



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



TESE DE DOUTORADO

**DESCRIÇÃO DA SECAGEM CONTÍNUA E INTERMITENTE DE
PEDAÇOS DE MELÃO CORTADOS NA FORMA DE
PARALELEPÍPEDOS PRÉ-TRATADOS OSMOTICAMENTE**

JOAN CARLOS ALVES PEREIRA

Campina Grande - PB

Março - 2023

**DESCRIÇÃO DA SECAGEM CONTÍNUA E INTERMITENTE DE
PEDAÇOS DE MELÃO CORTADOS NA FORMA DE
PARALELEPÍPEDOS PRÉ-TRATADOS OSMOTICAMENTE**

JOAN CARLOS ALVES PEREIRA

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas

Orientador: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva

Campina Grande - PB

Março - 2023

P436d

Pereira, Joan Carlos Alves.

Descrição da secagem contínua e intermitente de pedaços de melão cortados na forma de paralelepípedos pré-tratados osmoticamente / Joan Carlos Alves Pereira. – Campina Grande, 2024.

175 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

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

Referências.

1. Melão – Cultura. 2. Secagem Convectiva. 3. Desidratação Osmótica. 4. Equação de Difusão. 5. Coordenadas Cartesianas. 6. Melão-Passa – Cultivo. 7. Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas. I. Silva, Wilton Pereira da. II. Título.

CDU 635.61:66.047(043)

FICHA CATALOGráfICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-13/225



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

JOAN CARLOS ALVES PEREIRA

DESCRIÇÃO DA SECAGEM CONTÍNUA E INTERMITENTE DE PEDAÇOS DE MELÃO CORTADOS NA FORMA DE PARALELEPÍEDOS PRÉ-TRATADOS OSMOTICAMENTE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola como pré-requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 30/03/2023

Wilton Pereira da Silva - Orientador(a) - PPGEA/CTRN/UFMG

Josivanda Palmeira Gomes - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFMG

Rossana Maria F. de Figueirêdo - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFMG

Cleide M. D. P. S. e Silva - Examinador(a) Externo(a) - UAF/CCT/UFMG

Jossyl Amorim Ribeiro de Souza - Examinador(a) Externo(a) - UAF/CCT/UFMG



Documento assinado eletronicamente por **ROSSANA MARIA FEITOSA DE FIGUEIREDO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 31/03/2023, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSIVANDA PALMEIRA GOMES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/03/2023, às 15:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WILTON PEREIRA DA SILVA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 11/04/2023, às 15:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSSYL AMORIM RIBEIRO DE SOUZA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 12/04/2023, às 16:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva, Usuário Externo**, em 14/04/2023, às 16:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3266754** e o código CRC **54824825**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa, Valéria Patrícia Araújo Silva, pela força e incentivo em todos os momentos.

Ao meu filho, José Arthur Araújo Pereira, que nasceu em meio ao desenvolvimento deste trabalho, mostrando-me um amor imensurável que me deu forças para superar qualquer obstáculo rumo à minha conquista.

Aos meus pais, João Sales e Ana Maria, pelo apoio e carinho que me dedicaram e por me mostrarem o caminho para o sucesso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder a força para superar os desafios e alcançar meus objetivos. Sua presença constante em minha vida é a base da minha fé.

Aos meus pais, João de Sales Pereira e Ana Maria Alves Pereira, agradeço por todo o 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, incentivando-me 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.

À Prof^ª. Dr^ª. Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva que contribuiu com suas valiosas sugestões e correções ao longo dos anos de pesquisa, desde o início do mestrado.

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

Aos colegas de doutorado Renato e Leiliane, que contribuíram em todas as etapas deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade em avaliar este trabalho, fornecendo correções e contribuições de extrema importância.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pelos ensinamentos.

Ao meu “Doguinho”, Marley, pelos momentos de carinho sincero.

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

À CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xv
NOMENCLATURA.....	xvii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - OBJETIVOS	2
1.1.1 - Geral	2
1.1.2 - Específicos	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 - A cultura do melão	4
2.1.1- Variabilidade fenotípica	5
2.1.2 - Aspectos econômicos	7
2.2 - Desidratação osmótica	8
2.3 - Frutas desidratadas	12
2.4 - Secagem	14
2.4.1 - Princípio e aspectos gerais	14
2.4.2 - Curvas típicas de secagem.....	17
2.4.3 - Métodos de secagem	19
2.4.4 - Secagem intermitente	22
2.5 - Modelagem para o processo de secagem	27
2.6 - Modelos de difusão	29
2.7 - Equação geral de transporte	31
2.8 - Equação de difusão.....	31
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1 - Local de realização da pesquisa	35
3.2 - Aquisição da matéria-prima e processamento.....	35
3.3 - Material e procedimentos experimentais.....	36
3.3.1 - Pré-tratamento osmótico	36

3.3.2 - Experimentos de secagem	37
3.4 - Descrição da cinética de secagem por modelos empíricos	42
3.5 - Modelos de difusão	44
3.6 - Equação de difusão para a geometria do problema.....	44
3.7 - Solução analítica da equação de difusão	45
3.7.1 - Solução analítica para a condição de contorno do terceiro tipo	45
3.8 - Otimizador para a solução analítica com condição de contorno do primeiro tipo.....	49
3.9 - Otimizador para a solução analítica com condição de contorno do terceiro tipo	50
3.10 - Solução numérica da equação de difusão para a geometria de um paralelepípedo....	51
3.10.1 - Solução numérica tridimensional	52
3.10.2 - Volumes de controle internos.....	53
3.10.2.1 - Discretização dos volumes de controle internos	54
3.10.3 - Discretização dos volumes de controle externos.....	56
3.11 - Definição de $\Gamma\Phi$ nas interfaces dos volumes de controle	59
3.12 - Valor médio de uma grandeza Φ em um domínio	61
3.13 - Aplicação da simetria em um paralelepípedo com malha tridimensional.....	61
3.14 - Otimizador para a solução numérica da equação de difusão	63
3.15 - Descrição da secagem intermitente incluindo o período de têmpera na cinética.....	65
3.16 - Caracterização físico-química, bioativa e de cor dos paralelepípedos de melão	66
3.16.1 - Teor de umidade.....	66
3.16.2 - Atividade de água (a_w)	66
3.16.3 - pH.....	67
3.16.4 - Acidez Total Titulável (ATT)	67
3.16.5 - Cinzas	67
3.16.6 - Proteínas	67
3.16.7 - Ácido ascórbico.....	67
3.16.8 - Flavonoides e antocianinas.....	68
3.16.9 - Açúcares totais, açúcares redutores e açúcares não redutores	68
3.16.10 - Carotenoides e cor.....	68
3.16.11 - Análise estatística dos dados experimentais.....	68
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1 - Condições experimentais da secagem convectiva.....	69

4.2 - Secagem contínua e intermitente do melão pré-tratado osmoticamente	70
4.3 - Cinéticas de secagem descritas por modelos empíricos.....	74
4.3.1 - Cinética de secagem contínua	74
4.3.2 - Cinética de secagem intermitente.....	78
4.3.2.1 - Intermitente com $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min	78
4.3.2.2 - Intermitente com $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min	81
4.3.2.3 - Intermitente com $t_{in} = 30$ min e $t_{out} = 60$ min	83
4.4 - Taxas de secagem.....	88
4.5 - Cinéticas de secagem descritas por modelos analíticos de difusão.....	90
4.5.1 - Condição de contorno do primeiro tipo.....	91
4.5.2 - Condição de contorno do terceiro tipo	94
4.6 - Descrição da cinética de secagem intermitente usando o modelo empírico proposto .	98
4.6.1 - Distribuição de erros pelo modelo proposto	102
4.7 - Solução numérica para os paralelepípedos de melão	104
4.7.1 - Comparação entre os modelos de difusão	108
4.7.2 - Simulação da distribuição de umidade no interior dos paralelepípedos de melão..	110
4.8 - Caracterização físico-química, bioativa e de cor da polpa de melão in natura	114
4.9 - Caracterização físico-química, bioativa e de cor do melão-passa.....	118
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	127
5.1 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
APÊNDICE A	148
APÊNDICE B.....	163

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Tipos de melão comercializados no Brasil.....	6
Figura 2.2 -	Fluxos de massa durante o processo osmótico.....	9
Figura 2.3 -	Curvas de secagem. Fonte: Park et al. (2007).....	18
Figura 3.1 -	Melão Cantaloupe.....	35
Figura 3.2 -	Cortador de legumes.	36
Figura 3.3 -	Erlenmeyer contendo solução com amostra (a); Refratômetro (b).....	36
Figura 3.4 -	Incubadora refrigerada utilizada para a desidratação osmótica.....	37
Figura 3.5 -	Estufa com circulação de ar.	38
Figura 3.6 -	Amostras de paralelepípedos de melão (a); balança digital (b).....	38
Figura 3.7 -	Paquímetro digital.	39
Figura 3.8 -	Dessecador.....	40
Figura 3.9 -	Estufa utilizada.....	40
Figura 3.10 -	Termo-Higrômetro digital.....	41
Figura 3.11 -	Malha tridimensional para a solução numérica da equação de difusão para o paralelepípedo.....	52
Figura 3.12 -	Volume de controle interno com ponto nodal P e seus vizinhos a norte, sul, leste, oeste, frente e trás.....	54
Figura 3.13 -	Volume de controle externo com ponto nodal P.....	56
Figura 3.14 -	Volumes de controle com valor específico para o coeficiente de transporte: Γ_P^Φ e Γ_E^Φ (a); Domínio equivalente com coeficiente de transporte Γ_{eq}^Φ (b).....	60
Figura 3.15 -	Paralelepípedo com dimensões Lx, Ly, Lz (a); destaque para as fronteiras da parte equivalente a 1/8 que foi removido (b); parte destacada do paralelepípedo para a definição da malha tridimensional (c).....	62
Figura 4.1 -	Cinéticas da secagem contínua nas temperaturas de 50 °C (a) e 70 °C (b)	70
Figura 4.2 -	Cinéticas das secagens intermitentes (tempo de operação efetiva): intermitente com $t_{in} = 10$ min a 50 °C (a) e 70 °C (b); intermitente com	

	$t_{in} = 20$ min a 50 °C (c) e 70 °C (d); intermitente com $t_{in} = 30$ min a 50 °C (e) e 70 °C (f).....	71
Figura 4.3 -	Cinéticas das secagens intermitentes incluindo o período de têmpera: intermitente com $t_{in} = 10$ min a 50 °C (a) e 70 °C (b); intermitente com $t_{in} = 20$ min a 50 °C (c) e 70 °C (d); intermitente com $t_{in} = 30$ min a 50 °C (e) e 70 °C (f).....	73
Figura 4.4 -	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).....	76
Figura 4.5 -	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).....	77
Figura 4.6 -	Cinética de secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min e temperatura de secagem de 50 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c) e Silva et alii (d).....	79
Figura 4.7 -	Cinética de secagem intermitente ($t_{in} = 10$ min) para temperatura de secagem de 70 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c) e Silva et alii (d).....	80
Figura 4.8 -	Cinética de secagem intermitente ($t_{in} = 20$ min) para a temperatura do ar de secagem de 50 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Silva et alii (d).....	82
Figura 4.9 -	Cinética de secagem intermitente ($t_{in} = 20$ min) para a temperatura do ar de secagem de 70 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Silva et alii (d).....	83
Figura 4.10 -	Cinética de secagem intermitente ($t_{in} = 30$ min) para a temperatura do ar de secagem de 50 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Silva et alii (d).....	84
Figura 4.11 -	Cinética de secagem intermitente ($t_{in} = 30$ min) para a temperatura do ar de secagem de 70 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Silva et alii (d).....	85

Figura 4.12 -	Cinética de todas as secagens para a temperatura do ar de secagem de 50 °C (a) e 70 °C (b), descrita pela equação de Page.....	86
Figura 4.13 -	Comparação entre as cinéticas de secagem contínua e intermitente para a temperatura do ar de secagem de 50 °C (a) e 70 °C (b), descrita pela equação de Page.....	87
Figura 4.14 -	Taxas de secagem dos paralelepípedos de melão a 50 °C (a) e 70 °C (b), descritas pela equação de Page.....	89
Figura 4.15 -	Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo utilizando a temperatura de 50 °C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b), secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c) e secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min (d).....	92
Figura 4.16 -	Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo utilizando a temperatura de 70 °C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b), secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c) e secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min (d).....	93
Figura 4.17 -	Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo utilizando a temperatura do ar de secagem de 50 °C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b), secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c) e secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min (d).....	95
Figura 4.18 -	Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo utilizando a temperatura do ar de secagem de 70 °C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b), secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c) e secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min (d).....	96
Figura 4.19 -	Cinética de secagem intermitente descrita pelo modelo proposto com temperatura do ar de secagem de 50 °C: $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min (a), $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min (b) e $t_{in} = 30$ min e $t_{out} = 60$ min (c).....	100

Figura 4.20 -	Cinética de secagem intermitente descrita pelo modelo proposto com temperatura do ar de secagem de 70 °C: $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min (a), $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min (b) e $t_{in} = 30$ min e $t_{out} = 60$ min (c).....	101
Figura 4.21 -	Distribuição de erro para as secagens intermitentes na temperatura de 50 °C: $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min (a), $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min (b) e $t_{in} = 30$ min e $t_{out} = 60$ min (c).....	102
Figura 4.22 -	Distribuição de erro para as secagens intermitentes na temperatura de 70 °C: $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min (a), $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min (b) e $t_{in} = 30$ min e $t_{out} = 60$ min (c).....	103
Figura 4.23 -	Dimensões em função do teor médio de umidade adimensional.....	105
Figura 4.24 -	Cinética de secagem contínua usando simulação numérica tridimensional, nas temperaturas: 50 °C (a) e 70 °C (b).....	107
Figura 4.25 -	Difusividade efetiva de massa em função do teor de umidade adimensional para as secagens contínuas.....	108
Figura 4.26 -	Paralelepípedo com a parte destacada equivalente a 1/8 que foi removido (a); domínio cartesiano tridimensional com destaque para os planos 1, 25 e 45, utilizado para a obtenção das distribuições de água (b); malha bidimensional representando o plano 1 ($k = 1$) com destaque para o volume de controle (VC) escolhido para o transiente (c).....	111
Figura 4.27 -	Distribuição de umidade no interior dos paralelepípedos nos instantes: 40 min (a), 80 min (b), 120 min (c), 160 min (d), e 200 min (e).....	112
Figura 4.28 -	Distribuições de umidade para secagem contínua no plano 1 em 120 min: 50 °C (a) e 70 °C (b).....	113
Figura 4.29 -	Distribuição do teor de umidade no instante de 200 min de secagem contínua a 70 °C: (a) Plano 1; (b) Plano 25; (c) Plano 45.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Composição nutricional do melão.....	5
Tabela 3.1 -	Parâmetros para cada experimento de secagem do melão pré-tratado osmoticamente.....	41
Tabela 3.2 -	Modelos empíricos utilizados para prever a cinética de secagem dos paralelepípedos de melão.....	43
Tabela 3.3 -	Equações da taxa de secagem obtidas através dos modelos empíricos.....	43
Tabela 4.1 -	Dados referentes aos experimentos de secagem do melão pré-tratados osmoticamente.....	69
Tabela 4.2 -	Resultados dos modelos empíricos para a secagem contínua nas temperaturas de 50 e 70 °C.....	75
Tabela 4.3 -	Resultados dos modelos empíricos para a secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min nas temperaturas de 50 e 70 °C.....	78
Tabela 4.4 -	Resultados dos modelos empíricos para a secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min nas temperaturas de 50 e 70 °C.....	81
Tabela 4.5 -	Resultados dos modelos empíricos para secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min nas temperaturas de 50 e 70 °C.....	84
Tabela 4.6 -	Resultados obtidos para as simulações de secagem usando o modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo.....	91
Tabela 4.7 -	Resultados obtidos para as simulações de secagem usando o modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo.....	94
Tabela 4.8 -	Parâmetros obtidos para as secagens intermitentes descrita pelo modelo proposto.....	98
Tabela 4.9 -	Expressões utilizadas para representar as dimensões das amostras em função do teor de umidade adimensional.....	106

Tabela 4.10 -	Parâmetros de processo para o modelo numérico em relação à secagem contínua.....	107
Tabela 4.11 -	Caracterização físico-química da polpa de melão in natura.....	115
Tabela 4.12 -	Valores médios e desvio padrão da atividade de água, pH, acidez total titulável, teor de cinzas e proteínas das amostras de melão submetidas a diferentes experimentos de secagem.....	118
Tabela 4.13 -	Valores médios e desvio padrão do teor de ácido ascórbico, flavonoides, antocianinas e carotenoides das amostras de melão submetidas a diferentes experimentos de secagem.....	121
Tabela 4.14 -	Valores médios e desvio padrão do teor de açúcares totais, redutores e não redutores das amostras de melão submetidas a diferentes experimentos de secagem.....	123
Tabela 4.15 -	Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de cor (L^* , $+a^*$ e $+b^*$) das amostras de melão submetidas a diferentes experimentos de secagem.....	125

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 frutas tem papel fundamental em minimizar o desperdício de alimentos e reduzir o consumo energético utilizado na indústria de processamento de alimentos. Este trabalho teve por objetivo realizar um estudo dos processos de secagem contínua e intermitente de pedaços de melão pré-tratados osmoticamente, cortados na forma de paralelepípedo, utilizando modelos empíricos e difusivos para descrever esses processos, além de caracterizar o produto obtido quanto aos parâmetros físico-químicos, bioativos e de cor. Para isso, foram realizados experimentos utilizando uma incubadora com agitação mecânica para a realização da desidratação osmótica, a fim de melhorar as propriedades sensoriais e preparar as amostras para as secagens subsequentes. As secagens foram realizadas utilizando uma estufa com circulação forçada de ar nas temperaturas de 50 e 70 °C envolvendo secagens contínuas e intermitentes (com razão de intermitência $\alpha = 2/3$) dos paralelepípedos de melão. Como parte do estudo, as secagens foram modeladas por meio de equações empíricas, considerando o tempo de operação efetiva, com a finalidade de comparar as cinéticas de secagem e analisar o impacto da secagem intermitente sobre a economia de energia. As cinéticas de secagem também são descritas usando modelos difusivos que utilizam soluções analíticas e numéricas da equação de difusão, em coordenadas cartesianas, com condição de contorno de primeiro e terceiro tipo. Os resultados apontam uma redução do tempo de secagem e maiores taxas de secagem com a aplicação da intermitência, proporcionando uma maior economia de energia. Dentre as equações empíricas analisadas, a equação de Page é a que melhor descreve as secagens contínuas e intermitentes do melão pré-tratado. O modelo analítico com condição de contorno do terceiro tipo descreve adequadamente as secagens contínua e intermitente dos paralelepípedos de melão previamente desidratados. Constatou-se que o coeficiente de difusão aumenta com a aplicação da intermitência durante a secagem. O modelo proposto neste trabalho, baseado nas equações empíricas de Page e Lewis, foi capaz de descrever a cinética de secagem intermitente, incluindo o período de têmpera. De acordo com as análises físico-químicas e bioativas, a secagem intermitente obteve uma maior preservação dos compostos em relação à secagem contínua.

Palavras-chave: equação de difusão, coordenadas cartesianas, desidratação osmótica, secagem convectiva, melão-passa.

ABSTRACT

The technological development of the fruit drying process plays a fundamental role in minimizing food waste and reducing energy consumption used in the food processing industry. This work aimed to carry out a study of the continuous and intermittent drying processes of osmotically pre-treated pieces of melon, cut in the shape of a parallelepiped, using empirical and diffusive models to describe these processes, in addition to characterizing the product obtained in terms of physicochemical, bioactive and color parameters. For this, experiments were carried out using an incubator with mechanical agitation to carry out osmotic dehydration, in order to improve sensory properties and prepare the samples for subsequent drying. Drying was carried out using an oven with forced air circulation at temperatures of 50 and 70 °C involving continuous and intermittent drying (with intermittency ratio $\alpha = 2/3$) of the melon parallelepiped. As part of the study, drying was modeled using empirical equations, considering the effective operating time, with the purpose of comparing drying kinetics and analyzing the impact of intermittent drying on energy savings. Drying kinetics are also described using diffusive models that use analytical and numerical solutions of the diffusion equation, in cartesian coordinates, with first and third type boundary conditions. The results indicate a reduction in drying time and higher drying rates with the application of intermittency, providing greater energy savings. Among the empirical equations analyzed, Page's equation is the one that best describes the continuous and intermittent drying of pre-treated melon. The analytical model with boundary condition of the third type adequately describes the continuous and intermittent drying of previously dehydrated melon parallelepiped. It was found that the diffusion coefficient increases with the application of intermittency during drying. The model proposed in this work, based on the empirical equations of Page and Lewis, was able to describe the kinetics of intermittent drying, including the tempering period. According to physicochemical and bioactive analyses, intermittent drying achieved greater preservation of compounds compared to continuous drying.

Keywords: diffusion equation, cartesian coordinates, osmotic dehydration, convective drying, raisin melon.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

No contexto atual, a produção de frutas vem aumentando, assim como a demanda da população em consumi-las. A fruticultura é um dos setores que mais se destaca do agronegócio brasileiro, impulsionada por uma grande variedade de culturas produzidas em todas as regiões do país e diversos climas. Dentre as inúmeras variedades de frutas produzidas no Brasil, o melão desponta com grande volume de exportação. Cerca de 60% da produção é destinada ao mercado externo, tornando-o a fruta mais exportada (ABF, 2018).

A questão da perda de alimentos é de grande importância nos esforços para combater a fome, aumentar a renda dos produtores e melhorar a segurança alimentar nos países. Em termos gerais, o desperdício de frutas pode ocorrer em todas as fases da cadeia produtiva, principalmente durante as etapas de produção, pós-colheita e processamento. Estima-se que as perdas atinjam aproximadamente 21% da produção de frutas no Brasil (ABF, 2016). Nesse contexto, o domínio e o desenvolvimento tecnológico pós-colheita desempenham um papel fundamental na melhor utilização dos alimentos, permitindo conservá-los por longos períodos de tempo, minimizando, assim, o desperdício.

Muitas técnicas são utilizadas para reduzir as perdas e prolongar a vida útil dos alimentos. Dentre essas técnicas, a secagem é o método mais comum e amplamente utilizado na conservação de alimentos, que tem como finalidade diminuir o teor de umidade do produto e, conseqüentemente, sua atividade de água, evitando o desenvolvimento de microrganismos e de reações químicas indesejáveis que podem causar a deterioração do produto, permitindo a armazenagem por períodos mais longos. Outra alternativa muito utilizada no processamento comercial de produtos agrícolas, que possibilita a obtenção de produtos levemente transformados, é a técnica de desidratação osmótica. Essa técnica pode ser utilizada em alguns casos como uma etapa de pré-tratamento, onde o produto é submetido a processos complementares subsequentes como secagem ou congelamento. Em vista disso, o tratamento osmótico seguido de secagem convectiva resulta em produtos com qualidades sensoriais (cor, textura, sabor e odor) e físicas melhores do que aqueles obtidos através de tratamentos simples, preservando ao máximo os componentes nutricionais (PINHEIRO, 2017; GALVÃO, 2017).

A secagem intermitente tem sido considerada por muitos autores como um método de secagem mais eficiente em termos de consumo de energia e melhor qualidade do produto seco, em comparação com a secagem contínua. A essência deste método consiste em alternar períodos de secagem contínua

com períodos de repouso, permitindo que a difusão de umidade do centro para a superfície do material e a evaporação da umidade superficial ocorra de maneira mais equilibrada (ELIAS e OLIVEIRA, 2010; KUMAR et al., 2014). Portanto, a principal razão para o uso de secagem intermitente é justamente minimizar gradientes térmicos e hídricos no interior do material, conseqüentemente reduzindo os custos de produção (energia) e possíveis danos estruturais, melhorando assim, a qualidade final do produto (GOLMOHAMMADI et al., 2016).

No contexto apresentado, torna-se necessário o estudo de diferentes métodos de secagem, dada a escassez de pesquisas que abrangem secagem intermitente de sólidos com a geometria de um paralelepípedo, visando à secagem intermitente de melão como um processo que venha a melhorar a eficiência energética em relação à secagem contínua e investigar a influência do tempo de têmpera nas características de secagem. Além disso, este trabalho contribui para a qualidade do produto final submetido ao tratamento osmótico como forma de agregar valor à matéria-prima. Assim, o presente trabalho orienta-se ao estudo da secagem contínua e, principalmente, intermitente de melão cortado na forma de paralelepípedos pré-tratados osmoticamente, utilizando modelos matemáticos que permitem a implementação de uma estratégia de secagem, a fim de prever possíveis economias de energia e, ao final do processo, avaliar o produto obtido em relação às suas propriedades físico-químicas, bioativas e de cor. Como parte do estudo, foi proposto um modelo empírico, modificado para descrever a cinética de secagem intermitente, incluindo o período de têmpera. Além disso, uma solução numérica da equação de difusão baseada no método dos volumes finitos foi utilizada para descrever os processos de secagem, considerando o encolhimento e a difusividade de massa variável durante o processo, o que constitui um diferencial em relação às pesquisas reportadas na literatura.

1.1 - OBJETIVOS

1.1.1 - Geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar os processos de secagem contínua e intermitente de paralelepípedos de melão pré-tratados osmoticamente, descrever esses tipos de secagem por meio de modelos empíricos e de difusão e avaliar a eficiência energética dos processos, bem como os aspectos físico-químicos, bioativos e de cor do produto obtido.

1.1.2 - Específicos

- Realizar a desidratação osmótica de paralelepípedos de melão in natura em solução de sacarose a 60 °Brix e temperatura de 30 °C;
- Realizar experimentos relativos à secagem contínua e intermitente de paralelepípedos de melão osmoticamente desidratados em diferentes condições operacionais (diferentes períodos de têmpera e temperaturas);
- Descrever as cinéticas de secagem utilizando modelos empíricos e verificar qual modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais obtidos;
- Comparar os processos de secagem e analisar o comportamento na taxa de secagem;
- Descrever o processo de secagem contínua e intermitente de melão através de modelos analíticos de difusão e determinar a condição de contorno apropriada;
- Descrever o processo de secagem contínua e intermitente de melão cortado na forma de paralelepípedos utilizando o Método dos Volumes Finitos com uma formulação totalmente implícita para obter uma solução numérica da equação de difusão em coordenadas cartesianas;
- Descrever a secagem intermitente incluindo o período de têmpera na cinética de secagem;
- Comparar os resultados das simulações numéricas com os resultados experimentais;
- Simular a distribuição do teor de umidade no interior dos pedaços de melão durante o processo de secagem; e
- Determinar as características físico-químicas, bioativas e de cor do melão in natura e após a desidratação osmótica seguida de secagem.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - A cultura do melão

O meloeiro é uma dicotiledônia pertencente ao gênero *Cucumis*, família *Cucurbitaceae*, subfamília *Cucurbitoideae* e espécie *Cucumis melo* L. A planta se caracteriza por ser uma herbácea, trepadeira ou rastejante, com ramos laterais, podendo atingir até 3 m de comprimento. O sistema radicular é superficial e praticamente sem raízes adventícias. Apresenta folhas simples, palmatilobadas ou compostas, com inflorescências geralmente racemosas ou de flor única. Na maioria das espécies, as flores são unissexuais e surgem nas axilas das folhas, com cinco pétalas brancas ou amarelas. O fruto do meloeiro é uma baga carnuda de tamanho, aspecto, forma e cores variadas. Sua polpa também varia segundo o tipo, sendo observados coloração branca, amarelada, esverdeada, laranja e salmão, com aroma inodoro a intensamente almiscarado. O melão é constituído de 90% de água e produz de 200 a 600 sementes, dispostas simetricamente na parte interna da polpa (MCCREIGHT et al., 1993; OLIVEIRA et al., 2017).

Segundo Burger et al. (2010), os registros mais antigos indicam que o melão é originário da África tropical, sendo inicialmente introduzido na Ásia e no Oriente Médio por volta de 1.500 a. A. A literatura aponta a formação de centros primários e secundários na Índia, Irã, Turquia e China. Desse modo, é possível observar que as áreas indicadas como centros de origem do meloeiro são tropicais e com condições edafoclimáticas de regiões semiáridas.

No Brasil, a variabilidade genética de melão aumentou consideravelmente com a introdução ao longo da costa brasileira, principalmente na região Nordeste, por meio da chegada de escravos africanos e imigrantes europeus durante o século XVI. Desde então, o material genético passou por um intenso processo de seleção e cruzamentos que resultou em muitas cultivares locais adaptadas a vários tipos de solo e clima, sendo cultivados em diferentes regiões do país (DELWING et al., 2007; ANDRADE et al., 2019).

O melão é rico em elementos minerais, particularmente potássio, sódio, cálcio, magnésio e fósforo, além de ser fonte de outros nutrientes como açúcares, fibras e vitamina C. Possui valor energético relativamente baixo, variando de 20 a 62 kcal/100g de polpa, podendo ser indicado para vários tipos de dietas alimentares (EMBRAPA, 2012). O crescente interesse no consumo de melão está

relacionado aos seus potenciais benefícios à saúde humana, em particular altas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias (VOULDOUKIS et al., 2004; ISMAIL et al., 2010). A Tabela 2.1 contém a composição do melão in natura em 100 g de polpa, segundo dados da Tabela brasileira de composição de alimentos (TACO 2011).

Tabela 2.1 - Composição nutricional do melão.

Constituintes em 100 g	Valores
Umidade (%)	91,3
Energia (kcal)	29
Proteínas (g)	0,7
Carboidratos (g)	7,5
Fibra alimentar (g)	0,3
Cinzas (g)	0,5
Cálcio (mg)	3
Magnésio (mg)	6
Manganês (mg)	0,05
Fósforo (mg)	10
Ferro (mg)	0,2
Sódio (mg)	11
Potássio (mg)	216
Cobre (mg)	0,04
Zinco (mg)	0,1
Vitamina C (mg)	8,7

Fonte: TACO (2011)

2.1.1- Variabilidade fenotípica

No Brasil, são identificados aproximadamente 29 gêneros nos quais 155 espécies estão inseridas (GOMES-KLEIN et al., 2015). O gênero *Cucumis* é um dos mais importantes da família *Cucurbitaceae* em termos econômicos e inclui várias hortaliças cultivadas, como o pepino (*Cucumis sativus* L.), melão (*Cucumis melo* L.), maxixe (*Cucumis anguria* L.), entre outros, no qual o melão se destaca como o mais cultivado no mundo (SANTOS, 2016).

Em 1859, o botânico francês Naudin realizou um estudo pioneiro que agrupou as cultivares subdividindo as espécies em dez variedades, sendo nove cultivadas e uma selvagem. Este estudo serviu de base para classificações subsequentes que usaram os termos “grupos botânicos” ou “variedades botânicas” para cada um dos membros das duas subespécies (BURGER et al., 2010; PITRAT, 2013; ANDRADE et al., 2019). De acordo com Hammer e Gladis (2014), a classificação mais recente estabelece 17 variedades botânicas distribuídas em duas subespécies: *melo* e *agrestis*. A subespécie *melo* inclui as variedades *Flexuosus*, *Inodorus*, *Cantalupensis*, *Reticulatus*, *Adana*, *Ameri*, *Chandalak* e *Tibish* e a subespécie *agrestis* inclui as variedades *Acidulus*, *Agrestis*, *Chate*, *Chito*, *Conomom*, *Dudaim*, *Momordica*, *Texanuse* e *Makuwa*. Dentre as variedades botânicas, a *Cantalupensis* e a *Inodorus* são comercialmente as mais importantes no Brasil. Comercialmente, os melões são divididos em diferentes “tipos”, a fim de facilitar a comunicação entre os agentes da cadeia do agronegócio. No grupo do *Cantalupensis*, destacam-se três tipos que são produzidos, denominados Cantaloupe, Gália e Charentais. No grupo dos *Inodorus* têm-se os seguintes tipos: amarelo, pele de sapo e Honeydew. Na Figura 2.1 são apresentados os tipos de melões mais comercializados no Brasil.

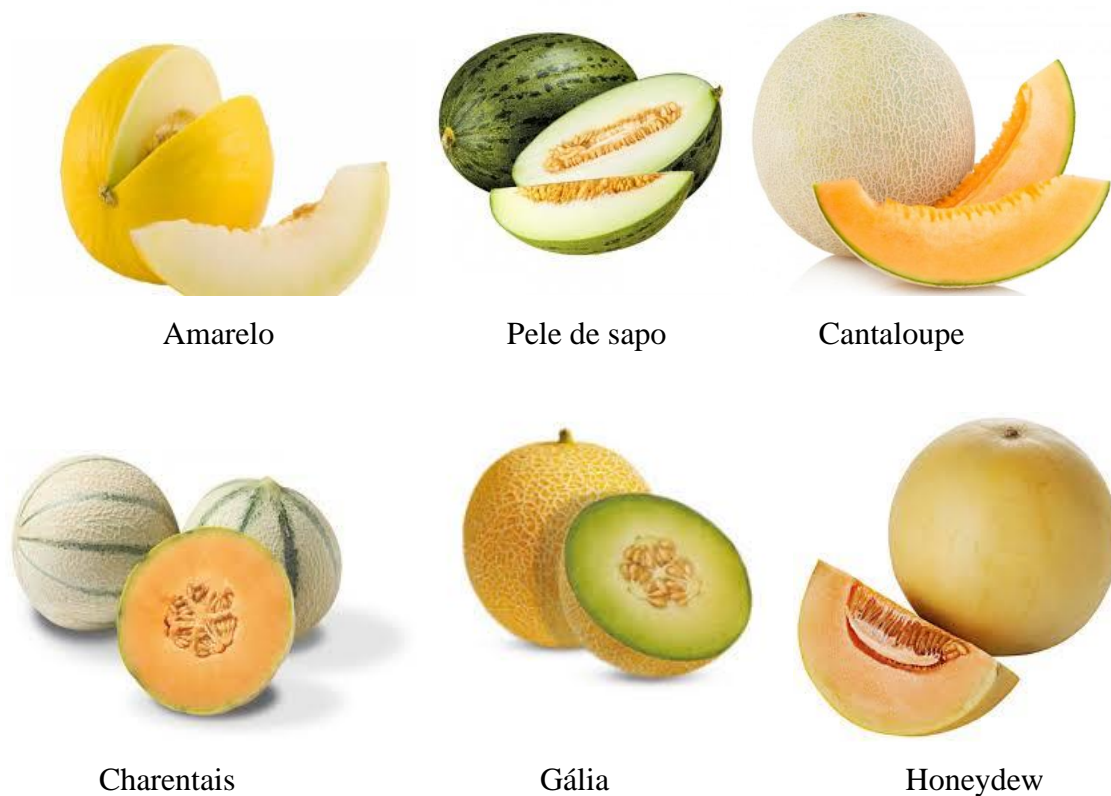


Figura 2.1 - Tipos de melão comercializados no Brasil.

A ampla produção mundial de melão comprova que o *Cucumis melo* L. é a espécie mais polimórfica do gênero *Cucumis*, apresentando grande variabilidade no tipo de fruto e qualidade, com variações de forma, tamanho, cor, textura, sabor e composição química (ESTERAS et al., 2013)

2.1.2 - Aspectos econômicos

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), a produção de frutas brasileiras no ano de 2017 foi de aproximadamente 44 milhões de toneladas. Esse volume mantém o país como terceiro maior produtor de frutas do mundo, ficando atrás apenas da China e da Índia, respectivamente.

O melão é uma das hortícolas mais produzidas do Brasil, com grande importância econômica no país. Além de abastecer o mercado interno, o melão brasileiro é amplamente exportado, sendo responsável pela maior parte das exportações de frutas do país. No Brasil, a produção de melão está concentrada na Região Nordeste, responsável por mais de 90% da produção nacional, representada principalmente pelos estados do Ceará e do Rio Grande do Norte, juntos correspondem a mais de 79% de toda a produção do Nordeste e 76% da produção nacional de melão (NUNES et al., 2011; IBGE, 2018; ABF, 2018). Essa concentração é atribuída às condições favoráveis de solo e clima na região, que permitem o cultivo o ano todo, contribuindo para uma alta produtividade e qualidade da fruta.

A produção brasileira de melão, no ano de 2016, chegou a 596.430 toneladas, com valor da produção estimado em R\$ 597,724 milhões. Os índices apresentam crescimento em relação ao ano anterior, quando a produção foi de 521.596 toneladas, com uma receita de R\$ 470,921 milhões (ABF, 2018).

Em se tratando de exportação, aproximadamente 60% da produção brasileira de melão é destinada para o mercado externo, apontando a fruta como a mais exportada do país. O Brasil vem experimentando um avanço crescente no volume de exportações, saltando de 98,7 mil toneladas embarcadas em 2002 para 233,6 mil toneladas em 2017 (BRASIL, 2016; ABF, 2018). Desde 2012, tem sido a fruta com maior volume de exportação. O valor exportado com a cultura do melão, no ano de 2017, totalizou mais de US\$ 162,9 milhões, com isso, o incremento nas exportações é de quase 4% na comparação com 2016, quando foram exportadas 224,6 mil toneladas, ou US\$ 148,7 milhões (ABF, 2018).

Atualmente, os maiores compradores do melão brasileiro são Inglaterra, Holanda e Espanha (ABF, 2018). Contudo, o mercado interno também ganha com a qualidade dos produtos. A projeção para o mercado interno é de excelente crescimento, tendo em vista uma maior demanda por frutas frescas, seguindo a tendência mundial em relação à necessidade de possuir uma alimentação saudável.

O agronegócio do melão é uma das culturas de maior expressão social e econômica para o país. Ele impulsiona vários agentes da cadeia produtiva, como pesquisa, ciência, tecnologia, trabalho no campo, transporte, entre outros. Tudo o que está envolvido nesse setor forma uma cadeia produtiva gigantesca que gera milhões de empregos e oferece oportunidades para os trabalhadores brasileiros.

2.2 - Desidratação osmótica

A desidratação osmótica é uma operação importante no processo de transformação de frutos perecíveis em novos produtos com valor agregado. Neste processo, a água é removida dos alimentos (fatias ou parte inteira) por imersão em solução aquosa concentrada contendo um ou mais solutos, resultando em uma liberação significativa de água do produto para o meio circundante (CASTRO et al., 2018a).

De acordo com Egea e Lobato (2014), três tipos de fluxos de massa estão envolvidos na desidratação de frutas em soluções aquosas: perda de água do fruto para a solução; migração de solutos da solução para o fruto e perda de alguns sólidos solúveis do fruto, como ácidos orgânicos, minerais e muitos outros nutrientes solúveis em água, para solução concentrada. Este último fluxo ocorre em menor intensidade em comparação com os dois primeiros, mas deve ser considerado na composição final do produto.

A direção da força de remoção de água acontece entre o alimento e a solução, através das membranas das células, provocada pela alta pressão osmótica da solução, onde a membrana semipermeável deixa que a difusão aconteça do alimento para a solução e desta para o alimento, conforme pode ser observado na Figura 2.2.

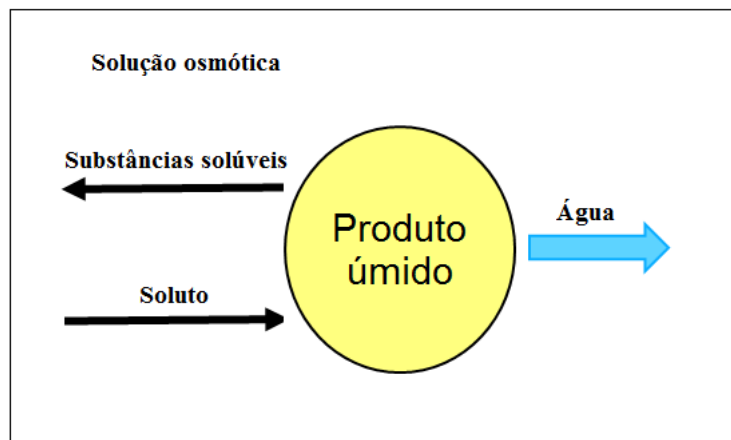


Figura 2.2 - Fluxos de massa durante o processo osmótico.

O processo de desidratação osmótica tem como objetivo diminuir o teor de umidade dos alimentos, de modo simultâneo, em que busca reduzir a incorporação de soluto pelo produto. Diferentes autores (RASTOGI e RAGHAVARAO, 1997; TSOTSAS e MUJUMDAR, 2014; EGEA e LOBATO, 2014; PROSAPIO e NORTON, 2017) relataram que este método permite reduzir o teor de umidade em até 50% em massa e geralmente não é capaz de diminuir a atividade de água (a_w) a níveis seguros para a conservação e armazenamento dos alimentos. A atividade de água é uma medida da quantidade de água disponível para reações químicas e biológicas, portanto representa uma indicação da estabilidade dos alimentos ao crescimento microbiano (OLIVEIRA et al., 2016a; PROSAPIO e NORTON, 2017). Assim, quando não é capaz de diminuir o teor de água a níveis considerados seguros, em relação às alterações microbiológicas e bioquímicas, o método passa a ser utilizado como pré-tratamento para secagens posteriores, como a secagem convectiva, secagem a vácuo, secagem por micro-ondas, entre outros (CASTRO et al., 2018a). Tal técnica também pode ser usada como tratamento principal, no caso de desidratação de algumas frutas. Na literatura, alguns autores utilizam apenas a desidratação osmótica como tratamento principal e apresentaram êxito nos resultados, conseguindo a estabilidade do produto, a exemplo de Martins et al. (2008), que obteve valor de atividade de água menor que 0,60 na desidratação de pseudofrutos de caju-do-cerrado, somente com a utilização da desidratação osmótica.

Além da redução do conteúdo de água dos alimentos, os métodos combinados de secagem oferecem vantagens, tais como: aprimora a qualidade e prolonga a vida útil dos produtos desidratados, minimizando as lesões geradas por outros processos, devido à remoção parcial da água, sem que ocorra mudança de fase; redução de perdas de características sensoriais do alimento e melhora na textura; uso

de temperaturas moderadas para proteger compostos nutricionais e bioativos dos alimentos (ALFARO et al., 2018); são tecnologias que não necessitam de equipamentos sofisticados, devido à sua simplicidade e acessibilidade; diminuem a atividade enzimática com pequenas alterações na qualidade do produto e, no caso do escurecimento enzimático oxidativo, podem reter ou até melhorar a cor do produto (GIRALDO et al., 2003); a conservação de sabor é maior quando é utilizado o açúcar ou xarope de açúcar como agente osmótico; a remoção de ácido e a absorção de açúcar pelos pedaços de frutas tornam o produto mais doce que o produto seco convencionalmente (YADAV e SINGH, 2012; SILVA et al., 2013); trata-se de um método mais econômico, pois exige menos energia em comparação com os métodos tradicionais de secagem por ar quente. Com isso, o tratamento osmótico seguido de secagem convectiva resulta em desenvolvimento de novos produtos alimentícios com qualidades sensoriais (aroma, sabor, cor e textura) e físicas (volume, densidade, porosidade) superiores aos obtidos através de tratamentos simples (KROKIDA et al., 1998; GALVÃO, 2017). Como desvantagens, pode-se citar o uso de tempos de secagem mais altos, a baixa transferência de massa e a extração de ácidos naturais pela solução osmótica (ROBBERS et al., 1997).

As taxas de transferência de massa durante o processo osmótico podem ser influenciadas por vários fatores, tais como: o soluto (tipo e concentração), grau de agitação e temperatura da solução, proporção sólido/soluto, estrutura do sólido (forma e tamanho), contato produto/solução (fase sólido-líquido) e pressão do processo (OSORIO et al., 2007; RASTOGI et al., 2002; CASTRO-GIRÁLDEZ et al., 2011; NIETO et al., 2013; ALMEIDA et al., 2014; LANDIM et al., 2016).

É essencial a escolha correta do tipo de soluto para o processo osmótico, por estar diretamente relacionado com alterações das características sensoriais, físicas e nutricionais do produto, além de influenciar no tempo do processo. Os açúcares são as substâncias mais usadas e são considerados excelentes agentes osmóticos, pois minimizam alterações no sabor, aroma e previnem o escurecimento enzimático. O cloreto de sódio é geralmente utilizado como agente osmótico quando o gosto de sal mantém ou melhora o sabor do produto processado, sendo muito utilizado na desidratação de vegetais. Também é possível o uso combinado do sal e da sacarose como agentes osmóticos (EGEA e LOBATO, 2014).

Brochier et al. (2019) estudaram a desidratação osmótica do kiwi utilizando solução osmótica de sacarose a 45, 55 e 65 °Brix numa proporção de 1:4 durante o tempo de 300 min e temperatura de 25 °C. Os autores avaliaram a influência da concentração da solução osmótica na desidratação do kiwi

e a perda e ganho de soluto em função do tempo e uso de diferentes concentrações de soluções osmóticas. Para isso, alterações do teor de umidade, na atividade da água e no teor de sólidos solúveis foram monitoradas em intervalos regulares durante a desidratação. Concluíram que houve diminuição da umidade livre, da atividade da água e ganho de soluto pelo fruto durante o tempo de desidratação. A taxa de perda de água foi maior durante a primeira hora de secagem. A diminuição da atividade da água foi maior quando o produto esteve imerso na solução a 65 °Brix, sendo o mais indicado para esse processo. As pressões osmóticas das soluções também foram previstas.

Mirzayi et al. (2018) avaliaram a cinética de transferência de massa durante a desidratação osmótica de fatias de banana em uma solução osmótica preparada pela combinação de açúcar e sal. A desidratação foi realizada utilizando dois níveis de concentração de sacarose (50 e 60 °Brix), três níveis de NaCl (0,5% e 10% p/v) e quatro níveis de tempo (90, 180, 270 e 360 min). Os dados experimentais revelaram que a perda de água aumentou com o aumento do tempo, sacarose e teor de sal. As perdas mínimas e máximas de água observadas foram de 9,0% (a 50 ° Brix, 0% de sal e 90 min) e 46,5% (a 60 °Brix, 10% de sal e 360 min), respectivamente. Além disso, uma pequena porção de sal foi necessária para reduzir o ganho de sólidos, enquanto o teor de açúcar e o tempo aumentavam. A difusividade efetiva de água nas fatias de banana foi de $5,67 \times 10^{-9}$ a $9,11 \times 10^{-9}$ m²/s para as soluções estudadas.

Ribeiro et al. (2016) investigaram a melhor condição para a desidratação osmótica de peras em solução de sacarose a 45 °Brix, com proporção de 1:4 (g:g) de fruto:solução osmótica, 1,0 g/100 mL de CaCl₂ e 3 h de imersão sem agitação à temperatura ambiente. As fatias de pera obtidas nas condições otimizadas de desidratação osmótica foram secas convencionalmente em uma estufa sem fluxo de ar, à pressão atmosférica e a uma temperatura de 60 °C por 3 h. Verificou-se que, quando a desidratação osmótica com as condições especificadas foi aplicada antes da secagem convencional em estufa, resultou em um ganho de 10 g/100 g de sólidos e uma perda de água de 30g/100 g da fruta. Ainda, os autores relataram que a desidratação osmótica seguida de secagem convencional resultou em uma redução de 42% no tempo de secagem, comparada à secagem utilizando apenas o método convencional.

Sanjinez-Argandoña et al. (2018) estudaram os efeitos do pré-tratamento osmótico, com e sem adição de cloreto de cálcio, nas características nutricionais e na aceitação sensorial de manga desidratada. Quatro diferentes tratamentos osmóticos (sacarose, sacarose + CaCl₂, sacarose + glicose, sacarose + glicose + CaCl₂) foram aplicados em pedaços de manga cortados com 1,5 x 2,5 x 1,5 cm na proporção fruto:solução de 1:4, a 40 °C por 2 h e a 111 rpm em agitador, seguidos de secagem em um

secador com circulação de ar (1,6 m / s) a 50 °C por 24 h. Foi observado que a adição de cloreto de cálcio em soluções osmóticas promoveu menor incorporação de açúcar e maior retenção de ácido nos pedaços de manga osmoticamente desidratados. O aumento de sacarose e glicose durante o pré-tratamento osmótico contribuiu para a manutenção da qualidade nutricional e da cor do produto desidratado quando comparado ao produto sem desidratação osmótica. A combinação de tratamento osmótico com secagem por convecção proporcionou melhor qualidade da manga desidratada, apresentando maior aceitação pelo público, conseqüentemente, apresentou maior intenção de compra.

2.3 - Frutas desidratadas

A produção de frutas desidratadas inclui as frutas secas e frutas em passa, obtidos a partir da diminuição do teor de umidade da fruta madura, inteira ou em pedaços, por processos tecnológicos adequados. Frutas secas não têm açúcar comercial adicionado durante o processamento, mas frutas em passa permitem esse ingrediente e, portanto, a desidratação osmótica pode ser usada.

Segundo Viana et al. (2017), a produção de frutas em passa é interessante, pois é um alimento nutritivo, concentrado, leve, prático, fácil de se transportar e armazenar, com alto valor agregado, que requer baixo investimento inicial para sua produção, quando comparado a outros métodos de conservação de frutas. A tecnologia empregada diminui a atividade de água do produto, com conseqüente inibição do desenvolvimento de microrganismos, aumentando sua vida útil de prateleira, além de promover a concentração de nutrientes e preservar a qualidade sensorial, uma vez que podem ser utilizadas baixas temperaturas durante o processo.

No processo de desidratação, o açúcar natural da fruta é concentrado com a retirada de água, obtendo-se um produto com cor e sabor acentuados. Portanto, a quantidade de açúcar natural (frutose) na fruta determinará o sabor do produto final. Frutas com pouco açúcar proporcionam produtos descorados, menos doces e pouco saborosos. Frutos muito maduros resultam em produtos de cor escura devido à produção de pigmentos (melanoidinas) com exposição ao calor durante a secagem.

Como acontece com todos os vegetais, as frutas continuam o processo de respiração, mesmo depois de serem colhidas. As frutas podem ser classificadas em climatéricas e não climatéricas, de acordo com o tipo de respiração. As frutas climatéricas apresentam um elevado aumento da taxa respiratória, melhorando suas qualidades nutricionais e sensoriais (odor, cor, sabor, textura), além de

aumento do teor de açúcar e redução da acidez. O estágio de maturação comercial da fruta é caracterizado pelo ápice (ponto máximo) na taxa de respiração que, em seguida, decresce novamente. Maçã, banana, goiaba, melão e manga são exemplos de frutas climatéricas populares. As frutas não climatéricas apresentam uma diminuição contínua em sua taxa de respiração após a colheita, mantendo-a contínua até atingir a fase de senescência e apenas amadurecem enquanto aderidas à planta mãe. Portanto, as qualidades da fruta não melhoram, embora possa ocorrer um leve amadurecimento e perda da cor verde. São exemplos de frutas não climatéricas o limão, laranja, morango e uva (CELESTINO, 2010).

O teor de umidade para a produção de frutas secas ou dessecadas como a passa não deve ultrapassar 25%, conforme estabelecido na Resolução nº 12 de 1978 (BRASIL, 1978), da Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos (CNNPA). Para reconhecimento do ponto ideal da fruta no estado de passa, recorre-se a habilidade do operador através do tato ou paladar.

A avaliação nutricional é importante em resposta às condições de secagem, sendo as altas temperaturas e os longos tempos de secagem os principais fatores responsáveis por essas perdas, principalmente em produtos sensíveis ao calor. Condições mais brandas de secagem resultam em menores perdas nutricionais e geralmente são obtidas por métodos mais onerosos, como a da liofilização. Nesse sentido, a técnica da secagem intermitente apresenta-se como uma possível alternativa que traz consigo o enfoque econômico.

De acordo com Celestino (2010) e Martins et al. (2008), as principais análises para avaliar a qualidade tecnológica de frutas-passas são perda de peso (PP), perda de umidade (PU), incorporação de sólidos (IS), atividade de água (A_w), pH, acidez titulável (AT), vitamina C e açúcar redutor.

Em trabalhos recentes, Castro et al. (2016) estudaram a desidratação osmótica de fatias de goiaba sob diferentes concentrações de sacarose (40, 50 e 60 °Brix), combinadas com temperaturas de 30, 40 e 50 °C, seguido de secagem convectiva a 60 °C, além de avaliar os parâmetros sensoriais da goiabapassa. Os autores verificaram que a máxima transferência de massa ocorreu durante as quatro horas iniciais de desidratação, sendo a concentração de sacarose o efeito com maior influência na diminuição da quantidade de água e no aumento da incorporação de sólidos. As amostras de goiaba tratadas com o pré-tratamento osmótico obtiveram boa aceitação sensorial, com maior preferência pelas passas obtidas em menor concentração de sacarose, para os atributos aparência, cor, textura e sabor. No estudo conduzido por Barros (2020), foram realizados experimentos de desidratação osmótica utilizando

temperaturas de 40, 50 e 60 °C e diferentes concentrações de sacarose nas soluções (40, 50 e 60 °Brix) e secagem convectiva (40, 50 e 60 °C) das fatias de kiwi cv. Hayward nas características químicas, físicas e físico-químicas do Kiwi-passa. Também foram utilizados modelos matemáticos empíricos e difusivos para a descrição do processo de secagem utilizando geometria de parede infinita. De acordo com os resultados reportados, o modelo de Page apresentou maior confiabilidade na descrição do processo de secagem das fatias de kiwi desidratadas. Temperaturas mais altas no processo de secagem proporcionaram aumento da difusividade efetiva do kiwi e as maiores taxas de secagem. Os parâmetros físico-químicos foram observados reduções no teor de água, atividade de água, pH, ratio, proteínas, ácido ascórbico, clorofila e carotenoides, luminosidade, a^* e b^* e o aumento no teor de cinzas, lipídeos, sólidos solúveis totais, açúcares redutores e totais. Os parâmetros de firmeza, coesividade e mastigabilidade foram diretamente proporcionais à temperatura de secagem e à concentração de sacarose do agente osmótico.

2.4 - Secagem

2.4.1 - Princípio e aspectos gerais

A secagem é um dos processos mais utilizados pelo ser humano na conservação de alimentos, que consiste na remoção de umidade a partir da aplicação de calor. É um processo natural que foi aperfeiçoado pelo homem ao longo do tempo. Atualmente estabelece uma das etapas do pré-processamento dos produtos agrícolas, visando remover parte da água neles contida e, conseqüentemente, reduzir sua atividade de água, geralmente por convecção forçada de ar aquecido. Durante a remoção da água na secagem, ocorrem dois processos simultâneos comum a qualquer condição de secagem: 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 amplamente utilizada e extremamente importante em vários setores, com finalidades específicas em algumas áreas de produção. É um processo poderoso de consumo de energia relativamente alto, onde apresenta cerca de 10 a 15% do consumo global de energia industrial do mundo (BENNAMOUN, 2011; ELHAGE et al., 2018). Em uma indústria intensiva em

energia que utiliza aquecimento ou secagem como parte do processo, melhorar a eficiência energética em 1% pode resultar em aumento de 10% no lucro (BEEDIE, 1995).

A secagem é, provavelmente, um dos processos industriais que mais consomem energia, em razão das propriedades físicas da água, como os altos valores de calor específico e calor latente de vaporização. De acordo com Kudra (2004), a indústria madeireira possui o maior percentual de energia gasta no processo de secagem, com 70%, seguida pela indústria têxtil, com 50% e a produção de papel e polpas com 27 e 33%, respectivamente. Portanto, mesmo pequenas melhorias na eficiência energética no processo de secagem implicam 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. Alguns produtos agrícolas são secos para posterior processo de reidratação em níveis desejáveis, visando, por exemplo, o fator econômico do frete e manuseio. Quando submetidas à secagem, suas características físicas e nutricionais são mantidas intactas e, quando a água é restaurada, elas retornam à sua aparência natural ou mudam muito pouco. Os alimentos desidratados podem ser consumidos diretamente, como figos secos, banana-passa, uva-passa, farinhas ou reidratados, a exemplo de hortaliças utilizadas em formulações de sopas ou pós-solúveis, como café, produtos achocolatados e leite (AGEITEC, 2020).

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, ou seja, mantendo seu poder germinativo. Ao realizar o processo de secagem adequadamente, os produtos podem ser armazenados por longos períodos de tempo sem comprometer a qualidade do produto (SILVA, 2008). As vantagens da secagem são várias, entre as quais temos uma melhor conservação do produto, inibição do crescimento de microrganismos e de reações de deterioração pela redução da atividade de água, bem como a redução de custos de transporte e armazenamento devido à diminuição do peso e volume do produto, 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 (FERNANDES et al., 2011; KALETA et al., 2013; MARQUEZ e MICHELIS, 2011; CACCAVALE et al., 2016; CASTRO et al., 2018b). As principais desvantagens são o alto custo de energia necessária para aquecer o ar e possíveis perdas na qualidade final do produto, devido ao fornecimento constante de calor.

Durante o processo de secagem, a extração da umidade é obtida pela movimentação da água, resultante de uma diferença de pressão de vapor de água entre a superfície do produto a ser seco e o ar que o envolve. A condição para que um produto seja submetido ao processo de secagem é que a pressão de vapor 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 alcançado, o teor de umidade no interior do produto se torna praticamente uniforme (CARMO, 2004; FIOREZE, 2004; SILVA, 2008).

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 pequena de água que está adsorvida como uma camada muito fina nas superfícies internas e externas dos coloides macromoleculares (amidos, pectinas, celuloses e proteínas) por meio de Força de Van der Waals e formação de ligação 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, que frequentemente não é total, e em alguns casos, não é eliminada nem a temperaturas que carbonizam parcialmente a amostra.

A preservação de um alimento, entre outros fatores, depende da quantidade da água presente no mesmo. O teor de umidade é definido como sendo a relação entre o peso da água livre e o peso total do

produto (%), ou seja, equivale ao conteúdo de água dentro do produto. 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, a natureza da amostra, da quantidade relativa de água, rapidez desejada na determinação e equipamento disponível.

Os métodos de determinação de umidade podem ser classificados em diretos (métodos de estufa, destilação e infravermelho) e indiretos (método dielétrico, resistência elétrica) (WEBER, 1995). Devido a sua maior confiabilidade, os métodos diretos são empregados como padrão para a aferição de outros procedimentos e na calibração dos métodos indiretos. O método direto da estufa é o processo mais usual, no qual 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 por certo período de tempo (PARK et al., 2007). 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 biológicos são muito diferenciados entre si, pois possuem características e propriedades próprias, que podem sofrer alterações importantes durante a secagem. Além do sistema de secagem utilizado, outros fatores podem influenciar na velocidade de secagem do produto: temperatura, umidade relativa e 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 materiais pequenos, a velocidade de secagem é maior do que para materiais de grandes dimensões, dependendo da relação área/volume do sólido (SILVA, 2008; FRANCO, 2016).

2.4.2 - Curvas típicas de secagem

As curvas de secagem são de fundamental importância quando se trata de pesquisa com produtos agrícolas. Essas informações são essenciais em várias etapas do processo de secagem, tornando possível estimar o tempo de secagem de certa quantidade de produto, 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. Tais dados são fundamentais para o dimensionamento de equipamentos e sistemas para colheita, manuseio, transporte e armazenamento. No dimensionamento de equipamentos, podem-se

determinar as condições de operação para a secagem e, com isso, a seleção de trocadores de calor, ventiladores e outros dispositivos (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 quando se produz contração e ruptura, ou quando se forma uma película na superfície do material parcialmente seco (VILLAR, 1999).

De acordo com 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 2.3. As curvas representam a evolução do teor de umidade do produto (X), de sua temperatura e da velocidade de secagem ou taxa de secagem (dX/dt), ao longo do tempo (t).

A curva (a) representa a diminuição do teor de umidade 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 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 derivando a curva (a) em relação ao tempo. A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto, em relação à evolução do tempo t), obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem (PARK et al., 2007).

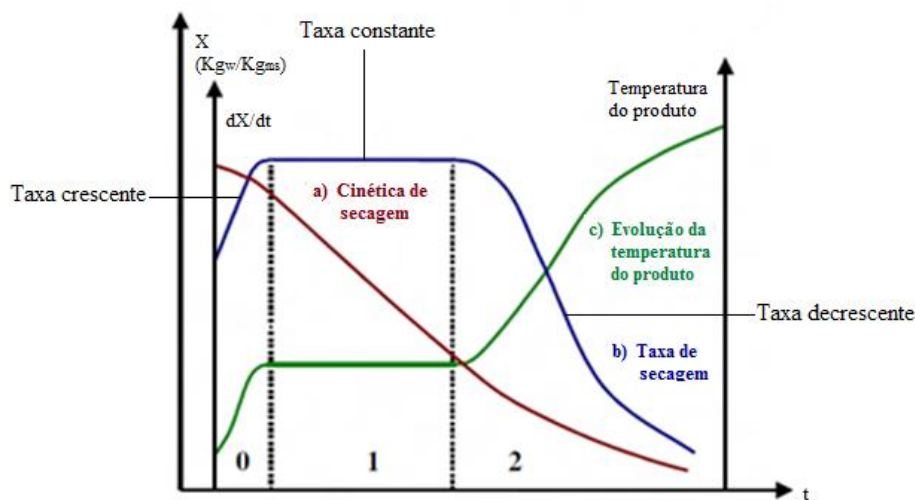


Figura 2.3 - Curvas de secagem. Fonte: Park et al. (2007).

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 2.3, pode-se observar os três períodos de secagem e descrevê-los da seguinte maneira: no período zero, ocorre o início da secagem. Nesse instante, o produto é geralmente mais frio do que o ar. Neste 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 lentas. 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 à 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. Nesse período, 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, ou seja, o término do período de taxa constante corresponde ao instante em que a migração interna de água para a superfície não consegue mais compensar a taxa de evaporação da água livre da mesma (SILVA, 2010a; PINHEIRO, 2017). 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).

2.4.3 - Métodos de secagem

A secagem é um dos métodos de preservação mais importantes e populares, que consiste na remoção de grande parte de líquido de um produto por evaporação mediante a ação do calor, podendo

realizar-se por meio natural, expondo o produto à radiação solar e artificial por meio de equipamentos mecânicos (GARCIA et al., 2004). Em ambos os métodos, 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 de alimentos é o método mais antigo e precursor de todos os demais processos de secagem. Surgiu quando os povos primitivos observaram que as sementes das plantas com as quais se alimentavam eram conservadas por mais tempo após serem expostas ao sol. A partir dessa descoberta, outros alimentos passaram a ser secos ao sol, como frutas, vegetais, carnes e os próprios grãos.

A secagem natural consiste em expor o alimento ao sol por longos períodos, sob condições climáticas de temperaturas elevadas, baixa umidade relativa do ar e ventos com intensidade moderada. A radiação solar é o principal método tradicional, ainda amplamente utilizado por pequenos produtores no processamento dos produtos, que acontece no próprio campo de cultivo ou em um terreiro. Este método de secagem utiliza tecnologia de baixo custo e fácil manejo, indicado ao processamento de pequenos volumes de material.

A secagem solar apresenta algumas desvantagens, como a necessidade de um longo tempo de secagem e a necessidade de áreas extensas. Além disso, o produto fica sujeito ao ataque de pragas e à contaminação microbiana, além das condições ambientais não controladas, o que pode resultar em maiores perdas na qualidade física e química dos produtos do que na secagem sob condições controladas (CELESTINO, 2010).

Por outro lado, a secagem artificial consiste no emprego de métodos mecânicos que permitem o controle das condições do ar de secagem para aumentar a velocidade do processo, sendo estes disponibilizados por equipamentos (secadores) desenvolvidos pelo homem. Porém, este método tem um custo mais alto do que o custo da secagem natural. Esse recurso é amplamente usado em grandes produções devido ao controle e a rapidez proporcionada por este processo. Produtos alimentícios são secos usando tradicionalmente métodos de secagem industriais, o que favorece a obtenção de produtos com qualidade superior e um menor tempo de processamento.

A remoção de umidade utilizando métodos artificiais é obtida através da exposição da massa do produto a um fluxo de ar aquecido (ou não) que transporta calor para o produto a ser desidratado, promovendo a evaporação da água nele contida e, em seguida, é liberada para o ambiente, sendo caracterizados, conforme o fluxo no secador, em estacionário, contínuo e intermitente. A principal

vantagem da secagem com ar aquecido é a redução no tempo de processo e, como desvantagens, pode-se mencionar os altos custos de energia 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 contração do material (FRANCO, 2016; SILVA et al., 2017).

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 que entra. O ar quente fornece energia ao produto, causando a vaporização da água do produto.

Secagem por contato com uma superfície quente: 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. 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 aplicado na superfície do tambor, que é desidratado, devido ao contato com a parede quente do tambor.

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, tornando este processo viável para alguns produtos em que a temperatura não pode ser elevada, principalmente para evitar a degradação das vitaminas. 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 de vácuo, a temperatura não necessita ser tão elevada e a secagem é muitas vezes mais rápida.

Secagem a frio: Para este tipo de processo, são utilizados os liofilizadores. Na liofilização, a água no interior do produto é congelada e a pressão é reduzida. A água passa diretamente do estado sólido para vapor (sublimação) e a água é transportada para o meio externo, na forma de vapor. As principais vantagens deste processo são as mínimas perdas de nutrientes e uma rápida reidratação do produto seco. No entanto, a liofilização sofre de algumas desvantagens, como altos custos de energia e tempos de processamento muito longos, o que restringe sua aplicabilidade a produtos de alto valor (KARAM et al., 2016).

Na indústria de alimentos, existem diferentes tecnologias para secar frutas, vegetais e grãos, como secador solar, aquecimento por microondas, irradiação infravermelha, secagem a vapor superaquecida, secagem fluidizada, secagem instantânea, congelamento e secagem a vácuo (SAGAR e KUMAR, 2010). Deve-se mencionar que o sistema de secagem aplicado tem um papel fundamental no teor de umidade final, qualidade e prazo de validade do produto obtido (KIHARASON e ISUTSA, 2019). Para a escolha da tecnologia a ser utilizada no processo, deve-se comparar as vantagens e desvantagens dentre as várias alternativas disponíveis, levando em conta tanto o ponto de vista técnico quanto o econômico.

Mais de 85% dos secadores industriais são secadores convectivos (AGHILINATEGH et al., 2015), mas apresentam grandes desvantagens, como consumo de energia e maior tempo de secagem devido à baixa condutividade térmica dos alimentos (ZHAO et al., 2014)

2.4.4 - Secagem intermitente

Vários métodos de secagem novos ou modificados são propostos na literatura, especialmente métodos que melhoram a eficiência da secagem em relação à economia de energia ou redução do tempo de secagem, mas também no aspecto da qualidade dos produtos secos.

Dentre esses métodos, a secagem intermitente tem sido considerada uma das soluções promissoras para melhorar a eficiência energética e a qualidade final do produto seco sem aumentar o custo do processo. A essência deste tipo de secagem consiste na passagem descontínua do ar aquecido pela massa do sólido 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 superfície do sólido e a evaporação da água superficial ocorre de maneira mais branda e equilibrada. Isso evita aquecimento desigual, permitindo a redistribuição de temperatura e umidade durante os períodos de repouso e, conseqüentemente, os danos térmicos e de qualidade podem ser minimizados através da aplicação da intermitência. Ainda, a taxa de reidratação de alimentos secos usando o método intermitente é maior do que aqueles secos pelo método contínuo. Além disso, a densidade aparente das amostras secas com o método intermitente são mais baixas devido à redistribuição de temperatura e umidade durante os períodos de repouso (AGHILINATEGH et al., 2015). Portanto, a aplicação da intermitência é sugerida como uma alternativa para impedir a

distribuição desigual de temperatura, evitando danos térmicos e melhorando a qualidade do produto (FAGUNDES et al., 2005; ELIAS e OLIVEIRA., 2010; DEHGHANNYA et al., 2019).

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 energia. A análise de energia da 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 (HO et al., 2002; CHIN e LAW, 2010; KOWALSKI e PAWLOSKI, 2011; PUTRANTO et al., 2011). Várias estratégias de intermitência no consumo de energia podem ser observadas na literatura e indicam que esses processos intermitentes geralmente mostram melhoria da eficiência energética em comparação com a secagem contínua.

A qualidade dos alimentos secos é outra questão importante na secagem. Este processo pode causar alterações nas propriedades dos alimentos, incluindo descoloração, perda de aroma, mudanças de textura, valor nutritivo e mudanças na aparência física (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, danos causados pelo calor na superfície e maior consumo de energia (HO et al., 2002). Por outro lado, condições de secagem suave 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), milho (VERGARA et al., 2018), goiaba (CHUA et al., 2002) e fatias de pera (LIMA et al., 2022) foram relatados na literatura.

Na secagem com ar aquecido de forma contínua, a quantidade de fornecimento 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 têmpera. 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. Com base na revisão de literatura realizada por Kumar et al. (2014), diversas variáveis podem ser alteradas para obter diferentes formas de intermitência, tais quais: velocidade, temperatura, humidade, pressão e a fonte alternativa de calor.

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 sim 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 escolha da intermitência deve ser selecionada com base no calor e transferência de massa envolvidos no processo de secagem específico e propriedades do material a ser seco (KUMAR et al., 2014).

De todas as formas para se conseguir a secagem intermitente acima mencionadas, a mais comum estudada por pesquisadores é a intermitência alcançada através da mudança das 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, no qual a fonte de calor é ativada e desativada (on / off) periodicamente ou por um fluxo de ar contínuo aquecido periodicamente, através da seca-aeração. Este processo envolve a combinação de secagem em alta temperatura por curto intervalo de tempo, um tempo de equalização da água no interior do produto, resfriamento lento e o final da secagem, reversão do ar de secagem, isto é, inverter a direção do fluxo de ar por um período de tempo e, em seguida, retornar para o seu sentido original. Com isto, minimizam-se os gradientes de umidade e temperatura no interior do material. Além disso, a secagem cíclica é uma abordagem comum de secagem, na qual a temperatura, umidade ou velocidade do ar de secagem sofrem variações do padrão cíclico especificada como onda senoidal, onda quadrada ou padrões de dente de serra (CHUA et al. 2003; HO et al., 2002; CHIN e LAW, 2010).

Dehghannya et al. (2018) salientaram que a relação com maior período de têmpera ou tempos de repouso resulta em maior economia de energia, mas aumenta consideravelmente o tempo de secagem. O aumento do tempo total de secagem pode não ser adequado para alguns produtos. Portanto, o grau de proporção da intermitencia (on/off) deve ser escolhido precisamente para obter uma economia de energia otimizada.

Kumar et al. (2014) e Galvão (2017) adotaram a definição para razão de intermitência como sendo a relação entre o período de têmpera (período em que o material fica fora do secador) e o tempo total de um ciclo, ou seja, $\alpha = \tau_{out}/(\tau_{in}+\tau_{out})$, onde τ_{in}   o tempo em que o material fica exposto   fonte de calor, τ_{out}   o tempo de têmpera 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.

Estudos experimentais têm sido propostos para descrever a secagem intermitente, demonstrando os potenciais benefícios da varia o intermitente da aplica o de calor sobre a economia energética e a qualidade final do produto seco (MENEGHETTI et al., 2012; SILVA et al., 2015a; SILVA et al., 2016a; SILVA et al., 2019).

Vários modelos empíricos foram aplicados por Camelo et al. (2019) para descrever a secagem intermitente da banana prata nos formatos cilíndrico e disco. Os resultados evidenciaram que o modelo de Page   o que melhor se ajusta aos dados experimentais da secagem intermitente da banana em ambos os formatos. Observou-se maior redu o do teor de umidade das amostras em disco quando comparado ao formato cilíndrico. Vergara et al. (2018) também estudaram a secagem intermitente com o objetivo de analisar a qualidade fisiológica de sementes de milho utilizando diferentes períodos de intermitência. Os autores relataram que a utiliza o de períodos de intermitência na secagem de sementes de milho proporciona sementes com maior qualidade fisiológica e maior potencial de armazenamento, em rela o   secagem contínua.

Borsini et al. (2016) avaliaram o efeito de diferentes métodos de secagem na perda de umidade e nas altera es de cor de frutos de Diospyros kaki. Os valores experimentais de secagem foram obtidos com temperaturas de 45, 60 e 75  C e velocidade do ar de secagem de e 1,1 ms⁻¹. A secagem intermitente foi aplicada alternando períodos de 45 min de secagem com ar e temperatura constantes (τ_{on}) e 45 min de descanso (τ_{off}). Para descrever a perda de água, foi utilizado o modelo de Page. Para comparar as curvas de secagem contínua e intermitente, utilizou-se o tempo efetivo de secagem ou o tempo de aplica o de calor, suprimindo o tempo de descanso. Os resultados mostraram que a aplica o de períodos de repouso durante a secagem a 45  C das fatias de fruta tem um efeito ligeiramente favorável

na taxa de redução de umidade no período de 50 a 230 min, mas não afetou a cinética da perda de umidade a 60 e 75 °C. O modelo de Page descreveu com sucesso a cinética de secagem. Os parâmetros de cor L^* e b^* diminuíram durante a secagem. A diferença de cor (ΔE) mostrou um aumento acentuado a 75 °C e não foi afetada pela aplicação de períodos intermitentes durante a secagem.

Abraham et al. (2016) realizaram experimentos de secagem intermitente no que diz respeito à difusão de umidade e tempo de secagem de fatias de manga, utilizando um secador convectivo. A razão de intermitência foi definida como sendo $\alpha = \tau_{on}/(\tau_{on}+\tau_{of})$, onde τ_{on} é o tempo de secagem em minutos e τ_{of} é o tempo de têmpera ou tempo de repouso em minutos. A relação de intermitência investigada foi de 1/2. Os parâmetros experimentais de secagem do produto com teor de umidade inicial de 80% foram: temperatura do ar de 40, 50 e 60 °C, umidade relativa de 65%, velocidade do ar de 0,6 ms⁻¹ e tempo de secagem com intervalo de 60 min à temperatura ambiente para um ciclo de 120 min. Os resultados apresentados mostraram que a secagem a 60 °C conduz a um ganho de 90 min no tempo de secagem, comparativamente a uma secagem a 50 °C no modo intermitente, para o mesmo teor de umidade do produto. Além disso, os resultados também mostraram que o período de intermitência não influencia a cinética de secagem, quando o teor de umidade das amostras se aproxima de 18%, independentemente da temperatura do ar de secagem.

Silva et al. (2019) propuseram um modelo de Page modificado para descrever a cinética de secagem contínua e intermitente de pedaços de maçã. A secagem foi realizada em uma estufa com circulação de ar forçada nas temperaturas de 50 e 70 °C. Para a secagem intermitente, a razão de intermitência foi de 2/3 e os períodos de revenimento foram de 30, 60 e 120 min, em um dessecador à temperatura ambiente. O modelo proposto foi eficaz na descrição da secagem contínua de pedaços de maçã e, para o caso intermitente, o modelo também foi capaz de descrever com boa precisão ambos os períodos de cada ciclo do processo. Os processos de secagem intermitente com períodos de têmpera de até 60 min foram muito satisfatórios em relação à economia de tempo de secagem efetiva, o que significa economia de energia. A redução no tempo efetivo de secagem foi de aproximadamente 45% para a temperatura de 50 °C e cerca de 34% para a temperatura de 70 °C, em comparação com a secagem contínua nessas mesmas temperaturas.

2.5 - Modelagem para o processo de secagem

A secagem é um problema fundamental que envolve transferências simultâneas de calor, massa e quantidade de movimento, tanto dentro como fora do material. Para representar os fenômenos físicos com maior realismo, torna-se fundamental o desenvolvimento de modelos matemáticos através de uma linguagem coerente (BASSANEZI, 2002).

A modelagem de processos de secagem é necessária para avaliar o efeito dos parâmetros e otimizar o processo, além de ajudar a prever os defeitos que podem ocorrer após a secagem em um produto específico e a controlar o processo de secagem.

A modelagem da secagem é uma tarefa complexa devido à interação entre as equações de equilíbrio, a estrutura interna do material e a variação nas propriedades térmicas, de umidade e mecânicas durante a secagem. A complexidade aumenta ainda mais se alguma forma de intermitência for introduzida. Portanto, torna-se uma tarefa difícil representar as condições exatas matematicamente durante a secagem (KUMAR et al., 2012). Portanto, a simulação através da modelagem é uma ferramenta apropriada para lidar com a complexidade da secagem de materiais biológicos.

Na literatura, encontram-se vários modelos propostos para descrever a secagem de produtos agrícolas, com a finalidade de correlacionar dados experimentais da secagem de cada material a um modelo. Dentre os vários modelos disponíveis, pode-se classificá-los em três grupos: modelos empíricos, modelos de difusão e modelos baseados na termodinâmica dos processos reversíveis.

Os modelos empíricos consistem em uma correlação direta entre o teor de umidade do produto e o tempo do processo de secagem, que podem ser facilmente investigados por experimentos em laboratório. Apesar de serem amplamente utilizados na descrição da cinética de secagem, seus parâmetros não possuem significado físico, uma vez que omitem fundamentos do processo e não permitem a visualização da distribuição de umidade no interior do produto em um determinado tempo definido, pois descrevem a perda de umidade apenas como um todo, e não localmente (KEEY, 1972; SILVA, 2013; MENDONÇA et al., 2015). Os modelos semiempíricos têm base na Lei de Newton para resfriamento aplicado à transferência de massa, presumindo que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de água se restrinja apenas à superfície do produto.

Modelos difusivos geralmente são baseados na difusão de líquido e/ou vapor no movimento migratório da água no interior do material e têm sido preferidos por muitos autores na área de secagem.

Este tipo de modelo prevê o teor de umidade que varia com o tempo e o espaço dentro do sólido e consideram as resistências aos fluxos de calor e massa externa e interna, permitindo prever a distribuição de umidade no interior do produto em qualquer instante estipulado. Tais modelos são capazes de descrever fisicamente o transporte de umidade de frutas, fornecendo resultados de valor mais fundamental em comparação com modelos empíricos. Contudo, modelos empíricos são mais simples em comparação com os modelos de difusão (BAINI e LANGRISH, 2007).

Os modelos baseados na termodinâmica dos processos reversíveis partem do princípio de um equilíbrio termodinâmico local no interior do produto, assumindo que os fluxos de água devido à difusão de vapor e líquido se devam, respectivamente, ao gradiente de temperatura e de concentração total de água no interior do sólido. As equações que descrevem este modelo sugerem que o transporte molecular de vapor d'água, ar e líquido, acontece simultaneamente (LUIKOV E MIKHAYLOV, 1965; PINHEIRO, 2017).

O aperfeiçoamento das técnicas e dos equipamentos utilizados no processo de secagem podem resultar em uma otimização e uma melhoria 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. Esses fatores podem variar de acordo com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, teor de umidade, entre outros (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, principalmente aqueles com alto teor de umidade inicial. 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).

2.6 - Modelos de difusão

Existem várias etapas para abordar a secagem através de modelos de difusão. Primeiro, as equações dos fenômenos de transporte devem ser estabelecidas. Essas equações são baseadas na equação geral de transporte, que será abordada no próximo tópico. Tal equação governa a maneira pela qual a transferência de calor e massa evolui e se comporta no material. Existem casos simplificados para modelagem e simulação, expressa por meio de um sistema de equações diferenciais parciais (EDP) sob diferentes premissas e restrições. As EDPs são equações baseadas na equação geral de transporte, que são derivadas de leis físicas, como a Segunda Lei de Fick para massa, Lei de Fourier para transferência de calor por condução e Lei de Newton para quantidade de movimento. Segundo, algumas suposições são estabelecidas para aplicação desses modelos, como: dimensionalidade, fenômenos de transporte, propriedades do material, retração, entre outros. Em seguida, as condições iniciais e de contorno são determinadas com base na interação material - meio externo. Posteriormente, os parâmetros do material são definidos, considerando as suposições e dos parâmetros de contorno relacionados aos coeficientes de transferência. Finalmente, a equação de transporte pode ser resolvida através de métodos numéricos ou analíticos e validação de modelos com dados experimentais.

Devido à complexidade da medição de algumas variáveis durante experimentos de secagem, modelos difusivos podem ser usados para simular a distribuição de temperatura, umidade e velocidade, entre outras variáveis com alta resolução espacial e temporal (ABERA et al., 2016; DEFRAEYE, 2014; CASTRO et al., 2018b).

Vários parâmetros devem ser definidos para a modelagem do processo de secagem. Esses parâmetros devem ser estabelecidos durante a conceituação do modelo. Estes incluem a dimensão, geometria e propriedades termofísicas do material, os fenômenos de transporte e a abordagem de escala. Além disso, os coeficientes de transferência e o método para resolver a equação de transporte devem ser determinados. Finalmente, outras abordagens, como a inclusão de encolhimento e a deformação mecânica podem ser consideradas.

As soluções da equação de difusão para a simulação do transporte de água podem ser divididas em dois grupos:

- Soluções analíticas;
- Soluções numéricas.

O uso de métodos analíticos e numéricos são ferramentas fundamentais para a solução da equação de difusão. A seleção de um método apropriado de solução envolve características dos modelos matemáticos, como a classificação das equações diferenciais, geometria do domínio e condições iniciais.

O método analítico é uma das formas de resolver a equação de difusão. Essa solução é frequentemente utilizada para descrever o conteúdo de umidade de um corpo em função do tempo, em que fornecem uma solução exata das equações diferenciais num domínio contínuo e para todo ponto, a qualquer instante, pode-se saber o valor da grandeza de interesse. Esse modelo é utilizado na descrição de algumas situações de interesse com geometrias simples como parede infinita, cilindro finito e infinito, esfera e paralelepípedo, com volume e difusividade constantes, e assumindo inicialmente a distribuição de umidade uniforme (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992; SILVA et al., 2009).

Para muitos processos de adsorção e dessorção de água em produtos agrícolas, a equação de difusão pode ser resolvida para a condição de contorno do primeiro e terceiro tipo sob a suposição de hipóteses simplificadoras. Neste caso, as soluções para várias geometrias são dadas por uma série que depende apenas do teor de água inicial (que se assume estar uniforme), do teor de água de equilíbrio e da difusividade efetiva (SILVA et al., 2008; SILVA et al., 2009; SILVA et al., 2014a). Apesar das várias vantagens práticas devido à sua implementação mais simples e a possibilidade de se conhecer a variável de interesse em qualquer ponto do domínio, em qualquer instante de tempo, soluções analíticas da equação de difusão apresentam algumas limitações que são difíceis de serem contornadas ou eliminadas, como por exemplo, a dificuldade de considerar a difusividade efetiva de massa com valor variável, em função do teor de umidade local; considerar o teor de umidade inicial uniforme e o volume do produto constante durante o processo de secagem.

As soluções numéricas são mais eficientes na descrição de processos mais complexos de difusão para uma geometria qualquer, aproximando o modelo objeto de estudo às condições físicas reais, como o encolhimento do produto pode ser considerado no modelo.

Na solução numérica, divide-se o domínio contínuo em um número finito de subdomínios de volumes elementares (volumes de controle ou volumes finitos). Com isso, a equação diferencial parcial (EDP) é substituída por equações algébricas equivalentes, uma para cada volume de controle. Os três principais métodos numéricos tradicionalmente aplicados para a solução de EPDs são (MALISKA,

2004; MUDIYANSELAGE et al., 2017): Método das Diferenças finitas (MDF); Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método dos Volumes Finitos (MVF).

2.7 - 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.

2.8 - Equação 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 (CIHAN et al., 2008; SANTOS e OLIVEIRA, 2013; SILVA, 2013, SILVA et al., 2015a). 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:

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

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 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. Além disso, garante 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 ($\Phi = T$), em que $\lambda = \rho c_p$ e $\Gamma^\Phi = k$. Assim, substituindo esses parâmetros na Equação (2.2), obtém-se:

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

Onde: c_p é o calor específico à pressão constante; ρ é a densidade; e k é uma importante propriedade do material chamada 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 prever 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 termofísicos 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. (2015a) 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 de um 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 satisfatoriamente os processos de secagem. Percebeu-se uma redução no coeficiente de transferência de massa, 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. (2016b) 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 repouso (sem fornecimento de calor). 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 demonstrou precisão e eficiência na simulação de diversos problemas físicos de transferência de massa.

Pereira et al. (2021) utilizaram modelos empíricos e de difusão para descrever o processo de absorção de água por grãos de arroz com e sem casca em diferentes temperaturas de imersão. Além disso, um software de otimização foi desenvolvido neste estudo para determinar os parâmetros e suas incertezas para os modelos de difusão. Os autores constataram que o modelo de Peleg foi o mais satisfatório para descrever a cinética de absorção de água pelo arroz sem casca, enquanto o modelo de Silva et alii apresentou os melhores indicadores estatísticos para o arroz com casca. Verificou-se também que um modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo apresentou os melhores resultados. Para grãos sem casca, as difusividades efetivas de massa encontradas foram $(1,186 \pm 0,045) \times 10^{-9}$, $(1,312 \pm 0,024) \times 10^{-9}$ e $(2,133 \pm 0,028) \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$, para as temperaturas de imersão de 28, 40 e 50 °C, respectivamente. Para grãos com casca, as difusividades foram $(0,675 \pm 0,011) \times 10^{-9}$ e $(1,269 \pm 0,017) \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$, para temperaturas de 28 e 50 °C, respectivamente.

CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Local de realização 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 (LTCM) da Unidade Acadêmica de Física (UAF), ambos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), na cidade de Campina Grande, Paraíba.

3.2 - Aquisição da matéria-prima e processamento

A matéria-prima utilizada foi o melão (*Cucumis melo L.*), cultivar Cantaloupe, conforme a Figura 3.1. Os frutos foram adquiridos no comércio local na cidade de Campina Grande - PB. Foram selecionados melões maduros, em boas condições físicas e grau de maturação semelhante.



Figura 3.1 - Melão Cantaloupe.

Os melões foram conduzidos ao laboratório, e, em seguida, foram devidamente higienizados com detergente neutro, enxaguados em água corrente, descascados e cortados em forma de paralelepípedo com arestas medindo aproximadamente 1,0, 1,0 e 2,0 cm (espessura, altura e comprimento), usando um cortador de legumes (Figura 3.2) e uma faca em aço inox.

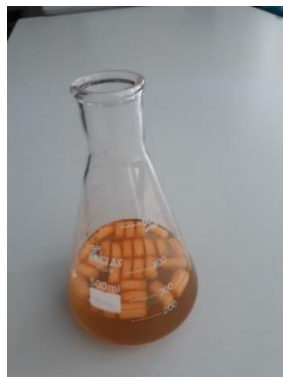


Figura 3.2 - Cortador de legumes.

3.3 - Material e procedimentos experimentais

3.3.1 - Pré-tratamento osmótico

Antes do processo de secagem convectiva, os pedaços de melão foram submetidos à desidratação osmótica, realizada com a imersão dos pedaços dos frutos em solução composta de sacarose e água, com concentração de 60 °Brix, medida com refratômetro portátil, como mostra a Figura 3.3. A concentração foi selecionada com base nos resultados de Pinheiro (2017), que estudou a desidratação osmótica do melão amarelo. A quantidade de solução foi estipulada para manter a proporção fruto/solução de 1:4, isto significa, que para cada grama de amostra, utilizou-se 4 mililitros de solução.



(a)



(b)

Figura 3.3 - Erlenmeyer contendo solução de sacarose com os pedaços de melão (a);

Refratômetro (b).

Durante todo o processo osmótico, os pedaços dos frutos foram mantidos a uma temperatura ambiente de 30 °C e agitação constante de 120 RPM durante 90 min. Para manter tais condições, foi utilizada uma incubadora refrigerada com agitação (TECNAL, TE-421), em que as amostras foram dispostas em *erlenmeyers* com capacidade de 500 mL, conforme Figura 3.4.



Figura 3.4 - Incubadora refrigerada utilizada para a desidratação osmótica.

Posteriormente, decorrido o tempo de processo, as amostras foram removidas da solução, lavadas com água destilada, levemente enxugadas com papel absorvente e sua massa aferida utilizando uma balança digital (Radwag), com precisão de 0,001 g e capacidade máxima de 510 g. Além disso, uma amostra em triplicata foi coletada para calcular o teor de umidade inicial antes e após a desidratação osmótica. Em seguida, as amostras desidratadas foram encaminhadas para a próxima etapa: a secagem com ar quente.

3.3.2 - Experimentos de secagem

Os experimentos de secagem foram realizados em uma estufa (Fanem, modelo 315 SE) com circulação forçada de ar (Figura 3.5), com direção do fluxo transversal e bandejas removíveis onde as amostras de melão osmoticamente desidratadas foram dispostas.



Figura 3.5 - Estufa com circulação de ar.

As secagens contínuas e intermitentes dos paralelepípedos de melão foram realizadas, em triplicata, utilizando-se duas temperaturas distintas (50 e 70 °C). Amostras de melão pesando aproximadamente 12 g foram dispostas em cestos de tela fina de alumínio (Figura 3.6) de forma que o ar fluísse com facilidade entre os pedaços de melão. Os cestos foram inicialmente identificados (A, B e C) e pesados inicialmente vazios. Em seguida, o conjunto (melão + cesto), para aferição da massa total inicial.

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-a de volta ao secador. As medições foram realizadas em intervalos pré-definidos em uma balança digital (Figura 3.6 b) até que as amostras alcancem o estágio de equilíbrio higroscópico.



(a)

(b)

Figura 3.6 - Amostras de paralelepípedos de melão (a); balança digital (b).

As aferições das dimensões (antes e durante o processo de secagem) foram realizadas com um paquímetro digital (Insize) (Figura 3.7) com resolução de 0,01 mm.



Figura 3.7 - Paquímetro digital.

No processo de secagem intermitente, cada um dos três cestos, após a pesagem, foi encaminhado para a estufa alternadamente, obedecendo ao tempo estipulado de intermitência, ou seja, enquanto uma amostra número 1 secava na estufa, as duas outras permaneciam em repouso em um dessecador contendo sílica gel azul (Figura 3.8) à temperatura ambiente. Após um terço de um ciclo, a amostra número 2 adentrou na estufa ao mesmo tempo em que a amostra de número 1; após pesagem, seguiu para o dessecador para o período de têmpera. No final de mais um terço do tempo de ciclo, a amostra número 3 foi colocada na estufa simultaneamente à amostra número 2, que após a pesagem, foi colocada no dessecador. Ao final do tempo de exposição da amostra número 3 à fonte de calor, completando mais um terço do tempo de um ciclo, a amostra foi retirada do secador e, após a pesagem, foi colocada no dessecador, enquanto a amostra número 1 foi colocada novamente no secador, iniciando-se um novo ciclo. Portanto, no caso da secagem intermitente estudada neste trabalho, a cada instante apenas uma amostra permanecia na estufa, na temperatura estabelecida, enquanto duas amostras permaneciam no dessecador, em temperatura ambiente.

Para as secagens contínuas, as amostras, em triplicata, foram levadas para a estufa simultaneamente. Inicialmente, as medições da massa foram realizadas em curtos intervalos de tempo (5, 10, 15, 20 e 30 min) e depois em intervalos de tempo maiores (40 e 60 min), até o final do processo. Isso foi feito até que as amostras atingissem o estágio de equilíbrio higroscópico, caracterizado por massa constante. Em cada instante especificado de tempo, as amostras eram retiradas da estufa, pesadas

e, no caso de secagem contínua, devolvidas para a estufa. Quando não havia mais variação de massa nas amostras, o teor de umidade de equilíbrio foi determinado.



Figura 3.8 - dessecador.

Nesse cenário, alcançado o teor de umidade de equilíbrio nas secagens contínua e intermitente, as amostras foram levadas para outra estufa (Figura 3.9) a uma temperatura de 105 °C e deixadas por um período de 24 h. Após esse período, as amostras foram levadas para o dessecador até atingirem a temperatura ambiente; em seguida pesadas e assim, obtida a massa seca. Adicionalmente, uma amostra fresca em triplicata também foi pesada e levada à estufa nas mesmas condições, visando a obtenção do teor de umidade no início do processo.



Figura 3.9 - Estufa utilizada.

Durante os experimentos de secagem, foram coletados dados da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente (laboratório) usando um Termo-Higrômetro digital (Minipa, MT-242) (Figura 3.10). Obtidos os dados, foi realizada a média destes valores.



Figura 3.10 - Termo-Higrômetro digital.

Foram realizados oito experimentos de secagem (E_1 a E_8), sendo seis secagens intermitentes com razão de intermitência de $\alpha = 2/3$ e duas secagens contínuas. Neste trabalho, foi adotada a definição de razão de intermitência dada por Kumar et al. (2014), em que define-se a razão de intermitência (α) como sendo a razão entre o período de têmpera 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. 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. As informações sobre cada experimento são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros para cada experimento de secagem de melão pré-tratado osmoticamente.

Experimento	Secagem	t_{in} (min)	t_{out} (min)	Temperatura (°C)
E_1	Contínua	-	-	50
E_2	Intermitente	10	20	50
E_3	Intermitente	20	40	50
E_4	Intermitente	30	60	50
E_5	Contínua	-	-	70
E_6	Intermitente	10	20	70
E_7	Intermitente	20	40	70
E_8	Intermitente	30	60	70

Com os dados da massa (m) e da massa seca (m_s), foi possível determinar 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 razão de umidade foi calculada a partir dos dados de perda de massa das amostras durante as secagens e dos teores de umidade de equilíbrio (Equação 3.2). Com isso, foram construídas as curvas de razão de umidade em função do tempo de secagem.

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

onde:

\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; e

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

3.4 - Descrição da cinética de secagem por modelos empíricos

Para o ajuste matemático das curvas de secagem contínua e intermitente dos pedaços de melão, foram ajustadas seis equações empíricas frequentemente utilizadas para representação da secagem de produtos agrícolas, apresentadas na Tabela 3.2. Para descrever a secagem intermitente, os períodos de tâmara foram eliminados, analisando apenas o período em que as amostras ficaram dentro do secador (tempo de operação efetiva).

Tabela 3.2 - Modelos empíricos utilizados para prever a cinética de secagem dos paralelepípedos de melão.

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. (2012a)	(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, foram utilizados 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 aos 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. (2014b), 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	$d\bar{X}^*/dt = -a \exp(-bt)$	(3.9)
Lewis	$d\bar{X}^*/dt = -a \exp(-at)$	(3.10)
Page	$d\bar{X}^*/dt = -a bt^{b-1} \exp(-at^b)$	(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 contínua e intermitente, considerando a geometria de um paralelepípedo no desenvolvimento dos modelos difusivos. Para a solução analítica, foram empregados os modelos de difusão líquida, em que pressupõe condição de contorno do primeiro tipo (condição de contorno prescrita) e do terceiro tipo (condição de contorno convectiva). Também foi utilizada a solução numérica tridimensional da equação de difusão para descrever o processo difusivo em coordenadas cartesianas dos pedaços de melão. Como parte do estudo, o período de têmpera foi incluído na cinética de secagem intermitente, bem como o encolhimento do material e a difusividade de massa em função do teor de umidade local.

3.6 - Equação de difusão para a geometria do problema

Para descrever o processo de secagem do melão, foi utilizada a equação de difusão, descrita a partir da equação geral de transporte para o caso em que a velocidade do meio e o termo fonte sejam iguais a zero. Nesse caso, a equação pode ser escrita assumindo que $\lambda = 1$; $\Phi = X$; $\Gamma^\Phi = D$, tem-se (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992; LIMA, 1999; BIRD et al., 2001; MALISKA, 2004):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla X), \quad (3.15)$$

em que: X representa o teor de umidade nos pontos (x, y, z); t é o tempo; e D é a difusividade efetiva de massa.

A equação de difusão aplicada ao transporte de massa pode ser escrita em coordenadas cartesianas, a partir da Equação (3.15), da seguinte forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial X}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial X}{\partial z} \right), \quad (3.16)$$

3.7 - Solução analítica da equação de difusão

A 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 inicial deve ser uniforme;
- (c) O sólido é homogêneo e isotrópico; e
- (d) O coeficiente de transferência de massa convectivo (h) é constante durante a difusão de água;

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

A solução analítica a ser apresentada para a equação de difusão em coordenadas cartesianas (Equação 3.16) 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 através da imposição de igualdade entre o fluxo interno (difusivo) no contorno do sólido e o fluxo externo (convectivo) nas vizinhanças deste contorno.

Esse modelo foi usado para a geometria de um paralelepípedo ajustado aos dados experimentais de secagem contínua e intermitente (tempo de operação efetiva). A solução para essa condição de contorno é expressa da seguinte forma:

$$-D \frac{\partial X(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=\pm L_x/2} = h(X(x, y, z, t)|_{x=\pm L_x/2} - X_{eq}) \quad (3.17)$$

$$-D \frac{\partial X(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=\pm L_y/2} = h(X(x, y, z, t)|_{y=\pm L_y/2} - X_{eq}) \quad (3.18)$$

$$-D \frac{\partial X(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=\pm L_z/2} = h(X(x, y, z, t)|_{z=\pm L_z/2} - X_{eq}) \quad (3.19)$$

em que: D é a difusividade efetiva de massa; h é o coeficiente de transferência convectiva de massa; X_{eq} é o teor de umidade de equilíbrio (b.s.); e L_x , L_y e L_z são os comprimentos das arestas do paralelepípedo ao longo dos eixos x , y e z , respectivamente. Assim, a solução analítica da Equação (3.16), considerando a condição de contorno definida pelas Equações (3.17), (3.18) e (3.19), é obtida por separação de variáveis, dada por: Luikov (1968), Crank, (1992) e Pinheiro (2017).

$$X(x, y, z, t) = X_{eq} - (X_{eq} - X_i) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n A_m A_k \cos\left(\frac{\mu_n x}{L_x/2}\right) \times \cos\left(\frac{\mu_m y}{L_y/2}\right) \times \cos\left(\frac{\mu_k z}{L_z/2}\right) \exp\left[-\left(\frac{\mu_n^2}{(L_x/2)^2} + \frac{\mu_m^2}{(L_y/2)^2} + \frac{\mu_k^2}{(L_z/2)^2}\right) Dt\right] \quad (3.20)$$

onde: $X(x, y, z, t)$ é o teor de umidade no instante t numa posição definida pelas coordenadas x , y e z ; X_i é o teor de umidade inicial e os parâmetros n , m e k representam inteiros positivos. As expressões para os coeficientes A_n , A_m e A_k são:

$$A_n = \frac{4 \operatorname{sen}(\mu_n)}{2\mu_n + \operatorname{sen}(2\mu_n)}, \quad (3.21)$$

$$A_m = \frac{4 \operatorname{sen}(\mu_m)}{2\mu_m + \operatorname{sen}(2\mu_m)}, \quad (3.22)$$

$$A_k = \frac{4 \operatorname{sen}(\mu_k)}{2\mu_k + \operatorname{sen}(2\mu_k)}. \quad (3.23)$$

As raízes μ_n , μ_m , μ_k são determinadas a partir das equações características, dadas por:

$$\operatorname{cotg} \mu_n = \frac{\mu_n}{Bi} \quad (3.24)$$

$$\operatorname{cotg} \mu_m = \frac{\mu_m}{Bi} \quad (3.25)$$

$$\cotg \mu_k = \frac{\mu_k}{Bi} \quad (3.26)$$

sendo Bi o número de Biot para a transferência de massa, definidos da seguinte forma:

$$Bi_1 = \frac{hL/2}{D}, \quad (3.27)$$

em que L é o comprimento. É imposto o mesmo h para todas as superfícies.

Como mencionado anteriormente, $X(x, y, z, t)$ remete ao teor de umidade em qualquer posição $(x, y$ e $z)$, num instante t . Contudo, em muitos casos de interesse, é válido conhecer o valor do teor de umidade no corpo inteiro, ao longo do processo. Para esses casos, a expressão para o valor médio do teor de umidade, num instante t , é dada da seguinte forma:

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{V} \int X(x, y, z, t) dV \quad (3.28)$$

em que V é o volume do paralelepípedo.

Substituindo a Equação (3.20) na Equação (3.28), a expressão para o teor de umidade médio é obtida para o paralelepípedo:

$$\begin{aligned} \bar{X}(t) = X_{eq} - (X_{eq} - X_i) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_n B_m B_k \exp \left[- \left(\frac{\mu_n^2}{(L_x/2)^2} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\mu_m^2}{(L_y/2)^2} + \frac{\mu_k^2}{(L_z/2)^2} \right) Dt \right] \end{aligned} \quad (3.29)$$

sendo as expressões para os coeficientes B_n , B_m e B_k escritas da seguinte forma:

$$B_n = \frac{2Bi_1^2}{\mu_n^2(Bi_1^2 + Bi_1 + \mu_n^2)}, \quad (3.30)$$

$$B_m = \frac{2Bi_2^2}{\mu_m^2(Bi_2^2 + Bi_2 + \mu_m^2)}, \quad (3.31)$$

$$B_k = \frac{2Bi_3^2}{\mu_k^2(Bi_3^2 + Bi_3 + \mu_k^2)}. \quad (3.32)$$

impondo o mesmo valor de h para todas as arestas do paralelepípedo, o número de Biot (Bi) resulta em:

$$Bi_1 = \frac{h(L_x/2)}{D}, \quad (3.33)$$

$$Bi_2 = Bi_1 \frac{L_y}{L_x}, \quad (3.34)$$

$$Bi_3 = Bi_1 \frac{L_z}{L_x}. \quad (3.35)$$

As Equações (3.24) a (3.26) são equações transcendentais, que podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\mu_j \operatorname{sen} \mu_j - Bi \cos \mu_j = 0 \quad (3.36)$$

A Equação (3.36) pode ser calculada para qualquer número de Biot especificado. Para isso, foi utilizado um algoritmo para o cálculo das raízes da equação para os valores especificados de Bi , que variam desde 0, correspondendo a uma resistência infinita ao fluxo de água na superfície, até 200, que na prática corresponde à condição de contorno prescrita.

Convém observar que, se a condição de contorno adequada ao processo difusivo for de primeiro tipo, basta impor, ao número de Biot, $Bi \rightarrow \infty$ na solução apresentada anteriormente. Neste caso, os coeficientes B_n , B_m e B_k , dados pelas Equações (3.30), (3.31) e (3.32) tornam-se:

$$B_n = \frac{2}{\mu_n^2}, \quad (3.37)$$

$$B_m = \frac{2}{\mu_m^2}, \quad (3.38)$$

$$B_k = \frac{2}{\mu_k^2}. \quad (3.39)$$

Com isso, μ_n , μ_m e μ_k (raízes da equação característica para condição de contorno de primeiro tipo) são obtidas através do conjunto de equação a seguir:

$$\mu_n = (2n - 1) \frac{\pi}{2}, \quad (3.40)$$

$$\mu_m = (2m - 1) \frac{\pi}{2}, \quad (3.41)$$

$$\mu_k = (2k - 1) \frac{\pi}{2}. \quad (3.42)$$

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

Para a condição de contorno do primeiro tipo, o valor médio do teor de umidade em um determinado instante, só depende da difusividade efetiva de massa D . O algoritmo desenvolvido por Silva et al. (2009) permite a determinação da difusividade efetiva de água durante o processo de secagem, a partir de um conjunto de dados experimentais, usando o método inverso, e 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:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} [\bar{X}_i^{\text{exp}} - \bar{X}_i^{\text{ana}}(D)]^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad 3.43$$

em que: \bar{X}_i^{exp} é o teor de umidade médio experimental, referente ao ponto i ; $\bar{X}_i^{\text{ana}}(D)$ é o teor de umidade médio correspondente ao ponto i obtido a partir da solução analítica; σ_i é o desvio padrão do teor de umidade experimental; D é a difusividade efetiva de massa; e N_p é o número de pontos experimentais.

O algoritmo descrito é baseado na determinação da remoção ótima de pontos experimentais antes do ajuste da solução analítica ao conjunto de dados conhecidos, mantendo a maior quantidade de informação estatística (SILVA et al., 2014a). Esse algoritmo pode ser utilizado para determinar D para as seguintes geometrias: parede infinita, cilindro infinito, esfera, cilindro finito e paralelepípedo; e 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 condição de contorno do primeiro tipo, com certa quantidade de termos da série. Dessa forma, $\bar{X}_i^{\text{ana}}(D)$ pode ser calculado para determinados tempos de interesse, possibilitando determinar χ^2 para um conjunto de dados experimentais através da Equação (3.43). Em seguida, 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 de 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.

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

Para proceder com a otimização descrita no item 3.8 aplicada a uma condição de contorno do terceiro tipo, a Equação (3.43) deve ser adaptada para este caso e passa a ser definida pela função objetivo a seguir (SILVA, 2010b):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} [\bar{X}_i^{\text{exp}} - \bar{X}_i^{\text{ana}}(D, Bi)]^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad 3.44$$

Quando a condição de contorno é convectiva, a função objetivo descrita pela Equação (3.44) passa a depender não só da difusividade efetiva de massa, mas também do número de Biot (Bi), ou de forma equivalente, do coeficiente de transferência convectivo de massa (h). Porém, para um determinado número de Biot, a Equação (3.44) torna-se função somente da difusividade efetiva de massa, equivalendo-se à Equação (3.43). Deste modo, o otimizador pode ser aplicado na minimização da Equação (3.44), determinando um valor ótimo de D para um número de Biot especificado. Assumindo que D e h sejam parâmetros 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 dentre 469 mínimos determinados. Então, para o otimizador desenvolvido por Silva et al. (2009), não é necessário que valores iniciais ou intervalos de busca sejam indicados para a busca por valores ótimos para D e Bi e, conseqüentemente, h, desde que o domínio inteiro para os números de Biot seja varrido.

Para a geometria de um paralelepípedo, a expressão para o número de Biot foi definida pela Equação (3.33), sendo que, para os números de Biot entre 0 e 10 foram usadas apenas 16 raízes da equação característica, dada pela Equação (3.36) e, para valores de Bi maiores que 10, utilizou-se 25 raízes nos cálculos. Para os números de Biot definidos pelas Equações (3.34) e (3.35), as raízes da equação característica foram calculadas por interpolação linear, usando valores disponíveis.

3.10 - Solução numérica da equação de difusão para a geometria de um paralelepípedo

O método dos volumes finitos (MVF) foi aplicado neste caso, com uma formulação totalmente implícita para obter uma solução numérica tridimensional da equação de difusão em coordenadas cartesianas, para descrever o processo de secagem contínua e intermitente de melão cortados na forma de paralelepípedos, pressupondo a condição de contorno de terceiro tipo (PATANKAR, 1980; MALISKA, 2004; SILVA, 2007). A partir da solução numérica, foi possível simular a distribuição de água no interior dos pedaços de melão, em instantes previamente estipulados.

3.10.1 - Solução numérica tridimensional

Para resolver numericamente a Equação (3.16), substitui-se o domínio contínuo em um domínio discretizado, ou seja, divide-se o domínio em um número finito de subdomínios de volumes elementares denominados volumes de controle ou volumes finitos. Com isso, a equação foi substituída por equações algébricas equivalentes, uma para cada volume de controle. A Figura 3.11 apresenta um domínio discretizado, dividido numa malha uniforme com 27 tipos distintos de volume de controle e sua localização na malha. Esses volumes são: interno, leste (E), oeste (W), norte (N), sul (S), frente (F), atrás (B), leste-norte (EN), leste-sul (ES), leste-frente (EF), leste-atrás (EB), oeste-norte (WN), oeste-sul (WS), oeste-frente (WF), oeste-atrás (WB), norte-frente (NF), norte-atrás (NB), sul-frente (SF), sul-atrás (SB), leste-norte-frente (ENF), leste-norte-atrás (ENB), leste-sul-frente (ESF), leste-sul-atrás (ESB), oeste-norte-frente (WNF), oeste-norte-atrás (WNB), oeste-sul-frente (WSF), oeste-sul-atrás (WSB).

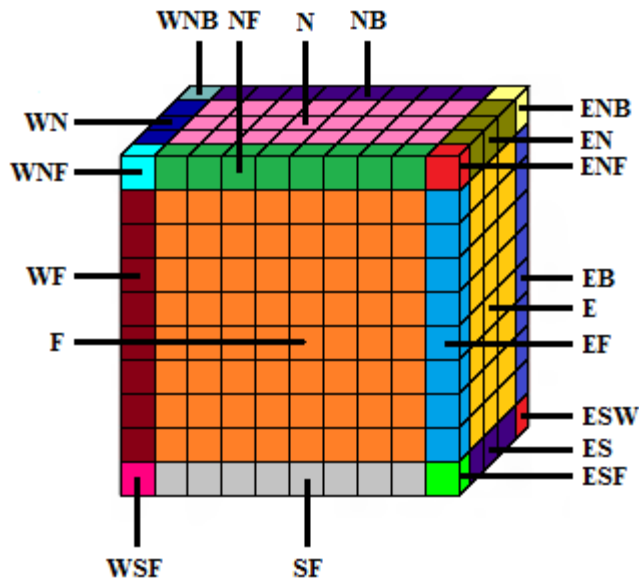


Figura 3.11 - Malha tridimensional para a solução numérica da equação de difusão para o paralelepípedo.

Integrando a equação de difusão em coordenadas cartesianas (Equação 3.16) no espaço ($\Delta x \Delta y \Delta z$) e no tempo (Δt), obtém-se:

$$\begin{aligned}
\int_t^{t+\Delta t} \int_v \frac{\partial \Phi}{\partial t} dx dy dz dt &= \int_t^{t+\Delta t} \int_v \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \right] dx dy dz dt \\
\int_t^{t+\Delta t} \int_v \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) \right] dx dy dz dt &+ \int_t^{t+\Delta t} \int_v \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \right] dx dy dz dt
\end{aligned} \tag{3.45}$$

em que:

$$\begin{aligned}
\int_t^{t+\Delta t} \int_v \frac{\Phi_P - \Phi_P^0}{\Delta t} dx dy dz dt &= \int_t^{t+\Delta t} \int_v \left[\left(\frac{\Gamma_e^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e - \Gamma_w^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w}{\Delta x} \right) \right. \\
&+ \left. \left(\frac{\Gamma_n^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n - \Gamma_s^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s}{\Delta y} \right) + \left(\frac{\Gamma_f^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f - \Gamma_b^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b}{\Delta z} \right) \right] dx dy dz dt
\end{aligned} \tag{3.46}$$

logo:

$$\begin{aligned}
\frac{\Phi_P - \Phi_P^0}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z &= \left(\Gamma_e^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e - \Gamma_w^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta y \Delta z \\
+ \left(\Gamma_n^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n - \Gamma_s^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s \right) \Delta x \Delta z &+ \left(\Gamma_f^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f - \Gamma_b^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b \right) \Delta x \Delta y
\end{aligned} \tag{3.47}$$

em que o termo com sobrescrito 0 significa “tempo anterior” (t) e sem o sobrescrito significa “tempo atual” (t + Δt).

3.10.2 - Volumes de controle internos

De acordo com a Figura 3.12, o volume de controle interno i tem um ponto nodal P e vizinhos a norte, sul, leste, oeste, frente e trás. As letras minúsculas n, s, e, w, f e b referem-se às interfaces do referido volume de controle.

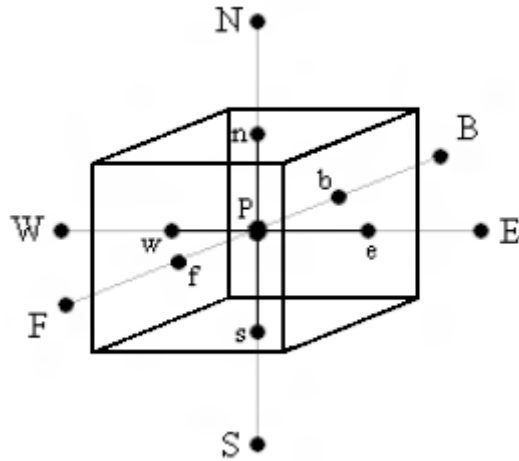


Figura 3.12 - Volume de controle interno com ponto nodal P e seus vizinhos a norte, sul, leste, oeste, frente e trás.

3.10.2.1 - Discretização dos volumes de controle internos

Com base na Figura 3.12, para um volume de controle interno, as derivadas parciais da Equação (3.47) podem ser aproximadas da seguinte forma:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right|_e = \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta x_e}; \quad (3.48)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right|_n = \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n}; \quad (3.49)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_f = \frac{\Phi_F - \Phi_P}{\Delta z_f}; \quad (3.50)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right|_w = \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta x_w}; \quad (3.51)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right|_s = \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s}; \quad (3.52)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_b = \frac{\Phi_P - \Phi_B}{\Delta z_b}; \quad (3.53)$$

A partir da Equação (3.47), com as derivadas das Equações (3.48) a (3.53) aplicadas nas interfaces do volume de controle interno, para uma formulação totalmente implícita, obtém-se:

$$\begin{aligned}
\frac{\Phi_P - \Phi_P^0}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z &= \Gamma_e^\Phi \left(\frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta x_e} \right) \Delta y \Delta z - \Gamma_w^\Phi \left(\frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta x_w} \right) \Delta y \Delta z \\
+ \Gamma_n^\Phi \left(\frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n} \right) \Delta x \Delta z - \Gamma_s^\Phi \left(\frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} \right) \Delta x \Delta z + \Gamma_f^\Phi \left(\frac{\Phi_F - \Phi_P}{\Delta z_f} \right) \Delta x \Delta y \\
- \Gamma_b^\Phi \left(\frac{\Phi_P - \Phi_B}{\Delta z_b} \right) \Delta x \Delta y
\end{aligned} \tag{3.54}$$

Assim, a Equação (3.54), discretizada para um volume de controle interno, pode ser escrita da seguinte forma:

$$A_p \Phi_P = A_e \Phi_E + A_w \Phi_W + A_n \Phi_N + A_s \Phi_S + A_f \Phi_F + A_b \Phi_B + B \tag{3.55}$$

em que:

$$A_p = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} + \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} + \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} + \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} + \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} + \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b}, \tag{3.56}$$

$$A_e = \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e}, \tag{3.57}$$

$$A_w = \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \tag{3.58}$$

$$A_n = \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \tag{3.59}$$

$$A_s = \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \quad (3.60)$$

$$A_f = \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \quad (3.61)$$

$$A_b = \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \quad (3.62)$$

$$B = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \Phi_P^0 \quad (3.63)$$

3.10.3 - Discretização dos volumes de controle externos

Os volumes de controle externos, como o apresentado na Figura 3.13, possuem fronteiras com o meio externo, a oeste (W), a norte (N) e a frente (F).

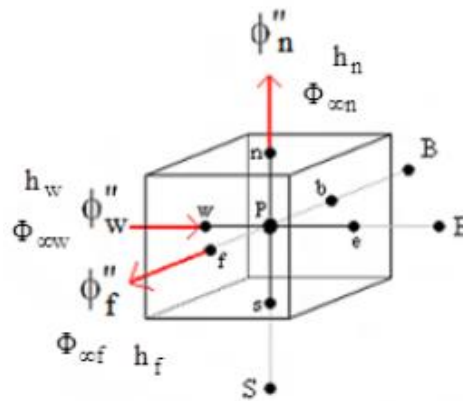


Figura 3.13 - Volume de controle externo com ponto nodal P.

Considerando a condição de contorno convectiva, o fluxo difusivo (fluxo interno) no contorno oeste é expresso da seguinte forma:

$$\phi''_w = -\Gamma_w^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_w}{\Delta x_w / 2} \quad (3.64)$$

e o fluxo convectivo (fluxo externo) a oeste é expresso como:

$$\phi''_w = h_w(\Phi_{\infty w} - \Phi_w) \quad (3.65)$$

em que h_w é o coeficiente de transferência de massa convectivo a oeste e Φ_{∞} expressa o valor de equilíbrio da variável de interesse no contorno oeste. Igualando a Equação (3.64) à Equação (3.65), obtém-se:

$$\Phi_w = \frac{\frac{2\Gamma_w^\phi}{h_w \Delta x_w} \Phi_P + \Phi_{\infty w}}{\frac{2\Gamma_w^\phi}{h_w \Delta x_w} + 1} \quad (3.66)$$

substituindo a Equação (3.66) na Equação (3.65):

$$\phi''_w = \frac{\Phi_{\infty w} - \Phi_P}{\frac{\Delta x_w}{2\Gamma_w^\phi} + \frac{1}{h_w}} \quad (3.67)$$

Analogamente para o contorno norte, obtém-se:

$$\phi''_n = \frac{\Phi_P - \Phi_{\infty n}}{\frac{\Delta y_n}{2\Gamma_n^\phi} + \frac{1}{h_n}} \quad (3.68)$$

e ainda, para o contorno frente:

$$\phi''_f = \frac{\Phi_P - \Phi_{\infty f}}{\frac{\Delta z_f}{2\Gamma_f^\phi} + \frac{1}{h_f}} \quad (3.69)$$

Com as derivadas definidas, dadas nas Equações (3,48) à (3.53) e aplicadas nas interfaces do volume de controle externo através de uma formulação totalmente implícita, levando-se em

consideração as expressões para o fluxo dadas pelas Equações (3.67), (3.68) e (3.69), a Equação (3.47), relativa ao volume de controle analisado resulta em:

$$\begin{aligned} \frac{\Phi_P - \Phi_P^0}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z = & \frac{\Phi_{\infty w} - \Phi_P}{\frac{\Delta x_w}{2\Gamma_w^\Phi} + \frac{1}{h_w}} \Delta y \Delta z + \Gamma_e^\Phi \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta x_e} \Delta y \Delta z - \frac{\Phi_P - \Phi_{\infty n}}{\frac{\Delta y_n}{2\Gamma_n^\Phi} + \frac{1}{h_n}} \Delta x \Delta z \\ & - \Gamma_s^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} \Delta x \Delta z - \frac{\Phi_P - \Phi_{\infty f}}{\frac{\Delta z_f}{2\Gamma_f^\Phi} + \frac{1}{h_f}} \Delta x \Delta y - \Gamma_b^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_B}{\Delta z_b} \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (3.70)$$

que, na forma discretizada, torna-se:

$$A_p \Phi_P = A_e \Phi_E + A_s \Phi_S + A_b \Phi_B + B, \quad (3.71)$$

com:

$$\begin{aligned} A_p = & \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} + \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} + \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \\ & + \frac{\Delta y \Delta z}{\frac{\Delta x_w}{2\Gamma_w^\Phi} + \frac{1}{h_w}} + \frac{\Delta x \Delta z}{\frac{\Delta y_n}{2\Gamma_n^\Phi} + \frac{1}{h_n}} + \frac{\Delta x \Delta y}{\frac{\Delta z_f}{2\Gamma_f^\Phi} + \frac{1}{h_f}}, \end{aligned} \quad (3.72)$$

$$A_e = \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \quad (3.73)$$

$$A_s = \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \quad (3.74)$$

$$A_b = \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \quad (3.75)$$

$$B = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \Phi_P^0 + \frac{\Phi_{\infty w}}{\frac{\Delta x_w}{2\Gamma_w^\Phi} + \frac{1}{h_w}} \Delta y \Delta z + \frac{\Phi_{\infty n}}{\frac{\Delta y_n}{2\Gamma_n^\Phi} + \frac{1}{h_n}} \Delta x \Delta z + \frac{\Phi_{\infty f}}{\frac{\Delta z_f}{2\Gamma_f^\Phi} + \frac{1}{h_f}} \Delta x \Delta y \quad (3.76)$$

Analogamente, podem-se determinar as equações discretizadas, na forma algébrica, para os volumes de controle externos nas demais faces, ilustrados na Figura 3.11.

3.11 - Definição de Γ^Φ nas interfaces dos volumes de controle

Para a discretização nos pontos nodais de cada volume de controle, o parâmetro Γ^Φ depende da grandeza de interesse Φ . Esse parâmetro é obtido através de uma função f de Φ_p a ser determinada de acordo com os dados experimentais, expressa da seguinte forma:

$$\Gamma_p^\Phi = f(\Phi_p, a, b) \quad (3.77)$$

em que a e b são parâmetros de ajuste da solução numérica aos dados experimentais, obtidos por otimização. No entanto, as equações discretizadas requerem os valores do parâmetro Γ^Φ nas interfaces leste, oeste, norte, sul, frente e atrás de cada volume de controle, representados pelos termos Γ_e^Φ , Γ_w^Φ , Γ_n^Φ , Γ_s^Φ , Γ_f^Φ , Γ_b^Φ , respectivamente. Quando Γ^Φ é considerado constante, significa que o seu valor é o mesmo em todo o domínio. Entretanto, se Γ^Φ for variável, deve ser estimado seu valor para todas as faces de cada volume de controle.

Para um problema de difusão, em geral, ocorre que cada volume de controle é ligeiramente diferente um do outro, visto que cada volume de controle tem um valor diferente da grandeza Φ e, conseqüentemente, isso afeta as propriedades físicas de cada volume de controle. Essa análise pode ser feita tomando como base a Figura 3.14, que representa um plano horizontal de dois volumes de controle adjacentes com uma interface comum entre os pontos nodais P e E . A Figura 3.14 (a) apresenta um volume de controle com ponto nodal P , com valor específico para o coeficiente de transporte Γ_P^Φ , enquanto no volume de controle vizinho, com ponto nodal E , possui um coeficiente de transporte Γ_E^Φ . d_P e d_E denotam as distâncias da interface aos pontos nodais P e E . A Figura 3.14 (b) apresenta um domínio equivalente, com coeficiente de transporte constante e igual a Γ_{eq}^Φ para os dois volumes de controle.

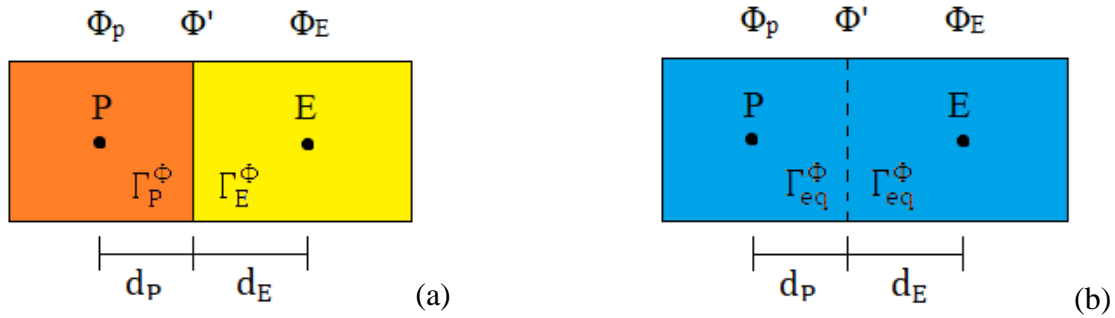


Figura 3.14 - Volumes de controle com valor específico para o coeficiente de transporte: Γ_P^Φ e Γ_E^Φ (a); Domínio equivalente com coeficiente de transporte Γ_{eq}^Φ (b).

Com base na Figura 3.14, um domínio com propriedades diferentes (Γ_P^Φ e Γ_E^Φ) pode ser substituído por um domínio com propriedades equivalentes (Γ_{eq}^Φ) e que, portanto, Γ_{eq}^Φ também é o valor na interface comum entre P e E. A seguinte Equação deve ser usada para determinar o parâmetro Γ_{eq}^Φ (SILVA, 2009):

$$\Gamma_{eq}^\Phi = \frac{\Gamma_P^\Phi \Gamma_E^\Phi}{f_d \Gamma_E^\Phi + (1 - f_d) \Gamma_P^\Phi} \quad 3.78$$

em que:

$$f_d = \frac{d_P}{d_P + d_E} \quad 3.79$$

Nos pontos nodais, Γ^Φ pode ser calculado através de uma relação apropriada entre tal parâmetro e a variável dependente Φ , como pode ser visto de forma mais detalhada em Silva (2009).

Para o caso de uma malha uniforme, as distâncias da interface aos pontos nodais são iguais, $d_P = d_E$, resultando em $f_d = 1/2$. Desta forma, a Equação (3.78) torna-se:

$$\Gamma_{eq}^\Phi = \frac{2\Gamma_P^\Phi \Gamma_E^\Phi}{\Gamma_E^\Phi + \Gamma_P^\Phi} \quad 3.80$$

A Equação (3.80) também pode ser usada para o coeficiente de transporte constante. Neste caso, tem-se que $\Gamma_P^\Phi = \Gamma_E^\Phi$, conseqüentemente, a Equação (3.80) resulta em $\Gamma_{eq}^\Phi = \Gamma_P^\Phi$. Para volumes de controle localizados nos contornos, o valor de Γ^Φ nas faces externas pode ser feito igual ao valor deste parâmetro no ponto nodal do respectivo volume de controle (SILVA, 2009).

3.12 - Valor médio de uma grandeza Φ em um domínio

Deve-se ressaltar que apesar da solução da equação de difusão possibilitar determinar o valor de Φ em qualquer volume de controle em um domínio discretizado e em qualquer instante, em muitas situações é interessante obter o valor médio desta grandeza para o domínio em estudo. O valor médio da variável de interesse ($\bar{\Phi}$) pode ser obtido por uma média ponderada, usando-se o volume de cada volume de controle como o peso da ponderação. Neste sentido, tem-se:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{N_k} \Phi_{ijk} V_{ijk} \quad 3.81$$

onde i, j e k definem a posição do ponto nodal do volume de controle no domínio discretizado; N_i, N_j e N_k definem o número de volumes de controle da malha, nas faces x, y e z , respectivamente; Φ_{ijk} é o valor da grandeza no volume de controle na posição i, j, k ; V_{ijk} é o volume do volume de controle na posição i, j, k ; e V é o volume do sólido (soma de todos os V_{ijk}), dado por:

$$V = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{N_k} V_{ijk} \quad 3.82$$

3.13 - Aplicação da simetria em um paralelepípedo com malha tridimensional

Para otimizar o tempo de execução computacional, o solver acoplado para a resolução da equação de difusão tridimensional utiliza o conceito de simetria, tendo em vista que as condições físicas são iguais em todas as faces do paralelepípedo. Dessa forma, é possível resolver o problema difusivo

para apenas uma parte da forma geométrica do sólido, como por exemplo, equivalente a 1/8 do paralelepípedo, conforme demonstrado na Figura 3.15.

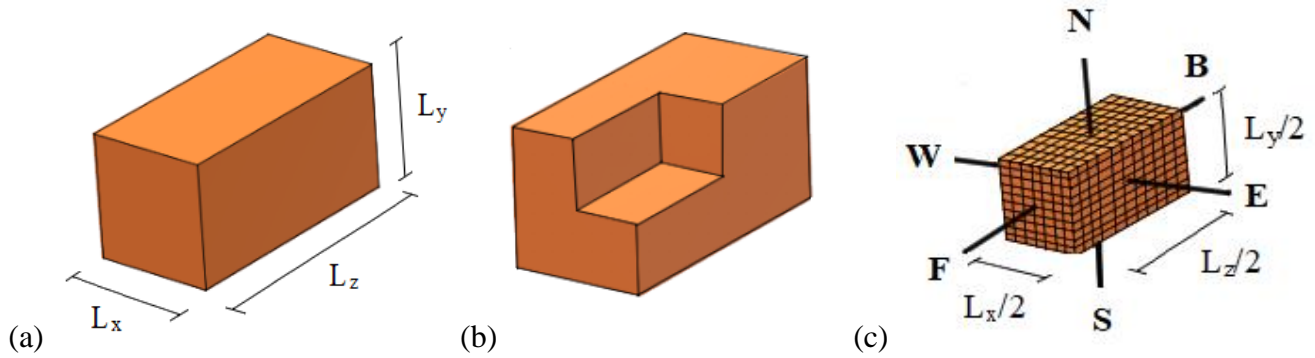


Figura 3.15 - Paralelepípedo com dimensões L_x , L_y , L_z (a); destaque para as fronteiras da parte equivalente a 1/8 que foi removido (b); parte destacada do paralelepípedo para a definição da malha tridimensional (c).

Neste caso de simetria, em que 1/8 do paralelepípedo (novo domínio) é usado, mostrado na Figura 3.15 (c), todos os volumes de controle que fazem contato com as arestas a oeste (W), sul (S) e atrás (B), o fluxo da grandeza de interesse é considerado zero ($\phi''_W = \phi''_S = \phi''_B = 0$). Desta forma, para uma solução numérica da equação de difusão com condição de contorno do terceiro tipo, o novo domínio tem os coeficientes de transferência convectivo de massa a oeste, sul e atrás, igual a zero, $h_w = h_s = h_b = 0$.

Conforme a consideração de simetria, um novo domínio é obtido, com metade das dimensões originais, isso implica em uma malha reduzida. Conseqüentemente, ocorre uma redução no tempo de execução computacional e também, economia de memória. Testes de simetria foram realizados por Galvão (2017) em seu trabalho sobre secagem de maçã cortada na forma de paralelepípedos. O autor realizou simulações considerando um sólido com geometria de um paralelepípedo e diferentes malhas. Na primeira simulação, utilizou-se um sólido com comprimentos L_x , L_y , L_z , com uma malha dividida em 20 x 20 x 20 volumes de controle; na segunda simulação, foi utilizada uma malha de 10 x 10 x 10, fazendo uso da simetria, considerando um domínio correspondente a um oitavo do domínio original ($L_x/2$, $L_y/2$ e $L_z/2$), com os fluxos da grandeza de interesse nas faces conforme descrito na Figura 3.15. Os resultados deixam evidente a redução do tempo de execução da simulação com o uso da simetria,

que é cerca de oito vezes menor do que a simulação sem o uso de simetria, demonstrando assim a economia de tempo no processo computacional. Ainda, comparando os resultados encontrados nas simulações e observando o erro relativo (%), verifica-se que existe uma perfeita concordância entre os seus valores, que também pode ser observada nos gráficos que ilustram suas cinéticas, ou seja, os resultados obtidos são idênticos para as simulações sem simetria e com simetria.

3.14 - Otimizador para a solução numérica da equação de difusão

Para determinar a difusividade efetiva de massa D , os parâmetros a e b da função que, em geral, pode ser expressa por $\Gamma_p^\Phi = f(\Phi_p, a, b)$ e juntamente com h , podem ser determinados por otimização através de um conjunto de dados experimentais. O otimizador foi desenvolvido através do método inverso, partindo de valores iniciais estabelecidos pelo usuário para os três parâmetros. Esses valores são então corrigidos para minimizar uma função objetivo, que neste caso é o qui-quadrado, expressa através de dados experimentais e de resultados obtidos por meio de simulações numéricas, definido como (BEVINGTON e ROBINSON, 1992; SILVA, 2007):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} [\bar{X}_i^{\text{exp}} - \bar{X}_i^{\text{sim}}]^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad 3.83$$

onde \bar{X}_i^{exp} é o valor do teor de umidade médio medido experimentalmente no i -ésimo ponto; \bar{X}_i^{sim} é o valor médio correspondente do teor de umidade obtido por simulação numérica; N_p é o número de pontos experimentais e $1/\sigma_i^2$ é o peso estatístico referente ao i -ésimo ponto experimental. No presente trabalho, os pesos estatísticos foram considerados iguais à unidade. De acordo com a Equação (3.83), o qui-quadrado faz uma comparação entre os dados simulados e experimentais, ou seja, depende de \bar{X}_i^{sim} que, por sua vez, depende dos parâmetros de processo D e h .

O otimizador possibilita determinar os parâmetros do processo, de forma que a solução numérica produza resultados para a cinética de secagem o mais próximo possível dos dados experimentais. Neste caso, além dos valores iniciais dos parâmetros a serem otimizados, são inseridos dados referentes à difusividade, a expressão que descreve a espessura em função do teor de umidade médio, tempo de

processo, valor do teor de umidade inicial e de equilíbrio, dentre outros. Através de método direto, o programa fornece a solução numérica da equação de difusão com a condição de contorno de terceiro tipo. Em adição a estes parâmetros, o otimizador precisa de uma função dada pela Equação (3.77) que descreva a difusividade efetiva.

O ajuste dos valores iniciais dos parâmetros minimizando o qui-quadrado é realizada em ciclos, envolvendo os seguintes passos: Passo 1. Informe o valor inicial dos parâmetros “a”, “b” e “h”. Resolva a equação de difusão e determine o qui-quadrado; Passo 2. Informe o valor para a correção de “h”; Passo 3. Corrija o parâmetro “h”, mantendo os valores dos parâmetros “a” e “b” constantes. Resolva a equação da difusão e calcule o novo qui-quadrado; Passo 4. Compare o último valor calculado para o qui-quadrado com o anterior. Se o último valor for menor, retorne ao passo 2. Caso contrário, diminua a última correção do valor de “h” e avance para o passo 5; Passo 5. Informe o valor para a correção de “a”; Passo 6. Corrija o parâmetro “a”, mantendo os valores dos parâmetros “b” e “h” constantes. Resolva a equação da difusão e calcule o novo qui-quadrado; Passo 7. Compare o último valor calculado do qui-quadrado com o anterior. Se o último valor for menor, retorne ao passo 5. Caso contrário, diminua a última correção do valor de “a” e avance para o passo 8; Passo 8. Informe o valor para a correção de “b”; Passo 9. Corrija o parâmetro “b”, mantendo os valores dos parâmetros “a” e “h” constantes. Resolva a equação da difusão e calcule o novo qui-quadrado; Passo 10. Compare o último valor calculado do qui-quadrado com o anterior. Se o último valor for menor, retorne ao passo 8. Caso contrário, diminua a última correção do valor de “b” e avance para o passo 11; Passo 11. Comece um novo ciclo, voltando ao passo 2, até atingir a convergência para os parâmetros “a”, “b” e “h”.

Se a difusividade for constante, os passos 8, 9 e 10 não são necessários. Por outro lado, 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 dos parâmetros podem ser estimados através de valores obtidos para produtos similares, disponíveis na literatura, ou através de correlações empíricas.

Para a simulação e determinação dos parâmetros de ajuste e indicadores estatísticos, o otimizador foi acoplado ao solver escrito em linguagem FORTRAN.

Para medir a qualidade dos ajustes, o segundo indicador estatístico utilizado foi o coeficiente de determinação (SILVA e SILVA, 1998).

3.15 - Descrição da secagem intermitente incluindo o período de têmpera na cinética

Para descrever a secagem dos paralelepípedos de melão osmoticamente desidratados, em que o período de têmpera também seja incluído na cinética, foi utilizado o *software* de otimização LS *Optimizer*, desenvolvido por Silva e Silva (2019), disponível gratuitamente em <http://www.labfit.net/LS.htm>. O LS *Optimizer* foi acoplado ao solver criado para o problema direto que implementa o modelo proposto, escrito em linguagem FORTRAN, através da opção de programação QuickWin Application.

Com base na metodologia descrita por Silva et al. (2022), foi possível realizar a predição da secagem intermitente, incluindo o período de têmpera. Esta metodologia utiliza equações empíricas, adaptadas para prever a cinética de processos de secagem intermitentes. O modelo proposto neste trabalho é baseado nas equações empíricas de Page e Lewis, dadas pelas Equações (3.5) e (3.4), respectivamente. Essas equações estabelecem o comando de intermitência no código computacional baseado na notação definida por Silva et al. (2022). O ciclo começa em um t_{c_0} instantâneo e terminando em $t_{c_0} + t_c$ com uma razão de intermitência $\alpha = 2/3$:

Para $t_{c_0} \leq t < t_{c_0} + \frac{t_c}{3}$, que corresponde ao período de secagem, tem-se:

$$\bar{X}^*(t) = \bar{X}^*(t_{c_0}) \exp \left[-a_{1_{in}} (t - t_{c_0})^{a_{2_{in}}} \right] \quad 3.84$$

onde $a_{1_{in}}$ e $a_{2_{in}}$ são parâmetros da equação proposta, semelhante a equação de Page para o período em que as amostras permanecem dentro do secador.

Para $t_{c_0} + \frac{t_c}{3} \leq t < t_{c_0} + t_c$, que corresponde ao período de têmpera, tem-se:

$$\bar{X}^*(t) = \bar{X}^* \left(t_{c_0} + \frac{t_c}{3} \right) \exp \left[-a_{3_{out}} \left(t - t_{c_0} - \frac{t_c}{3} \right) \right] \quad 3.85$$

onde $a_{3_{out}}$ é o parâmetro da equação proposta, semelhante a equação de Lewis para o período em que as amostras estão fora do secador.

Conforme observado por Silva et al. (2022), nota-se que o instante final de um ciclo ($t_{c_0} + t_c$), é igual ao instante inicial do ciclo seguinte. Isso significa que há uma concatenação de eventos dentro e fora do secador em cada ciclo e de um ciclo com o ciclo seguinte. Vale ressaltar que, para determinar os parâmetros $a_{1_{in}}$, $a_{2_{in}}$ e $a_{3_{out}}$, foi utilizado o *software* LS *Optimizer*. Informações detalhadas sobre a integração do solver com o *software* são explicadas no arquivo de ajuda (Help.pdf) do software, que também se encontra no Apêndice B do presente trabalho.

3.16 - Caracterização físico-química, bioativa e de cor dos paralelepípedos de melão

As análises físico-químicas dos paralelepípedos de melão foram realizadas, em triplicata, antes (in natura) e após a desidratação osmótica seguida de secagem (amostras de melão-passa). Para a caracterização, independente do tratamento, as amostras de melão foram secas até atingirem teor de umidade médio de 0,18 b.u. As análises foram as seguintes: teor de umidade, atividade de água, pH, acidez total titulável, cinzas, proteínas, ácido ascórbico, flavonoides, antocianinas, açúcares totais, açúcares redutores, açúcares não redutores, carotenoides e cor, de acordo com as metodologias descritas a seguir.

3.16.1 - Teor de umidade

O teor de umidade das amostras foi determinado pelo método gravimétrico, conforme descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008), no qual aproximadamente 5 g da amostra foram levados à estufa a 105 °C, até massa constante.

3.16.2 - Atividade de água (a_w)

A atividade de água foi determinada com auxílio do higrômetro de ponto de orvalho (Aqualab 3TE, Decagon Devices) em temperatura de 25 °C.

3.16.3 - pH

A determinação do potencial hidrogeniônico, pH, foi realizada através de leitura direta, em um pHmetro previamente calibrado com soluções tampão de pH 7,0 e 4,0, segundo a metodologia do IAL (2008).

3.16.4 - Acidez Total Titulável (ATT)

A acidez total titulável foi determinada pela titulação da amostra com solução de hidróxido de sódio a 0,1 N utilizando-se, como indicador para verificação do ponto de viragem a solução alcoólica de fenolftaleína a 1%, conforme a metodologia descrita no IAL (2008).

3.16.5 - Cinzas

As cinzas ou minerais foram determinadas por incineração, seguindo a metodologia do IAL (2008), determinando-se a perda de massa do material seco submetido a aquecimento em mufla a temperatura de 550 °C, até massa constante.

3.16.6 - Proteínas

As proteínas foram realizadas pelo método de Kjeldahl, que consiste na digestão da amostra em H₂SO₄, liberação da amônia por adição de NaOH e titulação da amônia com HCl.

3.16.7 - Ácido ascórbico

O teor de ácido ascórbico (mg/100 g) foi determinado por titulação com a solução de 2,6 diclofenolindofenol-sódio (DCFIS) até obtenção de coloração róseo claro persistente e como solução extratora o ácido oxálico, conforme descrito pela AOAC (1997), modificada por Benassi e Antunes (1998).

3.16.8 - Flavonoides e antocianinas

Os flavonoides e as antocianinas totais foram quantificados segundo a metodologia descrita por Francis (1982) e as leituras da absorbância foram realizadas em espectrofotômetro com comprimento de onda de 374 nm para os flavonoides e 535 nm, para antocianinas, sendo os resultados expressos em mg/100 g.

3.16.9 - Açúcares totais, açúcares redutores e açúcares não redutores

Os açúcares totais, redutores e não redutores foram analisados em triplicata, de acordo com as metodologias descritas no manual do IAL (2008), o qual consiste da redução do cobre presente na solução de Fehling através de açúcares invertidos. O conteúdo de açúcar presente na amostra foi obtido pelo volume de solução de açúcar necessário para reduzir completamente a solução de Fehling de volume conhecido.

3.16.10 - Carotenoides e cor

O teor de carotenoides foi determinado seguindo a metodologia propostas por Lichtenthaler (1987). Os parâmetros de cor foram determinados por leitura direta das amostras utilizando-se o espectrofotômetro portátil (MiniScan HunterLab XE Plus), com sistema de cor Cielab, com determinação dos seguintes parâmetros: L^* representa a luminosidade, transição do branco (0) para o preto (100); valores de $-a^*$ define a cor verde e valores de $+a^*$ a cor vermelha, já os valores de $-b^*$ representam a cor azul e $+b^*$ a cor amarela.

3.16.11 - Análise estatística dos dados experimentais

Os dados obtidos com relação à caracterização físico-química dos paralelepípedos de melão desidratados foram avaliados estatisticamente por meio de um delineamento inteiramente casualizado. A comparação entre médias foi realizada através do teste de Tukey a 5% de probabilidade, com o auxílio do programa estatístico ASSISTAT versão 7.7 beta (SILVA e AZEVEDO, 2016).

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados referentes aos estudos experimental e teórico dos processos de secagem contínua e intermitente de melão cortado na forma de paralelepípedos pré-tratados osmoticamente. Inicialmente, são apresentados os resultados obtidos na descrição da cinética de secagem por meio de modelos empíricos e de difusão para diferentes condições operacionais. Adiante, é feita uma análise comparativa entre os processos contínuo e intermitente em relação ao consumo de energia. Além disso, para a secagem intermitente, é feita uma análise detalhada dos resultados obtidos através do modelo proposto para descrever a secagem com o período de intermitência incluso no processo. Por fim, são apresentados os resultados obtidos para as análises físico-químicas e bioativas, fornecendo uma visão completa dos aspectos experimentais e teóricos abordados no estudo.

4.1 - Condições experimentais da secagem convectiva

Os estudos experimentais foram direcionados para desidratação osmótica e posterior secagem em estufa de paralelepípedos de melão em estágio de maturação maduro. O teor de umidade inicial apresentado pelas amostras in natura, em base seca, foi igual a 11,60. Na Tabela 4.1 são apresentadas informações sobre os experimentos de secagem convectiva pós-tratamento osmótico, referentes ao ar ambiente (temperatura e umidade relativa) e dados do melão (teor de umidade inicial e de equilíbrio), incluindo as dimensões médias iniciais. Os valores de L_x , L_y e L_z denotam as dimensões do paralelepípedo no sentido de cada eixo coordenado, após o processo de desidratação osmótica. A título de organização, os experimentos relativos à secagem têm a nomenclatura descrita na Tabela 3.1.

Tabela 4.1 - Dados referentes aos experimentos de secagem do melão pré-tratados osmoticamente.

Experimento	Ar ambiente		Dados do melão		Dimensões médias (m)		
	T _a (°C)	UR (%)	X _o (b.s.)	X _{eq} (b.s.)	L _x x 10 ⁻³	L _y x 10 ⁻³	L _z x 10 ⁻³
E ₁	26,0	62,3	2,408	0,148	8,04	8,25	18,77
E ₂	25,1	60,4	2,165	0,173	8,46	8,06	17,65
E ₃	25,3	65,1	2,632	0,190	8,40	8,01	17,76
E ₄	25,2	65,1	2,957	0,197	8,47	8,21	19,33
E ₅	26,8	60,5	2,525	0,115	8,54	8,01	18,12
E ₆	26,1	59,7	2,606	0,163	9,10	8,05	18,40
E ₇	26,8	60,5	2,749	0,125	8,51	8,72	17,72
E ₈	25,2	62,0	2,406	0,144	8,40	8,05	18,01

4.2 - Secagem contínua e intermitente do melão pré-tratado osmoticamente

Os experimentos de secagem contínua e intermitente das amostras de melão, cortado em forma de paralelepípedo, foram realizados de acordo com a metodologia descrita no Capítulo 3, seção 3.3. Os resultados obtidos para as razões de umidade adimensional (\bar{X}^*) em função do tempo, são apresentados nas Figuras 4.1 a 4.3. Os dados obtidos para as razões de umidade são revelados em Apêndice, bem como nas Tabelas A1 até A8.

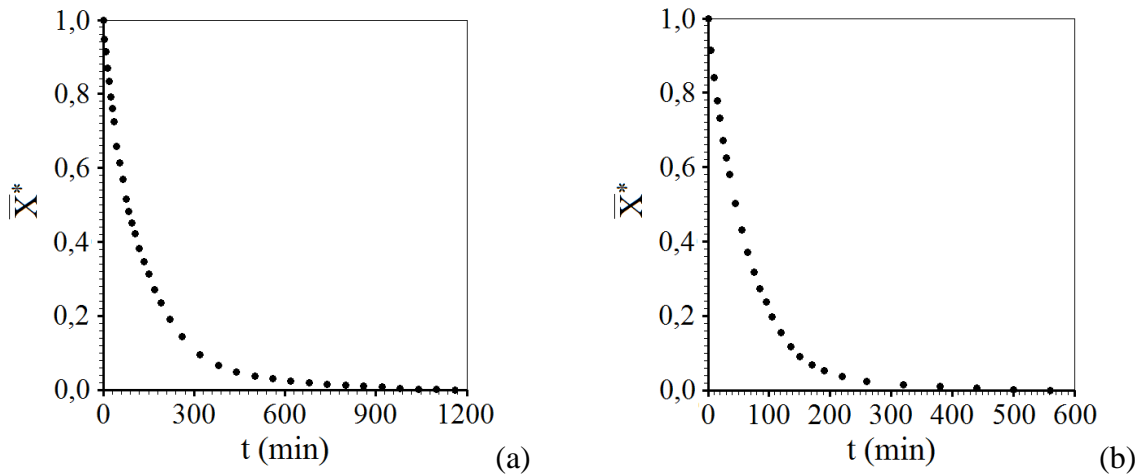


Figura 4.1 - Cinéticas da secagem contínua nas temperaturas de 50 °C (a) e 70 °C (b).

A Figura 4.1 apresenta a razão de umidade adimensional em função do tempo para as secagens contínuas, enquanto a Figura 4.2 mostra as secagens intermitentes, considerando apenas o “tempo de operação efetiva”, ou seja, o período de têmpera foi eliminado e apenas o tempo em que as amostras permaneceram dentro do secador foi analisado. Dessa forma, simula-se o processo de secagem intermitente supondo-o contínuo, obtendo-se então os resultados apresentados a seguir.

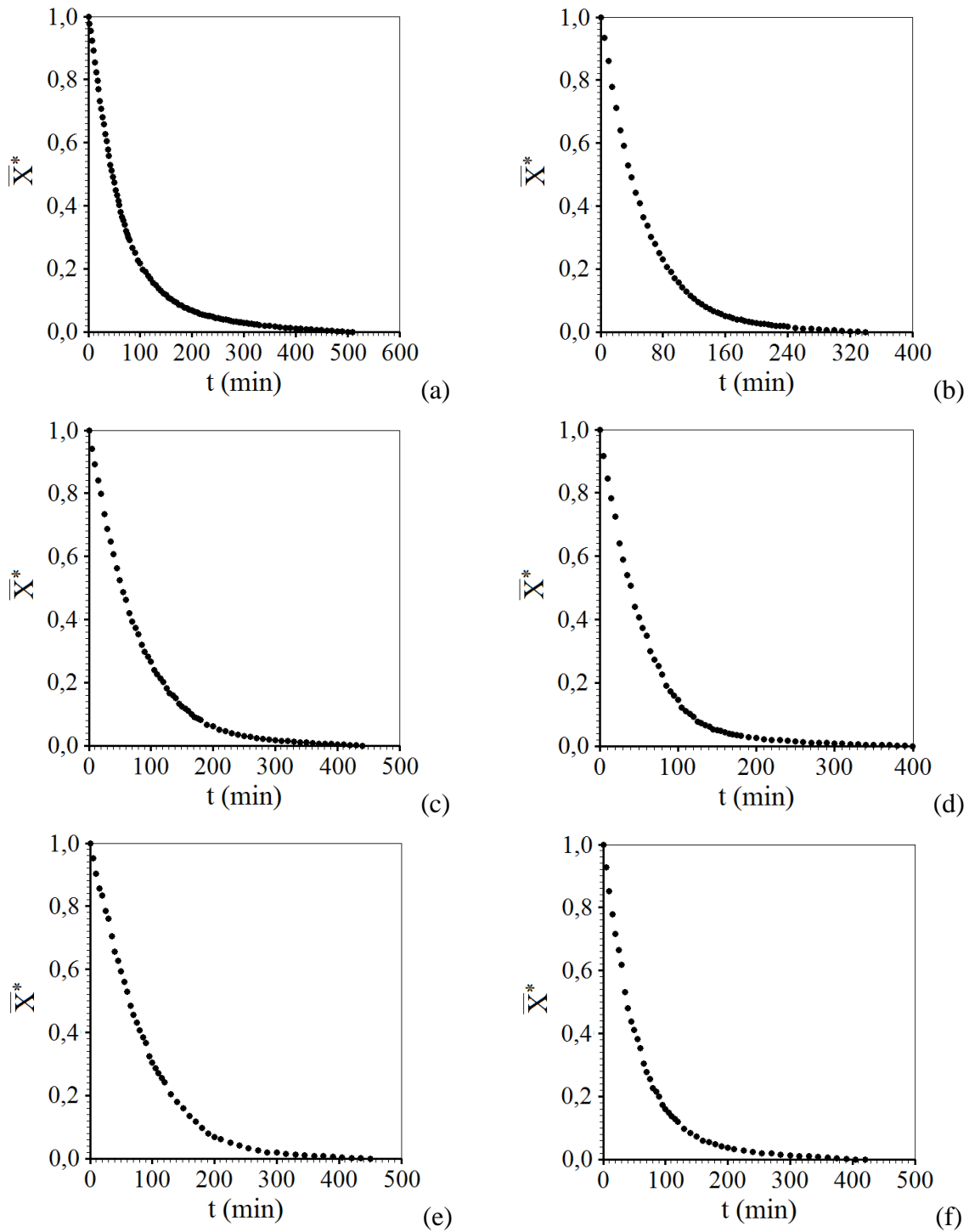


Figura 4.2 - Cinéticas das secagens intermitentes (tempo de operação efetiva): intermitente com $t_{in} = 10$ min a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) e $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b); intermitente com $t_{in} = 20$ min a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (c) e $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (d); intermitente com $t_{in} = 30$ min a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (e) e $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (f).

A partir das Figuras 4.1 e 4.2, como análise inicial, percebe-se que as curvas representam bem um processo de secagem de frutas. Observando as curvas, verifica-se que o teor de umidade diminuiu mais rapidamente com o aumento da temperatura de 50 para 70 °C, assim como, os tempos em que as amostras entraram em equilíbrio foram distintos para cada experimento, haja vista que o processo que utiliza 70 °C foi notoriamente menor, como esperado. Diversos autores analisando a cinética de secagem de frutas consideram a temperatura do ar de secagem como o parâmetro de maior influência no aumento da taxa de secagem (FEITOSA et al., 2017; CORRÊA et al., 2017; SANTOS et al., 2019).

A partir das cinéticas de secagem intermitentes mostradas na Figura 4.2, verifica-se que o tempo total de secagem foi consideravelmente reduzido em relação à secagem contínua (Figura 4.1). Isso indica que é possível estabelecer uma estratégia de economia energética empregando-se a técnica da secagem intermitente. Pesquisas reportadas na literatura também apontam redução do tempo de operação efetiva de secagem quando se utilizou secagem intermitente de produtos biológicos (LIMA et al., 2020; PEREIRA et al., 2020; SILVA et al., 2019).

A Figura 4.3 apresenta as razões de umidade relativas às secagens intermitentes, com razão de intermitência de $\alpha = 2/3$, considerando o período de têmpera na cinética de secagem das amostras de melão a 50 e 70 °C.

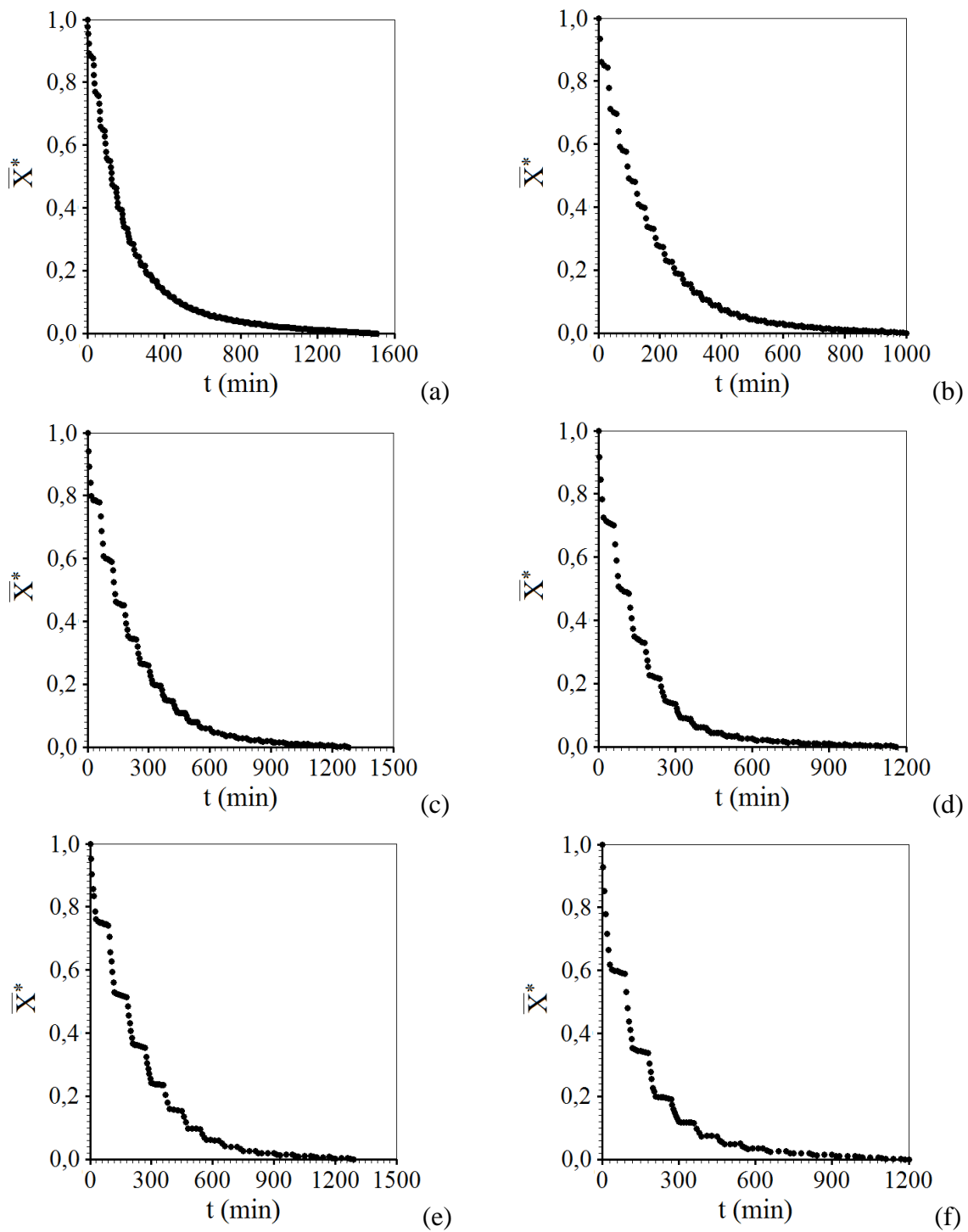


Figura 4.3 - Cinéticas das secagens intermitentes incluindo o período de têmpera: intermitente com $t_{in} = 10$ min a 50 °C (a) e 70 °C (b); intermitente com $t_{in} = 20$ min a 50 °C (c) e 70 °C (d); intermitente com $t_{in} = 30$ min a 50 °C (e) e 70 °C (f).

Na Figura 4.3 pode ser observado a razão de umidade adimensional obtida no início e no término do período de têmpera (t_{out}). Pequenas perdas de umidade foram observadas durante o período de têmpera, ou seja, durante esta fase, as amostras continuam perdendo uma certa quantidade de água, diferentemente do constatado por alguns autores, que consideram este período constante, a exemplo de Munson-McGee (2014). No entanto, foi verificado que, ao decorrer do processo de secagem, quando o teor de umidade das amostras se aproxima de 0,235 (base seca), a perda de umidade se mantém constante durante o período de têmpera e nesse momento não tem influência na cinética de secagem, independente da temperatura do ar de secagem.

4.3 - Cinéticas de secagem descritas por modelos empíricos

Esta seção apresenta os resultados obtidos na descrição da cinética de secagem contínua e intermitente de paralelepípedos de melão pré-tratados em solução osmótica utilizando diferentes modelos empíricos. Para descrever a cinética de secagem intermitente, o período de têmpera foi eliminado e apenas o tempo em que as amostras permaneceram dentro do secador foi analisado (tempo efetivo de operação). Com esta estratégia, foi possível analisar a secagem intermitente como uma secagem “pseudo-contínua”. A descrição da cinética de secagem utilizando modelos empíricos foi realizada por meio do *software* LAB Fit *Curve Fitting* (SILVA e SILVA, 2009a).

4.3.1 - Cinética de secagem contínua

Os resultados obtidos para a secagem contínua dos pedaços de melão por meio de modelos empíricos são apresentados na Tabela 4.2, que mostra todos os modelos propostos, seus respectivos parâmetros (com incertezas), coeficientes de determinação (R^2) e valores de qui-quadrado (χ^2).

Tabela 4.2 - Resultados dos modelos empíricos para a secagem contínua nas temperaturas de 50 e 70 °C.

Modelo	T (°C)	Parâmetros		R ²	χ ²
		a x 10 ⁻¹	b x 10 ⁻³		
Henderson e Pabis	50	9,7049±0,0643	7,8077±0,1176	0,9986	0,7235 x 10 ⁻²
	70	9,8902±0,0311	15,2890±0,0947	0,9997	0,7885 x 10 ⁻³
Lewis	50	0,0818±0,0011	-	0,9987	0,1140 x 10 ⁻¹
	70	0,1551±0,0008	-	0,9997	0,1181 x 10 ⁻²
Page	50	0,1351±0,0040	892,1350±6,2596	0,9997	0,1386 x 10 ⁻²
	70	0,1688±0,0051	979,7003±7,2497	0,9997	0,9066 x 10 ⁻³
Peleg	50	866,903±21,902	891,379±7,415	0,9960	0,1759 x 10 ⁻¹
	70	468,690±22,016	857,231±15,584	0,9886	0,3299 x 10 ⁻¹
Silva et alii	50	0,0668±0,0015	14,5074±1,4398	0,9994	0,3072 x 10 ⁻²
	70	0,1482±0,0019	5,1940±1,3673	0,9997	0,7474 x 10 ⁻³
Wang e Singh	50	-0,0337±0,0022	0,0024±0,0002	0,8834	0,1148 x 10 ¹
	70	-0,0733±0,0044	0,0108±0,0010	0,8901	0,6620

De acordo com as indicações estatísticas da Tabela 4.2, apenas o modelo de Wang e Singh apresentou valores de R² inferiores a 0,90, indicando ajuste insatisfatório aos dados experimentais obtidos. Em contrapartida, os demais modelos avaliados apresentaram excelentes ajustes aos dados experimentais, com valores de R² superiores a 0,988 e valores reduzidos de χ². Assim, esses modelos podem ser utilizados na predição da cinética de secagem dos pedaços de melão, especialmente os modelos de Page e Silva et alii, que apresentaram os maiores coeficientes de determinação (> 0,998) e qui-quadrado inferior (< 0,004) em ambas as temperaturas. Em consonância com essa análise, Silva et al. (2014b) consideraram os modelos de Page e Silva et alii como sendo os mais eficientes na descrição da cinética de secagem convectiva de bananas inteiras em todas as temperaturas investigadas (40, 50, 60 e 70 °C).

Os gráficos que representam a cinética de secagem contínua descrita pelas equações empíricas de Henderson e Pabis, Lewis, Page, Peleg, Silva et alii e Wang e Singh são apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5, as quais apresentam o conjunto de dados experimentais (pontos) e os resultados obtidos com as simulações dos modelos (linhas contínuas).

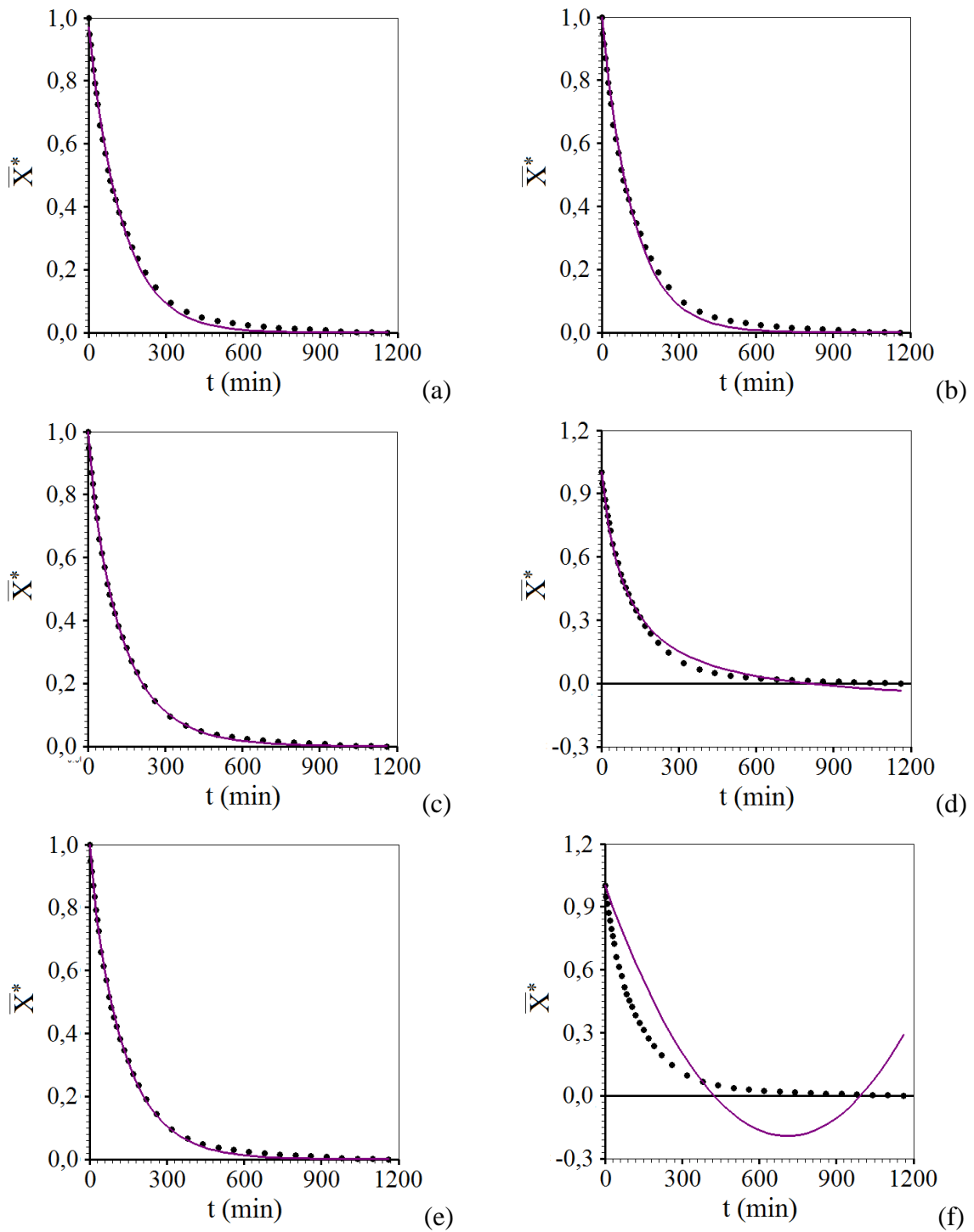


Figura 4.4 - Cinética de secagem contínua para a temperatura do ar de secagem de 50 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Peleg (d); Silva et alii (e) e Wang e Singh (f).

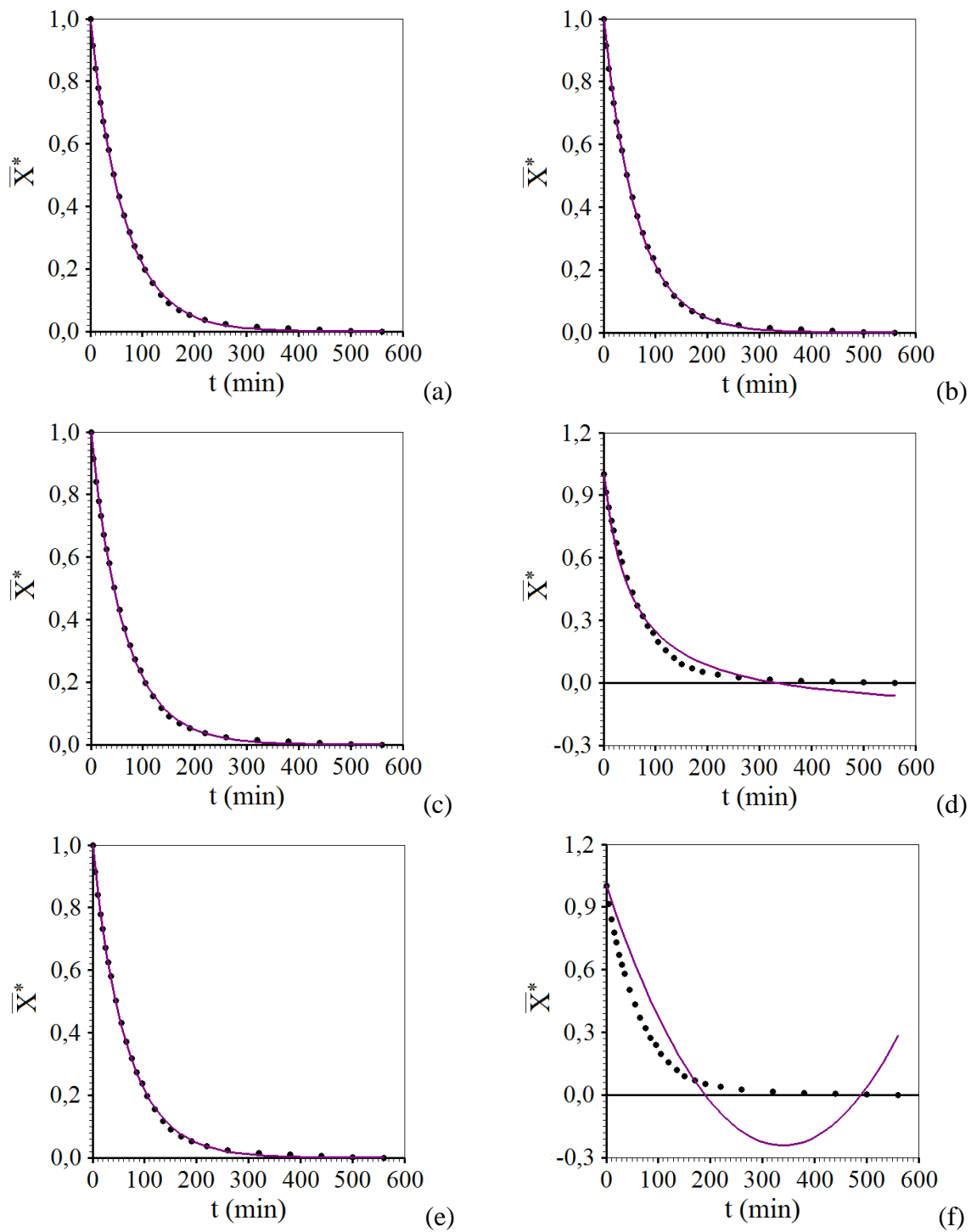


Figura 4.5 - Cinética de secagem contínua para a temperatura do ar de secagem de 70 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Peleg (d); Silva et alii (e) e Wang e Singh (f).

Observando-se as Figuras 4.4 e 4.5, pode-se afirmar que, com exceção do modelo de Wang e Singh representado pelos gráficos (f) e o modelo de Peleg que apresentou valores negativos no final da simulação, observado nos gráficos (d), os demais modelos apresentaram bons ajustes aos dados experimentais da secagem contínua para as duas temperaturas analisadas.

4.3.2 - Cinética de secagem intermitente

De acordo com os resultados obtidos pelas equações empíricas para descrever a cinética de secagem contínua, foram selecionados os melhores modelos 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 e $t_{out} = 20$ min

A Tabela 4.3 apresenta os indicadores estatísticos dos ajustes, bem como os valores dos parâmetros e suas incertezas para os modelos de Henderson e Pabis, Lewis, Page e Silva et alii, selecionados para representar a cinética de secagem intermitente de melão nas temperaturas de 50 e 70 °C.

Tabela 4.3 - Resultados dos modelos empíricos para a secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min nas temperaturas de 50 e 70 °C.

Modelo	T (°C)	Parâmetros		R ²	χ^2
		a x 10 ⁻¹	b x 10 ⁻³		
Henderson e Pabis	50	10,1999±0,0522	15,1142±0,1289	0,9985	0,1764 x 10 ⁻¹
	70	10,2191±0,0267	18,5946±0,0720	0,9997	0,1304 x 10 ⁻²
Lewis	50	0,1475±0,0010	-	0,9980	0,2019 x 10 ⁻¹
	70	0,1820±0,0008	-	0,9995	0,2863 x 10 ⁻²
Page	50	0,1478±0,0065	999,624±10,214	0,9979	0,2019 x 10 ⁻¹
	70	0,1543±0,0032	1039,166±4,912	0,9997	0,1329 x 10 ⁻²
Silva et alii	50	0,1543±0,0028	-5,2783±2,1309	0,9983	0,1912 x 10 ⁻¹
	70	0,1962±0,0013	-11,0980±0,9164	0,9998	0,8069 x 10 ⁻³

As simulações da cinética de secagem intermitente, com ciclos envolvendo o tempo de 10 min dentro do secador ($t_{in} = 10$ min) e 20 min fora do secador ($t_{out} = 20$ min) para temperaturas de 50 e 70 °C, são mostradas nas Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente.

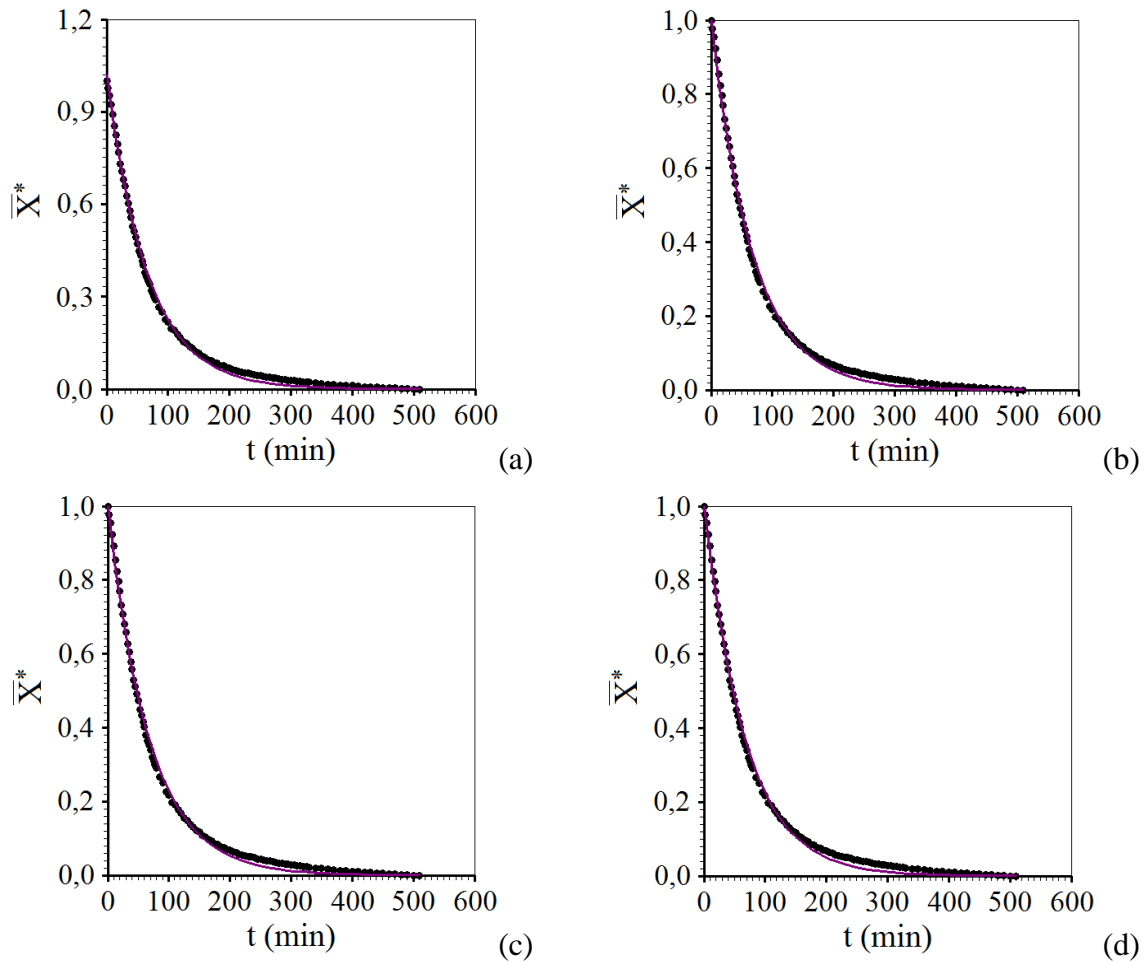


Figura 4.6 - Cinética de secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min e temperatura de secagem de 50 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c) e Silva et alii (d).

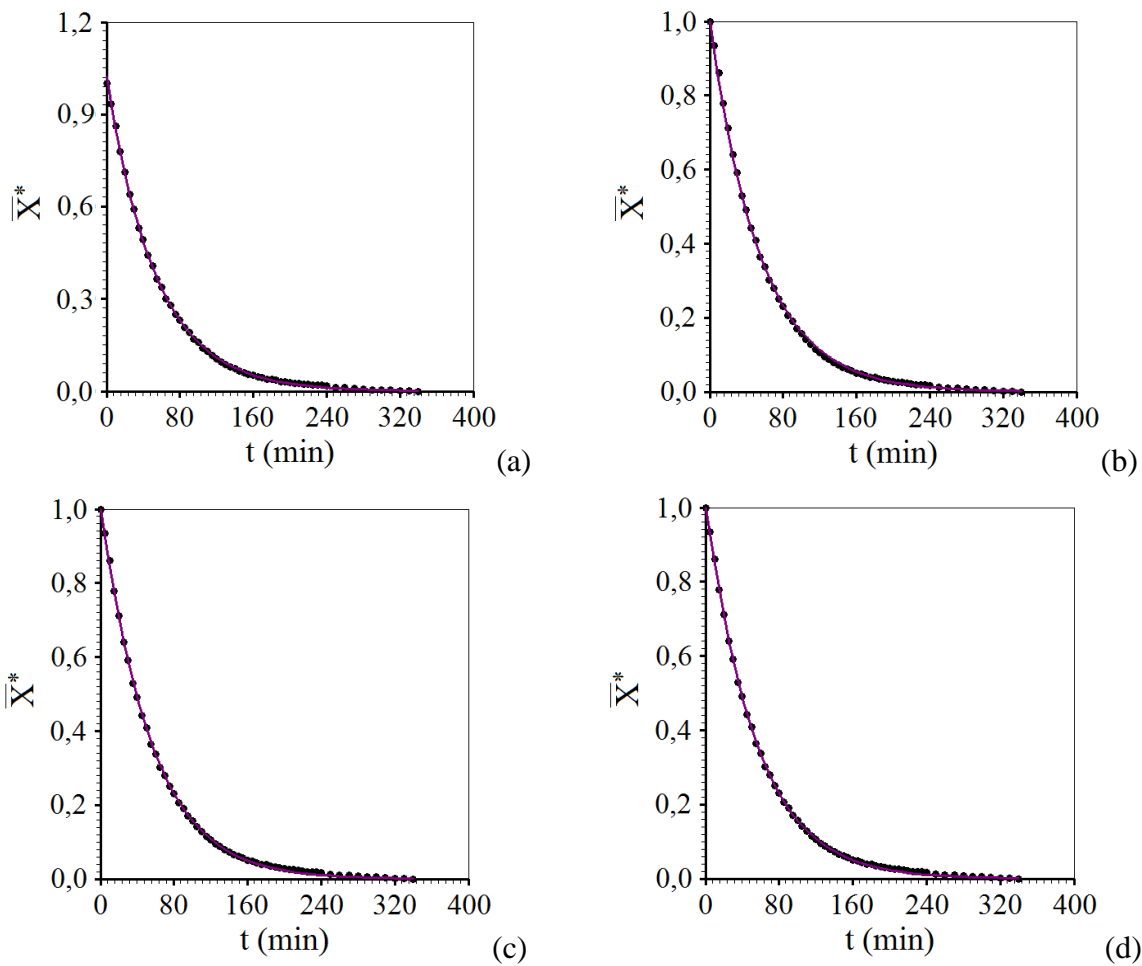


Figura 4.7 - Cinética de secagem intermitente ($t_{in} = 10$ min) para temperatura de secagem de 70 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c) e Silva et alii (d).

Conforme observado para a secagem contínua, os resultados obtidos com os quatro modelos empíricos mencionados mostraram bons ajustes para os dados experimentais de secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min em 50 e 70 °C, como pode ser visto na Tabela 4.3 e nas Figuras 4.6 e 4.7. Os modelos estudados tiveram ótimos resultados, podendo ser utilizados para descrever a cinética de secagem intermitente de paralelepípedos de melão.

4.3.2.2 - Intermitente com $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros e os indicadores estatísticos obtidos para a secagem intermitente com tempo de permanência dentro do secador de 20 min, e fora do secador de 40 min, nas temperaturas de 50 e 70 °C.

Tabela 4.4 - Resultados dos modelos empíricos para a secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min nas temperaturas de 50 e 70 °C.

Modelo	T (°C)	Parâmetros		R ²	χ^2
		a x 10 ⁻¹	b x 10 ⁻³		
Henderson e Pabis	50	10,2616±0,0349	13,6687±0,0703	0,9994	0,3024 x 10 ⁻²
	70	10,2748±0,0594	19,0303±0,1644	0,9984	0,6303 x 10 ⁻²
Lewis	50	0,1331±0,0007	-	0,9997	0,5865 x 10 ⁻²
	70	0,1853±0,0014	-	0,9983	0,8735 x 10 ⁻²
Page	50	0,0988±0,0015	1066,498±3,488	0,9998	0,7974 x 10 ⁻³
	70	0,1309±0,0042	1082,973±7,602	0,9994	0,2721 x 10 ⁻²
Silva et alii	50	0,1476±0,0009	-12,8867±0,7374	0,9998	0,9695 x 10 ⁻³
	70	0,2085±0,0028	-17,9161±1,9915	0,9991	0,3581 x 10 ⁻²

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam os resultados das cinéticas para a secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min, nas temperaturas de 50 e 70 °C.

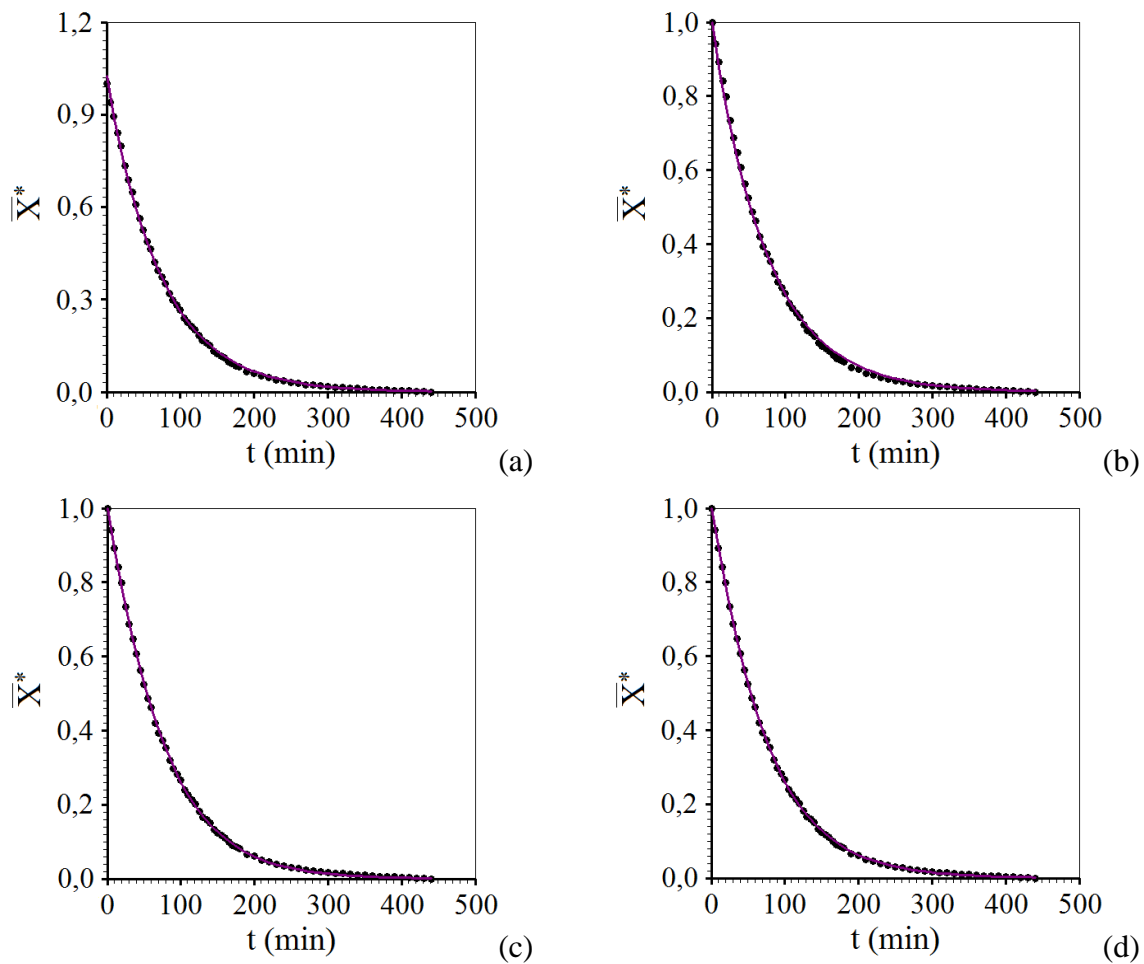


Figura 4.8 - Cinética de secagem intermitente ($t_{in} = 20$ min) para a temperatura do ar de secagem de 50 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Silva et alii (d).

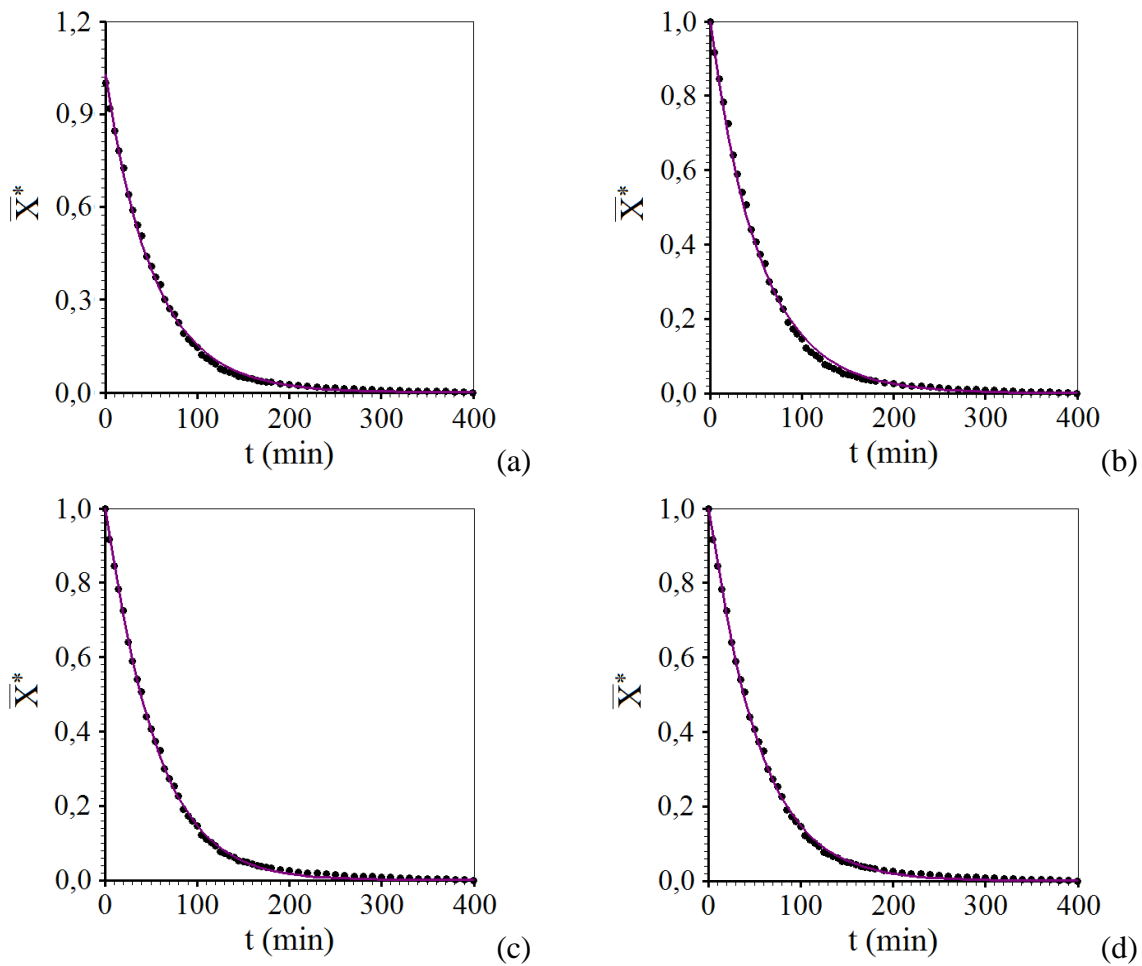


Figura 4.9 - Cinética de secagem intermitente ($t_{in} = 20$ min) para a temperatura do ar de secagem de 70 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Silva et alii (d).

4.3.2.3 - Intermitente com $t_{in} = 30$ min e $t_{out} = 60$ min

A Tabela 4.5 e as Figuras 4.10 e 4.11 apresentam os resultados para o ajuste dos modelos empíricos selecionados e as cinéticas para a secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min e $t_{out} = 60$ min. Como nos casos anteriores, para a temperaturas de 50 e 70 °C, esses processos cinéticos foram obtidos usando o modelo de Henderson e Pabis, Lewis, Page e Silva et alii.

Tabela 4.5 - Resultados para a secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min nas temperaturas de 50 e 70 °C.

Modelo	T (°C)	Parâmetros		R ²	χ^2
		a x 10 ⁻¹	b x 10 ⁻³		
Henderson e Pabis	50	10,4387±0,0811	12,0850±0,1551	0,9975	0,1346 x 10 ⁻¹
	70	10,1592±0,0501	18,0809±0,1385	0,9991	0,3662 x 10 ⁻²
Lewis	50	0,1151±0,0014	-	0,9979	0,2208 x 10 ⁻¹
	70	0,1778±0,0011	-	0,9989	0,4468 x 10 ⁻²
Page	50	0,0597±0,0017	1146,148±6,501	0,9996	0,1668 x 10 ⁻²
	70	0,1586±0,0067	1027,447±10,053	0,9991	0,3849 x 10 ⁻²
Silva et alii	50	0,1397±0,0022	-22,1693±1,8160	0,9990	0,5191 x 10 ⁻²
	70	0,1887±0,0030	-8,2533±2,1750	0,9992	0,3428 x 10 ⁻²

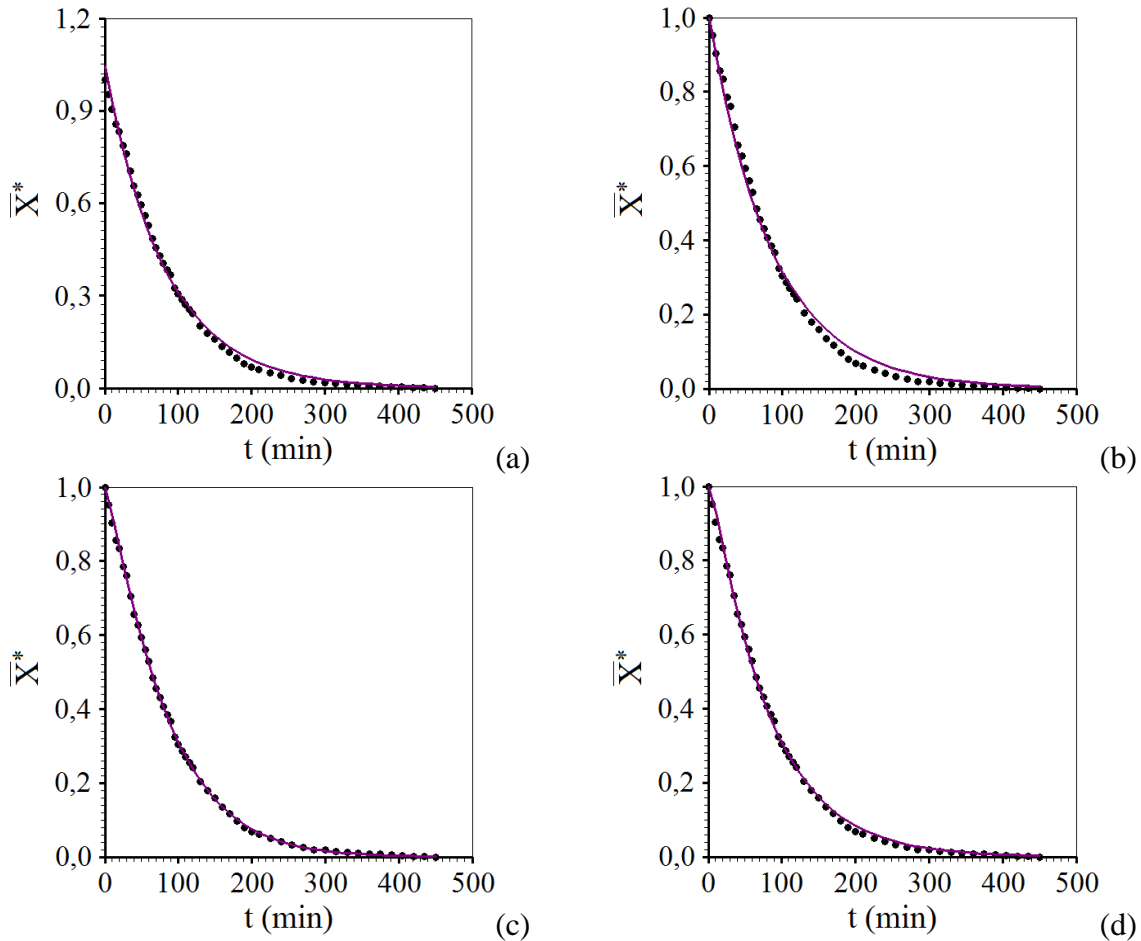


Figura 4.10 - Cinética de secagem intermitente ($t_{in} = 30$ min) para a temperatura do ar de secagem de 50 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Silva et alii (d).

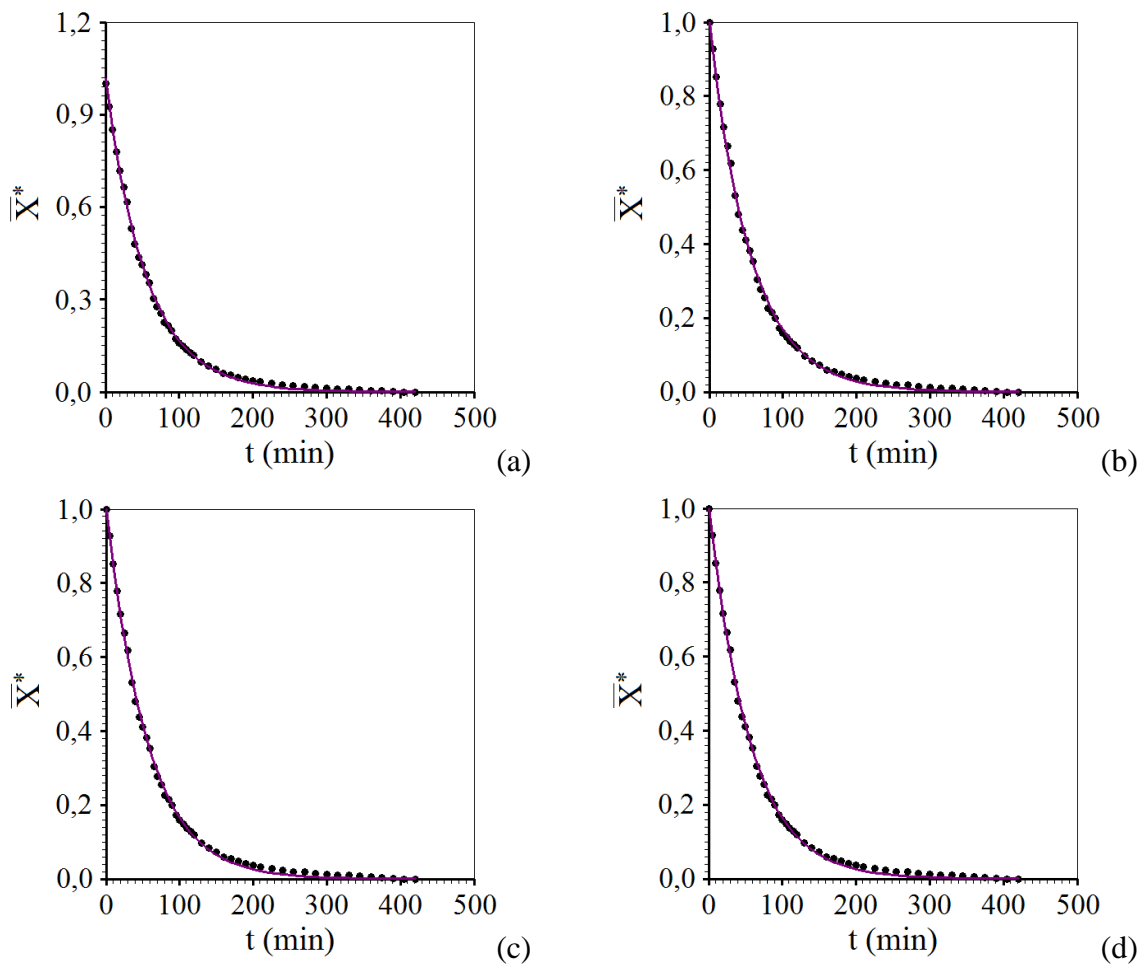


Figura 4.11 - Cinética de secagem intermitente ($t_{in} = 30$ min) para a temperatura do ar de secagem de 70 °C, descrita pelas equações empíricas: Henderson e Pabis (a); Lewis (b); Page (c); Silva et alii (d).

A inspeção visual das Figuras e os resultados obtidos na Tabela 4.5 permitem afirmar que os modelos mostraram ótimos indicadores estatísticos (com $R^2 > 0,996$ e $\chi^2 < 0,025$) demonstrando boa representatividade entre os dados experimentais e as curvas correspondentes da simulação. Essa performance se repetiu para as secagens intermitentes com $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min, assim como para $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min.

Portanto, a partir das análises discutidas, reforça-se, que os modelos abordados descrevem adequadamente as cinéticas de secagem intermitentes das amostras de melão pré-tratadas osmoticamente.

A fim de fazer uma comparação entre os métodos de secagem, a Figura 4.12 apresenta os três processos cinéticos (contínuo, intermitente com $t_{in} = 10$ min, intermitente com $t_{in} = 20$ min e intermitente com $t_{in} = 30$ min) para cada temperatura, usando o modelo de Page. O modelo de Page foi escolhido por apresentar valores inferiores de qui-quadrado e maior simplicidade na aplicação, em comparação aos demais modelos utilizados. Essa escolha o torna o modelo mais adequado para representar todos os processos de secagem. Existe um farto número de trabalhos de secagem convectiva descritos na literatura que utilizam com sucesso o modelo de Page para vários produtos agrícolas (SILVA et al., 2014b; MENDONÇA et al., 2015; SANTOS et al., 2019; LIMA et al., 2020; PEREIRA et al., 2020).

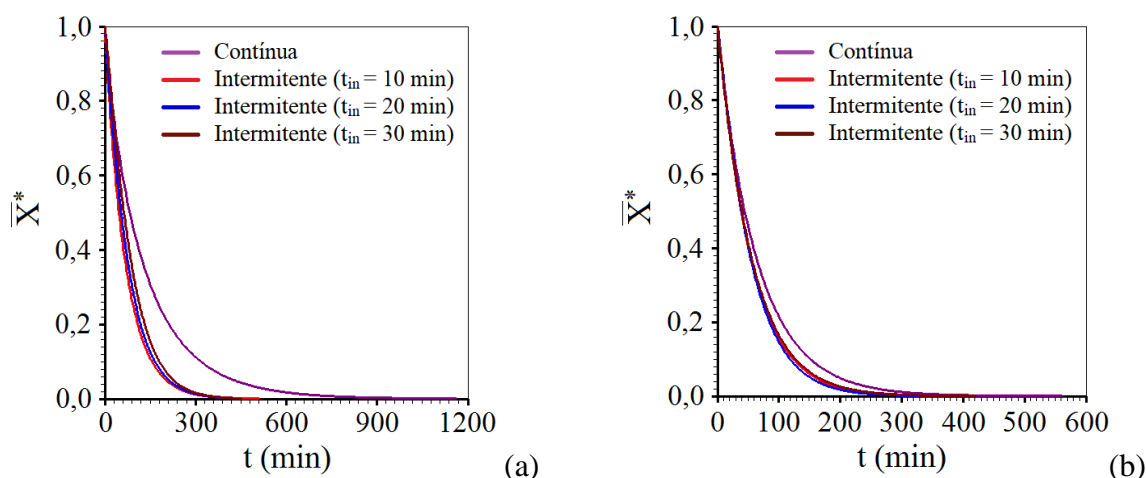


Figura 4.12 - Cinética de todas as secagens para a temperatura do ar de secagem de 50 °C (a) e 70 °C (b), descrita pela equação de Page.

A Figura 4.12 mostra que as cinéticas de secagem intermitentes são significativamente diferentes da cinética de secagem contínua para ambas as temperaturas analisadas. Nos processos de secagem intermitente, os pedaços de melão apresentaram maior perda de umidade quando comparados à secagem contínua, correspondente ao mesmo instante de tempo. Isso significa que o tempo de operação efetiva foi reduzido (e, conseqüentemente, o consumo de energia). Lima et al. (2020) também evidenciaram esse fato, os autores analisaram a eficiência da secagem de Sapoti comparando a secagem contínua e intermitente, constatando redução do tempo de secagem e do consumo de energia com a aplicação da secagem intermitente. Observou-se também que as três secagens intermitentes produziram efeito muito semelhante na cinética, principalmente para temperatura de 70 °C (Figura 4.12 b).

De forma a enfatizar a comparação entre os métodos de secagem em relação ao tempo de secagem e, conseqüentemente, consumo de energia em diferentes temperaturas, a Figura 4.13 apresenta a superposição das simulações dos dois processos cinéticos, contínuo e intermitente (com $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min). Para uma melhor visualização e análise das cinéticas, o limite de tempo de operação efetiva foi estabelecido em 500 min.

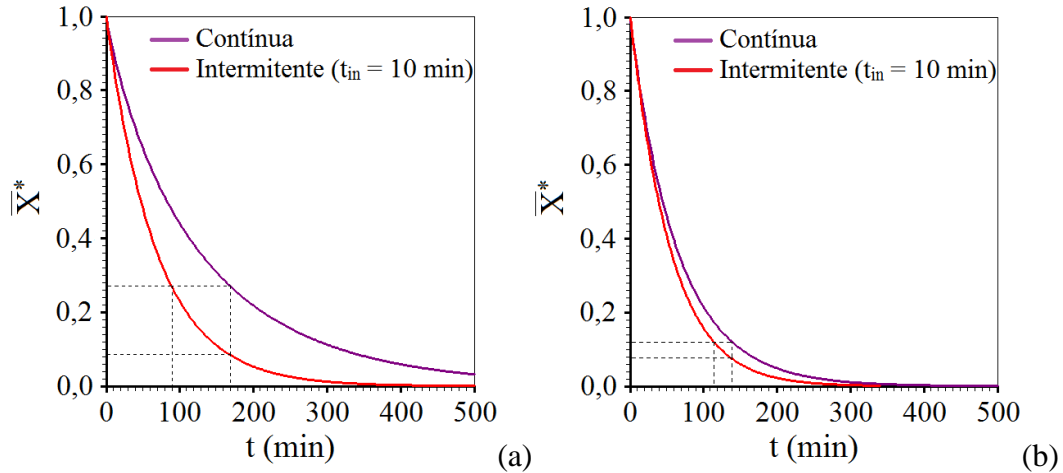


Figura 4.13 - Comparação entre as cinéticas de secagem contínua e intermitente para a temperatura do ar de secagem de 50 °C (a) e 70 °C (b), descrita pela equação de Page.

Na Figura 4.13 pode-se observar, na superposição das secagens, que as amostras de melão apresentaram maior perda de umidade quando submetidas à secagem intermitente. Por exemplo, na Figura 4.13 (a), a 50 °C, pode-se observar que o tempo necessário para as amostras atingirem a razão de umidade de aproximadamente 0,27 foi de 170 min para a secagem contínua e apenas cerca de 90 min para a secagem intermitente ($t_{in} = 10$ min). Isso significa uma economia de tempo efetivo de cerca de 80 min, o que corresponde a uma redução de 47,1% no tempo efetivo de secagem e, conseqüentemente, no consumo de energia, uma vez que o secador funciona a uma potência constante. Essas reduções no tempo efetivo com o uso de intermitência são possíveis, uma vez que durante o período de têmpera, ocorre difusão de umidade da parte central para a superfície do produto, favorecendo a homogeneização de seu teor de umidade e temperatura (GOLMOHAMMADI et al., 2016; PEREIRA et al., 2020). Este fenômeno é responsável por promover uma maior taxa de retirada de água da amostra, reduzindo o consumo de energia utilizada no processo.

A Figura 4.13 (b) mostra a comparação entre as cinéticas obtidas na secagem contínua e intermitente ($t_{in} = 10$ min), com temperatura do ar de secagem de 70 °C. Na secagem contínua foram necessários 140 min para obter o teor de umidade adimensional (ou razão de umidade) de aproximadamente 0,12, enquanto na secagem intermitente foram necessários 115 min de operação efetiva para obter o mesmo teor de umidade, o que corresponde a uma redução de 17,9 % no tempo de operação efetiva. Além disso, foi possível observar que a taxa de umidade diminuiu mais rapidamente com o aumento da temperatura de 50 para 70 °C, como esperado: quanto maior a temperatura, mais rápido o processo de secagem (DIAMANTE et al., 2010; PEREIRA et al., 2020).

Diante dos bons resultados obtidos, pode-se afirmar que a secagem intermitente de melão com tempo de exposição ao calor de 10 min e de têmpera de 20 min foi muito satisfatória no que se refere a economia de energia, reduzindo o tempo de secagem em mais de 47 % para a secagem a 50 °C, e em até 17,9% a 70 °C, em relação à secagem contínua considerando-se apenas o tempo efetivo de operação.

Resultado próximo foi encontrado por Silva et al. (2019) em sua pesquisa sobre secagem contínua e intermitente de maçãs com razão de intermitência = 2/3. De acordo com os resultados obtidos pelos autores, a maior redução no tempo efetivo de secagem foi de aproximadamente 45% para a temperatura de 50 °C, em comparação com a secagem contínua nessa mesma temperatura. Na secagem de grão e sementes, comportamento semelhante foi relatado por Yang et al. (2013) em sua pesquisa com sementes de repolho chinês secas com diferentes períodos de intermitência, com temperatura de 40 °C e velocidade do ar de secagem de 1 m s⁻¹. Os resultados mostram uma economia de energia de 48,1 % em comparação com a secagem contínua. Zhu et al. (2016), ao secarem soja verde de forma intermitente e contínua, observaram uma economia de 23 a 28 % na diminuição do tempo de secagem em relação à secagem contínua.

4.4 - Taxas de secagem

A taxa de secagem para cada experimento pode ser obtida por meio da derivada da Equação (3.2) com relação ao tempo:

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

ou

$$-\frac{d\bar{X}}{dt} = (X_i - X_{eq}) \left[-\frac{d\bar{X}^*}{dt} \right] \quad (4.2)$$

Para obter as taxas de secagem através dos modelos empíricos, foi utilizado o LAB Fit *Curve Fitting* e as equações referentes à Tabela 3.3 ajustadas aos parâmetros obtidos nas Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5. Assim, estão expressas na Figura 4.14 as taxas de secagem $-\frac{d\bar{X}^*}{dt}$ através da derivada da equação de Page (Equação 3.11), que foi usada para mostrar o comportamento de tais taxas ao longo do tempo, a fim de comparar os processos (contínuo e intermitente). Para melhor visualização e distinção das curvas simuladas, os gráficos foram plotados até o tempo de 400 min.

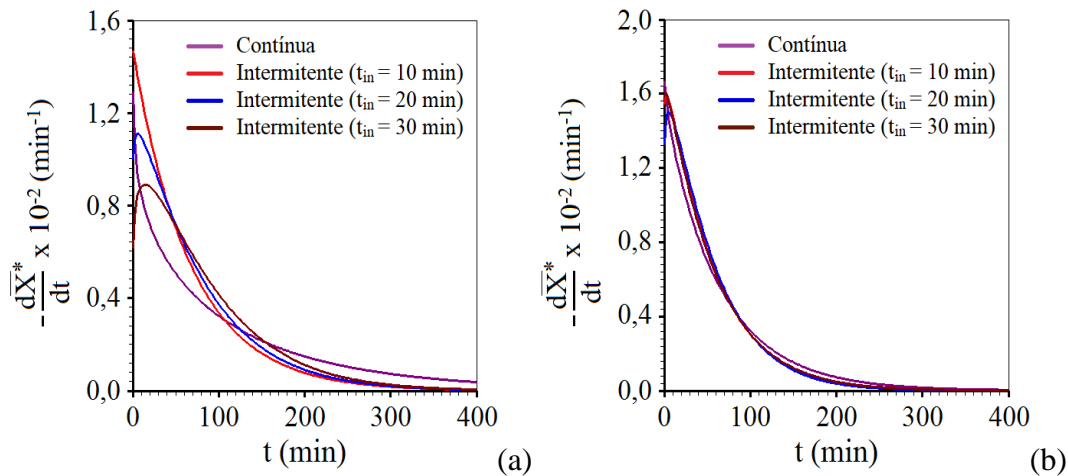


Figura 4.14 - Taxas de secagem dos paralelepípedos de melão a 50 °C (a) e 70 °C (b), descritas pela equação de Page.

Observa-se, na Figura 4.14, que a taxa máxima de secagem ocorre no início do processo e que, em todos os experimentos, não existem taxas constantes de secagem, comportamento que também ocorre com vários outros produtos agrícolas (SILVA et al., 2015a; OLIVEIRA et al., 2016b; SANTOS et al., 2019). Na Figura 4.14 (a), existe uma diferença notória entre a curva $-\frac{d\bar{X}^*}{dt}$ da secagem contínua e as três curvas $-\frac{d\bar{X}^*}{dt}$ dos processos intermitentes para a temperatura de 50 °C. Isso indica que o processo intermitente aumenta o valor dessa taxa no início do processo em relação à secagem contínua. De acordo com Yang et al. (2013), o aumento excessivo da taxa de secagem reduz consideravelmente

o tempo de operação efetiva. Além disso, também é possível observar que os experimentos de secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min e intermitente com $t_{in} = 30$ min tendem a um momentâneo crescimento e posterior decréscimo (período de taxa decrescente) nos primeiros momentos de secagem, já as curvas que representam a secagem contínua e intermitente com $t_{in} = 10$ min têm sua taxa totalmente decrescente.

Em relação à temperatura de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.14 b), verifica-se que não existe uma distinção clara de $-d\bar{X}^*/dt$ entre as secagens, mas possuem valores maiores nos instantes iniciais que a dX/dt para a temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Silva et al. (2015a) realizaram um estudo comparativo entre o uso da secagem contínua e intermitente de bananas inteiras com razão de intermitência de 1/2, com tempos de intermitência de 0,5, 1,0, e 2 h e temperatura do ar de secagem de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dentre os modelos empíricos analisados, o modelo de Peleg permitiu determinar uma expressão para a taxa de secagem e concluíram que o processo descontínuo aumenta o valor dessa taxa, o que corrobora com os resultados obtidos neste trabalho.

4.5 - Cinéticas de secagem descritas por modelos analíticos de difusão

Além de modelos empíricos, a migração de umidade nos paralelepípedos de melão também foi descrita por modelos de difusão, ajustados aos dados experimentais nas temperaturas de 50 e $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Modelos empíricos, apesar de permitirem extrair informações sobre a cinética de secagem, no entanto, não torna possível obter informações sobre a qualidade final do produto, o que pode limitar suas aplicações. Nesse sentido, uma maior quantidade de informações pode ser fornecida por um modelo de difusão em diferentes situações físicas, fornecendo não só a cinética do fenômeno estudado, mas também permitem prever a distribuição de umidade (e temperatura) no interior do material, a qualquer momento. Assim, a informação sobre a distribuição de umidade dentro do paralelepípedo de melão é importante porque permite uma análise posterior no aspecto da qualidade final do produto seco. Nesse trabalho, dois modelos difusivos com solução analítica foram usados para descrever os processos de secagem considerando apenas o tempo de operação efetiva. No primeiro modelo, foi aplicada a condição de contorno do primeiro tipo (condição de contorno de equilíbrio), onde o único parâmetro a ser determinado é a difusividade efetiva de massa (D). No segundo modelo, considerou-se a condição de contorno do terceiro tipo (condição de contorno convectiva), pressupondo uma possível resistência ao

fluxo de massa (água) na superfície do material. Neste caso, o processo é governado tanto pela difusividade efetiva de massa (D) quanto pelo coeficiente de transferência de massa convectivo (h).

Para a determinar a difusividade efetiva de massa e simular a cinética de secagem através dos modelos de difusão apresentados na seção 3.7, foram usados os *softwares* “Prescribed Adsorption - Desorption” (SILVA e SILVA, 2009b) e “Convective Adsorption - Desorption” (SILVA e SILVA, 2009c), que fornecem a solução analítica da equação de difusão com as condições de contorno de primeiro e terceiro tipos, respectivamente, a fim estabelecer a condição de contorno mais apropriada na descrição da secagem contínua e intermitente de melão pré-tratado osmoticamente, considerando o tempo efetivo de operação.

4.5.1 - Condição de contorno do primeiro tipo

Os resultados obtidos por meio da solução analítica da equação de difusão com condição de contorno do primeiro tipo para a geometria de um paralelepípedo estão resumidos na Tabela 4.6, que também apresenta os dados estatísticos e indicadores relacionados a este modelo.

Tabela 4.6 - Resultados obtidos para as simulações de secagem usando o modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo.

T (°C)	Secagem	D (m ² min ⁻¹)	R ²	χ ²
50	Contínua	1,1338 x 10 ⁻⁸	0,9850	0,1384
	Intermitente (t _{in} = 10 min)	2,4056 x 10 ⁻⁸	0,9756	0,4964
	Intermitente (t _{in} = 20 min)	2,2922 x 10 ⁻⁸	0,9721	0,3509
	Intermitente (t _{in} = 30 min)	1,9610 x 10 ⁻⁸	0,9673	0,4290
70	Contínua	2,4030 x 10 ⁻⁸	0,9737	0,1491
	Intermitente (t _{in} = 10 min)	3,3511 x 10 ⁻⁸	0,9730	0,2616
	Intermitente (t _{in} = 20 min)	3,5796 x 10 ⁻⁸	0,9653	0,2829
	Intermitente (t _{in} = 30 min)	3,0301 x 10 ⁻⁸	0,9697	0,2187

Utilizando os valores obtidos para a difusividade de massa efetiva em cada experimento de secagem, as cinéticas de secagem dos paralelepípedos de melão juntamente com os dados experimentais são mostradas nas Figuras 4.15 e 4.16.

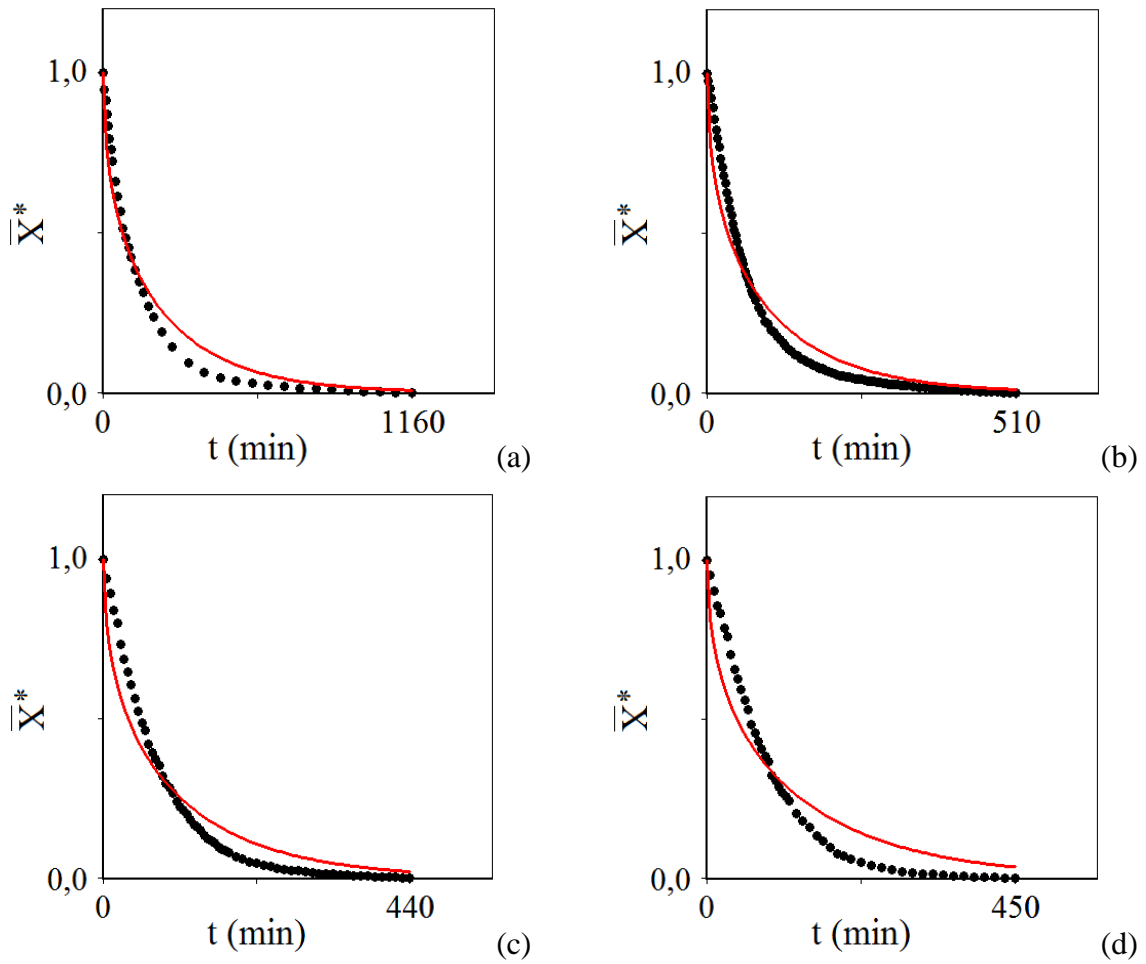


Figura 4.15 - Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo utilizando a temperatura de 50 °C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b), secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c) e secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min (d).

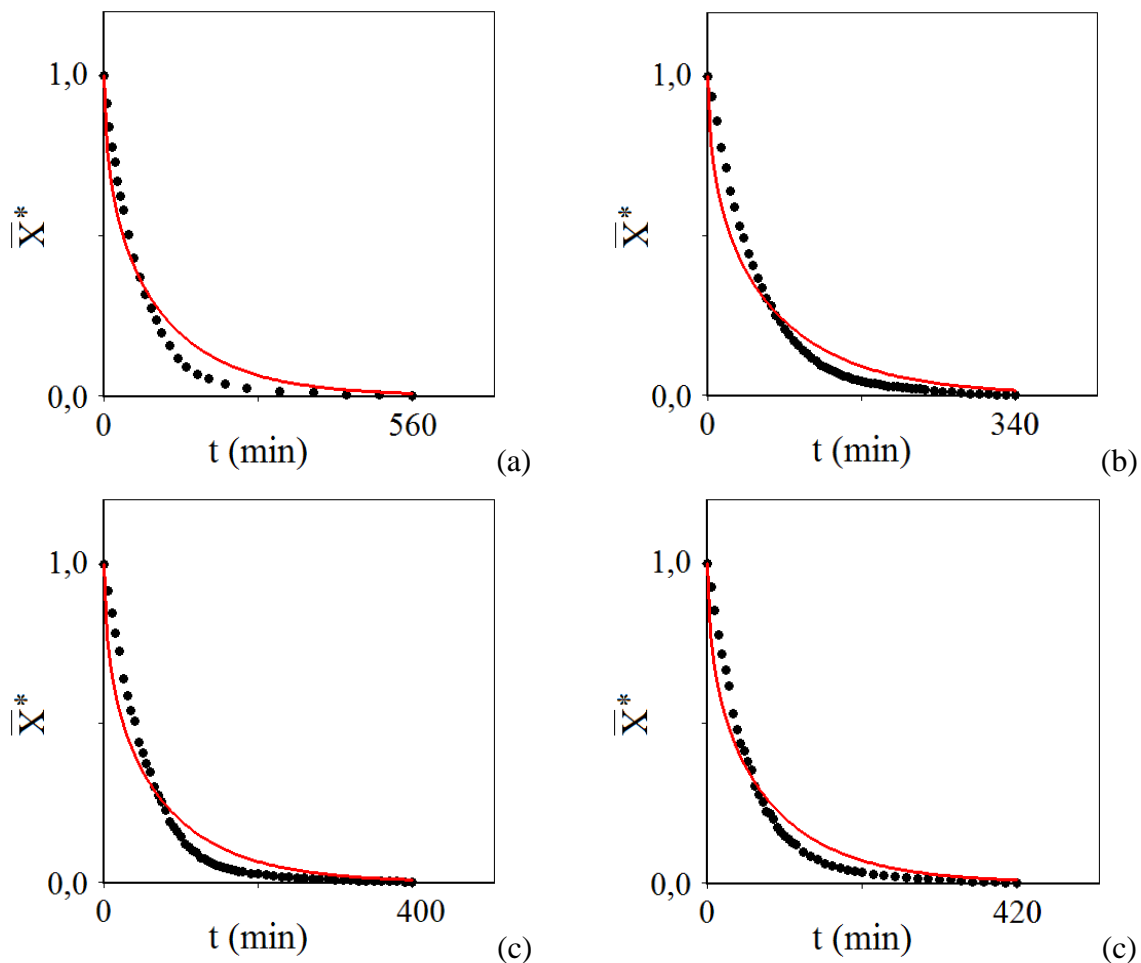


Figura 4.16 - Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do primeiro tipo utilizando a temperatura de 70 °C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b), secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c) e secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min (d).

A Tabela 4.6 e as Figuras 4.15 e 4.16 permitem afirmar que os resultados obtidos para condição de contorno do primeiro tipo não foram adequados para descrever a secagem do melão. Analisando as figuras é possível verificar que as linhas simuladas para essa condição de contorno divergem significativamente dos dados experimentais. Mas, como exposto nas figuras, uma explicação para este fato é que não há equilíbrio instantâneo entre a superfície exterior e o ar de secagem e, provavelmente, deve haver uma resistência ao fluxo de umidade na superfície do produto, no qual o modelo não leva em consideração. Mesmo assim, a Tabela 4.6 indica o efeito da intermitência na comparação com a secagem contínua usando a condição de contorno do primeiro tipo: aumento da difusividade efetiva de massa.

4.5.2 - Condição de contorno do terceiro tipo

Tabela 4.7 - Resultados obtidos para as simulações de secagem usando o modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo.

T (°C)	Secagem	D (m ² min ⁻¹)	h (m min ⁻¹)	Bi	R ²	χ^2
50	Contínua	4,0069 x 10 ⁻⁸	2,2426 x 10 ⁻⁵	2,25	0,9996	1,8303 x 10 ⁻³
	Intermitente (t _{in} = 10 min)	4,8184 x 10 ⁻⁵	2,5630 x 10 ⁻⁵	2,25 x 10 ⁻³	0,9986	1,7178 x 10 ⁻²
	Intermitente (t _{in} = 20 min)	3,5400 x 10 ⁻⁵	2,3178 x 10 ⁻⁵	2,75 x 10 ⁻³	0,9996	2,1194 x 10 ⁻³
	Intermitente (t _{in} = 30 min)	4,1153 x 10 ⁻⁵	1,9282 x 10 ⁻⁵	1,75 x 10 ⁻³	0,9978	1,1302 x 10 ⁻²
70	Contínua	2,4601 x 10 ⁻⁷	3,0823 x 10 ⁻⁵	0,535	0,9997	7,6620 x 10 ⁻⁴
	Intermitente (t _{in} = 10 min)	5,9525 x 10 ⁻⁵	3,2706 x 10 ⁻⁵	2,50 x 10 ⁻³	0,9998	6,3159 x 10 ⁻⁴
	Intermitente (t _{in} = 20 min)	5,7061 x 10 ⁻⁵	3,3526 x 10 ⁻⁵	2,50 x 10 ⁻³	0,9987	5,2591 x 10 ⁻³
	Intermitente (t _{in} = 30 min)	5,7418 x 10 ⁻⁵	3,0759 x 10 ⁻⁵	2,25 x 10 ⁻³	0,9992	3,2950 x 10 ⁻³

As simulações das cinéticas para todos os experimentos, bem como os dados experimentais referentes às temperaturas de 50 e 70 °C, são apresentados nas Figuras 4.17 e 4.18.

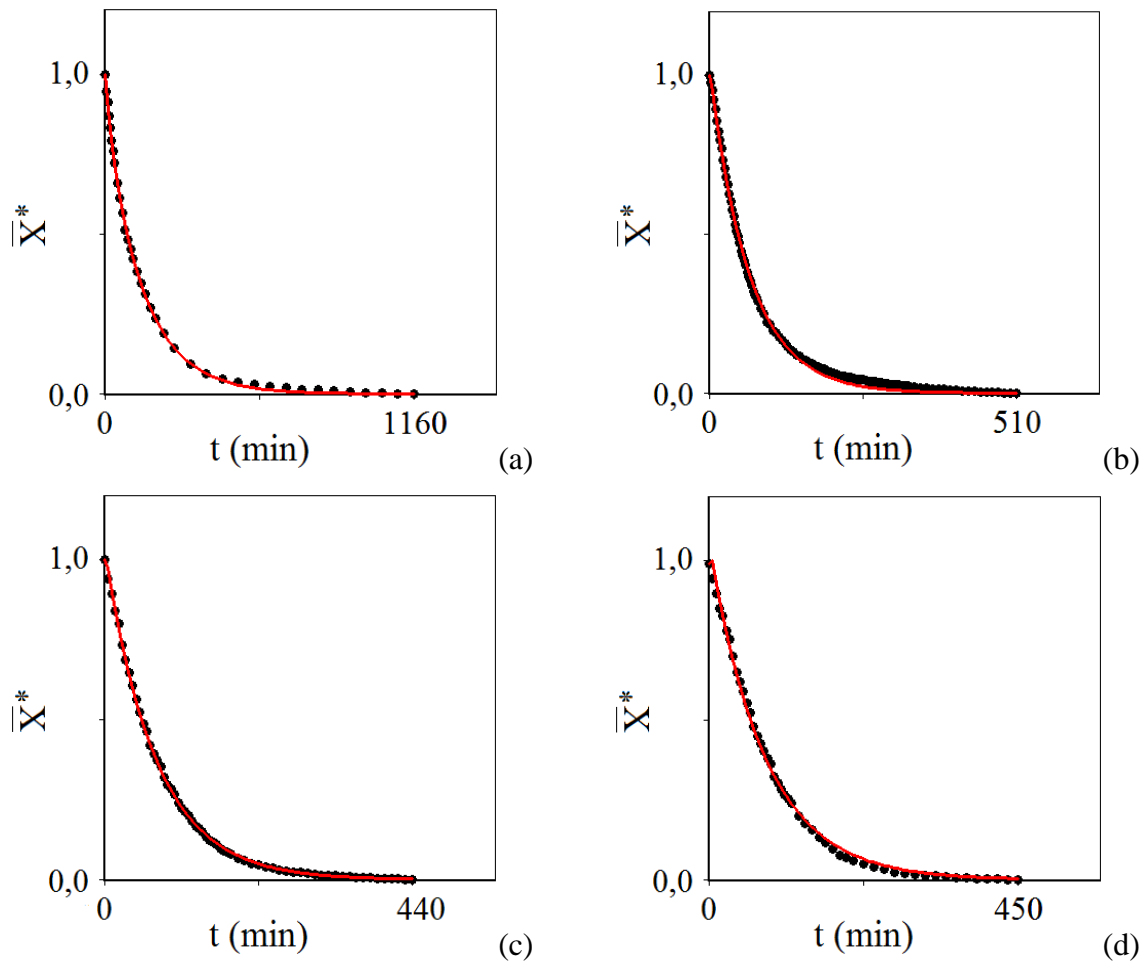


Figura 4.17 - Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo utilizando a temperatura do ar de secagem de 50 °C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b), secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c) e secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min (d).

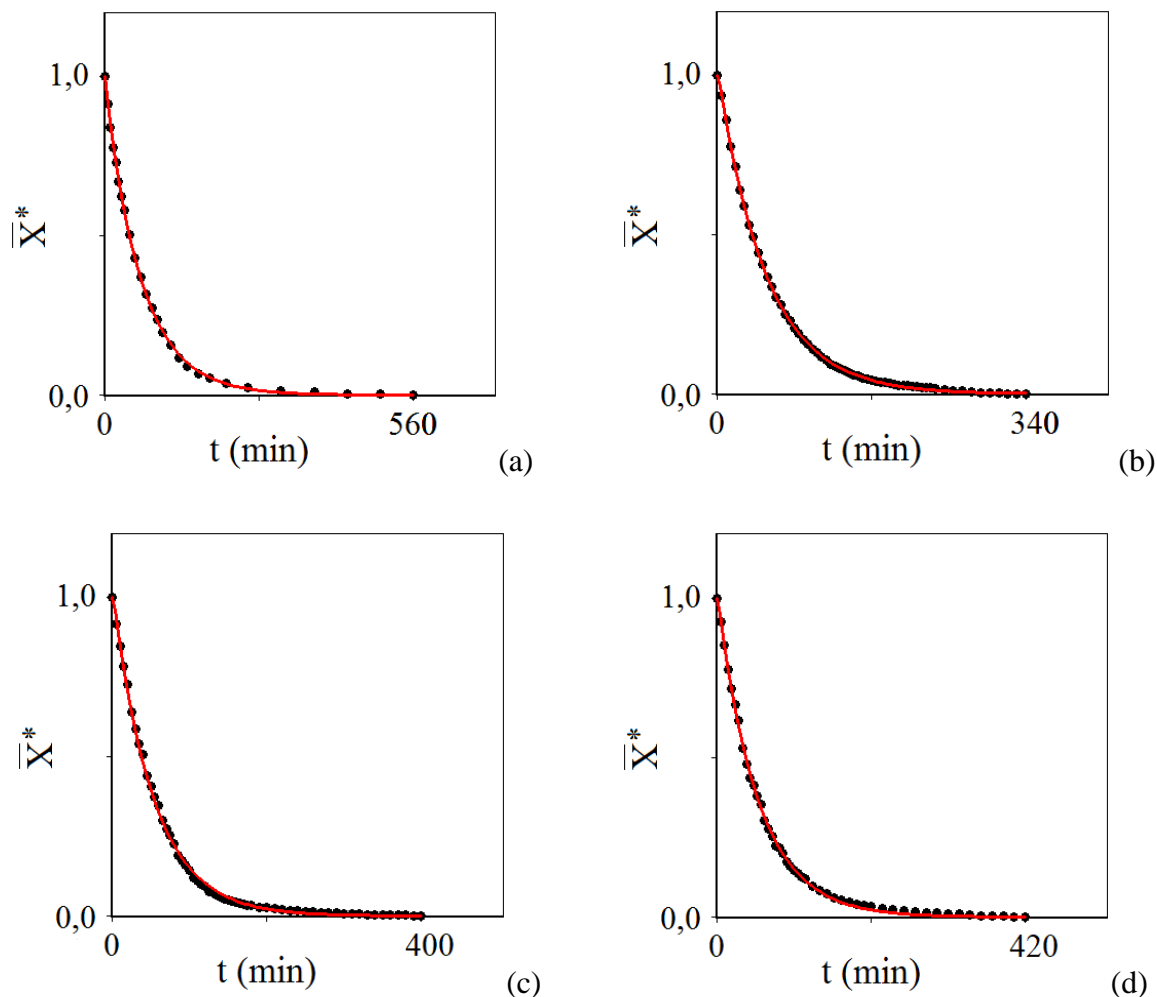


Figura 4.18 - Cinética de secagem descrita pelo modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo utilizando a temperatura do ar de secagem de 70 °C: secagem contínua (a), secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min (b), secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min (c) e secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min (d).

Analisando a Tabela 4.7 e as Figuras 4.17 e 4.18, observa-se que a condição de contorno do terceiro tipo é adequada para descrever a secagem contínua e intermitente do melão com geometria de paralelepípedo, uma vez que o modelo apresentou excelentes indicadores estatísticos e há uma boa concordância entre os dados experimentais e a simulação dos instantes iniciais ao final. Os indicadores estatísticos do ajuste para condição de contorno convectiva (Tabela 4.7) são superiores aos da condição de contorno do primeiro tipo (Tabela 4.6). Isso demonstra que a condição de contorno convectiva é mais adequada para uma descrição rigorosa da secagem do melão, visto que o efeito de resistência ao fluxo

de massa na superfície externa é levado em consideração. Estudos anteriores, como os de Rodrigues et al. (2015), Aires et al. (2019), Lima et al. (2020) e Pereira et al. (2021), também corroboram essa conclusão, encontrando que a condição de contorno do terceiro tipo é superior ao primeiro tipo para descrever o processo de secagem.

Na Tabela 4.7, os valores de difusividade efetiva de massa a 50 °C são: $4,0069 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ (secagem contínua), $4,8184 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ (secagem intermitente com estanho = 10 min), $3,5400 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ (secagem intermitente com estanho = 20 min) e $4,1153 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ min}^{-1}$ (secagem intermitente com estanho = 30 min). Observa-se que a intermitência aumenta significativamente a difusividade do processo em comparação com a secagem contínua, o que corrobora com a redução do tempo de operação efetiva com aplicação de secagem intermitente. Entre os processos de secagem intermitente a 50 °C, aquele com $t_{in} = 10 \text{ min}$ tem a maior difusividade efetiva, resultando na economia de tempo efetivo, como pode ser observado na Figura 4.17 (a). Em relação à temperatura de 70 °C, observa-se um comportamento semelhante, em que o valor da difusividade efetiva para a secagem contínua foi menor que o valores das três secagens intermitentes. Verifica-se que a difusividade também aumentou com o aumento da temperatura, ou seja, foi maior na temperatura de 70 °C, tanto para a contínua quanto para as intermitentes.

Observou-se também, na Tabela 4.6, que o número de Biot referente à secagem contínua foi de 2,25 e 0,53 para as temperaturas de 50 e 70 °C, respectivamente. Já para as secagens intermitentes, foi notado valores mais baixos para o número de Biot, da ordem de 10^{-3} , indicando que o efeito da intermitência causou uma redução significativa deste parâmetro quando comparado à secagem contínua. De acordo com Silva et al. (2015a), esse efeito pode ser interpretado como uma distribuição de umidade mais homogênea na secagem intermitente do que no processo contínuo, beneficiando a qualidade final do produto.

Comparando os indicadores estatísticos (qui-quadrado e coeficiente de determinação) do modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo aos obtidos com os modelos empíricos, pode-se observar que, em termos práticos, os resultados foram equivalentes. Além disso, o modelo de difusão empregado envolve dois parâmetros de ajuste (difusividade efetiva de massa e coeficiente de transferência de massa convectivo). Assim, pode-se prever a distribuição espacial da umidade em qualquer instante, tanto para secagem contínua quanto para secagem intermitente, em que apenas o tempo efetivo foi considerado. Por essa razão, o modelo de difusão torna-se mais vantajoso do que os

modelos empíricos, sendo preferido para descrever a secagem contínua e intermitente de melão com geometria de paralelepípedo tratado em solução osmótica.

Por fim, é importante mencionar que o modelo de difusão utilizado neste estudo não considerou a retração do produto e admitiu a difusão de umidade constante durante o processo. No entanto, os resultados obtidos foram satisfatórios e podem ser usados como valores iniciais em otimizações que usam modelos considerando tais fenômenos (SILVA et al., 2015a).

4.6 - Descrição da cinética de secagem intermitente usando o modelo empírico proposto

A Tabela 4.8 mostra os valores dos parâmetros ($a_{1_{in}}$, $a_{2_{in}}$ e $a_{3_{out}}$) do modelo proposto e também os indicadores estatísticos, coeficiente de determinação (R^2) e qui-quadrado (χ^2), relativos às temperaturas de 50 e 70 °C para todos os tempos de intermitência.

Tabela 4.8 - Parâmetros obtidos para as secagens intermitentes descrita pelo modelo proposto.

t_{in} (min)	T (°C)	Parâmetros			R^2	χ^2
		$a_{1_{in}}$	$a_{2_{in}}$	$a_{3_{out}}$		
10	50	$(5,528 \pm 1,679) \times 10^{-3}$	1,319±0,134	$(2,009 \pm 0,230) \times 10^{-3}$	0,9987	$5,394 \times 10^{-3}$
	70	$(12,528 \pm 1,464) \times 10^{-3}$	1,088±0,051	$(1,586 \pm 0,111) \times 10^{-3}$	0,9998	$6,453 \times 10^{-4}$
20	50	$(11,806 \pm 1,350) \times 10^{-3}$	0,987±0,039	$(1,115 \pm 0,081) \times 10^{-3}$	0,9996	$2,237 \times 10^{-3}$
	70	$(18,270 \pm 3,162) \times 10^{-3}$	0,946±0,060	$(1,851 \pm 0,195) \times 10^{-3}$	0,9987	$8,718 \times 10^{-3}$
30	50	$(9,070 \pm 2,822) \times 10^{-3}$	1,001±0,094	$(1,505 \pm 0,184) \times 10^{-3}$	0,9971	$2,651 \times 10^{-2}$
	70	$(18,257 \pm 1,356) \times 10^{-3}$	0,970±0,023	$(0,842 \pm 0,093) \times 10^{-3}$	0,9993	$3,494 \times 10^{-3}$

O modelo proposto mostrou-se adequado ao ajuste dos dados experimentais para os seis experimentos de secagem intermitente, com valores de coeficiente de determinação superiores a 0,99 e qui-quadrado inferior a 0,027. Os valores encontrados para os parâmetros de processo estão de acordo com os parâmetros determinados por Silva et al. (2022). Como o modelo utiliza três parâmetros, os resultados se mostraram mais realistas ao problema físico estudado, uma vez que foi constatado que ocorre perda de água durante o período de têmpera, causando um pequeno declínio nesta fase, no qual o modelo foi capaz de simular e pode ser observado nas Figuras 4.19 e 4.20. Silva et al. (2022)

estudaram a secagem intermitente de sementes de melão neve utilizando um modelo semelhante com dois parâmetros para prever a cinética intermitente incluindo a têmpera. Segundo os autores, ao usar apenas dois parâmetros, obtêm-se na cinética uma linha horizontal na fase de têmpera, não levando em consideração a diminuição dos valores da razão de umidade neste período. Assim, o modelo proposto com três parâmetros descreve melhor a situação física estudada, uma vez que este modelo também considerou o fato de que os pedaços de melão continuam perdendo umidade durante o período de têmpera, embora em menor intensidade do que a perda que ocorre quando as amostras estão no secador.

Além disso, para que o processo intermitente seja descrito, alguns autores, a exemplo de Munson-McGee (2014) e Franco et al. (2020), assumem que o coeficiente de transferência convectivo de massa é zero no período de têmpera, ou seja, consideram que neste período não ocorre perda de água, sendo assim, constante.

Silva et al. (2017) realizaram secagem de bananas inteiras de forma contínua e intermitente na temperatura de 70 °C e empregaram uma solução numérica da equação de difusão para modelar o procedimento intermitente, utilizando um software desenvolvido pelos mesmos para determinar D e h e simular o processo. Os autores obtiveram bons indicadores estatísticos para as secagens intermitentes, com os qui-quadrados menores que $2,72 \times 10^{-3}$ e coeficientes de determinação maiores que 0,9990. Já Lima et al. (2022), utilizaram modelos empíricos e de difusão para modelar a secagem contínua e intermitente de pera, mas não consideraram o período de têmpera em suas análises.

A literatura científica apresenta uma escassez de estudos que abordam a descrição da secagem intermitente, incluindo o período de têmpera por meio de modelos empíricos (SILVA et al. 2019; SILVA et al. 2022). Desta forma, os resultados obtidos nesta pesquisa através do modelo empírico proposto, demonstram que é possível descrever adequadamente as cinéticas de secagem intermitente sem que seja necessário utilizar modelos mais complexos, como aqueles que envolvem soluções numéricas da equação de difusão.

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam as curvas ajustadas da cinética de secagem intermitente de pedaços de melão nas temperaturas de secagem de 50 e 70 °C, para todos os tempos de intermitência, utilizando o modelo proposto e os parâmetros obtidos na Tabela 4.8.

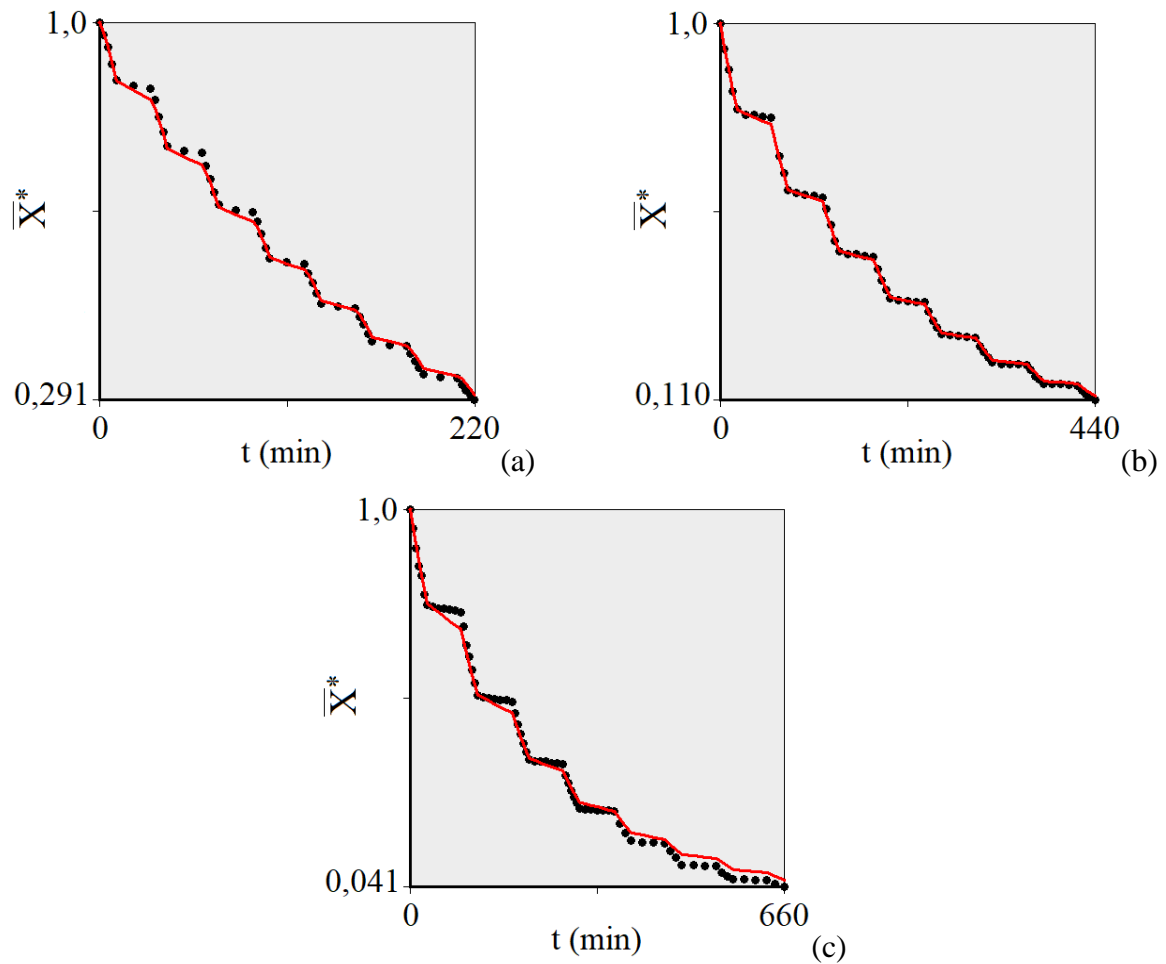


Figura 4.19 - Cinética de secagem intermitente descrita pelo modelo proposto com temperatura do ar de secagem de 50 °C: $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min (a), $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min (b) e $t_{in} = 30$ min e $t_{out} = 60$ min (c).

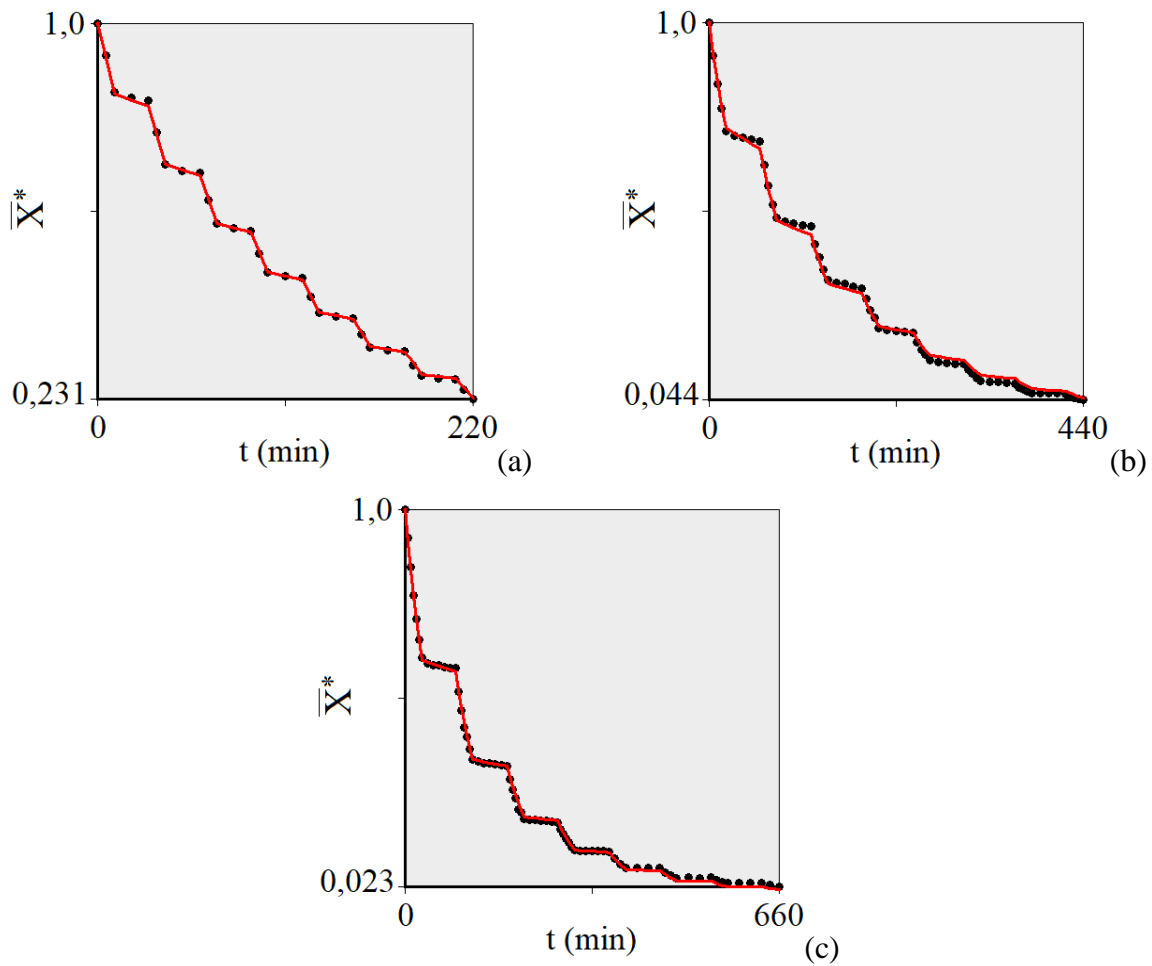


Figura 4.20 - Cinética de secagem intermitente descrita pelo modelo proposto com temperatura do ar de secagem de 70 °C: $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min (a), $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min (b) e $t_{in} = 30$ min e $t_{out} = 60$ min (c).

Notadamente, os resultados demonstram que há boa compatibilidade entre a curva ajustada obtida pelo modelo proposto e os pontos experimentais. Com base na análise das cinéticas e dos indicadores estatísticos apresentados na Tabela 4.8, pode-se afirmar que o modelo proposto neste trabalho (modelo empírico) descreve adequadamente a cinética de secagem intermitente das amostras de melão previamente tratadas osmoticamente.

4.6.1 - Distribuição de erros pelo modelo proposto

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram a distribuição de erros (diferença entre o valor experimental e o valor simulado) para os experimentos de secagem intermitente utilizando-se o modelo empírico proposto, evidenciando em cada gráfico o erro médio.

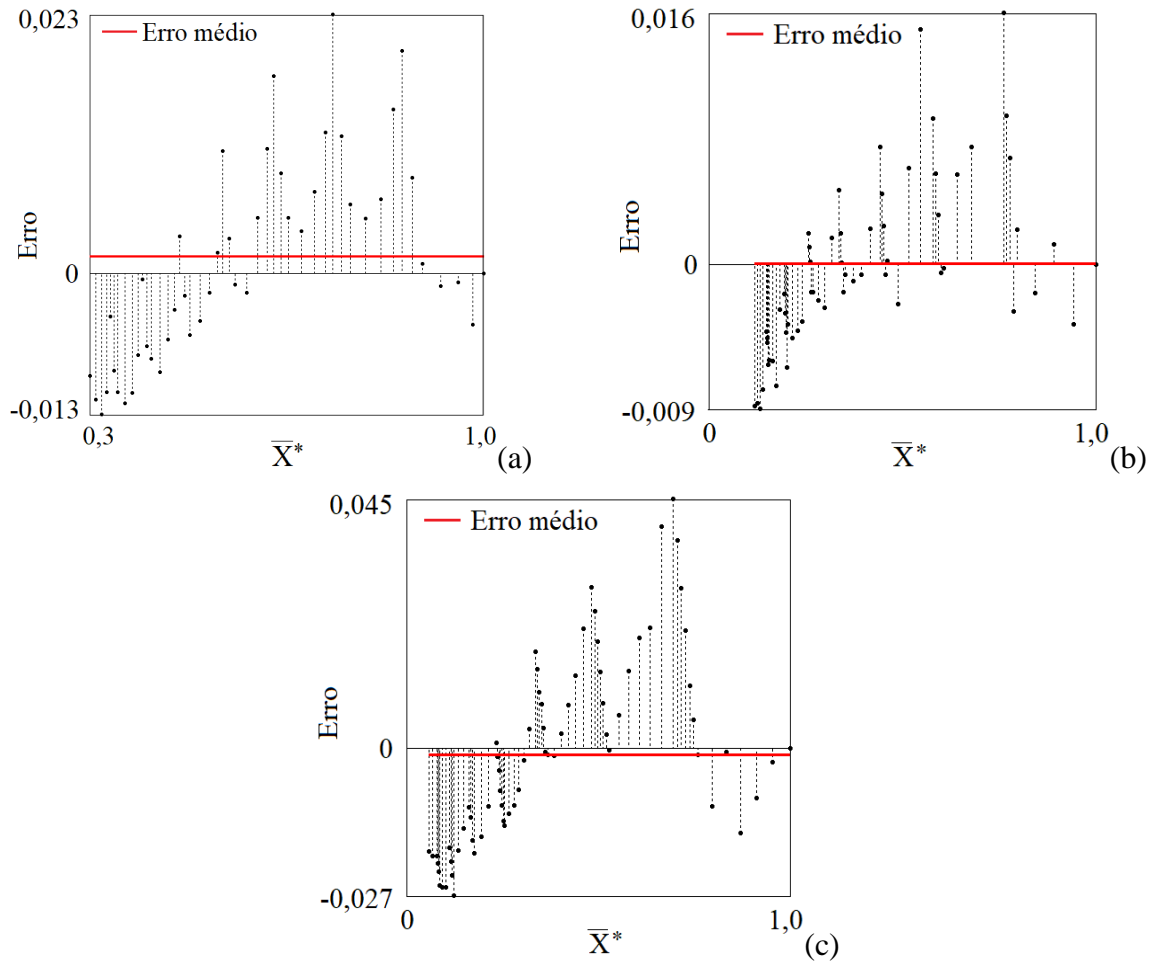


Figura 4.21 - Distribuição de erro para as secagens intermitentes na temperatura de 50 °C: $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min (a), $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min (b) e $t_{in} = 30$ min e $t_{out} = 60$ min (c).

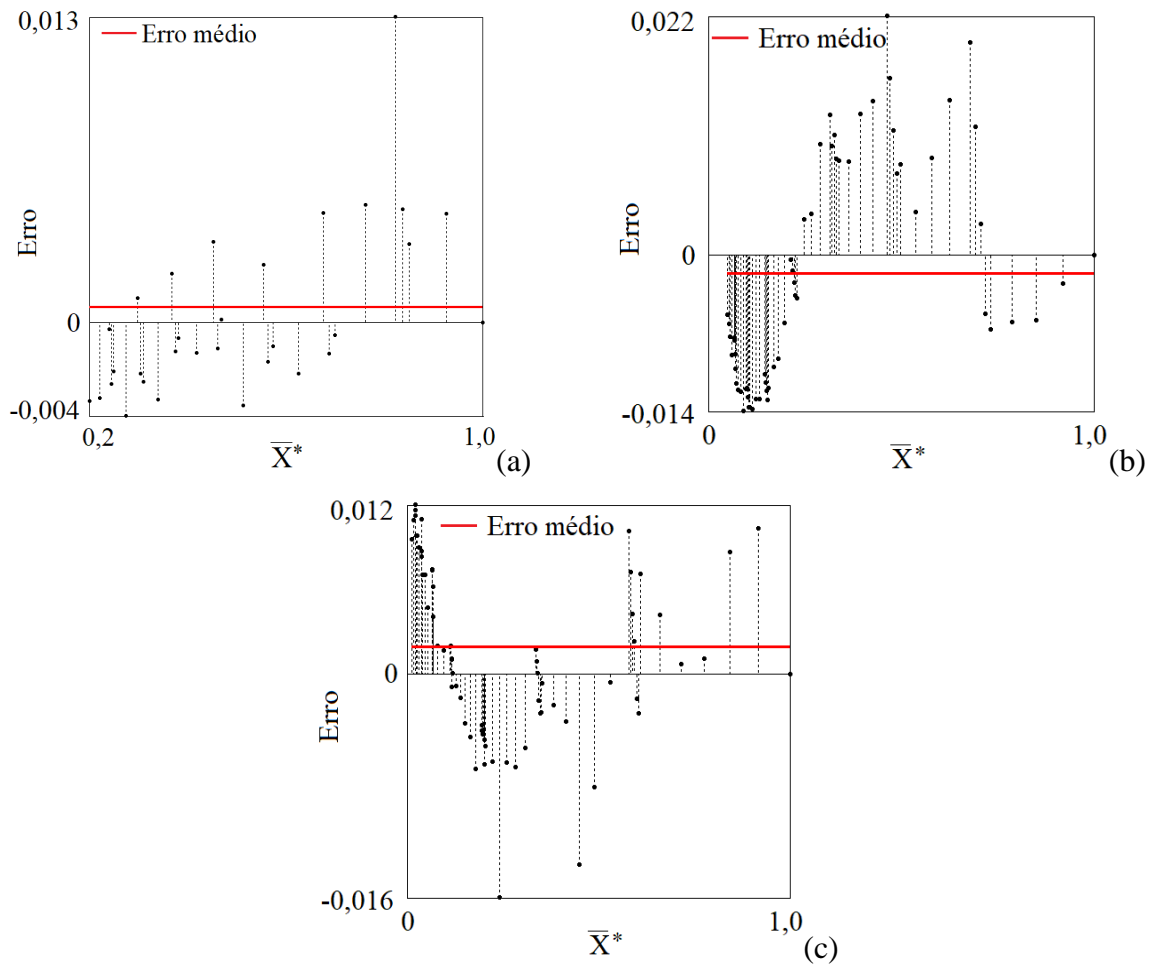


Figura 4.22 - Distribuição de erro para as secagens intermitentes na temperatura de 70 °C: $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min (a), $t_{in} = 20$ min e $t_{out} = 40$ min (b) e $t_{in} = 30$ min e $t_{out} = 60$ min (c).

Em todas as análises, o valor do erro médio apresentou valores próximos a zero, com erro máximo obtido de aproximadamente 0,003, em conformidade com a previsão teórica de ser zero. Esse resultado é mais um indicador positivo sobre a qualidade das análises realizadas, além dos indicadores estatísticos apresentados na Tabela 4.8.

Percebe-se uma distribuição aleatória e um comportamento melhor para uma menor temperatura. Quando se usou uma temperatura de 50 °C, obteve-se um erro médio mais próximo de zero do que para a temperatura de 70 °C.

4.7 - Solução numérica para os paralelepípedos de melão

A descrição da secagem dos paralelepípedos de melão pré-tratados osmoticamente também foi realizada utilizando-se uma solução numérica da equação de difusão tridimensional, obtida através do método dos volumes finitos, com uma formulação totalmente implícita, em coordenadas cartesianas, com a condição de contorno do terceiro tipo. Diferentemente da solução analítica abordada anteriormente, o modelo numérico considera a difusividade efetiva de massa como uma propriedade variável, em função do teor de umidade local. Além disso, o encolhimento dos pedaços de melão também foi considerado no modelo.

Para simular e determinar os parâmetros do processo e indicadores estatísticos, foi utilizado o programa *LS Optimizer Software* (SILVA e SILVA, 2016), acoplado ao solver desenvolvido (utilizando uma linguagem de programação Fortran, com opção de programação Quickwin Application), no qual também calcula as incertezas dos parâmetros obtidos no processo de otimização.

Para esse modelo, foi utilizada uma malha uniforme de 15 x 15 x 25 volumes de controle, relativo ao pedaço simétrico, que corresponde a 1/8 de todo o paralelepípedo, com 1120 números de passos no tempo, num intervalo de tempo $\Delta t = 0,5$ min, no qual as equações discretizadas foram resolvidas.

Para descrever o encolhimento, considerou-se que a variação das dimensões do paralelepípedo durante a secagem ocorre sem gerar mudanças significativas em sua forma geométrica. Com base nessa premissa, foi obtida uma expressão para a variação das arestas do paralelepípedo, em função do teor de umidade (adimensional) local (\bar{X}^*), obtido a partir de dados experimentais. O *software LAB Fit* (SILVA e SILVA, 2009a) foi utilizado para determinar a melhor função, entre as várias funções disponíveis em sua biblioteca (208 funções), visando o ajuste da curva que relaciona as dimensões e a razão de umidade. Os dados experimentais do encolhimento das amostras foram colocados em um único arquivo, correlacionados com a razão de umidade, assim, as dimensões do paralelepípedo (L_x , L_y e L_z) foram representadas por uma única expressão, L , em função do teor de umidade adimensional, obtida por meio de ajuste de curvas. A Figura 4.23 apresenta a superposição entre os valores das dimensões e a função (arco de círculo) que melhor se ajustou aos dados experimentais, em função do teor médio de umidade \bar{X}^* , representada pela seguinte expressão:

$$L(\bar{X}^*) = \sqrt{a - (\bar{X}^* - b)^2} \quad 4.3$$

Os valores dos parâmetros obtidos pelo ajuste foram $a = 0,593$ e $b = 0,758$.

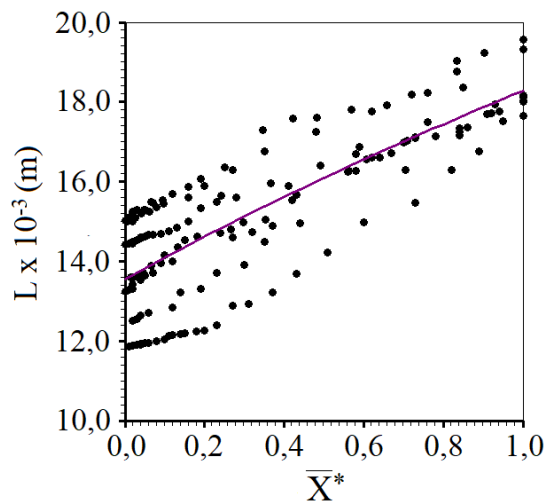


Figura 4.23 - Dimensões em função do teor médio de umidade adimensional.

A Figura 4.23 demonstra que, à medida em que os pedaços de melão perdem umidade suas dimensões diminuem, confirmando que, de fato, ocorre um forte encolhimento, no qual o modelo proposto levou em consideração, uma vez que a expressão foi acoplada ao solver (implementado com a solução numérica) para atualizar os valores de Δx , Δy e Δz a cada intervalo de tempo, para cada volume de controle, conforme descrito na metodologia (seção 3.10.1).

Determinada a função e seus respectivos parâmetros, a e b , as expressões obtidas para as funções que representam as dimensões das faces L_x , L_y e L_z em função do teor de umidade adimensional, são mostradas na Tabela 4.9. Vale salientar que as dimensões iniciais correspondem à metade das medidas originais, tendo em vista o uso da simetria.

Tabela 4.9 - Expressões utilizadas para representar as dimensões das amostras em função do teor de umidade adimensional.

Dimensões iniciais (m)	Expressões
$L_{x_0} = 5,0 \times 10^{-3}$	$L_x = 5,0 \times 10^{-3} \sqrt{0,593 - (\bar{X}^* - 0,758)^2}$
$L_{y_0} = 5,0 \times 10^{-3}$	$L_x = 5,0 \times 10^{-3} \sqrt{0,593 - (\bar{X}^* - 0,758)^2}$
$L_{z_0} = 10,0 \times 10^{-3}$	$L_x = 10,0 \times 10^{-3} \sqrt{0,593 - (\bar{X}^* - 0,758)^2}$

Para a difusividade variável, que também é incluída no modelo, os parâmetros do processo difusivo podem ser calculados através de uma relação apropriada entre esse parâmetro e o teor de umidade adimensional \bar{X}^* . A função proposta neste estudo corresponde a função exponencial, apresentada na Equação (4.4).

$$D = a \cdot \exp(b \cdot \bar{X}^*) \quad 4.4$$

em que a e b são parâmetros de ajuste aos dados experimentais, determinados por otimização. Na literatura, é possível encontrar várias expressões para a difusividade efetiva de massa em função da variável dependente (SILVA et al., 2015b; AIRES et al., 2018; LIMA et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2022). A Equação (4.4) foi considerada apropriada para o presente trabalho, considerando que a referida função é frequentemente usada para representar a variação de difusividade em processos de transferência de massa (SILVA JÚNIOR et al., 2017; AIRES et al., 2019; SILVA et al., 2017).

Assim, realizando-se os processos de otimização para obtenção da difusividade efetiva de massa para as amostras provenientes dos experimentos de secagem contínua (E_1 e E_5), cujas temperaturas foram 50 e 70 °C, obtiveram-se os valores dos parâmetros a e b da Equação (4.4), bem como os respectivos valores de qui-quadrado, coeficiente de determinação e coeficiente de transferência convectivo de massa, para cada experimento, apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Parâmetros de processo para o modelo numérico em relação à secagem contínua.

T (°C)	a	b	h (m min ⁻¹)	R ²	χ ²
50	(2,049 ± 0,122) x 10 ⁻⁸	1,957 ± 0,2328	(2,238 ± 0,079) x 10 ⁻⁵	0,9997	7,1968 x 10 ⁻⁴
70	(9,685 ± 0,542) x 10 ⁻⁸	0,3738 ± 0,234	(4,145 ± 0,177) x 10 ⁻⁵	0,9998	4,9589 x 10 ⁻⁴

Os parâmetros mostrados na Tabela 4.10 foram usados para gerar a cinética relativa a cada um dos processos de secagem, conforme demonstrado na Figura 4.24.

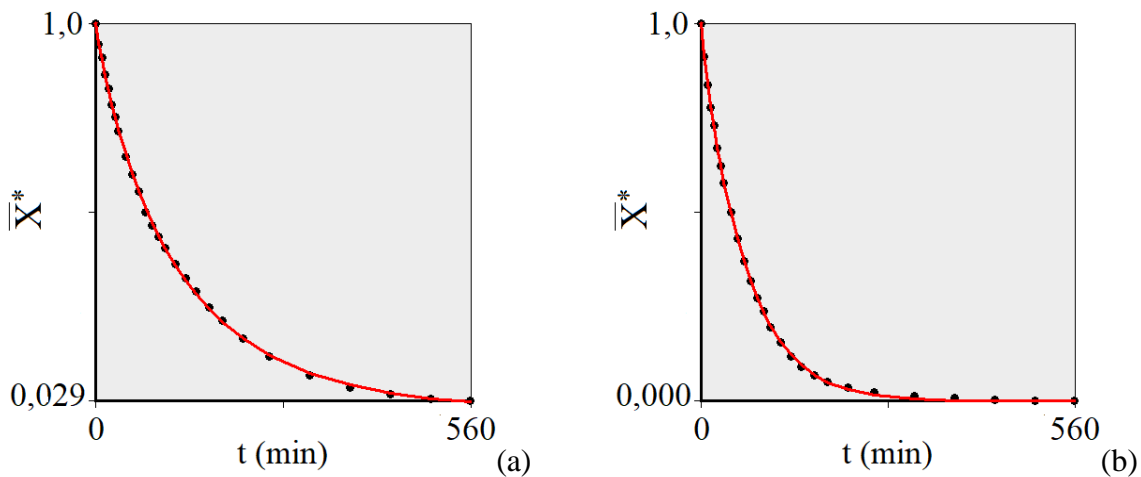


Figura 4.24 - Cinética de secagem contínua usando simulação numérica tridimensional, nas temperaturas: 50 °C (a) e 70 °C (b).

Uma análise dos indicadores estatísticos fornecidos na Tabela 4.10, particularmente o coeficiente de determinação e qui-quadrado, permite concluir que o modelo proposto descreve com precisão ($R^2 > 0,99$ e $\chi^2 < 7,20 \times 10^{-4}$) a cinética de secagem em pedaços de melão cortados na forma de paralelepípedos.

Conforme demonstrado nas Figuras 4.24, o modelo numérico descreve adequadamente os experimentos em questão, com uma boa concordância entre os dados experimentais e a linha simulada pelo modelo. O uso de uma expressão variável para a difusividade (como função do teor de umidade local), melhora sensivelmente a descrição da cinética de secagem, apresentando maior compatibilidade que o modelo de difusão analítico. Uma análise mais aprofundada dessa comparação será apresentada na próxima subseção.

De forma a complementar a análise dos resultados, o gráfico da difusividade efetiva de massa

em função do teor de umidade local, obtido a partir da Equação (4.4), é exposto para cada experimento na Figura 4.25.

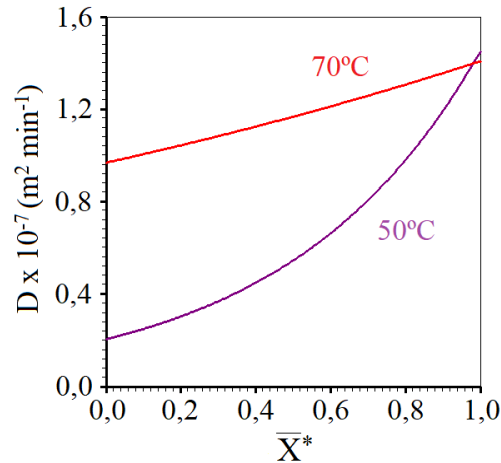


Figura 4.25 - Difusividade efetiva de massa em função do teor de umidade adimensional para as secagens contínuas.

Conforme ilustrado na Figura 4.25, observa-se um aumento na difusividade, à medida que o teor de umidade (adimensional) local se eleva. Ademais, verifica-se que os comportamentos das difusividades em relação à temperatura apresentam distinções significativas. A linha vermelha (70 °C) se aproxima de uma linha reta, enquanto a linha roxa (50 °C) apresenta uma nítida curvatura. Essa discrepância ocorre devido ao parâmetro de ajuste b (Tabela 4.10), apresentar um valor bem menor para a temperatura de 70 °C. Este resultado está em consonância com o esperado, tendo em vista a influência da temperatura no processo de secagem, uma vez que a difusividade das amostras submetidas à temperatura de 70 °C são superiores às submetida a 50 °C, como demonstrado na figura. Diversos estudos corroboram essa relação, atestando que o coeficiente de difusão é uma função da temperatura e do teor de umidade do material (YANG et al. 2013; TOUIL et al. 2014; KHAN et al. 2016; SILVA et al. 2016b; AIRES et al. 2018).

4.7.1 - Comparação entre os modelos de difusão

Para cada um dos experimentos, uma comparação entre o resultado obtido através da solução

analítica com condição de contorno do terceiro tipo, descrita no item 4.5.2, e o resultado obtido neste ponto, utilizando uma solução numérica tridimensional, possibilita concluir que a solução numérica melhora sensivelmente a descrição da cinética de secagem dos paralelepípedos de melão pré-tratados osmoticamente. Comparando os indicadores estatísticos apresentados na Tabela 4.7, relativos ao modelo analítico, com os da Tabela 4.10, relativos ao numérico, nota-se que, em geral, os valores obtidos para o qui-quadrado diminuíram quando utilizado o modelo numérico. Visualmente, os dois modelos podem ser considerados equivalentes em relação à cinética de secagem, uma vez que ambos apresentam concordância em relação aos dados experimentais. No entanto, o modelo numérico se destaca por uma melhor adequação física, pois é levado em consideração dois parâmetros importantes que ocorrem na secagem convectiva: a difusividade variável e o encolhimento.

É interessante observar que, mesmo o modelo analítico não considerar o volume e difusividade de massa variável, os resultados obtidos foram razoáveis. Segundo Silva et al. (2012b) e Aires et al. (2018), a ausência do encolhimento e da difusividade variável gera dois erros que tendem a se anular mutuamente e, conseqüentemente, os resultados obtidos através do modelo analítico foram satisfatórios. Obviamente, a retração produz mudanças internas na estrutura do produto, afetando a difusividade efetiva de massa, que já é prevista pela literatura (SILVA et al. 2015; DEHGHANNYA et al. 2016). Como exemplo, ao final dos experimentos de secagem contínua, a variação no volume do paralelepípedo em relação ao valor inicial (após o pré-tratamento osmótico) foi de 73% e 75% para as amostras secas nas temperaturas de 50 e 70 °C, respectivamente. Esse fato é importante, pois indica o forte encolhimento das amostras durante o processo de secagem. Sendo assim, para uma descrição rigorosa dos processos, o encolhimento deve ser considerado.

Apesar da proximidade dos resultados entre os modelos, o fato de o modelo analítico considerar o mesmo valor de difusividade em todos os pontos do paralelepípedo, embora ocorra alterações internas do produto durante a secagem, faz com que os resultados sejam considerados apenas razoáveis. Assim, devido ao modelo numérico em questão considerar os parâmetros do processo variáveis (encolhimento e difusividade), permite uma análise mais próxima da situação física real. Esse modelo também é capaz de simular a distribuição espacial de umidade no interior do produto, permitindo uma posterior análise das tensões hídricas.

Além disso, os valores obtidos para a difusividade efetiva de massa e coeficiente de transferência convectivo de massa, em ambos os modelos, foram consistentes com a literatura em relação à secagem

de frutas (KHAN et al., 2016; NASCIMENTO et al., 2016; FERREIRA et al., 2020; LIMA et al., 2021), com valores próximos aos obtidos no presente estudo, entre 10^{-8} e 10^{-10} $m^2\text{min}^{-1}$ para D e 10^{-5} a 10^{-7} m min^{-1} para h.

Aires et al. (2018) estudaram a secagem convectiva de fatias de maçã desidratadas osmoticamente utilizando uma solução numérica da equação de difusão bidimensional em coordenadas cartesianas, através do método dos volumes finitos. Dois modelos foram analisados: o primeiro considerando a difusividade efetiva da água e as dimensões constantes, enquanto o segundo levando em conta esses parâmetros de processo como variável. Além disso, a distribuição do teor de umidade nas fatias de maçã também foi estudada. Esses pesquisadores concluíram que o modelo que considerou os parâmetros do processo como variáveis foi mais adequado para descrever este tipo de processo físico.

4.7.2 - Simulação da distribuição de umidade no interior dos paralelepípedos de melão

A modelagem matemática do processo de secagem convectiva das amostras de melão com pré-tratamento osmótico, através de um modelo difusivo, permite prever as distribuições do teor de umidade nas amostras em qualquer volume de controle em instantes específicos. Informações sobre como a umidade está distribuída no interior do produto é importante porque permite uma análise das tensões geradas pela diferença desses gradientes hídricos, que, dependendo do material, podem causar trincas, fissuras ou deformações irregulares do produto (SILVA, 2012; AIRES et al. 2018). Assim, utilizando-se da solução numérica, foi simulada a distribuição espacial do teor de umidade no sólido para alguns planos internos e instantes de tempo previamente selecionados. Foi utilizado o *software parallelepiped* (SILVA, 2012) para calcular o teor de umidade em todos os pontos nodais dos volumes de controle da malha bidimensional do domínio mostrado na Figura 4.26 (c). Com base nessas informações, o *software Contour plots* (SILVA, 2010b) gerou os gráficos de distribuição de umidade dentro do paralelepípedo de melão em um instante específico do processo de secagem, em determinados planos xy, conforme ilustrado na Figura 4.26 (b).

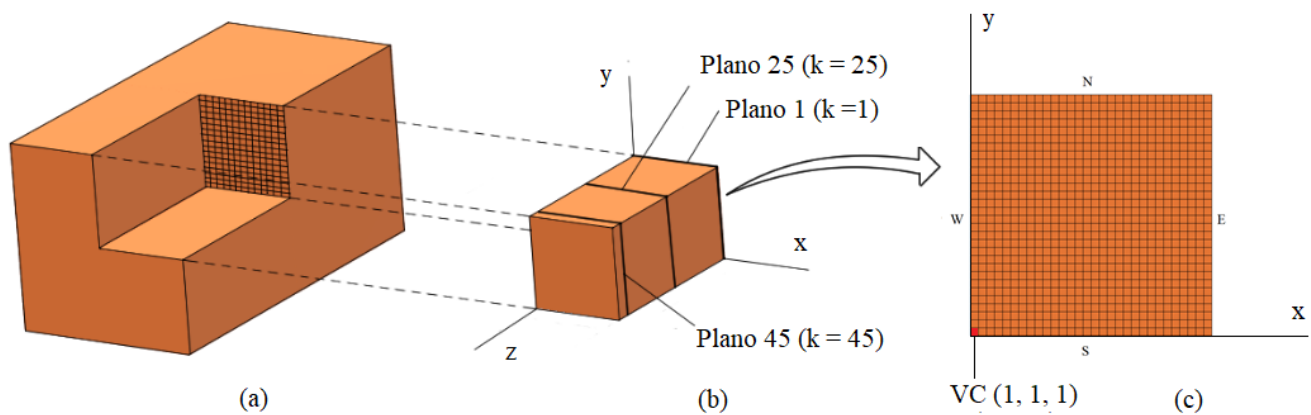


Figura 4.26 - Paralelepípedo com a parte destacada equivalente a 1/8 que foi removido (a); domínio cartesiano tridimensional com destaque para os planos 1, 25 e 45, utilizado para a obtenção das distribuições de água (b); malha bidimensional representando o plano 1 ($k = 1$) com destaque para o volume de controle (VC) escolhido para o transiente (c).

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos por meio de simulações utilizando a solução numérica com uma malha de $30 \times 30 \times 50$ volumes de controle, com simetria, 1120 passos no tempo e Δt igual a 0,5 min.

A malha considerada para o paralelepípedo simétrico possui 50 planos verticais ao longo do eixo z , ou seja, o valor de k varia de 1 a 50. Dessa forma, foram analisados os planos verticais que contêm os volumes de controle nas coordenadas $(i, j, 1)$, $(i, j, 25)$ e $(i, j, 45)$, com i e j variando de 1 a 31. Assim, tem-se o plano 1, plano 25 (centro do domínio) e plano 45, possibilitando realizar análises em diferentes perspectivas no interior do sólido.

A Figura 4.27 apresenta a distribuição de umidade no plano 1, nos instantes 40, 80, 120, 160 e 200 min de secagem contínua do melão pré-tratado osmoticamente, utilizando-se uma temperatura de $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

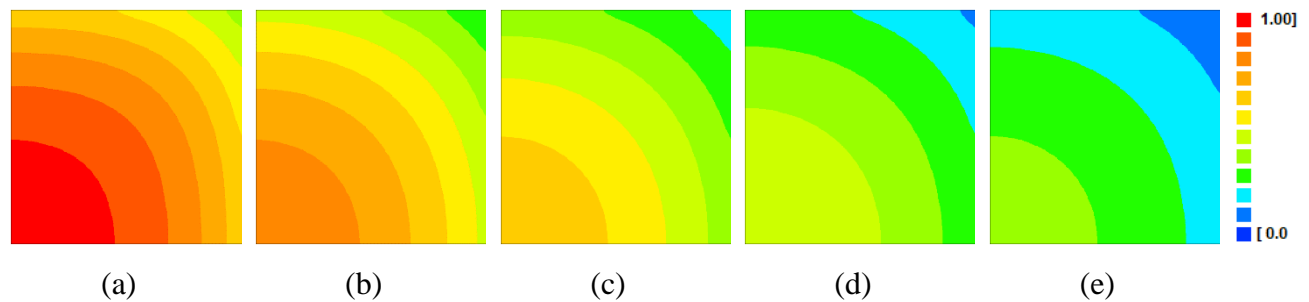


Figura 4.27 - Distribuição de umidade no interior dos paralelepípedos nos instantes: 40 min (a), 80 min (b), 120 min (c), 160 min (d) e 200 min (e).

Observando a Figura 4.27, percebe-se que os teores de umidade são maiores na região central das amostras e diminuem gradualmente do centro para as extremidades do sólido. Isso indica que o fluxo de água ocorre do interior para a superfície do produto, efeito típico de um processo de secagem (KUMAR et al. 2015; SILVA et al. 2015; AIRES et al. 2018). É nítida a evolução da distribuição do teor de umidade ao decorrer do processo de secagem, no instante de 40 min (Figura a), nota-se que a amostra apresenta um elevado teor de umidade, com uma suave perda de umidade nas camadas externas, o que é coerente, devido ser um período no início do processo, em que o produto ainda possui elevada quantidade de água. Já para o instante 200 min, gráfico (e), percebe-se que os elementos mais externos estão próximos de atingir o teor de umidade de equilíbrio, tendo a cor correspondente ao valor de equilíbrio pela escala de cores, enquanto os elementos mais internos apresentam uma perda de umidade mais acentuada em relação aos instantes iniciais.

A fim de comparar a distribuição de umidade no interior das amostras durante o processo de secagem nas temperaturas de 50 e 70 °C, analisou-se a distribuição de umidade no instante de 120 min, para ambos os casos. A Figura 4.28 apresenta os gráficos que ilustram a distribuição espacial de umidade para as duas temperaturas do ar de secagem.

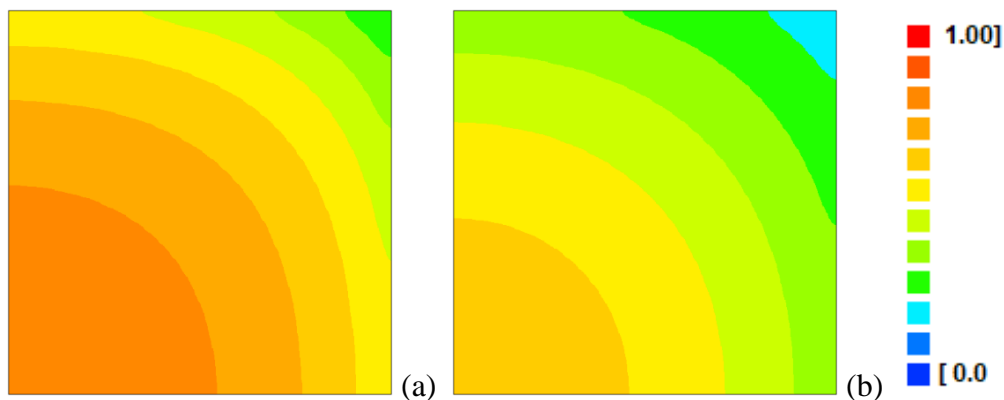


Figura 4.28 - Distribuições de umidade para secagem contínua no plano 1 em 120 min: 50 °C (a) e 70 °C (b).

A compreensão da diferença entre o teor de umidade no centro e nos contornos do sólido é importante, porque permite estabelecer procedimentos de secagem para evitar altos gradientes de umidade. Esses gradientes são aqueles que causam deformações irregulares e, no caso de alguns materiais, geram tensões (térmicas e hídricas) que podem comprometer a qualidade do produto, como observado na secagem de grãos de arroz (PEREIRA et al., 2020), feijão (AMADEU et al., 2022) e peças de madeira (SILVA et al., 2015a). No instante de 120 min para secagem contínua, a razão de umidade na temperatura de 50 °C varia de 0,272 (superfície) a 0,819 (centro), enquanto na temperatura de 70 °C a variação é de 0,201 (superfície) a 0,643 (centro). Essa diferença na distribuição de umidade no plano pode ser observada na Figura 4.28.

Comparando os gráficos (a) e (b), é possível verificar o efeito da temperatura do ar de secagem durante o processo. Com a temperatura de 70 °C, os teores de umidade são menores em todos elementos da malha no instante de tempo analisado, em relação à temperatura de 50 °C. Isso indica que as amostras secam mais rapidamente à medida que a temperatura do ar de secagem aumenta. Embora esses resultados sejam bastante óbvios, todos eles podem ser previstos pelo modelo, que envolve uma solução numérica da equação de difusão. Vale lembrar que tal conclusão ocorreu de forma mais precisa, levando-se em consideração as variações dos parâmetros termofísicos dos paralelepípedos de melão.

A Figura 4.29 apresenta a distribuição do teor de umidade nos Planos 1, 25 e 45, no instante de 200 min após o início da secagem contínua.

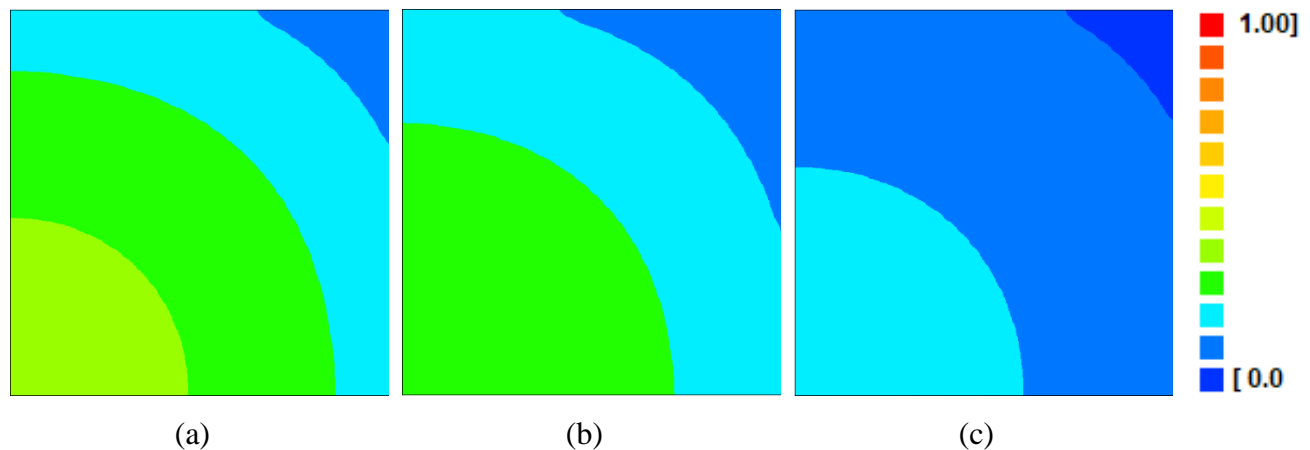


Figura 4.29 - Distribuição do teor de umidade no instante de 200 min de secagem contínua a 70 °C: (a) Plano 1; (b) Plano 25; (c) Plano 45.

De acordo com a Figura 4.29, nos planos 1 e 25, nenhum elemento da malha atingiu o teor de umidade de equilíbrio no tempo de 200 min. Enquanto que, no plano 45, alguns elementos na extremidade a nordeste já atingiram o valor de equilíbrio para o teor de umidade. Nota-se também que o Plano 1, localizado no contorno do paralelepípedo simétrico (1/8), que também equivale a uma posição no centro do paralelepípedo inteiro, apresenta umidade superior aos demais planos analisados, cujas localizações se encontram mais afastadas do centro do sólido. Esse fato corrobora com a justificativa de que o fluxo de umidade ocorre do centro para as extremidades do sólido.

4.8 - Caracterização físico-química, bioativa e de cor da polpa de melão in natura

A Tabela 4.11 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros físico-químicos da polpa do melão in natura juntamente com suas incertezas.

Tabela 4.11 - Caracterização físico-química da polpa de melão in natura.

Parâmetros	Média
Teor de umidade (% b.u.)	92,24 ± 0,622
Atividade de água (25°C)	0,986 ± 0,032
pH	6,23 ± 0,012
Acidez Total Titulável (% ácido cítrico)	0,231 ± 0,013
Cinzas (%)	0,415 ± 0,063
Proteínas (%)	1,540 ± 0,005
Ácido Ascórbico (mg /100g)	11,123 ± 0,882
Açúcares Redutores (% de glicose)	5,787 ± 0,040
Açúcares Totais (% de glicose)	6,071 ± 0,021
Açúcares Não Redutores (% de sacarose)	0,270 ± 0,022
Flavonoides (mg/100 g)	2,045 ± 0,012
Antocianinas (mg/100 g)	0,540 ± 0,010
Carotenoides (µg/100 g)	56,001 ± 0,449
Luminosidade (L*)	67,600 ± 0,283
Intensidade de vermelho (+a*)	1,910 ± 0,067
Intensidade de amarelo (+b*)	16,433 ± 0,078

O teor de umidade obtido na polpa do melão foi de 92,24%, percebe-se assim, que o melão in natura apresenta elevado teor de umidade, o que condiz com os resultados obtidos por Amadeu et al. (2020) e Reis et al. (2020), cujos valores de teor de umidade foram 91,79 e 94,16% para as variedades Orange e Japonês, respectivamente. Esta variação pode ser atribuída principalmente ao estágio de maturação e à variedade do melão.

Em relação à atividade de água (a_w), observa-se média de 0,986, sendo este valor considerado como de elevada atividade de água, o que indica uma alta perecibilidade do fruto. Os valores obtidos para a polpa de melão estão dentro da faixa para frutas com elevadas atividades de água ($> 0,95$), como encontrado por Moraes et al. (2017) e Dias et al. (2019) para polpa de araticum (0,98) e cupuaçu (0,99), respectivamente. O teor de umidade e a atividade de água são parâmetros importantes na conservação de alimentos, em que tais parâmetros indicam uma baixa estabilidade do fruto durante o

armazenamento, uma vez que possibilita o crescimento microbiano e ocorrência de reações bioquímicas, demandando a utilização de processos que proporcionem a sua conservação (SANTOS et al., 2019).

O valor do pH apresentado pela polpa de melão in natura (6,23) encontra-se na faixa de alimentos com baixa acidez ($\text{pH} > 4,5$), enquanto a acidez total titulável encontrada corresponde a 0,231 %. Valores de pH próximos foram reportados por Dalastro et al. (2016) para os melões Amarelo (6,43) e Pele de Sapo (6,49), confirmando que essa é uma característica marcante dessa fruta, enquanto o valor de acidez titulável encontrado pelos mesmos autores também foi próximo aos valores encontrados neste trabalho, sendo que a variedade Pele de Sapo deteve valores médios de 0,24 % de ácido cítrico para a acidez total titulável.

Em relação ao conteúdo de minerais (cinzas), a amostra de melão in natura apresentou teor de cinzas de 0,415%. Os valores obtidos foram próximos aos valores reportados na Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO, 2011), que menciona teores de 0,5%. De acordo com Reis et al. (2020), assim como ocorre com a maioria das frutas, o melão possui baixo teor em minerais. Os valores obtidos corroboram com os observados no estudo de Lima et al. (2015), no qual avaliou a composição físico-química de 15 amostras de polpas de frutas, obtendo valores que variaram entre 0,19 a 0,60 % de cinzas.

A polpa de melão apresentou teor de proteínas de 1,540%. Como exemplo de quantidades desse parâmetro em outras frutas, pode-se citar Jesus et al. (2016), que encontraram o teor médio de proteínas para umbu e ciriguela in natura de 0,98 e 2,05%, respectivamente, e Barros (2020), que encontrou o valor de 0,99 % para polpa de kiwi in natura.

A determinação do conteúdo de ácido ascórbico em frutas e de seus produtos é importante, pois além de seu papel fundamental na nutrição humana, é largamente empregado como agente antioxidante para estabilizar a cor e o aroma de alimentos, bem como conservante (CARDELLO, 1998; LIMA et al. 2015). O teor de ácido ascórbico encontrado para a polpa de melão neste trabalho foi 11,123 mg /100g, valor próximo ao encontrado por Kohn et al. (2015) em seu estudo da qualidade pós-colheita do melão cultivado em sistema orgânico, com 13,04 mg/100 g. A variação do conteúdo de ácido ascórbico está associada a vários fatores, como o processo de maturação da fruta, diferentes variedades, bem como pelas condições de processamento e armazenamento (LIMA et al., 2015). Este parâmetro está adequado à faixa recomendada pela legislação em vigor, que pode variar de 0,32 a 800 mg/100 g de melão

(BRASIL, 2000).

A análise do perfil de açúcares na polpa de melão revelou teores de 6,071% de glicose, com predominância dos redutores (5,787% glicose) em relação aos não redutores (0,270% sacarose). De acordo com Bastos et al. (2016), polpas de frutas apresentam maior conteúdo de glicose e frutose, quando comparado ao conteúdo de sacarose. Estas características se assemelham ao observado por Reis et al. (2020) em polpa de melão Orange, que apresentou 5,98% de glicose total, 4,83% de glicose redutora e 1,74% sacarose não redutora.

Os valores médios de flavonoides e antocianinas encontrados na polpa de melão foi de 2,045 e 0,540 mg/100 g, respectivamente. Esses valores se aproximam dos encontrados por Oliveira (2013) para o melão da variedade rendilhado (2,40 e 0,44 mg/100 g, respectivamente), comercializado nos nichos de mercado da cidade de Campina Grande. Estes compostos influenciam nas propriedades nutricionais e sensoriais dos alimentos, além de atuarem como antioxidantes, reagindo com os radicais livres, o que consequentemente auxilia na ação anti-inflamatória e anticancerígena, agindo também em processos reguladores do metabolismo (OLIVEIRA 2013; REIS et al., 2020).

Quanto ao conteúdo de carotenoides totais, a polpa do melão apresentou valor médio de 56,001 $\mu\text{g}/100\text{ g}$. Esse valor está acima dos teores apresentados por Oliveira et al. (2013) que, ao analisarem quatro variedades de melão (Amarelo, Rendilhado, Pele de Sapo e Orange) em três nichos de comercialização e de três cidades, observaram que os maiores teores de carotenoides foram encontrados para os melões da variedade Rendilhado, com valores variando entre 15,89 e 48,22 $\mu\text{g}/100\text{ g}$. A literatura indica que o teor de carotenoides varia de acordo com a cor da polpa do melão, visto que melões de polpa alaranjada possuem níveis significativamente mais elevados de carotenoides do que melão de polpa verde ou branca. Além disso, durante o processo de amadurecimento do fruto, ocorre a síntese de carotenoides (WOLBANG et al., 2010; COSTA et al., 2020).

A coloração é uma das principais características de qualidade e preferência do consumidor, capaz de influenciar a aceitação ou não de um alimento. Através da análise de cor das amostras de melão, a luminosidade (L^*) apresentou valor de 67,60, indicando um tom geral mais claro para a polpa do melão. O parâmetro a^* , que varia do índice de saturação verde (valores negativos) ao vermelho (valores positivos), apresentou valor de 1,91, estando dentro da escala de intensidade vermelha. Já o parâmetro b^* , que aponta o índice de saturação da cor amarela (valores positivos) para o azul (valores negativos), apresentou valor 16,433, indicando uma tendência do tom amarelo menos intenso. Silva et

al. (2016c) ao avaliarem a cor da polpa de melão Cantaloupe, determinaram valores para os parâmetros de cor L^* , a^* e b^* de 63,51, 8,98 e 30,34, respectivamente.

4.9 - Caracterização físico-química, bioativa e de cor do melão-passa

Na Tabela 4.12 encontram-se os valores médios obtidos através das análises físico-químicas, bioativas e de cor dos paralelepípedos de melão submetidos ao pré-tratamento em solução osmótica de sacarose, com concentração de 60 °Brix e posterior secagem convectiva de forma contínua e intermitente nas temperaturas de 50 e 70 °C, resultando em oito amostras de melão-passa.

Tabela 4.12 - Valores médios e desvios padrão da atividade de água, pH, acidez total titulável, cinzas e proteínas das amostras de melão submetidas a diferentes experimentos de secagem.

Parâmetros	Experimentos		
		50 °C	70 °C
Atividade de água (a_w)	Contínua	0,502 aB ± 0,012	0,448 bB ± 0,024
	Inter. $t_{in} = 10$ min	0,515 aB ± 0,029	0,467 bB ± 0,013
	Inter. $t_{in} = 20$ min	0,571 aA ± 0,032	0,514 bA ± 0,040
	Inter. $t_{in} = 30$ min	0,506 aB ± 0,016	0,433 bB ± 0,013
pH	Contínua	6,02 aA ± 0,02	5,83 bAB ± 0,01
	Inter. $t_{in} = 10$ min	6,10 aA ± 0,03	5,90 bA ± 0,02
	Inter. $t_{in} = 20$ min	6,07 aA ± 0,02	5,90 bAB ± 0,02
	Inter. $t_{in} = 30$ min	6,03 aA ± 0,01	5,76 bB ± 0,01
Acidez Total Titulável (%)	Contínua	0,64 bC ± 0,05	0,89 aB ± 0,07
	Inter. $t_{in} = 10$ min	0,81 aB ± 0,07	0,88 aB ± 0,07
	Inter. $t_{in} = 20$ min	1,24 aA ± 0,04	1,25 aA ± 0,09
	Inter. $t_{in} = 30$ min	1,30 aA ± 0,07	1,32 aA ± 0,06
Cinzas (%)	Contínua	1,11 aA ± 0,03	1,15 aA ± 0,05
	Inter. $t_{in} = 10$ min	1,14 aA ± 0,05	1,16 aA ± 0,05
	Inter. $t_{in} = 20$ min	1,19 aA ± 0,03	1,24 aA ± 0,04
	Inter. $t_{in} = 30$ min	1,13 aA ± 0,03	1,16 aA ± 0,05
Proteínas (%)	Contínua	3,34 aBC ± 0,13	2,20 bC ± 0,23
	Inter. $t_{in} = 10$ min	3,88 aA ± 0,36	3,60 aA ± 0,23
	Inter. $t_{in} = 20$ min	3,10 aC ± 0,35	2,69 bBC ± 0,32
	Inter. $t_{in} = 30$ min	3,77 aAB ± 0,28	3,16 bAB ± 0,15

As médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

As amostras de melão in natura apresentaram inicialmente um teor de umidade de cerca de 0,92 b.u. e, após o pré-tratamento osmótico seguido de secagem convectiva, uma redução para cerca de 0,18 b.u para as amostras de melão-passa. Consequentemente, após a redução do teor de umidade, a atividade de água das amostras secas foi substancialmente reduzida, de 0,986 (in natura) para 0,433 (melão-passa), com diferença estatística entre os experimentos apenas para o experimento com secagem intermitente ($t_{in} = 20$ min $t_{out} = 40$ min), com valor superior ao demais. Silveira et al. (2016) afirmaram que a atividade de água é um parâmetro que influencia as reações bioquímicas nos alimentos. A sua redução contribui para a conservação do produto, prolongando sua vida útil. Troller e Christian (1978) afirmaram que a maioria dos microrganismos não conseguem se desenvolver em condições de $a_w < 0,60$. Com base nisso, todas as amostras de melão-passa apresentaram valores adequados com relação a a_w .

O pH (potencial hidrogeniônico) das amostras submetidas aos experimentos de secagem variou entre 5,756 a 6,105. Não houve diferença estatística entre os experimentos na temperatura de 50 °C, enquanto na temperatura de 70 °C, verificou-se diferença estatística do valor de pH entre os experimentos intermitentes com $t_{in} = 10$ min e $t_{in} = 30$ min. Comparando os resultados obtidos na Tabela 4.12 com os descritos na Tabela 4.11 (fruto in natura), observa-se uma pequena diminuição de pH.

A acidez total titulável (ATT) das amostras de melão-passa também apresentou diferença significativa entre os experimentos de secagem (Tabela 4.12), no qual revelou os menores teores a 50 °C (menor temperatura de secagem), com faixa de variação de 0,64 a 1,30%. Ao se comparar os teores de acidez entre os experimentos de secagem, os resultados obtidos indicaram que o tipo de secagem aplicada influenciou de forma significativa tal parâmetro, uma vez que ocorreu aumento dos valores com aplicação da intermitência. Ademais, ao fazer uma comparação isolada entre os valores de ATT obtidos nas duas temperaturas estudadas, pode-se perceber que o acréscimo da temperatura favoreceu a obtenção de maiores teores de acidez na secagem contínua, enquanto verifica-se comportamento inverso para o pH, que diminui com o aumento da temperatura de secagem. Santos et al., (2019b) também observaram aumento da acidez e redução do pH do pêssego durante o processo de secagem, apresentando valores de ATT entre 1,26 a 1,82 % e pH entre 6,52 a 6,32, respectivamente.

No que concerne ao teor de cinzas, não houve alterações significativas dos valores médios com os processos de secagem. Isso se deve a estabilidade dos minerais à temperatura, uma vez que, para a determinação desse parâmetro, a amostra é submetida à incineração em mufla a temperaturas acima de

500 °C. No entanto, em comparação com os valores das cinzas do produto in natura (0,415%), disponível na Tabela 4.11, é possível notar uma diferença considerável, sendo um acréscimo de 0,825% de cinzas. O ganho de sólidos pelo pré-tratamento osmótico e concentração dos mesmos durante o processo de secagem provoca aumento do conteúdo de minerais, permitindo atestar a elevação no percentual de cinzas nas amostras. Castro et al. (2016) estudando o processo de obtenção da goiabapassa em diferentes temperaturas de osmose e concentrações de sacarose, sendo o processo complementado em secador de ar aquecido nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, encontraram valores de cinzas variando de 1,00 a 1,64%. Os autores também constataram que o ganho de sólidos durante o processo de desidratação osmótica proporcionou o aumento do teor de cinzas no produto.

Através dos resultados obtidos, a secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min apresentou a maior quantidade de proteínas nas duas temperaturas estudadas (50 e 70 °C), sendo estatisticamente superior aos demais experimentos de secagem, ocasionando menor degradação das proteínas. É interessante observar que para os três experimentos com secagem intermitente, foi utilizada a mesma razão de intermitência ($\alpha = 2/3$), isso implica dizer, que a única diferença das secagens intermitentes está relacionada aos tempos dentro (t_{in}) e fora (t_{out}) do secador. A partir desta análise, pode-se afirmar que, nas condições estudadas, os melhores resultados obtidos para este parâmetro estão relacionados aos tempos $t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min. Em relação às temperaturas utilizadas no processo de secagem, verificou-se que o acréscimo da temperatura proporcionou a diminuição dos valores deste parâmetro, provocado pela desnaturação das proteínas nas amostras, com maior variação apresentada para as secagens contínuas. Efeito similar foi reportado por Rocha (2017), que ao secar fatias de kiwi pré-tratadas osmoticamente nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, obteve teor de proteínas que variou de 4,02 a 6,67%, constatando maior degradação deste componente na temperatura de secagem de 70 °C. Vale ressaltar que a secagem também resultou na concentração do teor de proteínas em relação ao produto in natura (Tabela 4.11), devido à concentração de massa seca, após a remoção de água por secagem.

Silva et al. (2022) estudando os processos de secagem contínua e intermitente de sementes de melão secas na temperatura de 60 °C e posterior produção de farinha, também verificaram aumento do teor de proteínas nas farinhas produzidas a partir da secagem intermitente, apresentando-se superior aos demais tratamentos de secagem, comprovando que a metodologia empregada causou menor degradação das proteínas.

Na Tabela 4.13 estão expostos os resultados referentes ao teor de ácido ascórbico, flavonoides, antocianinas e carotenoides nos pedaços de melão pré-tratados osmoticamente e submetidos aos diferentes experimentos de secagem.

Tabela 4.13 - Valores médios e desvio padrão do teor de ácido ascórbico, flavonoides, antocianinas e carotenoides das amostras de melão submetidas a diferentes experimentos de secagem.

Parâmetros	Experimentos		
		50 °C	70 °C
Ácido ascórbico (mg/100 g)	Contínua	14,89 aA ± 0,75	11,88 bB ± 1,01
	Inter. t _{in} = 10 min	15,57 aA ± 0,41	14,21 bA ± 1,65
	Inter. t _{in} = 20 min	15,91 aA ± 0,85	14,22 bA ± 0,49
	Inter. t _{in} = 30 min	15,84 aA ± 1,70	14,06 bA ± 1,16
Flavonoides (mg/100 g)	Contínua	8,37 aB ± 0,01	3,98 bC ± 0,02
	Inter. t _{in} = 10 min	15,32 aA ± 0,03	11,65 bA ± 0,04
	Inter. t _{in} = 20 min	8,38 aB ± 0,02	3,95 bC ± 0,02
	Inter. t _{in} = 30 min	9,39 aB ± 0,07	6,80 bB ± 0,04
Antocianinas (mg/100 g)	Contínua	1,23 aB ± 0,02	0,50 bC ± 0,01
	Inter. t _{in} = 10 min	2,83 aA ± 0,03	2,43 aA ± 0,08
	Inter. t _{in} = 20 min	1,70 aAB ± 0,02	0,47 bC ± 0,01
	Inter. t _{in} = 30 min	1,38 aAB ± 0,02	1,12 aB ± 0,01
Carotenoides (µg/100 g)	Contínua	126,76 bD ± 0,83	166,11 aD ± 0,21
	Inter. t _{in} = 10 min	143,32 bC ± 0,42	180,01 aA ± 0,88
	Inter. t _{in} = 20 min	307,18 aA ± 0,49	266,13 bB ± 0,19
	Inter. t _{in} = 30 min	200,48 aB ± 0,89	206,98 aC ± 2,40

As médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.13, constatou-se uma concentração no percentual de ácido ascórbico das amostras de melão-passa, em relação às amostras in natura, produzidas através dos experimentos contínuos e intermitentes, devido à concentração da massa seca após a retirada da água por meio da secagem. De acordo com a Tabela 6, não houve diferença estatística entre os tratamentos de secagem na temperatura de 50 °C. No entanto, os experimentos com secagem intermitente a 70 °C obtiveram maiores teores de ácido ascórbico em relação à secagem contínua, indicando que esse tipo de secagem causou menor degradação deste composto nesta temperatura, uma vez que nestes casos foi requerido menor tempo efetivo de secagem e o produto ficou menos tempo

exposto a alta temperatura. Comparando os valores de ácido ascórbico obtidos nas duas temperaturas estudadas, percebe-se que ao elevar a temperatura de secagem, houve maior degradação deste composto em todos os tratamentos. Reduções do conteúdo de ácido ascórbico podem ser atribuídas devido à solubilidade em água, sensibilidade a altas temperaturas e algumas condições de oxidação (oxigênio, pH) (DAVEY et al. 2000; BRAGA et al., 2016).

Em relação ao teor de flavonoides e antocianinas, na Tabela 4.13, observa-se diferenças estatísticas entre as médias dos teores destes parâmetros nas amostras de melão-passa secas por diferentes métodos. As maiores concentrações foram observadas nas amostras secas de forma intermitente ($t_{in} = 10$ min e $t_{out} = 20$ min), com valores médios de 15,32 e 2,83 mg/100 g para flavonoides e antocianinas, respectivamente, na temperatura de 50 °C e 11,65 e 2,43 mg/100 g para flavonoides e antocianinas, respectivamente na temperatura de 70 °C. Em todos os experimentos, houve redução dos flavonoides e antocianinas com o aumento da temperatura de secagem. Essa diminuição se deve à termossensibilidade desses bioativos. Quando submetidos a altas temperaturas por um longo período, esses compostos podem sofrer degradação (CASTRO et al., 2017).

Verifica-se também que houve uma concentração do teor de flavonoides com relação a polpa de melão in natura, apresentando-se como uma boa característica ao produto seco, visto que este composto possui atividade antioxidante que atua na redução de radicais livres associados à redução do risco de doenças cardiovasculares e neurodegenerativas (ABOUL-ENEIN et al., 2013; AMADEU et al., 2020).

Entre os tratamentos de secagem, todas as amostras diferiram estatisticamente entre si, variando de 126,76 a 307,18 $\mu\text{g}/100$ g, com maior valor para a amostra de melão-passa seca de forma intermitente ($t_{in} = 20$ min $t_{out} = 40$ min) na temperatura de 50 °C, que apresentou valores superiores deste composto (307,18 $\mu\text{g}/100$ g). O uso do tratamento intermitente durante a etapa de secagem das amostras de melão foi capaz de reduzir a perda de carotenoides, pois essas amostras de melão-passa apresentaram maior teor de carotenoides quando comparadas às amostras secas de forma contínua. O menor teor de carotenoides obtidos para o processo contínuo pode ser atribuído ao fornecimento constante de calor durante todo o processo de secagem, uma vez que estes pigmentos naturais são compostos instáveis, sensíveis ao calor e susceptíveis à degradação ou processo de isomerização (SILVA et al., 2016c; CUNHA et al., 2020).

Medeiros et al. (2016) também mostraram valores de carotenoides decrescentes na secagem da manga ‘Tommy Atkins’ durante o processo de secagem em comparação com a fruta in natura. Essa

degradação foi provavelmente devido à instabilidade desses pigmentos na presença de oxigênio e alta temperatura.

Na Tabela 4.14 encontram-se os resultados obtidos para o teor de açúcares totais, redutores e não redutores das amostras de melão submetidas a pré-tratamento em solução osmótica e posterior secagem nas temperaturas de 50 e 70 °C.

Tabela 4.14 - Valores médios e desvio padrão do teor de açúcares totais, redutores e não redutores das amostras de melão submetidas a diferentes experimentos de secagem.

Parâmetros	Experimentos		
	50 °C	70 °C	
Açúcares Totais (% glicose)	Contínua	76,06 aB ± 2,33	61,37 bB ± 1,03
	Inter. t _{in} = 10 min	88,10 aA ± 2,15	75,59 bA ± 1,74
	Inter. t _{in} = 20 min	84,56 aA ± 2,25	72,51 bA ± 0,48
	Inter. t _{in} = 30 min	85,20 aA ± 2,36	71,55 bA ± 1,56
Açúcares Redutores (% glicose)	Contínua	52,20 aAB ± 1,57	33,24 bC ± 0,29
	Inter. t _{in} = 10 min	47,94 aB ± 2,30	44,17 aA ± 2,60
	Inter. t _{in} = 20 min	47,15 aAB ± 1,42	38,36 bB ± 0,23
	Inter. t _{in} = 30 min	48,07 aA ± 1,59	34,74 bB ± 1,09
Açúcares Não Redutores (% sacarose)	Contínua	23,86 bB ± 1,61	28,14 aC ± 0,74
	Inter. t _{in} = 10 min	41,97 aA ± 0,90	31,62 bBC ± 1,44
	Inter. t _{in} = 20 min	37,43 aA ± 1,03	34,31 aAB ± 0,62
	Inter. t _{in} = 30 min	37,66 aA ± 0,70	37,83 aA ± 0,71

As médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Conforme a Tabela 4.14, o experimento com secagem contínua apresentou teor de açúcares totais diferente estatisticamente dos demais, enquanto os experimentos com secagem intermitente apresentaram valores para este parâmetro estatisticamente iguais de acordo com o teste de Tukey a 5 % de probabilidade. Desta forma, percebe-se que os valores médios do teor de açúcares totais são estatisticamente superiores para os três tratamentos com secagem intermitente quando comparados ao tratamento contínuo. O maior percentual de açúcares totais foi observado no experimento que utilizou a combinação de secagem intermitente e menor temperatura (t_{in} = 10 min t_{out} = 20 min e 50 °C), o qual apresentou um ganho de açúcar durante o processo. É importante destacar que o melão in natura apresenta baixos teores de açúcares totais (6,07 % de glicose), conforma a Tabela 4.11. Percebe-se, através dos valores obtidos para este parâmetro, apresentados na Tabela 4.14, que em todas as condições

de secagem, os valores das amostras de melão-passa são maiores em relação ao melão in natura. Além das amostras terem ganhado açúcar no processo de desidratação osmótica houve, também, uma concentração desses valores após a remoção da água durante o processo de secagem. A maior concentração do teor de açúcares totais foi de 88,10%, correspondendo a um aumento de mais de 90% quando comparado ao produto in natura. Delgado et al. (2017) ao estudarem o efeito das condições de desidratação osmótica (temperatura, tempo e concentração de sacarose) sobre alguns parâmetros nutricionais da castanha portuguesa (*Castanea sativa Mill.*), verificaram que a sacarose foi o principal composto presente no produto desidratado devido a incorporação a partir da solução osmótica, correspondendo a um aumento de aproximadamente 50% em relação ao produto fresco, o que não ocorreu no presente trabalho em que a predominância foi de açúcares redutores.

O teor de açúcares redutores nas amostras de melão-passa variou entre 33,24 a 52,20% entre os tratamentos de secagem (contínuo e intermitentes), sendo os experimentos de secagem contínua e intermitente com $t_{in} = 10$ min os que apresentaram os maiores valores de açúcares redutores nas temperaturas de 50 e 70 °C, respectivamente. Percebe-se um aumento deste parâmetro em todos os tratamentos em relação ao melão in natura, o que pode ser justificado em razão da redução da água com o processo de secagem concentrando os açúcares, e também este fenômeno pode estar relacionado à atividade hidrolítica, ocasionada pelo aumento da temperatura durante a desidratação, provocando inversão de sacarose (açúcar não redutor em açúcar redutor) (DIAS et al., 2011; DELGADO et al., 2017; KROEHNKE et al., 2021).

Assim como observado nos açúcares redutores, a incorporação de sacarose no pré-tratamento osmótico seguido de secagem convectiva resultou no aumento do percentual de açúcares não redutores. Os valores deste parâmetro não se mostraram predominantemente dependentes no que se refere a temperatura de secagem, uma vez que apenas os experimentos de secagem contínua e intermitente com $t_{in} = 10$ min apresentaram diferença significativa entre as médias obtidas nas duas temperaturas de secagem. Os demais experimentos não apresentaram diferença significativa entre as temperaturas. Para as amostras submetidas a diferentes tratamentos de secagem na mesma temperatura, foram obtidos percentuais de açúcares não redutores maiores quando aplicada o método de secagem intermitente, uma vez que, com exceção do tratamento com secagem intermitente com $t_{in}=10$ min a 70 °C, todos os demais tratamentos intermitentes apresentaram diferença significativa em relação ao tratamento com secagem contínua, com valores superiores ao método contínuo.

Na Tabela 4.15 estão expostos os resultados referentes a análise de carotenoides e cor (L^* , $+a^*$ e $+b^*$) do melão-passa.

Tabela 4.15 - Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de cor (L^* , $+a^*$ e $+b^*$) das amostras de melão submetidas a diferentes experimentos de secagem.

Parâmetros	Experimentos		
		50 °C	70 °C
Luminosidade (L^*)	Contínua	27,98 bB ± 0,12	31,03 aA ± 0,20
	Inter. $t_{in} = 10$ min	25,11 bC ± 0,87	29,57 aAB ± 0,17
	Inter. $t_{in} = 20$ min	36,52 aA ± 0,85	27,60 bB ± 0,65
	Inter. $t_{in} = 30$ min	35,98 aA ± 0,96	27,71 bB ± 0,14
Intensidade de vermelho ($+a^*$)	Contínua	6,82 aA ± 0,34	6,56 aA ± 0,29
	Inter. $t_{in} = 10$ min	6,90 aA ± 0,26	6,45 aA ± 0,29
	Inter. $t_{in} = 20$ min	6,55 aA ± 0,20	6,38 aA ± 0,29
	Inter. $t_{in} = 30$ min	6,48 aA ± 0,62	6,32 aA ± 0,08
Intensidade de amarelo ($+b^*$)	Contínua	27,73 aC ± 0,17	20,63 bB ± 0,20
	Inter. $t_{in} = 10$ min	42,06 aA ± 0,60	28,50 bA ± 0,33
	Inter. $t_{in} = 20$ min	31,55 aB ± 0,23	27,83 bA ± 0,05
	Inter. $t_{in} = 30$ min	31,55 aB ± 1,25	28,43 bA ± 0,46

As médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A aceitabilidade dos alimentos é diretamente afetada pelo parâmetro de cor, uma vez que contribui não só para uma boa aparência, mas especialmente influencia a preferência do consumidor (CUNHA et al., 2020). Os resultados referentes à análise de cor do melão-passa são apresentados na Tabela 4.15.

Para o parâmetro L^* , verifica-se que todas as amostras pré-tratadas osmoticamente e submetidas à secagem (contínua e intermitente) em estufa nas temperaturas de 50 e 70 °C apresentaram valores para luminosidade (L^*) menores que aqueles apresentados por amostras in natura, indicando escurecimento. As amostras submetidas à condição de secagem intermitente ($t_{in} = 20$ min $t_{ou} = 40$ min) na temperatura de 50 °C e contínua na temperatura de 70 °C apresentaram os maiores valores de luminosidade, indicando serem mais claras que as demais.

Além das reações de escurecimento que ocorrem durante a secagem convectiva, esse efeito também pode ser atribuído a desidratação osmótica como pré-tratamento, provocando maior redução

na luminosidade. Barros (2020), verificou que o aumento da concentração de sacarose da solução osmótica provocou redução do valor L^* em fatias de Kiwi, ou seja, ocorre uma tendência ao escurecimento no produto. De acordo Phisut et al. (2013), a reação de Maillard é o principal responsável pelo escurecimento. Cunha et al. (2020), ao realizarem experimentos de secagem de melão Cantaloupe submetidos a pré-tratamento em soluções de etanol em diferentes concentrações, verificaram que, após o processo de secagem, houve diminuição da claridade de todas as amostras. Além disso, a amostra controle seca apresentou menor variação, indicando a influência direta do pré-tratamento neste parâmetro.

Em relação aos parâmetros a^* e b^* , observou-se um aumento destes parâmetros em relação ao melão in natura, demonstrando intensidade do parâmetro a^* para a cor vermelha e o b^* para a cor amarela. Comportamento similar para os parâmetros a^* e b^* foi constatado por Silva et al. (2016) ao realizarem experimentos de secagem de fatias de melão desidratadas osmoticamente, verificando que todos os melões secos tiveram perda de carotenoides e, portanto, apresentaram diferença de cor em relação à fruta in natura.

Para o parâmetro a^* , não houve diferença significativa entre as amostras secas de forma contínua e intermitente em ambas as temperaturas. Já para o parâmetro b^* , a cor das amostras secas de forma intermitente foi intensificada, com aumento significativo ($p < 0,05$) em relação à secagem contínua. O experimento intermitente com $t_{in} = 10$ min apresentou valores superiores com relação aos parâmetros a^* e b^* indicando maior escurecimento das amostras. Cunha et al. (2020) relataram mudança de cor para o melão seco durante a secagem convectiva, devido a vários fatores, incluindo a deterioração térmica (e/ou oxidativa) de carotenoides e escurecimento enzimático ou não enzimático.

Por fim, vale ressaltar que para as condições de secagem investigadas, de forma geral, os melhores resultados obtidos na caracterização físico-química estão relacionados aos experimentos de secagem intermitente, ou seja, o tipo de secagem influenciou significativamente nos parâmetros avaliados, o que implica dizer que a metodologia utilizada ocasionou menor degradação dos compostos, devido às condições de secagem mais suaves, promovidas pela aplicação intermitente de calor durante o processo. Apesar dos experimentos terem sido realizados em escala de laboratório, os resultados obtidos sugerem a possibilidade da aplicação em escala industrial.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

De acordo com análise dos resultados, pode-se concluir o seguinte:

- Entre os modelos empíricos testados, o de Page, bem como os modelos de Henderson e Pabis, Lewis e Silva et alii, se ajustaram bem aos dados experimentais, principalmente o de Page, que foi escolhido para descrever a cinética de secagem contínua e intermitente do melão pré-tratado osmoticamente;
- Considerando todos os processos de secagem, a maior economia de tempo de operação efetiva foi obtida para o experimento de secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min, a 50 °C, resultando em uma redução de 47,1% do tempo de operação efetiva de secagem em relação à secagem contínua;
- Verificou-se que não só a razão de intermitência é importante para a redução do tempo efetivo de secagem, mas também o período de têmpera, que afetou consideravelmente a cinética de secagem dos paralelepípedos de melão. Com o aumento da temperatura para 70 °C, os períodos de têmpera praticamente não influenciaram na cinética de secagem intermitente, mesmo assim, as cinéticas intermitentes proporcionaram uma redução significativa no tempo de operação efetiva em comparação com a secagem contínua;
- As secagens intermitentes proporcionaram maior taxa de secagem do material no início do processo quando comparado com a secagem contínua para a temperatura a 50 °C. Como esperado, quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior a taxa de secagem;
- Os modelos de difusão indicaram que a condição de contorno do terceiro tipo é a mais adequada para descrever a secagem dos paralelepípedos de melão pré-tratados osmoticamente;
- Verificou-se que o coeficiente de difusão aumenta com a aplicação da intermitência durante a secagem. Este efeito, de aumento da difusividade efetiva de massa, foi responsável por acelerar o processo de secagem e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia. Outro efeito da intermitência

em comparação com a secagem contínua, usando os modelos de difusão, consiste na diminuição do número de Biot.

- O modelo empírico proposto foi capaz de descrever, com boa precisão, a cinética de secagem intermitente incluindo o período de têmpera. Devido ao modelo utilizar três parâmetros, os resultados mostraram-se mais realistas ao problema físico estudado, uma vez que foi constatado que ocorre perda de umidade durante o período de têmpera, o qual o modelo foi capaz de simular;
- O modelo numérico tridimensional que considera os parâmetros de secagem variáveis e o encolhimento dos paralelepípedos de melão durante o processo de perda de umidade, descreveu bem a cinética de secagem contínua do melão pré-tratado osmoticamente;
- As expressões obtidas para difusividade efetiva de massa em função do teor de umidade local, possibilitaram descrever a cinética de secagem, melhorando sensivelmente os indicadores estatísticos através do uso de soluções analíticas;
- Apesar da proximidade dos resultados entre os modelos (analíticos e numérico), o modelo numérico foi considerado mais adequado para descrever este tipo de processo físico, principalmente devido ao modelo considerar os parâmetros do processo como variáveis (encolhimento e difusividade variável), permitindo uma análise mais próxima da situação física real;
- O modelo de difusão foi capaz de simular a distribuição de umidade no interior dos paralelepípedos de melão. Constatou-se que as extremidades do sólido secam mais rapidamente que o centro;
- Verifica-se que o tipo de secagem influenciou diretamente nas propriedades físico-químicas, bioativas e de cor do produto final. De modo geral, as secagens intermitentes obtiveram uma maior preservação dos compostos em comparação com a secagem contínua;
- A secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min proporcionou ao produto obtido valores superiores de

proteínas, flavonoides, antocianinas, açúcares totais, +a* e +b*.

5.1 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar uma análise sensorial do produto obtido com o objetivo de revelar o perfil sensorial do mesmo;
- Avaliar outras variáveis do processo de desidratação osmótica, a exemplo da utilização de diferentes agentes osmóticos, diferentes temperaturas e agitação mecânica;
- Realizar um estudo de secagem contínua e intermitente de outros produtos em diferentes geometrias para verificar se há maior redução do tempo de secagem e melhora nas características do produto final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABERA, M. K.; AREGAWI, W. A.; HO, Q. T.; ROGGE, S.; DELELE, M. A.; AMBAW, A.; VERBOVEN, P.; NICOLAI, B. M. **Multiscale Modeling of Food Processes**. Food Science, 2016.

ABF - **Anuário Brasileiro da Fruticultura 2016**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2016. 92p.

ABF - **Anuário brasileiro da fruticultura 2018**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2018. 88 p.

ABOUL-ENEIN, H.Y.; BERZYNSKI, D. X.; KRUK, I. Phenolic compounds: the role of redox regulation in neurodegenerative disease and cancer. **Mini Reviews in Medicinal Chemistry**, v.13, n.3, p.385-398, 2013.

ABRAHAM, T. F.; MARCEL, E.; ALEXIS, K.; BELKACEM, Z. Experimental drying kinetics of mango slices (*Mangifera indica* L.) Amelie under intermitente conditions. **International Journal of Thermal Technologies**, 2016.

AGEITEC - **Agência Embrapa de Informação tecnológica**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000fid5sgie02wyiv80z4s473tokdiw5.html>. Acesso em: jan. 2020.

AGHILINATEGH, N.; RAFIEE, S.; GHOLIKHANI, A.; HOSSEINPUR, S.; OMID, M.; MOHTASEBI, S. S.; MALEKI, N. A comparative study of dried apple using HA, intermittent and continuous microwave: Evaluation of kinetic parameters and physicochemical quality attributes. **Food Science & Nutrition**, 3, (6), 519-526, 2015.

AIRES, J. E. F.; SILVA, W. P.; AIRES, K. L.C. A. F.; SILVA JÚNIOR, A. F.; SILVA, C. M. D. P. Convective drying of osmo-dehydrated apple slices: kinetics and spatial behavior of effective mass diffusivity and moisture content. **Heat Mass Transfer**, 54, p. 1121-1134, 2018.

AIRES, K. L. C. A. F.; SILVA, W. P.; AIRES, J. E. F.; SILVA JÚNIOR, A. F.; SILVA, C. M. D. P. Convective drying of osmotically dehydrated apples described by three-dimensional numerical solution of the diffusion equation with analysis of water effective diffusivity spatial distribution. **Drying Technology**, 37, 16, p.2034-2046, 2019.

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.

ALMEIDA, J.A.R.; MUSSI, L. P.; OLIVEIRA, D. B.; PEREIRA, N. R. Effect of temperature and sucrose concentration on the retention of polyphenol compounds and antioxidant activity of osmotically dehydrated bananas. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.38, p.1-9, 2014.

ALFARO, L.; SIRAMARD, S.; CHOULJENKO, A.; SATHIVEL, S. Effects of liquid nitrogen pretreatment on the osmotic dehydration and quality of cryogenically frozen blueberries (*Vaccinium angustifolium* Ait.). **Food Bioscience**, 22, p.165-169, 2018.

AMADEU, L. T. S.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; REIS, C. G.; LIMA, T. L. B.; COSTA, P. S. Resíduos de frutas na elaboração de geleia de melão Pele de Sapo. **Revista Verde**, 15:2, p. 153-159, 2020.

AMADEU, L. T. S.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; FERREIRA, J. P. L.; SILVA, W. P.; GOMES, J. P. G.; PAIVA, Y. F.; COSTA, C. C. Controlled germination of faba beans: Drying, thermodynamic properties and physical-chemical composition. **Processes**, v. 10, p. 1-16, 2022.

ANDRADE, I. S.; MELO, C. A. F.; NUNES, G. H. S.; HOLANDA, I. S. A.; GRANGEIRO, L. C.; CORRÊA, R. X. Morphoagronomic genetic diversity of Brazilian melon accessions based on fruit traits. **Scientia Horticulturae**, v. 243, p. 514-523, 2019.

AOAC. Association Official Analytical Chemistry. Oficial methods of analysis. 43. ed. Washington, 1997. 1018 p.

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.

BAINI, R., LANGRISH, T. A. G. Choosing an appropriate drying model for intermitente and continuous drying of bananas. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 330-343, 2007.

BARROS, S. L.; SILVA, W. P.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; ARAÚJO, T. J.; SANTOS, N. C.; GOMES, J. Pa. Efeito da adição de diferentes tipos de açúcar sobre a qualidade físico-química de geleias elaboradas com abacaxi e canela. **Principia**, v. 1, p. 150-157, 2019.

BARROS, S. L. **Modelagem e simulação do processo de secagem convectiva de fatias de kiwi pré-tratadas osmoticamente utilizando geometria de parede infinita**. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2020.

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

BASTOS, J. S.; MARTÍNEZ, E. A.; SOUZA, S. M. A. Características físico-químicas da polpa de umbu (*Spondias tuberosa* Arruda Câmara) comercial: efeito da concentração. **Journal of Bioenergy and Food Science**, v.3, n.1, p. 11-16, 2016.

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.
- BENASSI, M.T.; ANTUNES, A. J. A comparasion of metaphosphoric and oxalic acids as extractant solutions for the determination of vitamin C in selected vegetables. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v. 31, n. 4, p. 507 - 513, 1998.
- BENNAMOUN, L. Reviewing the experience of solar drying in Algeria with presentation of the different design aspects of solar dryers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, n.7, p.3371-3379, 2011.
- 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., 2001, 912 p.
- BORSINI, A. A.; ALBANI, O. A.; RAMALLO, L. A. Aplicacion de diferentes tecnicas de secado en frutas de *Diospyros kaki* var. 'Fuyu'. Revista **Ciência e Tecnologia** n. 26 supl. 1, 2016.
- BRAGA, T. R. **Efeito de pré-tratamentos: desidratação osmótica assistida com ultrassom e luz ultravioleta pulsada na secagem e qualidade da manga**. 2016. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- BRASIL - Ministério da Saúde. Resolução CNNPA nº 12, de 1978. Normas técnicas especiais relativas a alimentos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 24 de julho de 1978. Disponível em: <https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/saudelegis/cnpa/1978/res0012_30_03_1978.html>. Acesso em: 15 de dezembro de 2021.
- BRASIL - Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Secretaria de Comércio Exterior. AliceWeb: **Sistema de Análise das informações de Comércio Exterior**. 2016, Disponível em: <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br> Acesso em: 15 jan. 2020.
- BRASIL. Leis, decretos, etc. Instrução Normativa Nº. 1, de 7 de janeiro de 2000. **Regulamento técnico geral para fixação dos padrões de identidade e qualidade para polpa de fruta**. Ministério de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Diário Oficial da União Nº. 6, Brasília, 10 de jan de 2000, Seção I., p. 54-58.
- BROCHIER, B.; INÁCIO, J. M.; NOREÑA, C. P. Z. Study of osmotic dehydration of kiwi fruit using sucrose solution. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 22, 2019.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: The AVI Publishing Company, 450 p.1992.
- BURGER, Y. et al. Genetic Diversity of *Cucumis melo*. **Horticultural Reviews**, v. 36, p. 165-198, 2010.

- CACCAVALE, P., DE BONIS, M.V., RUOCCO, G. Conjugate heat and mass transfer in drying: a modeling review. **J. Food Eng.** 176, p. 28-35, 2016.
- CAMELO, R. S. S.; PAES, J. L.; BRAZ, M. R. S.; BRUGGIANESI, G.; GUIMARÃES, C. L. Kinetics drying of silver banana (*Musa spp.*) in hybrid drye. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50 n. 3, 2019.
- CARDELLO, H. M. A.; CARDELLO, L. Teor de vitamina C, atividade de ascorbato oxidase e perfil sensorial de manga (*Mangifera indica* L.) var. haden, durante o amadurecimento. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.18, n.2, p. 211-217, 1998.
- 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.
- CASTRO-GIRÁLDEZ, M.; FITO, P. J.; FITO, P. Influence of process conditions on mechanical properties of osmotically dehydrated mango. **Journal of Food Engineering**, v.74, p.240-246, 2011.
- CASTRO, D. S.; AIRES, J. E. F.; AIRES, K. L. C. A. F.; SILVA JÚNIOR, A. F.; SILVA, W. P.; GOMES, J. P. Physical and chemical changes in guava raisin (*Psidium guajava* L.) produced by osmotic dehydration and drying convective. **Australian Journal of crop Science**, v.10, n.10, p.1449-1454, 2016.
- CASTRO, D. S.; OLIVEIRA, T. K. B.; LEMOS, D. M.; ROCHA, A. P. T.; ALMEIDA, R. D. Efeito da temperatura sobre a composição físico-química e compostos bioativos de farinha de taro obtida em leite de jorro. **Brazilian Journal Food and Technology**, v. 20, 2017.
- CASTRO, D. S.; SILVA, W. P.; GOMES J. P.; AIRES, J. E. F.; AIRES, K. L. C. A. F.; JUNIOR, A. F. S. Desenvolvimento e avaliação sensorial de goiaba-passa desidratada osmoticamente. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21, Campinas, 2018a.
- CASTRO, A. M.; MAYORGA, E. Y.; MORENO, F.L. Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 167, p.223-152, 2018b.
- CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos.** Planatina: Embrapa Cerrados, p. 51, 2010.
- 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., 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.
- 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.
- CORRÊA, J. L. G.; RASIA, M. C.; MULET, A.; CÁRCEL, J. A. Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*). **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 41, p. 284-291, 2017.
- COSTA, M. S.; ALMEIDA, F. A. C.; COELHO, B. E. S.; COSTA, J. D. S.; FIGUEIREDO NETO, A. Chemical composition of 'Ataulfo' mango pulp at different maturation stages. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.5, n.1, p.11-16, 2020.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**, Clarendon Press, Oxford, UK, 1992, 414 p.
- CUNHA, R. M. C.; BRANDÃO, S. C. R.; MEDEIROS, R. A. B.; JÚNIOR, E. V. S.; SILVA, J. H. F.; AZOUBEL, P. M. Effect of ethanol pretreatment on melon convective drying. **Food Chemistry**, v. 333, n. 127502, 2020.
- DALASTRA, G. M.; ECHER, M. M.; KLOSOWSKI, E. S.; HACHMANN, T. L. Produção e qualidade de três tipos de melão, variando o número de frutos por planta. **Revista Ceres**, v.63, n.4, p.427-450, 2016.
- DAVEY, M. W.; MONTAGU, M. V.; INZE, D.; SANMARTIN, M.; KANELIS, A.; SMIRNOFF, N.; BENZIE, I. F. F.; STRAIN, J. J.; FAVELL, D.; FLETCHER, J. Plant L-ascorbic acid: chemistry, function, metabolism, bioavailability and effects of processing. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 80, p. 825-860, 2000.
- 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.
- DEFRAEYE, T. Advanced computational modelling for drying processes - a review. **Applied Energy**, 131, p. 323-344, 2014.
- DEGHANNYA, J.; GORBANI, R.; GHANBARZADEH, B. Shrinkage of mirabelle plum during hot air drying as influenced by ultrasound-assisted osmotic dehydration. **International Journal of Food Properties**. 19, p. 1093-1103, 2016.

DEHGHANNYAA, J.; HOSSEINLARA.; S. H.; HESHMATI, M. K. Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**. v. 45, p. 132-151, 2018.

DEHGHANNYA, J.; KADKHODAEI, S.; HESHMATI, M. K.; GHANBARZADEH, B. Ultrasound-assisted intensification of a hybrid intermittent microwave-hot air drying process of potato: Quality aspects and energy consumption. **Ultrasonics**. v.96, p.104-122, 2019.

DELGADO, T.; PEREIRA, J. A.; RAMALHOSA, E.; CASAL, S. Osmotic dehydration effects on major and minor components of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) slices. **Journal of Food Science and Technology**, v.54, n.9, p.2694–2703, 2017.

DELWING, A. B., FRANKE, L. B., BARROS, I. B. I. Qualidade de sementes de acessos de melão crioulo (*Cucumis melo* L.). **Revista Brasileira de Sementes**, v.29, p. 187-194, 2007.

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.

DIAS, C. S.; BORGES, S. V.; QUEIROZ, F.; PEREIRA, P. A. P. Influência da temperatura sobre as alterações físicas, físico-químicas e químicas de geleia da casca de banana (*Musa* spp.) Cv. Prata durante o armazenamento. **Revista Instituto Adolfo Lutz**, v. 70, p. 28 – 34, 2011.

DIAS, J. D. M.; ABREU, V. K. G.; PEREIRA, A. L. F.; LEMOS, T. O.; SANTOS, L. H.; SILVA, V. K. L.; MOTA, A. S. B. Desenvolvimento e avaliação das características físico-químicas e da aceitação sensorial de doce em massa de cupuaçu. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 36, n. 1, p. 1-10, 2019.

ELHAGE, H.; HEREZ, A.; RAMADAN, M.; BAZZI, H.; KHALED, M. An investigation on solar drying: A review with economic and environmental assessment, **Energy**, 2018.

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.

EGEA, M. B.; LOBATO, L. P. A desidratação osmótica como pré-tratamento para frutas e hortaliças. **Rev Inst Adolfo Lutz**, v. 73, n. 4, p.316-24, 2014.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema de Produção de Melão**. Versão eletrônica. 2012. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>>. Acesso: 04 de novembro de 2020.

ESTERAS, C., FORMISANO, G., ROIG, C., DÍAZ, A., BLANCA, J., GARCIA-MAS, J., GÓMEZ-GUILLAMÓN, M.L., LOPÉZ-SESÉ, A.I., LÁZARO, A., MONFORTE, A.J., PICÓ, B. SNP genotyping in melons: genetic variation, population structure, and linkage disequilibrium. **Theoretical and Applied Genetics**, 126, 1285–1303, 2013.

- 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.
- FEITOSA, R. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; LIMA, F. C. S.; OLIVEIRA, E. N. A. Drying and characterization of myrtle pulp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 12, p.858-864, 2017.
- FERNANDES, F.A.N., RODRIGUES, S., LAW, C.L., MUJUMDAR, A.S. Drying of exotic tropical fruits: a comprehensive review. **Food Bioprocess Technology**, 4, p.163-185, 2011.
- FERREIRA, J. P. L.; CASTRO, D. S.; MOREIRA, I. S.; SILVA, W. P.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Convective drying kinetics of osmotically pretreated papaya cubes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 200-208, 2020.
- FIGUEIREDO, R. M. F. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária-UFPB, 2004, 229 p.
- FRANCIS, F. J. Analysis of anthocyanins. In: MARKAKIS, P. **Anthocyanins as food colors**. New York: Academic Press, 1982. p. 181-207.
- 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.
- FRANCO, C. M. R., LIMA, A. G. B., FARIAS, V. S. O. SILVA, W. P. Modeling and experimentation of continuous and intermittent drying of rough rice grains. **Heat Mass Transfer**, 56, p. 1003-1014, 2020.
- 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.
- GIRALDO, G., TALENS, P., FITO, P., CHIRALT, A. Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. **Journal of Food Engineering**, 58, p. 33-43, 2003.
- GOLMOHAMMADI, M.; FOROUGH-DAHR, M.; RAJABI-HAMANEH, M.I; SHOJAMORADI, A.; HASHEMI, S. Study on Drying Kinetics of Paddy Rice: Intermittent Drying. **Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering**, v. 35, n. 3, p. 105-117, 2016.

GOMES-KLEIN, V. L.; LIMA, L. F. P.; COSTA, G. A. G. d. *Cucurbitaceae* in Lista de Espécies da Flora do Brasil. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. 2015. Disponível em: <<http://www.floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/PrincipalUC/PrincipalUC.do>>. acesso em 24 de jan. de 2020.

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.

HAMMER, K., GLADIS, T. Notes on infraspecific nomenclature and classifications of cultivated plants in Compositae, Cruciferae, Cucurbitaceae, Gramineae (with a remark on *Triticum dicoccon* Schrank) and Leguminosae. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 61, 1455–1467, 2014.

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.

IAL - Instituto Adolfo Lutz. Métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 4.ed. **Normas analíticas do instituto Adolfo Lutz**. São Paulo. v.1, 2008. 1020p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes**. 2018. Disponível em: Acesso em 18 de set. 2020.

ISMAIL, H.I., KIM, W.C., MARIOD, A.A., ISMAIL, M. Phenolic content and antioxidant activity of cantaloupe (*Cucumis melo*) methanolic extract. **FoodChem**. 119, p. 643-647, 2010.

JESUS, G. F.; BASTOS, J. S.; OLIVEIRA, N. A.; ANJOS, M. B.; SANTOS, J. C. R.; SOUZA, S. M. A.; MARTINEZ, E. A. Estudos preliminares na formulação de estruturados de mix de polpa de frutas. **Revista CSBEA**, v.2, n. 1, 2016.

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.

KALETA, A., GORNICKI, K., WINICZENKO, R., CHOJNACKA, A. Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer. **Energy Conversion and Management**, 67, p.179-185, 2013.

KARAM, M. C.; PETIT, J.; ZIMMER, D.; DJANTOU, E. B.; SCHER, J. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. **Journal of Food Engineering**, 188, P. 32-49, 2016.

KEEY, R. B. Moisture: Solid relationships. **Drying principle and practices**. Oxford, p.19-49, 1972.

KHAN, M. I. H.; KUMAR, C., JOARDDER M. U. H.; KARIM M. A. Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials. **Drying Technology**, v. 35, n. 3, p. 335-346, 2016.

- KIHARASON, J. W., & ISUTSA, D. K. Shelf-Life of Pumpkin Fruit Slices, Flour and Blended Products. **International Journal of Food Science and Biotechnology**, 4, 14, 2019.
- KOHN, R. A. G.; MAUCH, C. R.; MORSELLI, T. B. G. A.; LLI, T. B. G. A.; ROMBALDI, C. V.; BARROS, W. S.; SORATO, V. Physical and chemical characteristics of melon in organic farming. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 7, p. 656-662, 2015.
- 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.
- KROEHNKE, J.; SZADZIŃSKA, J.; RADZIEJEWSKA-KUBZDELA, E.; BIEGAŃSKAMARECIK, R.; MUSIELAK, G.; MIERZWA, D. Osmotic dehydration and convective drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) - The influence of ultrasound on process kinetics and product quality. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 71, p. 105377, 2021.
- KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Effect of drying method on physical properties of dehydrated products. In: **Drying 98 - 11th International Drying Symposium. Proceedings**. Vol. A, p.809-816, 1998.
- KUDRA, D. Energy aspects in drying. *Drying Technology*, **Taylor & Francis**, 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.
- KUMAR, C., GRAEME, J., MILLAR, G.J., KARIM, M.A. Effective diffusivity and evaporative cooling in convective drying of food material. **Drying Technology**, 33:2, p. 227-237, 2015.
- LABUZA, T.P., SIMON, I.B. Surface Tension Effects During Dehydration. *Air Drying of Apple Slices*. **Food Technology**, v. 24, p.712-715, 1970.
- LANDIM, A. P. M.; BARBOSA, M. I. M. J.; JÚNIOR, J. L. B. Influence of osmotic dehydration on bioactive compounds, antioxidant capacity, color and texture of fruits and vegetables: a review. **Ciência Rural**, v.46, n.10, p.1714-1722, 2016.
- LICHTENTHALER, H.K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods Enzymology**, v. 148, p. 350-382, 1987.
- 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, T. L. S.; CAVALCANTE, C. L.; SOUSA, D. G.; SILVA, P. H. A.; ANDRADE SOBRINHO, L. G. Avaliação da composição físico-química de polpas de frutas comercializadas em cinco cidades do Alto Sertão paraibano. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 2, p. 49 - 55, 2015.

LIMA, L. S. L.; SILVA, W. P.; PEREIRA, J. C. A.; GOMES, J. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; JÚNIOR, A. F. S. Description of continuous and intermittent drying of sapodilla with elimination of tempering period: Saving in drying time. **Sylwan**, 164, p. 444-459, 2020.

LIMA, A. R. N., SILVA JUNIOR, A. F., PEREIRA, M. T. L.; VIERA, V. B.; OLIVEIRA, T. M. Q.; SILVA, W. P. Evaluation of two different diffusive models to describe the drying of passion fruit peels with and without blanching. **Heat Mass Transfer**, 58, p. 669-682, 2022a.

LIMA, L. S. L.; SILVA, W. P.; PEREIRA, J. C. A.; SILVA, C. M. D. P. S. Study of Continuous and Intermittent Drying of Pear Through Mathematical and Diffusion Models. **Journal of Agricultural Studies**, v.10, n. 1, 2022.

LUIKOV, A. V.; MIKHAYLOV, Y. A. **Theory of energy and mass transfer**, Oxford: Pergamon press, p. 392, 1965.

LUIKOV, A. V. **Analytical heat diffusion theory**. Academic Press, Inc. Ltd, London. Crank, J., 1992. The Mathematics of Diffusion. Clarendon Press, Oxford, UK, 1968.

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

MARQUEZ, C.A., MICHELIS, A. Comparison of drying kinetics for small fruits with and without particle shrinkage considerations. **Food Bioprocess Technology**, 4, p.1212-1218, 2011.

MARTINS M.C.P.; CUNHA T.L.; SILVA M.R.; Efeito das condições da desidratação osmótica na qualidade de passas de caju-docerrado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 3, p. 124-129, 2008.

MEDEIROS, R. A. B; BARROS, Z. M. P.; CARVALHO, C. B. O.; FRAGA NETA, E. G.; MACIEL, M. I. S.; AZOUBEL, P. M. Influence of dual-stage sugar substitution pretreatment on drying kinetics and quality parameters of mango. **Food Science and Technology**, 67, p. 167-173, 2016.

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.

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

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.

MIRZAYI, B.; HEYDARI, A.; JABBARI, A. The effects of Sucrose/NaCl/Time interactions on the osmotic dehydration of banana slices. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 21, 2018.

MCCREIGHT, J. D., NERSON, H., GRUMET, R. Melon, Cucumis melo L. **In: KALLOS, G.; BERGH, B. O. (Ed.). Genetic improvement of vegetable crops.** New York: Pergamon, 1993.

MORAIS, E. C.; PATIAS, S. G. O.; FERREIRA, N. S. S.; PICANÇO, N. F. M.; RODRIGUES, E. C.; NASCIMENTO, E.; FARIAS, R. A. P. G. Compostos bioativos e características físico-químicas de polpa de araticum in natura e pasteurizada. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, p. 1-9, 2017.

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.

MUDIYANSELAGE, C. M. R., KARUNASENA, H. C. P., GU, Y. T., GUAN, L., SENADEERA, W. Novel trends in numerical modelling of plant food tissues and their morphological changes during drying e a review. **Journal of Food Engineering**. 194, p. 24-39, 2017.

MUNSON-MCGEE, S.H. Moisture profiles during intermittent soaking of an oblate spheroid. **Journal of Food Engineering**, v. 125, n. 1, p. 77-83, 2014.

NASCIMENTO, E. M.; MULET, A.; ASCHERI, J. L. R.; DE CARVALHO, C. W. P.; CÁRCEL, J. A. Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel. **Journal of Food Engineering**, v. 170, p. 108-118, 2016.

NIETO A.B.; VICENTE, S.; HODARA, K.; CASTRO, M. A.; ALZAMORA S. M. Osmotic dehydration of apple: Influence of sugar and water activity on tissue structure, rheological properties and water mobility. **Journal of Food Engineering**, v.119, p.104-114, 2013.

NUNES, G.H.S., SANTOS JÚNIOR, H., GRANGEIRO, L.C., BEZERRA NETO, F., DIAS, C.T.S., DANTAS, M.S.M. Phenotypic stability of hybrids of Galia melon in Rio Grande do Norte state, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 83, 1421-1434, 2011.

OLIVEIRA, K. J. A. **Compostos bioativos e capacidade antioxidante em melões comercializados na Paraíba.** 2013. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Alimentos) - Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, 2013.

OLIVEIRA, S. M., BRANDÃO, T. R. S., & SILVA, C. L. M. Influence of drying processes and pretreatments on nutritional and bioactive characteristics of dried vegetables: A review. **Food Engineering Reviews**, 8, p. 134-163, 2016a.

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T. A. S.; CAMPOS, R. C. Qualidade fisiológica de sementes de milho submetidas a diferentes temperaturas na secagem artificial. **Global Science and Technology**, v. 9, n. 2, p. 25-34, 2016b.

OLIVEIRA, F. I. C.; NUNES, A. C.; SILVA, F. D.; SILVA, G. T. M. A.; ARAGÃO, F. A. S. **A cultura do melão**. In: FIGUEIRÊDO, M. C. B.; GONDIM, R. S.; ARAGÃO, F. A. S. Produção de melão e mudanças climáticas: sistemas conservacionistas de cultivo para redução das pegadas de carbono e hídrica. Brasília, DF: Embrapa, Cap.1, p. 17-31, 2017.

OLIVEIRA, T. M. Q.; SILVA JÚNIOR, A. F.; FARIAS, V. S. O.; MEDEIROS, R. A.; LIMA, A. R. N. Description of drying of jackfruit seed through diffusive models. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 1, p. 1-10, 2022.

OSORIO, C.; FRANCO, M. S.; CASTAÑO, M. P.; GONZÁLEZ-MIRET, M. L.; HEREDIA, F. J.; MORALES, A. L. Colour and flavour changes during osmotic dehydration of fruits. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v.8, p.353-359, 2007.

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 2019.

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

PEREIRA, J. C. A., SILVA, W. P., GOMES, J. P., QUEIROZ, A. J. M., FIGUEIRÊDO, R. M. F., MELO, B. A. SANTIAGO, A. M., LIMA, A. G. B.; MACEDO, A. D. B. Continuous and intermittent drying of rough rice: Effects on process effective time and effective mass diffusivity. **Agriculture**, v. 10, n. 282, 2020.

PEREIRA, J. C. A.; SILVA, W. P.; SILVA, R. C.; SILVA, C. D. P. S.; GOMES, J. P. Use of empirical and diffusion models in the description of the process of water absorption by rice. **Engineering Computations**, 2021.

PHISUT, N.; RATTANAWEDDEE, M.; AEKKASAK, K. Effect of osmotic dehydration process on the physical, chemical and sensory properties of osmo-dried cantaloupe. **International Food Research Journal**, v.20, p. 189 -196, 2013.

PINHEIRO, R. M. M. **Algoritmos de otimização e modelos analíticos para a descrição da desidratação de melão cortado em forma de cubo**. (Tese de doutorado). Centro de ciências e tecnologias, Universidade federal de Campina Grande, p.196, 2017.

PITRAT, M. Phenotypic diversity in wild and cultivated melons (*Cucumis melo*). **Plant Biotechnol. Tokyo**, 30, p. 273-278, 2013.

PROSAPIO, V.; NORTON I. Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze drying performance. **Food Science and Technology**, v. 80, p.401-408, 2017.

PUTRANTO, A., CHEN, X. D., DEVAHASTIN, S., XIAO, Z., & WEBLEY, P. A. Application of the reaction engineering approach (REA) for modeling intermittent drying under time-varying humidity and temperature. **Chemical Engineering Science**, v. 66, n. 10, p. 2149-2156, 2011.

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

RASTOGI, N. K., & RAGHAVARAO, K. S. M. S. Water and solute diffusion coefficients of carrot as a function of temperature and concentration during osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, 34, p. 429-440, 1997.

RASTOGI, N.K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S.; NIRANJAN, K.; KNORR, D. Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. **Trends in Food Science and Technology**, v.13, p.48-59, 2002.

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

REIS, C. G.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; AMADEU, L. T. S.; LIMA, T. L. B.; COSTA, P. S. Geleias de melão com casca e enriquecida com sementes de mandacaru. *Revista Verde*, 15:4, P. 414-421, 2020.

RIBEIRO, A. S. C., OLIVEIRA, E. A., MALDONADO, R. R. Optimization of osmotic dehydration of pear followed by conventional drying and their sensory quality. **LWT - Food Science and Technology**, 72, p. 407-415, 2016.

ROBBERS, M.; SINGH, R. P.; CUNHA, L. M. Osmotic convective dehydrofreezing process for drying kiwifruit. **Journal of Food Science**, 62(5), 1039-1047, 1997.

ROCHA, L. J. F. G. Estudo da secagem do kiwi com pré-tratamento osmótico e seu efeito no teor de macro e micronutrientes do fruto. 2017. p.105. Tese (Doutorado em Engenharia e ciências dos alimentos) - Universidade Estadual Paulista.

RODRIGUES, A.F.; SILVA, W.P.; GOMES, J.P.; SILVA, C.M.D.P.S.; RAMOS, I.C.C. Estudo da secagem de bananas através do modelo de difusão usando soluções analíticas. COVIMBRA. **In: Agronomy Congress**, 2015.

SAGAR, V.; KUMAR, P. S. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal of Food Science and Technology**, 47, p.15-26, 2010.

SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J.; YAHAGI, L. Y., COSTA, T. B., GIUNCO, A. J. Mango dehydration: influence of osmotic pre-treatment and addition of calcium chloride. **Revista Brasileira de Fruticultura**, 40 (4), 2018.

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.

SANTOS, m. c. **Análises citogenéticas em variedades comerciais de meloeiros (*Cucumis melo* L.)**. 60 p. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Santa Cruz. Ilhéus-Bahia, 2016.

SANTOS, N. C.; BARROS, S. L.; MONTEIRO, S. S.; SILVA, S. N.; RIBEIRO, V. H. A.; SILVA, V. M. A.; GOMES, J. P.; SANTIAGO, A. M.; LUIZ, M. R.; VIEIRA, D.M.; ARAUJO, R. D.; VILAR, S. B. O.; BARROS, E. R. Kinetics of drying and physical-chemical quality of peach cv. Hubimel. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 16, p. 223-232, 2019.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Tratamento de dados experimentais**. João Pessoa: UFPB/Editora Universitária, 2ª Edição, 197p. 1998.

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**, 28, 2, p. 325-333, 2008.

SILVA, W. P. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional, curso 1**, (2009). Apresentações em Powerpoint, online, disponível no endereço eletrônico: <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/TCMFC.htm>, acessado em: março/2022.

SILVA, W. P.; PRECKER, W. J.; SILVA, C. M. D. P. da S. e; SILVA, D. D. P. S.; Determination of the effective via minimization of the objective function by scanning: Application to drying of cowpea. **Journal of Food Engineering**, v. 95, n. 2, 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, acessado em: setembro/2021.

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>, acessado em setembro/2021.

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>, acessado em setembro/2021.

SILVA, C. K. F. **Estimação de parâmetros de secagem de alimentos – Formulação de Luikov e uso da transformada integral generalizada**. 2010. 125p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 2010a.

SILVA, C. M. D. P. S. Difusão de massa em corpos cilíndricos: modelagem, soluções analíticas e numéricas e aplicação na secagem de bananas. 2010b. 129 p. Dissertação 120 de Mestrado em Engenharia Agrícola. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.

SILVA, W. P. **Contour Plots Software**, (2010c). Disponível em: <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Contour.zip>. Acessado em: junho/2022.

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, 2012a.

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. 1, p. 164-174, 2012b.

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). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

SILVA, W. P. S.; AMARAL, D. S.; DUARTE, M. E. M.; MATA, M. E. R. M. C.; SILVA C. M. D. P. S.; PINHEIRO, R. M. M.; PESSOA, T. Description of the osmotic dehydration and convective drying of coconut (*Cocos nucifera* L.) pieces: A three-dimensional approach. **Journal of Food Engineering**, v.115, p. 121-131, 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.; SILVA, C. M. D. P. S.; LINS, M. A. A.; COSTA, W. S. Optimal removal of experimental points to determine apparent thermal diffusivity of canned products. **International Journal of Food Engineering**, v. 10, p. 223-231, 2014a.

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, n. 1, p. 67-74, 2014b.

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, 2015a.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; RODRIGUES, A. F.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. One-dimensional numerical solution of the diffusion equation to describe wood drying: comparison with two- and three-dimensional solutions. **Journal Wood Science.**, v. 61, p. 364-371, 2015b.

SILVA W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA JÚNIOR, A. F.; QUEIROZ, A. J. M. A numerical approach to determine some properties of cylindrical pieces of bananas during drying. *Int. J. Food. Eng.* 11, (3), p. 335-347, 2015.

SILVA, W. P., SILVA, C. M. D. P. S. **LS Optimizer**, Version 6.2 (2019), online, disponível em: <http://www.labfit.net/LS.htm>. Acessado em: junho/ 2022.

SILVA, V.; COSTA J. J.; FIGUEIREDO, A. R; NUNES, J.; NUNES, C.; Ribeiro, T. I. B.; PEREIRA, B. Study of three-stage intermittent drying of pears considering shrinkage and variable diffusion coefficient. **Journal of Food Engineering**, v.180, p. 77-86, 2016a.

SILVA, W. P.; RODRIGUES, A. F.; SILVA, C. M. 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**, 2016b.

SILVA, G. D.; BARROS, Z. M. P.; MEDEIROS, R. A. B.; CARVALHO, C. B. O.; BRANDÃO, S. C. R.; AZOUBEL, P. M. Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. *Food Science and Technology*, v. 74, p. 114–119, 2016c.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal Agricultural Research**, v. 11, p. 3733-3740, 2016.

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, 2017.

SILVA, W. P.; GALVÃO, I.B.; SILVA, C.M.D.P.S.; AIRES, J.E.F.; FIGUÊIREDO, R.M.F. Empirical model for describing continuous and intermittent drying kinetics of apple pieces. **Heat Mass Transf.** v. 56, p. 1263-1274, 2019.

SILVA, R. C.; SILVA, W. P; GOMES, J. P.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; LIMA, A. G. B.; ROCHA, A. P. T.; SILVA, L. D.; FERREIRA, J. P. L.; SANTOS, D. C.; ANDRADE, R. O. A New Empirical Model for Predicting Intermittent and Continuous Drying of “Neve” Melon (*Cucumis melo* sp.) Seeds. **Agriculture**, 12, 328, 2022.

SILVA JUNIOR, A. F.; SILVA, W. P.; AIRES, J. E. F.; AIRES, K. L. C. A. F. Numerical approach to describe complementary drying of banana slices osmotically dehydrated. **Heat Mass Transf**, 54, p. 267–276, 2017.

SILVEIRA, M. L. R.; SANTOS, C. O.; PENNA, O. G.; SAUTTER, C. K.; ROSA, C. S.; BERTAGNOLLI, S. M. M. Aproveitamento tecnológico das sementes de goiaba (*Psidium guajava* L.) como farinha na elaboração de biscoitos. **CEPPA Bulletin**, v. 34, n. 2, 2016.

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.2 4, 2015.

TACO - **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos**. 4. ed. Campinas: Unicamp, 2011.

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

TOUIL, A.; CHEMKHI, S.; ZAGROUBA, F. Moisture Diffusivity and Shrinkage of Fruit and Cladode of *Opuntia ficus-indica* during Infrared Drying. **Journal of Food Processing**, v. 2014, p. 1-9, 2014.

TROLLER, J. A.; CHRISTIAN, J. H. B. **Water activity and food**. Cambridge, Academic Press, v. 1, 1978.

TSOTSAS, E., & MUJUMDAR, A. S. **Modern drying technology**, 1-4, 2014.

VERGARA, F. O.; CAPILHEIRA, A. F.; GADOTTI, G. I.; VILLELA, F. A. Intermittence periods in corn seed drying process. **J. Seed Sci.** v. 40 n. 2, 2018.

VIANA, E. S.; REIS, R. C.; SENA, L. O.; SANTOS JUNIOR, M. B. S.; SILVA, P. N. R. Produção de bananas-passa com frutos de variedades melhoradas e avaliação da qualidade físico-química e sensorial. **B. CEPPA**, v.35, n.1, 2017.

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.

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.

VOULDOUKIS, I.; LACAN, D.; KAMATE, C.; COSTE, P.; CALENDIA, A.; MAZIER, D.; CONTI, M.; DUGAS, B. Antioxidant and anti-inflammatory properties of a Cucumismelo L extract rich in superoxide dismutase activity. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 94, p. 67-75, 2004.

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

- WOLBANG, C. A.; SINGH, D. P.; SYKES, S. R.; MCINERNEY, J. K., BIRD, A. R.; TREEBY, M. T. Influence of pre- and postharvest factors on β -carotene content, its in vitro bioaccessibility, and antioxidant capacity in melons. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n.3, 1732–1740, 2010.
- YADAV, A. K.; SINGH, S. V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v.51, p. 1654-1673, 2012.
- 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 Bioprod. Process.** 91, p. 381-388, 2013.
- ZEKI, B., **Dehydration. Food Process Engineering and Technology.** Academic Press, San Diego, pp. 459-510, 2009.
- ZHAO, D., AN, K., DING, S., LIU, L., XU, Z., & WANG, Z. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: Drying kinetics and physical quality. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 8, p. 2308-2318, 2014.
- 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.
- ZHU, Z.; YANG, Z.; WANG, F. Experimental research on intermittent heat pump drying with constant and time-variant intermittency ratio. **Drying Technology**, v. 34, n. 13, p. 1630-1640, 2016.

APÊNDICE A

São apresentadas neste apêndice, as tabelas contendo os dados experimentais obtidos neste trabalho.

Tabela A1 - Dados experimentais da secagem contínua de melão para a temperatura de 50 °C.

t (min)	m (g)	\bar{X}^*
0	12,58	1,000
5	12,15	0,948
10	11,86	0,914
15	11,50	0,870
20	11,19	0,834
25	10,85	0,792
30	10,59	0,761
35	10,28	0,724
45	9,74	0,659
55	9,35	0,613
65	3,48	0,568
75	8,53	0,515
85	8,26	0,482
95	2,84	0,452
105	2,68	0,423
120	7,42	0,382
135	7,12	0,346
150	6,84	0,312
170	6,50	0,271
190	6,21	0,236
220	5,83	0,191
260	5,44	0,144
320	5,03	0,095
380	4,78	0,065
440	4,63	0,047
500	4,53	0,036
560	4,48	0,029
620	4,43	0,023
680	4,39	0,019
740	4,36	0,015
800	4,34	0,012
860	4,32	0,010
920	4,30	0,007
980	4,27	0,004
1040	4,26	0,002
1100	4,24	0,001
1160	4,24	0,000

Tabela A2 - Dados experimentais da secagem contínua de melão para a temperatura de 70 °C.

t (min)	m (g)	\bar{X}^*
0	11,43	1,000
5	10,76	0,914
10	10,18	0,840
15	9,70	0,778
20	9,33	0,731
25	8,86	0,671
30	8,49	0,624
35	8,15	0,580
45	7,54	0,502
55	6,99	0,431
65	6,51	0,370
75	6,10	0,318
85	5,75	0,273
95	5,48	0,238
105	5,15	0,196
120	4,83	0,155
135	4,54	0,118
150	4,32	0,090
170	4,15	0,068
190	4,03	0,052
220	3,91	0,037
260	3,81	0,024
320	3,74	0,015
380	3,69	0,010
440	3,66	0,005
500	3,63	0,002
560	3,62	0,000

Tabela A3 - Dados experimentais para o tempo efetivo da secagem intermitente ($t_{in} = 10$ min) para temperatura de 50 °C.

t (min)	m (g)	\bar{X}^*
0	11,656	1,000
2,5	11,486	0,977
5	11,318	0,954
7,5	11,090	0,923
10	10,862	0,892
12,5	10,586	0,855
15	10,362	0,824
17,5	10,154	0,796
20	9,956	0,769
22,5	9,685	0,732
25	9,498	0,707
27,5	9,309	0,681
30	9,140	0,658

32,5	8,912	0,627
35	8,742	0,604
37,5	8,554	0,578
40	8,404	0,558
42,5	8,191	0,529
45	8,059	0,511
47,5	7,922	0,492
50	7,783	0,473
52,5	7,593	0,448
55	7,486	0,433
57,5	7,358	0,416
60	7,257	0,402
62,5	7,090	0,379
65	6,988	0,365
67,5	6,888	0,352
70	6,804	0,340
72,5	6,659	0,320
75	6,577	0,309
77,5	6,509	0,300
80	6,443	0,291
85	6,270	0,267
90	6,143	0,250
95	5,958	0,225
100	5,908	0,218
105	5,755	0,197
110	5,704	0,191
115	5,607	0,177
120	5,536	0,168
125	5,442	0,155
130	5,386	0,147
135	5,307	0,137
140	5,265	0,131
145	5,190	0,121
150	5,155	0,116
155	5,097	0,108
160	5,061	0,103
165	5,010	0,096
170	4,984	0,093
175	4,938	0,086
180	4,915	0,083
185	4,863	0,076
190	4,851	0,075
195	4,815	0,070
200	4,797	0,067
205	4,771	0,064
210	4,750	0,061
215	4,725	0,057
220	4,711	0,055

225	4,690	0,053
230	4,676	0,051
235	4,661	0,049
240	4,645	0,047
245	4,629	0,044
250	4,617	0,043
255	4,608	0,042
260	4,597	0,040
265	4,584	0,038
270	4,571	0,036
275	4,561	0,035
280	4,548	0,033
285	4,538	0,032
290	4,528	0,031
295	4,518	0,029
300	4,511	0,028
305	4,502	0,027
310	4,495	0,026
315	4,484	0,025
320	4,474	0,023
325	4,470	0,023
330	4,465	0,022
340	4,449	0,020
350	4,434	0,018
360	4,422	0,016
370	4,410	0,015
380	4,401	0,013
390	4,387	0,012
400	4,381	0,011
410	4,373	0,010
420	4,364	0,008
430	4,355	0,007
440	4,344	0,006
450	4,337	0,005
460	4,330	0,004
470	4,324	0,003
480	4,316	0,002
490	4,309	0,001
500	4,303	0,000
510	4,303	0,000

Tabela A4 - Dados experimentais para o tempo efetivo da secagem intermitente ($t_{in} = 10$ min) para temperatura de 70 °C.

t (min)	m (g)	\bar{X}^*
0	11,678	1,000

5	11,159	0,935
10	10,554	0,861
15	10,200	0,778
20	9,898	0,712
25	9,041	0,640
30	8,800	0,591
35	8,122	0,530
40	7,924	0,492
45	7,379	0,442
50	7,212	0,408
55	6,753	0,365
60	6,614	0,337
65	4,377	0,302
70	4,432	0,280
75	4,379	0,251
80	4,426	0,231
85	4,498	0,206
90	4,569	0,191
95	4,599	0,170
100	4,617	0,158
105	4,590	0,141
110	4,603	0,129
115	4,577	0,115
120	4,599	0,106
125	4,439	0,095
130	4,554	0,088
135	4,536	0,079
140	4,542	0,073
145	4,607	0,066
150	4,721	0,061
155	4,657	0,056
160	4,908	0,051
165	4,848	0,047
170	5,043	0,044
175	5,009	0,040
180	5,203	0,038
185	5,223	0,035
190	5,048	0,032
195	5,130	0,030
200	5,234	0,028
205	5,174	0,026
210	5,248	0,025
215	5,025	0,023
220	5,196	0,022
225	5,060	0,020
230	5,133	0,019
235	5,382	0,019
240	5,480	0,017

250	5,009	0,013
260	5,325	0,011
270	4,937	0,009
280	4,483	0,007
290	4,466	0,005
300	4,395	0,005
310	5,296	0,003
320	4,221	0,001
330	5,386	0,001
340	4,075	0,000

Tabela A5 - Dados experimentais para o tempo efetivo da secagem intermitente ($t_{in} = 20$ min) para temperatura de 50 °C.

t (min)	m (g)	\bar{X}^*
0	10,646	1,000
5	10,231	0,940
10	9,900	0,893
15	9,973	0,841
20	9,652	0,799
25	8,867	0,734
30	8,700	0,687
35	8,549	0,648
40	8,286	0,607
45	7,602	0,563
50	7,470	0,524
55	7,312	0,487
60	7,128	0,463
65	4,850	0,420
70	4,927	0,394
75	4,731	0,372
80	4,665	0,352
85	4,645	0,320
90	4,563	0,298
95	4,318	0,282
100	4,303	0,267
105	3,785	0,239
110	3,984	0,225
115	4,045	0,212
120	3,819	0,201
125	3,555	0,182
130	3,573	0,167
135	3,588	0,159
140	3,574	0,150
145	3,315	0,133
150	3,482	0,124

155	3,537	0,117
160	3,514	0,110
165	3,384	0,098
170	3,223	0,091
175	3,344	0,085
180	3,331	0,081
190	2,777	0,066
200	3,420	0,061
210	3,255	0,051
220	3,487	0,046
230	3,407	0,039
240	3,522	0,035
250	3,466	0,031
260	3,711	0,028
270	3,815	0,024
280	3,664	0,022
290	3,818	0,019
300	4,996	0,017
310	5,024	0,015
320	3,782	0,014
330	3,924	0,012
340	3,906	0,011
350	4,074	0,009
360	4,469	0,007
370	4,318	0,006
380	4,528	0,006
390	4,276	0,005
400	4,526	0,004
410	5,306	0,003
420	4,697	0,002
430	4,222	0,001
440	4,537	0,000

Tabela A6 - Dados experimentais para o tempo efetivo da secagem intermitente ($t_{in} = 20$ min) para temperatura de 70 °C.

t (min)	m (g)	\bar{X}^*
0	10,823	1,000
5	10,218	0,917
10	9,653	0,845
15	10,032	0,783
20	9,516	0,726
25	8,379	0,640
30	8,162	0,588
35	7,970	0,541
40	7,630	0,507
45	6,811	0,440
50	6,667	0,407

55	6,525	0,374
60	6,253	0,348
65	4,200	0,300
70	4,453	0,272
75	4,339	0,252
80	4,100	0,227
85	3,986	0,191
90	3,999	0,173
95	3,961	0,159
100	4,042	0,145
105	3,976	0,121
110	4,063	0,111
115	4,114	0,101
120	4,418	0,093
125	3,802	0,077
130	3,755	0,072
135	3,664	0,066
140	3,654	0,061
145	3,718	0,053
150	3,761	0,050
155	3,732	0,047
160	3,809	0,044
165	3,922	0,040
170	3,791	0,037
175	3,858	0,034
180	4,046	0,033
190	4,272	0,028
200	3,774	0,025
210	3,715	0,022
220	3,896	0,020
230	4,270	0,018
240	3,802	0,016
250	4,006	0,014
260	3,919	0,013
270	3,872	0,011
280	3,963	0,010
290	4,044	0,009
300	3,945	0,008
310	3,891	0,007
320	3,931	0,006
330	3,793	0,005
340	4,741	0,004
350	3,212	0,004
360	3,736	0,003
370	4,491	0,003
380	6,808	0,002
390	5,961	0,001
400	5,317	0,000

Tabela A7 - Dados experimentais para o tempo efetivo da secagem intermitente ($t_{in} = 30$ min) para temperatura de 50 °C.

t (min)	m (g)	\bar{X}^*
0	9,696	1,000
5	9,390	0,953
10	9,070	0,904
15	9,278	0,857
20	9,031	0,833
25	8,692	0,786
30	8,446	0,760
35	7,891	0,705
40	7,756	0,657
45	7,660	0,627
50	7,404	0,594
55	7,133	0,560
60	6,912	0,529
65	4,337	0,484
70	4,405	0,455
75	4,445	0,430
80	4,350	0,406
85	4,317	0,384
90	4,273	0,367
95	4,511	0,325
100	4,819	0,305
105	5,021	0,286
110	5,118	0,270
115	5,284	0,256
120	5,310	0,242
130	5,804	0,203
140	6,004	0,179
150	6,193	0,159
160	6,052	0,134
170	5,968	0,117
180	5,928	0,097
190	6,336	0,078
200	6,406	0,069
210	6,401	0,061
225	6,379	0,049
240	6,472	0,041
255	6,443	0,032
270	6,419	0,025
285	7,532	0,020
300	7,423	0,018
315	8,132	0,015
330	8,186	0,013
345	8,486	0,010
360	8,453	0,008

375	9,028	0,007
390	8,912	0,005
405	9,356	0,004
420	8,792	0,002
435	7,868	0,001
450	7,981	0,000

Tabela A8 - Dados experimentais para o tempo efetivo da secagem intermitente ($t_{in} = 30$ min) para temperatura de 70 °C.

t (min)	m (g)	\bar{X}^*
0	11,842	1,000
5	11,352	0,927
10	10,798	0,852
15	10,873	0,778
20	10,320	0,717
25	9,823	0,665
30	9,348	0,617
35	8,334	0,531
40	8,119	0,481
45	7,938	0,437
50	7,598	0,412
55	7,292	0,381
60	7,016	0,353
65	4,662	0,303
70	4,726	0,277
75	4,838	0,255
80	4,759	0,225
85	4,702	0,216
90	4,753	0,200
95	4,872	0,172
100	4,735	0,160
105	4,813	0,148
110	4,783	0,138
115	4,853	0,128
120	4,853	0,119
130	4,718	0,097
140	4,669	0,083
150	4,671	0,073
160	4,735	0,060
170	4,717	0,054
180	4,646	0,047
190	4,782	0,041
200	4,563	0,037
210	4,975	0,033
225	5,119	0,028
240	4,776	0,023

255	4,886	0,020
270	5,291	0,018
285	5,180	0,014
300	4,903	0,013
315	5,102	0,010
330	4,844	0,009
345	4,429	0,007
360	4,023	0,005
375	3,754	0,003
390	4,305	0,002
405	3,187	0,000
420	4,201	0,000

Tabela A9 - Dimensões das amostras de melão ao longo do experimento de secagem contínua para T = 50 °C.

Tempo (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)
0	8,03	8,27	19,56
20	8,00	8,25	18,77
30	7,73	7,86	18,22
45	7,49	7,80	17,92
65	6,88	7,69	17,8
85	6,41	7,26	17,6
105	6,37	7,25	17,59
135	6,11	7,05	17,3
170	5,83	6,75	16,29
220	5,83	6,62	16,06
320	4,59	6,03	15,53
380	4,50	5,9	15,5
440	4,46	5,78	15,03
680	4,18	5,75	15,02
920	4,13	5,74	15,02
1040	4,09	5,72	15,02

Tabela A10 - Dimensões das amostras de melão ao longo do experimento de secagem contínua para T = 70 °C.

Tempo (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)
0	8,54	8,17	18,12
5	7,77	7,20	17,7
10	7,51	6,84	17,34
15	7,31	6,70	17,13
20	7,25	6,51	17,11
25	7,01	6,34	16,72

30	6,89	6,21	16,6
35	6,71	6,02	16,26
55	6,34	5,67	15,67
65	6,13	5,52	14,88
75	6,02	5,40	14,73
85	5,80	5,35	14,61
95	5,72	5,27	14,54
135	5,60	4,74	13,99
150	5,47	4,65	13,96
170	5,43	4,57	13,71
190	5,40	4,35	13,64
220	5,31	4,28	13,53
260	5,20	4,19	13,41
320	5,18	4,15	13,3
380	4,84	4,11	13,29
440	4,80	4,05	13,25
500	4,75	3,95	13,13

Tabela A11 - Dimensões das amostras de melão ao longo do experimento de secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min e $T = 50$ °C.

Tempo (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)
0	8,46	8,06	17,65
5	8,10	7,95	17,52
10	7,89	7,56	16,75
35	7,59	7,21	16,30
62,5	7,5	7,11	15,46
95	7,34	6,82	14,98
125	7,23	6,60	14,22
155	6,86	6,49	13,68
185	6,77	6,13	13,22
215	6,70	5,95	12,93
245	6,38	5,86	12,88
275	6,28	5,68	12,39
305	5,99	5,41	12,25
335	5,95	5,39	12,24
365	5,87	5,35	12,19
395	5,75	5,31	12,17
425	5,61	5,18	12,15
455	5,50	5,17	12,12
485	5,40	5,15	12,03
545	5,38	5,14	12,00
605	5,35	5,05	11,95

665	5,28	5,04	11,94
725	5,25	5,03	11,92
815	5,23	5,01	11,91
905	5,18	5,00	11,90
1030	5,17	4,99	11,88
1240	5,16	4,98	11,87

Tabela A12 - Dimensões das amostras de melão ao longo do experimento de secagem intermitente com $t_{in} = 10$ min e $T = 70$ °C.

Tempo (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)
0	8,50	8,12	18,16
5	8,15	7,93	17,93
10	8,05	7,78	17,36
30	7,57	7,48	17,15
40	7,44	7,38	17,03
60	7,38	7,28	16,99
70	7,18	7,10	16,86
90	6,9	6,80	16,69
100	6,79	6,70	16,41
130	6,51	6,43	15,90
190	6,27	5,87	15,60
220	6,00	5,33	15,48
250	5,98	5,16	15,33
280	5,79	4,81	15,00
310	5,65	4,77	14,85
340	5,52	4,52	14,76
370	5,50	4,26	14,69
400	5,44	4,18	14,67
430	5,36	4,17	14,66
460	5,35	4,16	14,63
490	5,26	4,14	14,60
520	5,25	4,13	14,58
550	5,23	4,13	14,54
610	5,22	4,12	14,48
670	5,2	4,11	14,45
790	5,16	4,11	14,44
910	5,14	4,10	14,43
970	5,08	4,10	14,42

Tabela A13 - Dimensões das amostras de melão ao longo do experimento de secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min e $T = 50$ °C.

Tempo (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)
0	8,55	8,27	18,01
5	8,4	8,01	17,76
15	7,88	7,56	17,25
80	7,38	6,86	16,56
125	7,23	6,79	16,28
185	6,79	6,37	15,53
200	6,71	6,16	15,04
250	6,61	6,14	14,97
260	6,59	6,13	14,8
305	6,4	6,08	14,7
365	6,38	6,01	14,63
425	6,27	5,99	14,35
485	5,97	5,85	14,15
550	5,44	5,85	13,88
620	5,42	5,8	13,71
680	5,4	5,82	13,65
800	5,38	5,75	13,6
920	5,35	5,7	13,6

Tabela A14 - Dimensões das amostras de melão ao longo do experimento de secagem intermitente com $t_{in} = 20$ min e $T = 70$ °C.

Tempo (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)
0	8,21	7,55	18,02
5	8,02	7,2	17,71
20	7,64	6,82	17,10
65	7,31	6,72	16,60
125	5,49	6,43	14,95
140	5,10	6,26	14,48
185	5,06	6,03	13,91
200	4,88	5,79	13,70
245	4,5	5,77	13,30
260	4,45	5,68	13,22
305	4,32	5,66	12,85
380	4,23	5,42	12,70
440	4,10	5,4	12,65
500	3,99	5,35	12,56
560	3,97	5,34	12,55
680	3,95	5,34	12,50

Tabela A15 - Dimensões das amostras de melão ao longo do experimento de secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min e $T = 50$ °C.

Tempo (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)
0	7,47	7,21	19,33
10	7,21	6,91	19,23
20	7,05	6,87	19,04
30	6,51	6,39	17,50
95	6,46	6,08	16,29
115	6,13	5,99	16,25
210	5,48	5,34	15,95
300	5,38	5,29	15,65
390	4,93	5,18	15,60
480	4,90	4,43	15,44
550	4,75	4,05	15,36
570	4,70	3,80	15,24
660	4,50	3,42	15,20
750	4,27	3,40	15,10
840	4,25	3,29	15,01
1110	4,24	3,10	15,00

Tabela A15 - Dimensões das amostras de melão ao longo do experimento de secagem intermitente com $t_{in} = 30$ min e $T = 70$ °C.

Tempo (min)	L_x (mm)	L_y (mm)	L_z (mm)
0	8,03	8,27	19,56
10	7,07	7,26	18,37
20	6,73	7,00	18,18
30	6,20	6,36	17,77
100	5,59	5,98	17,25
120	4,73	5,48	16,75
195	4,58	5,2	16,36
210	4,51	5,09	15,90
280	4,50	4,86	15,86
300	4,40	4,77	15,70
390	4,08	4,58	15,46
480	3,98	4,48	15,30
570	3,90	4,40	15,28
660	3,88	4,30	15,25

APÊNDICE B

Este apêndice apresenta o manual do *software LS Optimizer*, que trata de forma detalhada sua utilização e foi usado para determinar parâmetros em experimentos de secagem, como os realizados no presente trabalho.

LS Optimizer: File menu

LS Optimizer software is used to determine parameters of differential equations through known experimental data. The user must provide a solver for the differential equation supposing known parameters, as well as an experimental dataset. Thus, **LS Optimizer** uses the least squares method (Levenberg-Marquardt algorithm) to determine the parameters of a given differential equation, including the covariance matrix: uncertainties of the parameters and covariance between them.

In order to perform an optimization process, three files must be placed together as is shown in Figure 1:

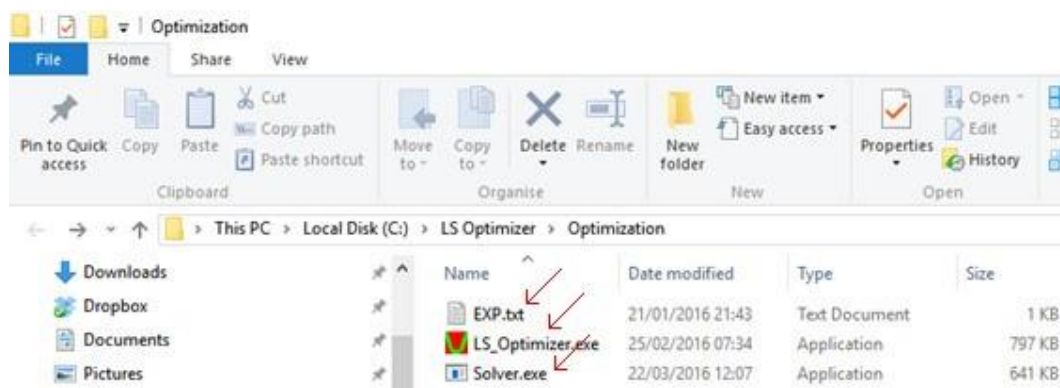


Figure 1 – Files that must be placed together within the directory “**Optimization**”.

The file “**exp.txt**” contains the experimental dataset (minimum 6 and maximum 97 points) as will be shown ahead. “**LS Optimizer.exe**” is the executable file of the software presented here, while “**solver.exe**” is a file that must be provided by the user. This solver should solve the differential equation for values of the parameters a_1 , a_2 , a_3 and a_4 specified by **LS Optimizer**. In order to access the directory that contains the three files, the user must click on the menu item **Place “Solver.exe” Within the**

Directory or **Place “Exp.txt” Within the Directory** and these options are available at the **File menu** shown in Figure 2.

When an optimization process is performed, the last results are deleted. Thus, **LS Optimizer** provides the menu item **Open Directory With Last Results** (Figure 2) enabling the user to save such results before a new optimization process is started.

Since the files “**solver.exe**” and “**exp.txt**” are provided by the user, it is enough a click on the menu item **Determine Parameters: Optimize** (as shown in Figure 2) to perform an optimization process.

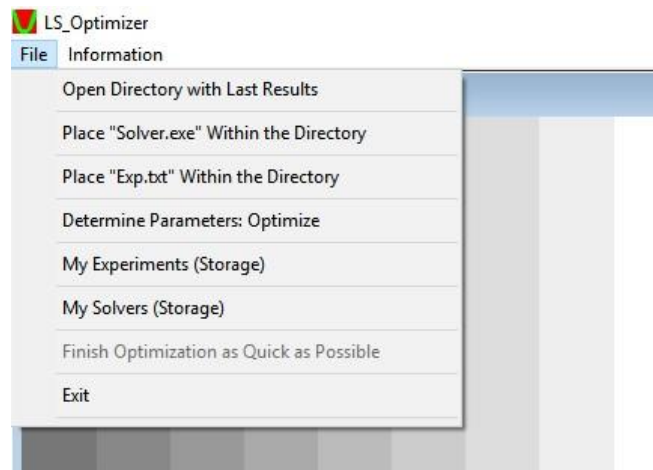


Figure 2 – File menu.

When a click is given in the menu item **Determine Parameters: Optimize**, the user receives a warning that the last results will be lost. After that, a dialog box is provided as shown in Figure 3.

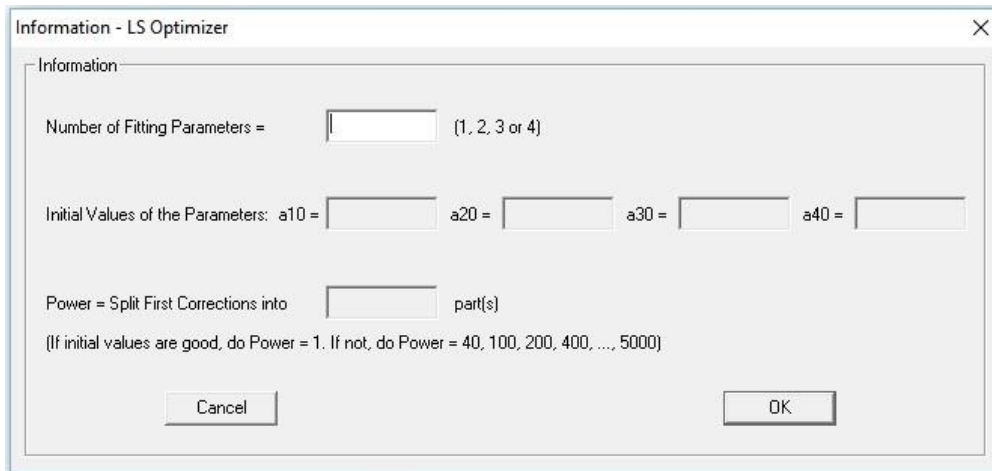


Figure 3 – Dialog box with information about the optimization process.

After each information is provided in the dialog box, with a click on OK button, the optimization process is started.

LS Optimizer: Creating the solver

In order to use the **LS Optimizer** software, it is necessary to perform some changes in the original source code related to the numerical solution of the differential equation (solver). At the beginning of the program, after definitions of variable types, two files must be read.

The first file, containing the experimental dataset, should be named as “**exp.txt**” and should be read by the solver to identify the values of the independent variable (for example, time), in which the dependent variable will be obtained by simulation (for instance, average moisture content). Figure 4 presents an example file “**exp.txt**”. In this figure, the first column shows the values of the independent variable; second column involves the measured values for the dependent variable and the third column contains the value of the statistical weight for each value of the dependent variable. If the statistical weights are not available, as in the file shown in Figure 4, the value equal to 1 must be assigned, indicating that all measures have the same weight.

The file “**parameters.txt**” is generated by **LS Optimizer** software with information that must be read and used by the solver of the differential equation. An example file “**parameters.txt**” can be seen in Figure 5. The first value will be read by the solver as an integer variable called “information”. The

second value provided by the **LS Optimizer** software will be read by the solver as an integer variable called “N_Param” that indicates the number of parameters involved in the solution of the differential equation. Finally, the third information is related to the values established by the **LS Optimizer** software for the parameters (a_1 , a_2 , a_3 and a_4).

The first value of the file “**parameters.txt**” can be 0, 1, 2, 3 and 4. When the value is 0, the solver must store the simulation results (independent variable and dependent variable, in two columns) in a file called “unsteady.txt”. If the value is 1, the simulation results must be written in a file called “unsteady_a1.txt”. If the value is 2, the simulation results must be written in a file called “unsteady_a2.txt”. Also, for the values 3 and 4, the files must be named “unsteady_a3.txt” and “unsteady_a4.txt”, respectively.

Time	Value	Constant
0	1.000	1
5	0.966	1
10	0.916	1
15	0.880	1
20	0.846	1
30	0.785	1
40	0.735	1
50	0.678	1
60	0.633	1
70	0.588	1
80	0.554	1
100	0.485	1
120	0.432	1
140	0.390	1
170	0.322	1
200	0.274	1
230	0.227	1
290	0.145	1
350	0.109	1
410	0.095	1
470	0.071	1
530	0.058	1
590	0.049	1
650	0.026	1
710	0.016	1
770	0.006	1
830	0.005	1
890	0.002	1
950	0.000	1

Figure 4 – Example file “**exp.txt**” with experimental dataset to be provided by the user.

```

Parameters.txt - Notepad
File Edit Format View Help
0
2
2.000000000000000E-008 2.000000000000000E-005 0.000000000000000E+000
0.000000000000000E+000

```

Figure 5 – Example file “**Parameters.txt**”, provided by **LS Optimizer** software, to be used by the solver created by user.

The solver to be handled by **LS Optimizer** can be created in any programming language. In the case of FORTRAN (QuickWin Application), the changes at the beginning of the original source code, aiming read the files “**exp.txt**” and “**parameters.txt**” can be made as indicated in Figure 6.

```

program solver
use DFLIB ← TO BE ADDED

Types and definitions of variables ← TO BE ADDED

LOGICAL(4) result
TYPE (qwinfo) winfo
double precision time(100), a1, a2, a3, a4
integer icont_, info_, N_Param, information

i = setexitqq(QWIN$EXITNOPERSIST) !the program is closed at the finish
! Minimize frame window
winfo%TYPE = QWIN$MIN
result = SETWSIZEQQ(QWIN$FRAMEWINDOW, winfo)

icont_ = 0
info_ = 0
open(unit = 5, file = 'exp.txt')
do while (info_ == 0)
  if(info_ == 0) icont_ = icont_ + 1 ← READ EXPERIMENTAL TIMES
  read(5,*, iostat = info_) time(icont_)
end do
close(5)

open(unit = 5, file = 'parameters.txt')
read(5, *) information !unsteady.txt, unsteady_a1.txt, unsteady_a2.txt, unsteady_a3.txt, unsteady_a4.txt
read(5, *) N_Param !number of parameters provide by optimizer
read(5, *) a1, a2, a3, a4 !parameters provide by optimizer
close(5)

```

Figure 6 – Modifications at the beginning of the original source code of the solver to read the files “**exp.txt**” and “**parameters.txt**”.

An example for the three-dimensional analytical solution of the diffusion equation with boundary condition of the first kind, in Cartesian coordinates, is available in ...\\LS Optimizer\\Solvers\\Analytical Example\\Analytical.f90.

One should remember that the simulation results are stored in files with up to 5 different names, depending on the value of the variable “information”. Thus, when the results are obtained by the solver (independent variable, dependent variable, in columns), such results should be written in the previously specified files (unsteady.txt, unsteady_a1.txt, unsteady_a2.txt, unsteady_a3.txt, unsteady_a4.txt). On the other hand, in the source code, the dependent variable should be calculated for the same values of the independent variable specified in the experimental dataset (“exp.txt”), and then written in the files specified above. Thus, before the loop (in which the dependent variable is calculated), should be added to the original source code the commands as shown in Figure 7, for the case of code in FORTRAN:

```
if(information == 0) open(unit = 10, file = 'Unsteady.txt')
if(information == 1) open(unit = 10, file = 'Unsteady_a1.txt')
if(information == 2) open(unit = 10, file = 'Unsteady_a2.txt')
if(information == 3) open(unit = 10, file = 'Unsteady_a3.txt')
if(information == 4) open(unit = 10, file = 'Unsteady_a4.txt')
```

Figure 7 – This code must be added to open a file with the name expected by **LS Optimizer** before the loop that calculates the dependent variable corresponding to each value of the independent variable.

The file “**unsteady.txt**” generated by the solver (as well as the files unsteady_a1.txt, unsteady_a2.txt, unsteady_a3.txt, unsteady_a4.txt) has the appearance as is shown in Figure 8.

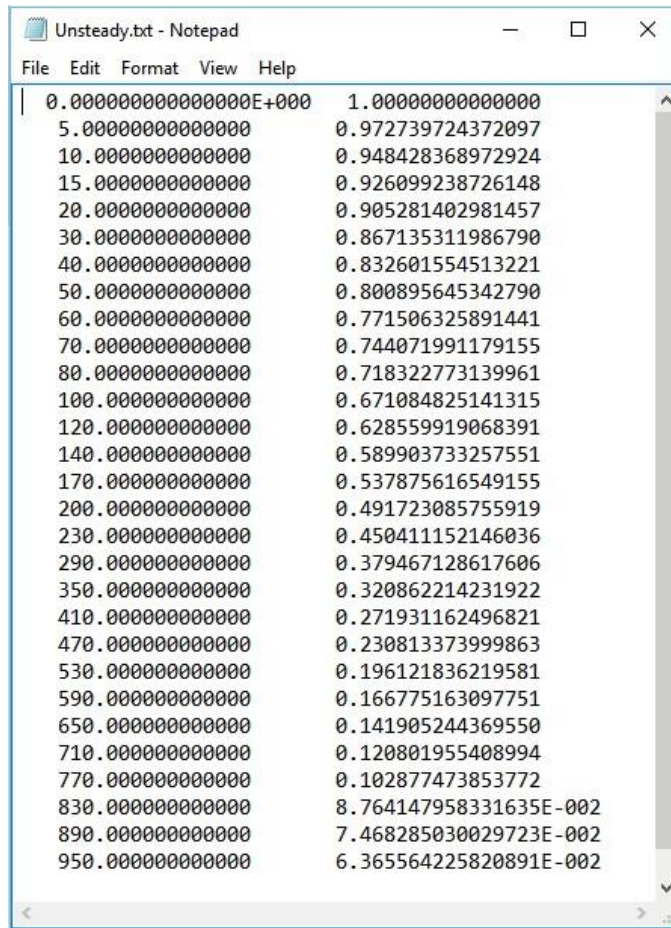


Figure 8 – File named “**Unsteady.txt**” generated by the solver and used for calculations in **LS Optimizer**.

The file shown in Figure 8, as well as the files `unsteady_a1.txt`, `unsteady_a2.txt`, `unsteady_a3.txt`, `unsteady_a4.txt`, are used by **LS Optimizer** to calculate the chi-squares and sensitivities related to each fitting parameter (a_1 , a_2 , a_3 and a_4).

Important: Be sure your solver is capable to determine the dependent variable for **any value** to be specified for the independent variable in the file “`exp.txt`”.

An example using “`solver.exe`” and “`exp.txt`” available in **LS Optimizer**

- 1) At File menu click on the menu item **My Experiments (Storage)**.
- 2) Select the file “**Exp_Numerical.txt**” and copy it. After that, close the directory “**Experiments**”.

- 3) At File menu click on the menu item **Place “Exp.txt” Within the Directory**. In the directory **“Optimization”**, delete current file **“exp.txt”** and paste the file **“Exp_Numerical.txt”**. After that, rename **“Exp_Numerical.txt”** to **“Exp.txt”**.
- 4) At File menu click on the menu item **My Solvers (Storage)**.
- 5) In **Numerical Examples**, select the file **“Solver_2Param.exe”** and copy it. After that, close the directory **“Solvers”**.
- 6) At File menu click on the menu item **Place “Solver.exe” Within the Directory**. In the directory **“Optimization”**, delete current file **“Solver.exe”** and paste the file **“Solver_2Param.exe”**. After that, rename **“Solver_2Param.exe”** to **“Solver.exe”**.
- 7) The **“Optimization”** directory contains the three desired files, as is shown in Figure 1. In this example, the solver contains the numerical solution of the diffusion equation in Cartesian coordinates for a parallelepiped with boundary condition of the third kind (grid with 30x30x50; 1900 time steps). This solution uses the Finite Volume Method (fully implicit formulation) and enables to simulate drying of mango slices, including shrinkage. The parameter a_1 is the effective mass diffusivity and the parameter a_2 is the convective mass transfer coefficient, considered in this example as a constant value. The file **“exp.txt”** contains experimental data related to the average

—

 moisture ratio (M) along time (t).
- 8) Close the **“Optimization”** directory and, at File menu, click on the menu item **Determine Parameters: Optimize**. With respect to the message box question, answer **“NO”** and provide the information required by dialog box that appears (Figure 9).

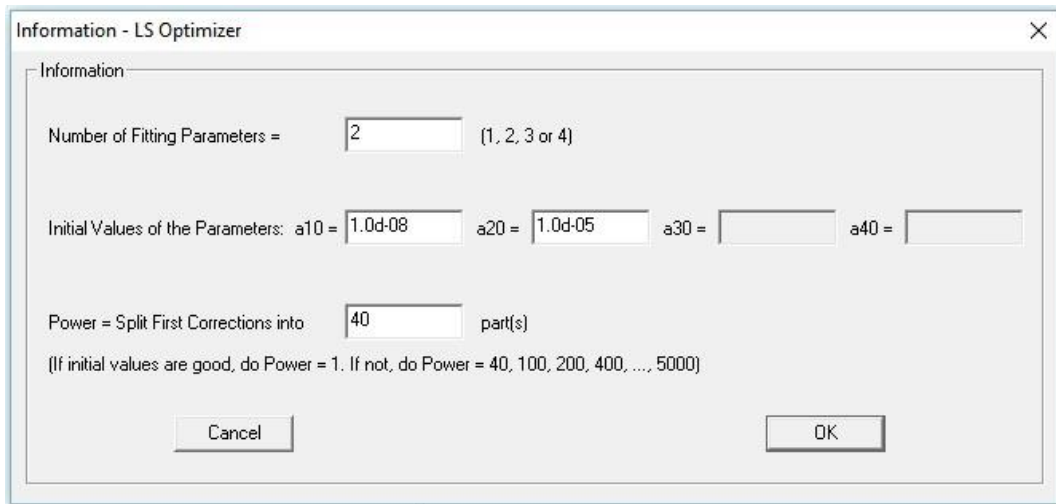


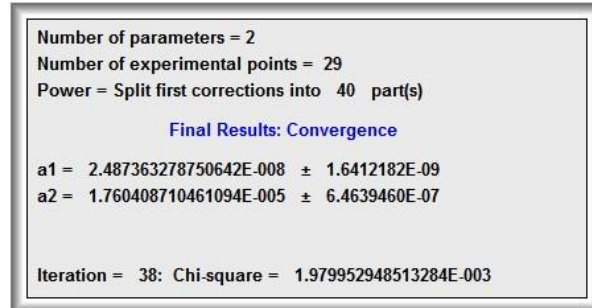
Figure 9 – The effective mass diffusivity a_{10} is given in $\text{m}^2 \text{min}^{-1}$ and the convective mass transfer coefficient a_{20} is given in m min^{-1} .

Notes: a) The other solver available in the directory “**Solvers**”, named **Solver_3Param.exe**, solves the same problem considering variable effective mass diffusivity: $a_1 \exp(a_2 M)$, where M is the local moisture ratio. The convective mass transfer coefficient is a_3 . Typical initial values for the parameters are: $a_{10} = 1.0\text{d-}09$; $a_{20} = 2.0\text{d+}00$ and $a_{30} = 1.0\text{d-}05$, for time given in minutes and length in meters.

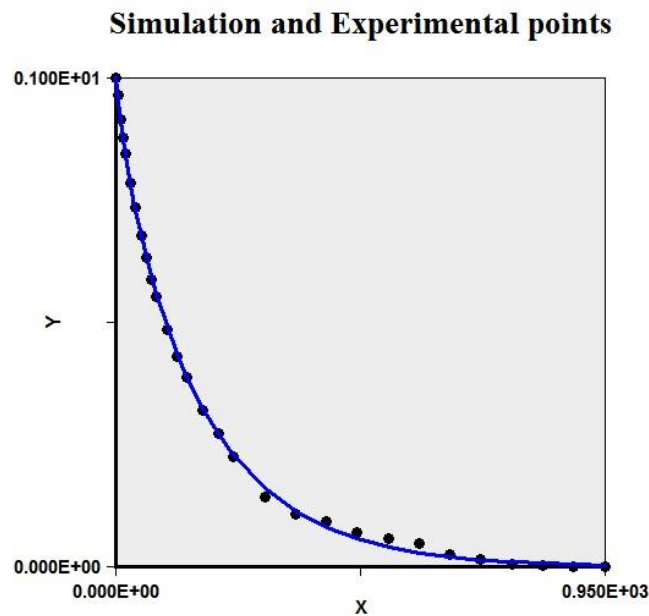
b) Diffusion in a parallelepiped was also solved analytically for boundary condition of the first kind, and the source code in FORTRAN (QuickWin Application) is available in the directory “**Solvers**”. The executable file is also available (directory “**Solvers**”), as well as the experimental dataset of water quantity during osmotic dehydration of mango (directory “**Experiments**”, **EXP_Analytical.txt**). Typical initial values for the effective mass diffusivity (parameter a_{10}) is $1.0\text{d-}09 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

- 9) For the problem defined with two parameters (Figure 9), after several minutes (or few hours), and 38 iterations, the results are presented through three files. The first file is named “**Results.txt**”, showing the history of the optimization process, values of the parameters, uncertainties and the covariance matrix, among other results. In order to access file “**Results.txt**”

(and the two other files), click on the menu item **Open Directory With Last Results** (Figure 2). The other two files are shown in Figure 10.



(a)



(b)

Figure 10 – (a) Main results; (b) Drying kinetics and experimental data: The continue line is obtained by simulation using the values of the optimum parameters determined by **LS Optimizer** to calculate the dependent variable at the same values of the independent variable available in the file “**exp.txt**”.

Notes about the user solver

- 1) The user solver must read the file “**exp.txt**” as it is shown in Figure 4.
- 2) The user solver must read the file “**Parameters.txt**” as it is shown in Figure 5.
- 3) The user solver must generate a file in columns with independent variable (same values shown in file “**exp.txt**”) and correspondent dependent variable calculated by simulation using the values stipulated by the file “**Parameters.txt**” for parameters a_1 , a_2 , a_3 and a_4 , as is shown in the last line of Figure 5.
- 4) The name of the file generated in previous item 3 must be:

“unsteady.txt”, or “unsteady_a1.txt”, or “unsteady_a2.txt”, or “unsteady_a3.txt”, or “unsteady_a4.txt”,

if the value provided in the first line of the file “**Parameters.txt**” (Figure 5) is 0, or 1, or 2, or 3, or 4, respectively.
- 5) Be sure your solver is capable to determine the dependent variable for **any value** to be specified for the independent variable in the file “exp.txt”.