os fenômenos que ocorrem durante esses processos. Nesta conjuntura, foram realizados experimentos de secagem contínua e intermitente (com razão de intermitência $\alpha = 2/3$) de grãos de arroz em casca utilizando um secador de leito fixo nas temperaturas de 50 e 70°C. Como parte do estudo, foram utilizados modelos empíricos a fim de simular as cinéticas de secagem e avaliar qual o modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais. Através dos modelos difusivos, são apresentadas soluções analíticas e numéricas da equação de difusão para a geometria cilíndrica. Em relação ao modelo numérico, a equação de difusão foi desenvolvida pelo método dos volumes finitos, com uma formulação totalmente implícita. Foi considerado o tempo de operação efetiva de secagem para a modelagem matemática e simular as distribuições de umidade. A comparação entre as cinéticas de secagem contínua e intermitente apontaram uma redução do tempo de secagem com a aplicação da intermitência, proporcionando uma maior economia de energia. Verificou-se que a condição de contorno do primeiro tipo é a que melhor descreve o processo de secagem do arroz em casca e que a difusividade efetiva de massa aumentou com a secagem intermitente. Os resultados afirmam que não apenas a razão de intermitência é importante para a redução do tempo de secagem, como também o período de têmpera.

Palavras-chave: Secagem convectiva, razão de intermitência, equação de difusão.

ABSTRACT

The technological development of the drying process of agricultural products plays a fundamental role in minimizing the waste of food. In this sense, intermittent drying has shown good results, improving the final quality of the product and reducing energy consumption. This work aims to conduct a study of the continuous and intermittent drying of rice in the husk using empirical and diffusion models to describe the phenomena that occur during these processes. Continuous and intermittent drying experiments (with an intermittence ratio $\alpha = 2/3$) of rice grains were carried out using a fixed bed drier at temperatures of 50 and 70°C. Empirical models were used to simulate drying kinetics and to evaluate which model best fits the experimental data. Through the diffusive models, we present analytical and numerical solutions of the diffusion equation for the cylindrical geometry. For the numerical model, the diffusion equation was developed by the finite volume method, with a totally implicit formulation. Effective drying time for mathematical modeling and simulation of moisture distributions were considered. The comparison between the kinetics of continuous and intermittent drying indicated a reduction of the drying time with the application of the intermittence, providing a greater energy saving. It has been found that the boundary condition of the first type is the one that best describes the drying process of the husked rice and that the effective mass diffusivity increased with intermittent drying. The results state that not only the ratio of intermittence is important for the reduction of drying time, but also tempering period.

Keywords: Convective drying, intermittent ratio, diffusion equation.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Dentre os cereais produzidos no Brasil e no mundo, o arroz (*Oryza sativa L.*) é considerado uma gramínea de grande importância econômica e alimentar, caracterizando-se como o principal alimento de mais da metade da população mundial, ocupando o segundo lugar em produção e extensão de área cultivada, ficando atrás apenas do trigo (FAO, 2018). O arroz vermelho, conhecido também como Arroz-da-Terra e Arroz Veneza, é uma variedade de arroz pigmentado, pouco conhecido no Brasil, tem o seu cultivo, atualmente, restrito a pequenas áreas do semiárido nordestino. No estado da Paraíba é notado como um dos principais alimentos da região, cultivado predominantemente por agricultores de base familiar, e se sobressaindo em relação ao arroz polido (PEREIRA et al., 2009).

A conservação dos alimentos por longos períodos de tempo torna-se tão importante quanto o aumento da produção, visto que muitos produtos são sazonais e de consumo contínuo ao longo do ano. Nesse contexto, o domínio e desenvolvimento tecnológico pós-colheita tem papel fundamental para melhor aproveitamento dos alimentos, minimizando o desperdício. O desperdício de produtos agrícolas, tais como frutas, vegetais e grãos são influenciados diretamente pelo teor de umidade, que afeta a qualidade durante o armazenamento. Em vista disso, várias técnicas são praticadas para reduzir o desperdício de grãos e aumentar a sua vida útil. Entre essas técnicas, a secagem é um dos métodos mais antigos, simples e amplamente utilizado na conservação de alimentos. Assim, a secagem torna-se operação fundamental para a manutenção da qualidade.

A secagem intermitente tem sido considerada um método do processo de secagem mais eficiente, em termos de consumo de energia, e melhor qualidade do material seco, em comparação com a secagem contínua. Portanto, a principal razão para o uso de secagem intermitente é justamente minimizar gradientes térmico e hídrico no interior do material, conseqüentemente reduzindo os custos de produção e possíveis danos estruturais, melhorando, assim, a qualidade final do produto (GOLMOHAMMADI et al., 2016).

Através dos modelos matemáticos é possível descrever o processo de secagem dos produtos agrícolas com precisão, além de predizer o comportamento da temperatura e da umidade dos grãos e do ar que o envolve, bem como a troca simultânea entre eles. Assim

sendo, modelos empíricos são eficientes para descrever a cinética de secagem, tornando notória a economia do tempo de processamento e, conseqüentemente, a economia de energia (ZHU et al., 2010). No entanto, os modelos empíricos são incapazes de explicar a melhoria da qualidade do produto final obtido pela secagem intermitente em comparação com o produto obtido pela secagem contínua. A fim de explicar isso, modelos mais complexos são necessários, tais como os modelos de difusão. Dois grupos de modelos de difusão estão disponíveis na literatura, o primeiro grupo envolvendo soluções analíticas da equação de difusão e o segundo grupo de modelos que envolvem as soluções numéricas. Apesar das soluções numéricas serem muito eficientes para descrever os processos de difusão, elas raramente são vistas na literatura para descrever o processo de secagem intermitente, ao passo que as soluções analíticas são predominantemente usadas para modelar o processo de secagem intermitente (YANG et al., 2013; SILVA et al., 2014; GOLMOHAMMADI et al., 2016; GALVÃO, 2017). Com o intuito de investigar a influência do período de tâmara nas características de secagem, torna-se de grande importância o uso de modelos de difusão para descrever a secagem intermitente do arroz em casca.

Tendo em vista melhorar a eficiência energética e a qualidade final dos produtos agrícolas no processo de secagem, faz-se necessário um completo entendimento dos processos físicos envolvidos na transferência simultânea de calor e massa, além da importância de estudos para descrever o processo de secagem intermitente.

Assim, o presente trabalho orienta-se ao estudo da secagem contínua e intermitente de sólidos com geometria cilíndrica, através da experimentação em laboratório e utilização de modelos de difusão e empíricos para descrever o processo de secagem de arroz em casca. Desta forma, pretende-se melhorar as estratégias para o controle do processo de secagem intermitente e explicar os mecanismos físicos que ocorrem durante tal processo, fornecendo novos subsídios teóricos. Não obstante, será possível fornecer informações quanto à distribuição de umidade no interior do grão de arroz durante o processo de secagem por meio dos modelos de difusão.

Embora algumas pesquisas já tenham sido realizadas com a secagem de grãos de arroz, estudos específicos com a secagem intermitente de arroz vermelho, envolvendo modelos de difusão para descrever o processo, ainda são necessários para o meio acadêmico, revelando a importância do nosso trabalho.

1.1 - OBJETIVOS

1.1.1 - Geral

Estudar os processos de secagem contínua e intermitente de arroz em casca, assim como a aplicação dos modelos de difusão e empíricos para descrever os fenômenos que ocorrem durante este processo.

1.1.2 - Específicos

- Realizar experimentos relativos à secagem contínua e intermitente de grãos de arroz em casca para várias condições operacionais;
- Descrever as cinéticas de secagem contínua e intermitente, utilizando modelos empíricos e verificar aquele que melhor se ajusta aos dados experimentais;
- Descrever o processo de secagem contínua e intermitente dos grãos de arroz em casca através de modelos analíticos de difusão;
- Determinar, através dos modelos de difusão, a condição de contorno apropriada para descrever o processo;
- Descrever o processo de secagem utilizando solução numérica da equação de difusão;
- Comparar os resultados das simulações numéricas com os resultados experimentais;
- Simular a distribuição do teor de umidade no interior dos grãos de arroz durante o processo de secagem.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - A cultura do arroz: Aspectos gerais

O arroz é uma planta da família das gramíneas, do gênero *Oryza*, que possui em torno de vinte espécies, sendo a mais cultivada a *Oryza sativa* (JULIANO, 1993). O grão é formado pelo tegumento, que envolve a semente e se encontra diretamente ligado ao pericarpo, membrana que envolve o fruto. O pericarpo é envolvido pelas glumelas, pela lema e pela pálea, que constituem a casca e são removidas durante o beneficiamento (VIEIRA, 1999).

Segundo a Instrução Normativa nº 6/2009 (BRASIL, 2009), do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, arroz em casca natural é o produto que, antes do beneficiamento, não passa por qualquer preparo industrial ou processo tecnológico. O arroz beneficiado é o produto maduro que foi submetido a algum processo de beneficiamento e se encontra desprovido, no mínimo, da sua casca. Já o arroz descascado ou arroz integral (esbramado), composto pelo endosperma e pelo farelo (camada encontrada entre a casca e o endosperma), é o produto do qual somente a casca foi retirada durante o beneficiamento (BRASIL, 2009). O arroz parboilizado é o produto que foi submetido à parboilização, que consiste em um processo hidrotérmico, anterior às etapas de descasque e polimento. Neste processo, algumas substâncias hidrossolúveis, como vitaminas e minerais, são transportadas para o centro do grão, aumentando o valor nutritivo deste arroz em relação ao polido. O arroz parboilizado é disponibilizado na forma de parboilizado polido e parboilizado integral (BRASIL, 2009; FERREIRA e YOKOYAMA, 1999).

No Brasil, o arroz é consumido especialmente na forma de grãos inteiros, sendo conhecidos, em função da forma de processamento pós-colheita, como arroz branco, arroz integral e arroz parboilizado (VIEIRA e RABELO, 2006). Quase 95% dos brasileiros consomem arroz e mais da metade o fazem no mínimo uma vez por dia. A preferência nacional de consumo é pelo arroz da classe longo fino, comercialmente conhecido como “arroz-agulhinha”, que é translúcido e apresenta a característica de ser mais solto, macio e firme após o cozimento (BARATA, 2005). O maior consumo, pouco mais de 70% do total,

ainda é de arroz branco polido. Em segundo lugar aparece o arroz parboilizado, cujo consumo quintuplicou nas duas últimas décadas, e se aproxima de 25%, ficando o arroz integral com 3 a 4% do que é consumido no Brasil (ELIAS et al., 2012). Existem, ainda, variedades de arroz pigmentado, com camadas de farelo ricas em antocianinas, sendo as cores mais comuns à vermelha e a roxa, quase negra (MCGEE, 2014). Também conhecido no Brasil como arroz da terra, o arroz vermelho tem o seu cultivo atualmente restrito a pequenas áreas do semiárido nordestino (PEREIRA et al., 2009).

2.1.1- Morfologia e composição do grão

O arroz possui em torno de vinte espécies e existem mais de 2000 variedades de arroz, embora as cultivadas sejam inferiores. A maior parte das variedades de arroz procede de duas espécies selvagens, uma asiática (*Oryza sativa*) que apareceu inicialmente nas montanhas dos Himalaias, e outra africana (*Oryza glaberrima*), originária do delta do rio Níger (JULIANO, 1993).

A estrutura do grão é formada pelo tegumento, que envolve a semente e se encontra diretamente ligado ao pericarpo, membrana que envolve o fruto. O pericarpo é envolvido pelas glumelas e pela casca, composta de duas folhas modificadas, a lema e a pálea, que são removidas durante o beneficiamento, obtendo-se o arroz integral. (VIEIRA, 1999). A estrutura do grão de arroz pode ser visualizada na Figura 2.1.

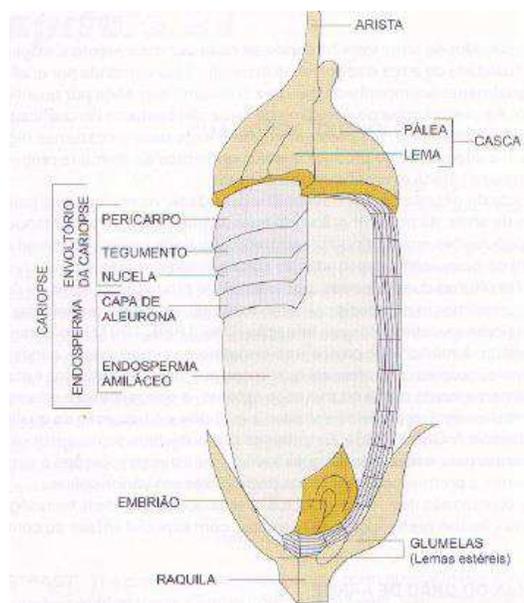


Figura 2.1- Estrutura do grão de arroz em casca. Fonte: Vieira e Rabelo (2006).

O arroz é constituído principalmente por carboidratos, apresentando quantidades menores de proteínas, lipídios, vitaminas e minerais. A proporção dos nutrientes no grão é influenciada pela variação genotípica, condições do clima, fertilizantes, qualidade do solo, processamento/beneficiamento, armazenamento e cozimento (STORCK, 2004; KENNEDY et al., 2002). De acordo com Walter et al. (2008), as condições de cultivo, incluindo fertilização e condições do solo, e pelo processamento, podem influenciar o conteúdo de minerais do arroz, estando presente em maior concentração nas camadas externas do grão.

O endosperma é o principal componente do arroz branco polido, representando 89 a 93% da cariopse, sendo formado por grânulos de amido, algumas proteínas e outros constituintes. Segundo Gomes e Magalhães Júnior (2004), o arroz fornece 20% da energia e 15% da proteína necessárias ao homem e se destaca pela sua fácil digestão. 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. O farelo obtido pelo polimento do arroz esbramado é constituído de 13,0 a 14,5% de lipídeos, de 6,1 a 8,5% de cinzas e, 48,3 a 55,4% de carboidratos (DENARDIN et al., 2005; ZANÃO et al., 2006).

2.1.2 - Aspectos gerais do consumo e produção do arroz vermelho

O arroz vermelho, conhecido também como Arroz-da-Terra e Arroz Veneza, assim chamado porque os grãos apresentam uma camada de farelo vermelho, tem origem asiática e chegou ao Brasil no século XVI, trazido pelos portugueses (GRIMÉ, 1976).

A Paraíba tem se destacado por resgatar a produção de arroz vermelho, chamando a atenção principalmente na região do Vale do Piancó, considerada o reduto da cultura no Brasil. O Estado é o maior produtor do país e o Vale do Piancó possui uma bacia hidrográfica de solos naturalmente férteis que viabiliza a produção desse tipo de arroz, cujo isolamento geográfico e o baixo nível tecnológico dificultam a introdução de outras variedades de arroz (PEREIRA, 2004; SOARES, 2014). A cultura do arroz vermelho é praticada com baixo nível tecnológico por pequenos agricultores, destinado ao consumo regional, sendo comercializado o excedente. Alguns fatores impedem o avanço da produção, como deficiência de orientação técnica, desarticulação entre os produtores, sistema de produção dependente de chuvas, sementes não melhoradas com mistura de variedades, adquiridas da própria produção (FARIAS et al., 2013).

Segundo Ferreira et al. (2005), embora a produção de arroz de sequeiro em municípios da região Semiárida não seja significativamente relevante no panorama macroeconômico, no entanto, mesmo produzido em pequena escala, se faz presente no prato da população dessa região, isto é, possui grande importância para a economia e consumo local.

2.2 - Secagem

2.2.1 - Princípio e aspectos gerais

A secagem é um dos processos mais utilizados pelo homem na conservação de alimentos. É um processo natural que foi aperfeiçoado pelo homem ao longo do tempo. Atualmente estabelece uma das etapas do pré-processamento dos produtos agrícolas, que tem por finalidade retirar parte da água neles contida, geralmente por convecção forçada de ar aquecido. Durante a remoção da água na secagem ocorrem dois processos simultâneos: a transferência de calor, que é a energia necessária para vaporizar os fluidos do produto a ser secado, e a transferência de massa, que é o vapor retirado na superfície do produto (MORAES, 2000).

O processo de secagem é uma etapa bastante utilizada e extremamente importante em diversos setores, tendo finalidades específicas em algumas áreas de produção. É provavelmente o processo mais intensivo de energia do processo industrial principal (KUDRA, 2004) e representa até 15% de todo o uso de energia industrial (CHUA et al., 2001). Em uma indústria intensiva em energia como aquecimento ou secagem, melhorar a eficiência energética em 1% pode resultar em aumento de 10% no lucro (BEEDIE, 1995; FRANCO, 2016). Portanto, qualquer pequena melhoria na eficiência energética no processo de secagem implica em redução de custos e melhoria da qualidade do produto. Nesse sentido, uma quantidade considerável de trabalhos de pesquisa relacionados à melhoria da eficiência energética na secagem tem sido amplamente estudada.

A secagem deve ser realizada com cautela para materiais que são sensíveis à variação de temperatura. No caso da secagem de materiais biológicos, a preservação dos valores nutricionais é desejável, da mesma forma, por secagem de substâncias

farmacológicas, em que os princípios ativos devem ser conservados. Assim sendo, por secagem de tais materiais, deve ser dada especial ênfase à qualidade final do produto.

A remoção da umidade deve ser realizada em um nível tal que o produto fique em equilíbrio com o ar do ambiente onde será armazenado e deve ser feita de modo a preservar a aparência, as qualidades nutritivas e, no caso de grãos, a viabilidade como semente. Ao realizar o processo de secagem adequado, os grãos podem ser estocados por longos períodos de tempo sem comprometer a qualidade do produto (SILVA, 2008). Na secagem, a retirada da umidade é obtida pela movimentação da água, decorrente de uma diferença de pressão de vapor de água entre a superfície do produto a ser secado e o ar que o envolve. A condição para que um produto seja submetido ao processo de secagem é que a pressão de vapor de água sobre a superfície do produto (P_s) seja maior do que a pressão do vapor de água no ar de secagem (P_{ar}). Se a pressão de vapor do produto for menor do que a pressão de vapor do ar, ocorrerá umedecimento do produto e, no caso das pressões do vapor de água do produto e do ar forem iguais, ocorrerá o equilíbrio higroscópico, o que não significa que a umidade do produto e a do ar são iguais. Quando este estado de equilíbrio é atingido, o teor de umidade no interior do produto passa a ser praticamente uniforme (CARMO, 2004; FIOREZE, 2004; SILVA, 2008).

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 a qual a água está presente na amostra, da natureza da amostra, da quantidade relativa de água, rapidez desejada na determinação e equipamento disponível. No entanto, as vantagens da secagem são várias, entre os quais temos uma melhor conservação do produto, muitas vezes apresenta um custo mais baixo e uma operação mais simples, tornando-se o processo comercial mais utilizado para preservar os alimentos quando comparado com outros métodos preservativos para períodos longos, como a centrifugação, o enlatamento, os tratamentos químicos, a irradiação, liofilização, refrigeração, entre outros. Alguns produtos agrícolas são secos com a finalidade de depois sofrer um processo de reidratação a níveis desejáveis, visando o fator econômico do frete e do manejo, por exemplo. Quando submetidas à secagem, conservam suas características físicas e nutritivas e, quando lhes são restituída a água, retornam ao aspecto natural ou mudam muito pouco.

De acordo Labuza e Simon (1970), a água está presente nos alimentos de três formas:

Água livre: Água superficial, presente nos espaços intergranulares e entre os poros do material, é a mais abundante, que pode ser removida com maior facilidade por secagem convencional. A água livre atua como meio de dispersão de nutrientes para o crescimento de microrganismos ou reações químico-enzimáticas.

Água adsorvida: Uma quantidade de água pequena que está adsorvida como uma camada muito fina nas superfícies internas e externas dos coloides macromoleculares (amidos, pectinas, celulosas e proteínas) por meio de Força de Van der Waals e formação de ligação de hidrogênio.

Água ligada ou de constituição: É a água que faz parte da estrutura do material, fortemente presa à massa seca, ligada a proteínas, açúcares e adsorvida na superfície de partículas coloidais, não permite o desenvolvimento de microrganismos e necessita de níveis elevados de temperatura para sua remoção. Dependendo da natureza da amostra, requer temperaturas diferentes para a sua remoção, que frequentemente não é total e em alguns casos não é eliminada nem a temperaturas que carbonizam parcialmente a amostra, tornando difícil de ser eliminada.

Os métodos de determinação de umidade podem ser classificados em diretos e indiretos (WEBER, 1995). Devido a sua maior confiabilidade, os métodos diretos são empregados como padrão para a aferição de outros procedimentos. O método direto da estufa é o processo mais usual, em que a umidade corresponde à perda de peso sofrida pelo produto quando aquecido em condições nas quais a água é removida durante o aquecimento direto da amostra a 105°C, durante um determinado período de tempo (PARK et al., 2007).

O teor de umidade pode ser calculado e expresso de duas formas:

- Teor de umidade base seca (b.s): Em relação à massa seca do produto: $X_{b,s} = m_a/m_s$;
- Teor de umidade base úmida (b.u): Em relação à massa total do produto: $X_{b,u} = m_a/m_t$;

em que m_a é a massa da água, m_s é a massa seca do produto e m_t é a massa total do produto úmido.

Os produtos são muito diferenciados entre si, devido a sua forma, estrutura e suas dimensões. Além do sistema de secagem utilizado, outros fatores podem influenciar na velocidade de secagem do produto: temperatura, umidade relativa, velocidade do ar de

secagem, umidade e temperatura iniciais do produto, tipo e forma de produto a ser seco, fluxo do produto no secador, tipo de secador, técnica de secagem. Em geral, para os grãos pequenos, a velocidade de secagem é maior que para grãos de grandes dimensões, dependendo da relação área/volume do sólido (SILVA, 2008; FRANCO, 2016).

2.2.2 - Curvas típicas de secagem

As curvas de secagem são de fundamental importância no que se refere às pesquisas com produtos agrícolas. Estas informações possuem relevância em diversas etapas do processo de beneficiamento, como o dimensionamento de equipamentos e sistemas para colheita, manuseio, transporte e armazenamento; com elas, pode-se estimar o tempo de secagem de certa quantidade de produtos, o tempo necessário para a produção, o gasto energético que refletirá no custo de processamento e que, por sua vez, influenciará no preço final do produto. No dimensionamento de equipamento podem-se determinar as condições de operação para a secagem e com isto, a seleção de trocadores de calor, ventiladores e outros (VILELA e ARTUR, 2008).

As curvas de secagem à taxa decrescente podem ser côncavas, convexas ou aproximar-se de uma linha reta; podem apresentar um ponto de inflexão quando ocorre uma mudança na forma física do material, como por exemplo, quando se produz contração e ruptura, e quando se forma uma película na superfície do material parcialmente seco (VILLAR, 1999).

Segundo Park et al. (2007) a evolução das transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem é dividida esquematicamente em três períodos, descritos na Figura 2.2. As curvas representam a evolução do teor de umidade do produto (X), de sua temperatura (T) e da velocidade de secagem (dX/dt) ou taxa de secagem, ao longo do tempo.

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (conteúdo de umidade do produto, X, em relação à evolução do tempo de secagem t), obtida pesando o produto durante a secagem numa determinada condição de secagem. A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto (variação do conteúdo de umidade do produto por tempo, dX/dt em relação à evolução do tempo t), isto é, é a curva obtida diferenciando a curva (a). A curva (c) representa a variação da temperatura do

produto durante a secagem (variação da temperatura do produto T , em relação à evolução do tempo t), obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem (PARK et al., 2007).

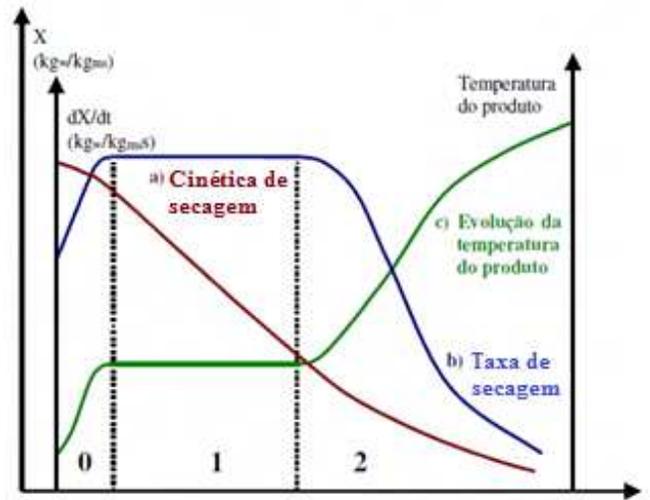


Figura 2.2 - Curvas de secagem. Fonte: Park et al. (2007).

No início da secagem ocorre elevação da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Neste instante, a taxa de secagem é crescente, devido à umidade relativa do ar na camada limite ser menor que 100%, acontecendo o que se costuma chamar de acomodação.

De acordo com a Figura 2.2, podemos observar os três períodos de secagem e descreve-los da seguinte maneira: no período zero, ocorre o início da secagem, nesse instante o produto é geralmente mais frio do que ar, nesse período ocorre elevação da temperatura do produto e da pressão de vapor de água, por consequência, a transferência de massa e a velocidade de secagem são lentos. O fornecimento contínuo de calor em excesso acarreta uma elevação da temperatura do produto ocorrendo um aumento de pressão e da velocidade de secagem até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa. No caso em que a temperatura do ar for inferior àquela do produto, esta última diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio. A duração deste período é insignificante em relação ao período total de secagem.

Tais elevações de temperatura prosseguem até o ponto onde acontece equivalência entre transferência de calor e massa (umidade), ou seja, o período de taxa constante. No

período de taxa constante, a transferência de massa é influenciada pelas condições externas (PARK et al., 2007; FRANCO, 2016).

À medida que a secagem prossegue e tenha passado pelo ponto de umidade crítica, o teor de umidade decresce e a água na fase líquida dentro do material faz a ligação entre as partículas sólidas (produto) formando as pontes líquidas. A partir deste ponto inicia-se o período de taxa de secagem decrescente, em que ocorre uma redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto e a transferência de calor não é equivalente à transferência de massa. Nesse período, a secagem ocorre no interior do produto e o teor de umidade de equilíbrio é atingido quando a quantidade de água evaporada se iguala à quantidade condensada (REEDS, 1991; BROOKER et al., 1992; SILVA, 2008, FRANCO, 2016).

2.2.3 - Métodos de secagem e secadores

O principal objetivo da secagem consiste na remoção de grande parte da umidade de um produto por evaporação mediante a ação do calor, podendo realizar-se por meio natural expondo o produto ao sol e artificial por meio de secadores mecânicos (GARCIA et al., 2004). Tanto para a secagem natural quanto para a artificial, o produto é colocado em contato com o ar de secagem, ocorrendo transferência do calor do ar ao produto sob o efeito da diferença de temperatura existente entre eles (AKPINAR e BICER, 2006).

A secagem natural é um dos métodos mais antigos de secagem de alimentos e surgiu quando os povos primitivos observaram que as sementes das plantas, com que se alimentavam, se conservavam por mais tempo depois de expostas ao sol. A partir daí começaram a secar ao sol outros alimentos, nomeadamente frutas, vegetais e os próprios grãos. A luz solar aberta é o principal método tradicional, ainda amplamente utilizado por pequenos produtores, pois é uma tecnologia de baixo custo e fácil manejo. Este método pode ser aplicado em regiões com temperatura média de 35 a 45°C, com boa taxa de radiação solar, baixa umidade relativa do ar e baixo índice de poluição. Não obstante, a secagem solar apresenta alguns problemas críticos, como a necessidade de um longo tempo de secagem e um grande espaço, poeira e contaminação microbiana dos materiais e efeitos indesejáveis na qualidade física e química dos produtos secos, além de está condicionada às

condições climáticas, não sendo adequado ao processamento de grandes volumes de grãos devido ao baixo rendimento (SILVA, 1995).

A secagem artificial consiste no emprego de métodos mecânicos para aumentar a velocidade do processo de secagem, sendo estes disponibilizados por equipamentos desenvolvidos pelo homem. Porém, este método tem um custo mais elevado do que o custo da secagem natural. Este recurso é amplamente usado em grandes produções devido ao controle e a rapidez proporcionada por este processo. Produtos agrícolas são secos usando tradicionalmente métodos de secagem industriais.

Os métodos de secagem artificiais são obtidos pela exposição da massa do material a um fluxo de ar aquecido (ou não), sendo caracterizados, conforme o fluxo no secador, em estacionário, contínuo e intermitente. A principal vantagem da secagem com ar aquecido é a diminuição no tempo de secagem e como desvantagens podemos citar, os altos custos de energia necessária para aquecer o ar necessário para atingir o calor latente de vaporização da água e o dano que se pode causar ao produto devido à elevação da temperatura e redução do volume, principalmente em materiais sensíveis ao calor (SILVA et al., 2016).

De acordo com Fioreze (2004), os secadores podem ser classificados de quatro formas, de acordo como seu princípio de funcionamento:

Secagem com ar quente: Os secadores de bandeja são bastante comuns no processo de secagem por ar quente. Neste tipo de secador, o produto sólido é espalhado sobre bandejas tipo tela e a circulação de ar no secador é feita por um ventilador situado atrás de resistências elétricas usadas para o aquecimento do ar de entrada, assim, o ar quente cede energia ao produto, o que acarreta a vaporização da água do produto.

Secagem por contato com uma superfície quente: Os secadores de tambor rotativo são exemplos deste tipo de secagem. Consistem de um cilindro que gira lentamente e é aquecido internamente por vapor ou outro meio de aquecimento. O alimento é exposto na superfície do tambor, que é desidratado, devido ao contato com a parede quente do tambor. Neste caso, a energia passa da superfície quente ao produto por condução, e o vapor de água sai do secador em virtude da diferença de densidade.

Secagem a vácuo: A secagem a vácuo é um processo em que os materiais são secos em um ambiente de pressão reduzida, o que reduz o calor necessário para a secagem rápida. Os dispositivos utilizados para a secagem a vácuo são conhecidos como equipamentos de secagem de vácuo. Este processo é frequentemente realizado com calor para reduzir a

umidade do ar, mas, em um secador a vácuo, a temperatura não necessita ser tão elevada, e a secagem é muitas vezes mais rápida, podendo ser desejável em alguns casos, como em alguns produtos em que a temperatura não pode ser elevada, principalmente para evitar a degradação de vitaminas.

Secagem a frio: Para este tipo de processo, são utilizados os liofilizadores. Na liofilização, a água é eliminada do alimento por sublimação. O alimento é congelado e, no liofilizador, sob vácuo, ocorre a desidratação. As principais vantagens deste processo são as mínimas perdas de nutrientes e uma rápida reidratação do produto seco.

2.3 - Secagem intermitente

Vários métodos de secagem novos ou modificados são propostos na literatura, especialmente métodos que melhoram a eficácia da secagem em um aspecto de poupança de energia ou reduzindo o tempo de secagem, mas também no aspecto da qualidade dos produtos secos. Dentre estes métodos, a secagem intermitente tem sido considerada um das soluções promissoras para melhorar a eficiência energética e a qualidade final do produto seco. A essência deste tipo de secagem consiste na passagem descontínua do ar aquecido pela massa de grãos em movimento, promovida pela recirculação do produto no secador, ou seja, alterna períodos de secagem contínua com períodos de repouso. Com isto, a difusão da água do centro para a periferia do grão e a evaporação da água superficial ocorre de maneira mais branda e equilibrada (ELIAS, 2002; FAGUNDES et al., 2005; ELIAS e OLIVEIRA., 2010). Um dos principais objetivos da operação intermitente é estabelecer o melhor padrão de modulação das condições do ar para minimizar o consumo de energia, maximizar a desempenho do secador e melhorar a qualidade do material (DEFENDI et al., 2017).

A secagem intermitente tem sido considerada como um dos processos de secagem mais eficientes em termos de consumo de energia. Análise de energia na secagem intermitente de grãos, legumes, frutas e ervas demonstraram que a secagem intermitente é mais eficiente em termos de energia do que a secagem contínua (PAN et al., 1998; CHUA et al., 2000a; HO et al., 2002; CHIN e LAW, 2010; KOWALSKI e PAWLOSKI, 2011). Várias estratégias de intermitência no consumo de energia podem ser observadas na

literatura e indicam que esses processos intermitentes geralmente mostram melhora da eficiência energética em comparação com a secagem contínua.

A qualidade dos alimentos secos é outra questão importante na secagem. A secagem causa alterações nas propriedades dos alimentos, incluindo descoloração, perda de aroma, mudanças de textura, valor nutritivo e mudanças na aparência física e forma (QUIRIJNS, 2006). A condição do ar de secagem tem um grande efeito sobre os atributos de qualidade do produto seco. Uma temperatura de secagem mais alta reduz o tempo de secagem, mas pode resultar em má qualidade do produto, devido a danos causados pelo calor na superfície, além de um maior consumo de energia (HO et al., 2002). Por outro lado, condições de secagem suaves com temperatura mais baixa podem melhorar a qualidade do produto, mas diminuem a taxa de secagem e o período de secagem é alongado. Alterações nos diferentes atributos de qualidade durante a secagem intermitente de maçã (ZHU et al., 2010), arroz (AQUERRETA et al., 2007), bananas (CHUA et al., 2001), goiaba (CHUA et al., 2002), batata (CHUA et al., 2000) e fatias de abóbora (PAN et al., 1998) foram relatados na literatura.

Na secagem com ar aquecido (secagem artificial) de forma contínua, a quantidade de energia é a mesma ao longo do processo de secagem, podendo resultar em degradação de qualidade e danos causados pelo calor na superfície (ZEKI, 2009) e desperdício de energia térmica. Isso ocorre porque na fase posterior de secagem, a taxa de secagem diminui à medida que as amostras não contêm umidade suficiente para serem removidas. A superfície das amostras torna-se seca para as fases posteriores de secagem e o uso constante de ar de alta temperatura provoca degradação de qualidade e danos à superfície. A estratégia de usar a intermitência permite tempo para transferir a umidade do centro para a superfície da amostra durante o período de repouso. Portanto, a degradação da qualidade e o dano causado pelo calor podem ser minimizados pela aplicação de secagem intermitente (KUMAR et al., 2014).

A intermitência pode ser alcançada de várias maneiras. Na Figura 2.3 pode ser observado de forma simplificada, os tipos de intermitência com base na revisão de literatura realizada por Kumar et al., (2014). A parte superior mostra variáveis que podem ser alteradas e a parte inferior mostra diferentes modos de aplicar essas variáveis na realização de diferentes formas de intermitência. A forma mais comum de secagem intermitente estudada por pesquisadores é a intermitência alcançada através da mudança das condições

do ar de secagem (CHUA et al., 2000a; CHUA et al., 2002; HO et al., 2002; CHIN e LAW, 2010).

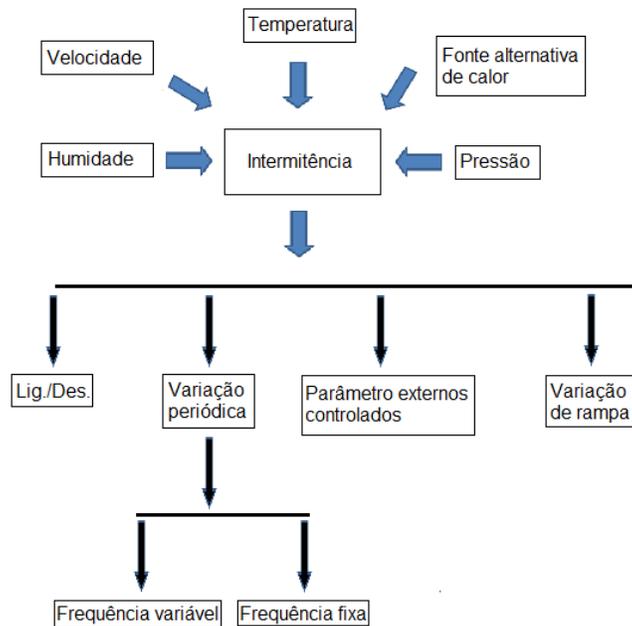


Figura 2.3 - Esquema de classificação geral para a secagem intermitente.

Diferentes tipos de intermitência afetam a qualidade do produto e a eficiência energética à sua maneira. Portanto, a intermitência não deve ser escolhida arbitrariamente, mas deve ser selecionada com base na física envolvida no método de secagem. Caso contrário, a eficiência energética otimizada esperada e a melhoria da qualidade do produto continuarão inalcançáveis. A intermitência deve ser selecionada com base na transferência de calor e massa envolvidos no processo de secagem, e propriedades do material a ser seco (KUMAR et al., 2014).

De todas as formas para se conseguir a secagem intermitente acima mencionada, a mais estudada é obtida mudando as condições do ar de secagem, pelo qual o fluxo de calor é fornecido intermitentemente, em vez de continuamente. Isto pode ser feito interrompendo o fluxo de ar ou por um fluxo de ar contínuo aquecido periodicamente, que envolve a combinação de secagem em alta temperatura por curto intervalo de tempo, minimizando os gradientes de umidade e temperatura no interior do material (CHUA et al., 2003).

Kumar et al. (2014) e Galvão (2017) definem a razão de intermitência como sendo a relação do período de têmpera e o tempo total de um ciclo, ou seja, $\alpha = \tau_{out}/(\tau_{in} + \tau_{out})$, onde

τ_{in} é o tempo em que o material fica exposto à fonte de calor, τ_{out} é o tempo de têmpera, isto é, período em que o material fica fora do secador, e $(\tau_{in} + \tau_{out})$ refere-se ao tempo total de um ciclo. Fazendo uma análise desta defini o, se $\tau_{out} = 0$, então $\alpha = 0$, ou seja, a secagem será contínua. Para $\tau_{out} \neq 0$, conseqüentemente $\alpha \neq 0$, resultando assim em diferentes casos de intermitência. Alguns autores utilizam estratégias que consistem em ligar e desligar a fonte de calor a fim de se obter a intermitência, porém, neste estudo será adotada a estratégia do produto ser colocado e retirado do secador, sem necessariamente ser realizado o desligamento do aparelho, representada pelo subscrito “in” e “out”, respectivamente. No presente estudo, será adotada a defini o para razão de intermitência mencionada.

2.4 - Modelagem matemática para secagem

Os modelos matemáticos possibilitam a representa o de fen menos físicos através de uma linguagem matemática coerente, podendo ser usados para descrever o processo de secagem (BASSANEZI, 2002).

A modelagem   necessária para avaliar o efeito dos parâmetros do processo e otimizar o processo de secagem (KUMAR et al., 2012). A retirada de umidade dos produtos alimentares é um processo muito complexo devido   sua complexidade na estrutura interna e no comportamento durante a secagem. A complexidade aumenta ainda mais se alguma forma de intermitência for introduzida. Portanto, se torna uma tarefa difícil representar matematicamente as condi oes exatas durante a secagem.

A secagem pode ser descrita pelos modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos. Nos modelos teóricos, consideram-se as condi oes externas sob as quais a opera o ocorre como também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos. Os modelos semi-teóricos têm base na Lei de Newton para resfriamento aplicado   transferência de massa, em que se presume que as condi oes sejam isotérmicas e que a resistência   transferência de água se restrinja apenas   superfície do produto. Os modelos empíricos consistem em uma correla o direta entre o teor de umidade do produto e o tempo do processo de secagem, que podem ser facilmente investigados por experimentos em laboratório (MENDONÇA et al., 2015).

O aperfeiçoamento das técnicas e dos equipamentos utilizados no processo de secagem podem resultar em uma otimiza o e uma melhora da eficiência do processo,

viabilizando sua aplicação comercial. Assim, é de fundamental importância a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água, utilizando-se um modelo matemático que simule e represente, satisfatoriamente, sua perda de água durante o período de secagem. As curvas de secagem representam o comportamento do produto durante o processo de secagem, com elas, pode-se estimar o tempo de secagem, o tempo necessário para a produção, o gasto energético que refletirá no custo de processamento, que podem variar de acordo com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, teor de umidade, entre outros fatores (GONELI et al., 2007).

No estudo da secagem, a maioria dos modelos empregados para representar a secagem dos produtos agrícolas foi desenvolvida, negligenciando-se a importância da contração volumétrica do produto durante o processo de secagem. A remoção de água durante a secagem dos produtos biológicos gera a redução da tensão existente no interior das células promovendo, assim, a sua contração volumétrica, a exemplo da secagem de frutas, em que o encolhimento é tão grande que não deve ser ignorado. Este efeito também deve ser incluído no modelo para uma completa descrição e análise do fenômeno (BROOKER et al., 1992).

2.5 - Equação geral de transporte

A equação geral de conservação para um volume de controle infinitesimal é dada por (PATANKAR, 1980; BECK et al., 1992; MALISKA, 2004):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) + \nabla \cdot (\lambda\vec{v}\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^{\Phi}\nabla\Phi) + S \quad (2.1)$$

onde Φ é a variável dependente de interesse, λ e Γ^{Φ} são coeficientes de transporte, \vec{v} é o vetor velocidade do meio e S é o termo fonte.

Na Equação (2.1), o primeiro termo representa a variação temporal da grandeza sob estudo em um volume infinitesimal, sendo conhecido como termo transiente. Por outro lado, o segundo termo, denominado termo advectivo, indica a variação da grandeza com a posição em um meio onde há movimento macroscópico com uma velocidade \vec{v} . O terceiro termo representa a variação da grandeza com a posição por difusão (termo difusivo),

enquanto o último termo, denominado de termo fonte, representa a geração da grandeza em um volume infinitesimal.

2.6 - Modelos de difusão

A equação de difusão, dependendo do problema, pode ser denominada de Lei de Fick (difusão mássica) ou Lei de Fourier (difusão térmica).

A equação que descreve o fenômeno de difusão para uma variável genérica Φ é obtida da Equação (2.1) fazendo $\vec{v} = 0$, já que neste caso o meio encontra-se em repouso (velocidade nula) e a variação da grandeza dentro do volume de controle ocorre unicamente por difusão. Assim, a equação de difusão é expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^{\Phi}\nabla\Phi) + S \quad (2.2)$$

Vários trabalhos são encontrados na literatura utilizando a difusão líquida para descrever o transporte de água apenas na fase líquida no interior do sólido (CARMO e LIMA, 2008; CIHAN et al., 2008; SANTOS, 2013; SILVA, 2013). A difusão líquida é definida como sendo um processo físico de natureza aleatória no qual as heterogeneidades de concentração tendem a se reduzir. Em um sólido homogêneo, a difusão de massa equivale ao transporte de átomos e de moléculas no interior do sólido, alcançando a posição de equilíbrio estável (SILVA et al., 2009; GALVÃO, 2017). Esta teoria se baseia na lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. Utilizando a lei de Fick na equação de balanço de massa de água no interior do produto e assumindo que $\lambda = 1$, $\Phi = X$, $\Gamma^{\Phi} = D$ e $S = 0$ na equação de difusão (2.2), obtém-se a equação para o transporte difusivo de massa, dada por (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992; LIMA, 1999; BIRD et al., 2001; MALISKA, 2004):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D\nabla X) \quad (2.3)$$

onde X é o teor de umidade no sólido (em base seca), D é a difusividade efetiva de massa e t é o tempo.

Para produtos que sofrem grandes alterações em suas dimensões quando submetidos a um processo de desidratação ou secagem, como exemplo as frutas, o fenômeno de encolhimento deve ser considerado na modelagem matemática com o objetivo de se obter uma representação mais realística do processo, evitando diferenças consideráveis entre os resultados experimentais e teóricos e, garantir maior confiabilidade nos valores dos parâmetros físicos determinados com a utilização do referido modelo (CARMO, 2004).

A equação da condução de calor é usada para calcular taxas de transferência de calor em um corpo sólido e é obtida da Equação (2.2) considerando-se a grandeza de interesse como sendo a temperatura ($\Phi = T$), $\lambda = \rho c_p$ e $\Gamma^\Phi = k$. Assim, substituindo esses parâmetros na Equação (2.2), obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \nabla \cdot (k \nabla \Phi) + S \quad (2.4)$$

onde, c_p é o calor específico à pressão constante, ρ é a densidade e k é a condutividade térmica. O produto ρc_p , comumente chamado de capacidade calorífica volumétrica, mede a capacidade de um material de armazenar energia térmica (FRANCO, 2016).

Silva (2013) estudou a secagem da banana nanica nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, ajustando os dados experimentais a diferentes modelos matemáticos. Foram considerados cinco modelos empíricos e também foi apresentada uma solução analítica para a equação de difusão em coordenadas cilíndricas considerando propriedades de transporte constantes. Dentre os modelos empíricos considerados, o que melhor se ajustou aos dados experimentais foi a equação de dois termos. Verificou-se que o modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo na superfície descreve o transporte de umidade de forma fisicamente mais consistente do que a condição de contorno de equilíbrio. A solução foi utilizada para descrever a distribuição de umidade considerando a geometria de um cilindro infinito durante o processo de secagem.

Galvão (2017) utilizou o método dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita para obter uma solução numérica tridimensional da equação de difusão durante o processo de secagem contínua e intermitente de pedaços de maçã, cortados na forma de paralelepípedos, pressupondo condição de contorno do terceiro tipo, parâmetros termo-físicos e dimensões variáveis. A análise dos resultados evidencia que o modelo difusivo descreveu adequadamente as cinéticas de secagem contínua e intermitente.

Modelos analíticos foram utilizados por Silva et al. (2015) para descrever os processos de secagem contínua e intermitente de bananas. Os autores consideraram a solução da equação de difusão para um cilindro infinito, considerando propriedades de transporte constantes e condição de contorno convectiva, que permitiu a determinação do coeficiente de difusão e do coeficiente de transferência de massa sobre a superfície da fruta. O conceito de tempo efetivo de operação foi utilizado e observou-se uma boa concordância entre o modelo e os dados experimentais obtidos. O modelo com condição de contorno convectiva descreveu bem os processos de secagem, tornando possível perceber que o coeficiente de transferência de massa foi reduzido, indicando que no caso descontínuo, o produto é submetido a tensões menores. Verificou-se que com a intermitência se obtém maiores taxas de secagem, em comparação com processo de secagem contínua.

Silva et al. (2016) realizaram experimentos de secagem contínua e intermitente com bananas inteiras usando ar quente a 70 °C. Apresentaram uma solução numérica da equação de difusão acoplada a um otimizador para determinar os parâmetros dos processos, considerando-se coeficiente de difusão variável, condição de contorno convectiva e encolhimento radial. A equação de difusão, escrita no sistema de coordenadas cilíndricas, foi considerada para o caso unidimensional e o método dos volumes finitos foi empregado para discretizar a equação básica. Para todas as experiências, a simulação da cinética de secagem resultou em bons indicadores estatísticos. O modelo proposto também incluiu dois valores para transferência de massa por convecção e possibilitou prever a distribuição de umidade durante todo o processo, incluindo a migração de umidade da parte central para a região periférica da seção transversal das bananas, durante o período de têmpera. Os resultados indicaram que, para o mesmo tempo de operação efetiva e razão de intermitência, o aumento do período de têmpera, implicou uma diminuição moderada no teor médio de umidade das bananas. O modelo considerado é preciso e eficiente para simular muitos problemas físicos de transferência de massa.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Local da pesquisa

A pesquisa foi conduzida no Laboratório de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA) e também no Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Unidade Acadêmica de Física (UAF) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), na cidade de Campina Grande, Paraíba.

3.2 - Aquisição da matéria-prima e caracterização inicial

Nesta pesquisa foram utilizados como matéria-prima grãos de arroz vermelho (*Oryza sativa L.*) em casca, adquiridos diretamente de um produtor local, cultivadas às margens do rio Piancó, localizado na região do Sertão da Paraíba. As sementes foram adquiridas logo após a época de colheita e conduzidas para o laboratório de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas em bolsas hermeticamente fechadas, conforme a Figura 3.1.



Figura 3.1 - Amostras de grãos de arroz vermelho em casca.

Inicialmente, foram selecionados 50 grãos *in natura*, de forma aleatória, para medição das dimensões (largura, espessura e comprimento) utilizando um paquímetro

digital da marca INSIZE (Figura 3.2) com resolução de 0,01 mm, antes da secagem. Foi realizada a média destes valores após efetivar as medições.

O diâmetro médio corresponde à média entre a espessura e a largura na posição central do grão. Assim, o raio do grão corresponde à metade do diâmetro médio.



Figura 3.2 - Paquímetro digital.

3.3 - Material e procedimentos experimentais

Os experimentos de secagem contínua e intermitente do arroz vermelho em casca foram realizados em triplicata utilizando duas temperaturas distintas (50 e 70°C). Os grãos de arroz com peso total de aproximadamente 20 gramas foram espalhados em cestos de tela fina (Figura 3.3), e uniformemente espalhados, formando uma camada fina, de forma que o ar fluísse através da amostra de arroz. Os cestos foram inicialmente pesados e, em seguida, o conjunto (grãos + cesto) também foi para aferição da massa inicial.



Figura 3.3 - Cestos com os grãos de arroz em casca.

Logo em seguida, realizamos as secagens em um secador convectivo de leito fixo (Figura 3.4), com fluxo de ar vertical fornecido por um ventilador. O ar com velocidade constante foi conduzido até a câmara, onde é distribuído em bandejas removíveis em que as amostras de grãos foram dispostas. O ar fornecido pelo ventilador é aquecido por meio de resistências elétricas, enquanto a temperatura do secador é controlada por meio de um transformador variador de tensão (Variac) de 0 a 150 V, conectado, em série, às resistências elétricas.



Figura 3.4 - Secador convectivo de leito fixo utilizado nos experimentos.

As temperaturas do ar de secagem utilizadas neste estudo foram monitoradas através de um termômetro de mercúrio (Figura 3.5 a), cujo bulbo foi instalado imediatamente abaixo da camada de grãos, com precisão $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$. O secador foi previamente ajustado para a velocidade do ar de secagem de 1 m s^{-1} , medido com um anemômetro de palheta (Figura 3.5 b) de leitura digital, da marca Instrutemp, modelo MDA-II, em todos os experimentos.

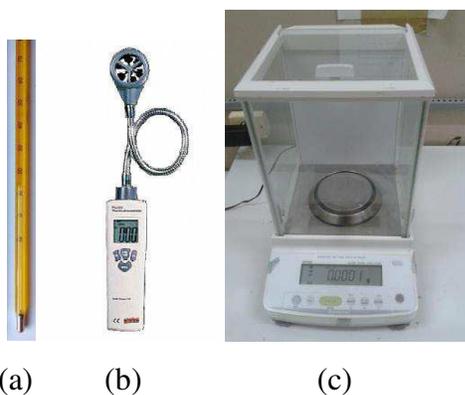


Figura 3.5 - instrumentos de medição: termômetro de mercúrio (a), anemômetro (b) e balança digital (c).

Em cada conjunto de experimentos, as amostras foram submetidas à técnica da secagem contínua e intermitente. Os cestos foram colocados no secador e os grãos foram secos usando ar quente com temperatura e velocidade constantes.

Durante o processo de secagem, a perda de água foi determinada através do método gravimétrico, uma vez que as amostras foram retiradas do secador para a medição da massa, pesando-se o cesto com a amostra e, em seguida, retornando-as de volta ao secador. As medições foram realizadas em intervalos pré-definidos em uma balança digital (Figura 3.5 c) da marca Marte, com precisão de 0,001 g e capacidade máxima de 200 g, até que os grãos atingissem o estágio de equilíbrio higroscópico.

No processo de secagem intermitente, os cestos foram encaminhados para o secador alternadamente, obedecendo ao tempo estipulado de intermitência. Enquanto a amostra número 1 estava no secador, as duas outras permaneceram em repouso em um recipiente fechado, exposto à temperatura ambiente. Passados 1/3 do tempo de um ciclo, a amostra número 2 adentrou no secador ao mesmo tempo em que a amostra de número 1 seguiu para o recipiente destinado ao período de têmpera; passado 2/3 do tempo do ciclo da amostra 1, a amostra 3 adentrou no secador simultaneamente em que a amostra 2 seguiu para o recipiente. Com isso, ao final do tempo de exposição da amostra número 3 à fonte de calor, a amostra número 1 voltou ao secador, encerrando-se o tempo de têmpera da amostra de número 1, iniciando-se então um novo ciclo.

Para as secagens contínuas, os três cestos com os grãos foram levados ao secador concomitantemente. Inicialmente, as medições foram realizadas em intervalos de tempo de 5, 10, 15, 20, 25, 30 minutos, depois com intervalos de 40, 60 e 120 minutos até o final do processo, ou seja, até que os grãos atingissem o estágio de equilíbrio higroscópico. Em cada instante de tempo especificado, as amostras eram retiradas, tiveram suas massas determinadas e retornaram para a o secador. Não havendo mais variação de massa nas amostras, o teor de umidade de equilíbrio foi determinado.

Nesse cenário, alcançado o teor de umidade de equilíbrio nas secagens contínua e intermitente, as amostras foram levadas para a estufa, da marca New lab (Figura 3.6 a), a uma temperatura de 105°C e deixadas por um período de 24 h. Após esse período, encaminhamos as amostras para o dessecador (Figura 3.6 b) até atingir a temperatura ambiente, sendo pesada e, então, obtida a massa seca. Para determinar a massa dos grãos, a

massa do cesto foi subtraída da massa total. No final de cada experimento de secagem foram obtidas as médias para a temperatura e umidade relativa do ar ambiente.

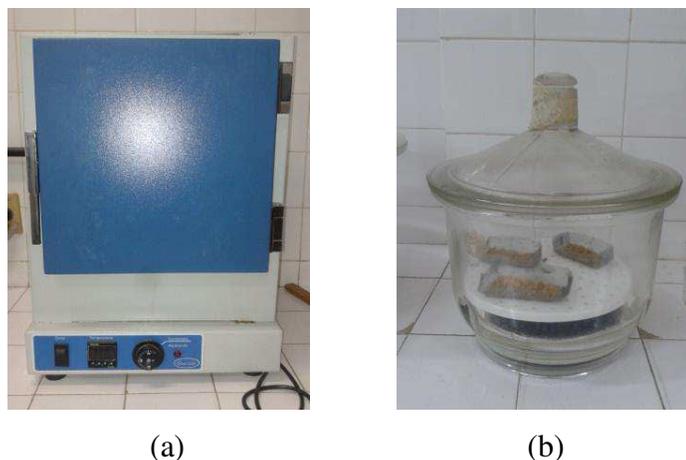


Figura 3.6 - Estufa (a) e dessecador (b) utilizados nos experimentos.

No total, realizamos seis experimentos de secagem, sendo quatro secagens intermitentes com razão de intermitência de $\alpha = 2/3$ e duas secagens contínuas. Define-se a razão de intermitência (α) como sendo a razão entre o período de tâmara e o tempo total de um ciclo a partir da expressão $\alpha = t_{out}/(t_{in} + t_{out})$, em que $t_{in} + t_{out}$ corresponde ao tempo total de um ciclo. Dessa forma, foram usados os termos “ t_{in} ” e “ t_{out} ” para designar o período dentro e fora das amostras no secador, respectivamente, sem que ocorra o desligamento do aparelho. Vejamos as informações gerais sobre cada experimento apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros para cada experimento de secagem de arroz em casca.

| Experimento | Secagem | t_{in} (min) | t_{out} (min) | T (°C) |
|----------------|--------------|----------------|-----------------|--------|
| E ₁ | Intermitente | 10 | 20 | 50 |
| E ₂ | Intermitente | 20 | 40 | 50 |
| E ₃ | Contínua | - | - | 50 |
| E ₄ | Intermitente | 10 | 20 | 70 |
| E ₅ | Intermitente | 20 | 40 | 70 |
| E ₆ | Contínua | - | - | 70 |

Com os dados da massa (m) e da massa seca (m_s), foram determinados o teor de umidade \bar{X} , em base seca (b.s.), calculados pela Equação (3.1):

$$\bar{X} = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (3.1)$$

A partir dos dados de perda de massa das amostras durante as secagens e dos teores de umidade de equilíbrio, foram calculadas as razões de umidade (Equação 3.2) e construídas as curvas de razão de umidade em função do tempo de secagem.

$$\bar{X}^* = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_i - X_{eq}} \quad (3.2)$$

em que:

\bar{X}^* - Razão de umidade do produto, adimensional;

\bar{X} - Teor de umidade médio do produto em base seca;

X_{eq} - Teor de umidade de equilíbrio do produto em base seca;

X_i - Teor de umidade inicial do produto em base seca.

3.4 - Descrição da cinética de secagem por modelos empíricos

No presente estudo, para descrever as secagens contínua e intermitente dos grãos de arroz em casca, foram ajustados seis equações empíricas frequentemente utilizadas para representação da secagem de produtos agrícolas, apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Modelos empíricos utilizados para prever a cinética de secagem dos grãos de arroz em casca.

| Modelo | Equação | Referência | Designação |
|-------------------|------------------------------------|--------------------------|------------|
| Henderson e Pabis | $\bar{X}^* = a \exp(-bt)$ | Diamante et al. (2010) | (3.3) |
| Lewis | $\bar{X}^* = \exp(-at)$ | Kaleta e Górnicki (2010) | (3.4) |
| Page | $\bar{X}^* = \exp(-at^b)$ | Diamante et al. (2010) | (3.5) |
| Peleg | $\bar{X}^* = 1 - t/(a + bt)$ | Mercali et al. (2010) | (3.6) |
| Silva et alii | $\bar{X}^* = \exp(-at - bt^{1/2})$ | Silva et al. (2012) | (3.7) |
| Wang e Singh | $\bar{X}^* = 1 + at + bt^2$ | Kaleta e Górnicki (2010) | (3.8) |

Para avaliar a qualidade dos ajustes dos diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais, utilizou-se como critérios de ajuste a análise do coeficiente de determinação (R^2) e o qui-quadrado (χ^2). Quanto mais aproximado a 1 o R^2 e quanto menor for o valor do qui-quadrado, mais elucidativo o modelo e melhor ele se ajusta à os dados experimentais (SOZZI e RAMOS, 2015).

A partir dos modelos empíricos apresentados na Tabela 3.2, as equações matemáticas para a taxa de secagem em função do tempo são apresentadas na Tabela 3.3. Tais modelos foram selecionados com base nos resultados de Silva et al. (2014), que estudaram a secagem contínua de bananas utilizando equações empíricas.

Tabela 3.3 - Equações da taxa de secagem obtidas através dos modelos empíricos.

| Modelo matemático | Equação | Designação |
|--------------------------|---|-------------------|
| Henderson e Pabis | $d\bar{X}^*/dt = -a b \exp(-bt)$ | (3.9) |
| Lewis | $d\bar{X}^*/dt = -a \exp(-at)$ | (3.10) |
| Page | $d\bar{X}^*/dt = -a b t^{b-1} \exp(-at^b)$ | (3.11) |
| Peleg | $d\bar{X}^*/dt = -a/(a + bt)^2$ | (3.12) |
| Silva et alii | $d\bar{X}^*/dt = -(a + bt^{-1/2}/2)\exp(-at - b\sqrt{t})$ | (3.13) |
| Wang e Singh | $d\bar{X}^*/dt = a + 2bt$ | (3.14) |

3.5 - Modelos de difusão

A aplicação de soluções analíticas e numéricas da equação de difusão foi empregada para descrever o processo de secagem continua e intermitente. Neste trabalho, utilizamos a geometria cilíndrica no desenvolvimento dos modelos difusivos. Para as soluções analíticas, foram empregados dois modelos de difusão líquida, em que o primeiro deles pressupõe condição de contorno do primeiro tipo (condição de contorno de equilíbrio ou prescrita) e o segundo pressupõe condição de contorno do terceiro tipo (condição de contorno convectiva). Esses modelos foram usados para a geometria de um cilindro infinito, visando estabelecer a correta condição de contorno na descrição da secagem contínua e intermitente do arroz. Além disso, a solução numérica da equação de difusão

também foi utilizada para descrever o processo difusivo em coordenadas cilíndricas dos grãos de arroz em casca.

3.5.1 - Equação de difusão para a geometria do problema

Para descrever o processo de secagem do arroz em casca, foi utilizada a equação de difusão de massa descrita pela Equação (2.3). Desse modo, para um cilindro infinito, em que o comprimento é muito maior que o raio, a equação de difusão unidimensional aplicada ao transporte de massa pode ser escrita em coordenadas cilíndricas da seguinte forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial X}{\partial r} \right), \quad (3.15)$$

em que, r define a posição de um ponto em relação ao eixo central do cilindro e t é o tempo.

3.5.2 - Soluções analíticas da equação de difusão

Como sabemos, solução de problemas de difusão para várias situações físicas de interesse muitas vezes requer a necessidade de estabelecer determinadas hipóteses na descrição do processo físico. A fim de resolvê-la analiticamente, foram consideradas as seguintes condições:

- (a) Difusão líquida é o único mecanismo de transporte de água no interior do sólido;
- (b) A distribuição inicial do teor de umidade deve ser uniforme;
- (c) As dimensões do sólido não variam durante a difusão de água;
- (d) A difusividade efetiva da água não varia durante o processo;
- (e) O sólido cilíndrico é homogêneo e isotrópico;
- (f) O coeficiente de transferência de massa convectivo (h) é constante durante a difusão de água.

3.5.3 - Solução analítica para a condição de contorno do primeiro tipo

A solução analítica com condição de contorno do primeiro tipo (condição de contorno de equilíbrio ou prescrita, ou condição de contorno de Dirichlet) é a primeira solução a ser apresentada para a equação de difusão em coordenadas cilíndricas. Para essa condição de contorno, o coeficiente de transferência convectivo de massa h é considerado infinito e, assim, a difusividade efetiva de massa é o único parâmetro do processo.

Para um cilindro homogêneo de raio R , com umidade inicial uniformemente distribuída X_i , com teor de umidade de equilíbrio X_{eq} , a solução $X(r, t)$ da Equação (3.15) é obtida por separação de variáveis (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992; SILVA, 2013):

$$X(r, t) = X_{eq} - (X_{eq} - X_i) \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} t\right), \quad (3.16)$$

onde,

$$A_n = \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)}, \quad (3.17)$$

em que μ_n é obtido através da seguinte equação característica:

$$J_0(\mu_n) = 0, \quad (3.18)$$

sendo J_0 e J_1 as funções de Bessel de primeiro tipo de ordens 0 e 1, respectivamente. Vale salientar que μ_n são as raízes da função de Bessel de primeiro tipo com ordem 0;

Na Equação (3.16) deve ser observado que $X(r, t)$ é o teor de umidade em base seca em uma posição r com relação ao eixo central do cilindro, num instante t , X_{eq} é o teor de umidade para $t \rightarrow \infty$; X_i é o teor de umidade para $t = 0$; R é o raio do cilindro e D é a difusividade efetiva de massa.

A expressão para o valor médio do teor de umidade, em um instante t , é dada da seguinte forma:

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{V} \int X(r, t) dV, \quad (3.19)$$

em que V é o volume do cilindro.

A solução da equação de difusão para o valor médio $\bar{X}(t)$ num sólido cilíndrico em um instante t é obtida pela substituição da Equação (3.16) na Equação (3.19), e é dada por:

$$\bar{X}(t) = X_{eq} - (X_{eq} - X_i) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_n^2} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} t\right). \quad (3.20)$$

Neste trabalho, são considerados os duzentos primeiros termos da série infinita.

3.5.4 - Otimizador para a solução analítica com condição de contorno do primeiro tipo

O método utilizado para otimização é o método inverso e foi usado para a determinação da difusividade da água durante o processo de secagem, a partir de um conjunto de dados experimentais para a solução analítica com condição de contorno do primeiro tipo, ou seja, para cada conjunto de dados experimentais, um "D" ótimo é determinado através da minimização de χ^2 .

A função objeto é definida a partir do qui-quadrado obtido pelo ajuste da solução analítica aos pontos experimentais (BEVINGTON e ROBINSON, 1992; TAYLOR, 1997; SILVA et al., 2009), como segue:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} [\bar{X}_i^{\text{exp}} - \bar{X}_i^{\text{ana}}(D)]^2 \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad (3.21)$$

em que \bar{X}_i^{exp} é o teor de umidade médio experimental; $\bar{X}_i^{\text{ana}}(D)$ é o teor de umidade médio determinado por meio da solução analítica da equação de difusão (Equação 3.20); σ_i é o desvio padrão do teor de umidade experimental; D é a difusividade e N_p é o número de pontos experimentais.

O algoritmo desenvolvido por Silva et al. (2009) utiliza soluções analíticas (condição de contorno prescrita) para determinar a difusividade em um processo de difusão de água com dados experimentais conhecidos, para as seguintes geometrias: parede infinita,

cilindro infinito, esfera, cilindro finito e paralelepípedo. O algoritmo consiste, fundamentalmente, dos procedimentos a seguir.

A princípio, um valor próximo de zero (1×10^{-20}) é atribuído para a difusividade, substituído na solução analítica da equação de difusão com certa quantidade de termos da série. Dessa forma, $\bar{X}_i^{ana}(D)$ pode ser calculado para determinados tempos de interesse, possibilitando determinar χ^2 para um conjunto de dados experimentais através da Equação (3.21). Então, o valor de D é dobrado e um novo χ^2 é calculado e comparado com o valor anterior. Caso esse novo valor de qui-quadrado seja menor, D é dobrado novamente, e outro valor para χ^2 é determinado, prosseguindo a comparação com o valor anterior. Este procedimento é repetido até que o último χ^2 calculado seja maior que o valor anterior. Dessa forma, o antepenúltimo e o último valores da D , respectivamente denotados por D_a e D_b , definem uma região bruta que contém o valor mínimo de χ^2 .

Os valores determinados para o intervalo entre D_a e D_b podem, ainda, ser refinados, subdividindo este intervalo em n valores de D distribuídos uniformemente. Este procedimento pode ser repetido até que um critério de convergência seja satisfeito.

3.5.5 - Solução analítica para a condição de contorno do terceiro tipo

A segunda solução analítica a ser apresentada para a equação de difusão em coordenadas cilíndricas refere-se à condição de contorno do terceiro tipo (condição de contorno convectiva ou condição de contorno de Cauchy).

Esta condição de contorno é expressa por intermédio da imposição de igualdade entre o fluxo interno (difusivo) no contorno do cilindro infinito e o fluxo externo (convectivo) nas vizinhanças deste contorno:

$$-D \left. \frac{\partial X(r, t)}{\partial r} \right|_{r=R} = h[X(r, t)|_{r=R} - X_{eq}], \quad (3.22)$$

Para um cilindro homogêneo, de raio R , com umidade inicial uniformemente distribuída X_i , com teor de umidade de equilíbrio X_{eq} , a solução $X(r, t)$ da Equação (3.15), para a condição de contorno definida pela Equação (3.22), é obtida por separação de variáveis (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992; SILVA, 2013), resultando em:

$$X(r, t) = X_{eq} - (X_{eq} - X_i) \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} t\right), \quad (3.23)$$

sendo,

$$A_n = \frac{2Bi}{J_0(\mu_n)[\mu_n^2 + Bi^2]}. \quad (3.24)$$

Substituindo a Equação (3.23) na Equação (3.19), a expressão para o teor de umidade médio é obtida para o cilindro infinito:

$$\bar{X}(t) = X_{eq} - (X_{eq} - X_i) \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D}{R^2} t\right), \quad (3.25)$$

no qual, o coeficiente B_n é dado por:

$$B_n = \frac{4Bi^2}{\mu_n^2(Bi^2 + \mu_n^2)}, \quad (3.26)$$

em que Bi é o número de Biot para a transferência de massa, e é definido da seguinte forma:

$$Bi = \frac{hR}{D}, \quad (3.27)$$

onde h é o coeficiente de transferência convectiva de massa. As raízes μ_n são calculadas a partir da equação característica para o cilindro infinito, que é dada por:

$$\frac{J_0(\mu_n)}{J_1(\mu_n)} = \frac{\mu_n}{Bi}. \quad (3.28)$$

A Equação (3.28) é uma equação transcendental e pode ser expressa da seguinte forma:

$$J_0(\mu_n)Bi - \mu_n J_1(\mu_n) = 0 \quad (3.29)$$

em que J_0 e J_1 são as funções de Bessel do primeiro tipo e ordens zero e um, respectivamente.

Neste trabalho, para determinar a difusividade efetiva de massa e o coeficiente de transferência convectivo de massa (ou o número de Biot), as primeiras 16 raízes da Equação (3.29) foram determinadas para vários números de Biot distintos.

3.5.6 - Otimizador para a solução analítica com condição de contorno do terceiro tipo

Para o caso da condição de contorno do terceiro tipo, o ajuste da solução analítica da Equação (3.25) aos dados experimentais passa a ser definida pela função objetivo a seguir:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} [\bar{X}_i^{\text{exp}} - \bar{X}_i^{\text{ana}}(D, Bi)]^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (3.30)$$

Para determinar a difusividade da água durante o processo de secagem, a função objetivo descrita pela Equação (3.30) passa a depender além de D , mas também do número de Biot, ou de forma equivalente, do coeficiente de transferência de massa convectivo (h). Para um determinado número de Biot, a Equação (3.30) torna-se função somente da difusividade efetiva de massa, tornando-se equivalente a Equação (3.21). Deste modo, é possível o otimizador ser aplicado na minimização da Equação (3.30), determinando um valor ótimo de D para um número de Biot especificado. Assumindo que D e h são independentes um do outro, o processo de minimização pode ser repetido para todos os 469 números de Biot, cobrindo o domínio de 0 a 200. Posteriormente à varredura completa dos números de Biot, é identificado o menor χ^2 dos 469 mínimos determinados. Então, para o algoritmo do otimizador desenvolvido por Silva et al. (2009), não é necessário que valores iniciais ou faixas de busca sejam indicados para a busca por valores ótimos para D e Bi e, conseqüentemente, h , uma vez que todo o domínio para os números de Biot é varrido. Para a geometria de um cilindro infinito, a expressão para o número de Biot foi definida pela Equação (3.27).

3.6 - Solução numérica unidimensional da equação de difusão

Para descrever a secagem contínua e intermitente dos grãos de arroz em casca por meio da solução numérica da equação de difusão, partiu-se de alguns pressupostos: os grãos de arroz foram considerados um cilindro infinito homogêneo e isotrópico; a difusão é o único mecanismo de transporte dentro dos grãos, sendo considerado constante durante o processo; O encolhimento radial não será considerado no modelo. Para esta geometria, a equação de difusão foi resolvida através do método numérico dos volumes finitos (PATANKAR, 1980; MALISKA, 2004; SILVA, 2007), com uma formulação totalmente implícita.

Conforme a Figura 3.7, os volumes de controle têm espessura Δr e o volume de controle número “i” tem um ponto nodal “P”, para um cilindro com malha uniforme.

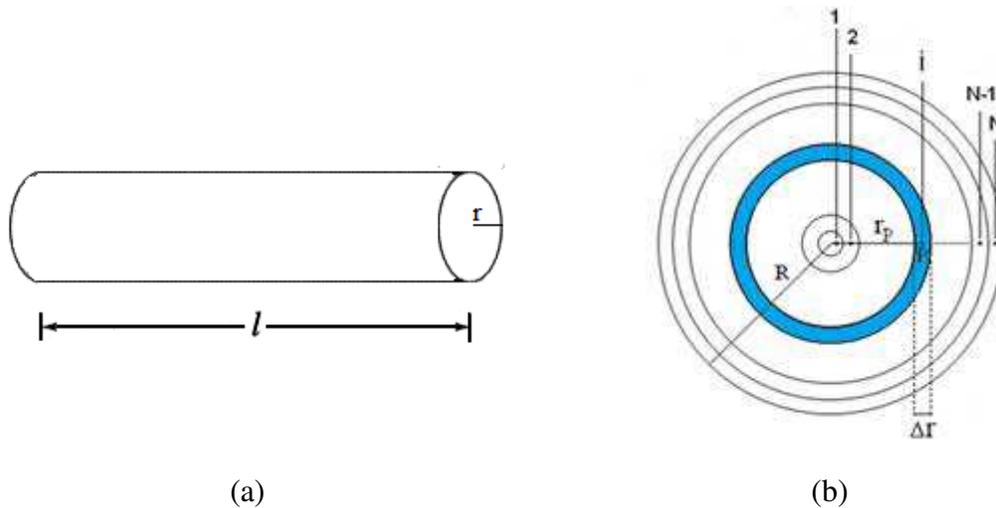


Figura 3.7 - Cilindro de raio r e comprimento l (a) e esquema da malha uniforme (b). Fonte: Silva et al.(2009).

A Figura 3.8 mostra um volume de controle interno com ponto nodal “P” e seus vizinhos a oeste (W) e a leste (E). As letras minúsculas “w” e “e” referem-se às interfaces do referido volume de controle; r_w e r_e são os raios das circunferências que delimitam as faces “w” e “e” do volume de controle, respectivamente.

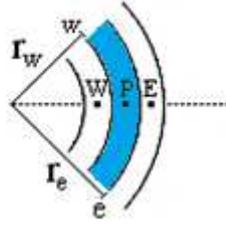


Figura 3.8 - Volume de controle interno “P” e seus vizinhos a oeste (W) e a leste (E).

Usando o método dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita para integrar a Equação (3.15) no espaço e no tempo, obtém-se o seguinte resultado para o volume de controle P:

$$\frac{X_P - X_P^0}{\Delta t} r_P \Delta r = r_e D_e \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_e - r_w D_w \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_w \quad (3.31)$$

em que o sobrescrito “0” significa “tempo anterior” (t) e sua ausência significa “tempo atual” (t + Δt).

3.6.1 - Volumes internos

Para um volume de controle interno, as derivadas parciais da Equação (3.31) podem ser aproximadas da seguinte forma:

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_e = \frac{X_E - X_P}{\Delta r} \quad (3.32)$$

e

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_w = \frac{X_P - X_W}{\Delta r} \quad (3.33)$$

Assim, a Equação (3.31) discretizada para um volume de controle interno pode ser escrita da seguinte forma:

$$A_w X_W + A_p X_P + A_e X_E = B, \quad (3.34)$$

em que:

$$A_w = -\frac{r_w}{\Delta r} D_w, \quad (3.35)$$

$$A_e = -\frac{r_e}{\Delta r} D_e, \quad (3.36)$$

$$A_p = \frac{r_p - \Delta r}{\Delta t} + \frac{r_e}{\Delta r} D_e + \frac{r_w}{\Delta r} D_w, \quad (3.37)$$

$$B = \frac{r_p \Delta r}{\Delta t} X_p^0. \quad (3.38)$$

3.6.2 - Volume de controle 1

Devido à condição de simetria, o terceiro termo da Equação (3.31) é zero; então, a equação se torna:

$$A_p X_P + A_e X_E = B, \quad (3.39)$$

com:

$$A_e = -\frac{r_e}{\Delta r} D_e, \quad (3.40)$$

$$A_p = \frac{r_p - \Delta r}{\Delta t} + \frac{r_e}{\Delta r} D_e + \frac{r_w}{\Delta r} D_w, \quad (3.41)$$

$$B = \frac{r_p \Delta r}{\Delta t} X_p^0. \quad (3.42)$$

3.6.3 - Volume de controle N

Para o volume de controle N, a Equação (3.32) é dada da seguinte forma:

$$\left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_e = \frac{X_b - X_p}{\Delta r/2}, \quad (3.43)$$

onde X_b é o valor de X na superfície. Neste caso, o subscrito “e” é coincidente com “b”. Por outro lado, a condição de contorno do terceiro tipo, para um cilindro infinito, é expressa pela seguinte equação:

$$-D_e \left. \frac{\partial X}{\partial r} \right|_e = h(X_b - X_\infty), \quad (3.44)$$

em que X_b é o teor de umidade no contorno leste. A Equação (3.44) ainda pode ser escrita na forma discretizada, do seguinte modo:

$$D_e \frac{(X_b - X_p)}{\Delta r/2} = h(X_\infty - X_b). \quad (3.45)$$

A Equação (3.45) pode ser utilizada para expressar X_b que é o valor da variável no contorno leste como segue:

$$X_b = \frac{D_e X_p + \frac{h \Delta r X_\infty}{2}}{D_e + \frac{h \Delta r}{2}}. \quad (3.46)$$

Substituindo a Equação (3.46) na Equação (3.44) e o resultado na equação (3.31), para o volume de controle no contorno tem-se, ao final:

$$A_w X_w + A_p X_p = B, \quad (3.47)$$

em que:

$$A_p = \frac{r_p \Delta r}{\Delta t} + \frac{r_e D_e}{\frac{D_e}{h} + \frac{\Delta r}{2}} + \frac{r_w}{\Delta r} D_w, \quad (3.48)$$

$$A_w = -\frac{r_w}{\Delta r} D_w, \quad (3.49)$$

$$B = \frac{r_p \Delta r}{\Delta t} X_p^0 + \frac{r_e D_e}{\frac{D_e}{h} + \frac{\Delta r}{2}} X_\infty. \quad (3.50)$$

3.6.4 - Otimizador para a solução numérica da equação de difusão

Para determinar os parâmetros D e h por otimização, a função objetivo foi definida pelo qui-quadrado referente ao ajuste da curva simulada aos dados experimentais da cinética do processo. A expressão para o qui-quadrado envolvendo o ajuste de uma curva simulada aos dados experimentais é dada por (SILVA, 2010):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} [\bar{X}_i^{\text{exp}} - \bar{X}_i^{\text{sim}}]^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (3.51)$$

onde \bar{X}_i^{exp} é o teor de umidade médio para o i -ésimo ponto experimental, \bar{X}_i^{sim} é o correspondente valor simulado para o i -ésimo ponto experimental, N_p é o número de pontos experimentais e $\frac{1}{\sigma_i^2}$ é o peso estatístico referente ao i -ésimo ponto. Em geral, na ausência de informações, os pesos estatísticos são feitos iguais a 1 para todos os pontos. Na Equação (3.51), o qui-quadrado depende de \bar{X}_i^{sim} , que depende de D e h .

De forma geral, a difusividade efetiva D pode ser calculada a partir da relação entre tal parâmetro e X , expresso pela seguinte função:

$$D = f(X, a, b) \quad (3.52)$$

onde “a” e “b” são parâmetros que ajustam a solução numérica aos dados experimentais, e juntamente com h , podem ser determinados por otimização.

Considerando o valor de h constante e a difusividade efetiva dada pela Equação (3.52), os parâmetros de processo podem ser determinados através da minimização da

função objetivo, a qual é realizada em ciclos envolvendo os seguintes passos (SILVA et al., 2012):

Passo 1: Informar os valores iniciais para os parâmetros “a”, “b” e “h”. Resolver a equação de difusão e determinar o qui-quadrado;

Passo 2: Informar o valor para a correção de “h”;

Passo 3: Corrigir o parâmetro “h”, mantendo os parâmetros “a” e “b” com valores constantes. Resolver a equação de difusão e calcular o qui-quadrado;

Passo 4: Comparar o valor mais recente calculado para o qui-quadrado com o valor prévio. Se o valor mais recente for menor, retorne ao passo 2; caso contrário, diminua a última correção do valor de “h” e vá para o passo 5;

Passo 5: Informar o valor para a correção de “a”;

Passo 6: Corrigir o parâmetro “a”, mantendo os parâmetros “b” e “h” com valores constantes. Resolver a equação de difusão e calcular o qui-quadrado;

Passo 7: Comparar o valor mais recente calculado para o qui-quadrado com o valor prévio. Se o valor mais recente for menor, retorne ao passo 5; caso contrário, diminua a última correção do valor de “a” e vá para o passo 8;

Passo 8: Informar o valor para a correção de “b”;

Passo 9: Corrigir o parâmetro “b”, mantendo os parâmetros “a” e “h” com valores constantes. Resolver a equação de difusão e calcular o qui-quadrado;

Passo 10: Comparar o valor mais recente calculado para o qui-quadrado com o valor prévio. Se o valor mais recente for menor, retorne ao passo 8; caso contrário, diminua a última correção do valor de “b” e vá para o passo 11;

Passo 11: Começar um novo ciclo indo de volta para o passo 2 até que a convergência estipulada para os parâmetros “a”, “b” e “h” seja atingida.

Em cada ciclo, o valor da correção de cada parâmetro pode ser inicialmente simples, compatível com a tolerância de convergência imposta ao problema. Então, para um dado ciclo, em cada retorno aos passos 2, 5 ou 8, os valores das novas correções podem ser multiplicados pelo fator 2. Se a correção inicialmente informada não minimiza a função objetivo, no próximo ciclo seu valor pode ser multiplicado pelo fator -1. No entanto, para o caso da condição de contorno de equilíbrio, os passos iniciais deixam de existir na ordem pré-estabelecida, devido a D ser o único parâmetro a ser determinado neste modelo. Os valores iniciais para os parâmetros podem ser estimados através de valores obtidos para produtos similares disponíveis na literatura, ou através de alguma correlação empírica.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados referentes aos estudos experimental e teórico do processo de secagem contínua e intermitente do arroz em coordenadas cilíndricas. Inicialmente, apresentamos os resultados experimentais da secagem contínua e intermitente obtidos para a descrição da cinética de secagem usando modelos empíricos. Em seguida, são utilizados os modelos de difusão para descrever tais processos. Além de descrever os problemas de difusão usando soluções analíticas, também foi utilizada uma solução numérica. Tais metodologias são empregadas para determinar a condição de contorno apropriada durante a secagem do arroz, estabelecer valores ótimos para a difusividade efetiva de massa e simular a distribuição de umidade no interior do grão de arroz.

4.1 - Condições ambientais e do ar de secagem

São evidenciadas na Tabela 4.1 as condições do ar ambiente e do ar de secagem durante o período dos experimentos de secagem contínua e intermitente dos grãos de arroz para as temperaturas de 50 e 70°C, incluindo informações referentes à secagem do arroz, tais como teor de umidade inicial e de equilíbrio. Em todos os casos de intermitência, ou seja, com tempo de permanência dentro (t_{in}) e fora (t_{out}) do secador, o período de temperatura ocorreu em temperatura ambiente. No estudo dos processos de secagem, foi considerado o tempo de operação efetiva de secagem, isto é, o período em que o material estava dentro do secador.

Tabela 4.1 - Informações sobre a temperatura e velocidade do ar de secagem, temperatura e umidade relativa do ar ambiente, tempo de secagem, teor de umidade inicial e de equilíbrio do arroz para cada experimento de secagem.

| Secagem | Ar de secagem | | Ar ambiente | | Arroz | |
|----------------|---------------|------------------------|---------------------|--------|-----------------------|------------------------|
| | T (°C) | v (m s ⁻¹) | T _a (°C) | UR (%) | X _i (b.s.) | X _{eq} (b.s.) |
| E ₁ | 50,0 | 1,0 | 26,5 | 60,4 | 0,2756 | 0,0726 |
| E ₂ | 50,0 | 1,0 | 27,4 | 60,3 | 0,2808 | 0,0843 |
| E ₃ | 50,0 | 1,0 | 27,3 | 59,5 | 0,2766 | 0,0468 |
| E ₄ | 70,0 | 1,0 | 27,2 | 60,1 | 0,2688 | 0,0369 |
| E ₅ | 70,0 | 1,0 | 27,8 | 59,4 | 0,2759 | 0,0536 |
| E ₆ | 70,0 | 1,0 | 28,1 | 59,4 | 0,2716 | 0,0215 |

Conforme descrito na metodologia, foram obtidos os valores médios das dimensões de 50 grãos de arroz em casca *in natura*. As dimensões da geometria são mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Dimensões médias do grão de arroz em casca *in natura*.

| Espessura (mm) | Largura (mm) | Comprimento (mm) | Raio médio (mm) |
|----------------|--------------|------------------|-----------------|
| 2,17 | 3,32 | 9,56 | 1,37 |

4.2 - Cinética de secagem

A metodologia utilizada para os experimentos de secagem e obtenção dos pontos experimentais foi descrita no capítulo 3, na seção 3.3. Os resultados obtidos para as razões de umidade adimensional (\bar{X}^*) em função do tempo, incluindo os pontos experimentais do período de têmpera para as secagens intermitentes, são apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2. Os dados obtidos para as razões de umidade são revelados em Apêndice, bem como nas Tabelas A1 até A6.

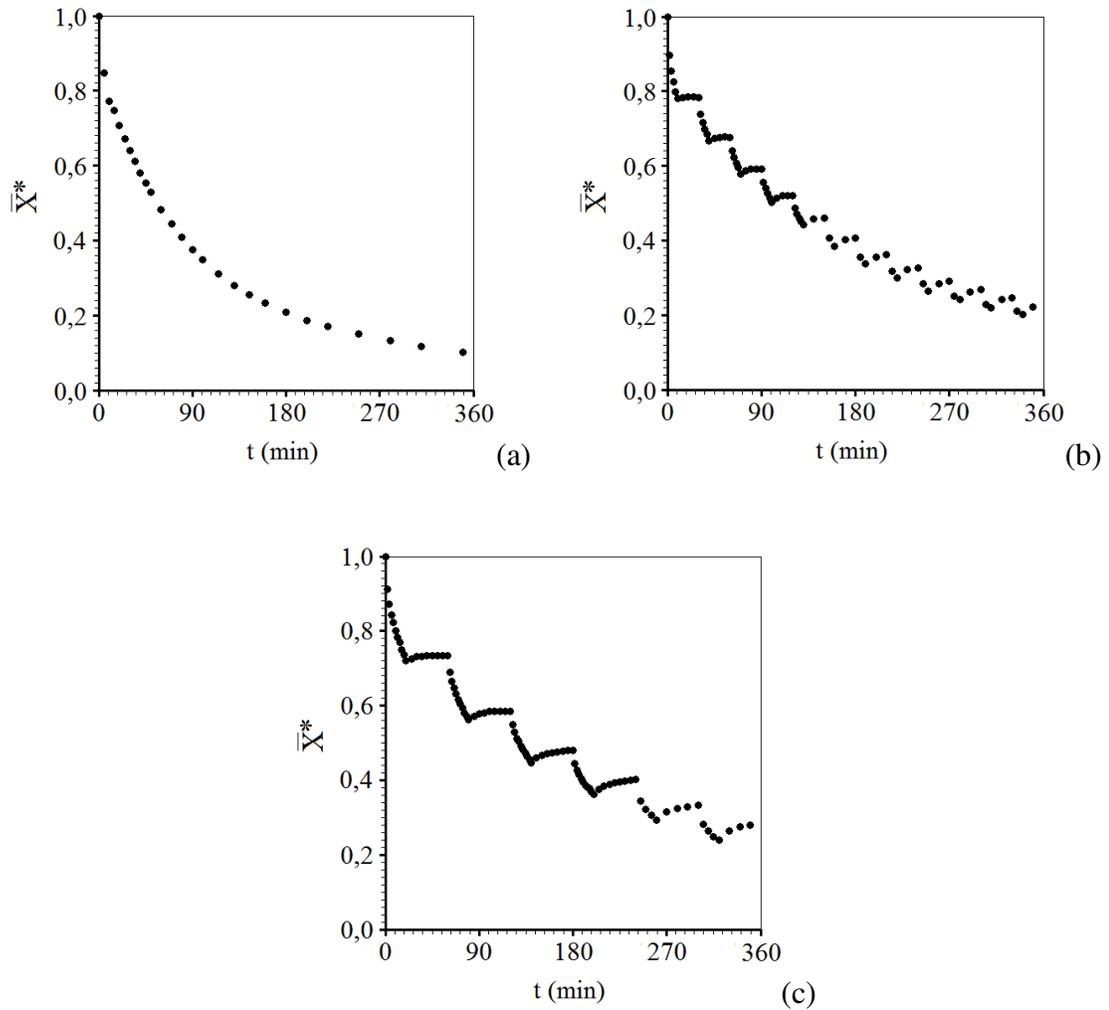


Figura 4.1 - Conjunto de dados experimentais para os processos de secagem com temperatura do ar de secagem de 50°C: contínua (a); intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c).

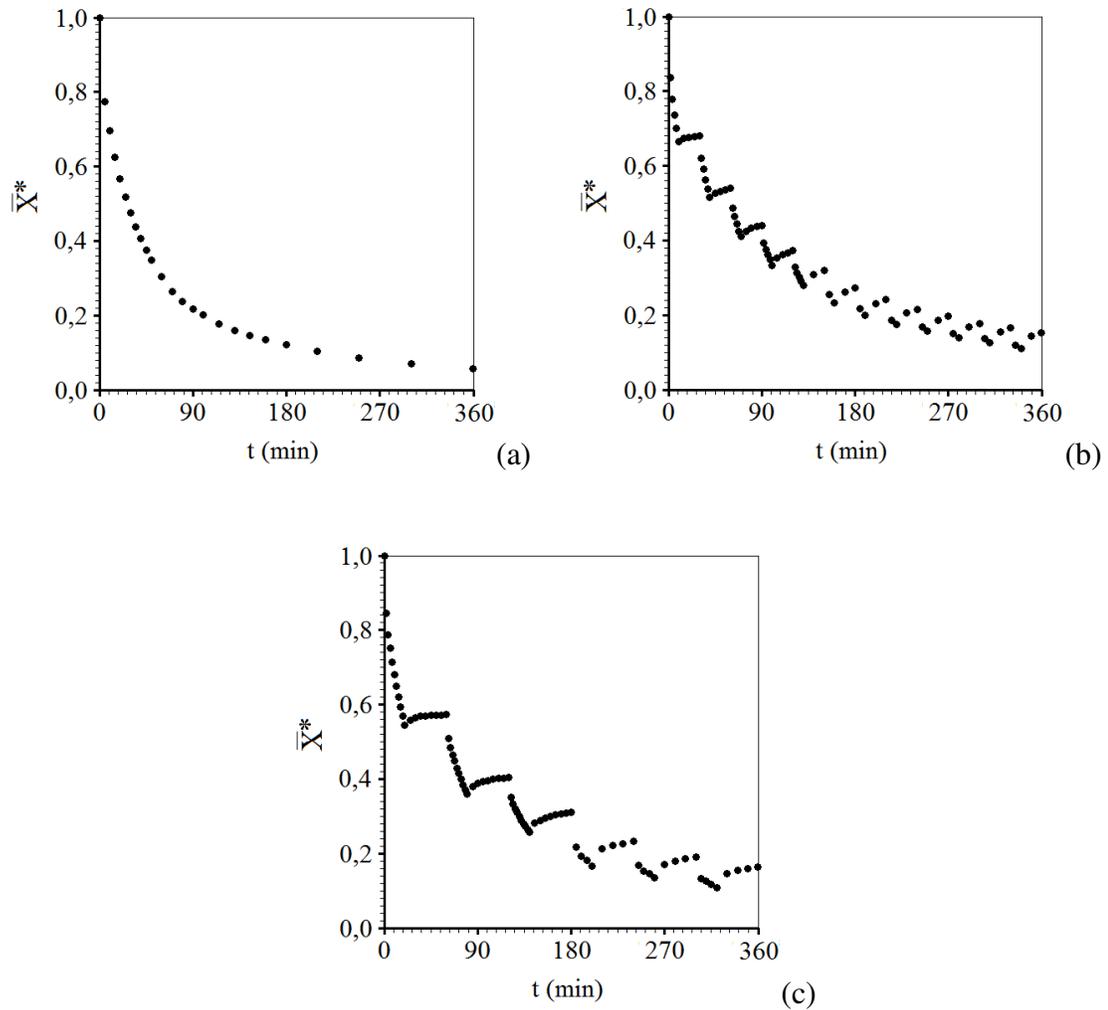


Figura 4.2 - Conjunto de dados experimentais para os processos de secagem com temperatura do ar de secagem de 70°C: contínua (a); intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c).

As Figuras 4.3 e 4.4 manifestam as razões de umidade adimensional em função do tempo, considerando apenas o tempo de operação efetiva, em que o período de têmpera foi eliminado. Os processos de secagem foram acompanhados até o ponto de equilíbrio higroscópico ($\bar{X}^* = 0,01$).

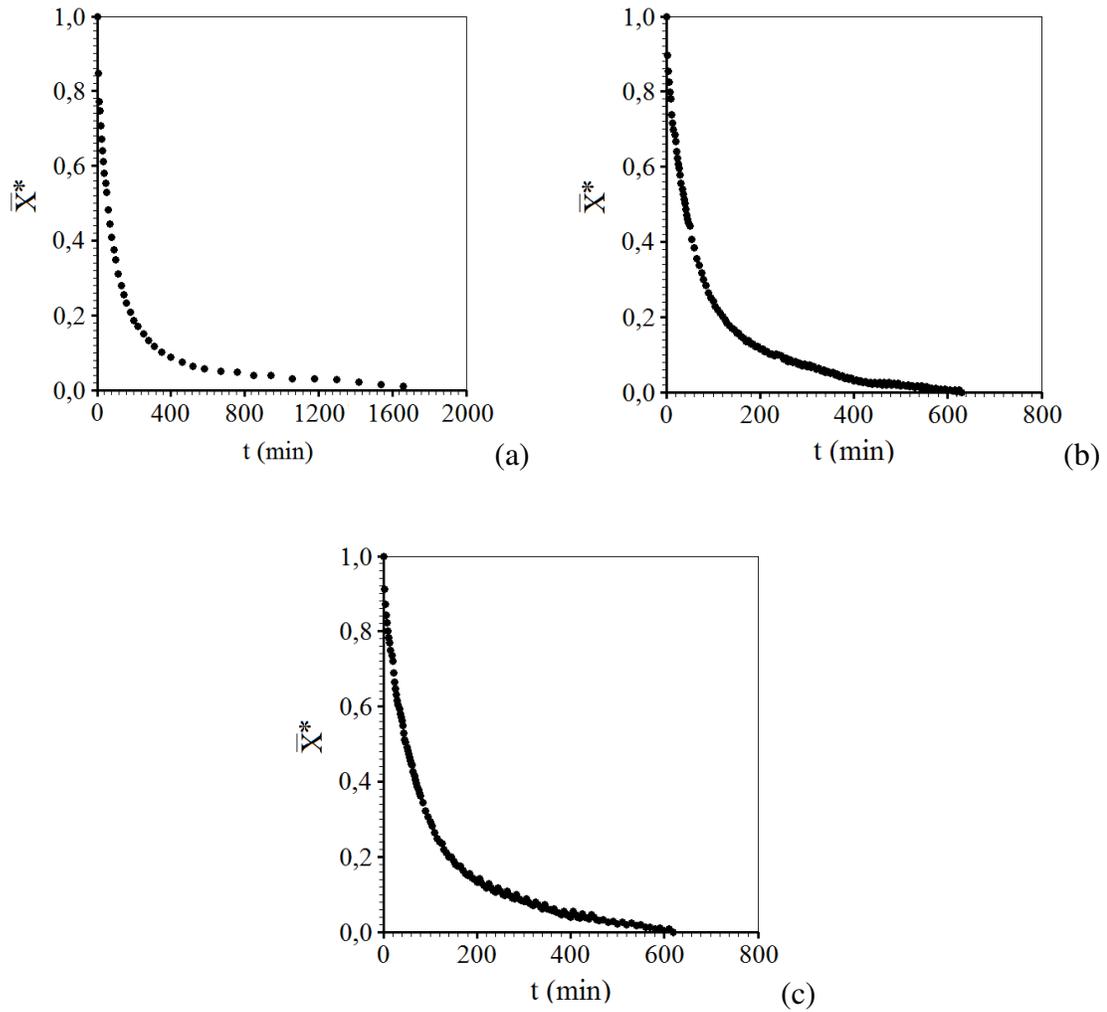


Figura 4.3 - Razão de umidade para a temperatura do ar de secagem de 50°C: Secagem contínua (a); secagem intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c).

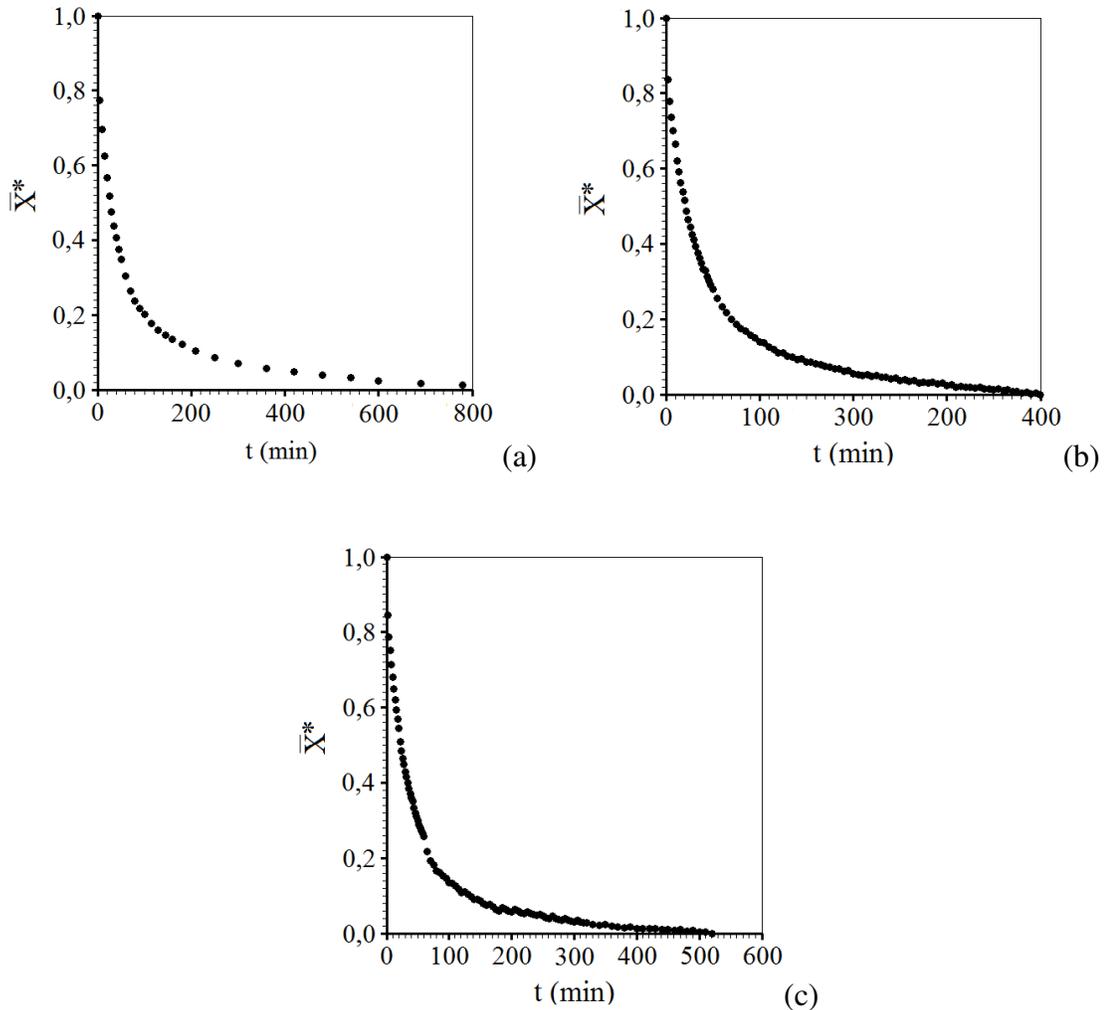


Figura 4.4 - Razão de umidade para a temperatura do ar de secagem de 70°C: Secagem contínua (a); secagem intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c).

Observa-se nas Figuras 4.1 e 4.2 que houve uma reabsorção de umidade nos processos de secagem intermitente durante o período de têmpera (t_{out}), que ocorreu devido ao repouso das amostras terem sido realizados em um recipiente fechado fora do secador, exposto às condições ambientais; o grão de arroz é altamente higroscópico e busca o equilíbrio com o ambiente.

Mesmo ocorrendo ganho de umidade durante o período de têmpera, quando as amostras adentraram novamente no secador para o período de secagem (t_{in}), esse teor de umidade logo foi compensado nos primeiros instantes de secagem. Tal fato pode ser explicado devido à evaporação da umidade superficial ocorrer de forma mais fácil, enquanto a difusão de umidade no interior para a superfície do grão ocorre de forma mais

lenta.

Analisando as Figuras 4.3 e 4.4, a partir das cinéticas de secagem contínua, foi possível observar que o teor de umidade diminuiu mais rapidamente com o aumento da temperatura de 50 para 70°C, fato normalmente observado em vários produtos agrícolas (ABASI et al., 2009; COSTA et al., 2011; SANTOS e OLIVEIRA, 2013; MARTINS et al., 2018). No entanto, aplicando-se a técnica de secagem intermitente, o tempo total de secagem foi consideravelmente reduzido quando comparado com a secagem contínua, para as duas temperaturas estudadas, o que indica que a técnica de secagem intermitente é mais eficiente no aspecto de redução no tempo de secagem e, conseqüentemente, economia energética, haja vista que os processos que utilizam a temperatura de 70°C apresentam tempos de secagem ainda menores. Neste caso, pode-se atribuir a redução do tempo de secagem não apenas ao aumento da temperatura do ar de secagem, mas também, a intermitência durante o processo de secagem dos grãos de arroz.

Portanto, mesmo ocorrendo absorção de umidade durante o período de têmpera, as secagens intermitentes ainda ocorreram de forma mais rápida que a contínua, devido a melhor distribuição de umidade no interior do grão durante o período de têmpera.

4.3 - Descrição das cinéticas de secagem utilizando modelos empíricos

A presente seção apresenta os resultados obtidos na descrição da cinética de secagem contínua e intermitente dos grãos de arroz em casca utilizando diferentes modelos empíricos. Para a secagem intermitente, foi analisado apenas o tempo em que os grãos de arroz permaneceram dentro do secador, eliminando o período de têmpera.

4.3.1 - Secagem contínua

Para obter o ajuste matemático das curvas de secagem aos dados experimentais dos grãos de arroz em casca, foi utilizado o programa computacional *LAB Fit Curve Fitting Software* (SILVA e SILVA, 2009a). Para avaliar a qualidade dos ajustes dos diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais, utilizou-se como indicadores estatísticos de ajuste a análise do coeficiente de determinação (R^2) e o qui-quadrado (χ^2). Nas Tabelas 4.3 a 4.5 são apresentados os parâmetros de ajuste dos modelos de Henderson e Pabis, Lewis,

Page, Peleg, Silva et alii e Wang e Singh aos dados da cinética de secagem dos grãos de arroz e seus respectivos coeficientes de determinação e qui-quadrado.

Tabela 4.3 - Resultados dos modelos empíricos para secagem contínua nas temperaturas de 50 e 70°C.

| Modelos | T (°C) | Parâmetros | | R ² | χ ² |
|-------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|----------------|-------------------------|
| | | a | b | | |
| Henderson e Pabis | 50 | 0,8580 | 0,8584 x 10 ⁻² | 0,976366 | 0,4412x10 ⁻¹ |
| | 70 | 0,8351 | 0,1587x10 ⁻¹ | 0,960002 | 0,7726x10 ⁻¹ |
| Lewis | 50 | 0,1106 x 10 ⁻¹ | - | 0,988969 | 0,1287 |
| | 70 | 0,2100 x 10 ⁻¹ | - | 0,981073 | 0,1440 |
| Page | 50 | 0,4736x10 ⁻¹ | 0,6704 | 0,998382 | 0,2720x10 ⁻² |
| | 70 | 0,9616x10 ⁻¹ | 0,6050 | 0,997275 | 0,4174x10 ⁻² |
| Peleg | 50 | 0,5405x10 ² | 0,9692 | 0,993470 | 0,1352x10 ⁻¹ |
| | 70 | 0,2588x10 ² | 0,9947 | 0,996409 | 0,5991x10 ⁻² |
| Silva et alii | 50 | 0,3873x10 ⁻² | 0,6339x10 ⁻¹ | 0,998172 | 0,3063x10 ⁻² |
| | 70 | 0,3911x10 ⁻² | 0,1155 | 0,995077 | 0,7497x10 ⁻² |
| Wang e Singh | 50 | -0,7967x10 ⁻² | 0,1679x10 ⁻⁴ | 0,948383 | 0,2788 |
| | 70 | -0,1002x10 ⁻¹ | 0,2260x10 ⁻⁴ | 0,847930 | 0,8101 |

Os gráficos que representam a cinética de secagem contínua, descrita pelas equações de Henderson e Pabis, Lewis, Page, Peleg, Silva et alii e Wang e Singh, são apresentados na Figura 4.5, a qual traz o conjunto de dados experimentais (pontos) assim como os resultados obtidos com as simulações dos modelos (linhas contínuas). Observa-se, através dos indicadores estatísticos da Tabela 4.3 e da visualização das Figuras 4.5 e 4.6, que os modelos de Page, Peleg e Silva et alii foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais, podendo ser utilizados na predição da cinética de secagem dos grãos de arroz em casca, com destaque para o modelo de Page, que apresentou maior coeficiente de determinação e menor qui-quadrado em ambas as temperaturas.

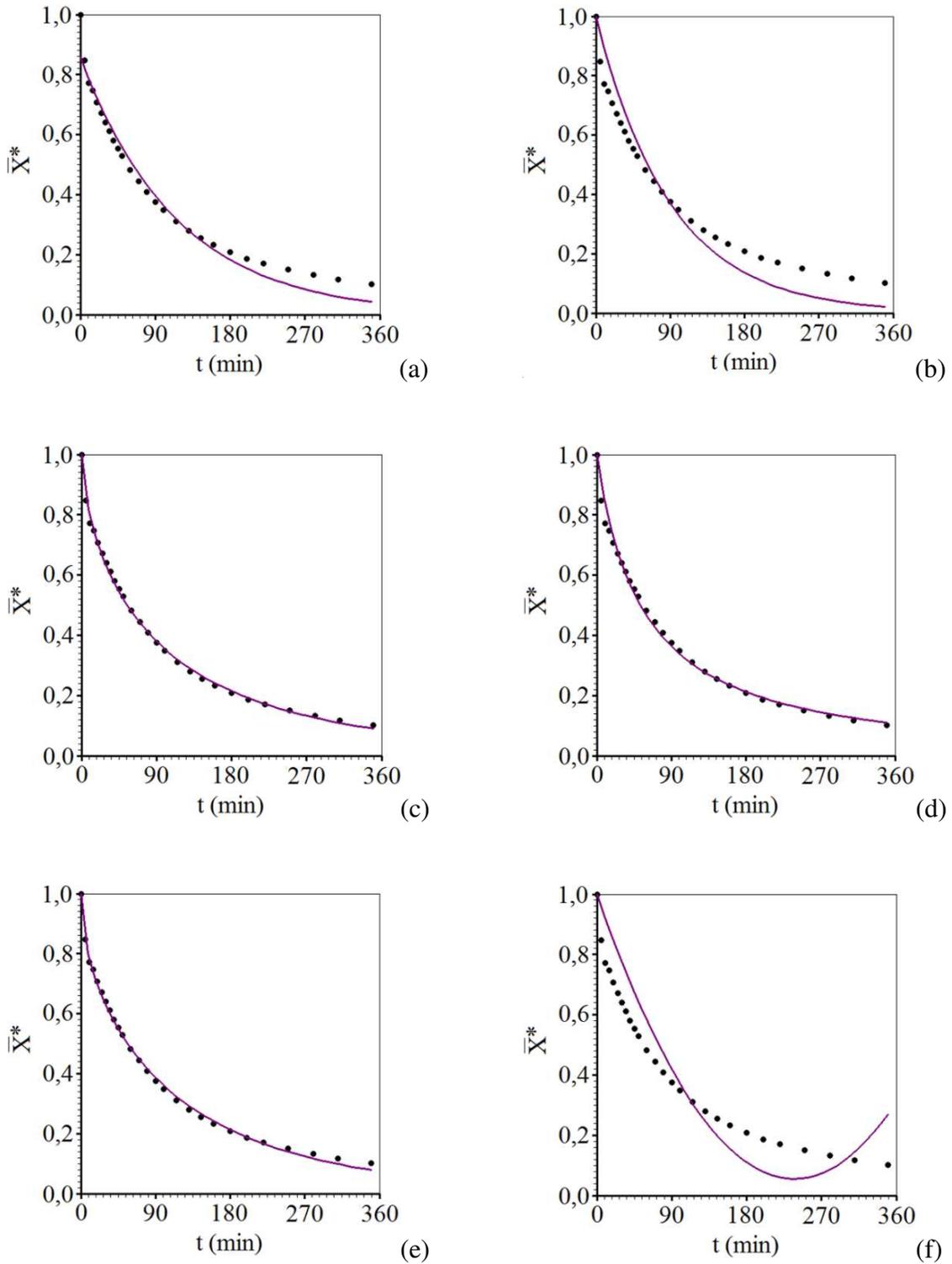


Figura 4.5 - Cinética de secagem contínua para a temperatura do ar de secagem de 50°C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Peleg (d); Silva et alii (e) e Wang e Singh (f).

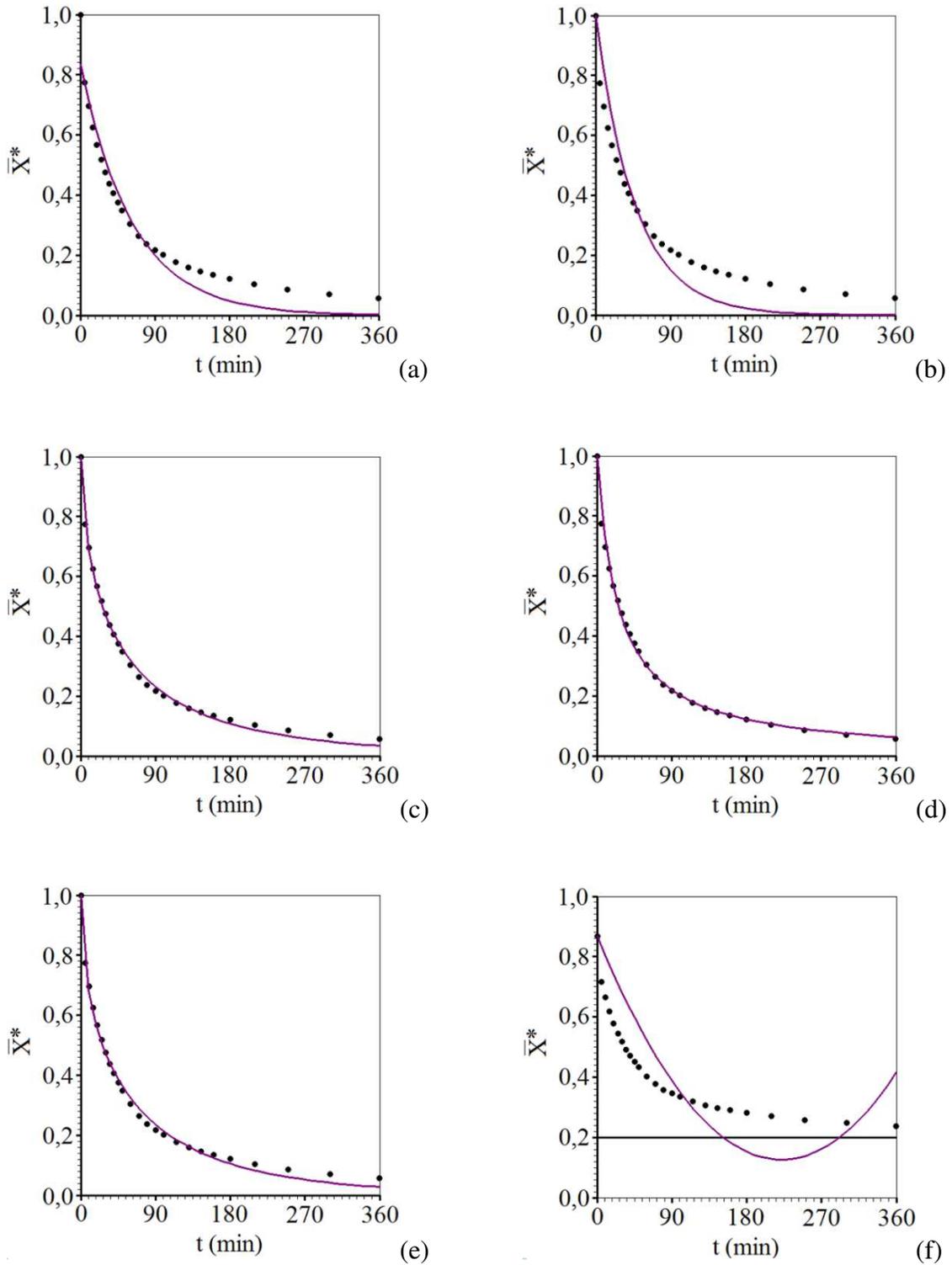


Figura 4.6 - Cinética de secagem contínua para a temperatura do ar de secagem de 70°C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Peleg (d); Silva et alii (e) e Wang e Singh (f).

O modelo de Page é, geralmente, utilizado com sucesso na descrição da cinética de secagem de vários produtos agrícolas. Moraes et al. (2013), Santos e Oliveira (2013) e Diógenes et al., (2013) também utilizaram o modelo de Page para descrever a secagem contínua de grãos de feijão, arroz e abóbora, respectivamente. Nestes experimentos, verificaram também coeficientes de determinação superiores a 0,99. Na secagem contínua, os modelos empíricos conseguem descrever bem o processo, no entanto, não descrevem muito bem o período de relaxamento da secagem intermitente. Por outro lado, considerando-se apenas o tempo de operação efetiva, modelos empíricos permitem extrair várias informações sobre a cinética de secagem (RODRIGUES, 2015). Ainda nas Figuras 4.5 e 4.6, pode-se observar um completo acordo entre o modelo de Page e os dados experimentais obtidos neste trabalho durante o processo de secagem.

4.3.2 - Secagem intermitente

A seguir serão apresentados os resultados dos ajustes matemáticos das curvas para as secagens intermitentes dos grãos de arroz em casca para as temperaturas de 50 e 70°C. De acordo com os melhores indicadores estatísticos, obtidos pelas equações empíricas para descrever a cinética de secagem contínua, foram utilizados os modelos de Page, Peleg e Silva et alii para descrever o processo de secagem intermitente, nos quais o período de têmpera foi eliminado.

4.3.2.1 - Intermitente com $t_{in} = 10$ min

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros de ajuste dos modelos empíricos selecionados para a secagem intermitente dos grãos de arroz com tempo de permanência dentro do secador $t_{in} = 10$ min, nas temperaturas de 50 e 70°C.

Tabela 4.4 - Resultados dos modelos empíricos para secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min, nas temperaturas de 50 e 70°C.

| Modelos | T (°C) | Parâmetros | | R ² | χ^2 |
|---------------|--------|-------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|
| | | a | b | | |
| Page | 50 | $0,5338 \times 10^{-1}$ | 0,7000 | 0,997644 | $0,1383 \times 10^{-1}$ |
| | 70 | 0,1009 | 0,6404 | 0,998749 | $0,5948 \times 10^{-2}$ |
| Peleg | 50 | $0,3997 \times 10^{-2}$ | 0,9361 | 0,997334 | $0,1685 \times 10^{-1}$ |
| | 70 | $0,2114 \times 10^{-2}$ | 0,9558 | 0,997417 | $0,1407 \times 10^{-1}$ |
| Silva et alii | 50 | $0,5938 \times 10^{-2}$ | $0,7226 \times 10^{-1}$ | 0,995575 | $0,2670 \times 10^{-1}$ |
| | 70 | $0,6753 \times 10^{-2}$ | 0,1236 | 0,997059 | $0,1454 \times 10^{-1}$ |

As cinéticas de secagem dos grãos de arroz juntamente com os dados experimentais referentes às temperaturas de 50 e 70°C são mostradas nas Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.

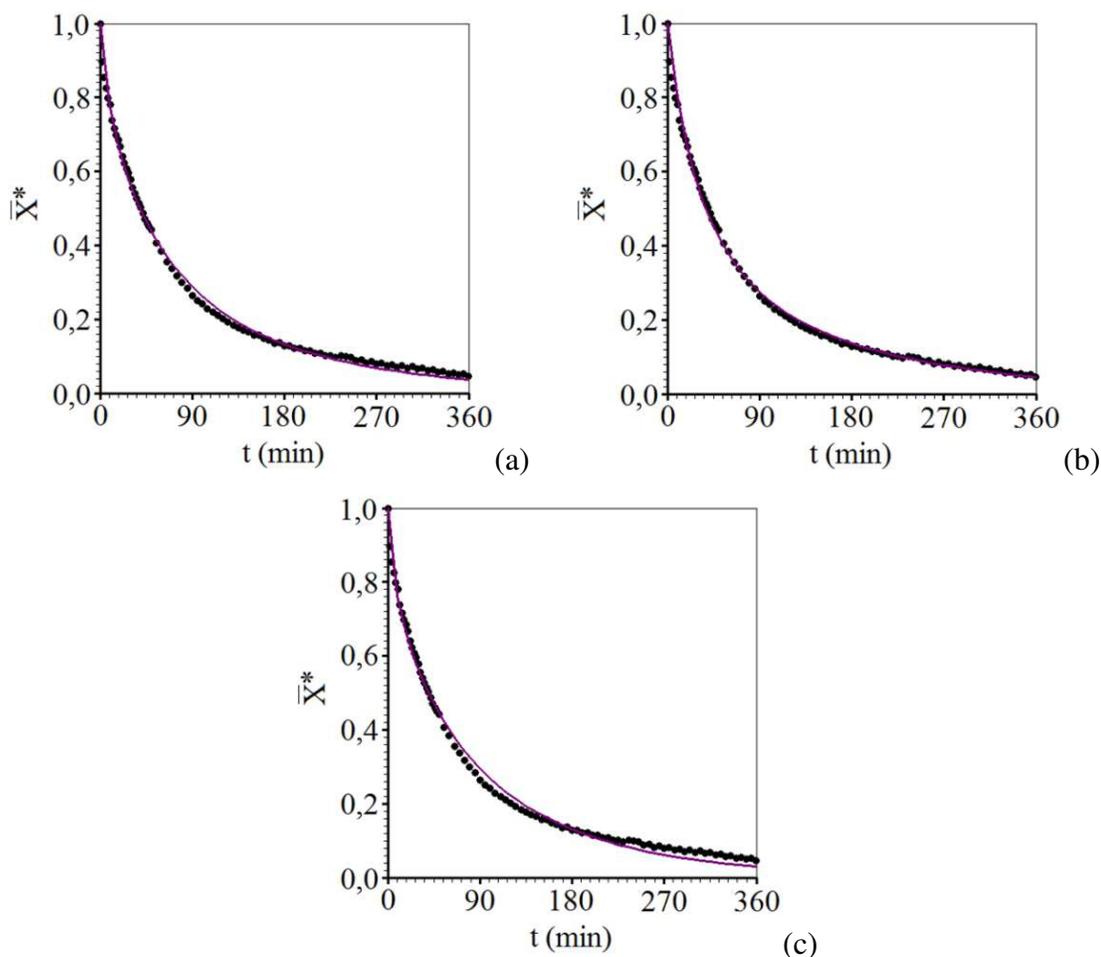


Figura 4.7 - Cinética de secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min para a temperatura do ar de secagem de 50°C, descrita pelas equações empíricas: Page (a), Peleg (b) e Silva et alii (c).

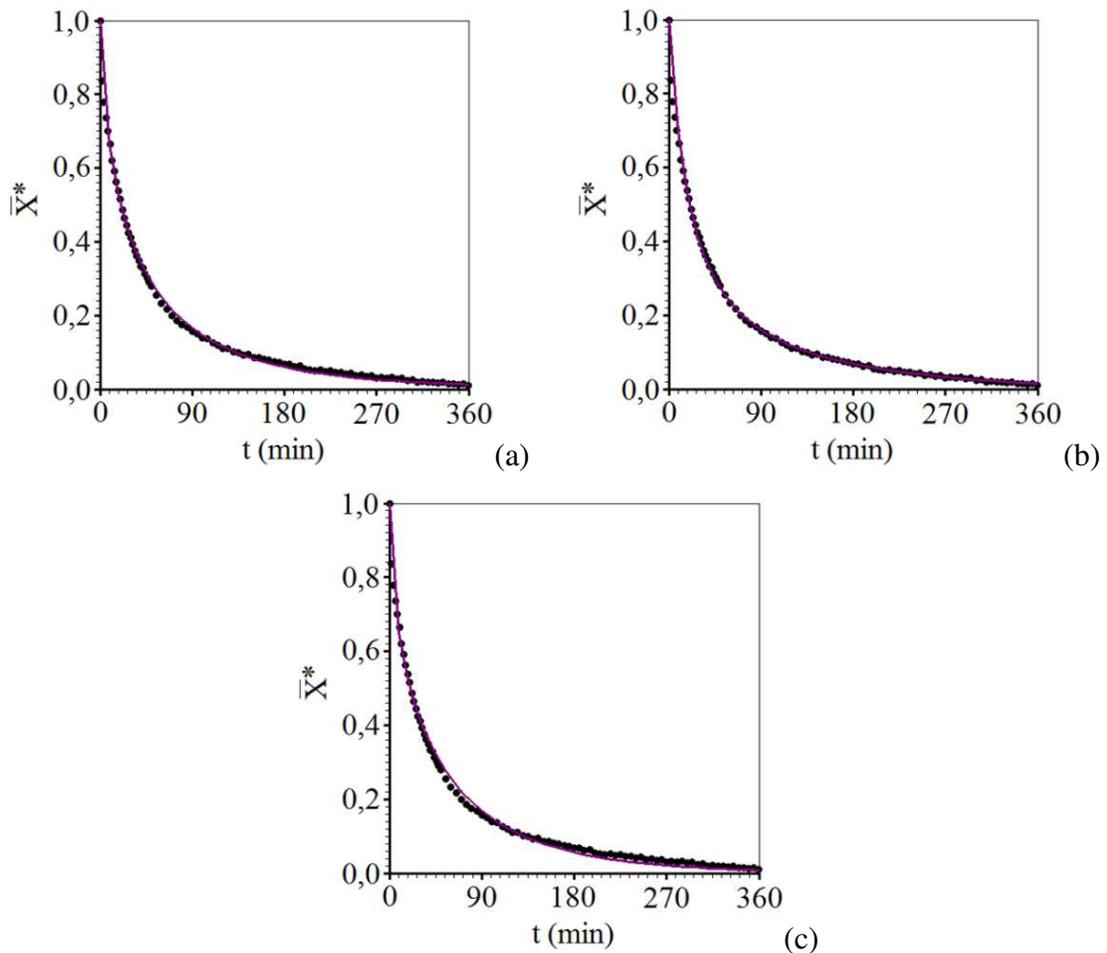


Figura 4.8 - Cinética de secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min para a temperatura do ar de secagem de 70°C , descrita pelas equações empíricas: Page (a), Peleg (b) e Silva et alii (c).

A partir dos parâmetros e indicadores estatísticos identificados na Tabela 4.4 e análise das Figuras 4.7 e 4.8, pode-se afirmar que todos os modelos apresentaram bons ajustes aos dados experimentais da secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min, nas duas temperaturas, podendo ser utilizados para descrever a cinética de secagem intermitente. Assim como ocorrido na secagem contínua, os resultados obtidos para o modelo de Page foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais em ambas as temperaturas.

4.3.2.2 - Intermitente com $t_{in} = 20$ min

A Tabela 4.5 e as Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os parâmetros de ajuste dos modelos empíricos selecionados e as cinéticas para a secagem intermitente dos grãos de

arroz com $t_{in} = 20$ min, nas temperaturas de 50 e 70°C.

Tabela 4.5 - Resultados dos modelos empíricos para secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min, nas temperaturas de 50 e 70°C.

| Modelos | T (°C) | Parâmetros | | R ² | χ^2 |
|---------------|-----------|-------------------------|-------------------------|----------------|-------------------------|
| | | a | b | | |
| Page | 50 | $0,4002 \times 10^{-1}$ | 0,7358 | 0,997988 | $0,1267 \times 10^{-1}$ |
| | 70 | $0,8696 \times 10^{-1}$ | 0,6691 | 0,997248 | $0,1393 \times 10^{-1}$ |
| Peleg | 50 | $0,5095 \times 10^2$ | 0,9140 | 0,997187 | $0,1934 \times 10^{-1}$ |
| | 70 | $0,2301 \times 10^2$ | 0,9494 | 0,995698 | $0,2158 \times 10^{-1}$ |
| Silva et alii | 50 | $0,5995 \times 10^{-2}$ | $0,5662 \times 10^{-1}$ | 0,996481 | $0,2278 \times 10^{-1}$ |
| | 70 | $0,8142 \times 10^{-2}$ | 0,1079 | 0,995543 | $0,2396 \times 10^{-1}$ |

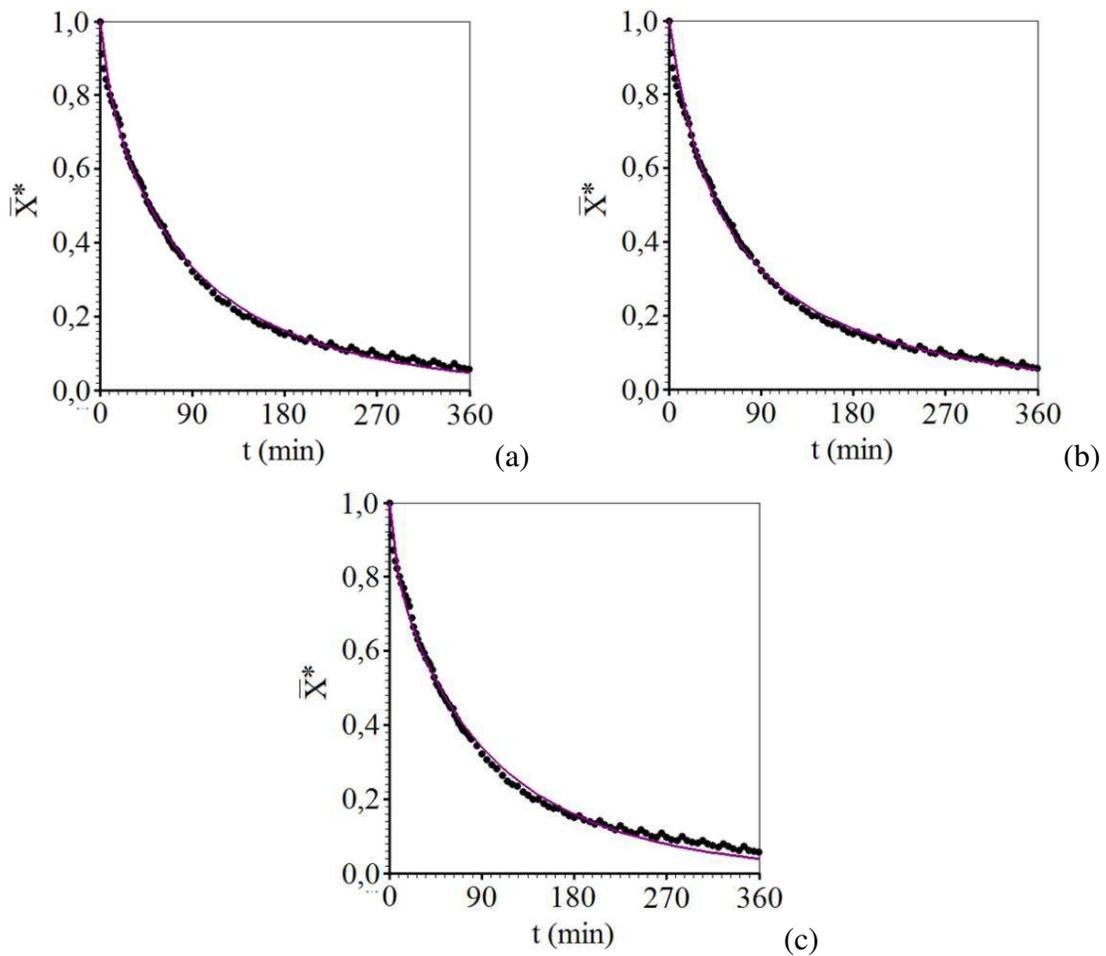


Figura 4.9 - Cinética de secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min para a temperatura do ar de secagem de 50°C, descrita pelas equações empíricas: Page (a), Peleg (b) e Silva et alii (c).

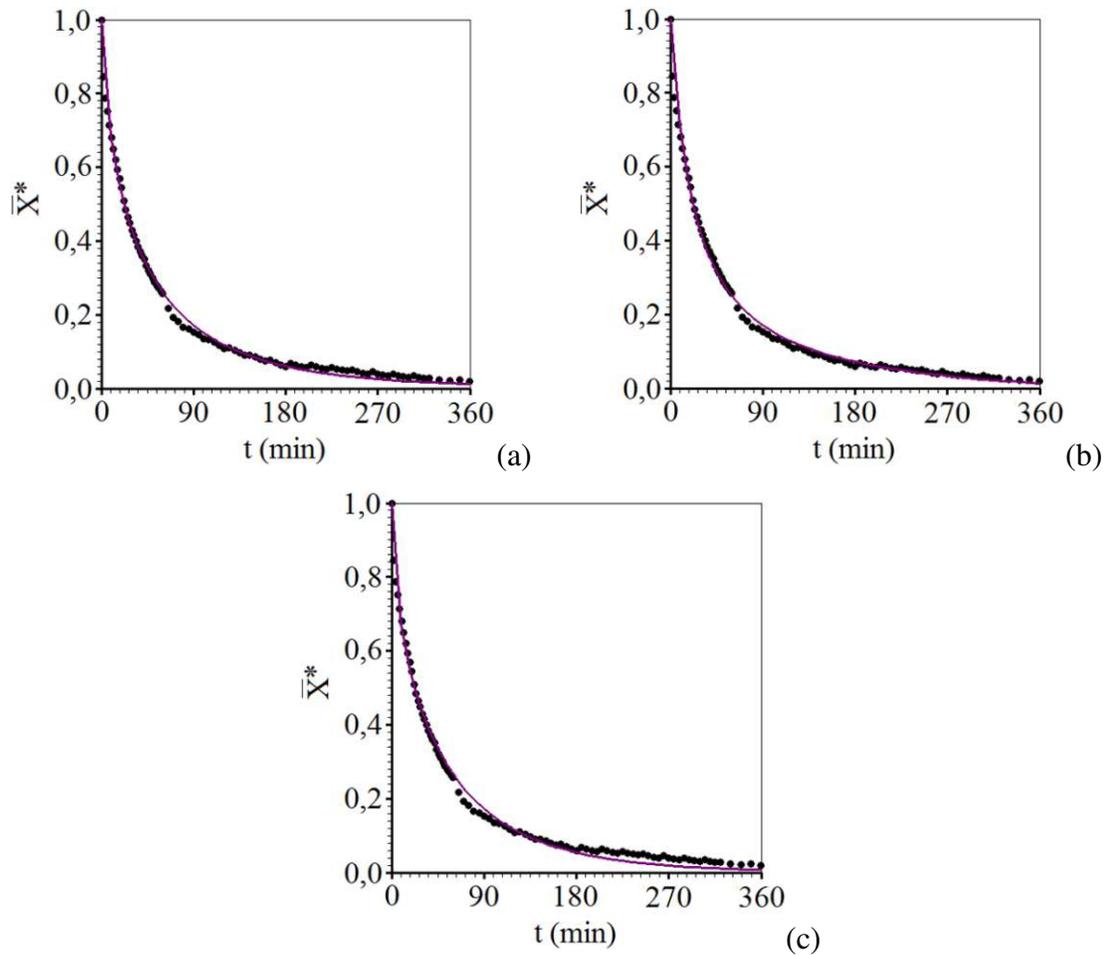


Figura 4.10 - Cinética de secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min para a temperatura do ar de secagem de 70°C , descrita pelas equações empíricas: Page (a), Peleg (b) e Silva et alii (c).

Assim como ocorrido para a secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min, os resultados obtidos indicam que todos os modelos evidenciaram bons ajustes aos dados experimentais da secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min e que, o modelo de Page trouxe os melhores resultados na descrição da cinética de secagem dos grãos de arroz nas temperaturas de 50 e 70°C , conforme pode ser constatado na Tabela 4.5 e também nas Figuras 4.9 e 4.10.

Conforme os resultados obtidos, o modelo de Page mostrou ótimos indicadores estatísticos com boa representatividade entre os dados experimentais e as curvas correspondentes da simulação, para as secagens contínuas e intermitentes, sendo escolhido para representar as cinéticas de secagem dos grãos de arroz.

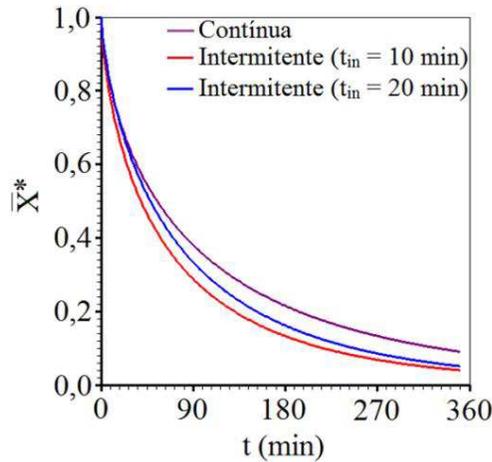


Figura 4.11 - Cinética de todas as secagens de arroz para a temperatura do ar de secagem de 50°C, descrita pela equação de Page.

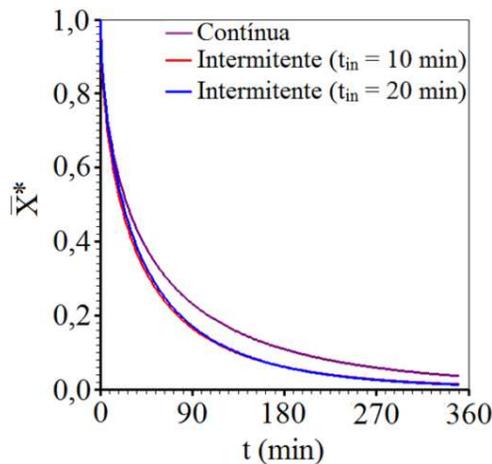


Figura 4.12 - Cinética de todas as secagens de arroz para a temperatura do ar de secagem de 70°C, descrita pela equação de Page.

A fim de se fazer uma comparação com relação aos métodos de secagem contínua e intermitente, nas Figuras 4.11 e 4.12 são apresentadas as simulações das cinéticas de secagem supracitadas, utilizando o modelo de Page, em um mesmo gráfico, para cada temperatura e para cada configuração de secagem utilizada.

A Figura 4.11 mostra que as curvas das duas secagens intermitentes ficaram abaixo da secagem contínua, demonstrando que nas secagens com intermitência, o arroz perdeu mais umidade quando comparada com a secagem contínua durante o mesmo período de tempo com temperatura do ar de secagem de 50°C. Ainda na figura 4.11, nota-se que houve uma diferença significativa entre as curvas das duas secagens intermitentes, em que, a

secagem com $t_{in} = 10$ min apresentou-se ainda melhor que a secagem com $t_{in} = 20$ min. Neste ponto, vale dizer que, embora a razão de intermitência ($\alpha = 2/3$) tenha sido a mesma para as secagens intermitentes, a redução do período de permanência dentro e fora do secador acarretou a diminuição do tempo de processo para a temperatura do ar de secagem a 50°C . Recentemente, Galvão (2017) realizou experimentos de secagem contínua e intermitente de maçã com razão de intermitência $\alpha = 2/3$. Observou-se que, considerando apenas o tempo efetivo de operação, a cinética da secagem intermitente com relação $t_{in} = 15$ min e $t_{out} = 30$ min, apresentaram melhores resultados comparados com relações de intermitências maiores, $t_{in} = 30$ min, $t_{out} = 60$ min e $t_{in} = 60$ min, $t_{out} = 120$ min.

Na Figura 4.12, assim como ocorrido nas secagens com temperatura de 50°C , observou-se comportamento semelhante quando comparada a secagem contínua com as intermitentes a 70°C , demonstrando redução no tempo de secagem com aplicação da intermitência. Porém, as duas secagens intermitentes produziram efeito semelhante na cinética de secagem, evidenciando a viabilidade do uso da secagem intermitente do arroz em casca com razão de intermitência $\alpha = 2/3$ para as temperaturas de 50 e 70°C . Trabalhos reportados na literatura também comprovaram a redução do tempo de operação efetiva de secagem quando se utilizou uma razão de intermitência de $\alpha = 2/3$ (AQUERRETA et al., 2007; HOLOWATY et al., 2012).

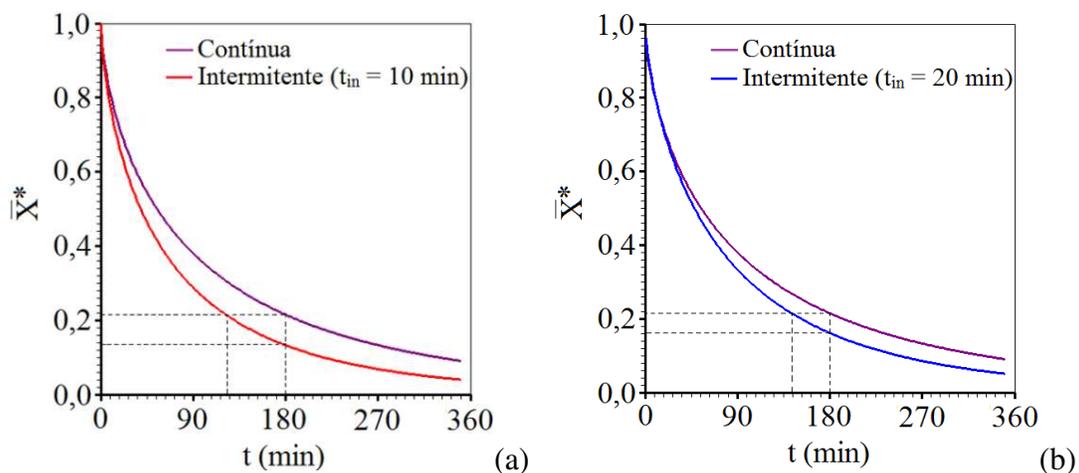


Figura 4.13 - Comparação entre os resultados obtidos na cinética de secagem do arroz para a temperatura do ar de secagem de 50°C , descrita pela equação de Page: contínua e intermitente com $t_{in} = 10$ min (a); contínua e intermitente com $t_{in} = 20$ min (b).

Com o objetivo de fazer uma comparação mais precisa entre os métodos de secagem contínua e intermitente em relação ao tempo de secagem, utilizando-se o modelo de Page, as Figuras 4.13 e 4.14 apresentam em um mesmo gráfico, para cada temperatura, e para a configuração da secagem intermitente, suas respectivas cinéticas.

Analisando a Figura 4.13 (a), verificou-se que o tempo necessário para o arroz atingir a razão de umidade de aproximadamente 0,22 foi de 180 minutos para a secagem contínua e de 125 minutos para a secagem intermitente ($t_{in} = 10$ min), ou seja, tem-se uma economia de tempo de quase 55 minutos, o que corresponde a uma redução de 30,6% no tempo de secagem. Este efeito é responsável por acelerar o processo de secagem e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia utilizada no processo. Cihan e Ece (2001) em sua pesquisa de secagem de arroz mostraram como resultados que o tempo de secagem com o método intermitente, foi 48% menor que o da secagem contínua, para o mesmo teor de umidade. Na Figura 4.13 (b), observa-se a comparação entre as cinéticas de secagem contínua e intermitente ($t_{in} = 20$ min) em que, para atingir a razão de umidade de 0,22, a secagem intermitente levou 144 minutos, ou seja, tem-se uma economia de tempo de quase 36 minutos, quando comparada com a secagem contínua, que corresponde a uma redução de 20% no tempo de secagem. Com isso, torna-se evidente que a razão de intermitência adotada acelera o processo de secagem.

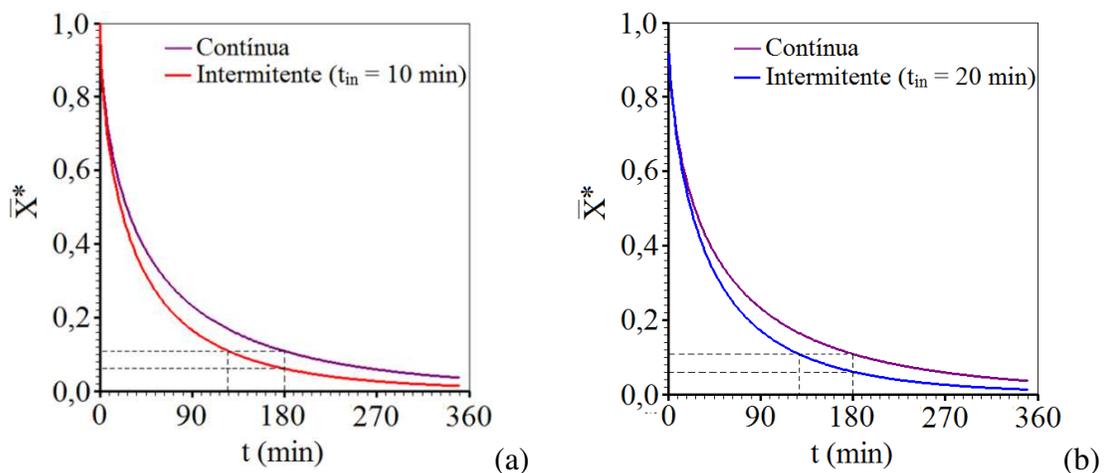


Figura 4.14 - Comparação entre os resultados obtidos na cinética de secagem do arroz para a temperatura do ar de secagem de 70°C, descrita pela equação de Page: contínua e intermitente com $t_{in} = 10$ min (a); contínua e intermitente com $t_{in} = 20$ min (b).

A Figura 4.14, mostra que a cinética da secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min, considerando-se apenas o tempo efetivo de operação, está em consonância com a cinética da secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min para 70 °C, e, portanto nesse caso, as secagens intermitentes produzem efeito semelhante e consideravelmente melhor no aspecto de economia de energia, comparadas à secagem contínua. Ainda, é possível observar que a razão de umidade diminuiu mais rápido com o aumento da temperatura de 50 para 70 °C.

4.3.3 - Taxas de secagem

A taxa de secagem possibilita quantificar o ganho na rapidez do processo contínuo e intermitente de secagem. Para obter as taxas de secagem através dos modelos empíricos, utilizaram-se as equações referentes à Tabela 3.3 ajustados aos dados experimentais das secagens dos grãos de arroz para cada temperatura. A taxa de secagem para cada experimento pode ser obtida por meio da derivada da Equação (3.2) com relação ao tempo:

$$\frac{d\bar{X}^*}{dt} = \frac{1}{(X_i - X_{eq})} \frac{d\bar{X}}{dt} \quad (4.1a)$$

ou

$$-\frac{d\bar{X}}{dt} = (X_i - X_{eq}) \left[-\frac{d\bar{X}^*}{dt} \right] \quad (4.1b)$$

Para obter o ajuste das curvas de secagem aos dados experimentais foi utilizado o programa computacional “LAB Fit Curve Fitting Software”. Além disso, foi utilizado o modelo empírico de Page para determinar a taxa de secagem $-d\bar{X}^*/dt$ através da Equação (3.11) e também os parâmetros obtidos nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5. Assim, as Figuras 4.15 e 4.16 apresentam as simulações da taxa de secagem em função do tempo para cada temperatura estudada.

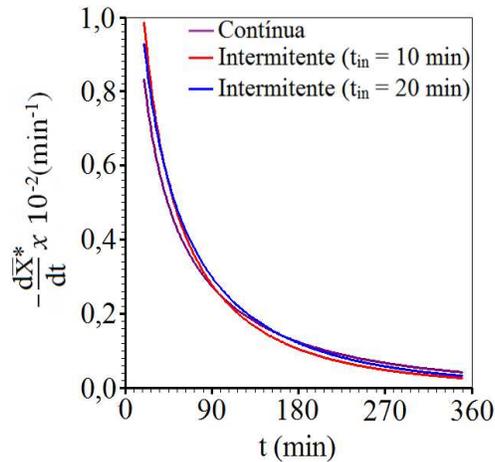


Figura 4.15 - Taxas de secagem dos grãos de arroz em casca a 50°C, descritas pela equação de Page.

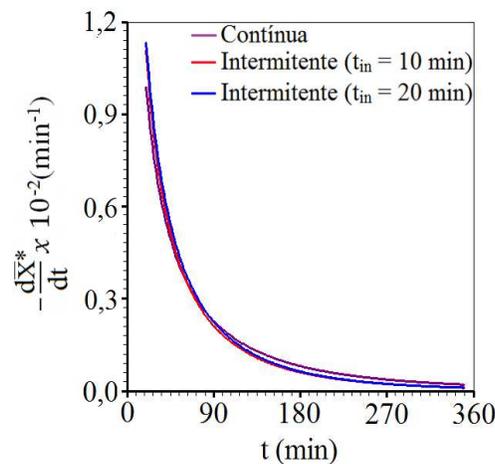


Figura 4.16 - Taxas de secagem dos grãos de arroz em casca a 70°C, descritas pela equação de Page.

A partir das Figuras 4.15 e 4.16, como primeira análise, é possível afirmar que todos os processos de secagem ocorreram em taxas decrescentes para as duas temperaturas.

Na Figura 4.15 observou-se que as secagens intermitentes apresentaram comportamento semelhante com relação às taxas de secagem e suavemente distintos da secagem contínua no início do processo, mas depois, esta vantagem inicial, é descompensada ao decorrer da secagem. O uso da intermitência promoveu maior taxa de remoção de água do material no início do processo, evidenciando-se o acréscimo da taxa de

secagem. Já para a Figura 4.16, nota-se que as três curvas são similares e não apresentam uma distinção significativa para as taxas de secagem.

O aumento da temperatura do ar de secagem de 50 para 70°C proporcionou aumento das taxas de secagem do material durante o início do processo, fato observado também em outros trabalhos de pesquisa, os quais afirmaram que a temperatura do ar é um parâmetro de influência na taxa de secagem de grãos (RODRIGUES et al., 2002; SILVA et al., 2014).

Silva et al. (2015) estudaram a secagem intermitente de bananas inteiras com temperatura do ar de secagem de 70°C, com uma razão de intermitência $\alpha = 1/2$, para tempos de intermitência de 30, 60 e 120 minutos. Usando o modelo empírico de Peleg, determinaram uma expressão para a taxa de secagem e concluíram que o processo descontínuo aumenta o valor dessa taxa.

Lima e Nebra (2000) consideraram o efeito do encolhimento na difusão de umidade durante o processo de secagem e aplicaram o método dos volumes finitos para resolver o problema de encolhimento e transporte de umidade simultânea em corpos esferoidais prolatos. A análise dos resultados evidencia que a taxa de secagem é maior quando ocorre encolhimento, em comparação à obtida quando não se considera este efeito, e que esta mesma taxa cresce proporcionalmente ao aumento do coeficiente de encolhimento.

4.4 - Descrição das cinéticas de secagem utilizando modelos analíticos de difusão

Modelos de difusão são, muitas vezes, mais vantajosos do que os empíricos, devido à quantidade de informações que podem ser extraídas, uma vez que os modelos empíricos não contemplam a descrição da distribuição da umidade no sólido estudado, o que pode limitar suas aplicações na descrição da secagem. A utilização dos modelos de difusão para descrever os processos de secagem possibilita prever a distribuição de umidade no interior do grão, em qualquer instante, previamente determinado.

Para simular o processo de secagem de grãos de arroz em casca foi considerada a geometria de um cilindro infinito no desenvolvimento dos modelos difusivos.

Neste trabalho, foram usados dois modelos analíticos de difusão para descrever a secagem contínua e intermitente de grãos de arroz em casca. No primeiro modelo, considera-se a condição de contorno do primeiro tipo (condição de contorno de equilíbrio), no qual o único parâmetro a ser determinado é a difusividade efetiva de massa (D). Neste

caso, a superfície externa do grão entra em equilíbrio com o ar de secagem não havendo, portanto, resistência ao fluxo de água em tal superfície. Para simular a cinética de secagem dos grãos de arroz, usando a solução analítica da equação de difusão empregando condição de contorno de primeiro tipo, foi utilizado o software “Prescribed Adsorption - Desorption” (SILVA e SILVA, 2009b).

No segundo modelo, considera-se a condição de contorno de terceiro tipo (condição de contorno convectiva), que pressupõe uma possível resistência ao fluxo de massa (água) na superfície do grão. Neste caso, além da difusividade efetiva de massa, também será determinado o coeficiente de transferência convectiva de massa (h). Para isso, foi utilizado o software “Convective Adsorption - Desorption” (SILVA e SILVA, 2009c) para simular a cinética de secagem dos grãos de arroz, usando a solução analítica da equação de difusão empregando condição de contorno de terceiro tipo.

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir de dados experimentais da secagem dos grãos de arroz nas temperaturas de 50 e 70°C e, a partir das simulações, foi possível estabelecer a condição de contorno mais apropriada na descrição da secagem contínua e intermitente do arroz, com a eliminação do período de têmpera.

4.4.1 - Cinética de secagem utilizando a condição de contorno do primeiro tipo

A Tabela 4.6 apresenta os indicadores estatísticos e os valores das difusividades efetivas de massa do modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo, para as secagens contínuas e intermitentes dos grãos de arroz com temperatura do ar de secagem de 50°C.

Tabela 4.6 - Resultados obtidos para as simulações das secagens utilizando o modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo a 50°C.

| | D (m ² min ⁻¹) | R ² | χ ² |
|---|---------------------------------------|----------------|---------------------------|
| Contínua | 2,0949 x 10 ⁻⁹ | 0,996184 | 6,5744 x 10 ⁻³ |
| Intermitente (t _{in} = 10 min) | 2,9817 x 10 ⁻⁹ | 0,991756 | 4,9611 x 10 ⁻² |
| Intermitente (t _{in} = 20 min) | 2,5149 x 10 ⁻⁹ | 0,992354 | 5,9541 x 10 ⁻² |

As cinéticas de secagem dos grãos de arroz em casca juntamente com os dados experimentais referentes à temperatura de 50°C são mostradas na Figura 4.17.

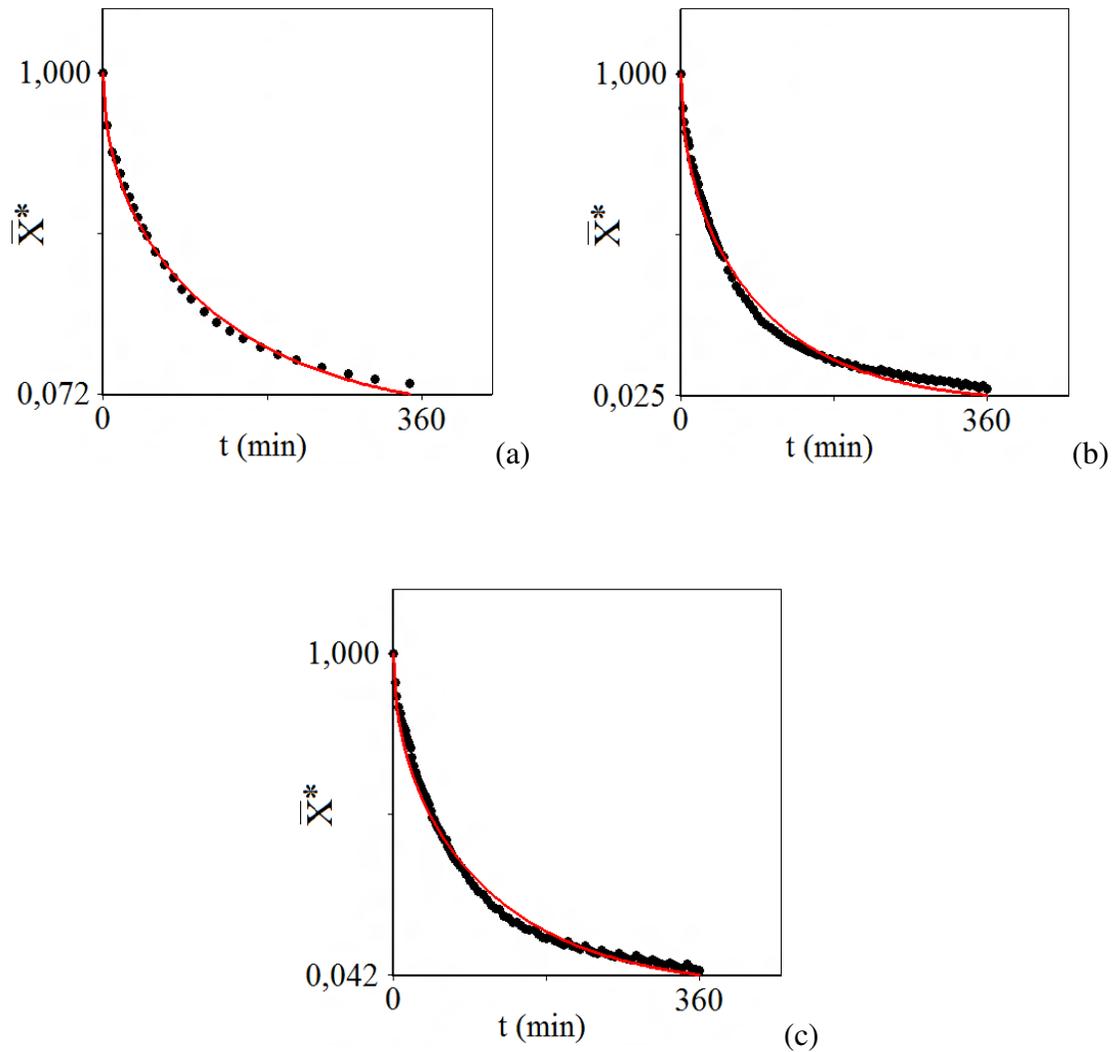


Figura 4.17 - Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo para a temperatura do ar de secagem de 50°C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c).

Para a temperatura de 70°C, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.7 e as simulações das cinéticas de secagem são apresentadas através da Figura 4.18.

Tabela 4.7 - Resultados obtidos para as simulações das secagens utilizando o modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo a 70°C.

| | D (m ² min ⁻¹) | R ² | χ^2 |
|---|---------------------------------------|----------------|---------------------------|
| Contínua | 4,0694 x 10 ⁻⁹ | 0,991151 | 2,2129 x 10 ⁻² |
| Intermitente (t _{in} = 10 min) | 5,3609 x 10 ⁻⁹ | 0,994840 | 4,4117 x 10 ⁻² |
| Intermitente (t _{in} = 20 min) | 5,1088 x 10 ⁻⁹ | 0,993616 | 4,3745 x 10 ⁻² |

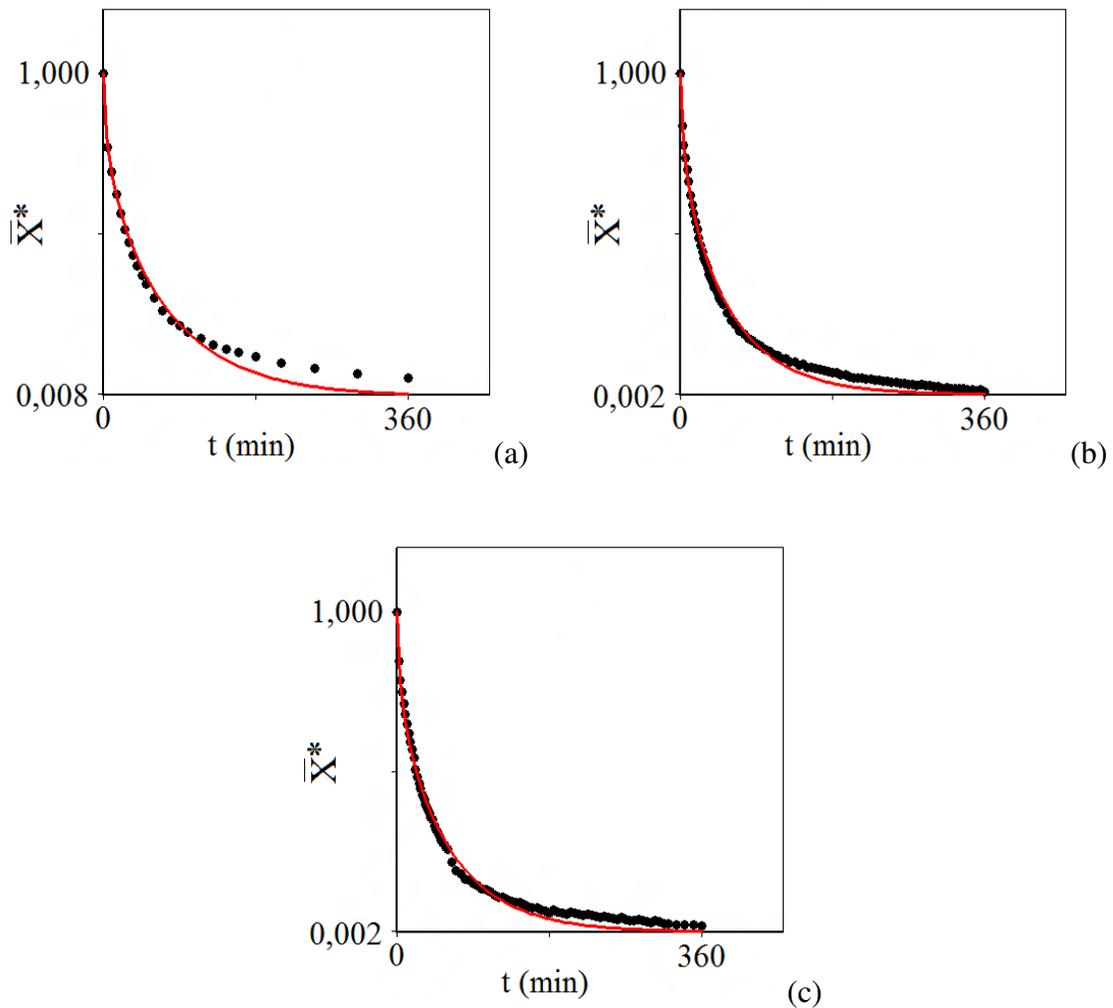


Figura 4.18 - Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo para a temperatura do ar de secagem de 70°C: secagem contínua (a), secagem intermitente com t_{in} = 10 min (b) e secagem intermitente com t_{in} = 20 min (c).

A partir da análise das Tabelas 4.6 e 4.7 é possível verificar que o modelo analítico que pressupõe a condição de contorno do primeiro apresentou bons indicadores estatísticos

e um ajuste satisfatório entre as simulações e os dados experimentais para as duas temperaturas, representadas nas Figuras 4.17 e 4.18. Entretanto, as cinéticas com temperatura de 70°C apresentaram certa divergência a partir dos 100 minutos de secagem. Segundo Silva (2012), esse fato ocorre devido ao modelo empregado considerar volume e parâmetros de transporte constantes, indicando que a difusividade efetiva após este tempo ($t = 100$ min) deveria ter um valor menor do que nos instantes iniciais. Contudo, o modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo pode ser considerado adequado para a descrição da secagem contínua e intermitente do arroz em casca. Além do mais, os indicadores estatísticos obtidos nas otimizações foram melhores dentre alguns modelos empíricos analisados.

Comparando-se os métodos de secagem contínua e intermitente, observa-se na Tabela 4.6 os valores da difusividade efetiva de massa (D) a 50°C, determinados por otimização, sendo $2,0949 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ para a secagem contínua, $2,9817 \times 10^{-9}$ e $2,5149 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ para a secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min e intermitente $t_{in} = 20$ min, respectivamente, apresentando aumento significativo deste parâmetro com a aplicação da intermitência. Podemos concluir que o efeito do período de têmpera no processo de secagem do grão de arroz foi refletido no aumento do coeficiente de difusão, com isso, o transporte de umidade ocorre de forma mais rápida para o processo de secagem intermitente, o que contribui para justificar a redução do tempo de operação efetiva.

O mesmo efeito aconteceu para as secagens com temperatura de 70°C, em que também se verificou aumento da difusividade com a aplicação da intermitência, conforme a Tabela 4.7.

As Figuras 4.17 e 4.18 seguem evidenciando a viabilidade do uso da secagem intermitente. Por exemplo, em 180 min de tempo de operação efetiva a 50°C, a razão de umidade obtida por simulação foi 0,216 para a secagem contínua, e para secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min e intermitente com $t_{in} = 20$ min, respectivamente, 0,132 e 0,171. Os resultados mostraram que, na secagem intermitente, houve redução do tempo de operação efetiva, quando comparado com a secagem contínua e que os teores de umidade são relativamente próximos entre as secagens intermitentes. Logo, é evidente a economia de energia para o método de secagem intermitente.

4.4.2 - Cinética de secagem utilizando a condição de contorno do terceiro tipo

Na Tabela 4.8 e na Figura 4.19 são apresentados os resultados para o modelo que utiliza a condição de contorno do terceiro tipo na temperatura de 50°C.

Tabela 4.8 - Resultados obtidos para as simulações das secagens utilizando o modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo a 50°C.

| | D (m ² min ⁻¹) | R ² | χ ² | h (m min ⁻¹) | Bi |
|---|---------------------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|-------|
| Contínua | 2,2241 x 10 ⁻⁹ | 0,996722 | 5,6682 x 10 ⁻³ | 1,5017 x 10 ⁻⁴ | 92,50 |
| Intermitente (t _{in} = 10 min) | 3,2565 x 10 ⁻⁹ | 0,993389 | 4,3290 x 10 ⁻² | 1,3074 x 10 ⁻⁴ | 55,00 |
| Intermitente (t _{in} = 20 min) | 3,0462 x 10 ⁻⁹ | 0,995150 | 3,3100 x 10 ⁻² | 5,2808 x 10 ⁻⁵ | 23,75 |

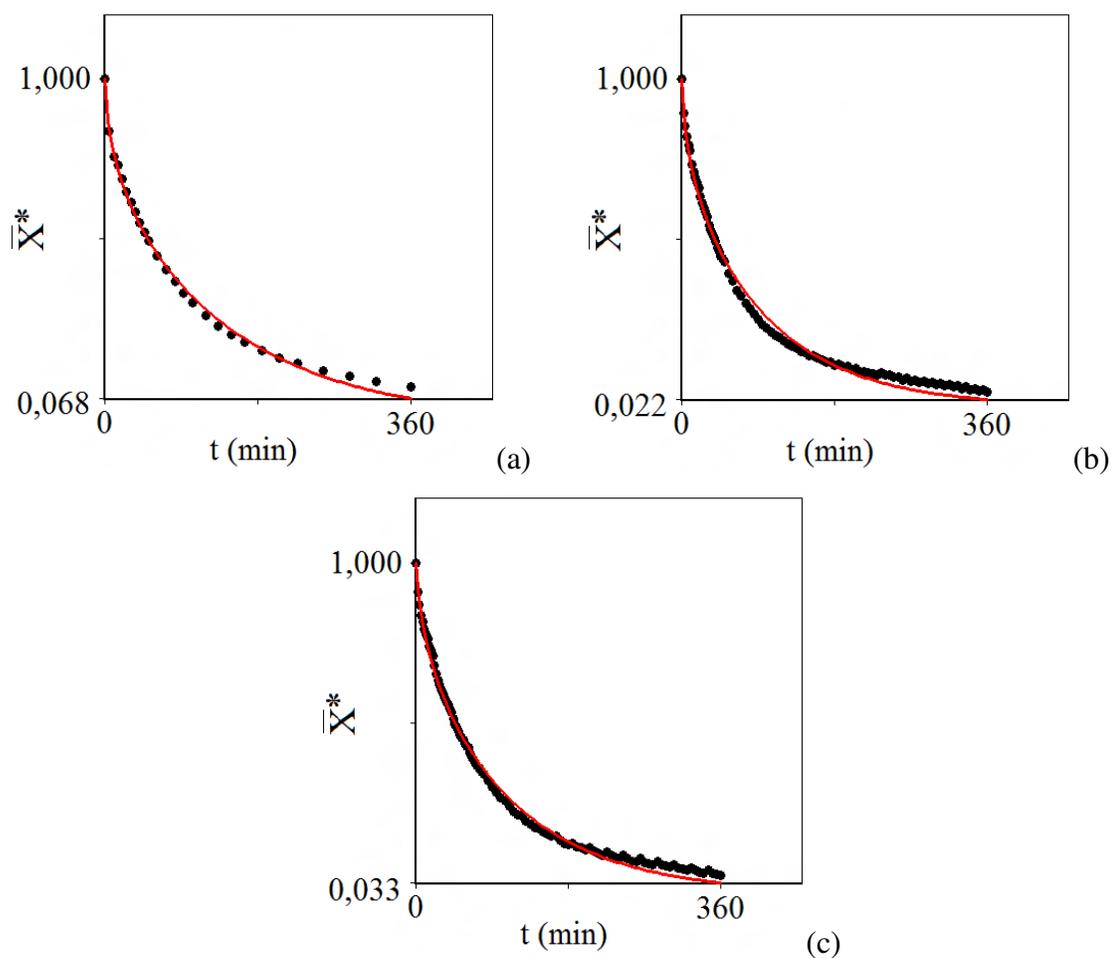


Figura 4.19 - Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo para a temperatura do ar de secagem de 50°C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c).

Na Tabela 4.9 e na Figura 4.20 são apresentados os resultados na temperatura de 70°C.

Tabela 4.9 - Resultados obtidos para as simulações das secagens utilizando o modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo a 70°C.

| | $D \text{ (m}^2 \text{ min}^{-1}\text{)}$ | R^2 | χ^2 | $h \text{ (m min}^{-1}\text{)}$ | Bi |
|--|---|----------|-------------------------|---------------------------------|-------|
| Contínua | $4,1767 \times 10^{-9}$ | 0,991365 | $2,3385 \times 10^{-2}$ | $6,0974 \times 10^{-4}$ | 200,0 |
| Intermitente ($t_{in} = 10 \text{ min}$) | $5,4971 \times 10^{-9}$ | 0,995137 | $4,5996 \times 10^{-2}$ | $8,0250 \times 10^{-4}$ | 200,0 |
| Intermitente ($t_{in} = 20 \text{ min}$) | $5,2354 \times 10^{-9}$ | 0,994124 | $4,3794 \times 10^{-2}$ | $7,6430 \times 10^{-4}$ | 200,0 |

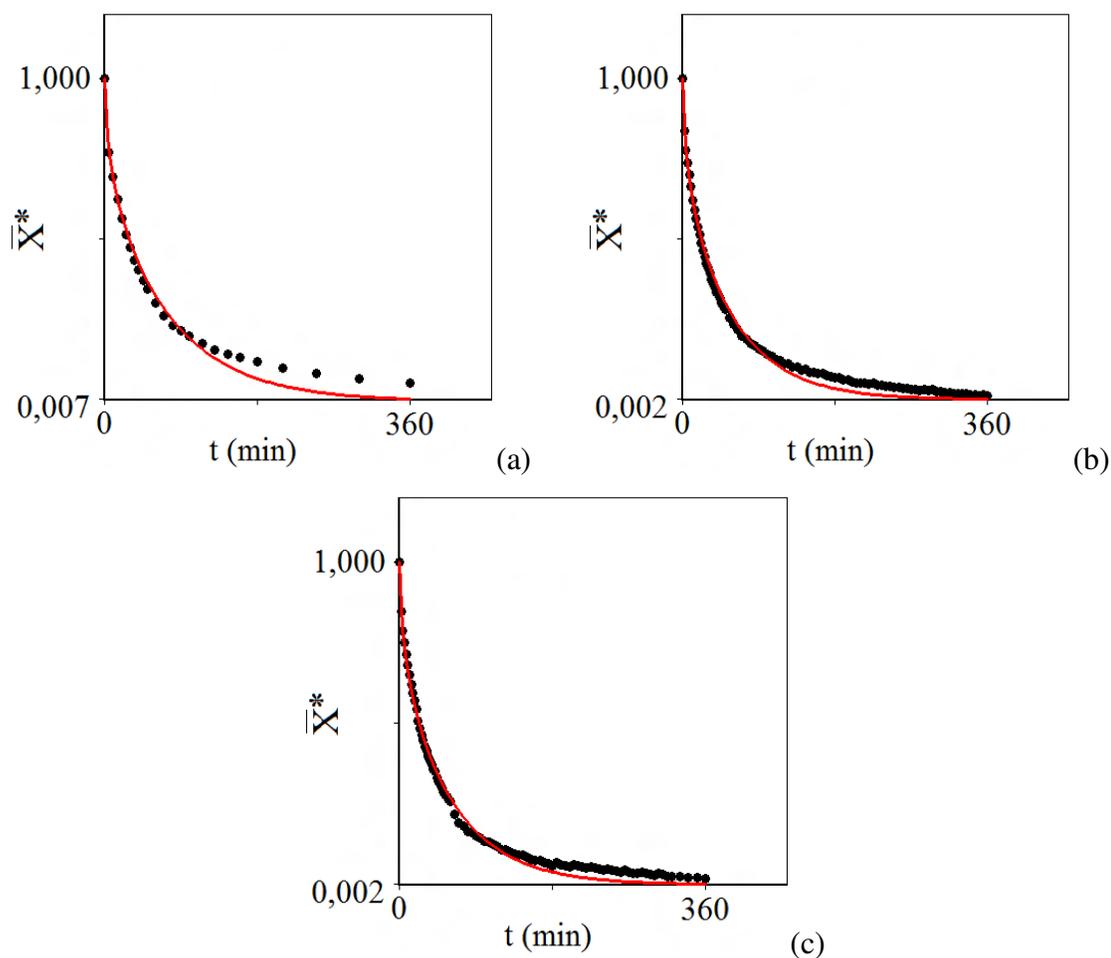


Figura 4.20 - Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo para a temperatura do ar de secagem de 70°C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10 \text{ min}$ (b) e secagem intermitente com $t_{in} = 20 \text{ min}$ (c).

Analisando os resultados contidos nas Tabelas 4.8 e 4.9, observaram-se indicadores estatísticos e ajustes semelhantes ao modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo. Porém, observa-se também que os números de Biot (Bi) para transferência de massa obtidos neste trabalho, são relativamente altos, com valores de 92,50; 55,00 e 23,75 para a secagem contínua, secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min e secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min, respectivamente, para a temperatura de 50°C. Ainda se vê que, com a elevação da temperatura para 70°C, o valor de Bi cresce, tendendo ao infinito, o que confirma a ausência de uma resistência ao fluxo de massa na superfície do grão.

Cabe mencionar ainda que, ao executar a simulação no software “Convective” (condição de contorno do terceiro tipo), ao final da execução, o mesmo exibe uma mensagem ao usuário sugerindo a simulação para a condição de contorno do primeiro tipo.

Portanto, de acordo com os números de Biot obtidos, torna-se bastante óbvio observar que, para todas as temperaturas estudadas, o modelo de difusão que considera a condição de contorno do primeiro tipo descreve de forma mais real o transporte de umidade no interior do grão de arroz durante o processo de secagem contínua e intermitente. Resultados disponíveis na literatura demonstram que a condição de contorno do primeiro tipo é utilizada na descrição do transporte de umidade para a maioria dos grãos (SILVA et al., 2008; COSTA et al., 2011; MORAIS et al., 2013; SILVA et al., 2013; LIMA e FRANCO, 2018)

4.5 - Descrição das cinéticas de secagem utilizando modelo numérico de difusão

Conforme os resultados apresentados no item anterior, a condição de contorno do primeiro tipo é a mais adequada para descrever as cinéticas de secagem contínua e intermitentes dos grãos de arroz em casca. Para simular tais processos, usando o modelo numérico unidimensional, foi utilizado o software “Infinite Cylinder” (SILVA, 2010). Para as secagens intermitentes, os dados foram analisados eliminando-se o período de têmpera.

4.5.1 - Resultados obtidos para o modelo numérico unidimensional

Nesta pesquisa, a solução numérica unidimensional da equação de difusão com condição de contorno de primeiro tipo foi ajustada ao conjunto de dados experimentais para

simular a cinética de difusão e determinar os parâmetros de transporte que, neste caso, devido à condição de contorno, todo o processo é governado apenas pela difusividade efetiva de massa, para a geometria de um cilindro infinito. Assim, em todas as simulações, foi estimado um valor inicial para D igual aos valores obtidos analiticamente para cada caso; foi utilizada uma malha uniforme contendo 101 volumes de controle com transiente acompanhado no volume 50, o número de passos no tempo foi de 500 e intervalos de tempo (Δt) de 1 minuto. Nestas otimizações, a difusividade efetiva e as variações dimensionais foram consideradas constantes. Mais informações sobre as simulações realizadas pelo software “Infinite Cylinder” podem ser observadas nos arquivos de ajuda do próprio software, apresentados em Anexo.

A Tabela 4.10 evidencia os valores das difusividades efetivas de massa e os indicadores estatísticos coeficiente de determinação e qui-quadrado, relativos ao modelo numérico unidimensional para as secagens contínua e intermitente do arroz, nas temperaturas de 50 e 70 °C.

Tabela 4.10 - Resultado das simulações das secagens pelo modelo unidimensional.

| | T (°C) | D (m ² min ⁻¹) | R ² | χ^2 |
|---|--------|---------------------------------------|----------------|---------------------------|
| Contínua | 50 | 2,1097 x 10 ⁻⁹ | 0,996187 | 2,1143 x 10 ⁻² |
| | 70 | 4,1538 x 10 ⁻⁹ | 0,993035 | 2,8346 x 10 ⁻² |
| Intermitente (t _{in} = 10 min) | 50 | 2,9905 x 10 ⁻⁹ | 0,992295 | 5,0170 x 10 ⁻² |
| | 70 | 5,4158 x 10 ⁻⁹ | 0,995105 | 4,4470 x 10 ⁻² |
| Intermitente (t _{in} = 20 min) | 50 | 2,5237 x 10 ⁻⁹ | 0,992532 | 5,7476 x 10 ⁻² |
| | 70 | 5,1601 x 10 ⁻⁹ | 0,994363 | 4,4152 x 10 ⁻² |

Simulando as cinéticas de secagem contínua e intermitentes com os dados da Tabela 4.10, utilizando-se o modelo unidimensional obtemos os gráficos apresentados nas Figuras 4.21 e 4.22.

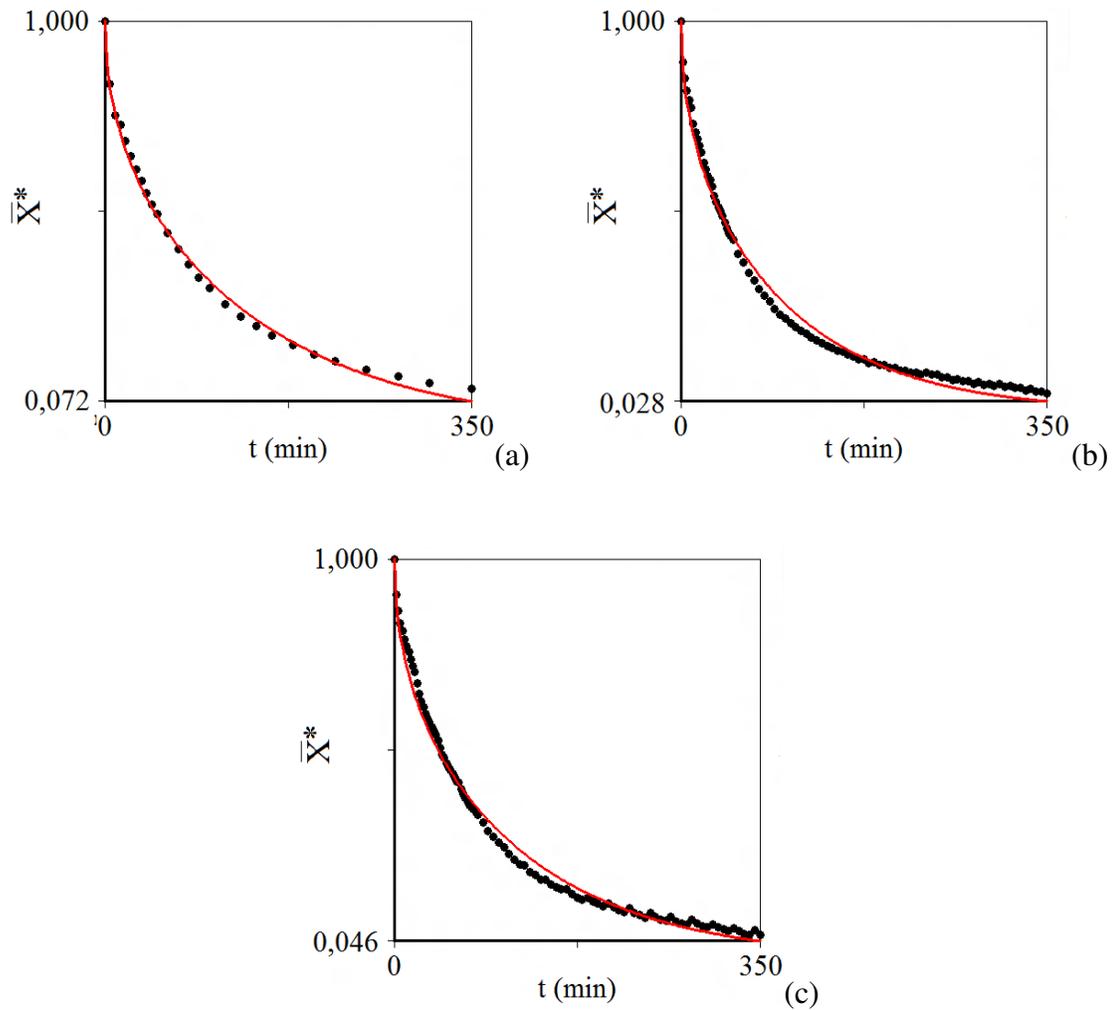


Figura 4.21 - Cinética de secagem descrita pelo modelo unidimensional para a temperatura do ar de secagem de 50°C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c).

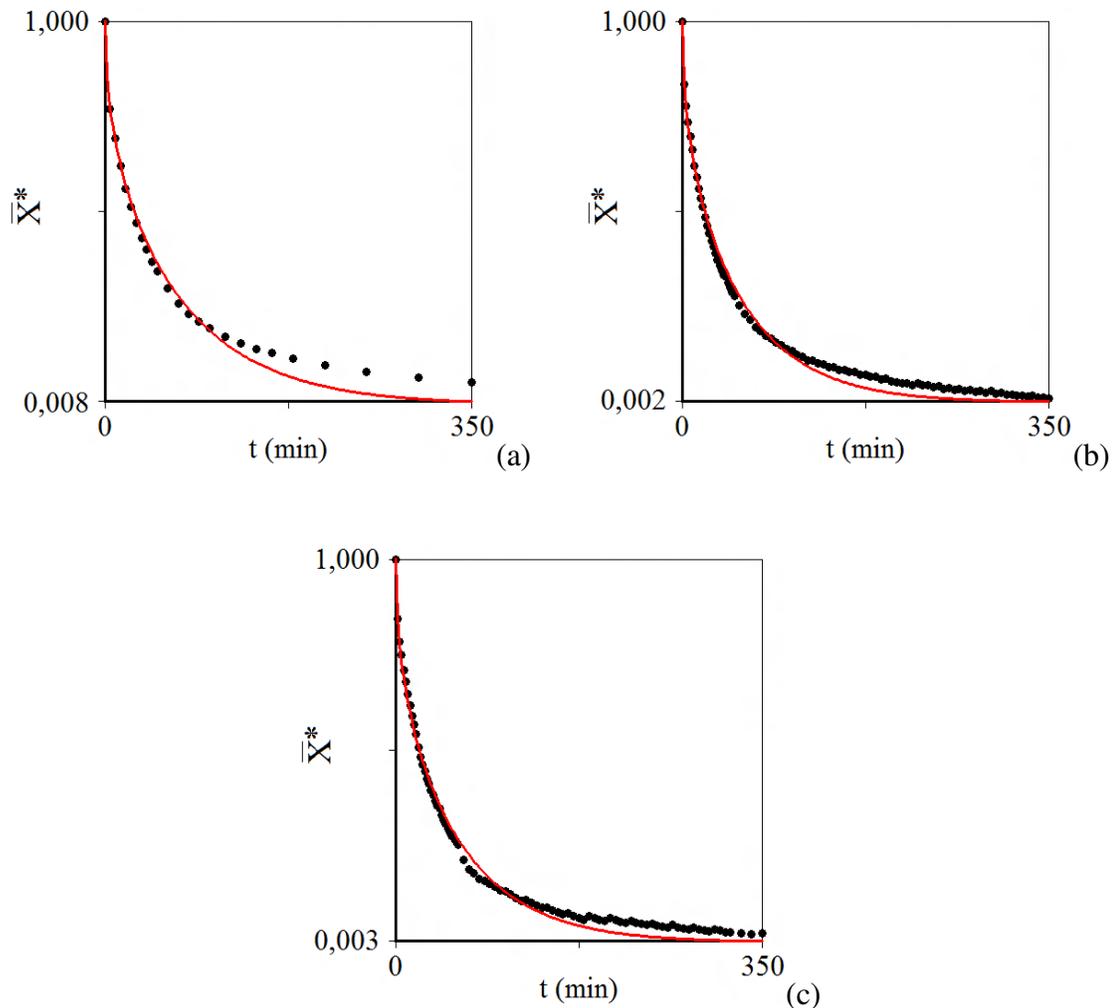


Figura 4.22 - Cinética de secagem descrita pelo modelo unidimensional para a temperatura do ar de secagem de 70°C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c).

Verificando a Tabela 4.10 e as Figura 4.21 e 4.22, é possível observar que o modelo numérico unidimensional revelou bons indicadores estatísticos ($R^2 > 0,992$ e $\chi^2 < 5,748 \times 10^{-2}$) e que o modelo descreve adequadamente a secagem contínua e intermitente do arroz; e que a condição de contorno escolhida fornece boa consonância com os dados experimentais.

Ainda de acordo com a Tabela 4.10, observa-se que os valores obtidos para a difusividade pelo modelo numérico aproximaram-se dos valores determinados pelo modelo analítico, em ambas as temperaturas. Desta forma, as cinéticas também apresentaram comportamento similar ao do modelo analítico, em que também é percebida uma

discrepância entre os resultados simulados e os dados experimentais nos instantes finais do processo para a temperatura de 70°C. Tal discrepância indica que a difusividade nos instantes finais deveria ter um valor menor do que nos instantes iniciais, uma vez que este modelo também considerou a difusividade efetiva e volume constantes durante todo o processo.

Para a simulação numérica, assumiram-se parâmetros constantes e ausência do encolhimento. Nesse caso, as soluções numéricas devem ser compatíveis com as soluções analíticas, que é um meio importante de validação para as soluções numéricas. Para validar a solução proposta, os resultados obtidos foram comparados com a solução analítica determinadas na seção 4.4.1, Tabelas 4.6 e 4.7. Para efeito de comparação, a Tabela 4.11 apresenta os parâmetros D obtidos para as soluções analíticas e numéricas, considerando a condição de contorno do primeiro tipo, nas duas temperaturas estudadas.

Tabela 4.11 - Difusividade efetiva de massa para as soluções analítica e numérica com condição de contorno do primeiro tipo.

| | T (°C) | D analítica (m ² min ⁻¹) | D numérica (m ² min ⁻¹) |
|---|--------|--|---|
| Contínua | 50 | 2,0949 x 10 ⁻⁹ | 2,1097 x 10 ⁻⁹ |
| | 70 | 4,0694 x 10 ⁻⁹ | 4,1538 x 10 ⁻⁹ |
| Intermitente (t _{in} = 10 min) | 50 | 2,9817 x 10 ⁻⁹ | 2,9905 x 10 ⁻⁹ |
| | 70 | 5,3609 x 10 ⁻⁹ | 5,4158 x 10 ⁻⁹ |
| Intermitente (t _{in} = 20 min) | 50 | 2,5149 x 10 ⁻⁹ | 2,5237 x 10 ⁻⁹ |
| | 70 | 5,1088 x 10 ⁻⁹ | 5,1601 x 10 ⁻⁹ |

Os resultados apresentados na Tabela 4.11 indicam que os dois resultados são praticamente equivalentes e atestam a concordância entre as soluções analítica e numérica. Logo, os resultados obtidos da solução numérica expõem consistência satisfatória, sendo fisicamente coerente.

4.5.2 - Distribuição de erros pelo modelo numérico unidimensional

As Figuras 4.23 a 4.24 mostram a distribuição de erros (diferença entre o valor experimental e o valor simulado) para todos os experimentos de secagem utilizando-se o modelo numérico unidimensional, evidenciando em cada gráfico o erro médio obtido.

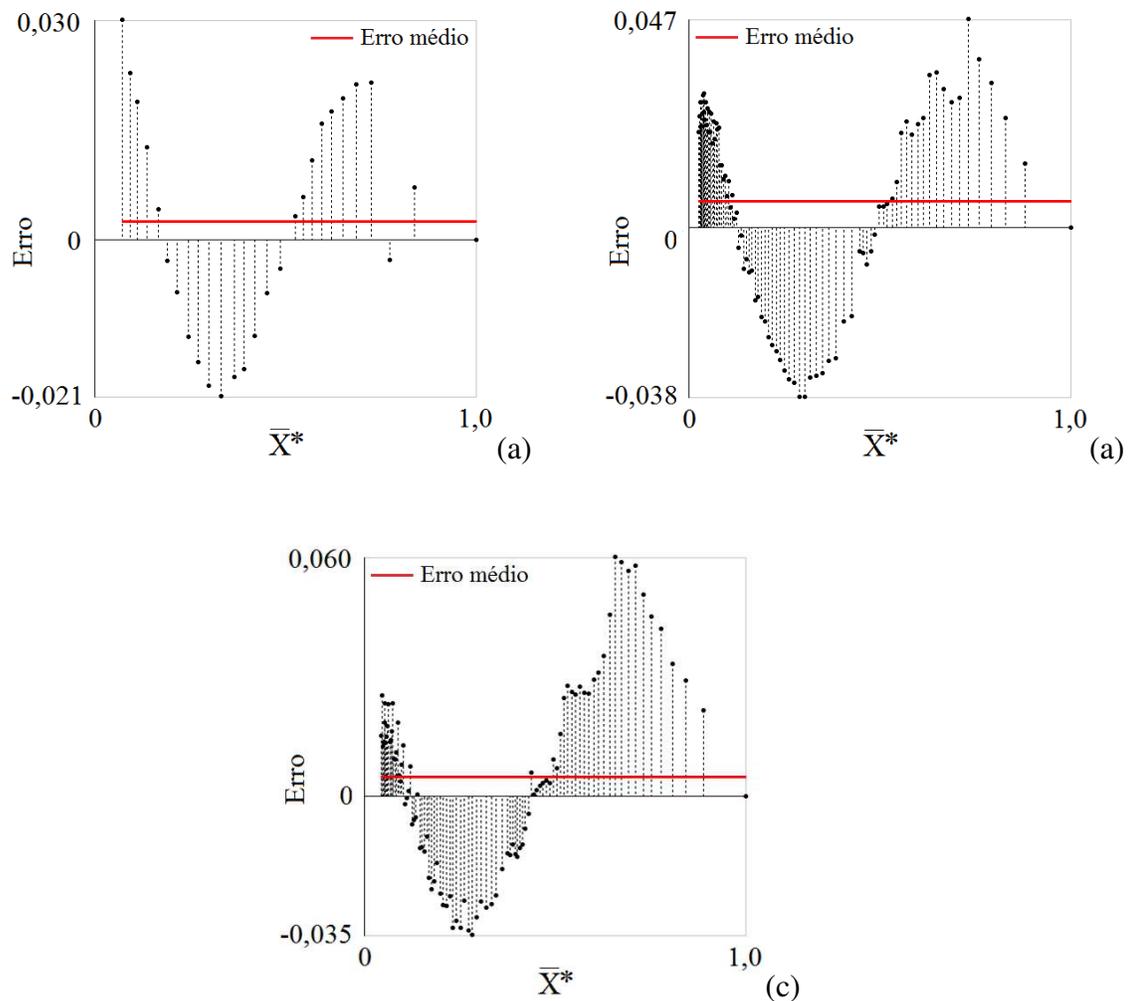


Figura 4.23 - Distribuição de erro para as secagens contínua e intermitentes na temperatura de 50°C: Contínua (a), intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e intermitente com $t_{in} = 20$ min (c).

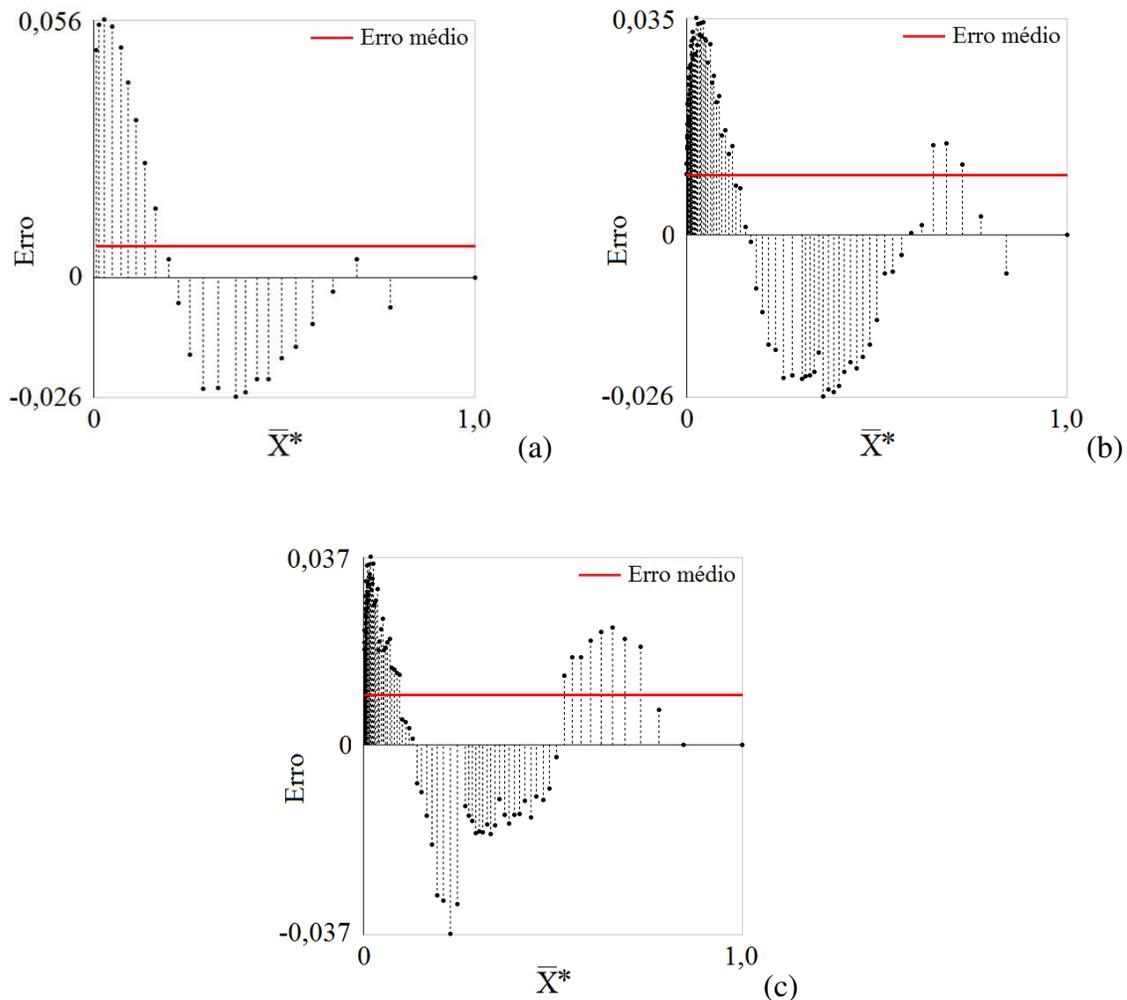


Figura 4.24 - Distribuição de erro para as secagens contínua e intermitentes na temperatura de 70°C: Contínua (a), intermitente com $t_{in} = 10$ min (b) e intermitente com $t_{in} = 20$ min (c).

Em todos os casos, o valor absoluto do maior erro é muito pequeno, o que é satisfatório. O erro médio foi relativamente baixo, em conformidade com a previsão teórica de ser zero, principalmente para as secagens com temperatura de 50°C, em que o maior erro médio observado foi de 0,00584 (Figura 4.23 b) e de 0,00977 para a temperatura de 70°C (Figura 4.24 b), apontando boa qualidade das análises realizadas. Ainda, nota-se que a distribuição não foi completamente aleatória, devido a eliminação do período de têmpera. Alguns autores, a exemplo de Siva et al. (2011), Lins (2013) e Franco (2016), reportam em suas pesquisas que a distribuição de erros tendenciosa pode ser resultante da difusividade de massa ter sido considerada constante durante todo o processo de secagem.

4.5.3 - Simulação da distribuição de umidade no interior do grão de arroz

Os processos de secagem contínua e intermitente dos grãos de arroz em casca podem ser descritos de forma satisfatória através de modelos difusivos utilizados neste trabalho. É possível, então, prever a distribuição de umidade no interior do grão em qualquer volume de controle desejado e em qualquer instante de tempo, previamente determinados.

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos através das simulações realizadas para o modelo numérico unidimensional. Os gráficos que mostram a distribuição de umidade foram determinados pelo mesmo software utilizado para simular o processo e determinar a difusividade, “Infinite Cylinder”.

As Figuras 4.25 e 4.26 ilustram o comportamento do teor de umidade adimensional em função da coordenada radial do cilindro infinito para determinados instantes de tempo ocorridos nos experimentos de secagem contínua.

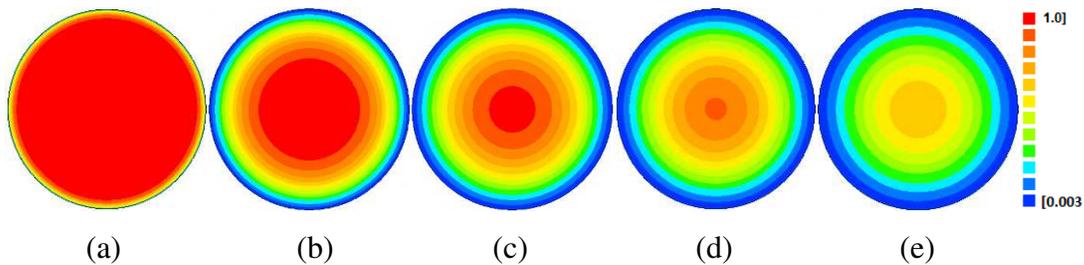


Figura 4.25 - Distribuição de umidade no interior do grão de arroz nos instantes 1 (a), 30 (b), 60 (c), 90 (d) e 135 (e) minutos a partir do início da secagem contínua a 50°C.

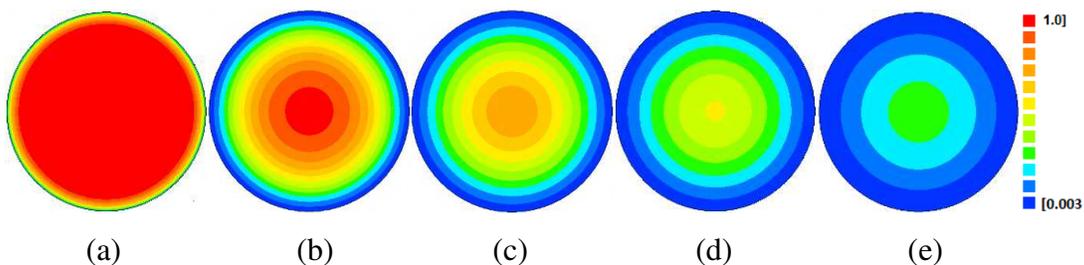


Figura 4.26 - Distribuição de umidade no interior do grão de arroz nos instantes 1 (a), 30 (b), 60 (c), 90 (d) e 135 (e) minutos a partir do início da secagem contínua a 70°C.

Observando os gráficos mostrados nas Figuras 4.25 e 4.26, percebe-se que, iniciado o processo de secagem, o teor de umidade propende a se localizar no interior do produto e diminui ao decorrer desse processo, devido à difusão de umidade do centro para a extremidade do grão, ou seja, durante o processo de secagem, o fluxo de água ocorre do interior para a superfície do produto.

Comparando as Figuras 4.25 e 4.26, foi possível verificar o efeito da temperatura do ar de secagem durante o processo de secagem. Com o aumento da temperatura de 50 para 70°C, os elementos da malha mais externos secam de forma mais rápida que os elementos internos, para cada instante de tempo analisado, isto é, quanto maior for a temperatura de secagem, mais rápido ocorrerá o processo, como já era esperado. Vale lembrar que tal conclusão ocorreu levando-se em consideração que o diâmetro do grão de arroz permaneceu constante durante todo o processo.

Nos gráficos apresentados anteriormente, observa-se coerência nos resultados devido ao fato de que, na camada externa ocorre o equilíbrio quase que instantâneo com o ar de secagem nos instantes iniciais, corroborando com a situação física analisada, imposta pela condição de contorno do primeiro tipo. Dessa forma, a condição de contorno do primeiro tipo é realmente mais adequada para descrição da secagem de arroz em casca, visto que o efeito da resistência ao fluxo de massa na superfície é inexistente. Ademais, o deslocamento de umidade ocorre de forma mais rápida no contorno e diminui gradativamente à medida que se conduz para o interior, tornando-se lento no centro do grão.

A fim de comparar a distribuição de umidade no interior do grão de arroz durante o processo de secagem contínua e intermitente, estudou-se a distribuição de umidade com o mesmo tempo de operação efetiva, no instante de 45 minutos, para todos os casos. Foi escolhido o tempo de 45 minutos com o intuito de analisar a distribuição de umidade no início do processo.

A Figura 4.27 apresenta a distribuição de umidade no tempo $t = 45$ minutos de operação efetiva a 50°C.

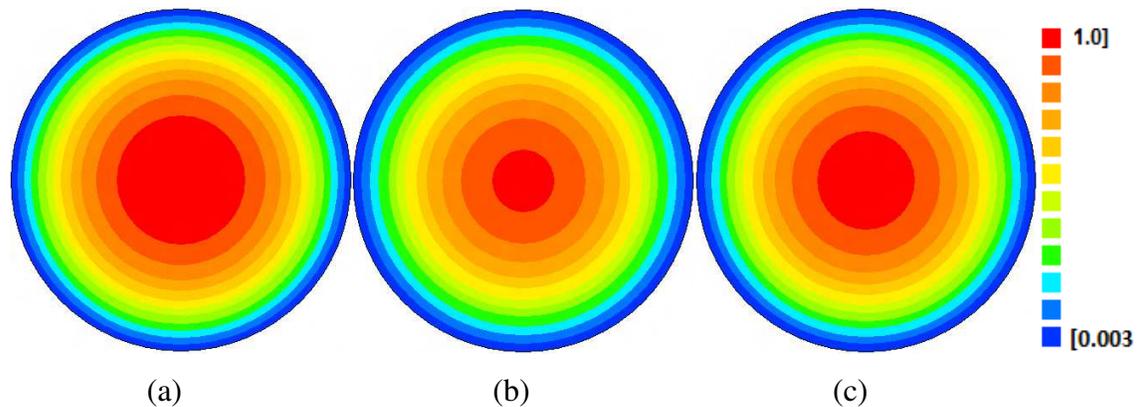


Figura 4.27 - Distribuições de umidade para secagem contínua e intermitente em 45 minutos de tempo de operação efetiva a 50°C: secagem contínua (a); intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c).

No instante $t = 45$ min, o teor de umidade médio adimensional foi 0,547; 0,474 e 0,510, para a secagem contínua, intermitente com $t_{in} = 10$ min e intermitente com $t_{in} = 20$ min, respectivamente. Observa-se que as duas secagens intermitentes apresentaram uma melhor distribuição de umidade quando comparadas com a secagem contínua, uma vez que a intermitência permite tempo para que o transporte de umidade ocorra de forma mais rápida e homogênea durante o período de têmpera. Ainda, é possível perceber que a secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min, correspondente ao tempo de têmpera de 20 min (t_{out}), proporcionou uma quantidade de água removida por unidade de tempo de secagem consideravelmente maior do que a secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min, o que está de acordo com a cinética de secagem obtidas na Figura 4.11. Portanto, pode-se afirmar que para a razão de intermitência estudada ($\alpha = 2/3$), em que $\alpha = t_{out}/(t_{in} + t_{out})$, a melhor situação física de economia de energia foi obtida para o experimento de secagem intermitente com tempo de exposição de 10 minutos e um período de têmpera de 20 minutos, a 50°C. O efeito do período de têmpera está relacionado com a redução dos gradientes de umidade durante este período, assim, quanto mais intensa for a diminuição dos gradientes de umidade no período de têmpera, melhor. Trabalhos reportados na literatura também comprovaram maior transporte de umidade para o mesmo tempo de operação efetiva quando aplicado tempos de intermitência menores, utilizando a razão de intermitência $\alpha = 2/3$ (HOLOWATY et al., 2012; GALVÃO, 2017).

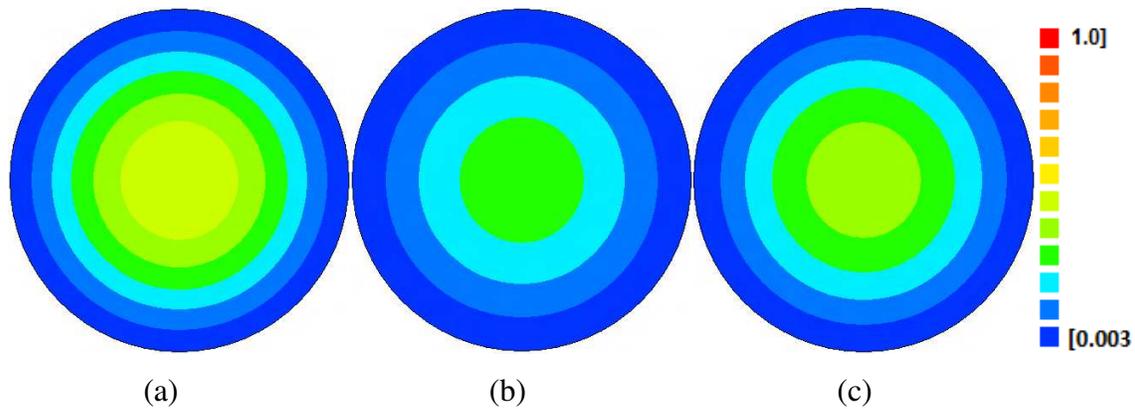


Figura 4.28 - Distribuições de umidade para secagem contínua e intermitente em 180 minutos de tempo de operação efetiva a 50°C: secagem contínua (a); intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c).

Com a finalidade de verificar a distribuição de umidade no interior do grão de arroz para um instante de secagem de $t = 180$ min de operação efetiva, pode ser observada através da Figura 4.28. A 180 min de tempo de operação efetiva, os valores médios do teor de umidade adimensional são 0,216; 0,133 e 0,172, para a secagem contínua, intermitente com $t_{in} = 10$ min e intermitente com $t_{in} = 20$ min, respectivamente. Percebe-se coerência nos resultados apresentados, pois para o instante $t = 180$ min, verifica-se redução do teor de umidade no interior do grão, em que a distribuição de umidade apresenta uma evolução similar ao analisado na Figura 4.27. Desta forma, confirma-se que a secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min proporciona resultados significativamente melhores.

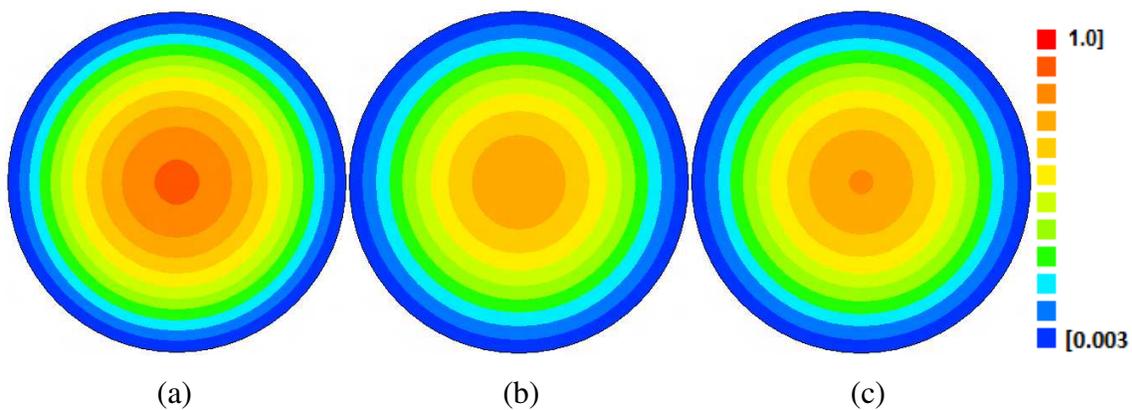


Figura 4.29 - Distribuições de umidade para secagem contínua e intermitente em 45 minutos de tempo de operação efetiva a 70°C: secagem contínua (a); intermitente $t_{in} = 10$ min (b); intermitente $t_{in} = 20$ min (c).

Para a temperatura do ar de secagem igual a 70°C, a distribuição de umidade no interior do grão de arroz em $t = 45$ min pode ser observada na Figura 4.29. Ao compararem-se as Figuras 4.27 e 4.29 foi possível verificar que em $t = 45$ minutos a amostra que está secando a 70°C realmente perdeu mais água que aquela em que o processo ocorre a 50°C, para os três experimentos de secagem. Quanto maior a temperatura do ar de secagem, mais rápido o sólido vai secar, como mencionado anteriormente.

Observa-se que a distribuição de umidade para as duas secagens intermitentes apresentaram comportamento semelhante, mas significativamente diferentes da secagem contínua, corroborando as cinéticas de secagem para 70°C, apresentadas na Figura 4.12. A quantidade de água removida no instante $t = 45$ min de secagem foi consideravelmente maior nas secagens intermitentes do que na secagem contínua, em que o teor de umidade médio adimensional foi 0,397; 0,331 e 0,341, para a secagem contínua, intermitente com $t_{in} = 10$ min e intermitente com $t_{in} = 20$ min, respectivamente. Com o aumento da temperatura de 50 para 70°C, a variação do teor de umidade adimensional é mais suave entre os processos de secagem intermitente e consideravelmente maior em relação à secagem contínua. Efeitos semelhantes foram encontrados por Rodrigues (2015), que realizou secagem intermitente de bananas inteiras utilizando ar quente, com uma razão de intermitência ($\alpha = 1/2$), para tempos de intermitência de 0,5, 1 e 2 horas, no qual também observou que a variação da difusividade efetiva de massa em relação ao teor de umidade adimensional é muito mais branda nos processos de secagem intermitente do que na secagem contínua.

A partir dos resultados apresentados nesta seção, pode-se dizer que, para todos os experimentos de secagem intermitente realizados, é possível chegar ao teor de umidade final aproximadamente igual ao obtido com a secagem contínua, reduzindo o tempo de operação efetiva de secagem. Assim, reduz o tempo de permanência do material no secador e ganha em energia. Esta análise mostrou as vantagens consideráveis da secagem intermitente e confirma a redução do tempo de secagem (tempo de operação efetiva). Vale ressaltar que o problema de difusão em estudo foi resolvido considerando-se parâmetros termofísicos e dimensões constantes.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, podemos concluir que:

- Dentre os modelos empíricos investigados, os modelos de Page, Peleg e Silva et alii se ajustaram bem aos dados experimentais, com destaque para Page, que apresentou os melhores resultados, sendo este escolhido para descrever a cinética de secagem contínua e intermitente do arroz em casca;
- A comparação entre as cinéticas de secagem contínua e intermitente descritas pelo modelo de Page indicou uma redução do tempo de operação efetiva de secagem em aproximadamente 30% para a secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min (E1), em relação à secagem contínua, com 180 minutos de operação efetiva;
- Para a razão de intermitência $\alpha = 2/3$, a maior economia de energia foi obtida com o experimento de secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min, a 50°C. Com o aumento da temperatura do ar de secagem para 70°C, as curvas de secagem tornaram-se semelhantes entre as secagens intermitentes e significativamente melhores em relação à secagem contínua. Verificou-se que não apenas a razão de intermitência é importante para a redução do tempo de secagem, mas também o período de têmpera;
- Todos os processos de secagem ocorreram em taxas decrescentes. As secagens intermitentes proporcionaram maior taxa de secagem do material no início do processo quando comparado com a secagem contínua;
- O modelo de difusão com a condição de contorno do primeiro tipo é o que melhor descreve os processos de secagem do arroz em casca;
- A difusividade efetiva de massa aumentou com o método da secagem intermitente em comparação com a secagem contínua. Este efeito é responsável por acelerar o processo de secagem e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia utilizada no processo.

A elevação da temperatura também é um fator que contribui para o aumento da difusividade;

- O modelo numérico unidimensional, com condição de contorno do primeiro tipo, descreve adequadamente a secagem contínua e intermitente do arroz em casca considerando-se apenas o tempo efetivo de operação;
- A comparação entre as cinéticas de secagem e os parâmetros obtidos com as soluções analíticas e numéricas indica que os dois resultados são equivalentes, pressupondo difusividade e volume constantes durante todo o processo. Logo, os resultados obtidos da solução numérica apresenta consistência satisfatória, sendo fisicamente coerente;
- As secagens intermitentes apresentaram uma melhor distribuição de umidade para o mesmo tempo de operação efetiva quando comparadas com a secagem contínua, o que possibilita afirmar que a intermitência permite tempo para que o transporte de umidade ocorra de forma mais rápida e homogênea durante o período de têmpera.

5.1 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar um modelo de difusão que considere o encolhimento do sólido e a difusividade efetiva de massa variável;
- Realizar experimentos de secagem intermitente utilizando diferentes razões de intermitência;
- Propor modelos matemáticos para o estudo da secagem intermitente incluindo o período de têmpera.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABASI, S.; MOUSAVI, S. M.; MOHEBI, M.; KIANI, S. **Effect of Time and Temperature on Moisture Content, Shrinkage, and Rehydration of Dried Onion.** Iranian Journal of Chemical Engineering. v.6, n.3, p. 57 - 70, 2009.

AKPINAR, E. K.; BICER, Y. **Mathematical modelling and experimental study on thin layer drying of strawberry.** International Journal of Food Engineering, Oxford, v.2, n.1, 2006.

AQUERRETA, J., IGUAZ, A., ARROQUI, C., VIRSEDA, P. **Effect of high temperature intermittent drying and tempering on rough rice quality.** Journal of Food Engineering, v.80, n.2, p. 611 - 618, 2007.

BARATA, T. S. **Caracterização do consumo de arroz no Brasil: um estudo na Região Metropolitana de Porto Alegre.** 2005. 93 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócios), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Cepan, Porto Alegre, RS, 2005.

BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática.** São Paulo: Editora Contexto, p.389, 2002.

BECK, J. V; COLE, K. D.; HAJI-SHEIKH, A.; LITKOUHI, B. **Heat conduction using green's functions.** New York: Hemisphere Publishing Corporation. Chapter ten: Galerkin-based green's functions and solutions, p. 293 - 335, 1992.

BEEDIE, M. **Energy saving a question of quality.** Dairy Industries International, v.12, n. 27, 1995.

BEVINGTON, P. R.; ROBINSON, D. K. **Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences.** Second ed., WCB-McGraw-Hill, Boston, 1992.

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

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 6, de 16 de fevereiro de 2009. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 fev., Seção 1, p. 3, 2009.

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

CARMO, J. E. F. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos esferoidais oblatos. Estudo de caso: Secagem de lentilhas**. 2004. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

CARMO, J. E. F.; LIMA, A. G. B. **Mass Transfer Inside Oblate Spheroidal Solids: Modelling and simulation**. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 25, n. 1, p. 19 - 26, 2008.

CIHAN, A.; ECE, M.C. **Liquid diffusion model for intermittent drying of rough rice**. Journal of Food Engineering, v. 49, p. 327 - 331, 2001.

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

CHIN, S. K., LAW, C. L. **Product quality and drying characteristics of intermitente heat pump drying of Ganoderma tsugae Murrill**. Drying Technology, v.28, n.12, p.1457 - 1465, 2010.

CHUA, K. J., CHOU, S. K., HO, J. C., MUJUMDAR, A. S., HAWLADER, M. N. A. **Cyclic air temperature drying of guava pieces: effects on moisture and ascorbic acid contents**. Food and Bioproducts Processing, v.78, n.2, p. 72 - 78. 2000a .

CHUA, K. J., MUJUMDAR, A. S., CHOU, S. K., HAWLADER, M. N. A., HO, J. C. **Convective drying of banana, guava and potato pieces: effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color change**. Drying Technology, v.18, n.4, p. 907 - 936, 2000b.

CHUA, K. J., MUJUMDAR, A. S., HAWLADER, M. N. A., CHOU, S. K., HO, J. C. **Convective drying of agricultural products. effect of continuous and stepwise change in drying air temperature.** Drying Technology, v.19, n.8, p.1949 - 1960, 2001.

CHUA, K. J., HAWLADER, M. N. A., CHOU, S. K., HO, J. C. **On the study of time-varying temperature drying-effect on drying kinetics and product quality.** Drying Technology, v.20, n.8, p.1559 - 1577, 2002.

CHUA, K. J., MUJUMDAR, A. S., CHOU, S. K. **Intermittent drying of bioproducts – na overview.** Bioresource Technology, v.90, n.3, p. 285 - 295, 2003.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; SOUSA, K. A.; GONÇALVES, D. N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1089 - 1096, 2011.

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

DEFENDI, R. O.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. **Assessment of dryer performance under intermittent drying of grains in fixed bed.** Engevista, v. 19, n.1, p. 146 - 165, 2017.

DENARDIN, C. C.; WALTER, M.; SILVA, L. P. **Influência do beneficiamento na composição nutricional em farelo de arroz.** In: II Simpósio sul-brasileiro de qualidade de arroz. **Anais...**Pelotas: Abrapós, 2005, 660 p.

DIAMANTE, L. M., IHNS, R., SAVAGE, G. P., VANHANEN, L. **A new mathematical model for thin layer drying of fruits.** International Journal of Food Science and Technology, v. 45, n. 9, p. 1956 - 1962, 2010.

DIÓGENES, A. M. G.; QUEIROZ, A. J. M.; IGUEIRÊDO, R. M. F.; SANTOS, D. C. **Cinética de secagem de grãos de abóbora.** Revista Caatinga, Mossoró, v. 26, n. 1, p. 71-80, Jan.-Mar., 2013

ELIAS, M. C. **Tecnologias para armazenamento e conservação de grãos, em médias e pequenas escalas.** 3ª Ed. Pelotas: Editora Universitária da UFPel, 218p. 2002.

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

ELIAS, M. C. F.; OLIVEIRA, M.; VANIER, N.L.; PARAGINSKI, R. T.; SCHIAVON, R. A. Manejo Tecnológico na pós colheita e inovações. In: ELIAS, M. C. F.; OLIVEIRA, M.; VANIER, N.L. (Ed.). **Qualidade de arroz da pós-colheita ao consumo**. Pelotas: Ed. Universidade da UFPEL, 2012.

FAO - Food and agriculture organization of the United Nations. **FAOSTAT 2018**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#search/rice>. Acesso em: 28 Out. 2018.

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.

FERREIRA, C. M.; YOKOYAMA, L. P. **Cadeia produtiva do arroz na Região Centro-Oeste**. Brasília: Embrapa Produção de Informações, 1999, 110 p.

FERREIRA, C. M.; PINHEIRO, B. S.; SOUZA, I. S. F.; MORAIS, O. P. **Qualidade do arroz no Brasil: Evolução e padronização**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005, 61p.

FIOREZE, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária-UFPB, 2004, 229 p.

FRANCO, C. M. R. **Modelagem, simulação e experimentação da secagem contínua e intermitente de sólidos elipsoidais. Estudo de caso: secagem de grãos de arroz em casca**. 2016. 261 f. Tese (doutorado em engenharia de processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

GALVÃO, I. B. **Estudo teórico-experimental de secagens contínua e intermitente de pedaços de maçã cortados na forma de paralelepípedo**. 2017. 172 f. Tese (Doutorado

em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

GARCIA, D. M.; BARROS, A. C. S. A.; PESKER, S. T.; MENEZES, N. L. **A Secagem de sementes**. Ciência Rural, Santa Maria, v.34, n.2, p.603 - 608, 2004.

GOLMOHAMMADI, M.; FOROUGH-DAHR, M.; RAJABI-HAMANEH, M.I; SHOJAMORADI, A.; HASHEMI, S. **Study on Drying Kinetics of Paddy Rice: Intermittent Drying**. Iran. J. Chem. Chem. Eng. v. 35, n. 3, p. 105 - 117, 2016.

GOMES, A. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação. 899 p. 2004.

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

GRIMÉ, W. E. **Botany of the Black Americas**. St. Clair Shores, Scholarly Press, 1976.

HO, J. C., CHOU, S. K., CHUA, K. J., MUJUMDAR, A. S., HAWLADER, M. N. A. **Analytical study of cyclic temperature drying: effect on drying kinetics and product quality**. Journal of Food Engineering v.51, n.1, p. 65 - 75, 2002.

HOLOWATY, S. A.; RAMALLO, L. A.; SCHMALKO, M. E. **Intermittent drying simulation in a deep bed dryer of yerba maté**. Journal of Food Engineering, v. 111, n.1, p. 110 - 114, 2012.

JULIANO, B. O. **Rice in human nutrition**. Rome. FAO, 1993. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/t0567e/T0567E00.htm#Contents>. Acesso em: 18 Novembro, 2018.

KALETA, A., GÓRNICKI, K. **Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer**. International Journal of Food Science and Technology, v. 45, n. 5, p. 891 - 898, 2010.

KENNEDY, G.; BURLINGAME, B.; NGUYEN, N. **Nutrient impact assessment of rice in major rice-consuming countries.** Internacional Rice Commission Newsletter, Roma, v. 51, p. 33 - 42, 2002.

KOWALSKI, S.J., PAWŁOWSKI, A. **Energy consumption and quality aspect by intermittent drying.** Chemical Engineering and Processing: Process Intensification v.50 n.4, p. 384 - 390, 2011.

KUDRA, T. **Energy aspects in drying.** Drying Technology, v.22, n.5, p. 917 - 932, 2004.

KUMAR, C., KARIM, A., JOARDDER, M. U. H., MILLER, G. J. **Modeling heat and mass transfer process during convection drying of fruit.** In: The 4th international conference on computational methods, Gold Coast, Australia, 2012.

KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDDER, M. U. H. **Intermittent drying of food products: A critical review.** Journal of Food Engineering, v. 121, p. 48 - 57, 2014.

LABUZA, T.P., SIMON, I.B. **Surface Tension Effects During Dehydration. Air Drying of Apple Slices.** Food Technology, v. 24, p.712 - 715, 1970.

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

LIMA, A. G. B.; NEBRA, S. A., **The finite-volume approach for the solution of the transient diffusion equation applied to prolate spheroidal solids.** Drying Technology, v. 18, v. 1-2, p. 21 - 48, 2000.

LIMA, I. F., FRANCO, C. M. R. **Equação de difusão em coordenadas esféricas aplicada em processos de secagem.** In: Anais do Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências - CONAPESC, 1, Campina Grande, Brasil, 2018.

LINS, M. A. A. **Determinação de parâmetros termo-físicos em produtos pastosos durante processos de transferência de calor.** 2013, 262 f. Tese (Doutorado em

Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

LUIKOV, A. V. **Analytical heat diffusion theory**. Academic Press, Inc. Ltd, London, 685 p. 1968.

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

MARTINS, E. A. S.; GONELI, A. L. D.; GONÇALVES, A. A.; FILHO, C. P. H.; SIQUEIRA, V. C.; OBA, G. C. **Drying kinetics of blackberry leaves**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.22, n.8, p. 570 - 576, 2018.

MENDONÇA, A. P.; SAMPAIO, P. T. B.; ALMEIDA, F. A. C.; FERREIRA, R. F.; NOVAIS, J. M. **Determinação das curvas de secagem das sementes de andiroba em secador solar**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.19, n.4, p.382 - 387, 2015.

MERCALI, G. D., TESSARO, I. C., NORENA, C. P. Z., MARCZAK, L. D. F. **Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum*, shum.)**. International Journal of Food Science and Technology, v.45, n. 11, p. 2281 - 2289, 2010.

MCGEE, Harold. **Comida & cozinha: Ciência e Cultura da Culinária**. 2. ed. São Paulo: Editora WMF Martins Fontes, 2014.

MORAES, M. L. B. **Comportamento da pressão estática e da frente de secagem em uma coluna de sementes de arroz**. 2000. 50 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2000.

MORAIS, S. J. S.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. **Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)**, Revista Ciência Agronômica, v. 44, n. 3, p. 455 - 463, 2013.

PAN, Y.K., ZHAO, L.J., HU, W.B. **The effect of tempering-intermittent drying on quality and energy of plant materials.** Drying Technology, v.17, n.9, p.1795 - 1812, 1998.

PATANKAR, S. V.: **Numerical heat transfer and fluid flow.** New York: Hemisphere Publishing Corporation, 193 p.1980.

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 de Outubro de 2018.

PEREIRA, J. A. **O arroz-vermelho cultivado no Brasil.** Teresina: Embrapa Meio-Norte, 90 p., 2004.

PEREIRA, J. A.; BASSINELLO, P. Z.; CUTRIM, V. A.; RIBEIRO, V. Q. **Comparação entre características agrônômicas, culinárias e nutricionais em variedades de arroz branco e vermelho.** Revista Caatinga, Mossoró, v. 22, n. 1, p. 243-248, Jan./Mar. 2009.

QUIRIJNS, E.J. **Modelling and dynamic optimisation of quality indicator profiles during drying.** s.n. v.1., 2006.

REEDS, J. S. **Drying,** ASM International Handbook Committee, 1991, p. 131-134.

RODRIGUES, M. E. A.; ALMEIDA, F. A. C.; GOUVEIA, J. P. G.; SILVA, M. M. **Avaliação da temperatura e velocidade do ar na secagem de goiaba.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.4, n.2, p.141 - 147, 2002.

RODRIGUES, A. F. **Modelagem matemática do estudo experimental das secagens contínua e intermitente de bananas.** 2015. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2015.

SANTOS, I. B. **Transporte de calor e massa em sólidos com forma arbitrária via método integral baseado em Galerkin: Modelagem e simulação.** 2013. 140 f. Tese

(Doutorado em Engenharia de Processos), Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

SANTOS, D. C.; OLIVEIRA, E. N. A.; **Cinética de secagem de grãos de arroz-vermelho**. Rev. Acad., Ciênc. Agrár. Ambient, Curitiba, v. 11, Supl. 2, p. 535 - 543, 2013.

SILVA, J. S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. ed. 19, Juiz de Fora: Instituto Maria, 500p. 1995.

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

SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 560 p. 2008.

SILVA, W. P.; MATA, M. E. R. M. C.; SILVA, C. D. P. S.; GUEDES, M. A. LIMA, A. G. **B. Determinação da difusividade e da energia de ativação para feijão macassar (*vigna unguiculata* (L.) walp.), variedade sempre-verde, com base no comportamento da secagem**. Engenharia Agrícola, v. 28, n. 2, p. 325 - 333, 2008.

SILVA, W. P.; PRECKER, J. W.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, D. D. P. S. **Determination of the effective diffusivity via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea**. Journal of Food Engineering 95, p. 298 - 304, 2009.

SILVA, W.P.; SILVA, C. M. D. P. S. **LAB Fit Curve Fitting Software, V.7.2.46** (2009a); disponível em: www.labfit.net, acesso em: Outubro/2018.

SILVA, W.P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Prescribed Adsorption-Desorption Software**, (2009b), disponível em <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Prescribed.htm>, e acessado em Outubro de 2018.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Convective Adsorption-Desorption Software**, (2009c). Disponível em <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Convectived.htm>, e acessado em Outubro de 2018.

SILVA, C. M. D. P. da S. **Difusão de massa em corpos cilíndricos: modelagem, soluções analíticas e numéricas e aplicação na secagem de bananas**. 2010. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P.; LINS, M. A. A. **Determination of expressions for the thermal diffusivity of canned foodstuffs by the inverse method and numerical simulations of heat penetration**. International Journal of Food Science and Technology, v. 46, n. 4, p. 811 - 818, 2011.

SILVA, L. D.; **Técnicas analíticas e numéricas para a Secagem de sólidos na forma de paralelepípedo: Uma abordagem tridimensional**. 2012. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SILVA, W. P., SILVA, C. M. D. P. S., FARIAS, V. S. O., GOMES, J. P. **Diffusion models to describe the drying process of peeled bananas: optimization and simulation**. Drying Technology, v. 30, n. 2, p. 164 - 174, 2012.

SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, W. P.; FARIAS, V. S. O.; GOMES, J. P. **Effective diffusivity and convective mass transfer coefficient during the drying of bananas**. Engenharia Agrícola, v.32 n.2, p.342 - 353, 2012.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; SOUSA, J. A. R.; FARIAS, V. S. O. **Empirical na diffusion models to describe water transpor tinto chickpea (Cicer arietinum L.)**. Journal of Food Engineering, v. 48, n. 2, p. 267 - 273, 2013.

SILVA, E. F. M. **Modelos empíricos e difusivos para a Descrição da secagem de bananas**. 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

SILVA, W. P. S.; SILVA, C. M. D. P. S.; GAMA, F. J. A.; GOMES, J. P. **Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas.** Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. v. 13, p. 67 - 74, 2014.

SILVA, W. P.; RODRIGUES, A. F.; SILVA, C. M. D. P. S.; CASTRO, D. S.; GOMES, J. P. **Comparison between continuous and intermittent drying of whole bananas using empirical and diffusion models to describe the processes.** Journal of Food Engineering, v. 166, p. 230 - 236, 2015.

SILVA, W. P.; RODRIGUES, A. F.; SILVA, C. D. P. S.; GOMES, J. P. **Numerical approach to describe continuous and intermittent drying including the tempering period: Kinetics and spatial distribution of moisture,** Drying Technology, v. 35, n. 3, p. 272 - 280, 2016.

SOARES, M. F. L. **Produção de arroz vermelho no Vale do Piancó: Revisão bibliográfica.** 2014. 22 f. Monografia (Especialização em Fundamentos da Educação: Práticas pedagógicas interdisciplinares). Universidade Estadual da Paraíba, Itapetina, 2014.

SOZZI, G.; RAMOS, D. S. **Avaliação do ágio no preço da energia convencional no mercado brasileiro de contratos de curto prazo: metodologia e aplicação.** Revista Espaço Ciência, v.22, p.24, 2015.

STORCK, C. R. **Variação na composição química em grãos de arroz submetidos a diferentes beneficiamentos.** 2004. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004.

TAYLOR, J. R. **An introduction to error analysis. Sausalito.** California: University Science Books, 2nd Edition, 1997.

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

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

VILLAR, G. C. **Estudo do desempenho de secador convectivo de bandejas para a secagem de bananas: análise da influência das variáveis operacionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), 1999, 75 f. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1999.

VILELA, C. A. A.; ARTUR, P. O. **Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v.28, p. 387 - 394, 2008.

VIEIRA, N. R. A.; CARVALHO, J. L. V. Qualidade Tecnológica. In: VIEIRA, N. R. A.; SANTOS, A. B.; SANT'ANA, E. P. **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, cap. 21, p. 582 - 604. 1999.

VIEIRA, N. R. A.; RABELO, R. R. Qualidade tecnológica. In: SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. **A cultura do arroz no Brasil**. 2. ed. Santo Antônio da Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, cap. 23. p. 869 - 900, 2006.

YANG, Z.; ZHU, E.; ZHU, Z.; WANG, J.; LI, S. **A comparative study on intermittent heat pump drying process of Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.ssp) seeds**. Food and Bioproducts Processing, v. 91, n. 4, p. 381 - 388, 2013.

ZANÃO, C. F. P., CANNIATTI-BRAZACA, S. G. C.; PIVA, C. P.; ARTHUR, V.; SARMENTO, S. B. S. **Avaliação das características nutricionais do arroz comum (*Oryza Sativa* L.) Irradiado**. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ E VIII REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 2006, Brasília. Anais... Brasília: - RENAPA, 2006.

ZEKI, B., **Dehydration**. Food Process Engineering and Technology. Academic Press, San Diego, pp. 459 - 510, 2009.

ZHU, Y., PAN, Z., MCHUGH, T. H., BARRETT, D. M. **Processing and quality characteristics of apple slices processed under simultaneous infrared dryblanching**

and dehydration with intermittent heating. Journal of Food Engineering, v. 97, n.1, p.8-16, 2010.

APÊNDICE A

São apresentadas neste apêndice, as tabelas contendo os resultados experimentais realizados neste trabalho.

Tabela A1 - Dados experimentais da secagem contínua do arroz em casca para a temperatura de 50°C.

| t (tempo) | \bar{X}^* (b.s) |
|-----------|-------------------|
| 0 | 1,000 |
| 5 | 0,847 |
| 10 | 0,772 |
| 15 | 0,748 |
| 20 | 0,708 |
| 25 | 0,672 |
| 30 | 0,640 |
| 35 | 0,611 |
| 40 | 0,581 |
| 45 | 0,553 |
| 50 | 0,529 |
| 60 | 0,483 |
| 70 | 0,445 |
| 80 | 0,408 |
| 90 | 0,375 |
| 100 | 0,348 |
| 115 | 0,310 |
| 130 | 0,280 |
| 145 | 0,255 |
| 160 | 0,233 |
| 180 | 0,209 |
| 200 | 0,187 |
| 220 | 0,171 |
| 250 | 0,150 |
| 280 | 0,132 |
| 310 | 0,116 |
| 350 | 0,102 |
| 400 | 0,087 |
| 460 | 0,074 |
| 520 | 0,064 |
| 580 | 0,056 |
| 670 | 0,051 |

| | |
|------|-------|
| 760 | 0,047 |
| 850 | 0,040 |
| 940 | 0,038 |
| 1060 | 0,031 |
| 1180 | 0,030 |
| 1300 | 0,027 |
| 1420 | 0,022 |
| 1540 | 0,014 |
| 1660 | 0,010 |
| 1780 | 0,008 |
| 1900 | 0,003 |
| 2020 | 0,000 |

Tabela A2 - Dados experimentais da secagem contínua do arroz em casca para a temperatura de 70°C.

| t (tempo) | \bar{X}^* (b.s) |
|-----------|-------------------|
| 0 | 1,000 |
| 5 | 0,773 |
| 10 | 0,696 |
| 15 | 0,625 |
| 20 | 0,566 |
| 25 | 0,517 |
| 30 | 0,476 |
| 35 | 0,437 |
| 40 | 0,406 |
| 45 | 0,375 |
| 50 | 0,348 |
| 60 | 0,304 |
| 70 | 0,264 |
| 80 | 0,237 |
| 90 | 0,218 |
| 100 | 0,201 |
| 115 | 0,178 |
| 130 | 0,160 |
| 145 | 0,146 |
| 160 | 0,135 |
| 180 | 0,122 |
| 210 | 0,104 |
| 250 | 0,086 |
| 300 | 0,071 |
| 360 | 0,056 |

| | |
|------|-------|
| 420 | 0,048 |
| 480 | 0,039 |
| 540 | 0,032 |
| 600 | 0,024 |
| 690 | 0,017 |
| 780 | 0,012 |
| 870 | 0,006 |
| 990 | 0,001 |
| 1110 | 0,000 |

Tabela A3 - Dados experimentais da secagem intermitente do arroz em casca com $t_{in} = 10$ min e temperatura de 50°C.

| T (tempo) | \bar{X}^* (b.s) | 115 | 0,521 | 360 | 0,229 |
|-----------|-------------------|-----|-------|-----|-------|
| 0 | 1,000 | 120 | 0,520 | 365 | 0,192 |
| 2 | 0,896 | 122 | 0,486 | 370 | 0,184 |
| 4 | 0,855 | 124 | 0,472 | 380 | 0,205 |
| 6 | 0,825 | 126 | 0,459 | 390 | 0,214 |
| 8 | 0,799 | 128 | 0,452 | 395 | 0,178 |
| 10 | 0,781 | 130 | 0,443 | 400 | 0,170 |
| 15 | 0,783 | 140 | 0,457 | 410 | 0,191 |
| 20 | 0,785 | 150 | 0,461 | 420 | 0,200 |
| 25 | 0,785 | 155 | 0,406 | 425 | 0,166 |
| 30 | 0,782 | 160 | 0,384 | 430 | 0,157 |
| 32 | 0,739 | 170 | 0,403 | 440 | 0,180 |
| 34 | 0,716 | 180 | 0,406 | 450 | 0,187 |
| 36 | 0,699 | 185 | 0,356 | 455 | 0,156 |
| 38 | 0,684 | 190 | 0,337 | 460 | 0,148 |
| 40 | 0,666 | 200 | 0,356 | 470 | 0,169 |
| 45 | 0,673 | 210 | 0,361 | 480 | 0,177 |
| 50 | 0,677 | 215 | 0,317 | 485 | 0,144 |
| 55 | 0,678 | 220 | 0,300 | 490 | 0,135 |
| 60 | 0,676 | 230 | 0,321 | 500 | 0,159 |
| 62 | 0,640 | 240 | 0,326 | 510 | 0,167 |
| 64 | 0,623 | 245 | 0,284 | 515 | 0,136 |
| 66 | 0,606 | 250 | 0,265 | 520 | 0,127 |
| 68 | 0,595 | 260 | 0,285 | 530 | 0,152 |
| 70 | 0,579 | 270 | 0,290 | 540 | 0,159 |
| 75 | 0,586 | 275 | 0,251 | 545 | 0,129 |
| 80 | 0,591 | 280 | 0,241 | 550 | 0,122 |
| 85 | 0,591 | 290 | 0,262 | 560 | 0,142 |
| 90 | 0,592 | 300 | 0,268 | 570 | 0,152 |
| 92 | 0,555 | 305 | 0,229 | 575 | 0,122 |

| | | | | | |
|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| 94 | 0,539 | 310 | 0,219 | 580 | 0,114 |
| 96 | 0,526 | 320 | 0,241 | 590 | 0,137 |
| 98 | 0,514 | 330 | 0,246 | 600 | 0,145 |
| 100 | 0,503 | 335 | 0,210 | 605 | 0,115 |
| 105 | 0,514 | 340 | 0,201 | 610 | 0,107 |
| 110 | 0,520 | 350 | 0,221 | 620 | 0,132 |

| T (tempo) | \bar{X}^* (b.s) | 940 | 0,062 | 1265 | 0,028 |
|-----------|-------------------|------|-------|------|-------|
| 630 | 0,139 | 950 | 0,087 | 1270 | 0,023 |
| 635 | 0,107 | 960 | 0,096 | 1280 | 0,046 |
| 640 | 0,102 | 965 | 0,063 | 1290 | 0,055 |
| 650 | 0,127 | 970 | 0,056 | 1295 | 0,026 |
| 660 | 0,133 | 980 | 0,083 | 1300 | 0,022 |
| 665 | 0,101 | 990 | 0,091 | 1310 | 0,045 |
| 670 | 0,097 | 995 | 0,060 | 1320 | 0,053 |
| 680 | 0,121 | 1000 | 0,053 | 1325 | 0,025 |
| 690 | 0,130 | 1010 | 0,078 | 1330 | 0,021 |
| 695 | 0,102 | 1020 | 0,086 | 1340 | 0,043 |
| 700 | 0,098 | 1025 | 0,054 | 1350 | 0,052 |
| 710 | 0,121 | 1030 | 0,049 | 1355 | 0,025 |
| 720 | 0,128 | 1040 | 0,074 | 1360 | 0,019 |
| 725 | 0,096 | 1050 | 0,082 | 1370 | 0,045 |
| 730 | 0,089 | 1055 | 0,053 | 1380 | 0,053 |
| 740 | 0,114 | 1060 | 0,045 | 1385 | 0,025 |
| 750 | 0,123 | 1070 | 0,071 | 1390 | 0,019 |
| 755 | 0,090 | 1080 | 0,080 | 1400 | 0,046 |
| 760 | 0,082 | 1085 | 0,047 | 1410 | 0,053 |
| 770 | 0,110 | 1090 | 0,041 | 1415 | 0,025 |
| 780 | 0,119 | 1100 | 0,064 | 1420 | 0,019 |
| 785 | 0,086 | 1110 | 0,075 | 1430 | 0,043 |
| 790 | 0,079 | 1115 | 0,043 | 1440 | 0,053 |
| 800 | 0,104 | 1120 | 0,037 | 1445 | 0,024 |
| 810 | 0,114 | 1130 | 0,061 | 1450 | 0,018 |
| 815 | 0,081 | 1140 | 0,069 | 1460 | 0,043 |
| 820 | 0,074 | 1145 | 0,039 | 1470 | 0,050 |
| 830 | 0,101 | 1150 | 0,034 | 1475 | 0,023 |
| 840 | 0,110 | 1160 | 0,058 | 1480 | 0,017 |
| 845 | 0,077 | 1170 | 0,067 | 1490 | 0,041 |
| 850 | 0,071 | 1175 | 0,036 | 1500 | 0,049 |
| 860 | 0,099 | 1180 | 0,030 | 1505 | 0,020 |
| 870 | 0,106 | 1190 | 0,056 | 1510 | 0,016 |
| 875 | 0,074 | 1200 | 0,065 | 1520 | 0,040 |

| | | | | | |
|-----|-------|------|-------|------|-------|
| 880 | 0,068 | 1205 | 0,033 | 1530 | 0,046 |
| 890 | 0,095 | 1210 | 0,028 | 1535 | 0,019 |
| 900 | 0,102 | 1220 | 0,051 | 1540 | 0,014 |
| 905 | 0,072 | 1230 | 0,060 | 1550 | 0,037 |
| 910 | 0,066 | 1235 | 0,030 | 1560 | 0,044 |
| 920 | 0,092 | 1240 | 0,025 | 1565 | 0,017 |
| 930 | 0,099 | 1250 | 0,049 | 1570 | 0,012 |
| 935 | 0,068 | 1260 | 0,056 | 1580 | 0,035 |

| | | | | | |
|-----------|-------------------|------|-------|------|-------|
| T (tempo) | \bar{X}^* (b.s) | 1720 | 0,005 | 1865 | 0,005 |
| 1590 | 0,043 | 1730 | 0,028 | 1870 | 0,000 |
| 1595 | 0,017 | 1740 | 0,035 | 1880 | 0,023 |
| 1600 | 0,012 | 1745 | 0,008 | 1890 | 0,030 |
| 1610 | 0,035 | 1750 | 0,005 | 1895 | 0,003 |
| 1620 | 0,043 | 1760 | 0,026 | 1900 | 0,001 |
| 1625 | 0,016 | 1770 | 0,034 | 1910 | 0,023 |
| 1630 | 0,010 | 1775 | 0,008 | 1920 | 0,030 |
| 1640 | 0,037 | 1780 | 0,004 | 1925 | 0,004 |
| 1650 | 0,044 | 1790 | 0,026 | 1930 | 0,000 |
| 1655 | 0,014 | 1800 | 0,032 | 1940 | 0,024 |
| 1660 | 0,009 | 1805 | 0,005 | 1950 | 0,031 |
| 1670 | 0,033 | 1810 | 0,003 | 1955 | 0,004 |
| 1680 | 0,041 | 1820 | 0,024 | 1960 | 0,000 |
| 1685 | 0,009 | 1830 | 0,032 | | |
| 1690 | 0,006 | 1835 | 0,005 | | |
| 1700 | 0,031 | 1840 | 0,002 | | |
| 1710 | 0,037 | 1850 | 0,023 | | |
| 1715 | 0,010 | 1860 | 0,031 | | |

Tabela A4 - Dados experimentais da secagem intermitente do arroz em casca com $t_{in} = 10$ min e temperatura de 70°C.

| | | | | | |
|----------|-------------------|-----|-------|-----|-------|
| t(tempo) | \bar{X}^* (b.s) | 68 | 0,425 | 160 | 0,233 |
| 0 | 1,000 | 70 | 0,410 | 170 | 0,262 |
| 2 | 0,836 | 75 | 0,425 | 180 | 0,273 |
| 4 | 0,778 | 80 | 0,433 | 185 | 0,217 |
| 6 | 0,737 | 85 | 0,437 | 190 | 0,199 |
| 8 | 0,700 | 90 | 0,439 | 200 | 0,230 |
| 10 | 0,665 | 92 | 0,393 | 210 | 0,241 |
| 15 | 0,673 | 94 | 0,376 | 215 | 0,187 |
| 20 | 0,677 | 96 | 0,361 | 220 | 0,175 |
| 25 | 0,679 | 98 | 0,348 | 230 | 0,206 |
| 30 | 0,681 | 100 | 0,334 | 240 | 0,215 |

| | | | | | |
|-----|-------|-----|-------|------|-------|
| 32 | 0,621 | 105 | 0,354 | 245 | 0,168 |
| 34 | 0,592 | 110 | 0,362 | 250 | 0,157 |
| 36 | 0,563 | 115 | 0,366 | 260 | 0,187 |
| 38 | 0,537 | 120 | 0,372 | 270 | 0,198 |
| 40 | 0,515 | 122 | 0,329 | 275 | 0,151 |
| 45 | 0,526 | 124 | 0,314 | 280 | 0,140 |
| 50 | 0,532 | 126 | 0,302 | 290 | 0,169 |
| 55 | 0,536 | 128 | 0,291 | 300 | 0,178 |
| 60 | 0,540 | 130 | 0,280 | 305 | 0,136 |
| 62 | 0,487 | 140 | 0,309 | 310 | 0,125 |
| 64 | 0,464 | 150 | 0,319 | 320 | 0,155 |
| 66 | 0,444 | 155 | 0,256 | 330 | 0,166 |
| 335 | 0,120 | 670 | 0,045 | 1010 | 0,044 |
| 340 | 0,111 | 680 | 0,078 | 1020 | 0,054 |
| 350 | 0,143 | 690 | 0,088 | 1025 | 0,014 |
| 360 | 0,153 | 695 | 0,046 | 1030 | 0,012 |
| 365 | 0,110 | 700 | 0,041 | 1040 | 0,043 |
| 370 | 0,102 | 710 | 0,072 | 1050 | 0,052 |
| 380 | 0,132 | 720 | 0,082 | 1055 | 0,015 |
| 390 | 0,143 | 725 | 0,043 | 1060 | 0,010 |
| 395 | 0,100 | 730 | 0,037 | 1070 | 0,039 |
| 400 | 0,093 | 740 | 0,069 | 1080 | 0,047 |
| 410 | 0,123 | 750 | 0,080 | 1085 | 0,012 |
| 420 | 0,134 | 755 | 0,038 | 1090 | 0,008 |
| 425 | 0,094 | 760 | 0,034 | 1100 | 0,037 |
| 430 | 0,086 | 770 | 0,067 | 1110 | 0,048 |
| 440 | 0,117 | 780 | 0,078 | 1115 | 0,007 |
| 450 | 0,125 | 785 | 0,036 | 1120 | 0,004 |
| 455 | 0,085 | 790 | 0,031 | 1130 | 0,035 |
| 460 | 0,081 | 800 | 0,063 | 1140 | 0,046 |
| 470 | 0,111 | 810 | 0,075 | 1145 | 0,006 |
| 480 | 0,122 | 815 | 0,033 | 1150 | 0,002 |
| 485 | 0,080 | 820 | 0,029 | 1160 | 0,034 |
| 490 | 0,074 | 830 | 0,060 | 1170 | 0,044 |
| 500 | 0,104 | 840 | 0,070 | 1175 | 0,004 |
| 510 | 0,114 | 845 | 0,032 | 1180 | 0,000 |
| 515 | 0,073 | 850 | 0,027 | | |
| 520 | 0,068 | 860 | 0,058 | | |
| 530 | 0,096 | 870 | 0,068 | | |
| 540 | 0,108 | 875 | 0,030 | | |
| 545 | 0,067 | 880 | 0,024 | | |
| 550 | 0,061 | 890 | 0,055 | | |
| 560 | 0,091 | 900 | 0,065 | | |
| 570 | 0,101 | 905 | 0,026 | | |

| | | | |
|-----|-------|------|-------|
| 575 | 0,063 | 910 | 0,020 |
| 580 | 0,055 | 920 | 0,054 |
| 590 | 0,085 | 930 | 0,064 |
| 600 | 0,095 | 935 | 0,022 |
| 605 | 0,053 | 940 | 0,018 |
| 610 | 0,051 | 950 | 0,051 |
| 620 | 0,080 | 960 | 0,060 |
| 630 | 0,091 | 965 | 0,019 |
| 635 | 0,052 | 970 | 0,017 |
| 640 | 0,047 | 980 | 0,048 |
| 650 | 0,079 | 990 | 0,057 |
| 660 | 0,089 | 995 | 0,019 |
| 665 | 0,050 | 1000 | 0,014 |

Tabela A5 - Dados experimentais da secagem intermitente do arroz em casca com $t_{in} = 20$ min e temperatura de 50°C.

| | | | | | |
|-----------|-------------------|-----|-------|-----|-------|
| T (tempo) | \bar{X}^* (b.s) | 130 | 0,490 | 315 | 0,249 |
| 0 | 1,000 | 132 | 0,482 | 320 | 0,239 |
| 2 | 0,913 | 134 | 0,473 | 330 | 0,264 |
| 4 | 0,873 | 136 | 0,464 | 340 | 0,275 |
| 6 | 0,842 | 138 | 0,455 | 350 | 0,280 |
| 8 | 0,822 | 140 | 0,446 | 360 | 0,285 |
| 10 | 0,800 | 145 | 0,459 | 365 | 0,236 |
| 12 | 0,783 | 150 | 0,466 | 370 | 0,219 |
| 14 | 0,770 | 155 | 0,471 | 375 | 0,211 |
| 16 | 0,750 | 160 | 0,474 | 380 | 0,200 |
| 18 | 0,735 | 165 | 0,475 | 390 | 0,228 |
| 20 | 0,720 | 170 | 0,477 | 400 | 0,237 |
| 25 | 0,725 | 175 | 0,480 | 410 | 0,243 |
| 30 | 0,731 | 180 | 0,481 | 420 | 0,247 |
| 35 | 0,732 | 182 | 0,444 | 425 | 0,199 |
| 40 | 0,733 | 184 | 0,426 | 430 | 0,188 |
| 45 | 0,734 | 186 | 0,415 | 435 | 0,180 |
| 50 | 0,734 | 188 | 0,404 | 440 | 0,175 |
| 55 | 0,734 | 190 | 0,396 | 450 | 0,197 |
| 60 | 0,733 | 192 | 0,387 | 460 | 0,208 |
| 62 | 0,690 | 194 | 0,381 | 470 | 0,215 |
| 64 | 0,665 | 196 | 0,377 | 480 | 0,218 |
| 66 | 0,647 | 198 | 0,368 | 485 | 0,175 |
| 68 | 0,632 | 200 | 0,362 | 490 | 0,163 |
| 70 | 0,616 | 205 | 0,376 | 495 | 0,154 |
| 72 | 0,604 | 210 | 0,384 | 500 | 0,150 |
| 74 | 0,594 | 215 | 0,388 | 510 | 0,174 |

| | | | | | |
|-----|-------|-----|-------|-----|-------|
| 76 | 0,581 | 220 | 0,394 | 520 | 0,185 |
| 78 | 0,571 | 225 | 0,395 | 530 | 0,192 |
| 80 | 0,562 | 230 | 0,397 | 540 | 0,195 |
| 85 | 0,572 | 235 | 0,399 | 545 | 0,154 |
| 90 | 0,577 | 240 | 0,401 | 550 | 0,144 |
| 95 | 0,581 | 245 | 0,343 | 555 | 0,139 |
| 100 | 0,584 | 250 | 0,322 | 560 | 0,133 |
| 105 | 0,585 | 255 | 0,306 | 570 | 0,158 |
| 110 | 0,585 | 260 | 0,292 | 580 | 0,168 |
| 115 | 0,585 | 270 | 0,315 | 590 | 0,176 |
| 120 | 0,585 | 280 | 0,325 | 600 | 0,181 |
| 122 | 0,549 | 290 | 0,329 | 605 | 0,141 |
| 124 | 0,530 | 300 | 0,332 | 610 | 0,130 |
| 126 | 0,512 | 305 | 0,281 | 615 | 0,124 |
| 128 | 0,505 | 310 | 0,265 | 620 | 0,118 |

| T (tempo) | \bar{X}^* (b.s) | 940 | 0,107 | 1260 | 0,085 |
|-----------|-------------------|------|-------|------|-------|
| 630 | 0,145 | 950 | 0,117 | 1265 | 0,047 |
| 640 | 0,156 | 960 | 0,120 | 1270 | 0,039 |
| 650 | 0,164 | 965 | 0,079 | 1275 | 0,036 |
| 660 | 0,168 | 970 | 0,072 | 1280 | 0,034 |
| 665 | 0,128 | 975 | 0,065 | 1290 | 0,061 |
| 670 | 0,117 | 980 | 0,062 | 1300 | 0,072 |
| 675 | 0,111 | 990 | 0,094 | 1310 | 0,079 |
| 680 | 0,105 | 1000 | 0,101 | 1320 | 0,084 |
| 690 | 0,132 | 1010 | 0,108 | 1325 | 0,045 |
| 700 | 0,143 | 1020 | 0,114 | 1330 | 0,038 |
| 710 | 0,152 | 1025 | 0,073 | 1335 | 0,033 |
| 720 | 0,155 | 1030 | 0,061 | 1340 | 0,030 |
| 725 | 0,116 | 1035 | 0,060 | 1350 | 0,057 |
| 730 | 0,107 | 1040 | 0,056 | 1360 | 0,068 |
| 735 | 0,099 | 1050 | 0,083 | 1370 | 0,074 |
| 740 | 0,097 | 1060 | 0,093 | 1380 | 0,080 |
| 750 | 0,122 | 1070 | 0,098 | 1390 | 0,032 |
| 760 | 0,133 | 1080 | 0,101 | 1400 | 0,026 |
| 770 | 0,140 | 1085 | 0,061 | 1420 | 0,051 |
| 780 | 0,146 | 1090 | 0,052 | 1440 | 0,060 |
| 785 | 0,107 | 1095 | 0,050 | 1450 | 0,027 |
| 790 | 0,096 | 1100 | 0,045 | 1460 | 0,022 |
| 795 | 0,091 | 1110 | 0,071 | 1480 | 0,056 |
| 800 | 0,088 | 1120 | 0,084 | 1500 | 0,066 |
| 810 | 0,113 | 1130 | 0,091 | 1510 | 0,026 |
| 820 | 0,124 | 1140 | 0,095 | 1520 | 0,018 |

| | | | | | |
|-----|-------|------|-------|------|-------|
| 830 | 0,131 | 1145 | 0,055 | 1540 | 0,052 |
| 840 | 0,135 | 1150 | 0,047 | 1560 | 0,063 |
| 845 | 0,099 | 1155 | 0,044 | 1570 | 0,023 |
| 850 | 0,089 | 1160 | 0,039 | 1580 | 0,017 |
| 855 | 0,084 | 1170 | 0,061 | 1600 | 0,050 |
| 860 | 0,081 | 1180 | 0,076 | 1620 | 0,060 |
| 870 | 0,106 | 1190 | 0,083 | 1630 | 0,020 |
| 880 | 0,118 | 1200 | 0,087 | 1640 | 0,012 |
| 890 | 0,125 | 1205 | 0,055 | 1660 | 0,044 |
| 900 | 0,128 | 1210 | 0,045 | 1680 | 0,052 |
| 905 | 0,088 | 1215 | 0,040 | 1690 | 0,013 |
| 910 | 0,080 | 1220 | 0,036 | 1700 | 0,008 |
| 915 | 0,075 | 1230 | 0,060 | 1720 | 0,039 |
| 920 | 0,071 | 1240 | 0,075 | 1740 | 0,049 |
| 930 | 0,097 | 1250 | 0,082 | 1750 | 0,009 |

| T (tempo) | \bar{X}^* (b.s) |
|-----------|-------------------|
| 1760 | 0,004 |
| 1780 | 0,036 |
| 1800 | 0,042 |
| 1810 | 0,007 |
| 1820 | 0,000 |
| 1840 | 0,033 |
| 1860 | 0,041 |
| 1870 | 0,005 |
| 1880 | 0,000 |
| 1900 | 0,031 |
| 1920 | 0,039 |
| 1930 | 0,004 |
| 1940 | 0,000 |

Tabela A6 - Dados experimentais da secagem intermitente do arroz em casca com $t_i = 20$ min e temperatura de 70°C.

| | | | | | |
|-----------|-------------------|-----|-------|-----|-------|
| T (tempo) | \bar{X}^* (b.s) | 78 | 0,370 | 185 | 0,217 |
| 0 | 1,000 | 80 | 0,359 | 190 | 0,192 |
| 2 | 0,846 | 85 | 0,380 | 195 | 0,181 |
| 4 | 0,787 | 90 | 0,389 | 200 | 0,166 |
| 6 | 0,751 | 95 | 0,393 | 210 | 0,212 |
| 8 | 0,713 | 100 | 0,396 | 220 | 0,221 |
| 10 | 0,681 | 105 | 0,400 | 230 | 0,226 |

| | | | | | |
|-----------|-------------------|-----|-------|------|-------|
| 12 | 0,650 | 110 | 0,403 | 240 | 0,232 |
| 14 | 0,621 | 115 | 0,403 | 245 | 0,161 |
| 16 | 0,593 | 120 | 0,405 | 250 | 0,153 |
| 18 | 0,570 | 122 | 0,350 | 255 | 0,145 |
| 20 | 0,545 | 124 | 0,333 | 260 | 0,135 |
| 25 | 0,557 | 126 | 0,320 | 270 | 0,171 |
| 30 | 0,564 | 128 | 0,311 | 280 | 0,180 |
| 35 | 0,568 | 130 | 0,299 | 290 | 0,186 |
| 40 | 0,570 | 132 | 0,289 | 300 | 0,191 |
| 45 | 0,571 | 134 | 0,279 | 305 | 0,133 |
| 50 | 0,572 | 136 | 0,272 | 310 | 0,125 |
| 55 | 0,572 | 138 | 0,264 | 315 | 0,117 |
| 60 | 0,573 | 140 | 0,257 | 320 | 0,109 |
| 62 | 0,509 | 145 | 0,281 | 330 | 0,145 |
| 64 | 0,484 | 150 | 0,288 | 340 | 0,155 |
| 66 | 0,464 | 155 | 0,295 | 350 | 0,160 |
| 68 | 0,448 | 160 | 0,299 | 360 | 0,164 |
| 70 | 0,428 | 165 | 0,304 | 365 | 0,110 |
| 72 | 0,416 | 170 | 0,306 | 370 | 0,103 |
| 74 | 0,399 | 175 | 0,309 | 375 | 0,097 |
| 76 | 0,385 | 180 | 0,311 | 380 | 0,091 |
| T (tempo) | \bar{X}^* (b.s) | 730 | 0,045 | 1220 | 0,012 |
| 390 | 0,123 | 735 | 0,042 | 1240 | 0,050 |
| 400 | 0,134 | 740 | 0,040 | 1260 | 0,060 |
| 410 | 0,140 | 750 | 0,073 | 1270 | 0,012 |
| 420 | 0,144 | 760 | 0,084 | 1280 | 0,010 |
| 425 | 0,091 | 770 | 0,090 | 1300 | 0,047 |
| 430 | 0,085 | 780 | 0,095 | 1320 | 0,054 |
| 435 | 0,079 | 785 | 0,046 | 1330 | 0,011 |
| 440 | 0,074 | 790 | 0,040 | 1340 | 0,008 |
| 450 | 0,106 | 795 | 0,037 | 1360 | 0,044 |
| 460 | 0,114 | 800 | 0,035 | 1380 | 0,054 |
| 470 | 0,122 | 810 | 0,068 | 1390 | 0,009 |
| 480 | 0,126 | 820 | 0,077 | 1400 | 0,005 |
| 485 | 0,076 | 830 | 0,086 | 1420 | 0,043 |
| 490 | 0,070 | 840 | 0,088 | 1440 | 0,053 |
| 495 | 0,064 | 845 | 0,040 | 1450 | 0,008 |
| 500 | 0,059 | 850 | 0,034 | 1460 | 0,004 |
| 510 | 0,094 | 855 | 0,032 | 1480 | 0,043 |
| 520 | 0,104 | 860 | 0,030 | 1500 | 0,050 |
| 530 | 0,111 | 870 | 0,062 | 1510 | 0,004 |
| 540 | 0,116 | 880 | 0,073 | 1520 | 0,000 |
| 545 | 0,068 | 890 | 0,079 | | |
| 550 | 0,063 | 900 | 0,083 | | |

| | | | |
|-----|-------|------|-------|
| 555 | 0,060 | 905 | 0,035 |
| 560 | 0,057 | 910 | 0,031 |
| 570 | 0,091 | 915 | 0,027 |
| 580 | 0,101 | 920 | 0,027 |
| 590 | 0,109 | 940 | 0,065 |
| 600 | 0,114 | 960 | 0,073 |
| 605 | 0,063 | 970 | 0,024 |
| 610 | 0,058 | 980 | 0,022 |
| 615 | 0,055 | 1000 | 0,058 |
| 620 | 0,052 | 1020 | 0,066 |
| 630 | 0,085 | 1030 | 0,023 |
| 640 | 0,098 | 1040 | 0,018 |
| 650 | 0,102 | 1060 | 0,054 |
| 660 | 0,107 | 1080 | 0,065 |
| 665 | 0,057 | 1090 | 0,017 |
| 670 | 0,052 | 1100 | 0,014 |
| 675 | 0,050 | 1120 | 0,051 |
| 680 | 0,047 | 1140 | 0,059 |
| 690 | 0,079 | 1150 | 0,016 |
| 700 | 0,089 | 1160 | 0,012 |
| 710 | 0,096 | 1180 | 0,046 |
| 720 | 0,100 | 1200 | 0,057 |
| 725 | 0,050 | 1210 | 0,013 |

ANEXOS

O SOFTWARE “INFINITE CYLINDER”

A tela inicial do software tem a aparência mostrada através da Figura 1, dada a seguir.

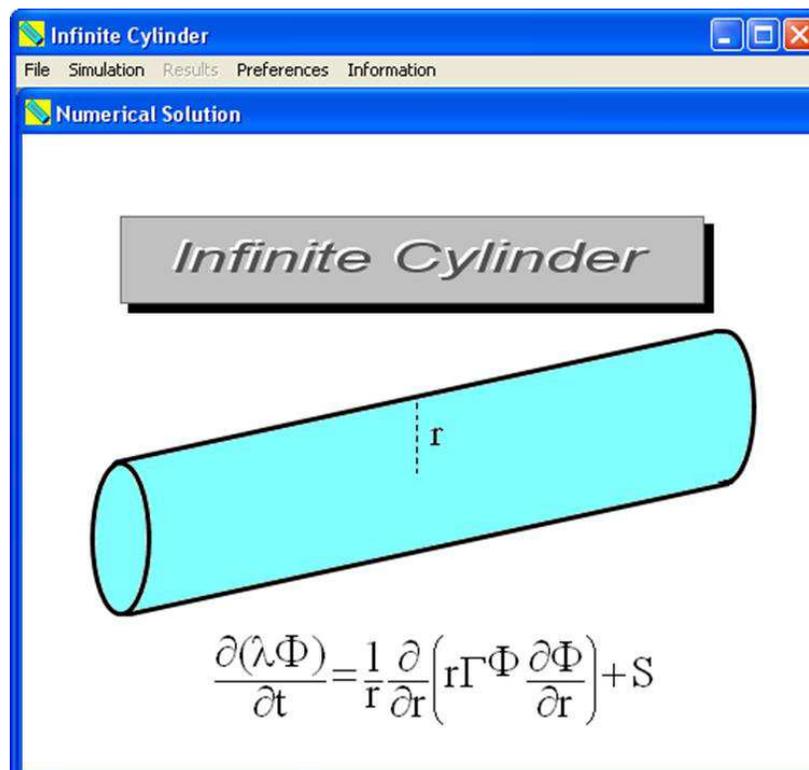


Figura 1 – Tela principal do software “Infinite Cylinder”.

A Equação de difusão apresentada na Figura 1 é resolvida numericamente através do método dos volumes finitos, com uma formulação totalmente implícita. Para problemas de difusão de água, deve-se estabelecer $S = 0$; $\lambda = 1$; $\Gamma^{\Phi} = D_{ef}$ (difusividade) e $\Phi = X$ (teor de umidade). Para os problemas de difusão de calor, $\lambda = 1$ ou $\lambda \rho = c$ conforme se deseja informar a difusividade ($\Gamma^{\Phi} = \alpha$) ou a condutividade térmica ($\Gamma^{\Phi} = k$), respectivamente.

Embora o usuário tenha a opção de interface em Inglês e em Português, ao ser instalado, na primeira execução o software apresenta a língua inglesa nos diálogos. Por isto, nas figuras referentes à apresentação do software, os diálogos também serão apresentados neste idioma. O software foi concebido para ser usado por usuários iniciantes e, para tal, foi criada uma interface gráfica intuitiva, através de menus, e tais menus serão apresentados a seguir.

O MENU “FILE”

O menu “File” é apresentado através da Figura 2.

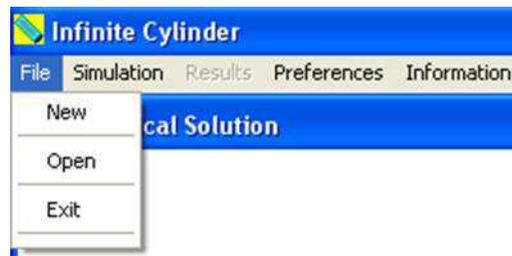


Figura 2 – Itens do menu “File”.

Além da opção “Exit”, que encerra a execução do software, as opções “New” ou “Open”, uma vez clicadas, abrem sequencialmente um conjunto de três caixas de diálogos que requerem todas as informações para que uma simulação seja completamente definida.

No caso da opção “Open”, as caixas de diálogo já apresentam os valores previamente informados no arquivo salvo com o nome escolhido pelo usuário. A primeira caixa de diálogo, denominada “Informações Gerais – Passo 1”, tem a aparência mostrada na Figura 3.

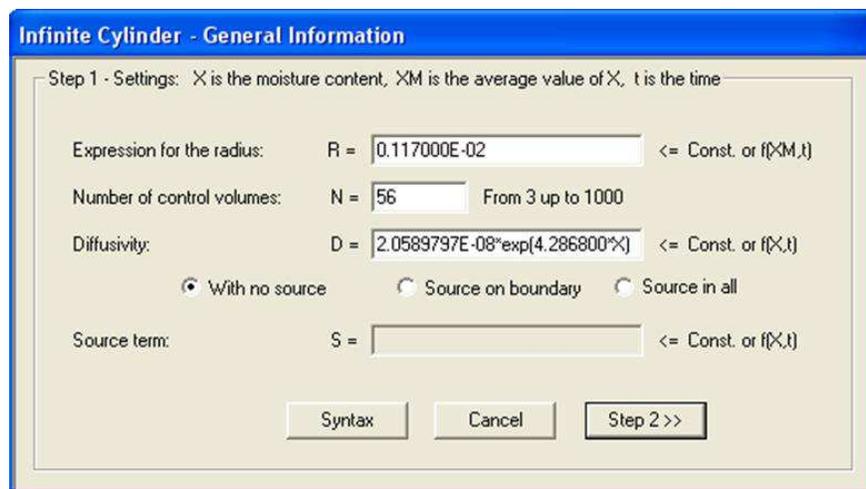


Figura 3 – Primeira caixa de aquisição de dados. Tal caixa de diálogo requer as informações listadas a seguir.

- Raio: deve-se informar um valor constante ou variável. No caso de valor variável, este valor deve ser uma função do teor de umidade médio (ou da temperatura média) ou do tempo de secagem (ou de aquecimento/resfriamento);
- Número de volumes de controle: deve-se informar um número mínimo de 3 até um máximo de 1000 volumes de controle;
- Difusividade: deve-se informar um valor constante ou variável. No caso de valor variável, este valor deve ser uma função do teor de umidade local (ou temperatura local) ou do tempo de secagem. Se tal valor não for conhecido, mas a ser determinado pelo software por otimização, escreva uma expressão ou um valor apenas compatível com o processo. Após sua determinação por otimização, o valor aproximado deve ser substituído no arquivo pelo valor determinado;
- Opções do termo fonte: existem três opções. A primeira é sem termo fonte, a segunda é com termo fonte nos volumes de controle do contorno e a terceira é com termo fonte em todos os volumes de controle;
- Informação do termo fonte: deve-se informar um valor constante ou variável. No caso de valor variável, este valor deve ser uma função do teor de umidade local (ou temperatura local) ou ainda do tempo de secagem.

Clicando no botão “Passo 2” da caixa de diálogo descrita na Figura 3 surge uma nova caixa de diálogo denominada “Informações Gerais – Passo 2”, que pode ser vista na Figura 4.

The image shows a software dialog box titled "Inifinite Cylinder - General Information". The main content area has a light beige background and contains the following text and input fields:

- Initial moisture content: $X_i =$
- Lambda Parameter: $Rho \cdot C_p =$ <= Const. or f(X,t)
- Interval of time: $\Delta t =$
- Number of steps in the time: $N_{st} =$
- Unsteady state for the node: $N_o =$

At the bottom of the dialog, there are four buttons: "<< Step 1", "Syntax", "Cancel", and "Step 3 >>". A note at the top of the dialog reads: "Step 2 - Settings: X is moisture content or temperature, XM is the average value of X".

Figura 4 – Segunda caixa de aquisição de dados.

Nesta caixa de aquisição de dados são requeridas as informações listadas a seguir.

- Teor de umidade inicial (ou temperatura): deve ser uniforme no início do processo;
- Parâmetro lambida: para a temperatura, é o produto da densidade pelo calor específico quando a difusividade $\Gamma^{\Phi} = k$ (condutividade térmica). Este parâmetro deve ser igual a 1 para se determinar a difusividade térmica ($\Gamma^{\Phi} = \alpha$), bem como em problemas de secagem. Para o estudo mais genérico de difusão de calor, este parâmetro pode ter um valor constante ou variável;
- Intervalo de tempo: estabelece o intervalo de tempo para o qual as equações discretizadas serão resolvidas;
- Número de passos no tempo: número de intervalos em que o tempo total de secagem é dividido;
- Acompanhar transiente do nó: define um volume de controle que terá a cinética de secagem (ou de temperatura) acompanhada, além da cinética referente ao teor de umidade médio (ou de temperatura média).

Clicando no botão “Passo 3” da caixa de diálogo descrita na Figura 4, surge uma nova caixa de diálogo denominada “Condição de contorno”, vista na Figura 5.

The image shows a software dialog box titled "Infinite Cylinder - Boundary". It is divided into three sections for defining boundary conditions. The first section, "Moisture Content X", has a label "Moisture content on the boundary:" followed by a text input field containing "X =". The second section, "Flux", has a label "Flux on the boundary:" followed by a text input field containing "Flux =", and a note "(In: positive - Out: negative)". The third section, "Convection", has two labels: "Moisture content:" followed by a text input field containing "Xinf = 0", and "Convective coefficient:" followed by a text input field containing "h = 4.0381445". At the bottom of the dialog are three buttons: "<< Step 2", "Cancel", and "OK".

Figura 5 – Terceira caixa de aquisição de dados.

Nesta caixa de diálogo são requeridas as informações sobre a condição de contorno para o problema simulado, conforme é descrito a seguir.

- Teor de umidade (ou temperatura) prescrito: deve-se informar o valor do teor de umidade no contorno do cilindro infinito;
- Fluxo prescrito: deve-se informar o valor do fluxo, que normalmente é calculado pela expressão no contorno do cilindro infinito;

$$\phi'' = \Gamma^{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \quad \text{ou} \quad \text{Flux} = D \frac{\partial X}{\partial r},$$

- Convecção: deve-se informar o valor do teor de umidade do fluido (ou temperatura) nas vizinhanças do contorno e o coeficiente de transferência convectiva de massa (ou de calor), h. Se h não for conhecido, mas a ser determinado pelo software por otimização, escreva um valor apenas compatível com o processo. Após sua determinação por otimização, o valor aproximado deve ser substituído no arquivo pelo valor determinado;

O MENU “SIMULATION”

O menu “Simulation” é apresentado através da Figura 6.



Figura 6 – Menu “Simulation”.

Uma vez informados um conjunto de dados, o item “Begin Simulation” do menu “Simulation” deve ser clicado. Então, uma caixa de diálogo denominada “Type of the problem” mostra duas opções disponíveis no software: 1) “Simular o problema carregado”

e 2) “Buscar por expressão para a difusividade e o valor do coeficiente de transferência convectivo”. Neste segundo caso, referente a um processo de otimização, dados experimentais serão requeridos. A caixa de diálogo mencionada pode ser vista através da Figura 7.

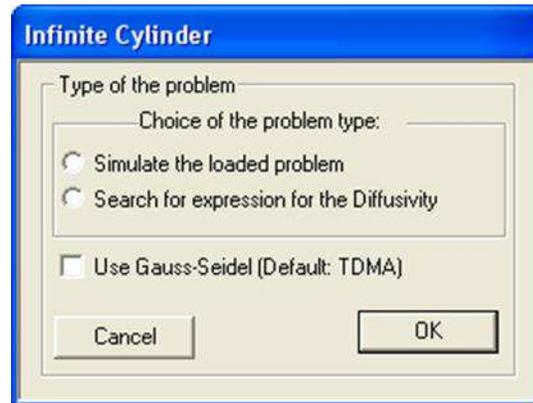


Figura 7 – Tipo do problema a ser simulado.

É interessante observar que existem dois métodos para a resolução dos sistemas de equações lineares resultantes da discretização da equação de difusão: TDMA, que é o método “default”, por ser muito mais rápido que os demais métodos para problemas unidimensionais, e o Gauss-Seidel (que pode ser escolhido clicando na caixa de checagem mostrada).

Menu “Simulation”: Opção “Simulate the loaded problem”

No caso de uma simples simulação, ao marcar a opção “Simulate the loaded problem” e clicar “OK” na caixa de diálogo da Figura 7, o processo é iniciado. Neste caso, os valores dos parâmetros informados para a difusividade e coeficiente de transferência convectivo devem ser os valores reais do processo estudado, e não apenas “compatíveis”. Ao final da simulação, o aspecto do software é mostrado através da Figura 8.

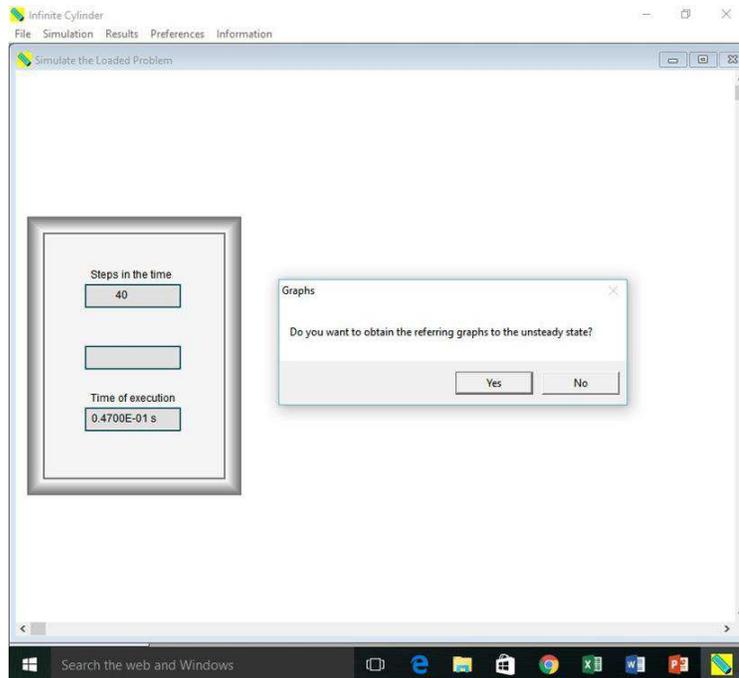


Figura 8 – Aspecto da tela após uma simulação dos dados carregados.

Respondendo “sim” à pergunta, aparece a caixa de diálogo da Figura 9.

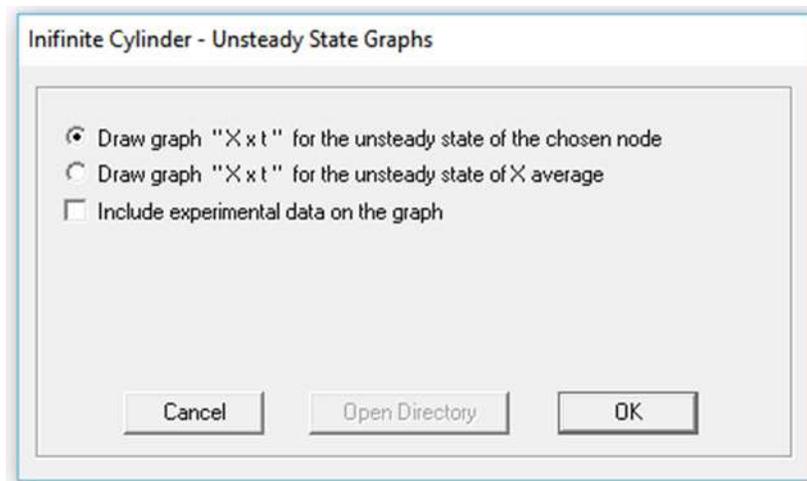


Figura 9 – Opções para desenhar a cinética do processo.

Então, dentre as opções, o usuário deve escolher qual é o gráfico referente à cinética do processo que ele quer desenhar, incluindo ou não os dados experimentais referentes ao problema carregado. A Figura 10 apresenta um gráfico típico para a cinética de

aquecimento do ponto central de um produto colocado em um recipiente cilíndrico durante um tratamento térmico.

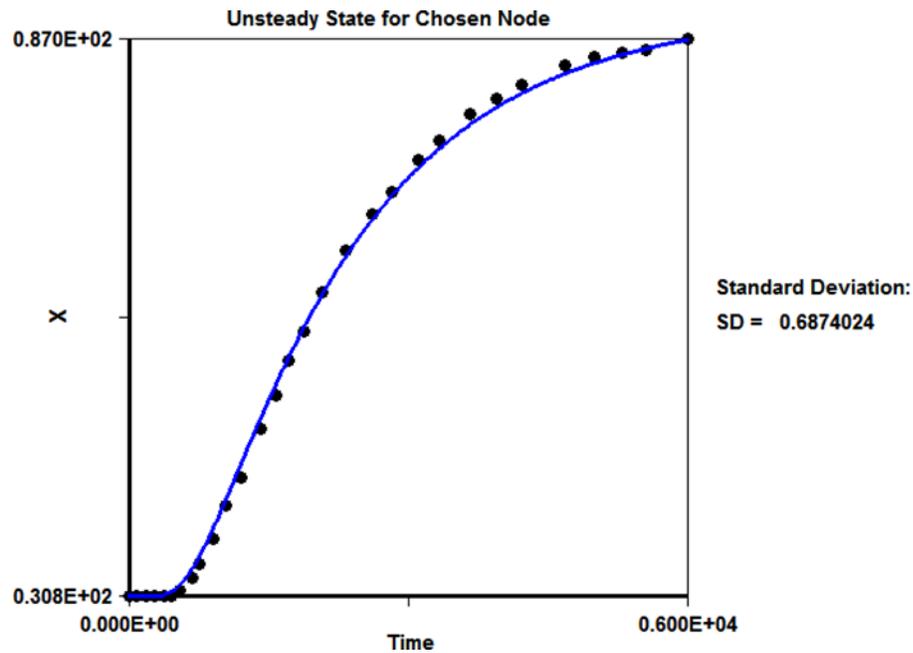


Figura 10 – Cinética de aquecimento: linha simulada e pontos experimentais.

Usando um número de passos de tempo menor que o total no arquivo de dados a ser carregado, pode-se obter não só a cinética do processo até aquele instante (Figura 11(a)), como também a distribuição da grandeza de interesse (teor de umidade local ou temperatura) na secção circular do cilindro infinito, como mostra a Figura 11(b) para 600 s de processo.

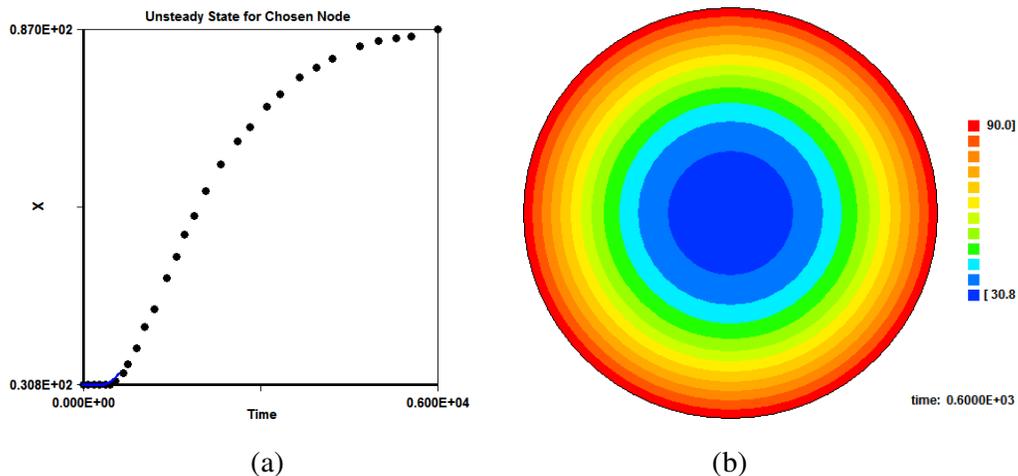


Figura 11 – Em $t = 600$ s: (a) Cinética de aquecimento do ponto central; (b) Distribuição de temperatura na seção reta do cilindro.

Menu “Simulation”: Opção “Search for expression for the Diffusivity”

No caso de busca por uma expressão para a difusividade, mais duas informações são requeridas. Primeiro, deve ser informada a expressão para a difusividade, a ser escolhida entre várias opções disponíveis de funções crescentes, decrescentes ou a função constante, conforme é mostrado na Figura 12. Segundo, devem ser informados os valores iniciais dos parâmetros de processo e o número de passos de tempo para a otimização.

Inifinite Cylinder - Searching for Diffusivity

Choice: D =

| | |
|--|---|
| 1 - <input checked="" type="radio"/> a | 11 - <input type="radio"/> $b \cdot \ln(a \cdot X^{0.5})$ |
| 2 - <input type="radio"/> $a \cdot X + b$ | 12 - <input type="radio"/> $b \cdot \ln(a \cdot X)$ |
| 3 - <input type="radio"/> $a \cdot X^2 + b$ | 13 - <input type="radio"/> $b \cdot \ln(a \cdot X^2)$ |
| 4 - <input type="radio"/> $b \cdot \exp(a \cdot X)$ | 14 - <input type="radio"/> $b \cdot \cosh(a \cdot X^{0.5})$ |
| 5 - <input type="radio"/> $b \cdot \exp(a/X)$ | 15 - <input type="radio"/> $b \cdot \cosh(a \cdot X^2)$ |
| 6 - <input type="radio"/> $b \cdot \exp(a \cdot X^2)$ | 16 - <input type="radio"/> $b / \cosh(a \cdot X)$ |
| 7 - <input type="radio"/> $b \cdot \cosh(a \cdot X)$ | 17 - <input type="radio"/> $b / \cosh(a \cdot X^{0.5})$ |
| 8 - <input type="radio"/> $1 / (a \cdot X + b)$ | 18 - <input type="radio"/> $b / \cosh(a \cdot X^2)$ |
| 9 - <input type="radio"/> $a \cdot X^{0.5} + b$ | 19 - <input type="radio"/> $a \cdot X^{0.5} + b$ |
| 10 - <input type="radio"/> $b \cdot \exp(a \cdot X^{0.5})$ | 20 - <input type="radio"/> $a \cdot X + b$ |

Parameters: Initial Values

a = h =

Division of the time in steps

Number of steps in the time: (from 200 up to 10000)

Attention:
You must put experimental data (t, X, SD), in columns, referring to the search in a file called "Exp.txt" inside of the directory "Experimental".

Figura 12 – Funções para a difusividade e valores iniciais para os parâmetros.

Ao clicar “OK” na caixa de diálogo da Figura 12, o diretório “Experimental” será aberto para que os dados experimentais sejam informados num arquivo chamado “**Exp.txt**” (máximo de 97 pontos experimentais), como é mostrado na Figura 13.

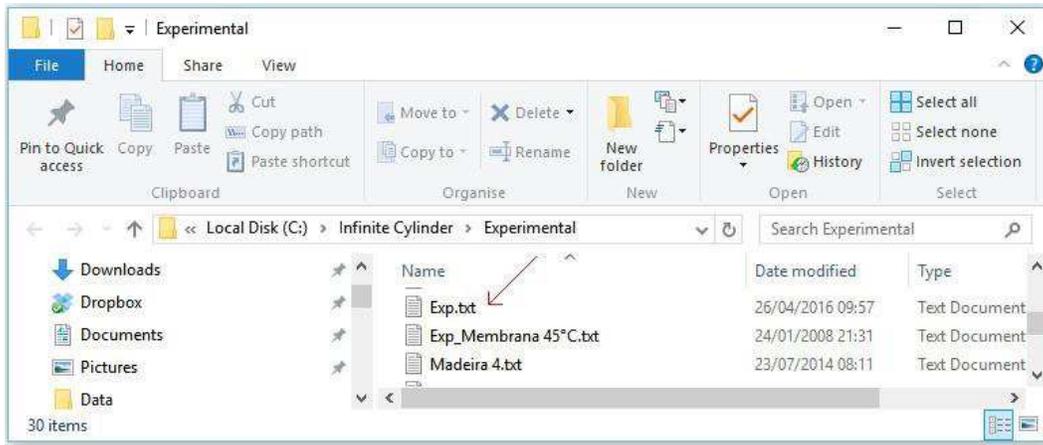


Figura 13 – Diretório “Experimental” onde o conjunto de dados “exp.txt” deve ser colocado.

A estrutura dos dados é em três colunas, na sequência: 1) tempo, 2) teor de umidade (ou temperatura), 3) correspondente peso estatístico. Caso o peso estatístico não tenha sido determinado no experimento, basta atribuir o valor 1 em toda a terceira coluna, como mostrado na Figura 14.

| Time | Moisture/Temperature | Statistical Weight |
|------|----------------------|--------------------|
| 0 | 26 | 1 |
| 2 | 26.1 | 1 |
| 4 | 25.5 | 1 |
| 6 | 23 | 1 |
| 8 | 20.3 | 1 |
| 10 | 17.9 | 1 |
| 12 | 16.1 | 1 |
| 14 | 14 | 1 |
| 16 | 12.5 | 1 |
| 18 | 11.3 | 1 |
| 20 | 10.3 | 1 |
| 22 | 9.2 | 1 |
| 24 | 8.6 | 1 |
| 26 | 7.9 | 1 |
| 28 | 7.3 | 1 |
| 30 | 6.8 | 1 |
| 32 | 6.1 | 1 |
| 34 | 5.7 | 1 |
| 36 | 5.2 | 1 |
| 38 | 4.9 | 1 |
| 40 | 4.5 | 1 |
| 42 | 4.2 | 1 |
| 44 | 3.8 | 1 |
| 46 | 3.6 | 1 |
| 48 | 3.4 | 1 |
| 50 | 3.1 | 1 |
| 52 | 2.9 | 1 |
| 54 | 2.7 | 1 |
| 56 | 2.5 | 1 |
| 58 | 2.3 | 1 |
| 60 | 2.1 | 1 |
| 64 | 1.8 | 1 |
| 66 | 1.6 | 1 |
| 68 | 1.6 | 1 |

Figura 14 – Arquivo de dados “exp.txt” em três colunas: tempo, teor de umidade (ou temperatura) e peso estatístico.

Uma vez informados os dados experimentais, o diretório “**Experimental**” deve ser fechado, e então aparece a caixa de diálogo mostrada na Figura 15.

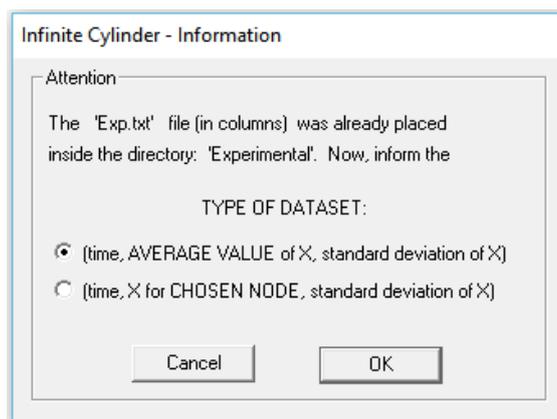


Figura 15 – Escolha se o conjunto de dados é referente ao valor médio do domínio ou ao valor medido em um ponto definido pelo nó escolhido quando a definição do problema foi feita.

Normalmente, para problemas de secagem, o teor de umidade médio é medido e a primeira escolha é a mais adequada. Para problemas envolvendo medidas de temperatura feitas por um termopar colocado em uma dada posição, a segunda escolha é a mais adequada. Ao clicar OK, a otimização em busca dos melhores valores para os parâmetros é iniciada. Se os valores iniciais forem compatíveis com o problema definido, os resultados similares ao da Figura 16 aparecerão.

Finished!

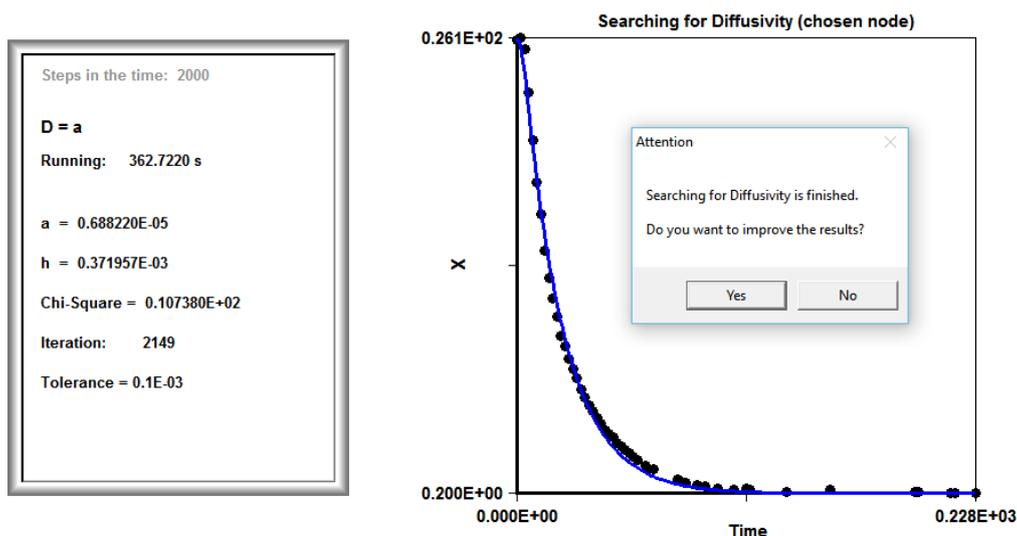


Figura 16 – Resultados típicos para a determinação de parâmetros usando dados experimentais.

Por garantia, clique “sim” à pergunta da caixa de diálogo mostrada na Figura

16, até que a tolerância seja 0.1×10^{-7} . Após isso, respondendo “não”, a otimização é encerrada e os resultados podem ser acessados imediatamente, ou através do menu “Results”, descrito a seguir.

O MENU “RESULTS”

O menu “Results”, que é habilitado somente ao final de uma simulação (ou otimização), apresenta todos os resultados gerados pelo software. Os itens deste menu podem ser vistos através da Fig. 17.

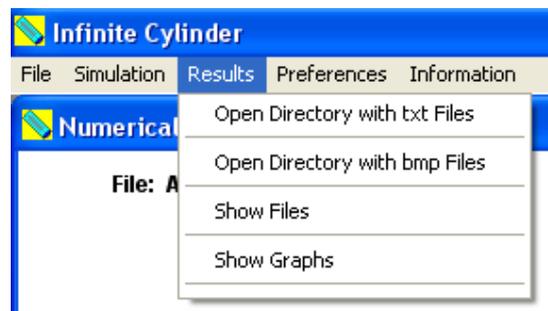


Figura 17 – Itens do menu “Results”.

O item “Open Directory with txt Files” abre o diretório onde são armazenados os arquivos de texto com todas as informações geradas em uma simulação (ou otimização).

No caso da simulação de uma cinética de transporte de água (ou de calor), os arquivos são:

- Data.txt: contém todos os dados informados referentes ao problema simulado;
- Flux on the boundary.txt: contém os valores do fluxo no contorno ao longo do tempo;
- Moisture content on the boundary.txt: contém os valores do teor de umidade (ou de temperatura) no contorno ao longo do tempo;
- Node.txt: contém os valores do teor de umidade (ou de temperatura) ao longo do tempo para o volume de controle especificado;
- Radius.txt: contém os valores do raio do cilindro ao longo do tempo de secagem;
- Unsteady.txt: contém os valores do teor de umidade médio (ou da

temperatura média) ao longo do tempo;

- Diffusivities.txt: contém os valores das difusividades a oeste e a leste de cada volume de controle para o instante final da simulação;
- Moisture Content.txt: contém os valores do teor de umidade (ou da temperatura) de cada volume de controle para o instante final da simulação;
- Radial Distribution.txt: contém os valores do teor de umidade local (ou da temperatura local) em função da posição radial para o instante final da simulação.

Deve ser observado que os arquivos mencionados podem ser abertos logo após a simulação, através do item “Show Files”.

O item “Open Directory with bmp Files” abre o diretório onde são armazenados os arquivos gráficos com todas as informações geradas em uma simulação.

Ainda no caso da simulação de uma cinética de transporte de água (ou de calor), os arquivos gráficos disponíveis são:

- Unsteady for Average.bmp: apresenta o gráfico do teor de umidade médio (ou da temperatura média) em função do tempo de secagem;
- Contour Plot.bmp: apresenta o gráfico de contorno que representa a distribuição radial do teor de umidade (ou de temperatura) para o instante final do processo.

Além destes dois gráficos gerados pelo software, podem-se gerar vários outros gráficos informativos a partir dos arquivos de dados listados anteriormente. Como exemplo, pode-se gerar o gráfico do teor de umidade local (ou da temperatura local) em função da posição radial, com as informações contidas no arquivo “Radial Distribution.txt”.

No caso da determinação de uma expressão para a difusividade e do coeficiente de transferência convectivo, a partir de dados experimentais, os arquivos gerados são os seguintes:

- Optimum.txt: contém a expressão ótima para a difusividade e o valor do coeficiente de transferência convectiva, além dos indicadores estatísticos “coeficiente de determinação” e “qui-quadrado” que determinam a qualidade do

ajuste realizado via otimização;

- Results_a.txt: lista com todos os valores do parâmetro “a” da expressão da difusividade determinados ao longo do processo de minimização do qui-quadrado e ainda os correspondentes valores de R^2 e X^2 ;
- Results_b.txt: apresenta a lista com todos os valores do parâmetro “b” da expressão da difusividade determinados ao longo do processo de minimização do qui-quadrado, e também os correspondentes valores de R^2 e X^2 ;
- Results_c.txt: apresenta a lista com todos os valores do parâmetro “h” determinados ao longo do processo de minimização do qui-quadrado, e também os correspondentes valores de R^2 e X^2 ;
- Results_a_b_c.txt: disponibiliza a lista com todos os valores dos parâmetros “a” e “b” da expressão da difusividade e os valores de “h” determinados ao longo do processo de minimização do qui-quadrado, e também os correspondentes valores de R^2 e X^2 ;
- Unsteady Optimum.txt: contém os valores do teor de umidade médio (ou da temperatura média) ao longo do tempo para os valores ótimos dos parâmetros da difusividade e do coeficiente de transferência convectiva.

No caso de um processo de otimização, o único gráfico gerado é referente à cinética do transporte de água (ou de calor) obtida com os valores ótimos dos parâmetros da difusividade e do coeficiente de transferência convectiva.

O MENU “PREFERENCES”

Este menu possibilita ao usuário algumas escolhas antes da simulação de um problema, e os seus itens podem ser vistos através da Figura 18.

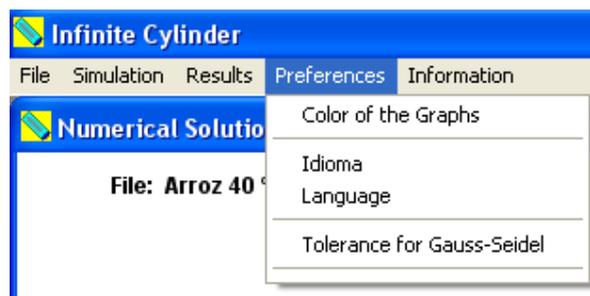


Figura 18 – Itens do menu “Preferences”.

O item “Color of the Graphs” possibilita a escolha, ao se desenhar gráficos, das cores preta, vermelha, magenta, verde e azul. Já o item “Idioma – Language” possibilita escolher o idioma de interface com o usuário: Português ou Inglês. Por último, o item “Tolerance for Gauss-Seidel” possibilita especificar o valor da tolerância na solução de sistemas de equações lineares via Gauss-Seidel. Vale salientar que o valor “default” é dado por 1×10^{-8} , mas pode ser modificado a critério do usuário.

O MENU “INFORMATION”

O menu “Information” pode ser visto através da Figura 19.

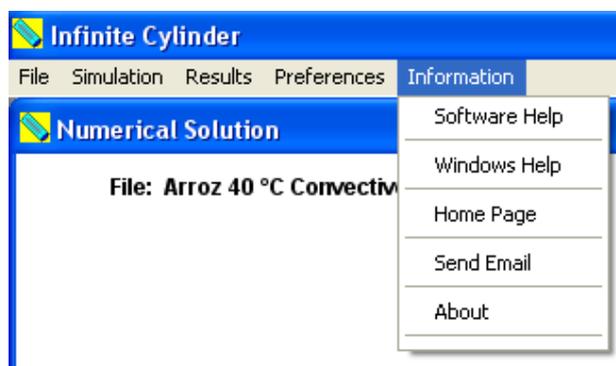


Figura 19 – Itens do menu “Information”.

Este menu apresenta informações gerais sobre a autoria do software, arquivos de ajuda, link para a “home page” e ainda uma opção para o envio de e-mail para os autores.