



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE-UFCG
CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE-CES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS NATURAIS E
BIOTECNOLOGIA - PPGCNBIOTEC

RAQUEL ALVES DE MEDEIROS

**OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DE SEMENTES DE
MELÃO (*Cucumis melo* L.) USANDO MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS E
DIFUSIVOS.**

CUITÉ – PB

2021

RAQUEL ALVES DE MEDEIROS

**OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DE SEMENTES DE
MELÃO (*Cucumis melo* L.) USANDO MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS E
DIFUSIVOS.**

Dissertação apresentada como requisito obrigatório à obtenção do grau de Mestre em Ciências Naturais e Biotecnologia do Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais e Biotecnologia, com área de concentração em Biotecnologia Industrial.

Orientador (a): Prof^a. Dr^a. Vera Solange de Oliveira Farias.

Coorientador: Prof^o. Dr^o. Aluizio Freire da Silva Júnior.

CUITÉ – PB

2021

M488o Medeiros, Raquel Alves de.

Otimização e simulação do processo de secagem de sementes de melão (*Cucumis melo* L.) usando modelos matemáticos empíricos e difusivos. / Raquel Alves de Medeiros. - Cuité, 2021.

98 f. : il. Color.

Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais e Biotecnologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Educação e Saúde, 2021.

"Orientação: Profa. Dra. Vera Solange de Oliveira Farias; Coorientador: Prof. Dr. Aluizio Freire da Silva Júnior".

Referências.

1. Melão. 2. *Cucumis melo* L. 3. Secagem de sementes - melão. 4. Secagem de sementes - modelos matemáticos. 5. Melão - secagem - semente. 6. Aproveitamento integral dos alimentos. 7. Secagem convectiva. I. Farias, Vera Solange de Oliveira. II. Silva Júnior, Aluizio Freire da. III. Título.

CDU 635.611(043)

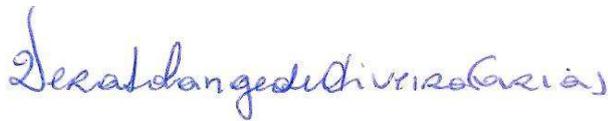
RAQUEL ALVES DE MEDEIROS

OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DE SEMENTES DE
MELÃO (*Cucumis melo* L.) USANDO MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS E
DIFUSIVOS.

Dissertação apresentada como requisito obrigatório à obtenção do grau de Mestre em Ciências Naturais e Biotecnologia do Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais e Biotecnologia, com área de concentração em Biotecnologia Industrial.

Aprovado em 22 de março de 2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof^ª. Dr^ª. Vera Solange de Oliveira Farias

Orientadora



Prof^º. Dr^º. Aluizio Freire da Silva Júnior

Coorientador



Prof^ª. Dr^ª. Vanessa Bordin Viera

Examinadora Interna



Prof. Dra. Kalina Lúcia Cavalcante de Almeida Farias Aires

Examinadora Externa

A Deus,
a minha família
e a todos que contribuíram
para que eu obtivesse êxito em mais
uma etapa da minha vida.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu forças para superar todos os desafios encontrados ao longo da realização deste trabalho;

Aos meus pais, Divalcy e Rosinete, que compartilharam e me incentivaram na realização de mais um sonho;

Ao meu esposo, Fabio Henrique, que sonhou meu sonho, que me apoiou, incentivou e esteve ao meu lado durante toda trajetória. Obrigada por muitas vezes abdicar dos seus objetivos para que eu conseguisse concluir o meu mestrado;

Aos meus filhos, Benjamim e Mariana, por serem minha fonte de amor, força e inspiração;

A minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Vera Solange de Oliveira Farias. Que abraçou com maestria a minha causa e em todos os momentos demonstrou sabedoria e paciência para lidar com os desafios que surgiram no decorrer desta jornada;

Ao meu coorientador, Prof^o. Dr^o. Aluizio Freire da Silva Júnior, pelos ensinamento e contribuições dados durante todo o processo;

Aos membros da banca examinadora, Prof^a. Dr^a. Vanessa Bordin Viera e a Prof. Dra. Kalina Lúgia Cavalcante de Almeida Farias Aires pela disponibilidade de participar e dividir comigo este momento tão importante e esperado, e pelas contribuições acerca da minha dissertação;

As minhas colegas da pós-graduação, Thamires, Maria Tereza e Ruth por se dispor a ajudar nas análises físico-químicas;

A coordenadora do PPGCNBIOTEC Prof^a. Dr^a Magnólia que diante das adversidades a qual enfrentei demonstrou empatia e humanização;

A Herbert Henrique, que durante sua permanência na secretária do PPGCNBIOTEC, sempre esteve pronto a ajudar com eficiência e disposição;

A Francinalva, professora do curso de Farmácia do CES, obrigada por ter disponibilizado a estufa para a utilização na secagem das sementes de melão;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro.

“O êxito da vida não se mede pelo caminho
que você conquistou, mas sim pelas
dificuldades que superou no caminho”.

Abraham Lincoln

MEDEIROS, Raquel Alves de. **Otimização e simulação do processo de secagem de sementes de melão (*cucumis melo* L.) usando modelos matemáticos empíricos e difusivos**. 2021. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais e Biotecnologia) – Programa de Pós-graduação em Ciências Naturais e Biotecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité, 2021.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é otimizar e simular processos de secagem de sementes de melão (*Cucumis melo* L.) variedade *inodorus* usando modelos matemáticos empíricos e difusivos e analisar a influência da temperatura sobre as propriedades físico-químicas das amostras. Foram realizados experimentos de secagem em estufa de circulação para três temperaturas distintas (50°C, 60°C e 70°C) e descrição da cinética de secagem por meio de modelos empíricos e difusivos. Além disso, foi realizado otimizações no tempo de secagem e elaboração e caracterização físico-química da farinha de sementes de melão. De acordo com os resultados obtidos, foi observado que a modelagem empírica que melhor descreveu o processo de secagem foi exponencial de dois termos. Através desse modelo foi descrita a cinética e taxa de secagem e foi constatado que a temperatura apresentou influência significativamente no tempo de secagem das sementes; com relação à descrição por modelos difusivos foram utilizadas duas condições de contorno (de primeiro e de terceiro tipo), a condição de contorno de terceiro tipo descreveu de forma mais realista o processo. Por meio das otimizações no tempo de secagem, foi verificado a possibilidade de redução no tempo de secagem e as análises físico-químicas demonstraram que todas as amostras de farinhas de sementes de melão que permaneceram até o tempo final de secagem estavam de acordo com o parâmetro de umidade preconizado pela RDC n° 263/2005, assim como os níveis de atividade de água estavam abaixo ao recomendado (<0,6). Portanto, os resultados obtidos nesta pesquisa fortalece a utilização e potencial de inserção das sementes de melão no setor industrial, além de disponibilizar ao meio científico informações importantes referentes à descrição e otimização do processo de secagem.

Palavra-chaves: Secagem convectiva; Cinética de secagem; Modelagem matemática; Aproveitamento integral dos alimentos.

MEDEIROS, Raquel Alves de. **Optimization and simulation of the drying process of melon seeds (*cucumis melo* L.) using empirical and diffusive mathematical models**. 2021. 98 f. Dissertation (Master in Natural Sciences and Biotechnology) - Postgraduate Program in Natural Sciences and Biotechnology, Federal University of Campina Grande, Cuité, 2021.

ABSTRACT

The objective of this research is to optimize and simulate drying processes of melon (*Cucumis melo* L.) inodorus seeds using empirical and diffusive mathematical models and to analyze the influence of temperature on the physical and chemical properties of the samples. Drying experiments were carried out in a circulation oven for three different temperatures (50 ° C, 60 ° C and 70 ° C) and description of drying kinetics by means of empirical and diffusive models. In addition, optimizations were made in the drying time and preparation and physicochemical characterization of the melon seed flour. According to the results obtained, it was observed that the empirical modeling that best described the drying process was exponential in two terms. Through this model, the kinetics and drying rate were described and it was found that the temperature had a significant influence on the drying time of the seeds; Regarding the description by diffusive models, two boundary conditions (first and third type) were used, the third type boundary condition described the process in a more realistic way. Through the optimization of drying time, the possibility of reduction in drying time was verified and the physical-chemical analyzes showed that all samples of melon seed flours that remained until the final drying time were in accordance with the parameter of humidity recommended by RDC n ° 263/2005, as well as the water activity levels were below the recommended (<0.6). Therefore, the results obtained in this research strengthens the use and potential of insertion of melon seeds in the industrial sector, in addition to providing the scientific community with important information regarding the description and optimization of the drying process.

Keywords: Convective drying; Drying kinetics; Mathematical modeling; Full use of food.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Principais tipos comerciais de melões cultivados no Brasil.....	24
Figura 2.2: Representação da condição de contorno de Cauchy.....	39
Figura 3.1: Representação dos melões utilizados para a realização dos experimentos.....	42
Figura 3.2: Sementes de melão utilizadas no processo de secagem.....	43
Figura 3.3: Fluxograma das etapas de preparo das amostras de sementes de melão.....	43
Figura 3.4: Representação esquemática de uma parede infinita (J representa o fluxo de massa e Meq o teor de umidade de equilíbrio).....	46
Figura 3.5: Fluxograma de elaboração da farinha de sementes de melão.....	53
Figura 4.1: Curvas do ajuste do modelo exponencial de dois termos (2004) aos dados experimentais do teor de umidade adimensional em função do tempo em minutos gerados por meio do <i>software</i> LABFit: (a) T = 50°C; (b) T = 60°C; (c) T = 70°C.....	61
Figura 4.2: Curvas do ajuste do modelo de PAGE aos dados experimentais do teor de umidade adimensional em função do tempo em minutos gerados por meio do <i>software</i> LABFit: (a) T = 50°C ; (b) T = 60°C; (c) T = 70°C.....	62
Figura 4.3: Curvas da taxa de secagem das sementes de melão obtidas através do modelo de exponencial de dois termos (2004) para: (a) T=50 °C; (b) T=60 °C; (c) T=70 °C.....	63
Figura 4.4: Gráficos das cinéticas de secagem para a condição de contorno de primeiro tipo gerados pelo <i>software</i> <i>Analytical</i> para: (a) T=50 °C; (b) T=60 °C; (c) T=70 °C.....	65
Figura 4.5: Gráficos das cinéticas de secagem para a condição de contorno de terceiro tipo gerados pelo <i>software</i> <i>Analytical</i> para: (a) T=50 °C; (b) T=60 °C; (c) T=70 °C.....	67
Figura 4.6: Superposição das Cinéticas de Secagem para as três temperaturas.....	68
Figura 4.7: Gráficos de contorno para as amostras submetidas a uma temperatura de 50 °C, nos seguintes instantes de tempo: (a) t = 10,08 min; (b) t = 20,16 min; (c) t = 40,32 min; (d) t = 60,48 min; (e) t = 80,64 min.....	70
Figura 4.8: Gráficos de contorno para as amostras submetidas a uma temperatura de 60 °C, nos seguintes instantes de tempo: (a) t = 10,08 min; (b) t = 20,16 min; (c) t = 40,32 min; (d) t = 60,48 min; (e) t = 80,64 min.....	71
Figura 4.9: Gráficos de contorno para as amostras submetidas a uma temperatura de 70 °C, nos seguintes instantes de tempo: (a) t = 10,08 min; (b) t = 20,16 min; (c) t = 40,32 min; (d) t = 60,48 min; (e) t = 80,64 min.....	72
Figura 4.10: Gráficos de contorno para t = 30,24 min, para as seguintes temperaturas de secagem do ar: (a) T = 50 °C; (b) T = 60 °C; (c) T = 70 °C.....	73
Figura 4.11: Farinha de sementes de melão <i>in natura</i>	75
Figura 4.12: Farinhas de sementes de melão submetidas à intervenção do tempo: (a) FSM 50°C por 142,2 min; (b) FSM 60°C por 94,1 min; (c) FSM 70°C por 72,6 min.....	75
Figura 4.13: Farinhas de sementes de melão submetidas até o tempo final de secagem (360 minutos): (a) FSM 50°C; (b) FSM 60°C; (c) FSM 70°C.....	76
Figura 4.14: Imagem atualizada de sementes de melão secas no ano de 2018.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Dados experimentais de temperatura, teor de umidade inicial (\bar{M}_i), teor de umidade de equilíbrio (\bar{M}_{eq}) e tempo de secagem das sementes de melão.....	58
Tabela 4.2: Resultados das simulações das cinéticas de secagem descritas por expressões empíricas por meio do <i>Software LABFit</i>	60
Tabela 4.3: Resultados com as otimizações realizadas com o <i>software Analitical</i> para a condição de contorno do primeiro tipo.....	64
Tabela 4.4: Resultados com as otimizações realizadas com o <i>software Analitical</i> para a condição de contorno convectiva.....	66
Tabela 4.5: Redução nos tempos de secagem das sementes de melão submetidas à intervenção do tempo.....	74
Tabela 4.6: Análises físico-químicas das farinhas de sementes de melão.....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Composição do melão por 100g de parte comestível: centesimal e de minerais.....	26
Quadro 2.2: Métodos encontrados na literatura, de secagem de sementes de melão para elaboração de farinha.....	29
Quadro 3.1: Expressões empíricas utilizadas para descrever a cinética de secagem de sementes de melão.....	45
Quadro 3.2: Tempo de secagem das sementes para elaboração da farinha de sementes de melão.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS

a, b - Parâmetros de ajuste dos modelos empíricos

A_w - Atividade de Água

Bi - Número de Biot de transferência de massa

b.u. - Teor de umidade em base úmida

b.s. - Teor de umidade em base Seca

min - Tempo em minutos

mg - miligramas

Kcal - quilocalorias

D - coeficiente de difusão líquida, $m^2 \cdot s^{-1}$

D_{ef} - difusividade efetiva (m^2/s)

D_w - Difusividade efetiva de massa ($m^2 \text{min}^{-1}$)

g - Gramas

M_{bs} - Teor de umidade em base seca

M_{bu} - Teor de umidade em base úmida

M₀ - Teor de umidade inicial

L - Espessura da parede infinita

P<0,05 - Diferença significativa entre médias de acordo com o Teste de Tukey a 5%.

R² - Coeficiente de determinação

T (°C) - Temperatura medida em Grau Celsius

t (min) - Tempo em minutos

χ² - Qui-quadrado

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOAC - Métodos Oficiais de Análise Internacional

ANOVA - Análise de Variância

CES - Centro de Educação e Saúde

CIP - Classificação Internacional de Patent

EPO - Espacenet, European Patent Register

FSM – Farinha de sementes de melão

INPI - Instituto Nacional de Propriedade Industrial

LATED - Laboratório de Técnica Dietética

LTA - Laboratório de Tecnologia de Alimentos

LABROM - Laboratório de Bromatologia

pH - Potencial Hidrogeniônico

RDC - Resolução da Diretoria Colegiada

SM *in natura* – Sementes de melão *in natura*

SM 50°C - Sementes de melão submetidas a 50°C

SM 60°C- Sementes de melão submetidas a 60°C

SM 70°C- Sementes de melão submetidas a 70°C

UFMG - Universidade Federal de Campina Grande

WIPO - World Intellectual Property Organization

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	18
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA.....	20
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 Objetivos gerais	21
1.2.1 Objetivos específicos	21
CAPÍTULO 2	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.2 O MELÃO (<i>cucumis melo</i> L.).....	24
2.2.1 Botânica, produção e aspectos nutricionais	24
2.2.2 Aproveitamento integral do melão	27
2.2.3 Sementes de melão como matéria prima para o desenvolvimento de farinha: Obtenção, aplicação e teor nutricional	28
2.2.4 Prospecção tecnológica de farinha de sementes de melão (<i>Cucumis melo</i> L.) utilizadas na alimentação humana	29
2.2.4.1 Metodologia da Prospecção tecnológica	30
2.2.4.2 Resultados e discussão da Prospecção tecnológica	30
2.2.4.3 Conclusão da Prospecção tecnológica	30
2.3 SECAGEM.....	31
2.3.1 Fenômeno da secagem	31
2.3.2 Teor de umidade	33
2.3.3 Períodos da secagem	34
2.4 SIMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	35
2.4.1 Descrição da secagem por modelos empíricos	33
2.4.2 Descrição da secagem por modelos difusivos	36
2.4.2.1 Equação de transporte	36
2.4.2.2 Equação de difusão	36
2.4.2.3 Equação de difusão de massa	36
2.4.3 Soluções analíticas da equação de difusão	37
2.4.3.1 Análise da geometria parede infinita	38
2.4.3.2 Condições de contorno	38
CAPÍTULO 3	41
3 MATÉRIAS E METÓDOS	42
3.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	42
3.2 OBTENÇÃO E TRATAMENTO DA MATÉRIA PRIMA.....	42
3.3 DADOS EXPERIMENTAIS DA SECAGEM CONVECTIVA.....	44

3.4 CINÉTICA DE SECAGEM E MODELAGEM MATEMÁTICA.....	44
3.4.1 Descrição da cinética de secagem por modelos empíricos.....	44
3.4.2 Modelos difusivos.....	46
3.4.2.1 Solução analítica para a geometria de uma parede infinita.....	46
3.4.2.1.1 Hipóteses para obtenção da solução analítica para equação de difusão...	47
3.4.2.1.2 Solução analítica para equação de difusão.....	47
3.5 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM PARA ELABORAÇÃO DA FARINHA.....	52
3.6 ELABORAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA FARINHA DE SEMENTES DE MELÃO.....	52
3.7 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICA.....	54
3.7.1 Determinação da Umidade.....	54
3.7.2 Determinação da acidez.....	54
3.7.3 Determinação do pH.....	55
3.7.4 Determinação da atividade de água.....	55
3.7.5 Análise estatística.....	56
CAPÍTULO 4.....	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.1 DADOS EXPERIMENTAIS DA SECAGEM CONVECTIVA.....	58
4.2 MODELOS EMPÍRICOS USADOS NA MODELAGEM MATEMÁTICA.....	59
4.2.1 Melhor ajuste dos modelos empíricos aos dados experimentais.....	59
4.2.1.1 Cinéticas de secagem.....	61
4.2.1.2 Taxa de secagem.....	63
4.3 DESCRIÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE SEMENTES DE MELÃO UTILIZANDO SOLUÇÕES ANALÍTICAS DA EQUAÇÃO DE DIFUSÃO.....	64
4.4 DISTRIBUIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NO INTERIOR DA PAREDE INFINITA.....	69
4.5 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM POR MEIO DE INTERVENÇÃO UTILIZANDO MODELAGEM MATEMÁTICA.....	74
4.6 PROCESSAMENTO DA FARINHA DE SEMENTES DE MELÃO E ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA.....	75
4.6.1 Farinha de sementes de melão.....	75
4.6.2 Análise físico-química da farinha de sementes de melão.....	76
CAPÍTULO 5.....	80
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
CAPÍTULO 6.....	83
6 REFERÊNCIAS.....	84
CAPÍTULO 7.....	91

7 ARTIGO DERIVADO DA DISSERTAÇÃO.....	92
--	-----------

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

O melão (*Cucumis melo* L.) é uma cucurbitácea cultivada em varias regiões do mundo e tem grande expressão econômica. Condições de clima quente e umidade relativa baixa são favoráveis para o cultivo do meloeiro durante todo o ano, contribuindo com altas produtividades e elevada qualidade dos frutos produzidos (GUIMARÃES et al., 2013; COSTA, 2017).

O Brasil é atualmente um dos maiores produtores de melão do mundo. A maior parte da sua produção, cerca de 95%, concentra-se na região Nordeste, tendo o estado do Rio Grande do Norte como o seu maior produtor, seguido do Ceará. Isso se deve, em especial, ao fato da região apresentar características que aumentam seu potencial produtivo e exportador, como clima, solo, potencializando a sua produção nas entressafras (LANDAU et al., 2020).

O fruto do meloeiro é considerado uma fruta saudável, hipocalórica, hiperhídrica, fonte de vitaminas e minerais. Em contrapartida ao seu potencial econômico e nutricional foi verificado que o melão é uma das frutas que apresenta maior índice de resíduos (em torno de 55 %), incluindo uma grande quantidade de sementes com um significativo potencial nutritivo, mas que compõe material de descarte em indústrias de alimentos e no consumo doméstico. (MALACRIDA et al., 2007; MADEIRA, 2017).

As sementes de melão são ricas em fibras, proteínas, lipídios e micronutrientes como potássio, além de apresentar vários benefícios funcionais. As sementes ao serem extraídas do fruto apresentam alto teor de água, tornando-as de fácil deterioração e para que possam ser conservadas por períodos mais longos é necessária a aplicação de técnicas de conservação como a secagem (MEDEIROS, 2017).

A secagem é considerada um dos métodos de conservação de alimentos mais antigos. É um processo que envolve os fenômenos de transferência de calor e massa simultaneamente com o objetivo de eliminar, total ou parcialmente, um fluido (líquido ou vapor) presente num corpo. Isso deve ocorrer através da evaporação do líquido, perante um fornecimento de calor ao corpo. Vários mecanismos de migração de massa são descritos pela literatura, como a difusão de vapor, escoamento de líquido e de vapor e difusão líquida. O modelo de difusão líquida tem sido empregado por diversos autores (SILVA et al., 2009; FARIAS et al., 2013; SILVA, L., 2018; FARIAS et al., 2015; FARIAS et al., 2018).

O processo de secagem está presente na maioria dos trabalhos que se referem à elaboração de novos produtos a partir da utilização de resíduos biológicos, principalmente no reaproveitamento de sementes (BECKER; KRUGER, 2010; SOARES et al., 2012;

CAMARGO, 2016; LIMA, 2020). Apresenta-se como um fator de proteção na qualidade do produto, uma vez que facilita a conservação e armazenamento do produto, protege contra a degradação enzimática e oxidativa, estabiliza os componentes aromáticos por mais tempo e possibilita o acesso ao produto durante todo o ano. Entretanto, o sistema de secagem de produtos biológicos pode ocasionar alguns efeitos indesejáveis como encolhimento, endurecimento superficial, rachaduras, alterações na cor e degradação de alguns nutrientes. Ou seja, é um procedimento complexo, e vem desafiando os pesquisadores a melhorarem cada vez mais as técnicas empregadas, com o objetivo de proporcionar um produto final de melhor qualidade com menor gasto energético (FIOREZE, 2004).

Uma das técnicas de aperfeiçoamento no processo de secagem é o uso de modelos matemáticos. Essa ferramenta vem sendo bastante utilizada para projetar e otimizar o processo de secagem. Por meio dela, é possível descrever características de secagem de diversos produtos agrícolas, e como isso, desenvolver e aperfeiçoar técnicas e equipamentos utilizados na secagem (COSTA et al., 2011; SILVA et al., 2018; LIMA et al., 2020).

1.1. JUSTIFICATIVA

Tendo em vista que, o Brasil é considerado um dos maiores produtores de melão; o Nordeste concentra grande parte da produção do tipo amarelo; é uma fruta com elevado índice de resíduos que apresenta grande potencial para o reaproveitamento dos seus resíduos, em especial as sementes. Além disso, estudos tem demonstrado que as sementes do melão, apresentam propriedades tecnológicas, funcionais e nutricionais significativas para o desenvolvimento de novos produtos. Sendo assim, o seu reaproveitamento traz vários benefícios como redução do desperdício, enriquecimento nutricional das refeições, elaboração de novas receitas, entre outros (MADEIRA, 2017; SILVA et al., 2018; LANDAU et al., 2020).

No que se refere à utilização de sementes de melão, alguns trabalhos já abordam a sua utilização e potencial de inserção no setor industrial (MEDEIROS, 2017; CABRAL 2018; MIRANDA, 2020). No entanto, para a sua utilização, na maioria das vezes é necessário a aplicação de alguma técnica de conservação como a secagem (STORCK et al., 2013). Vale ressaltar, que o procedimento de secagem em produtos biológicos podem ocasionar algumas alterações indesejáveis no produto, dentre elas a degradação de nutrientes (FIOREZE, 2004). No entanto, são escassos os estudos sobre a descrição do processo de secagem destes resíduos, os quais produziram dados importantes para otimização do processo.

Portanto, devido à falta de informações precisas acerca de uma metodologia padrão para o desenvolvimento da secagem de sementes de melão (especialmente do tipo amarelo) e processamento da farinha, a realização desta pesquisa é guiada pela importância de disponibilizar ao meio científico informações referentes à descrição da cinética de secagem e otimização do processo. E com isso, auxiliar na redução de perdas nutricionais e do gasto energético do processamento, ou seja, na obtenção de um produto de qualidade com baixo custo operacional.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Otimizar e simular processos de secagem de sementes de melão (*Cucumis melo* L.) variedade *inodorus* usando modelos matemáticos empíricos e difusivos e analisar a influência da temperatura sobre as propriedades físico-químicas das amostras.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar experimentos para obter a cinética de secagem de sementes de melão para três temperaturas distintas (50, 60 e 70 °C);
- Utilizar os dados experimentais obtidos no processo de secagem para determinar o melhor ajuste para os dados experimentais, a cinética de secagem e as taxas através de modelos empíricos;
- Avaliar o processo de secagem através de modelos empíricos, determinando os parâmetros das equações empíricas através de um *software* de ajuste de curvas;
- Aplicar modelos difusivos (soluções analíticas) para a geometria de parede infinita tendo em vista otimizar o processo, considerando os dados obtidos nos experimentos, a fim de determinar valores para os parâmetros termofísicos inerentes aos fenômenos de difusão de massa;
- Utilizar os parâmetros termofísicos obtidos no processo de otimização para simular e analisar os processos de secagem;

- Simular a distribuição do teor de umidade no interior do sólido, bem como as suas respectivas cinéticas de difusão, utilizando-se de modelos da difusão líquida;
- Verificar a influência da temperatura de secagem nos parâmetros termofísicos;
- Estabelecer um teor de umidade das sementes em base úmida e otimizar o tempo de secagem com posterior processamento da farinha e análise físico-química;
- Determinar as propriedades físico-químicas das amostras de farinha de sementes de melão antes, durante (intervenção) e após a secagem a três temperaturas diferentes (50, 60 e 70 °C).

Capítulo 2

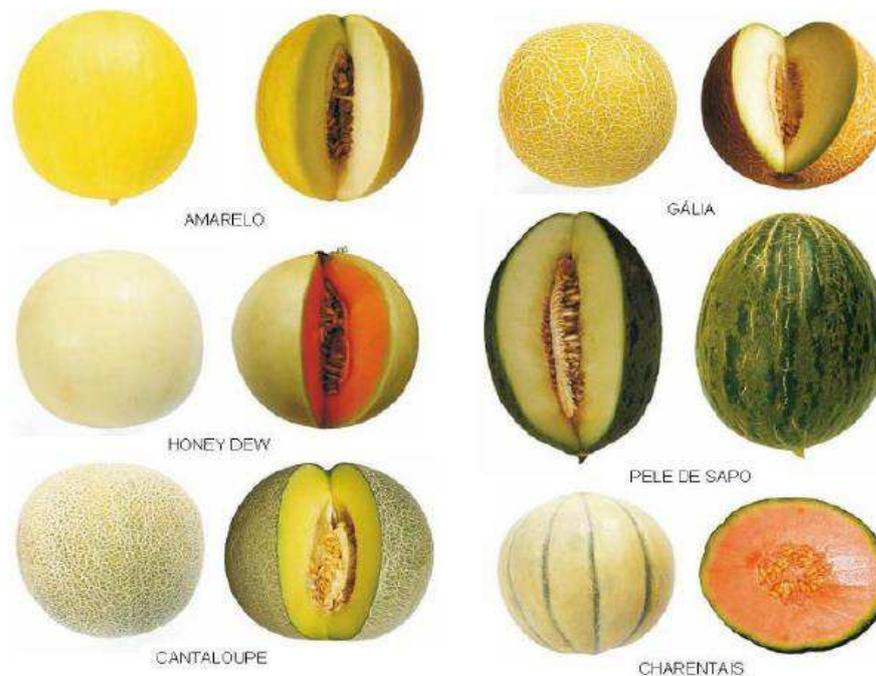
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2 O MELÃO (*Cucumis melo* L.)

2.2.1 Botânica, produção e aspectos nutricionais

O melão faz parte da família das Cucurbitáceas, do gênero *Cucumis* e espécie *Cucumis melo* L. Existem sete variedades botânicas de interesse para a agricultura, no entanto, no Brasil os principais tipos comerciais pertencem apenas a duas variedades botânicas: *Cucumis melo* var *inodorus*, que apresentam frutos sem aroma (inodoros), de casca lisa, coloração amarela, branca ou verde escura e com boa conservação pós-colheita; a outra variedade botânica é *Cucumis melo* var *cantaloupensis*, que dispõe de frutos aromáticos, que pode possuir casca recoberta com rendilhamento corticoso de coloração ligeiramente amarela a esverdeada ou casca verde rugosa com gomos ou suturas no sentido longitudinal e reduzida vida pós-colheita (ARAGÃO, 2011; SOARES, 2020). Na Figura 2.1 é mostrado a classificação comercial dos melões cultivados no Brasil.

Figura 2.1 – Principais tipos comerciais de melões cultivados no Brasil



Fonte: MADEIRA (2017).

Conforme apresentado anteriormente (Figura 2.1), os melões cultivados no Brasil foram agrupados e classificados em 6 tipos, sendo eles:

- Melão amarelo: Pertence ao grupo dos inodoros e é também conhecido como melão espanhol. Tem casca amarela e polpa variando de branca a creme. Seus frutos apresentam formato redondo ovalado. Por ser o mais resistente ao manuseio e apresentar boa conservação pós-colheita, é o tipo mais cultivado em todo o Brasil.
- Pele de sapo: Pertence ao grupo dos inodoros. Recebeu este nome pela coloração de sua casca: verde-clara com manchas verde-escuras, levemente enrugada e dura, com polpa creme esverdeada. Dentre os melões comercializados, é o tipo de maior tamanho.
- Honey dew: Pertence ao grupo dos inodoros, tem formato esférico, casca lisa com cor variando entre o branco e o amarelo.
- Cantaloupe: Pertence ao grupo dos aromáticos e é também conhecido como melão japonês. Apresenta a casca rendilhada com formato esférico e polpa salmão. Exige um manuseio mais cuidadoso e utilização de processo de refrigeração durante a pós - colheita.
- Gália: Pertence ao grupo dos aromáticos, é arredondado, com casca verde no início e amarela quando o fruto está maduro. A coloração da polpa varia de branco a branco esverdeado. Possui rendilhamento menor que os cantaloupes.
- Charentais: Pertence ao grupo dos aromáticos, possui casca lisa, verde-clara e reticulada (costelada), forma arredondada e às vezes achatada, e polpa salmão. Algumas variedades possuem leve rendilhamento.

Nas últimas décadas, a produção mundial de melão vem apresentando um aumento significativo. Cenário esse, também observado no Brasil, onde a melonicultura ocupa posição de destaque na produção nacional de frutas, sendo referência em produtividade e qualidade, passando de importador a exportador dessa fruta. (KIILL et al., 2015).

O Brasil é mais do que autossuficiente na produção de melão. Possui um elevado volume de exportação, podendo observar nos últimos anos cerca de 60% da produção designada para o mercado externo. Se utilizado o critério de porcentagem da produção, o melão é considerado como a fruta mais exportada (ANUÁRIO, 2018).

A região Nordeste é responsável por cerca de 95% da produção nacional de melão e pela totalidade da exportação. Dentre os estados que mantem a liderança em área e produção estão o Rio Grande do Norte e o Ceará (LANDAU et al., 2020).

Um fator de grande influência para região Nordeste ser destaque no cultivo do meloeiro está relacionado às condições climáticas da região, uma vez que, o sucesso do cultivo do melão está ligado à combinação de alta temperatura, baixa umidade e luminosidade. Ou seja, a região apresenta condições ideais de solo e clima para garantir o crescimento, desenvolvimento e aumento da produtividade do meloeiro. Além disso, a concentração do período de safra no Brasil coincide com a entressafra de outros países produtores, a exemplo da Espanha (COSTA, 2017).

A maioria dos melões produzidos no Brasil/ Nordeste é do tipo “amarelo” pertencente à variação *inodorus*. Tem como características boa resistência ao transporte, elevada vida pós-colheita e, geralmente, produzem frutos maiores (FERREIRA, 2015).

O melão é uma fruta de baixo valor energético, rica em água (em torno de 90%), fonte de vitaminas (A, B e C) e minerais (cálcio, fósforo, sódio e em particular o potássio) (TACO, 2011). Costumeiramente o fruto é consumido na forma *in natura*, como também sucos, saladas, iogurtes e sorvetes (MALACRIDA et al., 2007). No Quadro 1, pode ser visualizado a composição centesimal e de minerais do melão.

Quadro 2.1– Composição do melão por 100g de parte comestível: centesimal e de minerais.

	TACO (2011)	FRANCO (2001)
UMIDADE	91,3 %	–
VALOR CALÓRICO	29 Kcal	29,9 Kcal
PROTEÍNA	0,7 g	0,84 g
LIPÍDIOS	Traços	0,13 g
CARBOIDRATOS	7,5 g	6,36 g
FIBRAS	0,3 g	–
CÁLCIO	3 mg	17 mg
FOSFORO	10 mg	16 mg
POTÁSSIO	216 mg	316 mg
SÓDIO	11 mg	84,9 mg

Fonte: autoria própria, (2021). Dados fornecidos pela Tabela Brasileira de Composição de Alimentos –TACO (2011) e pela Tabela de composição química dos alimentos de FRANCO, (2001).

Evidências científicas mostram que o fruto do meloeiro além de ser um produto saudável que fornece as funções nutricionais normais, como fonte de energia, macronutriente e micronutriente, possui propriedades benéficas à saúde, uma vez que, pode atuar como modulador em processos metabólicos, melhorando as condições de saúde e prevenindo o surgimento precoce de doenças degenerativas.

Dentre os benefícios apresentados pelo melão estão: proteger a visão, auxiliar na cicatrização dos ferimentos, contribuir na formação dos ossos, dentes e sangue; atua como calmante, diurético, laxante, alcalinizante. E possui um alto poder antioxidante e propriedades anti-inflamatórias (BRASIL, 2016; MADEIRA, 2017).

Em contrapartida à elevada produção e inúmeros benefícios do fruto do meloeiro, existem uma grande produção de resíduos provenientes dessa fruta, tendo em vista que, cerca de 50% do fruto (casca e sementes) é material de descarte, apesar de apresentar um significativo potencial nutritivo.

2.2.2 Aproveitamento integral do melão

O aproveitamento integral de alimentos é uma ferramenta importante contra o desperdício de alimentos. Na literatura, verifica-se o aumento de pesquisas que apontam que as partes como sementes, cascas, talos, muitas vezes, são mais nutritivas que as partes consumidas usualmente. Ou seja, o consumo dessas partes, é uma prática saudável, sustentável e que contribui para a promoção da saúde (CAMARGO, 2016; MEDEIROS, 2017).

Fundamentado nisso, alguns estudos têm sido realizados com o objetivo de investigar quais as melhores técnicas, procedimentos e processos para o aproveitamento dos resíduos/subprodutos gerados durante o beneficiamento das frutas.

Com relação ao melão (*Cucumis melo*), Marcheto et al. (2008) ao avaliar as partes desperdiçadas de frutas e hortaliças verificaram que o melão foi uma das frutas que apresentaram maior percentual de perda (55,3%), ou seja, uma perda de mais da metade do fruto. Diante disso, pode-se observar que o melão é um alimento com grande potencial para aproveitamento dos seus resíduos, tanto para enriquecer preparações como para reduzir o impacto ambiental. Na literatura, são encontrados vários relatos do aproveitamento e da composição desses resíduos, seja de forma isolada (casca ou semente), conjugada (casca e semente) e em junção com outros resíduos agroindustriais (PEREIRA, 2014; LIMA, 2020).

Madeira (2017) ao analisar os resíduos do melão (*Cucumis melo*) (casca e sementes), verificou propriedades tecnológicas, funcionais e nutricionais significativas para o desenvolvimento de novos produtos, como também apresentou achados importantes quanto ao seu potencial antioxidante e antiproliferativo em células tumorais.

Em relação à aplicação desses resíduos na elaboração de novos produtos foram observados estudos contendo sua adição na elaboração de bolos, torta de frango, cupcake, biscoito, barra de cereais. Quanto à composição nutricional, estes resíduos tem demonstrado serem fontes importantes de fibra e proteína (BECKER; KRUGER, 2010; CUNHA, 2018; MIRANDA 2020). Vale ressaltar, que esses achados são de resíduos de melão de diferentes tipos comerciais, como cantaloupe, charentais e amarelo.

2.2.3 Sementes de melão como matéria prima para o desenvolvimento de farinha: obtenção, aplicação e teor nutricional.

O processamento do melão ainda acarreta o descarte dos seus resíduos. Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), “Resíduos de alimentos são materiais comestíveis saudáveis destinados ao consumo humano que são descartados, perdidos, degradados ou consumidos por pragas em qualquer ponto da cadeia alimentar” (FAO, 1981). Desta forma, os recursos que possam reduzir a perda e o impacto desta matéria orgânica repercute positivamente no meio ambiente e na economia.

Adentrando-se no aproveitamento de subprodutos do melão, especialmente nas sementes, que são ricas nutricionalmente, constituem uma parte significativa de descarte e é o resíduo do melão que mais vem sendo utilizado pelos pesquisadores. Esses pesquisadores aproveitam a farinha desse resíduo como ingrediente para elaboração de novos produtos alimentícios. (MARCHETTO et al. 2008; MEDEIROS 2017; LIMA, 2020)

De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), farinhas constituem a matéria-prima obtida de partes comestíveis de uma ou mais espécies de cereais, leguminosas, frutos, sementes, tubérculos e rizomas por moagem, e outros processos tecnológicos considerados seguros para produção de alimentos.

Para obtenção da farinha de sementes de melão consta na literatura a presença de duas etapas básicas: a secagem e a trituração. Entretanto, foi verificado uma discrepância significativa em relação às metodologias de secagem. Sendo observada secagem em estufa de ventilação, em secador e em forno doméstico, sendo a maior divergência foi relacionada ao tempo e temperatura de secagem.

No Quadro 2.2 estão presentes diferentes metodologias encontradas na literatura para elaboração da farinha de sementes de melão, no qual verifica-se que a temperatura máxima utilizada foi de 200° C em forno doméstico e 80° C, em estufa de ventilação, e a mínima, de 60 ° C em estufa. Em relação ao tempo, o máximo foi de 24 horas em estufa e o mínimo de 45 minutos em forno doméstico (PEREIRA, 2014; MADEIRA, 2017; MEDEIROS, 2017; CUNHA, 2018; SILVA, 2019; MIRANDA, 2020; LIMA, 2020;).

Quadro 2.2 – Métodos, encontrados na literatura, de secagem de sementes de melão para elaboração de farinha.

AUTOR	MÉTODO DE SECAGEM		
	TEMPO	TEMPERATURA	EQUIPAMENTO
PEREIRA, 2014	5 horas	80° C	Estufa sem ventilação
MEDEIROS, 2017	8 horas	60° C	Estufa incubadora
MADEIRA, 2017	24 horas	80° C	Estufa de ventilação
CUNHA, 2018	24 horas	80° C	Estufa de ventilação
MOURA ROLIM et al. (2018)	24 horas	80° C	Estufa de ventilação
SANTOS, 2018	24 horas	80° C	Estufa de ventilação
LIMA, 2020	45 minutos	200° C	Forno doméstico
MIRANDA, 2020	45 minutos	200° C	Forno doméstico

Fonte: Autoria própria, (2021).

As sementes de melão têm demonstrado ser uma importante fonte de proteínas, lipídios e fibras. Além de apresentar um quantidade considerável de minerais essenciais como K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn e P, e seu perfil lipídico, apontar um conteúdo elevado de ácidos graxos essenciais. Malacrida et al. (2007) ao analisar a composição centesimal de sementes de melão amarelo, encontrou os seguintes dados: fibras (30%); lipídios (25,2%); proteínas (20,1%) e carboidratos (15,8%). As características nutricionais das sementes de melão também foram analisadas por Madeira (2017), sendo encontrado em g/100g: 51,75 g de fibras; 22,06 g de proteína e 1,77 g de carboidratos.

2.2.4 Prospecção tecnológica de farinha de sementes de melão (*Cucumis melo* L.) Utilizadas na alimentação humana

2.2.4.1 Metodologia da prospecção tecnológica

A pesquisa de levantamento de patentes ocorreu no mês de janeiro de 2021. O estudo prospectivo iniciou-se com a busca das patentes por meio da inserção das palavras-chave (Farinha de semente de melão, Farinha de sementes de *Cucumis melo L.* e melon seed flour) nos campos de busca (título, resumo e tópico) dos bancos de depósito de patentes nacionais e internacionais (Espacenet, European Patent Register (EPO), PatentScope – World Intellectual Property Organization (WIPO), Web of Science – Derwent) e Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI). O período da busca não foi delimitado, portanto todas as patentes referentes ao tema foram consideradas, com exceção das patentes encontradas no banco de patentes Derwent ao qual possui o período de busca fixo (1963-2021).

Para contabilização dos dados só foram consideradas as patentes de farinha de sementes de melão com utilização na alimentação humana. As variáveis utilizadas no estudo foram os bancos de dados, ano de depósito, países de concessões de depósitos, tipos de titulares, inventores, tipo de utilização do registro, áreas de concentrações de conhecimentos e Classificação Internacional de Patentes (CIP).

Para tabulação dos dados foi aplicado o teste de frequência por meio de planilha personalizada do *Software* Microsoft Excel 2010.

2.2.4.2 Resultados e discussão da prospecção tecnológica

Após o levantamento, foi encontrada apenas uma patente na plataforma PatentScope, cujo o título é “Processo de obtenção de farinha a base de semente do melão amarelo” depositada no ano de 2014, tendo como país de concessão, o Brasil. A patente foi desenvolvida por Silva *et al.* (2014), porém apresenta como titular a Sociedade Unificada de Ensino Superior Augusto Motta. Vale ressaltar que a tecnologia patenteada está relacionada apenas à proteção da metodologia de obtenção da farinha de semente de melão amarelo, portanto não houve reivindicação de proteção do produto adquirido (farinha).

A classificação concedida por meio da CIP (A23L 3/00 e A23L 19/00) relaciona a patente à Seção A – Necessidades humanas e Subseções de conservação de alimentos ou produtos alimentares em geral e preparação ou tratamento de produtos de frutas ou vegetais, respectivamente, com concentração na área de ciência e tecnologia de alimentos.

2.2.4.3 Conclusão da prospecção tecnológica

Dado o exposto, foi verificado que existe uma carência de pedidos de patentes relacionadas à farinha de semente de melão, visto que já existe um número considerável de trabalhos acadêmicos acerca do tema com resultados bem promissores.

Outro quesito propício à discussão foi a reivindicação de proteção apenas do método de obtenção da farinha, excluindo-se a farinha e abrindo lacunas para essa tecnologia ser patenteada por outrem.

Portanto, faz-se necessário que haja uma discussão sobre a importância de patentear tecnologias no meio acadêmico, com posterior formação na escrita desses documentos, visando proteger as pesquisas de grande relevância nacional e internacional e impulsionar os inventores a criarem tecnologias cada vez mais promissoras capazes de solucionar problemas da sociedade atual, além de atuar na geração de renda do país.

2.3 SECAGEM

A secagem é muito utilizada para a preservação de alimentos e tem sido utilizada desde a antiguidade. O princípio básico da secagem é a remoção de uma fase líquida ou gasosa de qualquer material, envolvendo exclusivamente a transferência de calor e massa. Os termos secagem e desidratação tem a mesma finalidade, mas alguns estudiosos da área diferenciam estes termos em função da secagem referir-se a processos que envolvam transferência de calor e massa, enquanto que desidratação pode representar processos de retirada de água de um material através de processos mecânicos (FIOREZE, 2004).

2.3.1 Fenômeno de secagem

Durante a secagem dois processos ocorrem simultaneamente: transferência de calor e transferência de massa. O calor é transferido para o corpo a ser seco por convecção do ar quente ou através do contato do mesmo com a superfície do secador (condução) (FARIAS, 2018). O aquecimento faz com que a água presente na superfície evapore e gere um gradiente de concentração de umidade interna no produto. Esse gradiente (diferença de concentração) causa a migração da água do interior para superfície e assim, a água é eliminada (PARK et al., 2007; FARIAS, 2018).

A migração de água durante a secagem é descrita pelos chamados mecanismos de migração de massa e alguns destes mecanismos são descritos na literatura. De acordo com (FIOREZE, 2004; PARK et al., 2007), os principais mecanismos de migração de massa são:

- Difusão líquida (devido uma diferença de concentração no produto);
- Difusão de vapor (devido um gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura);
- Escoamento de líquido e vapor (causado por variações na: pressão, concentração, capilaridade e temperaturas elevadas);
- Movimento de líquido devido à força gravitacional;
- Movimento de líquido por capilaridade.

Vários processos físicos podem ocorrer simultaneamente para resultarem na secagem. Assim, a descrição do transporte de massa pode ser feito através da junção de alguns destes mecanismos citados. Na literatura, alguns estudiosos consideram os mecanismos de difusão líquida e difusão de vapor na explicação do fenômeno, mas outros consideram apenas o mecanismo de difusão líquida adequado na descrição do fenômeno (CHEMKHI, 2005; FARIAS, 2018).

A etapa da secagem corresponde a uma importante etapa na produção de diversos materiais, sendo amplamente utilizados nos mais variados setores industriais, como: indústrias agrícolas, cerâmicas, químicas, alimentícias, farmacêuticas, de papel e celulose, mineral e de polímeros, entre outras (PARK et al., 2007).

No entanto, a secagem é um processo que deve ocorrer de forma controlada, uma vez que é um processo delicado e, se for mal conduzido, poderá desencadear em perdas consideráveis na produção de produtos que sejam secos de forma inadequada. Assim, o tipo de secagem a ser aplicado em determinados produtos deve ser analisado visando maximizar ganhos produtivos e evitar perdas de matéria-prima.

Assim, a secagem pode ser classificada quanto ao tipo em: **secagem artificial** (através da utilização de secadores) e **secagem natural** (produto exposto ao sol e ao vento); Quanto à periodicidade, em **contínua** e **intermitente** (FIOREZE, 2004).

A secagem natural é utilizada em escalas de produção de pequeno porte, como de pequenos agricultores que colocam suas produções de grãos para secar ao sol. Com o aumento da demanda de produtos (agrícolas, principalmente) para o consumo da população

mundial, a produção em larga escala exigiu métodos de secagem que fossem rápidos e eficientes. Assim, a construção de grandes secadores se tornou a mais eficiente forma de realizar uma secagem controlada e com pequenas perdas de produtos (FIOREZE, 2004).

A secagem natural ocorre com a exposição dos produtos ao ar livre, sendo influenciada por fatores naturais como a velocidade do vento, calor, umidade do ar, entre outros. Ela pode ser realizada pela exposição direta dos produtos cerâmicos ao sol, ou com as peças colocadas em grandes galpões cobertos. A secagem realizada dessa forma pode acarretar perdas consideráveis de matéria prima, além de ser um processo demorado e com um custo alto de mão de obra.

A secagem artificial ocorre em equipamentos chamados secadores, que têm a vantagem de permitir que as condições de secagem sejam controladas, como a temperatura de secagem, a velocidade do fluxo de ar no secador, etc. A secagem realizada nestes equipamentos apresentam alta produtividade, mas por envolver gastos energéticos e com equipamentos, é recomendável para produções de alta rentabilidade. Outra vantagem é a diminuição de gastos com mão de obra (FARIAS, 2018; ARAÚJO, 2018).

Na secagem artificial o secador é ajustado para as condições de secagem antes do início do processo, permitindo que a temperatura do secador e a umidade do ar de secagem possam ser conhecidas. Assim, a secagem é programada e o transporte de água do interior do produto até a sua superfície e, posteriormente para o ar de secagem, ocorre de forma contínua (SILVA, 2007).

2.3.2 Teor de umidade

O teor de umidade (M) ou conteúdo de umidade de um produto é a quantidade de água que pode ser retirada sem danificar o produto e é definido como a razão entre a quantidade de umidade e a massa (úmida ou seca) do produto.

Para produtos secos, existe o teor de umidade inicial (M_i) e o teor de umidade de equilíbrio (M_{eq}). O teor de umidade inicial é o teor de umidade do produto antes de ser seco, já o teor de umidade de equilíbrio corresponde ao valor para o teor de umidade de um corpo exposto a certas condições por um longo período de tempo, ou seja, que naquelas condições não há mais fluxo de massa do corpo para o meio (PARK et al., 2007; SILVA, 2007; ARAÚJO, 2018). O teor de umidade pode ser expresso de duas formas, em base úmida e base seca, sendo definidos a seguir.

- **Teor de umidade em base seca (b.s.)**

Seja massa de água (m_{H_2O}) retirada de um produto a ser seco. O teor de umidade em base seca (M_{bs}), é definido como a razão entre a massa de água retirada do produto e a sua massa seca (m_s), ou seja:

$$M_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \quad (2.1)$$

- **Teor de umidade em base úmida (b.u.)**

Definido como a razão entre a massa de água (m_{H_2O}) e massa total (m_t) do corpo antes de ser seco (massa seca mais massa de água):

$$M_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_s} \quad (2.2)$$

O teor de umidade do produto é um dos fatores mais importantes na secagem, influenciando diretamente na forma que o processo deve ocorrer.

2.3.3 Períodos da Secagem

O processo de secagem se dá a partir de três períodos distintos, representados pelo período de estabilização, período de taxa constante e período de taxa decrescente. O período de estabilização ocorre no início da secagem, sendo caracterizado pelo equilíbrio entre as condições da superfície do produto e do ar de secagem por meio da elevação da temperatura.

O segundo período (taxa de velocidade constante) é baseado na saturação da superfície do sólido, e a transferência da água livre do interior do produto para a superfície ocorre simultaneamente a sua evaporação; O terceiro período denominado de taxa decrescente ocorre devido à redução da transferência de massa ocorrida por causa da diminuição na migração de umidade do interior para a superfície do produto (OLIVEIRA, 2020).

2.4 SIMULAÇÃO MATEMÁTICA

O processo de secagem possui inúmeros benefícios que vão desde a conservação até a redução do peso e, conseqüentemente, redução do custo com transporte. Entretanto, esse processo não apresenta apenas vantagens, podendo ocasionar impactos negativos nas características organolépticas e nutricionais do produto (CALADO, 2014).

No intuito de reduzir os efeitos indesejáveis que o processo de secagem pode ocasionar, pesquisadores vêm realizando diversas pesquisas na busca de metodologias que possam otimizar o processo e garantir qualidade no produto final.

Um das ferramentas que vem sendo bastante explorada pelos pesquisadores para melhoria do processo de secagem é a utilização de modelos matemáticos. De acordo com Adorno *et al.* (2013), a utilização da modelagem matemática acarreta redução de custo e tempo, tornando-se uma ferramenta de grande importância para a produção de alimentos, uma vez que diminui o desperdício de alimentos, pois permite as análises sem que haja o gasto de produtos, apenas através da simulação com os modelos matemáticos.

A simulação da secagem de produtos alimentícios, por meio da modelagem matemática, pode ser feita por meio de dois grupos principais: modelos empíricos e modelos difusivos. Os modelos empíricos consideram unicamente as condições externas de secagem, como a resistência externa à temperatura e a umidade relativa do ar, não considerando fatores inerentes ao produto. Enquanto que os modelos difusivos permitem a compreensão do comportamento da transferência de calor e massa entre o produto e o ar quente (MIDILLI; KUCUK e YAPAR, 2002; PANCHARIYA; POPOVIC e SHARMA, 2002).

2.4.1 Descrição da secagem por modelos empíricos

Existem vários modelos matemáticos para a descrição do processo de secagem. Entre eles, métodos empíricos e fenomenológicos. Os modelos empíricos se baseiam nas condições externas de secagem como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem, não fornecendo indicações sobre o transporte de energia e de água no interior do produto. Sendo assim, a descrição da cinética de secagem por meio desses modelos possui limitações. No entanto, têm como vantagem o fornecimento da velocidade de secagem do produto denominado por taxa de secagem, além disso, possui um baixo custo operacional. (CORRÊA *et al.*, 2007).

2.4.2 Descrição da secagem por modelos difusivos

2.4.2.1 Equação de transporte

A equação geral de transporte para um volume elementar infinitesimal pode ser expressa por (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2001; SILVA, 2007; MALISKA, 2012):

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \vec{v} \Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S \quad (2.3)$$

Na Equação (2.3) cada termo tem um significado quanto ao transporte da grandeza estudada. Os termos são definidos como:

" Φ " é a variável dependente de interesse;

" λ " e " Γ^Φ " são coeficientes de transporte;

" \vec{v} " é o vetor velocidade do meio;

" S " é o termo fonte.

2.4.2.2 Equação de difusão

A equação de difusão é obtida da equação geral de transporte (Eq. 2.3), para o caso em que o meio onde ocorre o transporte da grandeza estudada é estacionário, ou seja, o termo advectivo é zero (0), pois a velocidade do meio é nula ($\vec{v} = 0$). Assim, a equação de difusão é dada por:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) \quad (2.4)$$

2.4.2.3 Equação de difusão de massa

Para o problema de transporte de massa, a equação de difusão massa é obtida fazendo-se: $\lambda = 1$, $\Phi = M$, $\Gamma^\Phi = D$ e $S = 0$:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.5)$$

onde M é o teor de umidade em base seca num instante t , e D é a difusividade efetiva de massa, que é um parâmetro termofísico importante para o estudo do transporte de grandezas por difusão.

Na Equação (2.5), o termo entre parêntesis do lado direito é o negativo da conhecida primeira lei de Fick. Esta lei diz que o fluxo de massa por unidade de tempo e área (J) é dado por:

$$\vec{J} = -D_{ef} \nabla M. \quad (2.6)$$

2.4.3 Soluções analíticas da equação de difusão

A Equação (2.5) é uma equação diferencial parcial e a literatura pesquisada apresenta vários trabalhos que obtiveram ou usaram soluções desta equação obtidas por métodos analíticos e/ou métodos numéricos. A solução da equação requer que as condições físicas do fenômeno em que ela vai ser aplicada determinem as hipóteses relevantes para obtenção da solução. Fatores relevantes para o formato que a Equação (2.5) são a geometria dos corpos estudados, condições de contorno em que o processo ocorre, condições iniciais, possível comportamento do corpo durante o processo, dentre outros.

Solucionar analiticamente a equação de difusão tem se mostrado uma forma eficiente de descrever processos que envolvam transferência de massa ou calor. No entanto, estes métodos apresentam limitações por serem realizados partindo de simplificações como difusividade constante durante todo o processo, geometria simplificada em relação ao formato corpo real, consideração do meio como sendo homogêneo e isotrópico, dentre outras. Em alguns trabalhos em que soluções analíticas da equação de difusão foram utilizadas, a geometria dos corpos estudados foram aproximadas para geometrias simples, como parede infinita, placa, paralelepípedo, cilindro e esferas. Além disso, nestes trabalhos, são encontradas aproximações, onde parâmetros de transporte como a difusividade mássica (D) e o coeficiente convectivo de transferência de massa (h), bem como as dimensões do sólido são considerados constantes durante todo o processo. Em adição, nestes casos considera-se que a grandeza de interesse, transportada por difusão, tem uma distribuição inicialmente homogênea. Soluções onde estas considerações são adotadas podem ser encontradas em

(LUIKOV, 1968; CRANK, 1992; SILVA, 2007; INCROPERA, 2008). No entanto, estas aproximações podem induzir soluções que se distanciam de uma adequada descrição de processos físicos reais. Nestes trabalhos podem ser encontradas soluções da equação para diferentes geometrias simples e sob diferentes condições de contorno.

Apesar das limitações, soluções analíticas podem ser utilizadas para realizar descrições de processos simples de transferência de massa ou calor, sendo uma ferramenta bastante empregada. Naturalmente, essas soluções não devem ser descartadas, sendo uma de suas importantes aplicações, a validação das soluções numéricas. Algo importante na descrição de soluções de equações diferenciais são as condições de contorno, como será visto a seguir.

2.4.3.1 Análise da geometria parede infinita

A aplicação do modelo difusivo requer que a situação a ser estudada num processo que envolva transferência de calor ou massa, por exemplo, seja bem definida quanto à geometria do corpo em que o processo está ocorrendo. Se a geometria real do corpo pode ser aproximada para uma geometria simples, uma solução da equação de difusão pode ser obtida mais facilmente. Análises com essas características podem ser encontradas em Rui-López et al. (2004), Lima et al. (2020), onde produtos agrícolas foram submetidas a processos de transferência de massa e suas geometrias foram aproximadas para parede infinita.

2.4.3.2 Condições de contorno

As condições de contorno são enunciados matemáticos que têm a finalidade de especificar o comportamento da grandeza de interesse no início, nas fronteiras ou nos contornos do domínio do problema estudado. As condições são classificadas como sendo de primeiro, segundo e terceiro tipo (FARIAS, 2018; ATAÍDE, 2018).

- **Condição de contorno de primeiro tipo**

Também chamada de condição de contorno de equilíbrio, prescrita e de Dirichlet, esta condição de contorno estabelece que a superfície de um objeto colocado num meio, entra em equilíbrio imediatamente com o meio (MALISKA, 2004; FARIAS, 2018; ARAÚJO, 2018). Em relação a este estudo, considerando um processo de transferência de massa onde um

determinado corpo ou material deve ser seco num local propício, então esta condição considera que a superfície do material ou corpo entra em equilíbrio imediatamente ao ser colocado no meio onde ocorrerá a secagem.

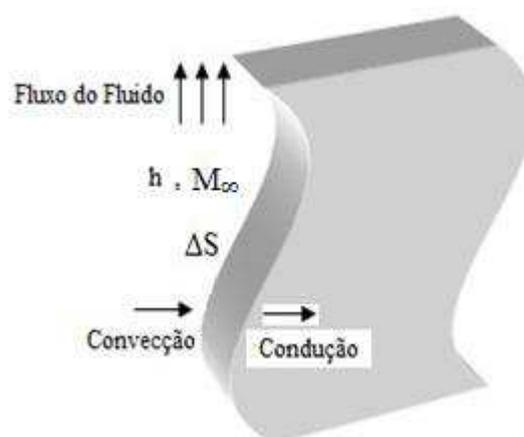
- **Condição de contorno de segundo tipo**

Esta condição de contorno também é chamada de condição de contorno de *Newmann* ou de fluxo prescrito, sendo caracterizada pelo conhecimento do fluxo da grandeza de interesse na superfície de contorno (MALISKA, 2004).

- **Condição de contorno de terceiro tipo**

A condição de contorno de terceiro tipo, também conhecida por convectiva ou condição de contorno de Cauchy, é aplicada considerando que os fluxos difusivo e convectivo são iguais na superfície. Isto se deve ao fato de que o transporte da grandeza de interesse na superfície se dá por convecção, sendo caracterizada por um coeficiente convectivo de convecção (h), que representa a velocidade com que a grandeza é transportada (MALISKA, 2004; FARIAS, 2011). Uma representação desta condição de contorno é mostrada na Figura 2.2.

Figura 2.2: Representação da condição de contorno de Cauchy



Fonte: (FARIAS, 2018)

Se o fluxo da grandeza por convecção no meio é M_∞ , então esta condição é expressa pelo seguinte enunciado matemático:

$$h(M_\infty - M_s) = -D \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_s \quad (2.7)$$

onde M_∞ representa o fluxo de massa no ambiente, M_s representa o fluxo na superfície do sólido, D representa o parâmetro termo físico difusividade de massa e o subscrito s representa a superfície.

Outro parâmetro que surge ao utilizar esta condição de contorno é o chamado número de Biot (Bi), sendo definido com a razão entre a resistência interna e a resistência externa ao fluxo na superfície, sendo, portanto um parâmetro adimensional. Se o processo estudado ocorre num sólido de comprimento característico L , então Bi é definido como se segue:

$$Bi = \frac{hL/2}{D} \quad (2.9)$$

Diante do exposto, neste trabalho será realizado um estudo sobre a secagem de sementes de melão, através de modelos matemáticos: modelos empíricos e soluções analíticas da equação de difusão unidimensional, escrita em coordenadas cartesianas empregando condição de contorno prescrita e convectiva.

Capítulo 3

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA

As etapas experimentais deste trabalho foram realizadas nos Laboratórios de: Técnica Dietética (LATED), Tecnologia de Alimentos (LTA), Bromatologia (LABROM) e Laboratório de Farmacobotânica, Farmacognosia e Fitoterapia do Centro de Educação e Saúde (CES) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), *Campus Cuité-PB*.

3.2 OBTENÇÃO E TRATAMENTO DA MATÉRIA PRIMA

As sementes analisadas nesta pesquisa foram provenientes de melões amarelos (*cucumis melo* L. var. *reticulatos*) obtidos na feira livre do município de Cuité-PB (Figura 3.1). Após a aquisição, os melões foram submetidos a um processo de higienização, onde foram lavados em água corrente com auxílio de uma esponja para remoção da sujidade superficial. Em seguida, iniciou-se o processo manual de remoção das sementes. Logo após a remoção as mesmas foram lavadas e higienizadas com solução clorada a 200 ppm por 15 minutos e em seguida enxaguadas em água corrente. Posteriormente foram alocadas em uma peneira, onde permaneceram por aproximadamente 20 minutos para remoção de água oriunda da lavagem. As sementes e as etapas para obtenção da amostra estão representadas nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente.

Figura 3.1 – Representação dos melões utilizados para a realização dos experimentos



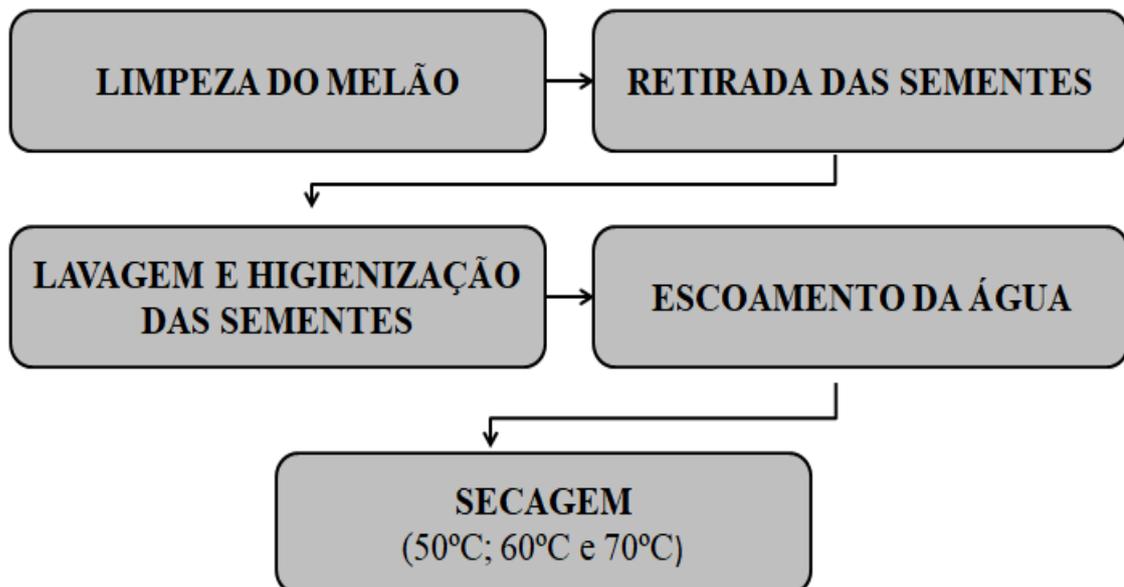
Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 3.2 - Sementes de melão utilizadas no processo de secagem.



Fonte: A autoria própria (2018)

Figura 3.3 - Fluxograma das etapas de preparo das amostras de sementes de melão



Fonte: A autoria própria (2018)

3.3 DADOS EXPERIMENTAIS DA SECAGEM CONVECTIVA

A secagem convectiva contínua foi realizada em uma estufa de circulação e renovação de ar (marca Americanlab, modelo AL102/408), utilizando a técnica de secagem contínua, para três temperaturas distintas (50, 60 e 70 °C). Antes de iniciar o processo de secagem, as amostras tiveram sua massa determinada (em balança semi analítica da marca Bioscale). Em seguida, as amostras foram dispostas em cestos de arame galvanizado de massa conhecida (em triplicata), e foram colocadas na estufa. A cada intervalo de tempo pré-determinado, as amostras foram retiradas, pesadas e recolocadas na estufa. Este procedimento se repetiu até que a massa aproximadamente constante fosse atingida. As médias e desvio padrão da massa e do teor de umidade inicial em base úmida das sementes submetidas à secagem e utilizadas na descrição da cinética de secagem foram calculadas por meio do *Software Microsoft Office Excel* 2010.

3.4 CINÉTICA DE SECAGEM E MODELAGEM MATEMÁTICA

A cinética de secagem é essencial para a modelagem matemática, sendo considerada a relação entre teor de umidade do produto e o tempo.

O teor de umidade indica a quantidade de água contida em um corpo em relação à sua massa total (base úmida) ou em relação à massa seca (base seca) (Brooker et al., 1992). Nesse trabalho será utilizado o teor de umidade em base seca, definido como:

$$\bar{M}_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \Rightarrow \bar{M}_{bs} = \frac{m_t - m_s}{m_s} \quad (3.1)$$

onde \bar{M}_{bs} é o teor de umidade médio em base seca, m_{H_2O} é a massa de água, m_s é a massa seca e m_t é a massa total do produto.

3.4.1 Descrição da cinética de secagem por meio de modelos empíricos

Para a descrição da cinética de secagem das sementes de melão, os dados experimentais foram ajustados às expressões empíricas por meio do *software* de ajuste de

curvas LAB Fit Versão.7.2.46. Foram testados doze modelos disponíveis na literatura (Quadro 3.1) a fim de obter o melhor modelo para descrição da cinética e taxa de secagem.

Quadro 3.1 – Expressões empíricas utilizadas para descrever a cinética de secagem de sementes de melão

Modelo	Nome	Expressão	Referência
1	Lewis	$MR=e^{-at}$	Kaleta e Górnicki (2010)
2	Henderson e Pabis	$MR=ae^{-bt}$	Diamante et al. (2010)
3	Peleg	$MR=1-t/(a+bt)$	Mercali et al. (2010)
4	Page	$MR = \exp(-t^b)$	Diamante et al. (2010)
5	Silva et al.	$MR=e^{-at-b\sqrt{t}}$	Silva et al. (2013)
6	Wang e Singh	$MR=1+at+bt^2$	Kaleta e Górnicki (2010)
7	Logaritmica	$MR=a \exp(-kt)+c$	Pirone et al. (2014)
8	Dois termos	$MR=a \exp(-kt)+b \exp(-k_1t)$	Madamba, Driscoll e Buckle, (1996)
9	Exponencial de dois termos	$MR=a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-kat)$	Ertekin e Yaldiz (2004)
10	Midilli et al	$MR=a \exp(-kt^n+bt)$	Ertekin e Yaldiz (2010)
11	Page modificado I	$MR = \exp(-kt)^n$	
12	Page modificado II	$MR = \exp[-(kt)^n]$	

Fonte: autoria própria (2020).

Para a obtenção do melhor ajuste aos dados experimentais, foram observados os parâmetros do Coeficiente de Determinação (R^2) próximo a 1,0 e menor Qui-quadrado (χ^2). A partir do melhor modelo foi obtida a cinética e a taxa de secagem para os dados experimentais. O segundo foi obtido através da derivada do melhor modelo.

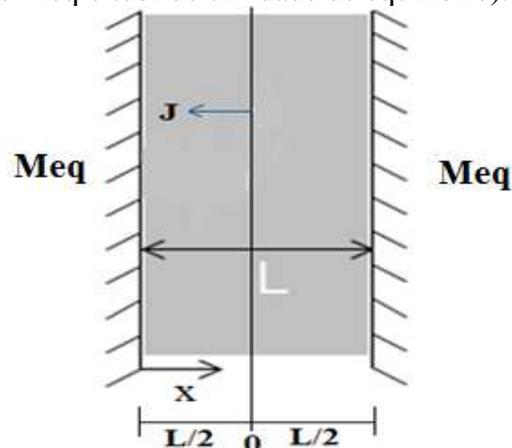
3.4.2 Modelos difusivos

3.4.2.1 Solução analítica para a geometria de uma parede infinita

As soluções analíticas da equação de difusão podem ser obtidas por alguns métodos de resolução de equações diferenciais parciais. Um dos métodos mais utilizados com esta finalidade é o método de separação de variáveis, que é fundamentado na suposição de que a solução da equação é um produto de funções, onde cada função depende de uma das variáveis da equação diferencial. Neste estudo, o processo de transferência de massa que ocorre durante a secagem das sementes de melão se dá por uma aproximação da geometria da parede infinita (unidimensional).

Numa parede infinita, considera-se apenas o fluxo de uma grandeza através de sua espessura L (Figura 3.4), pois as dimensões de sua largura L_y e de seu comprimento L_z são muito grandes em comparação com L , de forma que os fluxos da grandeza tratada nas direções y e z podem ser desconsiderados. Sendo o domínio da parede de $-L/2$ até $L/2$, considera-se o centro de simetria do corpo como sendo a origem de um sistema de coordenadas (Figura 3.4).

Figura 3.4 Representação esquemática de uma parede infinita (J representa o fluxo de massa e Meq o teor de umidade de equilíbrio).



Assim, em coordenadas cartesianas, a equação de difusão unidimensional em regime transiente, é dada a partir da Equação (3.2):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial M}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (3.2)$$

A Equação (3.2) pode ser resolvida numericamente, caso a variação dos parâmetros de transporte como a difusividade (D) e/ou das dimensões do corpo, sejam consideradas durante a secagem. Caso as variações de D e das dimensões do sólido não sejam levadas em consideração durante o processo, uma solução analítica pode ser utilizada.

Neste trabalho, optou-se por utilizar-se de soluções analíticas da Equação (3.2), obtidas por separação de variáveis. No entanto, para utilização desta solução em um problema real, algumas hipóteses devem ser consideradas.

3.4.2.1.1 Hipóteses para obtenção da solução analítica para equação de difusão

A solução analítica da Equação (3.2) pode ser obtida obedecendo-se as seguintes hipóteses:

- as dimensões do sólido não variam durante a difusão da água;
- a difusão líquida é o único mecanismo de transporte de água dentro do sólido;
- a distribuição inicial do teor de umidade deve ser uniforme;
- o sólido é considerado homogêneo e isotrópico;
- os parâmetros termo-físicos não variam durante o processo.

3.4.2.1.2 Solução analítica para equação de difusão

Neste trabalho duas condições de contorno serão utilizadas para a solução analítica: condição de contorno prescrita (primeiro tipo) e condição de contorno convectiva (terceiro tipo).

- **Solução analítica com condição de contorno de primeiro tipo (prescrita)**

Aplicando-se as condições de contorno e simetria de primeiro tipo (prescrita), considera-se que a superfície do sólido assume imediatamente as condições do meio e devido

à simetria do sólido submetido ao processo de transferência de água, no interior do sólido, o fluxo de água é nulo, ou seja:

$$\left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (3.3)$$

Desta forma, aplicando-se esta condição de contorno, a solução para equação de difusão unidimensional em regime transiente é (LUIKOV; 1968; CRANK, 1992; BIRD et al, 2001; INCROPERA et al, 2008):

$$M(x,t) = M_{eq} + (M_i - M_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{L/2}\right) \exp\left[-\mu_n^2 \cdot \frac{D}{\left(\frac{L}{2}\right)^2} t\right] \quad (3.4)$$

onde $M(x,t)$ representa o teor de umidade num instante t e posição espacial x do domínio trabalhado, M_{eq} e M_0 são, respectivamente, o teor de umidade de equilíbrio e o teor de umidade inicial e as expressões para C_n (coeficientes da solução analítica dependente da posição para a condição de contorno do primeiro tipo) e μ_n (raízes da equação característica para condição de contorno do primeiro tipo) são dadas por:

$$C_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n} \quad \text{e} \quad \mu_n = (2n-1) \frac{\pi}{2}. \quad (3.5 \text{ a-b})$$

Sendo que L é a espessura da parede infinita.

O valor médio de M é obtido por:

$$\bar{M}(t) = \frac{1}{L_x} \int M(x, t) dx \quad (3.6)$$

Desta forma, obtém-se que o valor médio para qualquer instante t e posição x do domínio do produto pode ser obtido pela seguinte equação:

$$\bar{M}(t) = M_{eq} + (M_0 - M_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} \exp\left(-\mu_{1n}^2 \frac{D}{(L/2)^2} t\right) \quad (3.7)$$

- **Solução analítica com condição de contorno de terceiro tipo (convectiva)**

A condição de contorno de terceiro tipo considera que os fluxos de massa por difusão (superfície interna) e por convecção (superfície externa) são iguais na superfície do produto. Esta condição de contorno é mostrada na Equação (3.7) e, para este estudo, resulta em:

$$-D \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=\pm L/2} = h \left(M(x, t) \Big|_{x=\pm L/2} - M_{eq} \right) \quad (3.7)$$

A aplicação desta condição de contorno e da condição de simetria (Equação (3.3)) na solução da Equação (3.2), obtida por separação de variáveis, resulta na solução mostrada a seguir (LUIKOV; 1968; CRANK, 1992; BIRD et al, 2001; INCROPERA et al, 2008):

$$M(x, t) = M_{eq} + (M_0 - M_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{L/2}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{D}{(L/2)^2} t\right) \quad (3.8)$$

onde o termo A_n é dado por:

$$A_n = \frac{4\text{sen}(\mu_n)}{2\mu_n + \sin(2\mu_n)} \quad (3.9)$$

O termo μ_n é obtido pela solução de uma equação transcendental dada pela Equação (3.10):

$$\text{cotg}(\mu_n) = \frac{\mu_n}{\text{Bi}} \quad (3.10)$$

O termo Bi que aparece na Equação (3.10) é o chamado número de Biot, que é um parâmetro que relaciona o efeito difusivo e o efeito convectivo de transporte de água na superfície do produto pela seguinte equação:

$$\text{Bi} = \frac{hL/2}{D} \quad (3.11)$$

sendo L_x (dividido por dois para explorar a simetria do centro geométrico do sólido), o comprimento característico do produto.

Então, para um determinado número de Biot, se os μ_n são conhecidos, os coeficientes A_n são completamente definidos. A Equação (3.10) é chamada equação característica e pode ser numericamente resolvida para qualquer número de Biot.

O valor médio de M pode ser obtido, novamente, aplicando a Equação (3.8) na (3.6):

$$\bar{M}(t) = M_{eq} - (M_{eq} - M_0) \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left[-\frac{\mu_n^2}{(L/2)^2} Dt\right] \quad (3.12)$$

onde B_n é dado pela seguinte expressão:

$$B_n = \frac{2Bi^2}{\mu_n^2 (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)} \quad (3.13)$$

A equação transcendental, Equação (3.11) apresenta inúmeros valores para as constantes μ_n para cada valor do número de Biot (Bi). Em processos onde o modelo difusivo é aplicado para a descrição de processos que envolvam transferência de massa, o número de Biot está relacionado à resistência do produto no estabelecimento de um fluxo de água na superfície. Assim, o número de Biot é utilizado na predição de qual condição de contorno é melhor para descrever o processo, uma vez que um valor de $Bi = 0$ corresponde a uma resistência muito grande no fluxo de água na superfície e, $Bi = 200$ indica que a consideração de igualdade entre os fluxos difusivo e convectivo na superfície do produto não corresponde ao processo físico real, de modo que a condição de contorno prescrita é mais apropriada a ser aplicada na descrição do processo.

A predição de qual a melhor condição de contorno deve ser feita mediante sua aplicação na descrição do processo físico. A utilização do modelo difusivo para simular o processo de transferência de massa tem se mostrado eficiente, uma vez as simulações realizadas são muito próximas do fenômeno físico real. No entanto, para estas simulações serem realizadas os parâmetros do processo precisam ser determinados, como a difusividade de massa (D) e o coeficiente convectivo de transferência de massa (h). A função do otimizador é possibilitar a determinação desses valores (h e D), de forma que a solução

analítica produza resultados para a cinética de secagem o mais próximo possível dos dados experimentais. Um dos métodos usados em otimização é o método inverso (Mariani et al., 2008; Mariani et al., 2009; Silva et al. 2011; Farias, 2018), em que são atribuídos valores aos parâmetros de interesse, seguido da solução da equação que descreve o sistema, sendo que os resultados obtidos são comparados com os dados experimentais relativos ao sistema. A partir da comparação, novos valores para os parâmetros são estabelecidos, e o processo continua até que os resultados simulados possam ser considerados suficientemente próximos dos resultados experimentais. Esta comparação envolve a minimização de uma função objetivo, aqui denominada de qui-quadrado (χ^2), descrita pela Equação (3.14).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} [\overline{M}_i^{\text{exp}} - \overline{M}^{\text{sim}}]^2 \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad (3.14)$$

onde $\overline{M}_i^{\text{exp}}$ é o valor experimental, $\overline{M}^{\text{sim}}$ é o valor simulado, N_p é o número de pontos experimentais, $1/\sigma_i^2$ é o peso estatístico referente ao i -ésimo ponto experimental sendo que, na ausência de informações, em geral, tais pesos são feitos iguais a 1.

A determinação destes parâmetros é o que torna possível a simulação do processo. Existem algumas formas de determiná-los, entre elas está um método muito utilizado por alguns pesquisadores da área, que é o método inverso (SILVA et al. 2012; AZEVEDO et al., 2018; SILVA JÚNIOR, 2015; SILVA et al., 2018; AIRES et al., 2017). Este método consiste em utilizar otimizadores computacionais acoplados à solução da equação utilizada para descrever o processo.

O otimizador computacional utilizado neste estudo para a simulação do processo de transferência de massa foi o *software Analytical* (Oliveira et al., 2020). Por meio dele, é possível determinar a difusividade efetiva de água e de sólidos, o coeficiente de transferência convectiva de massa, além de simular as cinéticas de ganho de sólidos e perda de água. O *software* apresenta interface simples, sendo necessário carregar o conjunto de pontos experimentais obtidos na secagem (teor de umidade, tempo) num arquivo texto. Posteriormente, o *software* disponibiliza as condições de contorno para as quais o otimizador tem solução: primeiro tipo ou terceiro tipo. Após a escolha da condição de contorno, o programa permite ao usuário escolher se quer otimizar ou simular o processo difusivo. Uma vez escolhida a opção, é necessário que sejam colocadas o número de termos da solução da equação de difusão, a largura da parede infinita, os teores de umidade inicial (M_i) e de

equilíbrio (M_{eq}) obtidos através da secagem e, finalmente uma estimativa inicial para a difusividade térmica. Como resultados, o programa fornece os valores ótimos para os parâmetros, a cinética de secagem, bem como os valores simulados para o teor de umidade médio em função do tempo de secagem. Com os parâmetros ótimos determinados é possível simular o processo difusivo para obter a distribuição de umidade no interior do produto.

3.5. OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM PARA ELABORAÇÃO DA FARINHA

Após a descrição da cinética de secagem, foram realizadas as otimizações dos tempos de secagem das amostras para a elaboração da farinha de sementes de melão. Os cálculos das otimizações tiveram como base o parâmetro máximo de 15% (g/100g) (b.u.) de teor de umidade. Valor esse, preconizado na Resolução RDC N° 263, DE 22 DE SETEMBRO DE 2005 (BRASIL, 2005), que dispõe sobre o regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos, o qual fixa a identidade e as características mínimas de qualidade para esses produtos.

Para obter a otimização do tempo de secagem para as amostras de sementes de melão, foram utilizados os dados de teor de umidade em base seca (Equação (3.15)) das SM 50°C; SM 60°C e SM 70°C referente à secagem experimental e convertido em base úmida, através da equação abaixo:

$$M_{bs} = \frac{M_{bu}}{1 - M_{bu}} \quad (3.15)$$

onde M_{bs} é o teor de umidade em base seca e M_{bu} é o teor de umidade em base úmida. Assim, se $M_{bu} = 15\%$, então:

$$M_{bs} = \frac{0,15}{1 - 0,15}; \quad M_b = 0,1765 \quad (3.16)$$

3.6 ELABORAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUIMÍCAS DAS FARINHAS DE SEMENTES DE MELÃO

As sementes passaram pelo processo de higienização de acordo com o planejamento experimental descrito anteriormente (Figura 3.3). Em seguida, as sementes foram

encaminhadas para o processo de secagem, com exceção das amostras *in natura* que não receberam tratamento térmico e foram imediatamente acondicionadas e analisadas. As demais amostras foram dispostas em cestos devidamente identificados e encaminhadas para a estufa, previamente estabilizada nas respectivas temperaturas, permanecendo até o término do tempo descrito para cada amostra (Quadro 3.2).

Quadro 3.2 - Tempo de secagem das sementes de melões para elaboração da farinha

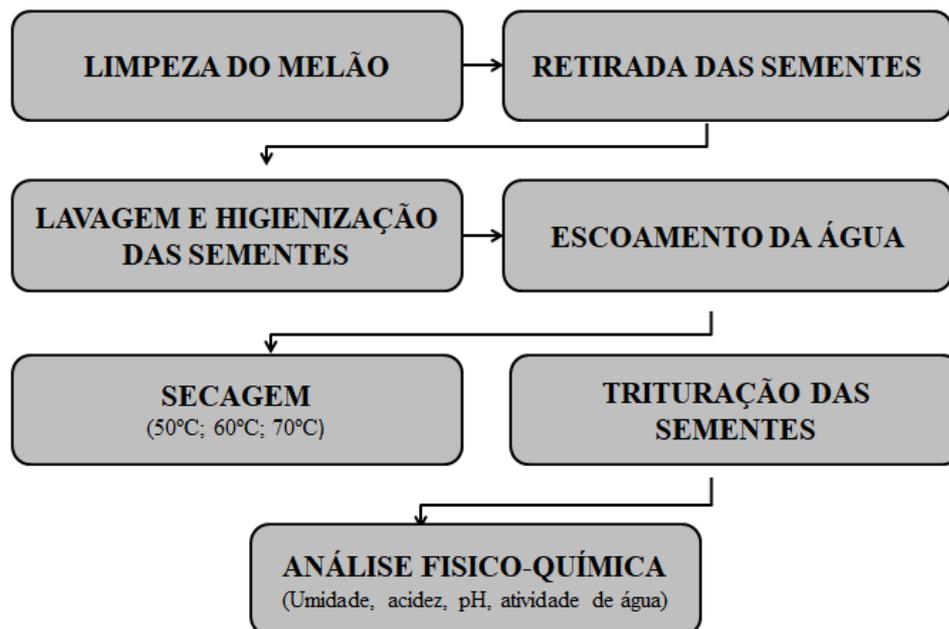
Amostra	Tempo de secagem	
	Intervenção	Final
SM <i>in natura</i>	*	*
SM 50° C	142,2 min	360 min
SM 60° C	94,1 min	360 min
SM 70° C	72,6 min	360 min

SM – Semente de Melão; * Não foi aplicado tratamento térmico.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

Após a secagem, as sementes foram trituradas em liquidificador industrial (marca Colombo Premium, modelo BR com capacidade para 4 litros). Posteriormente, as farinhas foram analisadas fisioquimicamente. O fluxograma de elaboração da farinha de sementes de melão está representado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Fluxograma de elaboração da farinha de sementes de melão.



Fonte: Autoria própria, (2019)

3.7 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

As análises das propriedades físico-químicas (umidade, acidez, pH e atividade de água) das farinhas de sementes de melão foram realizadas de acordo com as normas preconizadas pela Association of Official Agricultural Chemists - AOAC (2016), Instituto Adolf Lutz (2008) e manual do Aqualab (2001). Todas as análises foram reproduzidas em triplicata.

3.7.1 Determinação de Umidade

A umidade foi determinada por meio do método de secagem direta em estufa a 105°C, de acordo com o descrito nos métodos físico-químicos da *Association of Official Agricultural Chemists* - AOAC (2005).

Para determinação da umidade, pesou-se cerca de 3,0 g da amostra em uma cápsula de alumínio previamente aquecida em estufa a 130° C, por uma hora, resfriada em dessecador até atingir a temperatura ambiente. Posteriormente, as amostras foram colocadas em estufa estabilizada a 105°C durante 24 horas e depois, foram transferidas para o dessecador até alcançar a temperatura ambiente. Em seguida, foi mensurada a massa seca por meio da pesagem em balança analítica. Por fim, procedeu-se o cálculo da Equação (3.17) para a obtenção do teor de umidade.

Cálculo:

$$\text{Umidade (\%)} = \frac{N \times 100}{P \text{ ou } V} \quad (3.17)$$

onde: N = perda de peso (amostra seca) e

P ou V = peso ou volume da amostra úmida (g ou mL)

3.7.2 Determinação da acidez

Para as farinhas das sementes de melão, a acidez foi determinada por meio do método de acidez titulável de acordo com o descrito nos métodos físico-químicos para análise de alimentos do Instituto Adolf Lutz (2008).

Para a determinação da acidez, foi pesado em elenmeyer cerca de 10,0 g da amostra por meio de balança analítica. Logo após foram adicionados 100 mL de água destilada para a homogeneização da matéria. Posteriormente, colocou-se 3 gotas da solução de fenolftaleína a 1% dentro da amostra e titulou-se com solução de hidróxido de sódio 0,1 M até a obtenção do ponto de viragem indicado pelo surgimento da coloração rósea persistente. Anotou-se a quantidade de hidróxido de sódio utilizado para o referido cálculo da equação (3.18) para determinação da acidez, ao qual procede:

Cálculo:

$$\text{Acidez em Solução Normal (\%)} = \frac{V \times f \times 100}{P \times c} \quad (3.18)$$

onde:

V = nº de mL da solução de hidróxido de sódio 0,1 N ou 0,01N gasto na titulação.

f = fator da solução de hidróxido de sódio 0,1 ou 0,01 N (olhar no frasco, após a padronização)

P = nº de g da amostra usado na titulação

c = correção para solução de NaOH 1M

3.7.3 Determinação do pH

A determinação do pH foi realizado por leitura direta em potenciometria. Foram pesados 10g de farinha em um béquer e adicionados 100 mL de água destilada para homogeneização da matéria. Em seguida, com o PHmetro previamente higienizado com água destilada e calibrado com as soluções tampões de pH 7,0 e pH 4,0, foi determinada a leitura do pH das amostras com a introdução do eletrodo na solução em agitação suave, após a estabilização da leitura o valor do pH foi registrado (IAL, 2008).

3.7.4 Determinação da atividade de água

A atividade de água foi determinada a uma temperatura de 25 °C em um equipamento medidor de atividade de água - Aqualab®, de acordo com o Manual do fabricante (AQUALAB, 2001).

3.7.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram compilados em planilha personalizada do programa Microsoft Office Excel 2010 e posteriormente submetidos à Análise de Variância Univariada (ANOVA) e teste de Tukey ($p=0,05$) por meio do *Software* Assistat versão 7.7.

Capítulo 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA SECAGEM CONVECTIVA

Foram realizadas três secagens para distintas temperaturas, doravante denominadas de **SM 50°C**, **SM 60°C** e **SM 70°C**, com o objetivo de se estudar o comportamento da transferência de massa no interior das sementes. Na Tabela 4.1 estão dispostos os dados experimentais de teor de umidade inicial, teor de umidade de equilíbrio e tempo de secagem das sementes de melão para cada uma das temperaturas.

Tabela 4.1: Dados experimentais de temperatura, teor de umidade inicial (\bar{M}_i), teor de umidade de equilíbrio (\bar{M}_{eq}) e tempo de secagem das sementes de melão.

Amostras	\bar{M}_i (b.s.)	\bar{M}_{eq} (b.s.)	t (min.)
SM 50°C	1,427	0,043	360
SM 60°C	1,745	0,024	240
SM 70°C	2,135	0,025	210

SM: Sementes de melão; **M_i (bs):** teor de umidade inicial; **M_{eq} (bs):** teor de umidade de equilíbrio; **t (min):** tempo em minutos.

Após a análise dos dados pode ser observado (Tabela 4.1) que o aumento da temperatura de secagem mostrou-se inversamente proporcional ao tempo de secagem. Tendo em vista que, conforme a temperatura de secagem era elevada, os tempos de secagem das amostras diminuía. Observação semelhante foi verificado por diversos investigadores na área agrícola, incluindo Silva e Pereira (2018), ao secar sementes de melancia.

O maior tempo de secagem foi observado na amostra submetida à temperatura de 50°C, onde foi verificado um gasto de 360 minutos para que a amostra entrasse em equilíbrio. E o menor tempo de secagem foi observado na temperatura de 70°C (210 minutos). Ou seja, a elevação da temperatura ocasionou redução no tempo de secagem.

Para realizar os ajustes dos modelos empíricos aos dados experimentais, assim como as otimizações do modelos difusivos, foi utilizada a razão de umidade média, \overline{MR} , calculada como:

$$\overline{MR} = \frac{\bar{M}(t) - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_i - \bar{M}_{eq}} \quad (4.1)$$

Inicialmente, os dados (t, \overline{MR}) foram utilizados para realizar o ajuste dos modelos empíricos aos dados experimentais, assim como na determinação dos parâmetros de processo, através de um otimizador, para cada temperatura de secagem. Como as incertezas dos pontos experimentais não foram determinadas, todos os pesos estatísticos foram considerados iguais a 1, o que significa $\sigma = 1$. Isto corresponde a minimizar o resíduo na Equação (3.14).

4.2 MODELOS EMPÍRICOS USADOS NA MODELAGEM MATEMÁTICA

4.2.1 Melhor ajuste dos modelos empíricos aos dados experimentais

Por meio da utilização do LAB fit *Curve Fitting Software*, desenvolvido por Silva e Silva (2009), foi possível determinar os parâmetros de ajuste das equações empíricas aos dados experimentais, com base na utilização dos modelos descritos no Quadro 3.1. Na Tabela 4.2 são apresentados os parâmetros obtidos para determinar o melhor ajuste dos modelos empíricos aos dados experimentais.

Ao analisar os indicadores dos parâmetros de Coeficiente de Determinação (R^2) e qui-quadrado (χ^2) contidos na Tabela 4.2, pode-se concluir que o modelo que melhor descreveu as cinéticas de secagem nas três temperaturas foi o exponencial de dois termos. E o segundo melhor modelo para as temperaturas de 60 e 70 °C foi o modelo de Midilli et al., seguido de Page em terceiro lugar, enquanto o de Page foi o segundo melhor modelo para a temperatura de 50 °C. O modelo Logaritmica apresentou o pior ajuste aos dados experimentais das três temperaturas. Resultados distintos foram encontrados por Silva e colaboradores (2018), ao secar também sementes de melão, apontando que o melhor modelo foi o de Page.

Pode-se verificar que as diferenças no valor do coeficiente de determinação são muito pequenas para os melhores modelos, ocorrendo uma diferença na quarta casa decimal e algumas vezes, na quinta casa decimal. Este fato pode ser interpretado que mais de um modelo descreve de forma satisfatória as cinéticas de secagem para o produto e para as condições de secagem utilizadas neste trabalho.

Tabela 4.2: Resultados das simulações das cinéticas de secagem descritas por expressões empíricas por meio do Software LABFit.

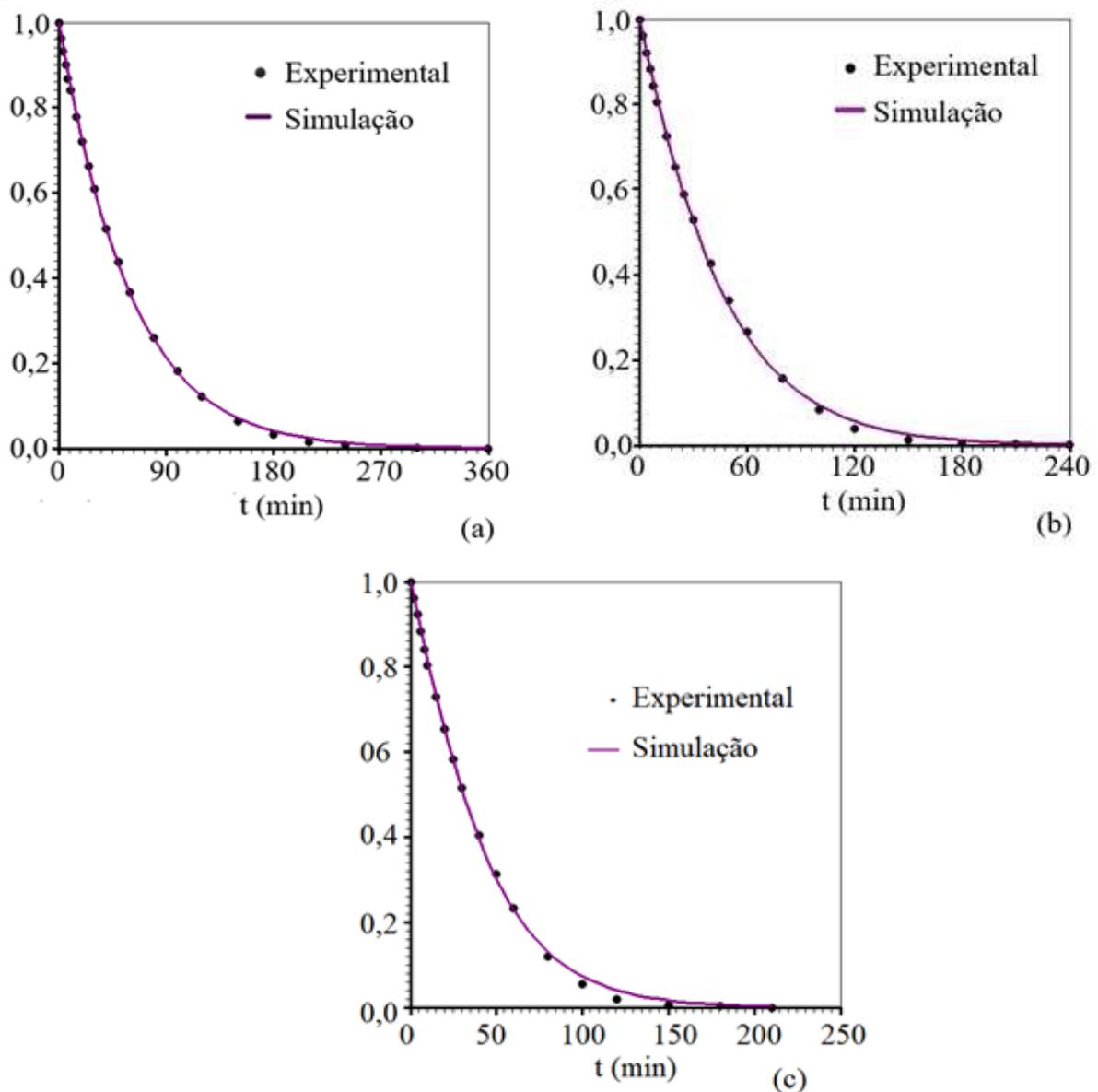
Amostras	Modelo	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	χ^2
SM 50°C	Henderson e Pabis	1,0007	1,6922x10 ⁻²	0,999667	1,34530x10 ⁻³
	Lewis	1,6903x10 ⁻²	-	0,999676	1,34760x10 ⁻³
	Page	1,5375x10 ⁻²	1,0241	0,999718	1,00440x10 ⁻³
	Peleg	4,8318x10 ¹	7,9946x10 ⁻¹	0,993962	1,88528x10 ⁻²
	Silva et al	1,7262x10 ⁻²	-2,3646x10 ⁻³	0,999659	1,25196x10 ⁻³
	Wang and Singh	-9,5817x10 ⁻³	2,0170x10 ⁻⁴	0,959765	2,04491x10 ⁻¹
	Page modificado I	-	-	-	-
	Page modificado II	-	-	-	-
	Logaritmica	-3,5891x10 ²	-8,4983x10 ⁻⁶	0,746917	7,38089x10 ⁻¹
	Midili et al.	-	-	-	-
	Dois termos	-1,7739x10 ⁻³	1,0011	0,999666	1,34294x10 ⁻³
Dois termos exponencial	1,4008	1,9232x10 ⁻²	0,999805	6,98397x10 ⁻⁴	
SM 60°C	Henderson e Pabis	1,0104	2,2415x10 ⁻²	0,999205	2,93800x10 ⁻³
	Lewis	2,2057x10 ⁻²	-	0,999305	3,39052x10 ⁻³
	Page	1,7739x10 ⁻²	1,0594	0,999536	1,55516x10 ⁻³
	Peleg	3,5661x10 ¹	8,266x10 ⁻¹	0,989115	3,57738x10 ⁻²
	Silva et al	2,3739x10 ⁻²	-9,7717x10 ⁻³	0,999348	2,26872x10 ⁻³
	Wang and Singh	-1,0601x10 ⁻²	2,3451x10 ⁻⁵	0,922709	4,06493x10 ⁻¹
	Page modificado I	-	-	-	-
	Page modificado II	-	-	-	-
	Logaritmica	-3,5528x10 ²	-8,2357x10 ⁻⁶	0,667132	1,00017
	Midili et al.	9,9092x10 ⁻¹	-1,5664x10 ⁻⁵	0,999584	1,26538x10 ⁻³
	Dois termos	-1,5654x10 ⁻²	1,0147	0,999243	2,76408x10 ⁻³
Dois termos exponencial	1,5072	2,6776x10 ⁻²	0,999615	1,13274x10 ⁻³	
SM 70°C	Henderson e Pabis	1,0213	2,3991x10 ⁻²	0,998120	6,92883x10 ⁻³
	Lewis	2,3238x10 ⁻²	-	0,998335	8,78200x10 ⁻³
	Page	1,5192x10 ⁻²	1,1175	0,999350	2,27736x10 ⁻³
	Peleg	3,4019x10 ¹	8,2468x10 ⁻¹	0,984723	5,17653x10 ⁻²
	Silva et al	2,6722x10 ⁻²	-1,9788x10 ⁻²	0,998735	4,47776x10 ⁻³
	Wang and Singh	-1,0846x10 ⁻²	2,4238x10 ⁻⁵	0,911857	4,56351x10 ⁻¹
	Page modificado I	-	-	-	-
	Page modificado II	-	-	-	-
	Logaritmica	-3,5813x10 ²	-8,1450x10 ⁻⁶	0,645018	1,09641
	Midili et al.	9,8540x10 ⁻¹	5,7030x10 ⁻⁵	0,999414	1,47284x10 ⁻³
	Dois termos	-3,2520x10 ⁻²	1,0304	0,998311	6,18531x10 ⁻³
Dois termos exponencial	1,6253	3,0523x10 ⁻²	0,999415	1,70344x10 ⁻³	

SM: Semente de Melão; **R**²: Coeficiente de difusividade; χ^2 : Qui-quadrado.

4.2.1.1 Cinéticas de secagem

A Figura 4.1 apresenta as curvas de ajustes do modelo exponencial de dois termos aos dados experimentais.

Figura 4.1 - Curvas do ajuste do modelo exponencial de dois termos (2004) aos dados experimentais do teor de umidade adimensional em função do tempo, em minutos, gerados por meio do *software* LABFit: (a) $T = 50^{\circ}\text{C}$; (b) $T = 60^{\circ}\text{C}$; (c) $T = 70^{\circ}\text{C}$.

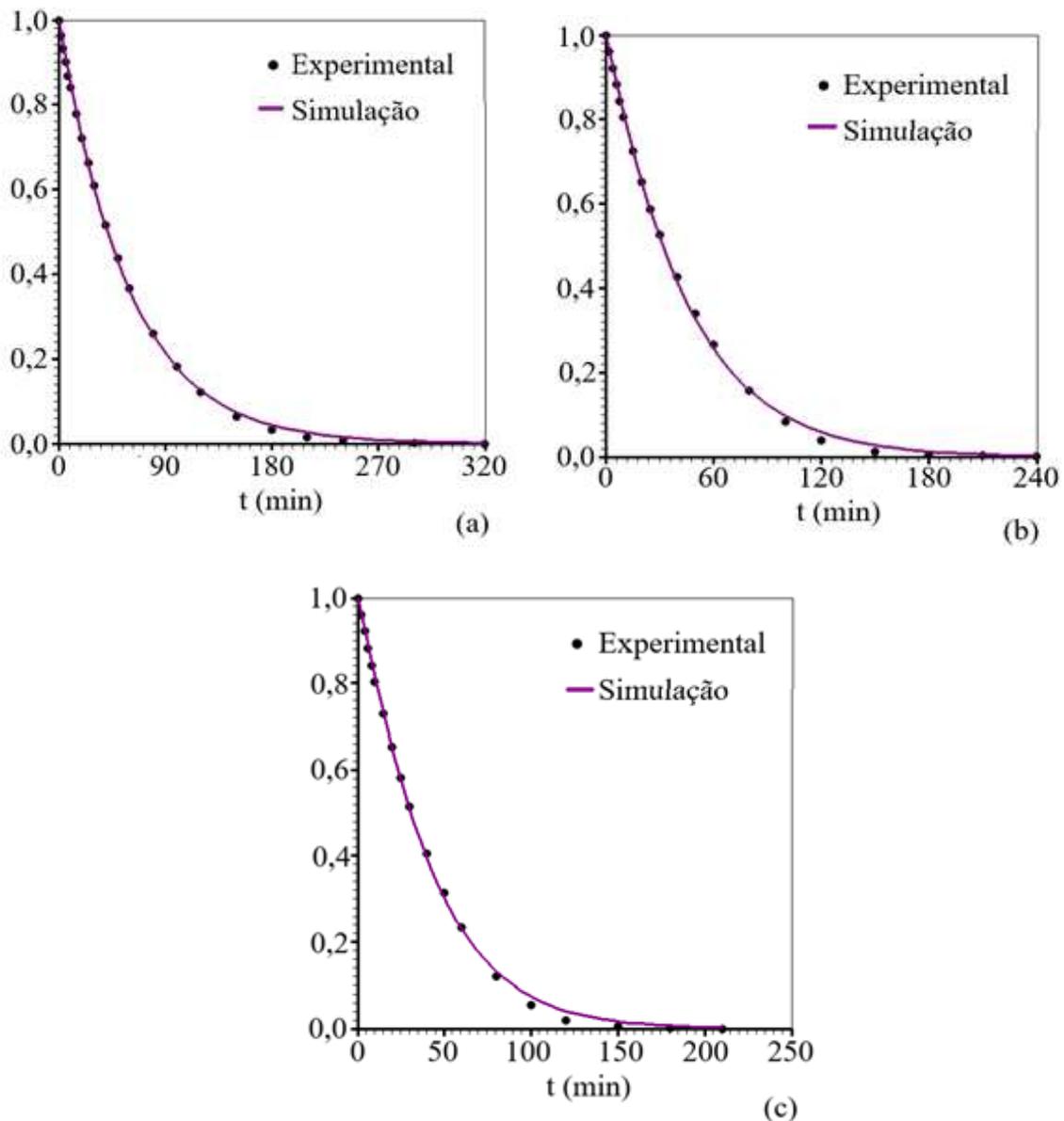


fonte: autoria própria, 2021

Os gráficos da figura acima comprovam o observado através dos parâmetros de Coeficiente de Determinação (R^2) e Qui-quadrado (χ^2), descritos na Tabela 4.2, indicando que o modelo exponencial de dois termos (2004) proporcionou o melhor ajuste aos dados

experimentais. Um modelo bastante utilizado na literatura é o modelo de Page (SILVA et al., 2018; LIMA, 2020). Como este modelo também descreveu de forma satisfatória as cinéticas de secagem para as três temperaturas utilizadas neste trabalho, a Figura 4.2 representa as cinéticas de secagem obtidas através deste modelo (PAGE) para todas as condições experimentais.

Figura 4.2 - Curvas do ajuste do modelo de PAGE aos dados experimentais do teor de umidade adimensional em função do tempo, em minutos, gerados por meio do *software* LABFit: (a) $T = 50^{\circ}\text{C}$; (b) $T = 60^{\circ}\text{C}$; (c) $T = 70^{\circ}\text{C}$.



Fonte: autoria própria, 2021

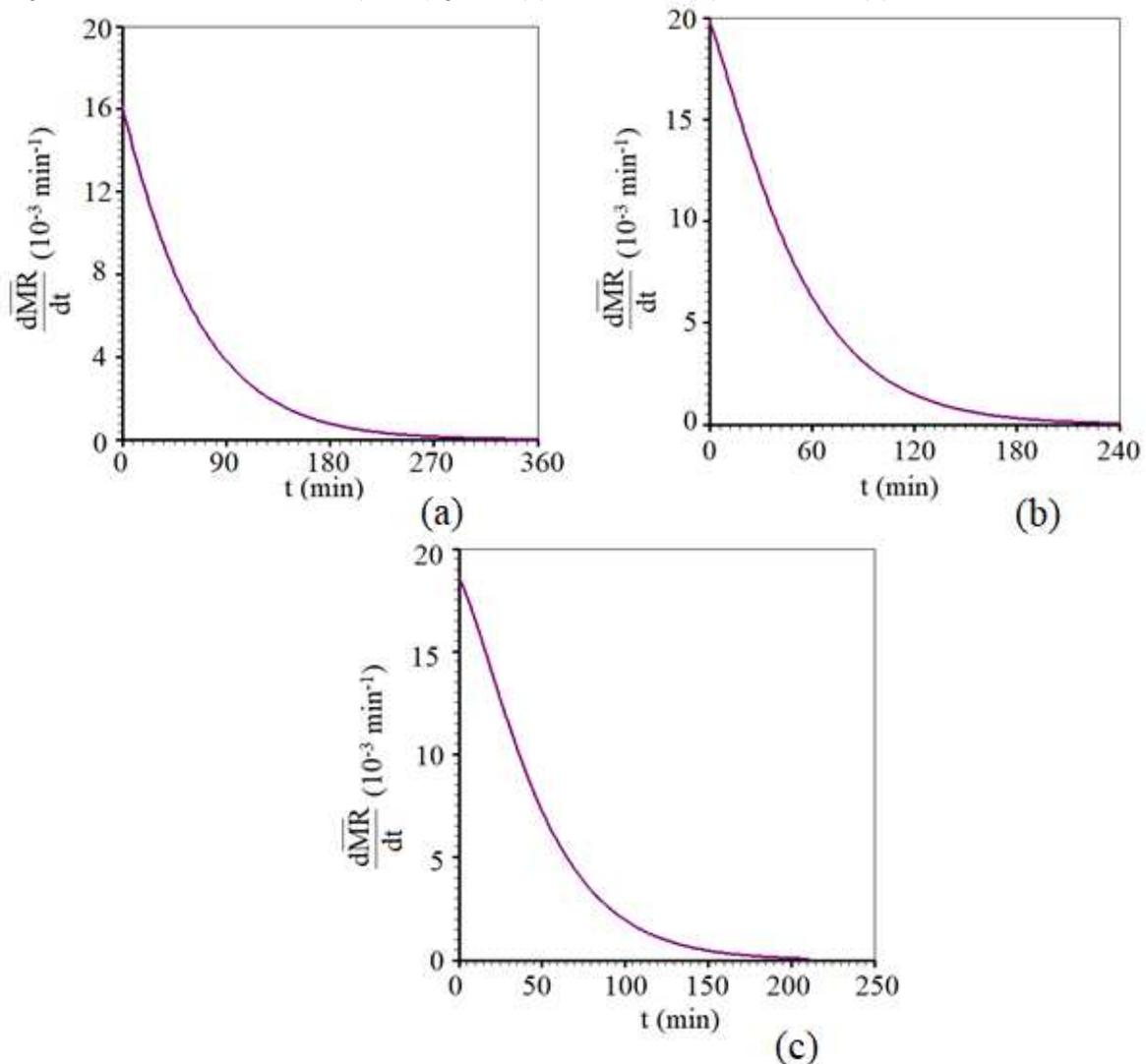
4.2.1.2 Taxa de secagem

Após a definição do melhor modelo de descrição dos dados, esse foi utilizado para a obtenção da taxa de secagem através da derivada do modelo exponencial de dois termos, representada pela Equação (4.2), descrita abaixo:

$$\frac{d\overline{MR}}{dt} = -ak \exp(-kt) - ka(1-a)\exp(-kat) \quad (4.2)$$

A Figura 4.3 descreve as taxas de secagem obtidas por meio do modelo exponencial de dois termos (2004).

Figura 4.3 - Curvas da taxa de secagem das sementes de melão obtidas através do modelo de exponencial de dois termos (2004) para: (a) T=50 °C; (b) T=60 °C; (c) T=70 °C.



Fonte: autoria própria, 2021.

4.3 DESCRIÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE SEMENTES DE MELÃO UTILIZANDO SOLUÇÕES ANALÍTICAS DA EQUAÇÃO DE DIFUSÃO

Neste trabalho são utilizadas duas soluções analíticas para equação de difusão unidimensional em coordenadas cartesianas: com condição de contorno prescrita e condição de contorno convectiva. Com a finalidade de analisar qual condição de contorno apresenta uma solução mais real para descrição da cinética de secagem, foram utilizados otimizadores acoplados a estas soluções analíticas.

Desta forma, os resultados obtidos com as otimizações utilizando o *software Analytical* estão mostradas na Tabela 4.3, onde são mostrados os valores ótimos da difusividade (D), bem como os indicadores estatísticos χ^2 e R^2 .

Tabela 4.3: Resultados com as otimizações realizadas com o *software Analytical* para a condição de contorno do primeiro tipo

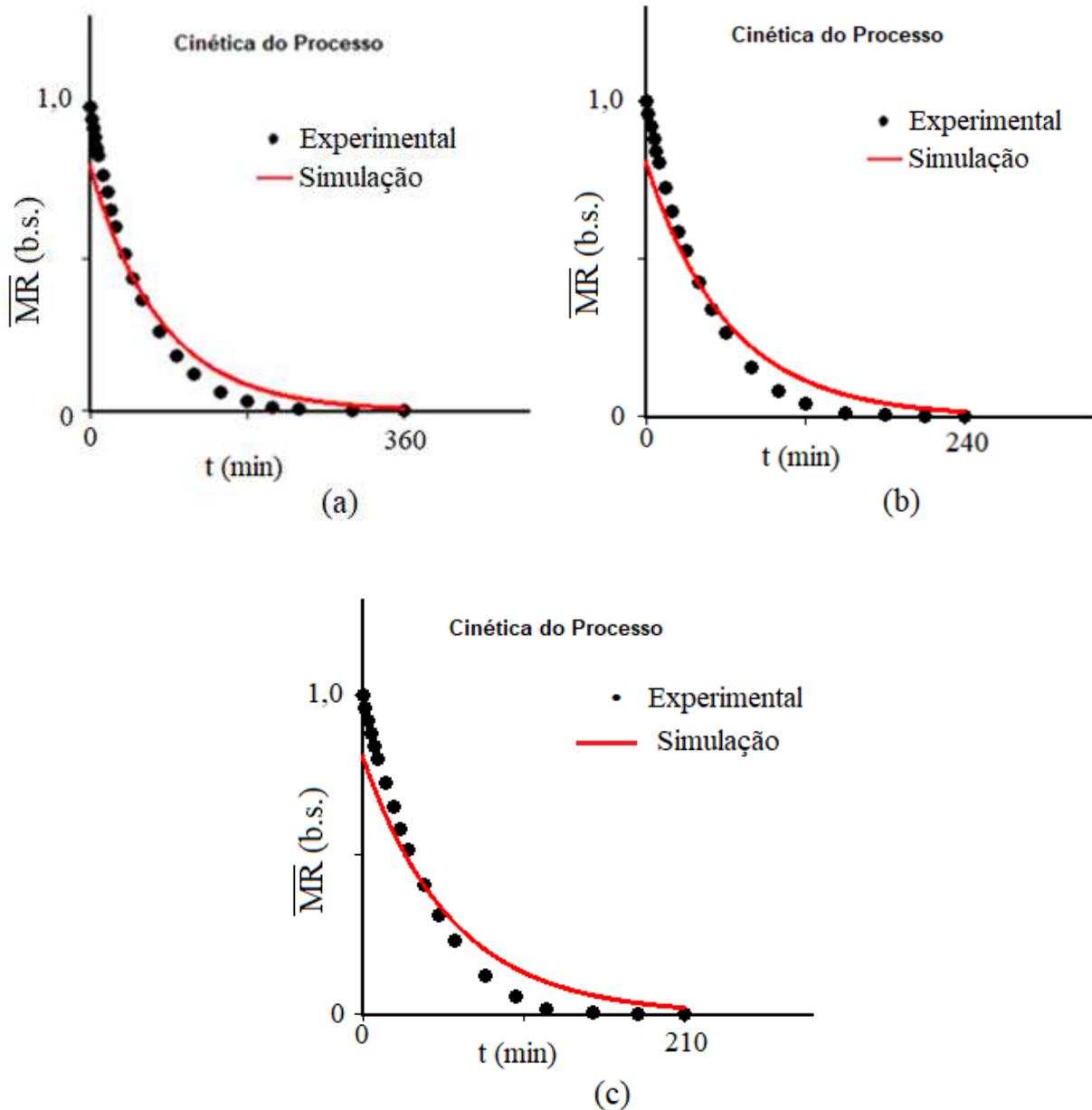
T (°C)	D_{ef} ($m^2 \text{ min}^{-1}$)	χ^2	R^2
50 °C	$5,49904 \times 10^{-9}$	0,19272	0,90363
60 °C	$7,24162 \times 10^{-9}$	0,18482	0,91113
70 °C	$7,69217 \times 10^{-9}$	0,20351	0,90355

T : Temperatura; D_{ef} Difusividade efetiva de massa; R^2 : Coeficiente de difusividade; χ^2 : Qui-quadrado
Fonte: autoria própria, 2021

Uma análise dos resultados obtidos para os valores de D , mostra valores crescentes com a temperatura (T) de secagem, ou seja, este parâmetro aumenta se a temperatura do ar de secagem aumentar. Este fato está em concordância com Silva et al. (2018), que trabalhou com secagem de sementes de melão em temperaturas entre 35 e 50 °C, considerando a geometria do produto um esferoide prolato e empregando a condição de contorno de primeiro tipo. Os valores encontrados pelos autores variaram de $1,553 \times 10^{-10}$ a $2,091 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

Uma vez determinados os parâmetros do processo através da simulação realizada pelo *Analytical*, foi possível gerar os gráficos em que os pontos experimentais e a curva de secagem, gerada pela simulação que o programa realiza, mediante o carregamento dos dados experimentais da secagem são sobrepostos. Estes gráficos são gerados pelo programa e, podem ser vistos na Figura 4.4.

Figura 4.4: Gráficos das cinéticas de secagem para a condição de contorno de primeiro tipo gerados pelo *software Analytical* para: (a) T=50 °C; (b) T=60 °C; (c) T=70 °C.



Fonte: própria autoria, 2021

Uma inspeção dos gráficos da Figura 4.4 mostra que as curvas de secagem simuladas pelo *software Analytical*, usando a condição de contorno de primeiro tipo, sobrepõem os pontos experimentais obtidos e, que os resultados apresentam indicadores estatísticos R^2 e qui-quadrado (χ^2) com valores bons, visto que, quanto mais próximo de um (1) é o valor de R^2

e menor é o valor do χ^2 , melhor é a aproximação feita pelo algoritmo para a determinação do valor da difusividade.

Os parâmetros obtidos com as otimizações realizadas usando a condição de contorno de terceiro tipo estão mostradas na Tabela 4.5. Devido esta condição de contorno considerar a igualdade dos fluxos difusivo e convectivo na superfície do sólido, a otimização disponibiliza outros parâmetros, que são o coeficiente convectivo h e o número de Biot (Bi). Pode-se verificar que para esta condição de contorno, os indicadores estatísticos obtidos foram melhores do que os obtidos para a condição de contorno de primeiro tipo.

Tabela 4.4: Resultados com as otimizações realizadas com o *software Analitical* para a condição de contorno convectiva

T (°C)	D_{ef} (m ² min ⁻¹)	h_w (m ² min ⁻¹)	Biot	χ^2	R^2
50 °C	$2,07908 \times 10^{-8}$	$2,48928 \times 10^{-5}$	1,25716	$2,46682 \times 10^{-3}$	0,99912
60 °C	$2,74726 \times 10^{-8}$	$3,22849 \times 10^{-5}$	1,23392	$5,57138 \times 10^{-3}$	0,99770
70 °C	$3,47601 \times 10^{-8}$	$3,77326 \times 10^{-5}$	1,19016	$1,21812 \times 10^{-2}$	0,99457

T: Temperatura; *D_{ef}*: Difusividade efetiva de massa; *h_w*: Coeficiente de transferência convectiva de massa; Biot; número de Biot; *R²*: Coeficiente de difusividade; χ^2 : Qui-quadrado

Fonte: autoria própria, 2021

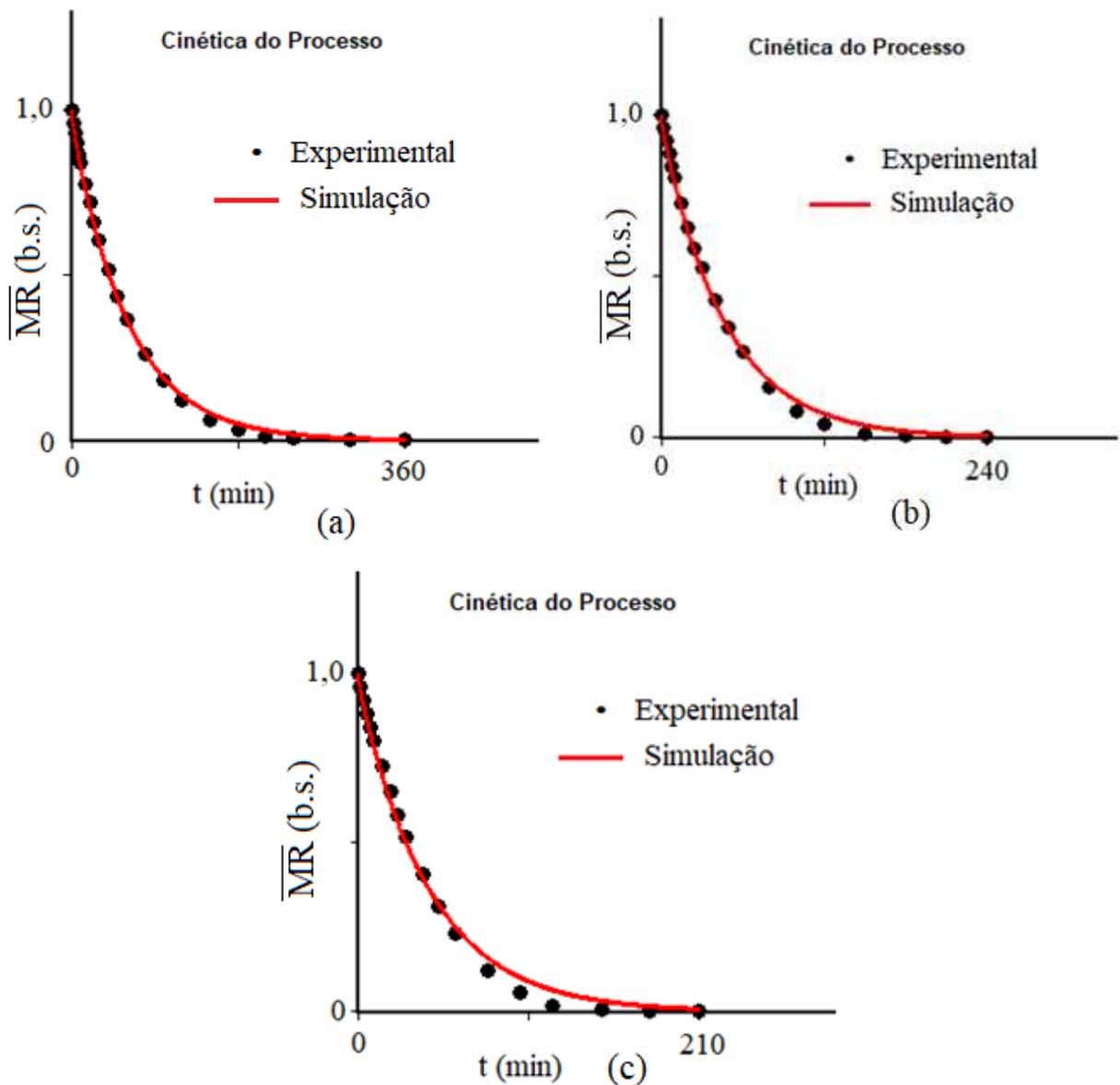
Na Tabela 4.4, observando-se os resultados obtidos, verifica-se valores crescentes com a temperatura para D e h , fato verificado por vários pesquisadores (SILVA et al. 2018, LIMA et al. 2020)

Os gráficos gerados pelo *software Analitical* são mostrados na Figura 4.5.

Examinando os gráficos da Figura 4.5, nota-se que as simulações realizadas usando a condição de contorno de terceiro tipo geraram curvas que se ajustaram aos pontos experimentais, de forma mais satisfatória do que para o ajuste encontrado usando a condição de contorno de primeiro tipo. Estes resultados concordam com o que foi observado ao se analisar os indicadores estatísticos R^2 e o qui-quadrado, isto é, a condição de contorno convectiva apresentou resultados melhores do que os fornecidos para condição de contorno de primeiro tipo. Desta forma, pode-se afirmar que a condição de contorno convectiva descreve

de forma mais realista o processo. Este resultado está de acordo com outros trabalhos presentes na literatura (SILVA et al., 2009; FARIAS, 2011; AZEVEDO et al., 2018).

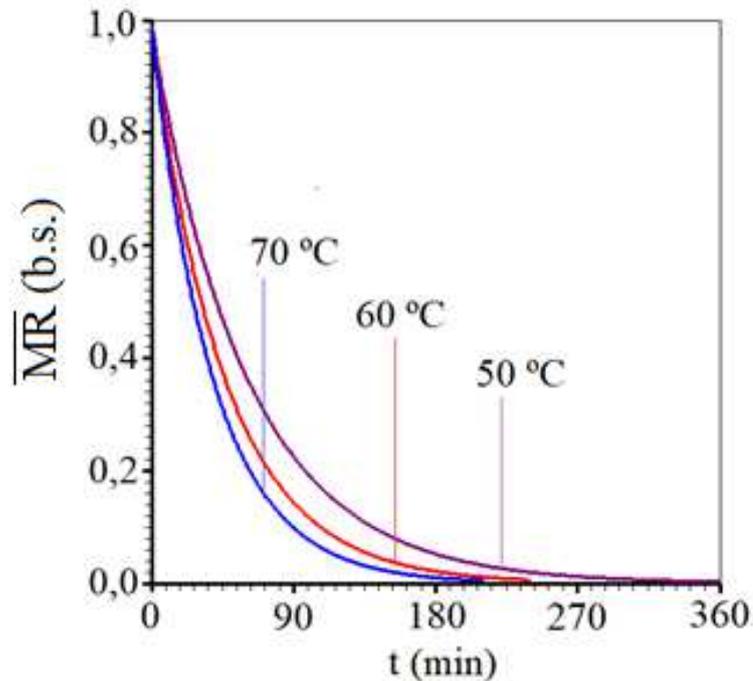
Figura 4.5 Gráficos das cinéticas de secagem para a condição de contorno de terceiro tipo gerados pelo *software Analitical* para: (a) T=50 °C; (b) T=60 °C; (c) T=70 °C.



Fonte: Própria autoria, 2021.

A superposição das cinéticas de secagem simuladas com o *software Analitical* usando a condição de contorno de terceiro tipo para as três temperaturas de secagem, é mostrada na Figura 4.6.

Figura 4.6: Superposição das cinéticas de secagem para as três temperaturas.



Fonte: Própria autoria, 2021.

Verifica-se, através dos gráficos da Figura 4.6, que quanto maior é a temperatura de secagem, mais rápido ocorre o processo de secagem.

Ao verificar os resultados obtidos com as duas soluções analíticas, é possível afirmar que os modelos utilizados descrevem razoavelmente bem a cinética de secagem de sementes de melão, uma vez que a consideração de que os parâmetros de transporte (difusividade, principalmente) ser constantes durante todo o processo, podem resultar em discrepâncias entre a simulação e o processo físico real.

Examinando os gráficos da Figura 4.5, é possível observar que há uma boa concordância entre as curvas simuladas e os pontos experimentais. No entanto, é possível observar que a melhor concordância entre dados experimentais e simulação ocorre nos instantes iniciais do processo. Nos instantes finais do processo, percebe-se uma certa discrepância entre os resultados simulados e os dados experimentais, indicando que a difusividade efetiva neste intervalo de tempo deveria ter um valor menor do que nos instantes iniciais, pressupondo que D é variável com o teor de umidade, o que pode ser verificado com uma solução numérica.

Um outro aspecto que pode ser analisado e discutido é quanto aos parâmetros estatísticos obtidos pelos modelos empíricos e difusivos. Observa-se que os modelos empíricos fornecem parâmetros estatísticos ligeiramente melhores que os fornecidos pelos

modelos difusivos. Apesar destes resultados, os modelos difusivos são preferidos pelos pesquisadores, visto que os modelos empíricos geralmente são obtidos a partir de simples correlações matemáticas dos dados experimentais e os seus parâmetros, em regra, não possuem significado físico. Por outro lado, os modelos difusivos são modelos fenomenológicos que consideram as etapas elementares de transferência e, frequentemente, os seus parâmetros apresentam significado físico. São baseados nos princípios básicos de conservação de massa e energia. Utilizando-se esses modelos, é possível, por exemplo, analisar e estudar a distribuição de umidade no interior de produto em qualquer instante de tempo, como será mostrado na próxima seção.

4.4 DISTRIBUIÇÃO DO TEOR DE UMIDADE NO INTERIOR DA PAREDE INFINITA

A obtenção de informações sobre como o teor de umidade é distribuído no interior e no contorno do sólido é importante, porque essas diferenças geram tensões que podem provocar danos ao produto, tais como trincas, fissuras ou deformações (FARIAS, 2018). Assim, foi analisada a distribuição espacial da razão de umidade no sólido no interior das sementes em alguns instantes de tempo escolhidos arbitrariamente.

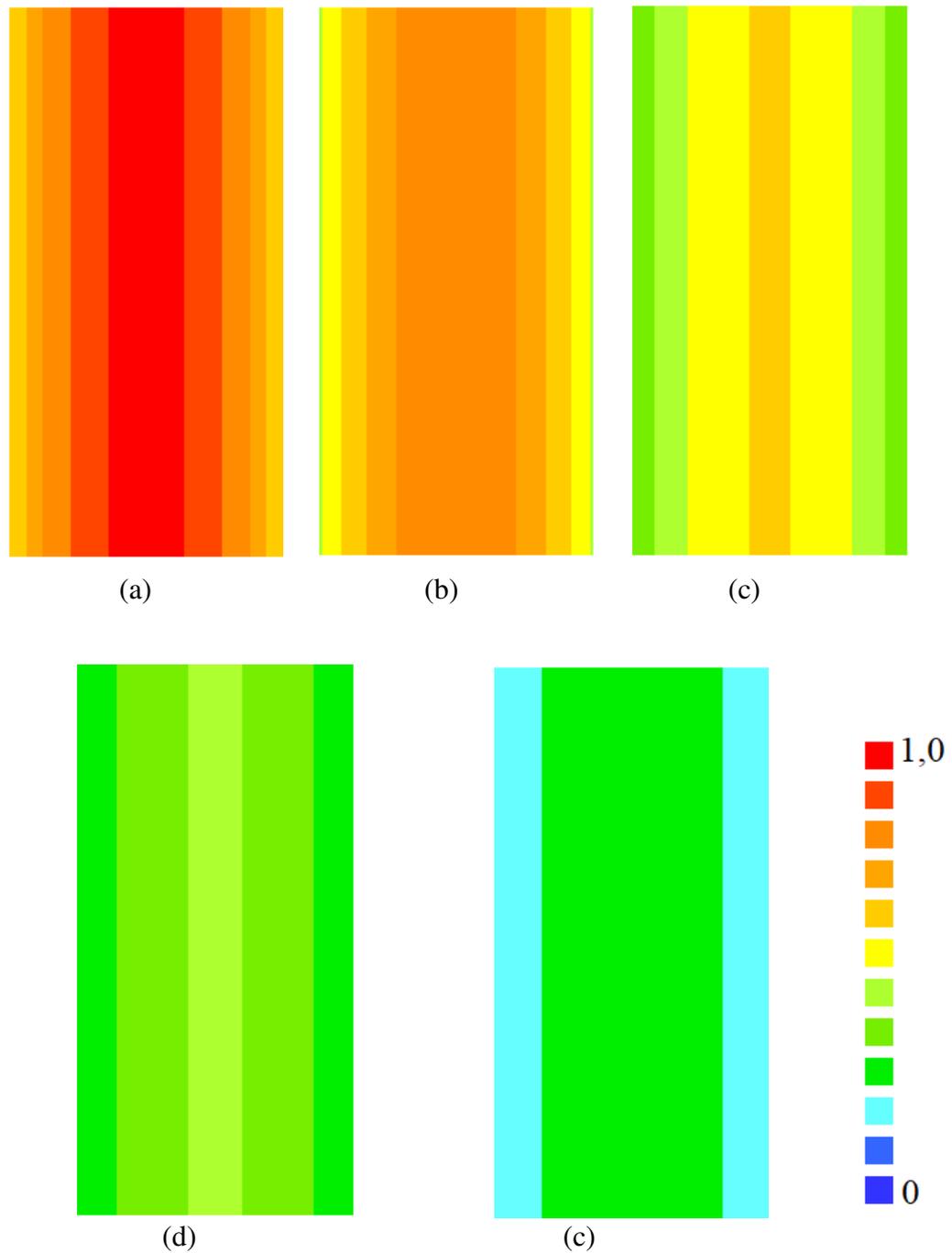
Os instantes de tempo selecionados para análise foram:

- a) $t = 10,08$ min;
- b) $t = 20,16$ min;
- c) $t = 40,32$ min;
- d) $t = 60,48$ min;
- e) $t = 80,64$ min.

Na Figura 4.7 são apresentados os gráficos de contorno para a temperatura de 50 °C, nos 5 instantes de tempo escolhidos.

Pode-se notar que as extremidades do produto, pelo fato de estarem em contato direto com o ar de secagem, secam mais rápido do que a região central, criando um gradiente do teor de umidade que provoca um fluxo de água do centro para as extremidades. Para o instante 80,64 min, percebe-se que os lados mais externos atingiram um teor de umidade bastante reduzido.

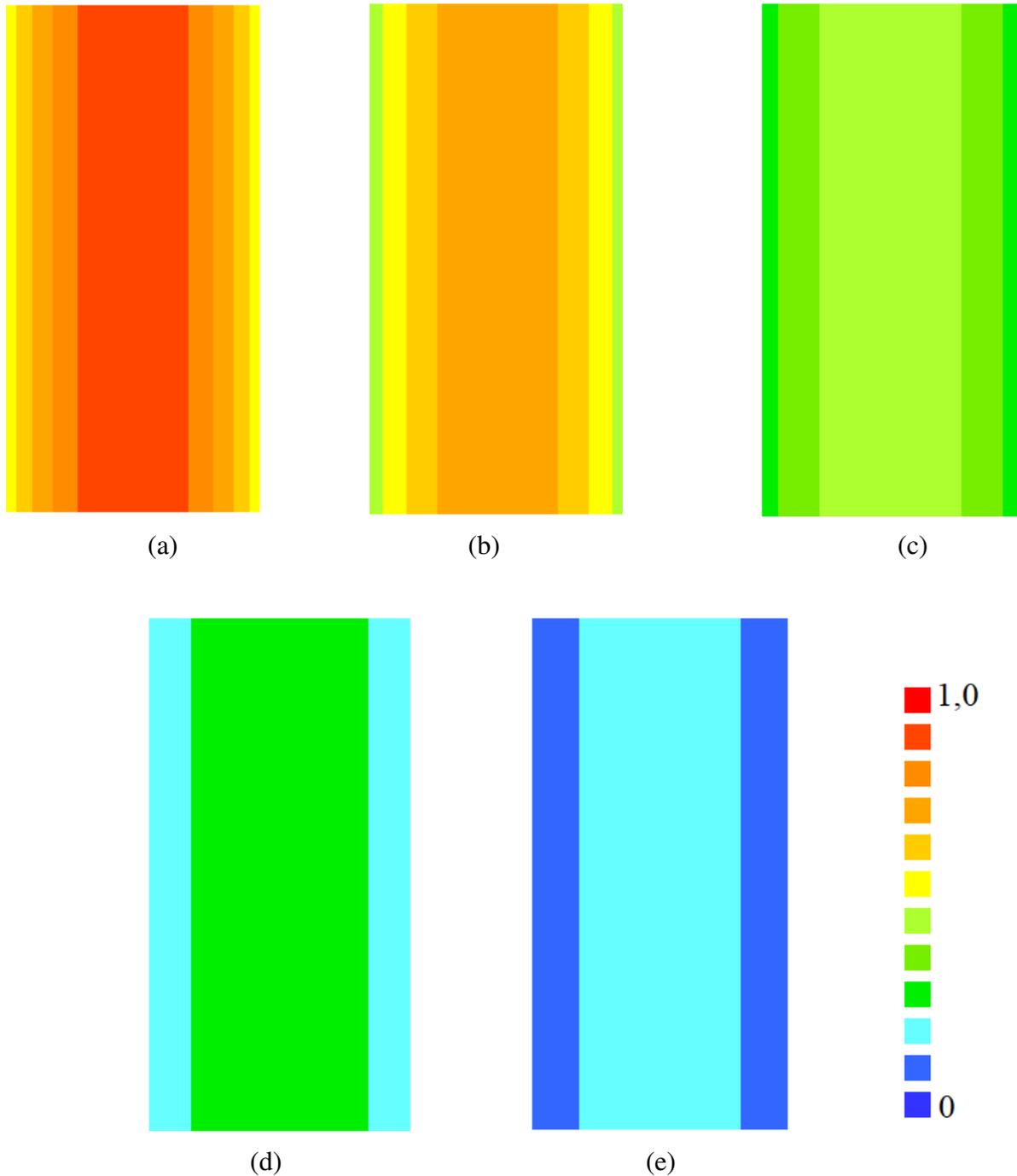
Figura 4.7: Gráficos de contorno para as amostras submetidas a uma temperatura de 50 °C, nos seguintes instantes de tempo: (a) $t = 10,08$ min; (b) $t = 20,16$ min; (c) $t = 40,32$ min; (d) $t = 60,48$ min; (e) $t = 80,64$ min.



Fonte: Própria autoria, 2021.

Os gráficos de contorno mostrando o perfil da distribuição de umidade para a temperatura de 60 °C estão apresentados na Figura 4.8

Figura 4.8: Gráficos de contorno para as amostras submetidas a uma temperatura de 60 °C, nos seguintes instantes de tempo: (a) $t = 10,08$ min; (b) $t = 20,16$ min; (c) $t = 40,32$ min; (d) $t = 60,48$ min; (e) $t = 80,64$ min.

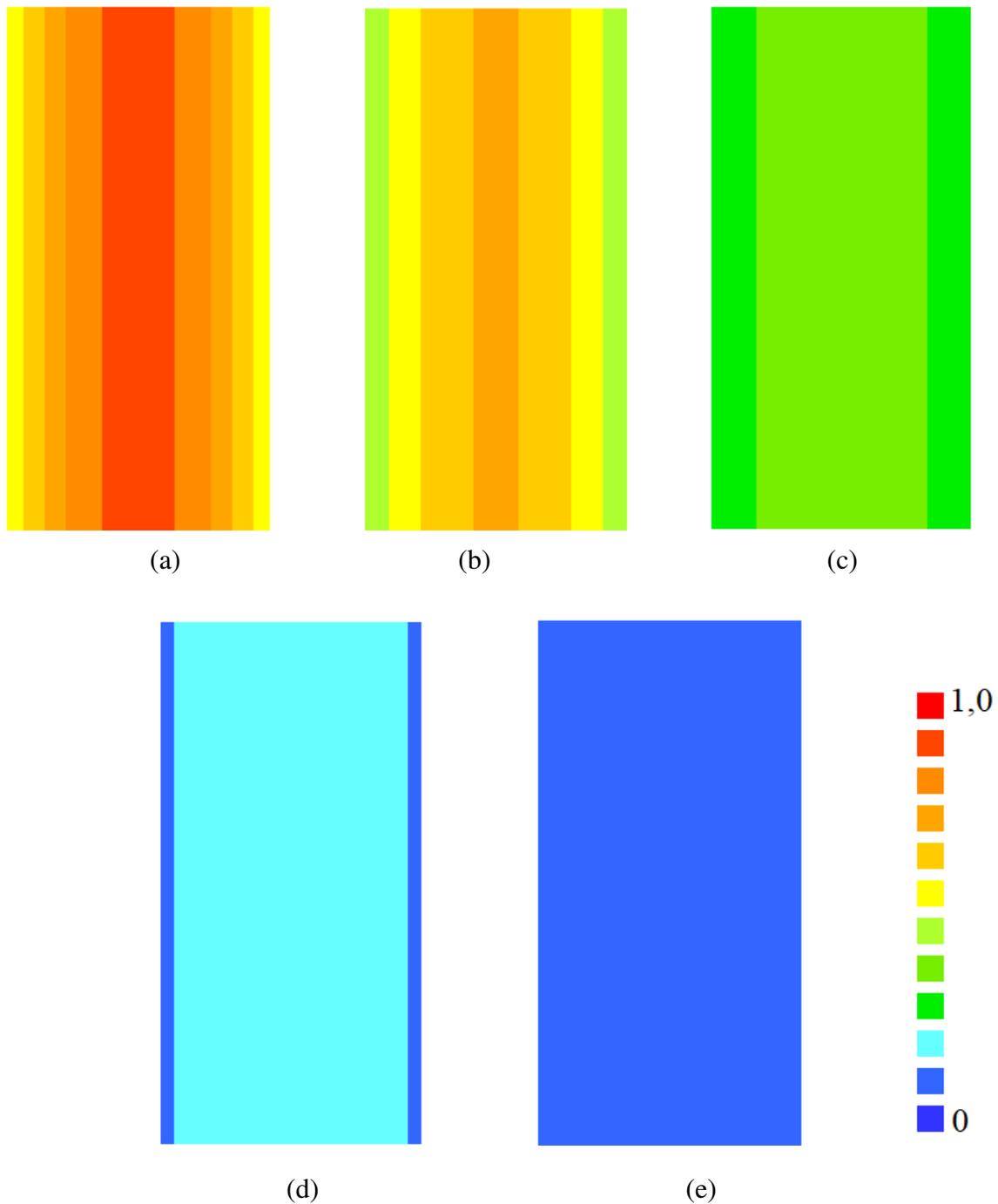


Fonte: Própria autoria, 2021.

Para esta temperatura é possível ver nitidamente uma redução no teor umidade em todos os instantes de tempo ao se fazer a comparação das Figuras 4.7 e 4.8.

Para a temperatura de 70 °C, a distribuição espacial do teor de umidade está mostrada na Figura 4.9, para os mesmos instantes das temperaturas anteriores.

Figura 4.9: Gráficos de contorno para as amostras submetidas a uma temperatura de 70 °C, nos seguintes instantes de tempo: (a) $t = 10,08$ min; (b) $t = 20,16$ min; (c) $t = 40,32$ min; (d) $t = 60,48$ min; (e) $t = 80,64$ min.

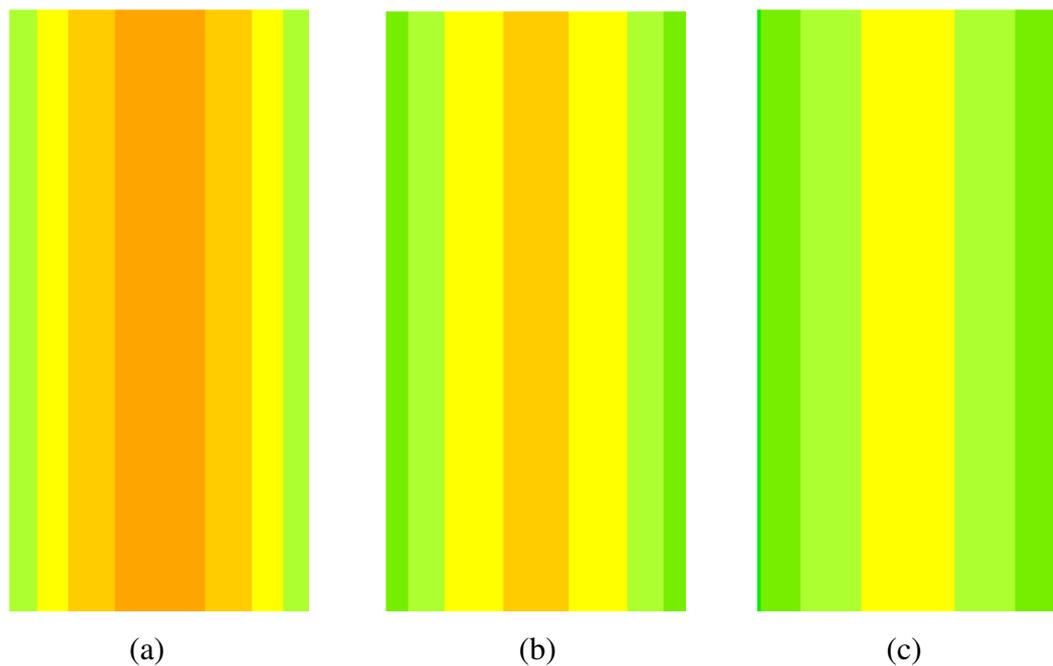


Analisando a evolução da distribuição de umidade com o tempo, apresentada na Figura 4.9, fica evidente como o aumento da temperatura de secagem reduz o tempo o processo. Para esta temperatura, verifica-se que no instante $t = 80,64$ min, por exemplo, todo o domínio estudado apresenta praticamente o teor de umidade de equilíbrio, o que não acontece nas outras temperaturas.

Percebe-se também, em todas as temperaturas estudadas, que os gradientes formados ao longo do tempo não são muito acentuados, principalmente nos instantes de tempo após 40 minutos do processo. Posteriormente a esse tempo de secagem, o teor de umidade caracteriza-se por uma distribuição quase uniforme, o que pode ser explicado pelo fato do fenômeno apresentar um número de Biot relativamente baixo.

Com o intuito de comparar a distribuição do teor de umidade num mesmo instante de tempo para as três temperaturas, na Figura 4.10 está apresentada a distribuição espacial da razão de umidade, para $t = 30,24$ min.

Figura 4.10: Gráficos de contorno para $t = 30,24$ min, para as seguintes temperaturas de secagem do ar: (a) $T = 50$ °C; (b) $T = 60$ °C; (c) $T = 70$ °C.



Fonte: Própria autoria, 2021.

As distribuições de umidade apresentadas nos gráficos da Figura 4.10 para as três temperaturas estudadas, em $t = 30,24$ min., servem para corroborar com os fatos discutidos

anteriormente, isto é, quanto maior a temperatura do ar de secagem, mais rápido ocorre o processo. Além disso, a distribuição do teor de umidade para cada temperatura não apresenta um gradiente muito acentuado, o que é confirmado pelo número de Biot relativamente baixo nas três condições de secagem.

Uma observação que pode ser feita em todos os gráficos de contorno apresentado é quanto à simetria do processo. Nota-se que é possível dividir o domínio ao meio usando uma linha vertical imaginária, de modo que o lado direito do domínio pode ser rebatido para o lado esquerdo. Isto pode ser explicado pelo fato de que as condições de secagem, tais como temperatura do ar e coeficiente de transferência convectivo de massa, possuem o mesmo valor nos dois contornos do produto, lado esquerdo e lado direito. Este fato foi explorado na obtenção das soluções analíticas da equação de difusão.

4.5 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM POR MEIO DE INTERVENÇÃO UTILIZANDO MODELAGEM MATEMÁTICA

A RDC nº263 de 2005 que dispõe sobre a aprovação do regulamento técnico para produtos de cereais, farinha e farelos, estabelece um teor de umidade máximo de 15% para tais produtos. Levando em consideração que as sementes de melão ao final do processo de secagem apresentavam valores de umidade menores (em torno de 3%) que o limite máximo preconizado, foram realizadas intervenções no tempo de secagem visando uma análise mais detalhada do processo, objetivando proporcionar melhorias, a exemplo de redução no tempo de secagem, o que pode aumentar a qualidade do produto final, bem como, propiciar a economia de energia elétrica.

Para tanto, foi realizado uma interpolação nos dados experimentais a fim de saber qual o tempo necessário para que fosse atingido os 15% de umidade.

Tabela 4.5 Redução nos tempos de secagem das sementes de melão submetidas à intervenção do tempo.

Amostras	Tempo de secagem		Economia de tempo/energia
	Intervenção	Final	
SM <i>in natura</i>	*	*	-
SM 50 °C	142,2 min	360 min	217,8 min
SM 60 °C	94,1 min	360 min	265,9 min
SM 70 °C	72,6 min	360 min	287,4 min

SM: sementes de melão; *não foram submetidas a tratamento térmico.
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

4.6 PROCESSAMENTOS DA FARINHA DE SEMENTES DE MELÃO E ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA

4.6.1 Farinha de semente de melão

As farinhas das sementes de melão apresentaram granulometria espessa, com aspecto flocado. Na amostra *in natura* (Figura 4.11) e nas amostras submetidas a intervenção (Figura 4.12), esse aspecto é ainda mais visível.

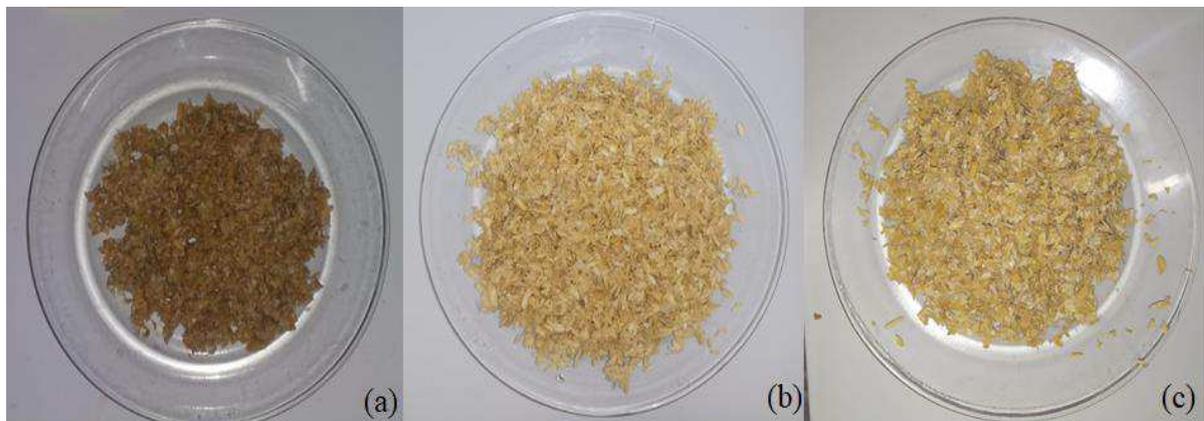
Figura 4.11: Farinha de sementes de melão *in natura*



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

Ao analisar a Figura 4.12 verifica-se que as amostras submetidas à intervenção apresentaram aspecto úmido.

Figura 4.12: Farinhas de sementes de melão submetidas à intervenção do tempo: (a) FSM 50°C por 142,2 min; (b) FSM 60°C por 94,1 min; (c) FSM 70°C por 72,6 min.



. Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

Na figura 4.13, estão presentes as farinhas de sementes de melão submetidas até o tempo final de secagem, ou seja, 360 minutos. Por meio dela, é possível constatar a granulometria espessa das farinhas, que apresenta frações fibrosas, possivelmente em virtude da elevada concentração de fibras presentes nas sementes. Fato esse, constatado por Madeira, 2017, que demonstrou que a farinha de semente de melão possui alto conteúdo de fibras (51,75%), principalmente do tipo insolúvel.

Figura 4.13: Farinhas de sementes de melão submetidas até o tempo final de secagem (360 minutos): (a) FSM 50°C; (b) FSM 60°C; (c) FSM 70°C.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

4.6.2 Análise físico-química da farinha de sementes de melão

Na Tabela 4.6 estão descritos os resultados das análises físico-químicas das farinhas de sementes de melão (FSM) *in natura*, submetidas à intervenção e às que permaneceram até o final da secagem.

Observou-se que a umidade das farinhas de sementes de melão submetidas até o final da secagem, variou de 5,33 a 3,54%, estando de acordo com a RDC n° 263/2005 que determina o máximo de 15,0% de teor de umidade (BRASIL, 2005). Também foi possível observar que não houve diferença estatística entre o teor de umidade das amostras de farinha que permaneceram até o final da secagem (360 minutos), ou seja, nesse caso a temperatura não influenciou no teor de umidade final. Valores de umidade próximos ao encontrados neste estudo foram relatados por Madeira (2017), que obteve 3,55% de umidade em farinha de semente de melão; e por Malacrida et al (2007) que relatou 5,6% de umidade para o mesmo tipo de farinha.

Tabela 4.6 Resultado das análises físico-químicas das farinhas de sementes de melão

Amostras	Tempo	Análises Físico-químicas			
		Umidade (%)	Acidez (%)	pH	A _w
FSM <i>In natura</i>	-	60,30 ^a	1,48±0,1 ^d	7,16±0,03 ^b	0,99 ^a
FSM 50°C Intervenção	142,2min	34,35±0,18 ^c	2,07 ^{cd}	7,14±0,03 ^b	0,99 ^a
FSM 50°C Final	360 min	5,33±0,65 ^d	5,91±1,11 ^a	7,35±0,04 ^a	0,36±0,01 ^b
FSM 60°C Intervenção	94,1 min	34,79±0,26 ^c	3,55 ^{bc}	6,65±0,04 ^d	0,99 ^a
FSM 60°C Final	360 min	3,64±0,09 ^d	5,91±0,45 ^a	6,80±0,02 ^c	0,21 ^d
FSM 70°C Intervenção	72,6 min	45,92±2,86 ^b	2,50±0,3 ^{cd}	6,79±0,05 ^c	0,99 ^a
FSM 70° C Final	360 min	3,54±0,09 ^d	4,57±0,75 ^{ab}	6,76±0,02 ^c	0,23±0,01 ^c

FSM*:Farinha de sementes de melão; Aw: Atividade de água; Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Quanto à atividade de água foi observado que todas as farinhas que foram submetidas até o final da secagem apresentaram teores de a_w abaixo do valor limitante para o desenvolvimento da maioria dos microrganismos ($a_w < 0,6$), porém devem ser levados em consideração outros fatores como disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura, substâncias antimicrobianas, entre outros, para manter a estabilidade microbiológica do produto (FELLOWS, 2006). Resultados opostos foram verificados nas farinhas que sofreram intervenção no tempo de secagem, as quais apresentaram altos teores de a_w (0,99). Teor esse, característico de frutas frescas e vegetais, e que em temperatura ambiente possibilita a proliferação de microrganismos.

Reforçando a ligação do baixo teor de umidade e de atividade de água das sementes secas com a segurança para a não proliferação de microrganismos é exposto na Figura 4.14 sementes de melão secas no ano de 2018 e que atualmente (2021), ainda encontra-se em bom estado de conservação, com ausência de alterações em seu aspecto físico e sem produção aparente de microrganismos.

Da mesma forma que a umidade e atividade de água, o pH e acidez é um importante parâmetro para qualidade microbiológica do produto. O pH demonstra o inverso da concentração de íons hidrogênio (H^+) de um alimento, e quanto maior essa concentração

menor é o valor do pH, sendo a redução do pH, uma das barreiras utilizadas para inibir a multiplicação microbiana (JAY, 2005;GAVA; SILVA, 2008).

Figura 4.14: Imagem atualizada de sementes de melão secas no ano de 2018



Fonte: autoria própria, 2021

O pH presente nas farinhas de melão submetidas a intervenção e ao tempo final de secagem variou de 7,36 a 6,65, onde são classificadas numa faixa de pH em torno da neutralidade. Embora a variação tenha sido pequena em relação aos tratamentos, pode-se observar uma redução dos valores de pH conforme a temperatura era elevada, respaldado pela literatura que afirma que o pH do meio se torna mais ácido a medida que a temperatura aumenta (JAY, 2005).

Medeiros (2017), ao analisar a atividade de água e pH da farinha integral de sementes de melão relatou valores próximos aos apresentados nesse estudo, apresentando atividade de água menor de 0,6 (0,49) e pH de 7,63.

Os valores de acidez das amostras de farinha submetidas a intervenção no tempo de secagem foram menores do que as que permaneceram até o final da secagem, fato esse, que pode ser justificado devido a secagem, e conseqüentemente redução no teor de umidade das amostras, ocasionar uma concentração de alguns nutrientes e compostos, como os ácidos orgânicos. Nunes et al. (2017), também encontrou valores de acidez maiores em resíduos de abacaxi secos se comparados aos *in natura*.

As farinhas que sofreram uma intervenção no tempo de secagem a temperatura de 50°C, 60°C e 70°C apresentaram respectivamente valores de acidez 2,07; 3,55 e 2,50. Enquanto que as amostras que permaneceram até o final do tempo estabelecido para as referidas temperaturas apresentaram 5,91; 5,91 e 4,57 respectivamente. Valores maiores de acidez foram encontrados por Medeiros (2017), ao analisar farinha de sementes de melão refinada e integral observou 7,92 e 9,89 de acidez respectivamente.

Capítulo 5

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Quanto à descrição dos dados experimentais por meio dos modelos empíricos, o modelo exponencial de dois termos apresentou os melhores parâmetros de coeficiente de determinação (R^2) e qui-quadrado (χ^2), resultando no melhor ajuste aos dados experimentais. Através desse foi descrita a cinética e taxa de secagem e constatou-se que a temperatura apresentou influência significativa no tempo de secagem das sementes;
- Quanto à descrição da cinética de secagem por meio dos modelos difusivos, foram utilizadas duas condições de contorno: condição de contorno de primeiro tipo (prescrita) e a condição de contorno de terceiro tipo (convectiva). A condição de contorno de terceiro tipo a que descreveu de forma mais realista o processo.
- Em relação a distribuição do teor de umidade no interior da parede infinita, nota-se que as extremidade do produto secam mais rápido do que a região central criando um gradiente do teor de umidade que provoca um fluxo de água do centro para as extremidades, e ao observar a evolução da distribuição de umidade com o tempo, ficou evidente que quanto maior a temperatura do ar de secagem, mais rápido ocorre o processo. Além disso, a distribuição do teor de umidade para cada temperatura, não apresenta um gradiente muito acentuado, o que é confirmado pelo número de Biot relativamente baixo nas três condições de secagem.
- Com relação ao estudo das otimizações no tempo de secagem, foi verificado a possibilidade de redução no tempo de secagem de 217,8 min, 145,9 min e 137,4 min para as temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C, respectivamente.
- No tocante as análises físico-químicas, observou-se que todas as amostras de farinhas de sementes de melão que permaneceram até o tempo final de secagem estavam de acordo com o parâmetro de umidade preconizado pela RDC n° 263/2005, assim como os níveis de a_w estavam abaixo ao recomendado ($<0,6 a_w$). Entretanto, as amostras submetidas à intervenção, não apresentaram resultados tão satisfatórios.

- Os resultados obtidos nesta pesquisa fortalece, a utilização e potencial de inserção das sementes de melão no setor industrial, além de disponibilizar ao meio científico informações importantes referentes à descrição e otimização do processo de secagem.
- Apesar da legitimidade dos dados, é reforçada a necessidade de estudos mais detalhados em torno das sementes de melão, inclusive que aborde a utilização de soluções numéricas, análise da secagem a temperatura de 80°C e estudo de vida de prateleira.

Capítulo 6

6 REFERÊNCIAS

AIRES, J. E. F. et al. Convective drying of osmo-dehydrated apple slices: kinetics and spatial behavior of effective mass diffusivity and moisture content. **Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 4, p. 1121-1134, 2017.

ANUÁRIO BRASILEIRO DA FRUTICULTURA, 2018

AOAC - **Association of Official Analytical Chemists**. Official Methods of analysis of AOAC International. 18. ed. Washington: AOAC, 2005.

ARAGÃO, C. A.; DA LUZ PIRES, M. M. M.; BATISTA, P. F.; DANTAS, B. F. Qualidade de mudas de melão produzidas em diferentes substratos. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 3, p. 209-214, 2011.

ARAÚJO, L. F. de. **Solução numérica e implementação computacional da equação de difusão usando coordenadas generalizadas tridimensionais: aplicação na secagem de telhas ornamentais**. 260 p. Tese (Doutorado em engenharia de processos) — Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

ATAÍDE, J. S. P. de. **Transferência de calor durante o processo de pasteurização de polpas de frutas armazenadas em recipientes obtidos por revolução de áreas planas**. 259 p. Tese (Doutorado em Engenharia De Processos) — Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

AZEVEDO, H. B. de et al. Estudo analítico do processo de secagem de telhas cerâmicas usando modelos de difusão unidimensional. **Educação ciência e saúde**, v. 5, n. 2, p. 51–69, 2018.

BECKER, T. S.; KRÜGER, R. L. Elaboração de barras de cereais com ingredientes alternativos e regionais do Oeste do Paraná. **Arq. Ciênc. Saúde UNIPAR**, Umuarama, v. 14, n. 3, p. 217-224, set./dez. 2010

Brasil. Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA. **Resolução RDC nº 263, de 22 de setembro de 2005**. Aprova o "Regulamento Técnico para Produtos de Cereais, Amidos, Farinhas e Farelos" [Internet]. Brasília, DF: 2005. [acesso em janeiro de 2021]. Disponível

em:https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005/rdc0263_22_09_2005.html#:~:text=1%C2%BA%20Aprovar%20o%20%E2%80%9CREGULAMENTO%20T%C3%89CNICO,Regulamento%20para%20adequarem%20seus%20produtos.&text=5%C2%BA%20Esta%20Resolu%C3%A7%C3%A3o%20entra%20em%20vigor%20na%20data%20de%20sua%20publica%C3%A7%C3%A3o.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Na cozinha com as frutas, legumes e verduras**. Brasília, DF: [sn], 2016, 112 p.

CABRAL, M. S. **Farinha de melão Charentais (var. Cantaloupenis Naud): obtenção, caracterização e formulação de biscoito sem glúten**.. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

CAMARGO, Taiana Lemos. **Aproveitamento integral de alimentos: menos resíduos e mais saúde**. Monografia. Curso de Graduação em Nutrição, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

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

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; SOUSA, K. A.; GONÇALVES, D. N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1089-1097, 2011.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. Oxford Science Publications, New York 1992, 414 p.

COSTA, N. D. A cultura do melão. **Área de Informação da Sede-Col Criar Plantar ABC 500P/500R Saber (INFOTECA-E)**, 2017.

CUNHA, Josiane Araújo da. **Da semente à farinha: semeando a sustentabilidade no aproveitamento de resíduo do melão Cantaloupe (Cucumis melo L. var. reticulatus)**. Dissertação de Mestrado. Natal-RN, 2018.

DIAMANTE, L. M. et al. A new mathematical model for thin layer drying of fruits.

International journal of food science & technology, Londres, v. 45, n. 9, p. 1956-1962, 2010.

ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. **Journal of food engineering**, v. 63, n. 3, p. 349-359, 2004.

ERTEKIN, C.; YALDIZ, OSMAN. Thin layer drying of sliced squash by forced convection. In: **CIGR XviiithWorld Congress. Quebec City, Canada**. 2010.

FARIAS, V. S. d. O. **Difusão 3d em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. 265 p. Tese (Doutorado em Engenharia De Processos) — Universidade Federal de Campina Grande, 2011

FARIAS, V. S. d. O. et al. Drying of solids with irregular geometry : numerical study and application using a three-dimensional model. **Heat Mass Transfer**, v. 49, n. 5, p. 695–709, 2013.

FARIAS, V. S. d. O. et al. Assessment of diffusion models to describe drying of roof tiles using generalized coordinates. **Heat Mass Transfer**, v. 52, n. 7, p. 1403–1416, 2015.

FARIAS, V. S. O. et al. THREE-DIMENSIONAL ANALYTICAL SOLUTION OF THE DIFFUSION EQUATION. **JP Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 15, n. 2, p. 409–432, 2018

FELLOWS, P. J. Tratamento térmico utilizando ar quente. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. Porto Alegre: Artmed, 2006, p. 323.

FIGUEIREDO, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. 1st. ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2004. 229 p. ISBN 85-237-0459-0.

GUIMARÃES, M.A.; TELLES, J.P.F.; DASMACHENO, L.A.; VIANA, C.S. & MONTEIRO, L.R. (2013) – Pré-embrição de sementes e seus efeitos no crescimento e desenvolvimento de plântulas de melancia. **Revista Ceres**, vol. 60, n. 3, p. 442-446.

- INCROPERA. Frank Incropera e David DeWitt - **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa** et.al. 6th. ed. Rio de Janeiro: LTC â Livros técnicos e Científicos Editora S.A., 2008. 586 p. ISBN 978-85-216-1584-2.
- KALETA, A.; GÓRNICKI, K. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. **International journal of food science & technology**, v. 45, n. 5, p. 891-898, 2010.
- KIILL, L. H. P.; RIBEIRO, F. M.; SIQUEIRA, K. M. M.; SILVA, E. M. S. Plano de manejo de polinizadores do meloeiro. Petrolina: **Embrapa Semiárido**, 2015.
- LANDAU, E. C. et al. Evolução da produção de melão (*Cucumis melo*, Cucurbitaceae). **Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2020.
- LIMA, R. L. de. **Farinha da semente de melão-pepino (*Cucumis Melo* Var. *Cantalupensis* Naud): Caracterização e aplicação em preparações culinárias**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2020.
- LUIKOV, A. V. **Analytical heat diffusion theory**. Academic Press, New York and London, 1968, 684 p.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of food engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.
- MADEIRA, P. M. R. **Agregação de valor ao resíduo de melão: caracterização, avaliação de atividade antioxidante, antiproliferativa, potencial prebiótico e produção de enzimas**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós- graduação em Biotecnologia. Natal, RN, 2017.
- MEDEIROS, I. C. C. **Elaboração e caracterização de cookie produzido com farinha de semente de melão (*Cucumis melo* L.)**. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Graduação em Nutrição. Universidade Federal da Paraíba. 2017.

MALACRIDA, C. R.; ANGELO, P. M.; ANDREO, D.; Neuza Jorge. Composição química e potencial antioxidante de extratos de sementes de melão amarelo em óleo de soja. **Revista Ciên. Agron.**, Fortaleza, 38 (4), p. 372-376, Out.- Dez., 2007.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2nd. ed. Rio de Janeiro: LTC â Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2004. 453 p.

MERCALI, G. D. et al. Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of bananas (*Musa sapientum*, shum.). **International journal of food science & technology**, Londres, v. 45, n. 11, p. 2281-2289, 2010.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying technology**, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

MIRANDA, M. P. dos S. **Preparações culinárias elaboradas com farinha das sementes de melão cantaloupe (*Cucumis melo L. var. reticulatus*): um estudo piloto**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2020

MOURA ROLIM, P.; OLIVEIRA JR, S.D.; OLIVEIRA, A.C.S.M.; SANTOS, E.S.; MACEDO, G.R. Nutritional value, cellulase activity and prebiotic effect of melon residues (*Cucumis melo L. reticulatus* group) as a fermentative substrate. **Journal of Food and Nutrition Research**, Online first articles, set., 2018.

OLIVEIRA, T. M. Q. ; MEDEIROS, R. A. ; FARIAS, V. S. O. ; SILVA, W. P. ; FRANCO, C. M. R. ; SILVA JÚNIOR, A. F. Drying Process of Jackfruit Seeds. In: Delgado J., Barbosa de Lima A.. (Org.). **Transport Processes and Separation Technologies**. 1ed.: , 2020, v. 133, p. 89-103.

PANCHARIYA, P. C., POPOVIC, D., SHARMA, A. L. (2002). Thin-layer modelling of black tea drying process. **Journal of food engineering**, 52, 349-357.

[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00126-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00126-1)

PARK, K. J. et al. Conceitos de processo e equipamentos de secagem. Campinas - SP: [s.n.], 2007. 121 p. Disponível em: <<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>>.

PEREIRA, H. L. S. **Aceitabilidade e composição centesimal de bolo de chocolate (*tipo mãe benta*) isento de glúten e lactose fortificado com farinha de semente de melão (*cucumis melo*)**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Maranhão, São Luiz, 2014.

RUI-LOPEZ, A. V.; CÓRDOVA, G. C.; RODRÍGUEZ-JIMENES, M.A.; GARCIA-ALVARADO. Moisture and temperature evolution during food drying: effect of variable properties. **Journal of food engineering**, 63 (2004), p.117-124.

SANTOS, J. A. B. dos. **Avaliação da atividade enzimática de frutossiltransferase produzida por aspergillus oryzae em fermentação semi-sólida de resíduos de melão cantaloupe**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2018.

SILVA, W. P. da. **Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. 263 p. Tese (Doutorado em Engenharia De Processos) — Universidade federal de campina grande, 2007.

SILVA, W.P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Lab fit curve fitting software, V.7.2.46** (2009); Online. Disponível em: <www.labfit.net>. Acesso em 2021

SILVA, W. et al. Estudo da cinética de secagem de telhas cerâmicas através do modelo de difusão usando solução analítica e método inverso. In: **XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP 2009**. Campinas - SP: [s.n.], 2009. p. 10.

SILVA., L. D. **Técnicas analíticas e numéricas para a secagem de sólidos na forma de paralelepípedo: uma abordagem tridimensional**. 182 p. Tese (Doutorado em Engenharia De Processos) — Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

SILVA, L. D. da et al. Estudo da secagem de placas cerâmicas de revestimento através do modelo difusivo usando soluções analíticas para condição de contorno do terceiro tipo. In: **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2012**. São Luís - MA: [s.n.], 2012. Disponível em: <www.abcm.org.br/conem2012>.

SILVA JUNIOR, A. F. da. **Desenvolvimento de ferramentas numéricas e computacionais para a descrição de transferência de massa em corpos cilíndricos: aplicação em desidratação osmótica e secagem complementar de banana.** 269 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) — Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

SILVA, I. L., DA SILVA, H. W., DE CAMARGO, F. R., DE FARIAS, H. F., DE F. M FREITAS, E. Secagem e difusividade de sementes de melão. **Revista de Ciências Agrárias**, 41(2), 309-315, 2018

SILVA, C. R. D.; PEREIRA, I. G. D. O. Cinética da secagem e difusão efetiva das sementes de Melancia. 2018.

SOARES, D.; LIBERALI, R.; FERNANDES COUTINHO, V. Os benefícios nutricionais da multimistura. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, vol. 16, núm. 4, 2012, pp. 201-211.

SOARES, J. M. **Efeito da aplicação foliar de silício no manejo, na produção e na qualidade dos frutos do meloeiro.** 2020. 73 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020

STORCK, C. R.; NUNES, G. L.; OLIVEIRA, B.B.; BASSO, C. Folhas, talos, cascas e sementes de vegetais: composição nutricional, aproveitamento na alimentação e análise sensorial de preparações. **Cienc. Rural**. 2013; 43(3): 537-543.

Tabela brasileira de composição de alimentos. 4. ed. rev. e ampl. Campinas: NEPA-UNICAMP, 2011. 161 p.

ZENEBO, O.; PASCUET, N. S.; TIGLEA, P. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos.** 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

Capítulo 7

COMPORTAMENTO DA SECAGEM DE SEMENTES DE MELÃO (CUCUMIS MELO L.) EM CAMADA FINA USANDO MODELOS EMPÍRICOS

Raquel Alves de Medeiros

Mestranda em Ciências Naturais e Biotecnologia
Instituição: Universidade Federal De Campina Grande -UFCG, campus Cuité-PB
Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000
Email: raquel.medeiros113@gmail.com

Vera Solange de Oliveira Farias

Doutora em Engenharia de Processos
Instituição: Professora Titular, Universidade Federal De Campina Grande -UFCG, campus Cuité-PB
Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000
Email: vera.solange6@gmail.com

Thamires Mabel Queiroz de Oliveira

Mestre em Ciências Naturais e Biotecnologia pela UFCG
Instituição: Universidade Federal De Campina Grande -UFCG, campus Cuité-PB
Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000
Email: tham.iresmabel@hotmail.com

Aluizio Freire da Silva Júnior

Doutor em Engenharia de Processos
Instituição: Professor Adjunto nível IV, Centro de Educação e Saúde - CES, UFCG, Cuité-PB
Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000
Email: aluiziofsj.ces@gmail.com

Amélia Ruth Nascimento Lima

Mestranda em Ciências Naturais e Biotecnologia
Instituição: Universidade Federal De Campina Grande -UFCG, campus Cuité-PB
Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000
Email: ameliaruth.lima@gmail.com

Maria Tereza Lucena Pereira

Mestranda em Ciências Naturais e Biotecnologia
Instituição: Universidade Federal De Campina Grande -UFCG, campus Cuité-PB
Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000
Email: mariatereza-lucena@hotmail.com

Célia Maria Rufino Franco

Doutora em Engenharia de Processos
Instituição: Professora Adjunto nível III Universidade Federal De Campina Grande -UFCG, campus Cuité-PB
Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000
Email: celiarufino@ufcg.edu.br

Jair Stefanini Pereira de Ataíde

Doutor em Engenharia de Processos
Instituição: Professor Adjunto nível III Universidade Federal De Campina Grande -UFCG, campus Cuité-PB
Endereço: Sítio Olho D'água da Bica, Zona Rural, Cuité - PB, CEP: 58175-000
Email: jair.stefanini@professor.ufcg.edu.br

RESUMO:

O melão (*Cucumis melo L.*) possui elevada expressão econômica, sendo cultivado em várias regiões do mundo devido a sua adaptação a diversos solos e climas. Apesar disso uma grande quantidade da fruta é desperdiçada. Normalmente, as partes não comestíveis do melão, cascas e sementes são completamente descartadas durante o processamento e consumo habitual, embora evidências científicas têm relatado benefícios de sementes de melão. Nessa perspectiva, objetivou-se nesse trabalho avaliar o processo de secagem dessas sementes através de modelos empíricos e determinar por meio de dados experimentais as curvas de secagem para a temperatura de 80 °C. Observando os resultados obtidos e os parâmetros estatísticos (qui-quadrado e coeficiente de determinação) utilizados na análise dos resultados, verifica-se que a equação de Page foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais. Assim sendo, esse modelo foi utilizado para obter a taxa de secagem, através da qual, foi observado a existência de um período de indução para a temperatura estudada. O fim deste período e o início do período de taxa decrescente ocorreram próximos aos 11 min.

PALAVRAS-CHAVE: Cinética de secagem, Equação de Page, Sementes de melão.

BEHAVIOR OF THE THIN LAYER DRYING OF MELON SEEDS (CUCUMIS MELO L.) USING EMPIRICAL MODELS**ABSTRACT:**

The melon (*Cucumis melo L.*) has high economic expression, being cultivated in several regions of the world due to its adaptation to diverse soils and climates. Despite this a large amount of this fruit is wasted. Usually the inedible parts of melon, bark and seeds are completely discarded during processing and usual consumption, although scientific evidence has reported benefits of melon seeds. In this perspective, the objective of this work was to evaluate the drying process of these seeds through empirical models and to determine by means of experimental data the drying curves for the temperature of 80°C. Observing the results obtained and the statistical parameters (chi-square and coefficient of determination) used in the analysis of the results, it is verified that the Page Equation was the one that best fit the experimental data. Thus, this model was used to obtain the drying rate, through which it was observed the existence of an induction period for the temperature studied. The end of this period and the beginning of the period of falling rate occurred near 11 min.

KEYWORDS: Drying kinetics, Page Equation, Melon seeds.

INTRODUÇÃO

O melão (*Cucumis melo L.*), pertencente à família das *cucurbitáceas* e ao grupo *Cantalupensis*, é uma fruta originária da Ásia e largamente cultivado nas regiões tropicais, sendo bastante apreciado por seu sabor, aroma e valor nutritivo. O Brasil é atualmente um dos maiores produtores de melão do mundo, sendo a Região Nordeste responsável por 95% da produção nacional, principalmente o estado do Rio Grande do Norte que concentra a maior parte da produção total brasileira (Ferrari et al., 2005; Madeira, 2017). Esse fruto contém grandes quantidades de sementes que, apesar de apresentarem potencial nutritivo, constituem material de descarte em indústrias de alimentos e no consumo doméstico (Malacriada et al. 2007; Madeira, 2017). A alta qualidade na produção de sementes de *cucurbitáceas* depende diretamente do estágio de maturação do fruto (Donato et al., 2015). As sementes de melão possuem em sua composição ácidos graxos similar ao óleo de soja. Os ácidos graxos insaturados, oléico e linoleico, correspondem a 85% dos ácidos graxos totais e representam 99% dos ácidos graxos insaturados (Becker & Krüger). Maran & Pryia (2015), evidências científicas tem relatado benefícios de sementes de melão, as quais impulsionam a imunidade, reduz riscos cardiovasculares, auxilia no controle dos níveis de gordura no sangue e contém nutrientes essenciais para cicatrização de feridas. Segundo Barbosa (2013), a farinha da semente de melão apresentou teor elevado de cálcio, podendo ser utilizado na elaboração de novos produtos enriquecidos com esse mineral. Para a elaboração de novos produtos, é necessário realizar previamente um processo de secagem das sementes de melão. Assim, torna-se importante pesquisar e estabelecer as condições ótimas de secagem para que se tenha um produto final com qualidade. Essas condições incluem a temperatura do ar de secagem, bem como o tempo de duração do processo. Apesar de toda essa importância, as pesquisas sobre a secagem das sementes de melão ainda são incipientes, principalmente com relação a modelagem matemática. Na literatura pesquisada, poucos trabalhos foram encontrados sobre a descrição da cinética de secagem de sementes de melão. Madeira (2017), em suas pesquisas sobre agregação de valor ao resíduo de melão, concluiu que a temperatura influenciou significativamente na resposta do rendimento das farinhas de sementes de melão, sendo o ensaio de 80 °C por 24 h o que apresentou melhor rendimento. Assim, objetivou-se com esse trabalho descrever o processo de secagem das sementes de melão amarelo, variedade *reticulatus*, utilizando modelos empíricos.

MATERIAL E MÉTODOS

Dados experimentais da secagem de sementes de melão

As sementes de melão amarelo analisadas neste estudo são provenientes de melões adquiridos na feira livre do município de Cuité- PB. As sementes foram coletadas manualmente com o auxílio de uma colher de alumínio. Após a coleta, as sementes foram distribuídas em um recipiente previamente higienizado para que fosse realizado o processo de separação dos resíduos do fruto proveniente da coleta. Posteriormente, foram higienizadas em água corrente até que restasse o mínimo possível de resíduo da polpa do melão, e submersas em solução clorada 150 ppm por 15 minutos. Em seguida, foram escorridas com auxílio de uma peneira onde permaneceram por um período de aproximadamente 20 minutos e as massas foram obtidas usando uma balança digital da marca BIOPRECISA, modelo JH2102. As amostras de sementes foram alocadas em três cestos de metal (previamente pesados) e levadas a uma estufa de circulação forçada de ar (AMERICAN LAB modelo AL 102/480), à temperatura de 80°C. Essa temperatura foi escolhida com base nas pesquisas reportadas na literatura (Pereira, 2014; Madeira, 2017). Cada cesto continha aproximadamente 30 g do produto. Durante o processo de secagem as amostras das sementes em triplicata eram retiradas em instantes de tempo pré-estabelecidos, pesadas e recolocadas na estufa. Esse procedimento foi repetido até que a massa de equilíbrio foi alcançada. Finalmente, a temperatura da estufa foi ajustada para 105°C e as amostras foram deixadas nessa mesma estufa por 24 h, a fim de determinar a massa seca.

O procedimento de retirada e higienização das sementes foi realizado no laboratório de Análise Sensorial de Alimentos (LASA) e o experimento de secagem foi realizado no Laboratório de Bromatologia (LABROM), ambos do Centro de Educação e Saúde (CES), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus de Cuité-PB.

Modelagem matemática e cinética de secagem

A utilização de modelos matemáticos que consideram as características do sistema de transferência de massa em alimentos é uma ferramenta cada vez mais explorada pelos pesquisadores,

sendo de grande utilidade para o cálculo do desenvolvimento eficiente de cada análise, tendo em vista a melhoria no processamento, redução de perdas e aumento da qualidade do produto final (DANTAS et al. 2011). Entre os modelos usados para a descrição da cinética de secagem, as equações empíricas se destacam entre os mais utilizados. Um modelo empírico consiste numa correlação direta entre o teor de umidade médio e o tempo de secagem.

Os dados experimentais obtidos para a cinética de secagem foram usados na forma adimensional, dada pela equação:

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

onde X_{eq} (b.s.) é o teor de umidade de equilíbrio, $\bar{X}(t)$ (b.s.) é o teor de umidade médio no tempo t (s) e X_i (b.s.) é o teor de umidade inicial.

Deste modo, foram testados seis modelos encontrados na literatura a fim de verificar aquele que melhor descreveria as cinéticas de secagem das sementes de melão. Os modelos testados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1-Modelos para descrever as cinéticas de secagem.

Modelo	Nome	Expressão	Referência
1	Henderson e Pabis	$X^* = ae^{-bt}$	Diamante et al. (2010)
2	Logaritmica	$X^* = ae^{-bt} + c$	Pirone et al. (2014)
3	Lewis	$X^* = e^{-at}$	Kaleta e Górnicki (2010)
4	Page	$X^* = e^{-at^b}$	Diamante et al. (2010)
5	Silva et alii	$X^* = e^{-at-b\sqrt{t}}$	Silva et al. (2013)
6	Wang e Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$	Kaleta e Górnicki (2010)

em que: a e b são parâmetros de ajuste; t: tempo (em minutos); M^* : é a razão de umidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações apresentadas na Tabela 1 foram ajustadas através do *software LabFit* (Silva e Silva, 2009), e a seleção do melhor modelo foi feita através dos indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (R^2) e qui-quadrado (χ^2). Os resultados dos ajustes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2-Resultados dos ajustes dos modelos empíricos aos dados experimentais.

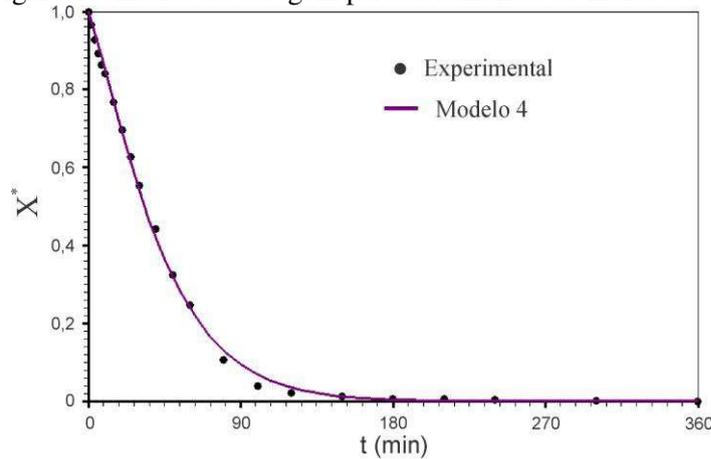
T(°C)	Modelo	a	b	c	R^2	χ^2
70	1	1,03	$2,29 \times 10^{-2}$	-	0,994	$1,98 \times 10^{-2}$
	2	1,05	$2,17 \times 10^{-2}$	$-2,29 \times 10^{-2}$	0,995	$1,68 \times 10^{-2}$
	3	$2,17 \times 10^{-2}$	-	-	0,995	$2,53 \times 10^{-2}$
	4	$9,44 \times 10^{-3}$	1,23	-	0,999	$4,74 \times 10^{-3}$
	5	$2,73 \times 10^{-2}$	$-3,29 \times 10^{-2}$	-	0,996	$1,21 \times 10^{-2}$
	6	$-1,07 \times 10^{-2}$	$2,38 \times 10^{-5}$	-	0,917	$3,96 \times 10^{-1}$

Observando os indicadores estatísticos na Tabela 2, pode-se concluir que o melhor modelo para descrever as cinéticas de secagem nas temperaturas de 60 e 85°C foi o modelo 4, que corresponde a Equação de Page (Diamante et al. (2010)). Modelo esse, amplamente utilizado na área de modelagem matemática. Duarte et al., 2020 ao estudar o ajuste de modelos matemáticos de secagem em berinjelas expostas a diversas temperaturas, também constatou que a equação de page representava de forma satisfatória o processo de secagem. Uma forma modificada da equação de

Page também se mostrou adequada para a descrição da secagem de resíduos agro-industriais de abacaxi (Filho et al., 2020). Nessa pesquisa, Leite et al. (2020) comparou uma forma modificada da equação de Page ao primeiro termo da solução analítica da equação de difusão (caso de uma parede infinita), e a equação de Page modificada se mostrou a mais adequada.

Deste modo, esse modelo foi usado para descrever a secagem das sementes de melão na temperatura de 80°C. O gráfico de ajuste pode ser observado na Figura 1, que confirma os indicadores estatísticos apresentados na Tabela 1, mostrando um bom ajuste do Modelo 4 aos dados experimentais.

Figura 1-Cinética de secagem para as sementes de melão a 80°C.

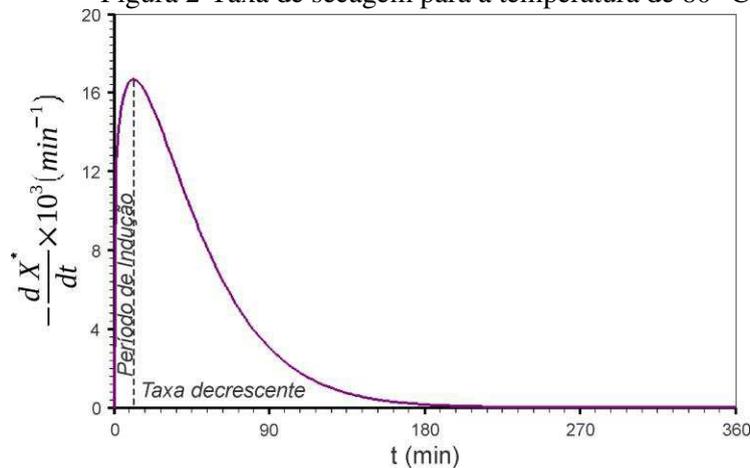


A fim de obter a taxa de secagem na temperatura estudada, a expressão do modelo 4 foi derivada em função do tempo e a seguinte expressão foi obtida:

$$\frac{dX^*}{dt} = -abt^{b-1}e^{-at^b}, \quad (2)$$

A partir da Equação (2), foi obtida a taxa de secagem para a temperatura de 80°C. O gráfico dessa taxa é apresentado na Figura 2.

Figura 2-Taxa de secagem para a temperatura de 80 °C.



Através da Figura 2 é possível observar que a taxa de secagem apresenta um período inicial crescente, um período de indução de 11 min, aproximadamente. Embora os períodos de indução e de taxa constante sejam conhecidos, a maioria dos trabalhos de secagem encontrados na literatura não analisa tais períodos e consideram o processo totalmente isotérmico. No entanto, a existência desses períodos deve ser primeiramente descartada para então serem usados modelos como os difusivos.

CONCLUSÃO

Entre os modelos usados para descrever as cinéticas de secagem, o que apresentou os melhores indicadores estatísticos foi o modelo 4 (Modelo de Page). O mesmo modelo foi então utilizado para obter a taxa de secagem.

O estudo da taxa de secagem demonstrou a existência de um período de indução, o que implica que o processo não foi isotérmico em todo o período estudado. Esta observação indica a necessidade de analisar a existência de períodos de indução ou de taxa constante, antes de considerar que todo o processo ocorreu em taxa decrescente.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, K. V. R. S. Farinha de sementes do melão (*Cucumis melo L.*): Proposta de desenvolvimento de alimento sustentável. Dissertação de mestrado, Universidade Augusto Mota, Rio de Janeiro, 2013.
- Becker, T. S.; Krüger, R. L. Elaboração de barras de cereais com ingredientes alternativos e regionais do Oeste do Paraná. Arq. Ciênc. Saúde UNIPAR, Umuarama, v. 14, n. 3, p. 217-224, set./dez. 2010.
- Dantas, L. A.; Mata, M.; Duarte, M. E. M. Programa computacional dinâmico para simulação de secagem de grãos e sementes de milho. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 13, n. 3, p. 309-318, 2011.
- 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, Wiley Online Library, v. 45, n. 9, p. 1956–1962, 2010.
- Donato, L. M. S.; Rabelo, M. M.; David, A. M. S. S.; Rocha, A. F.; Rocha, A. S.; Borges, G.A. Qualidade fisiológica de sementes de melão em função do estágio de maturação dos frutos. Comunicata Scientiae, v. 6, n. 1, p. 49-56, 2015.
- Duarte, M. E. M.; Mata, M.E.R.R.C.; Araújo, R.D.A.; Almeida, R.D.; Andre, A.M.M.C.N., Melo, R.D.B. Coeficiente de difusividade efetivo e modelagem matemática da secagem de berinjela. Braz. J. of Develop. Curitiba, v. 6, n. 7, p. 54117-51124 jul. 2020
- Ferrari, C. C.; Rodrigues, L.K.; Tonon, R.V.; Hubinger, M.D. Cinética de transferência de massa de melão desidratado osmoticamente em soluções de sacarose e maltose. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 25(3): 564-570, jul.-set. 2005.
- Filho, M. T. L., Martins, J. H.; Mata, M. E. R. M. C.; Silva, A. L. C.; Martins, I. T. A. Drying kinetics of pineapple agro-industrial residues: a new approach. Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, n. 1, p. 3928-3949 jan. 2020.
- Kaletka, A., Górnicki, K. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. International Journal of Food Science and Technology, Wiley Online Library, v. 45, n. 5, p. 891–898, 2010.
- Madeira, P. M. R. Agregação de valor ao resíduo de melão: caracterização, avaliação de atividade antioxidante, antiproliferativa, potencial prebiótico e produção de enzimas. Tese de doutorado apresentada no programa de pós-graduação em Biotecnologia (Renorbio) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 241 p. 2017.
- Malacrida, C. R.; Angelo, P. M.; Andreo, D.; Neuza Jorge. Composição química e potencial antioxidante de extratos de sementes de melão amarelo em óleo de soja. Rev. Ciên. Agron., Fortaleza, 38 (4), p. 372-376, Out.- Dez., 2007.
- Pereira, H. L. S. Aceitabilidade e composição centesimal de bolo de chocolate (*tipo mãe benta*) isento de glúten e lactose fortificado com farinha de sementes de melão (*Cucumis melo*). Monografia apresentada ao curso de Nutrição da Universidade Federal do Maranhão. 51 p. 2014.
- Pirone, B.N.; De Michelis, A.; Salvatori, D. M. Pretreatments effect in drying behaviour and colour of mature and immature ‘Napolitana’ sweet cherries. Food Bioprocess Technol,

Springer, v. 7, n. 6, p. 1640–1655, 2014.

Silva, W.P., Silva, C. M. D. P. S., Sousa, J.A.R., Farias, V. S. O. Empirical and diffusion models to describe water transport into chickpea (*Cicer arietinum* L.). *International Journal of Food Science and Technology*, Wiley Online Library, v. 48, n. 2, p. 267–273, 2013.

Silva, W.P.; Silva, C. M. D. P. S. Lab fit curve fitting software, V.7.2.46; disponível em :<www.labfit.net>. Acesso em: Abril de 2018.