

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

RAÍ MELO DE OLIVEIRA

ESTUDO DA SECAGEM INFRAVERMELHO DE SEMENTES DE MELANCIA
(Citrullus lanatus)

São Cristóvão – SE

2019

RAÍ MELO DE OLIVEIRA

ESTUDO DA SECAGEM INFRAVERMELHO DE SEMENTES DE MELANCIA
(Citrullus lanatus)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Processos Químicos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Luanda Gimeno Marques

São Cristóvão – SE

2019

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

Oliveira, Raí Melo de
O48e Estudo da secagem infravermelho de sementes de melancia
(*Citrullus lanatus*) / Raí Melo de Oliveira ; orientadora Luana
Gimeno Marques. – São Cristóvão, SE, 2019.
105 f.: il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Química) –
Universidade Federal de Sergipe, 2019.

1. Engenharia química. 2. Calor - Convecção. 3. Radiação
infravermelha. 4. Cinética química. 5. Calor – Transmissão. I.
Marques , Luana Gimeno, orient. II. Título.

CDU 66.047

RAÍ MELO DE OLIVEIRA

ESTUDO DA SECAGEM INFRAVERMELHIA DE SEMENTES DE MELANCIA (*Citrullus lanatus*)

Dissertação de Mestrado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
da Universidade Federal de Sergipe em 26 de Agosto de 2019

BANCA EXAMINADORA



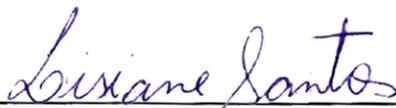
Prof.^a Dr.^a Luanda Gimeno Marques

Orientadora (PEQ/UFS)



Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado

(PEQ/UFS)



Prof.^a Dr.^a Lisiane dos Santos Freitas

(DQI/UFS)

AGRADECIMENTOS

Com um misto de sensações e experiências que contribuíram para o meu amadurecimento profissional, é com alegria que agradeço aos que estiveram ao meu lado nessa trajetória enriquecedora.

Primeiro, a Deus por ter me proporcionado toda a sabedoria e coragem necessária para alcançar esta conquista.

A prof.^a Luanda, minha orientadora, pela motivação, dedicação e confiança.

Agradeço aos professores do PEQ pelas sugestões enriquecedoras para a pesquisa realizada, em destaque para o prof.^o Manoel e prof.^a Lisiane que estavam sempre dispostos a colaborar com o meu crescimento como pesquisador.

Aos meus pais, Ana Célia e José Erivaldo, por todo apoio, dedicação e esforço que tiveram para comigo, OBRIGADO! Vocês sempre serão minha melhor referência, inspiração e fortaleza. Amo-os sem medidas!

Aos meus irmãos Rangel e Rafael que me deram suporte e proporcionaram momentos mais leves na caminhada. Deus não poderia me conceder irmãos melhores!

Aos meus avós José Guilherme (*i.m.*) e Tancredo (*i.m.*) por todos os princípios e experiências passadas. Em especial a minha avó Célia, pela afeição, mimos e orações para o meu sucesso. Te Amo!

Agradeço aos meus tios e tias que sempre me incentivaram com toda atenção e amor. Aos primos, principalmente a Larissa, pela dedicação, conselhos e companheirismo que me ofertou todos esses anos. Vocês são um presente de Deus.

A Jean pelo apoio, conselhos, compreensão e paciência nos momentos mais difíceis.

Aos amigos de infância, da graduação e da vida que me apoiaram e aconselharam nos mais diversos momentos. Em especial àqueles que estiveram a todo instante ao meu lado e que a UFS me proporcionou: Daniella, Mayara, Thaís, Thereza e Vanessa.

Agradeço aos companheiros de laboratório que contribuíram com o desenvolvimento da pesquisa e deram suporte nos momentos mais importantes: Gabriel, Keyse, Marcelo, Marcos, Fernando e Paulo.

A CAPES pelo auxílio financeiro.

Enfim, a todos aqueles que, de alguma forma, torceram e contribuíram para essa vitória, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A melancia da espécie *Citrullus lanatus* é uma fruta mundialmente conhecida e consumida, que possui a polpa rica em pró-vitamina A, vitaminas C, do complexo B e alguns sais minerais. As sementes dessa fruta, normalmente descartadas, também trazem benefícios ao ser humano, seja na nutrição, pelo seu alto índice de gorduras, proteínas e minerais como magnésio, cálcio, potássio, ferro, fósforo e zinco, ou ainda na indústria farmacêutica através do óleo extraído que auxiliam no tratamento do câncer, problemas cardiovasculares, ação hipotensiva e remédios caseiros para o tratamento de queimaduras, inchaço e artrite. Dentre os componentes das sementes de melancia, destacam-se aminoácidos como a arginina e citrulina, que possuem funções importantes para o corpo humano. Logo, estudos sobre esse material se tornam cada vez mais comuns, devido às suas aplicações, de modo que as tecnologias de secagem aparecem como importante método de processamento desse material, destacando-se a utilização da radiação infravermelha contínua ou combinada a outras técnicas como a convecção e intermitência que oferecem diversas vantagens ao produto final, uma vez que possibilitam boa eficiência energética, alta qualidade do produto final e menor tempo de processamento. Diante disso, o trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade, a eficiência energética e a cinética da secagem infravermelha contínua, híbrida (radiação infravermelho associada à convecção) e intermitente sob as condições: 45, 65 e 85°C para a temperatura da fonte infravermelho (IV), 0,4; 0,8 e 1,2 m/s para a velocidade do ar e proporções de intermitência de 1:1; 1:5 e 1:9. As sementes foram separadas por cor, sendo utilizadas as de coloração escura e com umidade de aproximadamente 0,44 b.u., cujas dimensões foram aferidas com o paquímetro e o analisador de imagens. Os experimentos de secagem foram realizadas com amostras de, aproximadamente, 11,5 g de sementes, e foram comandadas pela difusão interna da umidade do material, permitindo a utilização do modelo teórico de Fick para descrever o período a taxa decrescente e a utilização das equações semiempíricas de Lewis, Brooker e Page para representar todo o processo. A difusividade efetiva de umidade (D_{eff}), na faixa operacional investigada, variou de 0,617 a 0,625 x 10⁻¹⁰ m²/s e a comparação entre os resultados das secagens mostrou o aumento da D_{eff} com a intensificação da temperatura da fonte IV e redução do consumo energético de 46,79% ao combinar a maior temperatura da fonte analisada com o maior tempo de intermitência das amostras. A análise colorimétrica das sementes indicou maiores índices de variação de cor quando se aplicou isoladamente a radiação IV. No entanto, essa variação foi amenizada com a associação da radiação IV com a convecção forçada em temperatura ambiente e os períodos de intermitência durante os processos de secagens utilizados. Assim, o processo de secagem via radiação IV mostra-se promissor, sendo sua melhor condição, dentre as analisadas, a secagem via radiação IV contínua com temperatura da fonte a 85°C.

PALAVRAS-CHAVE: Convecção; Cinética de secagem; Intermitência; Qualidade do produto; Infravermelho; Transferência de calor e massa.

ABSTRACT

The watermelon *Citrullus lanatus* species is a globally known and consumed fruit, that has the flesh rich in provitamin A, vitamins C, B complex and some minerals. The seeds of this fruit, usually discarded, also bring benefits to human beings, whether in nutrition, by your high level of fats, proteins and minerals like magnesium, calcium, potassium, iron, phosphorus and zinc, or even in the pharmaceutical industry through the oil extracted to assist in the treatment of cancer, cardiovascular problems, and hypotensive action home remedies for the treatment of Burns, swelling and arthritis. Among the components of the watermelon seeds include amino acids such as arginine and citrulline, which are important functions for the human body. Soon, the study of this material become increasingly common due to their applications, so that the drying technologies appear as an important method of processing this material, especially the use of infrared radiation or combined with other techniques such as convection and flashing that offer several advantages to the final product, since they provide good energy efficiency, high quality of the final product and reduced processing time. Given this, the work aimed to evaluate the quality, energy efficiency and continuous infrared drying kinetics, hybrid (infrared radiation associated with convection) and flashing under the conditions: 45, 65 and 85° C for the temperature of the infrared source (IR), 0,4; 0,8 and 1,2 m/s for the forced convection and burst of 1:1 proportions; 1:5 and 1:9. The samples were performed with dryings, approximately 11,5 g of seeds, and were commanded by internal diffusion of moisture of the material, allowing the use of the theoretical model of Fick to describe the period the descending rate and the use of semi empirical equations of Lewis, Brooker and Page to represent the whole process. Effective moisture diffusivity (D_{eff}), on the various drying conditions, ranged from 0,617 to 0,625 $\times 10^{-10}$ m²/s and the comparison between the results of dryings showed increased D_{eff} with increased supply temperature IR and reduced consumption 46,79% energy by combining the highest temperature of the parsed source with longer samples burst. Colorimetric analysis of seed indicated higher levels of variation of color when applied alone IR radiation. However, this variation was softened with the Association of radiation IR with the forced convection at room temperature and flashing periods. Thus, the drying process via IR radiation is promising, being its best condition, among those analyzed, the drying via continuous IR radiation with source temperature at 85°C.

KEYWORDS: Convection; Drying kinetics; Flashing; Quality of the product; Infrared; Heat and mass transfer.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição de aminoácidos (g/ 100 g) da farinha da semente de melancia.	21
Tabela 3.2: Composição centesimal da farinha de semente de <i>C. lanatus</i>	22
Tabela 3.3: Teor mineral da farinha da semente <i>C. lanatus</i> desengordurada.....	22
Tabela 3.4: Equações semiempíricas para a cinética de secagem.	31
Tabela 4.1: Valores codificados e reais das variáveis utilizadas no planejamento experimental da secagem contínua.....	40
Tabela 4.2: Valores codificados e reais das variáveis utilizadas no planejamento experimental da secagem intermitente.	40
Tabela 4.3: Valores codificados e reais das variáveis utilizadas no planejamento experimental da secagem híbrida.	40
Tabela 5.1: Valores médios do comprimento (y), largura (x), espessura (z), diâmetro equivalente (D_{eq}), esfericidade (ϕ), desvio padrão e variância das sementes de melancia “ <i>in natura</i> ”.....	44
Tabela 5.2: Valores do coeficiente de difusão (D_{eff}) para cada temperatura de secagem, teste do qui-quadrado (χ^2), erro estimado (SE) e coeficiente de determinação (R^2).....	49
Tabela 5.3: Parâmetros, teste do qui-quadrado (χ^2), erro estimado (SE) e coeficiente de determinação (R^2).	51
Tabela 5.4: Valores do coeficiente de difusão (D_{eff}) para cada temperatura de secagem, teste do qui-quadrado (χ^2), erro estimado (SE) e coeficiente de determinação (R^2).....	59
Tabela 5.5: Valores do coeficiente de difusão (D_{eff}) para cada temperatura de secagem, teste do qui-quadrado (χ^2), erro estimado (SE) e coeficiente de determinação (R^2).....	68
Tabela 5.6: Valores da energia de ativação e D_0 nas condições analisadas.....	71
Tabela 5.7: Valores médios do comprimento (y), largura (x), espessura (z), diâmetro equivalente (D_{eq}) e esfericidade (ϕ) das sementes de melancia pós-secagem.	72
Tabela 5.8: Dados de volume real (V_p), massa específica real (ρ_p), volume aparente (V_{ap}), massa específica aparente (ρ_{ap}), porosidade (ϵ) e encolhimento volumétrico (S) da semente de melancia antes e depois da secagem.....	73
Tabela 5.9: Parâmetros colorimétricos das sementes de melancia <i>in natura</i> e com 12% b.s. de umidade.	76
Tabela 5.10: Valores da coordenada croma (C^*), do ângulo de <i>hue</i> (H^*) e índice de escurecimento (IE) das sementes de melancia pós-processo de secagem.	78

Tabela 5.12: Consumo energético específico das secagens ($X_{bu} = 20\%$).....	80
Tabela B. 1: Parâmetros, teste do qui-quadrado (χ^2), erro estimado (SE) e coeficiente de determinação (R^2) dos modelos cinéticos de secagem.	101
Tabela C. 1: Parâmetros, teste do qui-quadrado (χ^2), erro estimado (SE) e coeficiente de determinação (R^2) dos modelos cinéticos de secagem.	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Melancia (<i>Citrullus lanatus</i>).	18
Figura 4.1: Separação de sementes de melancia por cor.	34
Figura 4.2: a) Vista frontal do equipamento. b) Vista lateral do equipamento.	35
Figura 4.3: Dimensões características da semente de melancia: x, largura; y, comprimento; z, espessura. (a) vista frontal (b) vista lateral.	36
Figura 4.4: Sementes de melancia em monocamada para secagem IV.	38
Figura 4.5: Esquema de coletor de imagens.	42
Figura 5.1: Dimensões e frequência das sementes “ <i>in natura</i> ”.	45
Figura 5.2: Teor de umidade e temperatura em função do tempo.	47
Figura 5.3: Taxa de secagem em função do tempo.	48
Figura 5.4: Adimensional de umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page.	50
Figura 5.5: Adimensional umidade e temperatura em função do tempo para as velocidades: a) 0,4 m/s; b) 0,8 m/s; c) 1,2 m/s.	52
Figura 5.6: Taxa de secagem em função do tempo para as velocidades: a) 0,4 m/s; b) 0,8 m/s; c) 1,2 m/s.	53
Figura 5.7: Adimensional de umidade e temperatura em função do tempo: a) TF = 45°C; b) TF = 65°C; c) TF = 85°C.	55
Figura 5.8: : Taxa de secagem em função do tempo: a) TF = 45°C; b) TF = 65°C; c) TF = 85°C.	56
Figura 5.9: Diagrama de Pareto com estimativa de efeitos das variáveis sobre a difusividade efetiva.	58
Figura 5.10: Superfície de resposta da difusividade efetiva em função da temperatura e velocidade do ar.	58
Figura 5.11: Adimensional de umidade em função do tempo: a) Intermitência de 1:1; b) Intermitência de 1:5; c) Intermitência de 1:9.	61
Figura 5.12: Temperatura superficial da amostra em função do tempo: a) Intermitência de 1:1; b) Intermitência de 1:5; c) Intermitência de 1:9.	62
Figura 5.13: Taxa de secagem em função do tempo: a) Intermitência de 1:1; b) Intermitência de 1:5; c) Intermitência de 1:9.	63

Figura 5.14: Adimensional de umidade em função do tempo: a) $T_F = 45^\circ\text{C}$; b) $T_F = 65^\circ\text{C}$; c) $T_F = 85^\circ\text{C}$.	64
Figura 5.15: Temperatura superficial da amostra em função do tempo: a) $T_F = 45^\circ\text{C}$; b) $T_F = 65^\circ\text{C}$; c) $T_F = 85^\circ\text{C}$.	66
Figura 5.16: Taxa de secagem em função do tempo: a) $T_F = 45^\circ\text{C}$; b) $T_F = 65^\circ\text{C}$; c) $T_F = 85^\circ\text{C}$.	67
Figura 5.17: Diagrama de Pareto com estimativa de efeitos das variáveis na difusividade efetiva.	69
Figura 5.18: Superfície resposta para a difusividade efetiva em função das suas variáveis temperatura da fonte e período de intermitência.	69
Figura 5.19: : Difusividade efetiva em função da temperatura superficial absoluta da amostra para diferentes tipos de secagem: a) Secagem contínua; b) Secagem Híbrida e c) Secagem intermitente.	70
Figura 5.20: Superfície de resposta do consumo energético em função da temperatura e velocidade do ar na secagem híbrida.	82
Figura 5.21: Diagrama da Pareto com estimativa de efeitos das variáveis no consumo energético para a secagem híbrida.	82
Figura 5.22: Superfície de resposta do consumo energético em função da temperatura e velocidade do ar na secagem intermitente.	83
Figura 5.23: Diagrama da Pareto com estimativa de efeitos das variáveis no consumo energético para a secagem intermitente.	83
Figura A. 1: Adimensional de umidade no modelo teórico da Lei de Fick.	97
Figura B. 1: Adimensional umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page; d) Modelo Fick.	98
Figura B. 2: Adimensional umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page; d) Modelo Fick.	99
Figura B. 3: Adimensional umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page; d) Modelo Fick.	100
Figura C. 1: Adimensional umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page; d) Modelo Fick.	102
Figura C. 2: Adimensional umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page; d) Modelo Fick.	103
Figura C. 3: Adimensional umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page; d) Modelo Fick.	104

NOMECLATURA

a^*	Coordenada do sistema Hunter que indica a faixa de cor do verde ao vermelho	[-]
b_o	Coordenada do sistema Hunter que indica a faixa de cor do azul ao amarelo <i>in natura</i>	[-]
b^*	Coordenada do sistema Hunter que indica a faixa de cor do azul ao amarelo	[-]
C^*	Coordenada croma	[-]
D_0	Fator pré-exponencial da equação de Arrhenius	[L ² /t]
D_{eff}	Difusividade efetiva	[L ² T ⁻¹]
D_{eq}	Diâmetro equivalente	[L]
ΔE^*	Diferença de cor total	[-]
GLR	grau de liberdade do modelo	[-]
H^*	Ângulo <i>hue</i> que indica a tonalidade	[-]
IE	Índice de escurecimento do material	[-]
L^*	Coordenada do sistema Hunter que indica a luminosidade do material	[-]
P	Erros relativos	[-]
S	Encolhimento	[-]
SE	Erros estimados	[-]
V_d	Volume da amostra após a secagem	[L ³]
V_o	Volume aparente inicial da amostra	[L ³]
V_p	Volume real da amostra	[L ³]
X	Umidade do sólido, massa de água por massa de sólido seco	[-]
X_e	Umidade do sólido no equilíbrio	[-]
$XR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e}$	Umidade adimensional	[-]

SÍMBOLOS GREGOS

ρ	Massa específica	[ML ⁻³]
ε	Porosidade	[-]
φ	Esfericidade	[L]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivos Específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. Melancia (<i>Citrullus lanatus</i>)	17
3.2. Sementes da <i>Citrullus lanatus</i>	19
3.2.1. Qualidade Nutricional	20
3.2.2. Propriedades ópticas	22
3.3. Secagem	24
3.3.1. Secagem por convecção	25
3.3.2. Secagem infravermelho	26
3.3.3. Secagem infravermelha intermitente	28
3.3.4. Secagem híbrida	29
3.4. Cinética de secagem	30
3.5. Encolhimento	32
3.6. Consumo energético específico	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1. Material	34
4.2. Equipamentos	35
4.3. Metodologia	35
4.3.1. Caracterização física das sementes	36
4.3.1.1. Volume da semente	36
4.3.1.2. Massa específica real e aparente	37
4.3.1.3. Porosidade	37
4.3.2. Experimentos de secagem	38
4.3.3. Planejamento experimental	39
4.3.4. Tratamentos dos dados de secagem	41
4.3.5. Encolhimento das partículas	42
4.3.6. Caracterização óptica	42
4.3.7. Consumo energético específico	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1. Caracterização física	44

5.2. Cinética de secagem.....	46
5.4. Avaliação da qualidade física.....	72
5.5. Caracterização óptica	75
5.6. Consumo energético.....	80
6. CONCLUSÃO	84
7. SUGESTÕES.....	86
REFERÊNCIAS	87
APÊNDICE A.....	97
APÊNDICE B.....	98
APÊNDICE C.....	102

1. INTRODUÇÃO

A produção da melancia da espécie *Citrullus lanatus* no Brasil ganhou força no nordeste brasileiro, devido ao clima e solo favoráveis ao desenvolvimento da fruta, que chegou ao país através de escravos africanos que traziam sementes para cultivo ao redor das senzalas onde permaneciam. A partir daí o alimento passou a ser incluso no mercado nacional e a participar de pesquisas científicas que visam o melhoramento genético e processamento das sementes para inclusão nas indústrias alimentícia e farmacêutica.

O consumo da melancia é comumente realizado *in natura* (IN) e exclusivamente de sua polpa adocicada de coloração avermelhada, descartando casca e sementes, que possuem diversos tamanhos e cores. A semente é fonte de diversos nutrientes, como a citrulina que é convertida em arginina (também presente nas sementes) pelo corpo humano, responsável por auxiliar na divisão das células, cicatrização de ferimentos e eliminação de amônia do corpo.

Devido aos diversos benefícios oferecidos pela semente da *Citrullus lanatus* as pesquisas variam de acordo com sua finalidade passando pelo ramo alimentício, porque ela oferece bons teores de proteínas, gorduras e minerais e na indústria farmacêutica, que extrai seu óleo para produção de florais.

Além disso, os plantios exigem sementes de alta qualidade para a obtenção de mudas mais vigorosas e com ausência de problemas fitossanitários. Assim, a aplicação da secagem, possibilita a retirada de umidade do material, propiciando a manutenção da qualidade e maior tempo de prateleira, assegurando um armazenamento seguro, pois a umidade imprópria para armazenagem acelera a deteriorização do produto.

Dentre os diversos métodos de secagem destaca-se a aplicação do infravermelho como alternativa para aumento da eficiência do processo, já que a aplicação de tal energia eletromagnética promete alta qualidade do produto com menores tempos de processamento e consequentemente, baixo consumo energético.

Com o objetivo de sanar possíveis desvantagens do processo de secagem infravermelho a combinação com outros métodos é a chave para tal. A junção da radiação com a convecção utilizando ar ambiente permite resfriamento da área superficial da amostra causando um efeito sinérgico que irá causar menos danos

térmicos ao produto, ao mesmo tempo em que acelera a retirada de água superficial das sementes.

Outra associação muito utilizada com a secagem infravermelha é a adição de períodos de intermitência durante o processo para facilitar a retirada da umidade do material, pois o tempo de intermitência propicia aumento da concentração de água na superfície da amostra, acelerando o processo de retirada da umidade e diminuindo o consumo energético. Consumo este que é visado por indústrias com o objetivo de ter maiores rendimentos com menores custos de processamento.

Com a aplicação de processos de secagem, parâmetros qualitativos do material são alterados e por isso merecem atenção, de modo que a escolha da técnica adequada é imprescindível para garantir qualidades do produto como: cor, encolhimento, teor nutricional, tempo de armazenamento, sabor e o poder germinativo das sementes.

Logo, o presente trabalho visa estudar a influência de variáveis como a temperatura da fonte, velocidade do ar e período de intermitência na difusividade efetiva, no encolhimento e parâmetros de qualidade das sementes de melancia.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudar a secagem via radiação infravermelho nos modos de operação contínuo, intermitente e híbrido de sementes de melancia, a fim de avaliar a qualidade desse produto e o consumo energético de cada operação.

2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar fisicamente as sementes de melancia pré e pós-aplicação dos diferentes métodos de secagem;
- ✓ Realizar a secagem das sementes de melancia por infravermelho nos modos contínuo, intermitente e híbrido;
- ✓ Avaliar a cinética de secagem dos processos utilizados;
- ✓ Avaliar os fenômenos de transferência de massa envolvidos nos processos.
- ✓ Realizar a cinética de secagem com base em equações semiempíricas e modelo teórico, encontrados na literatura;
- ✓ Avaliar o encolhimento das sementes;
- ✓ Determinar o consumo energético específico.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura tem o intuito de agregar embasamento teórico proposto, facilitando a análise do processo de secagem aplicado às sementes da melancia (*Citrullus lanatus*), partindo de informações desde o fruto até técnicas de secagem empregadas em sementes e suas vertentes.

3.1. Melancia (*Citrullus lanatus*)

O cultivo da melancia é conhecido desde a pré-história, onde já era produzida pelos egípcios há cerca de 2.000 a.C., sendo do gênero *Citrullus* e da família das Cucurbitáceas. A melancia desse gênero inclui quatro espécies: *Citrullus lanatus* - cultivada para consumo humano e ampla distribuição mundial, *C. colocynthis*, *C. ecirrhosus* e *C. rehmii* (PAIVA, 2015).

A introdução dessa cultura no Brasil deu-se durante o ciclo econômico da cana-de-açúcar com a chegada de escravos da África equatorial que traziam sementes do fruto e as cultivavam ao redor das senzalas no litoral do Nordeste (Maranhão e Bahia), daí se propagando para outras regiões. Mais tarde houve a inserção do fruto egípcio e utilização de cultivares melhoradas de origem americana e japonesa (VILELA *et al.*, 2006).

A melancia é consumida em todo Brasil, normalmente *in natura*, trazendo benefícios para quem a consome, já que a sua polpa – parte comumente mais consumida – é fonte de pró-vitamina A, vitamina C e do complexo B, além de sais minerais como cálcio, fósforo e ferro (GAMA, 2015).

Estudiosos como Erhirhie e Ekene (2013) levantaram informações a respeito dos valores medicinais da *Citrullus lanatus* do ponto de vista farmacológico, enquanto que Silva (2017) buscou a avaliação dos efeitos de suplementação com extratos de melancia e *L-citrulina*, sobre parâmetros testiculares de camundongos, notando maior produção do hormônio testosterona em um dos seus grupos teste.

Dentre as diversas variedades da melancia, a mais comercializada é a *Citrullus lanatus* que possui casca que varia de verde claro a verde escuro, com manchas ou listras e polpa avermelhada, doce e succulenta. Toda a fruta é comestível e consumida de diversas formas: crua, como suco, frita, em salada ou em conserva (ALI *et al.*, 2017).

A *Citrullus lanatus* da variedade Crimson Sweet, desenvolvida pela Universidade do Kansas em 1963, é a mais cultivada no Brasil. Esse fruto tem peso médio de 12 kg e é resistente ao transporte, devido à resistência de sua casca (PAIVA, 2015). Sua produção global é de, aproximadamente, 117 milhões de toneladas. O Brasil nesse mesmo ano obteve uma produção de 2.090.432 milhões de toneladas e área colhida de 90.447 ha, alcançando $231.112 \text{ t.ha}^{-1}$ da média produtiva (FAO, 2016). A Figura 3.1 ilustra a melancia.



Figura 3.1: Melancia (*Citrullus lanatus*).

A produção nacional de 22 frutíferas foi apresentada pelo IBGE – dentre elas as classificadas nas lavouras temporárias: abacaxi, melancia e melão – na PAM (Produção Agrícola Municipal) 2016. O valor da produção desses produtos foi 26,0% maior que em 2015, destacando a melancia entre os frutos de menor preço por unidade (R\$ 0,65/kg), com uma participação de 0,4% do valor total da produção nacional de produtos agrícolas e 4,1% de participação no valor total da produção das frutas, conseguindo a sétima posição na lista das frutas mais importantes nesse quesito (IBGE, 2016).

Dados como os do PAM 2014 mostram a região Nordeste como maior produtora de melancia do país, com destaque para BA, RN e CE, devido ao grande potencial da região na agricultura de diferentes espécies de cucurbitáceas, dadas as condições favoráveis de solo e clima (OLIVEIRA *et al*, 2002; IBGE, 2014). Assim, evidenciando a importância da fruta na produção e comércio agrícola regional.

3.2. Sementes da *Citrullus lanatus*

O aproveitamento da melancia, comumente, é restrito apenas a sua polpa, ocasionando desperdício de partes importantes como as sementes, que trazem benefícios nutricionais e medicinais desconhecidos por grande parte da população.

As sementes localizadas na polpa do fruto – constituído pelo tecido placentar de cor vermelha em função da presença de licopeno ou amarelada devido à presença de carotenos e xantofilas – apresentam diversos tamanhos, sua coloração varia do cinza ao preto (PESKE *et al*, 2003; PEREIRA, 2017).

A integração da semente de melancia na alimentação é mais comum em regiões da Ásia e da Índia, que a utilizam como matéria prima para o preparo de farinha, ou no Oriente Médio, que as assam para complemento alimentar (GAMA, 2015).

É crescente o rol de pesquisas voltadas ao uso do óleo extraído da semente de melancia *Citrullus lanatus* na indústria cosmética e farmacêutica, como também em perspectiva de seu uso na melhoria da nutrição infantil, pois a mesma possui alto teor de proteína e gordura, além de minerais benéficos, como magnésio, cálcio, potássio, ferro, fósforo e zinco (ERHIRHIE e EKENE, 2013; SONAWANE *et al*, 2016).

Diante dos diversos nutrientes existentes nas sementes da melancia. Destaca-se ainda a presença de importantes aminoácidos como, a arginina e citrulina, sendo esse utilizado pelo corpo humano para produção da arginina, que atua na divisão de células, cicatrização de ferimentos e eliminação de amônia (IKPEME *et al*, 2016; GAMA, 2015; PERKINS-VEAZIE *et al*, 2015).

O floral a base de sementes da melancia *Citrullus lanatus* é encontrado no município de Aracaju, no mercado Municipal Governador Albano Franco. Este medicamento homeopático possui como princípio ativo a citrulina que é indicado para o aumento da libido, no combate à retenção de líquidos, no controle da hipertensão, dislipidemias (distúrbio nos níveis de lipídios e/ou lipoproteínas no sangue), infecções urinárias, pedras nos rins e doenças relacionadas ao sistema renal.

Seus fins medicinais foram aplicados em várias partes do mundo, utilizando os extratos das sementes de *Citrullus lanatus* no tratamento de câncer, problemas cardiovasculares, hipertensão, ação hipotensiva e remédios caseiros para o trato de edema e infecções no trato urinário (SONAWANE *et al*, 2016). No norte do Sudão, por exemplo, o óleo gorduroso da semente, muitas vezes é utilizado para o tratamento de queimaduras, inchaço, artrite e como laxativo (DESHMUKH e JAIN, 2015).

Deshmukh e Jain (2015) mostraram suas propriedades hipoglicêmicas presentes no extrato através da metanólise das sementes de *Citrullus lanatus* aplicados em ratos diabéticos, comprovando a redução significativa de alto nível glicêmico em jejum e a recuperação de poliúria (aumento da produção de urina), polidipsia (sede excessiva) e polifagia (apetite exagerado) em ratos diabéticos.

Kiin-kabari e Akusu (2014) mostraram a influência do processamento na composição imediata, nas propriedades funcionais e na estabilidade de armazenamento da farinha de sementes de melancia (*Citrullus lanatus*), sujeitas a três métodos de processamento: secagem ao sol, assadas e previamente fervidas para posterior desidratação no forno. Como resultado os pesquisadores encontraram melhorias das propriedades funcionais para o método da secagem no forno a 50°C durante 12 h, sendo previamente fervidas por 10 min.

3.2.1. Qualidade Nutricional

O uso nutricional de sementes pode oferecer benefícios maiores que o consumo de suas respectivas frutas, pois em alguns casos as sementes possuem maiores teores de vitaminas, fibras, minerais e outros nutrientes essenciais, que frações da sua polpa (SONAWANE *et al*, 2016; OLAWUMI e FRANCA, 2017).

A valorização das sementes no mercado nutricional faz com que estudos preconizem à introdução desse produto na alimentação humana. Olawumi e Franca (2017) mostraram através da produção de cookies com farinha de semente de melancia, que a semente da *Citrullus lanatus* é rica em gordura, proteína e aminoácidos essenciais, cuja composição é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Composição de aminoácidos (g/ 100 g) da farinha da semente de melancia.

Aminoácidos	Semente inteira
Isoleucina	3,98
Leucina	6,96
Lisina	3,05
Cistina	1,12
Metionina	1,77
Aminoácidos totais de enxofre	2,89
Tirosina	1,80
Fenilalanina	4,05
Aminoácido aromático total	5,85
Treonina	4,28
Valine	4,20
Aminoácidos essenciais totais	35,04
Histidina	3,20
Arginina	8,96
Ácido aspártico	9,41
Ácido glutâmico	15,65
Serina	6,29
Prolina	3,72
Glicina	6,28
Alanina	4,34

Sonawane *et al* (2016) constataram a alta qualidade da farinha de semente de melancia, através da sua análise funcional, que pode ser vista através das Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2: Composição centesimal da farinha de semente de *C. lanatus*.

Composição (%)	Farinha da semente de <i>Citrullus lanatus</i>
Umidade	5,68 ± 0,25
Gordura	41,39 ± 2,81
Proteína	45,72 ± 3,46
Cinza	2,75 ± 0,32
Carboidrato	4,46

Tabela 3.3: Teor mineral da farinha da semente *C. lanatus* desengordurada.

Parâmetros (mg/100g)	Semente de <i>Citrullus lanatus</i> em pó
Sódio	4,71 ± 0,09
Potássio	448,3 ± 8,97
Magnésio	669,34 ± 13,39
Manganês	3,38 ± 0,07
Cobre	4,13 ± 0,08
Ferro	15,50 ± 0,31
Zinco	6,47 ± 0,13
Fósforo	1769,1 ± 35,38

3.2.2. Propriedades ópticas

A secagem ao sol de sementes de melancia traz efeitos prejudiciais a sua cor, fator decisivo na valorização e aceitação do produto no mercado. A cor avermelhada da semente da *Citrullus Lanatus* é proveniente do licopeno, que sofre efeitos de calor, luz e oxigênio na sua isomerização e auto-oxidação (CHAJI e HEDAYATIZADEH, 2017).

Além da desvalorização comercial do produto, a descoloração do material pode indicar a perda de elementos químicos importantes presentes na semente, que podem estar diretamente ligados ao sabor do alimento (BOREL, 2014).

A subjetividade da avaliação visual da coloração dos alimentos é eliminada com a leitura das coordenadas do sistema CIELab, que estrutura a variação da cor dos alimentos em: L*, do preto (0) ao branco (100); a* variando entre vermelho e verde; e

b^* que vai do azul ao amarelo. A partir de tais dados obtidos em análise a diferença de cor total (ΔE^*) do material seco, o croma ou índice de saturação (C^*), que mensura a intensidade de cor entre 0 (cores neutras) a 60 (cores fortes), e o ângulo *hue* (H^*), que indica a tonalidade, podem ser calculados para descrever as mudanças de cor da semente de melancia durante a secagem, a partir das Equações 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente (BOREL, 2014; OLIVEIRA *et al*, 2016; CHAJI e HEDAYATIZADEH, 2017):

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2} \quad (3.1)$$

Os parâmetros a^* e b^* variam entre -60 e 60. O subscrito “o” indica a leitura da cor do material *in natura*.

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (3.2)$$

$$H^* = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (3.3)$$

O valor do ângulo *hue* (H^*) varia entre 0° e 360° , sendo que estes indicam a tonalidade vermelha e 90° , 180° e 270° indicam amarelo, verde e azul, respectivamente.

O índice de escurecimento (IE) do material pode ser determinado a partir da leitura das coordenadas cromáticas e calculado de acordo com a equação (BOREL, 2014):

$$IE = \frac{100(x - 0,031)}{0,17} \quad (3.4)$$

Em que:

$$x = \frac{a^* + 1,75L^*}{5,645L^* + a^* - 3,012b^*} \quad (3.5)$$

O IE mede a intensidade da cor castanha do material, parâmetro que auxilia na identificação de escurecimento enzimático ou não do produto, porque conduzem a formação de pigmentos da cor marrom ou negra do material (BOREL, 2014).

O escurecimento enzimático inicia a partir da oxidação de fenóis endógenos por ação da enzima polifeloxidase na presença do oxigênio, desencadeando mecanismos complexos envolvendo proteínas, aminoácidos e fenóis, que resultam na formação de pigmentos escuros, perda de aroma, de propriedades nutricionais e vida útil do fruto (SILVA *et al*, 2017). Já o escurecimento não enzimático é proveniente da reação de Maillard, que envolve a caramelização de açúcares do material (CARNEIRO *et al*, 2006).

Segundo Borel (2014), a descrição da cinética de escurecimento das partículas pode ser investigada ajustando-se equações cinéticas de ordem zero e de primeira ordem aos dados experimentais, conforme as equações a seguir:

$$IE = C_o + \alpha_o \cdot t \quad (3.6)$$

$$\frac{IE}{IE_o} = \exp(\alpha_1 \cdot t) \quad (3.7)$$

Em que IE_o é o valor do índice de escurecimento do material *in natura* e C_o e α_o são as constantes da equação cinética de ordem zero e α_1 é a constante da equação cinética de primeira ordem.

Borel (2014) realizou a secagem de polén apícola, analisando dentre os atributos de qualidade do material, a cor, que teve alteração significativa na secagem infravermelho, intensificada pelo aumento da potência da radiação, e sua cinética de escurecimento melhor descrita pela equação de ordem zero.

Oliveira *et al* (2016) analisaram os efeitos da secagem na coloração de frutos de baru e constataram que quanto maior a temperatura de secagem, maior a diferença de cor, obtendo 60°C como a temperatura mais indicada para secagem do seu material.

Chaji e Hedayatizadeh (2017) realizaram a leitura das coordenadas do sistema Hunter em sementes de melancia submetidas a secagem híbrida (infravermelho + convecção forçada), desse modo, concluíram que a equação cinética de primeira ordem foi a que melhor se adequou a todas as condições de secagem, além de verificarem menor alteração colorimétrica do material.

3.3. Secagem

As sementes “*in natura*”, geralmente, apresentam inadequado teor de umidade para armazenamento, facilitando o consumo de substâncias de reserva, a liberação de energia e água que favorecem a proliferação de microrganismos e insetos, de modo a acelerar sua deteriorização em razão da alta atividade metabólica (PESKE *et al*, 2003).

A utilização de métodos de secagem aparece como solução à conservação dos alimentos, já que este processo objetiva a retirada de água presente no produto através da transferência de calor e massa entre o material e o ar de secagem (RIBEIRO, 2014; SILVA *et al*, 2016).

A transferência de massa do processo de secagem se baseia na pressão de vapor d’água do ar e na presença do vapor d’água intrínseco da semente, que tende a

ocupar os espaços intercelulares, gerando pressão de vapor em todas as direções do material, inclusive em sua superfície. Com as diferentes pressões de vapor d'água no sistema, a retirada de água do material se torna possível, sendo acelerada pelas distintas temperaturas entre o ambiente e a semente (PESKE *et al*, 2003; VILLA-CORRALES *et al.*, 2010).

A secagem, natural ou artificial, é influenciada pelo tipo de material e de secador utilizado, implicando diretamente na taxa ou velocidade de secagem do produto que depende da pressão de vapor da água e do ar de secagem, temperatura e velocidade do ar, velocidade de difusão da água no material, espessura e superfície exposta à secagem (LOPES, 2013; PARK *et al*, 2014).

A secagem natural, frequentemente aplicada por pequenos produtores em razão do seu baixo custo, ocorre à temperatura ambiente, no entanto sua aplicação se torna inviável diante das exigências do mercado atual, já que a mesma deixa o produto exposto a agentes biológicos e condições climáticas adversas, não proporcionando alta produtividade. Na secagem artificial, o secador fornece, direta ou indiretamente, calor ao material, tornando o processo mais célere, com maior controle das condições de secagem, de modo a padronizar e tornar o ambiente mais favorável para o produto final desejado (USTRA, 2005; SANTOS e RIBEIRO, 2009).

Santos *et al* (2014) ressaltam que a secagem é um dos métodos mais utilizados na conservação da qualidade de grãos e sementes na etapa de pós-colheita, garantindo manutenção da qualidade, economia no processamento e preservação do produto em ambiente natural por prazos maiores.

A secagem de produtos via radiação infravermelho vem sendo popularizada, já que permite, com segurança, maior eficiência energética e menor impacto ambiental. Além disso alguns autores destacam a combinação da convecção e da radiação infravermelho, que produz o efeito de arrefecimento causado pela convecção, permitindo maior potência do infravermelho sem degradação térmica do material (KUDRA e MUJUMDAR, 2002; RIADH *et al.*, 2015).

3.3.1. Secagem por convecção

A secagem por convecção é de fácil construção e operação, entretanto, como toda secagem de material biológico, o procedimento acarreta em consequências

físicas, químicas e nutricionais do produto, que são ocasionadas por fatores externos, temperatura e velocidade do ar, e fatores internos: densidade, permeabilidade, composição, porosidade e teor de umidade do alimento (NASCIMENTO, 2014).

A secagem convectiva ocorre de maneira indireta, de forma dependente da temperatura e umidade relativa do ar, mostrando-se com baixa eficiência energética, longos períodos de processamento, e elevado custo do processo. Diante deste contexto, diversos autores vêm estudando técnicas de secagem alternativas que minimizem esses inconvenientes (NASCIMENTO *et al*, 2014).

A temperatura do ar de secagem é um fator a ser observado, porque após um período de exposição da semente ao ar aquecido, esta tende a atingir a mesma temperatura do ar, podendo prejudicar sua qualidade fisiológica (PESKE *et al*, 2003).

Oliveira *et al* (2011) estudaram a capacidade germinativa da semente de carambola após a secagem convectiva, observando um aumento do vigor das sementes e de, aproximadamente, 24% na germinação do material submetido a secagem.

Chielle *et al* (2016) realizaram a secagem convectiva de sementes de mamão objetivando maior rendimento na extração do seu óleo. O processo realizado, com temperaturas da fonte IV variando de 40 a 100°C e velocidade do ar de 1 a 3 m/s, obteve seu melhor resultado a temperatura de 70°C e velocidade de 2 m/s, de modo que a secagem proporcionou um rendimento de 19,23% na extração do óleo das sementes de mamão.

Azzouz *et al* (2017) analisaram a secagem convectiva de sementes de uva, considerando o encolhimento do material, em condições diferentes de velocidade do ar e temperatura, de modo que o material melhor conservou sua estrutura a uma velocidade de secagem fixa em 2 m/s e temperatura de 55°C.

3.3.2. Secagem infravermelho

O aquecimento de um sólido com radiação infravermelha (IV) é realizado a partir de ondas eletromagnéticas que se encontram em um intervalo de comprimento de 0,75 até 100 μm . Assim, esta energia penetra no sólido e se converte em calor, aquecendo-o rápido e de maneira mais uniforme, uma vez que a radiação é transferida da fonte para o produto, sem aquecimento do ar do ambiente, tornando esse método mais eficiente (SWASDISEVI *et al*, 2007; COSTA, 2010).

O uso da energia eletromagnética, como a radiação IV, é uma alternativa muito utilizada para aumentar a eficiência do processo de secagem, porque tal processo possui diversas vantagens, dentre elas: o simples manuseio do equipamento, a fácil associação com outros métodos de secagem, o direcionamento preciso da fonte de calor para a superfície do material, a capacidade de emitir altas taxas de calor em equipamentos pequenos, alta qualidade do produto final e menor tempo de processamento (*BARBOSA NETO *et al*, 2014).

Segundo Ginzburg (1969), em termos qualitativos o aquecimento infravermelho pode atuar como tratamento térmico para inativação de fatores tóxicos e enzimas degradativas, redução da contagem microbiana, melhoria da operação de descasque de grãos de leguminosas e, em geral, agregando valor aos grãos de cereais, leguminosas e oleaginosas.

Um fato muito importante a ser analisado na secagem com infravermelho é a temperatura da fonte de calor, porque altas temperaturas proporcionam uma secagem mais rápida, no entanto, podem modificar significativamente a superfície do produto, acarretando danos ao elemento. Desse modo, as vantagens técnicas e econômicas desse procedimento devem ser controladas, visando à qualidade final do produto (GLOUANNEC, 2008; SANTOS, 2009).

Estudos mostram o avanço tecnológico no uso da radiação infravermelho, que vem sendo frequentemente aplicada, seja no modo contínuo ou intermitentemente, de forma isolada ou acoplada a um sistema convectivo, sendo esta conhecida por secagem híbrida, pois envolve mais de um método de secagem. Este método de secagem é promissor, uma vez que aumenta a taxa de secagem, diminuindo o consumo de energia e a degradação do produto, tornando-o comercialmente viável (GLOUANNEC, 2008; SANTOS, 2009; MUJUMDAR, 2015).

Barbosa Neto *et al* (2014) estudaram a secagem infravermelho e o encolhimento de sementes de sorgo encapsuladas em matriz polimérica à base de gel em diferentes faixas de temperaturas. Os autores verificaram que o efeito da temperatura da fonte infravermelho na contração de partículas foi mais significativo no período da taxa constante e praticamente desprezível no período da taxa decrescente.

Silva Neto *et al* (2014) estudaram a cinética de secagem das sementes de pinhão-mansão através da secagem infravermelho com as temperaturas da fonte de 70, 80 e 90°C. O comportamento cinético mostrou apenas o período a taxa decrescente e

que o processo foi descrito adequadamente pelo modelo difusivo de Fick, obtendo maiores difusividades efetiva nas sementes mais maduras.

Okeyo *et al* (2017) realizaram a secagem infravermelho de arroz recém colhido a 23,5% de umidade em base úmida, com intensidade de radiação infravermelho de 5,55 kW/m² durante 30, 50, 90 e 180 s. Eles concluíram que, para todas as amostras, a remoção de umidade e a energia necessária para realização do processo, aumentaram juntamente com a duração da secagem, além disso, notaram que o tratamento com infravermelho não afetou negativamente as qualidades sensoriais e de moagem do arroz, excetuando-se as amostras aquecidas por 180 s.

3.3.3. Secagem infravermelha intermitente

O uso da intermitência permite tempo para transferir a umidade do centro para a superfície da amostra durante o período de equalização (intermitência), diminuindo a concentração da umidade no interior da semente. Portanto, a degradação da qualidade e o dano causado pelo calor são minimizados pela aplicação de secagem intermitente (KUMAR *et al*, 2014).

A secagem intermitente é caracterizada por períodos em que o material está exposto à radiação infravermelha e em que não está exposto de maneira intercalada e proporcional. Essa relação de intermitência pode ser lenta, onde a razão de intermitência é de 1:1 a 1:3, ou seja, para cada período de exposição à radiação infravermelha, é necessário um período de equalização igual ou até três vezes maiores. Enquanto que o método de intermitência rápida funciona numa proporção, em geral, de 1:6 a 1:15 (COSTA, 2010).

A intercalação entre períodos de submissão a fonte de calor e períodos sem aquecimento aumenta a quantidade de água removida por unidade de tempo quando comparado à secagem contínua, porque após a retirada da água superficial a taxa de secagem máxima atingida é a velocidade de migração da água do interior para a superfície (PESKE *et al*, 2003).

A redistribuição de umidade do material durante o período de equalização ao reduzir gradientes de água e temperatura provocam a diminuição de trincas, de tensões térmicas e hídricas, não violando a estrutura do material. Assim, a secagem intermitente

é indicada para materiais suscetíveis ao calor como: grãos, vegetais, frutas, ervas, cerâmica e madeira (LIMA *et al*, 2016).

Ghasemi *et al* (2017) analisaram a secagem intermitente do arroz e ao fim do experimento constataram a redução significativa do índice de craqueamento durante a intermitência em períodos maiores de secagem.

Jung e Yoon (2018) realizaram a secagem intermitente lenta da soja, objetivando a redução do seu craqueamento em períodos de têmpera, e mostraram que houve manutenção da qualidade física dos grãos, que o processo de secagem redistribuiu a umidade do material baixando seu estresse térmico, garantindo eficiência de 0,25 com menor taxa de craqueamento.

3.3.4. Secagem híbrida

Os diversos métodos de secagem possuem características e qualidades próprias que muitas vezes não suprem a necessidade de determinado material, assim, numa tentativa de suprir quaisquer desvantagens que o processo possa apresentar, visando mais eficiência e baixo consumo energético, a secagem híbrida uni dois ou mais métodos de secagem em um único procedimento (KOWALSKI, 2009).

A combinação da secagem convectiva com a radiação infravermelha propicia um efeito sinérgico, trazendo maior eficiência e qualidade ao produto, como também o aumento da transferência de massa e redução da temperatura superficial do material, pois a junção desses dois métodos visa o aquecimento da amostra como um todo via radiação, desidratando o elemento por igual e a retirada da umidade superficial pela convecção, causando menos dano ao produto (WANYO *et al*, 2011; NASCIMENTO *et al*, 2014).

Nascimento (2014) realizou a secagem híbrida (convecção + infravermelho) de grãos de *Moringa Oleifera*, objetivando analisar o potencial de aplicação da secagem híbrida quanto a eficiência de secagem, consumo energético e manutenção da qualidade do material. Desse modo, ele concluiu que a secagem aumentou a qualidade do seu material, elevando os níveis de concentração de proteína, favoreceu a sedimentação de sólidos devido à oxidação de lipídios e promoveu maior remoção da turbidez de água sintética tratada com solução a base desses grãos.

Chayjan e Radmard (2016) realizaram a secagem híbrida (infravermelho + micro-ondas) de sementes de lentilha e mostraram a diminuição da umidade e da difusividade efetiva com o aumento da temperatura, como também que o valor da difusividade efetiva, segundo o modelo teórico, é menor quando se considera o encolhimento do material.

Wang *et al* (2014) realizaram a secagem híbrida (convecção + infravermelho) de calamar (lula) desfiado e mostraram que o melhor resultado obteve consumo razoável de energia em curto tempo de processamento nas condições operacionais de 0,5 m/s para a velocidade do ar e comprimento de onda infravermelho de 2,5-3,0 μm . Além de observarem que o consumo específico de energia aumenta linearmente com a velocidade do ar.

Diante do exposto a utilização da secagem híbrida é um método eficiente e satisfatório que traz boa qualidade ao produto final, unindo vantagens de mais de um método de secagem. Assim, acredita-se na viabilidade da secagem híbrida das sementes da *Citrullus lanatus*.

3.4. Cinética de secagem

A cinética de secagem realiza a análise comportamental da transferência de massa entre as sementes e o agente de secagem, contribuindo com informações relevantes ao processo, que envolve a difusão da umidade em camada fina de sementes, submetidas a variáveis pré-determinadas como a temperatura, a velocidade e a umidade relativa do ar de secagem, além de ajustes matemáticos que permitem estimar o comportamento da água na semente (RODOVALHO *et al*, 2015).

A literatura apresenta modelos para representar a cinética de secagem de diferentes materiais. Esses modelos podem ser classificados em teóricos, empíricos ou semi-empíricos. Os modelos teóricos, geralmente complexos por envolverem muitas funções e parâmetros, se baseiam em leis e teorias científicas; os empíricos não oferecem indicadores de energia e transporte de umidade, são mais simples, facilmente aplicados e se ajustam de modo satisfatório aos dados experimentais obtidos; os modelos semi-empíricos são baseados, principalmente na Teoria da difusão líquida de Lei de Fick e na Teoria da Lei de Newton do Resfriamento (BOTELHO *et al*, 2011; RODOVALHO *et al*, 2015). A Tabela 3.1 apresenta as equações de secagem semi-empíricas mais utilizadas.

Tabela 3.4: Equações semiempíricas para a cinética de secagem.

Equação	Representação Matemática	Referência
Lewis	$XR = \exp(-k.t)$ (3.1)	Celma <i>et al</i> (2008)
Page	$XR = \exp(-k.t^n)$ (3.2)	Santos <i>et al</i> (2014)
Brooker	$XR = a.\exp(-k.t)$ (3.3)	Almeida <i>et al</i> (2014)

$$*XR = (X - X_e)/(X_0 - X_e)$$

A melhor descrição do processo de secagem é baseada na segunda Lei de Fick, que relaciona o coeficiente de difusão da semente com o ar de secagem. Esse modelo difusivo é amplamente empregado na descrição dos mecanismos de migração da umidade presente no sólido (RODOVALHO *et al*, 2015).

Para fins de simplificação do modelo teórico, faz-se necessário a utilização de algumas hipóteses simplificadoras (RODOVALHO *et al*, 2015; SANTOS *et al*, 2014):

- assumindo as sementes como placa plana;
- o teor de umidade inicial (X_0) é uniforme;
- a transferência de massa é predominantemente difusiva;
- transferência de massa unidimensional em z;
- pressão constante ao longo do processo;
- coeficiente difusivo efetivo (D_{eff}) constante;
- encolhimento desprezível;
- sem reação química e
- $Bi > 40$.

Dessa forma a equação diferencial apresenta a forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (3.4)$$

Para solucionar tal equação, admitem-se as seguintes condição inicial (CI) e condições de contorno (CC):

$$\begin{cases} CI: X(0, z) = X_0 \\ CC1: \frac{\partial X(t, 0)}{\partial t} = 0 \\ CC2: X(t, Z) = X_e \end{cases}$$

Resolvendo a equação, esta assume a forma:

$$XR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2.n + 1)^2} \cdot \exp \left[- \frac{(2.n + 1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4.L^2} \right] \quad (3.5)$$

Sendo XR o adimensional de umidade, X o teor de umidade da semente (b.s.), X_0 o teor de umidade inicial da semente (b. s.), X_e o teor de umidade de equilíbrio da semente (b.s.), D_{eff} o coeficiente de difusão efetivo (m^2s^{-1}), n o número de casos (termos) e t o tempo (s).

Para Younis *et al.* (2018), em processos de secagem longos, a equação 3.5 pode ser resumida a:

$$XR = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{L^2} \right] \quad (3.6)$$

3.5. Encolhimento

O encolhimento é característico de produtos muito úmidos, que implicam na consideração da cinética de contração, para diferentes temperaturas do ar de secagem e teores de umidade, na previsão de perfis do teor de umidade do produto, tornando esse fenômeno importante para o conhecimento das características intrínsecas do produto (FILHO *et al.*, 2015).

A contração volumétrica não é consequência exclusiva da perda do teor de umidade, mas também do processo e da geometria do produto, principalmente nos materiais biológicos que se contraem nas direções longitudinal, tangencial e radial. Esse encolhimento (S) normalmente é expresso da relação dos volumes da amostra antes e pós-secagem, como pode ser notado na seguinte Equação (LOPES, 2013):

$$S = \left(1 - \frac{V_d}{V_o} \right) \times 100 \quad (3.7)$$

Sendo V_d o volume da amostra após a secagem e V_o o volume aparente inicial da amostra.

Segundo Arrieche (2003) o fenômeno do encolhimento acontece devido a alguns mecanismos durante o processo de secagem. Dentre estes, cita-se a atuação de forças capilares, que ocorrem com a desidratação do produto, de modo a relaxar as pressões exercidas por esses mecanismos. O processo de encolhimento dá-se fim quando o material passa do estado gomoso para o estado vítreo ou ainda com a formação do chamado “*case harding*”, devido as elevadas temperaturas da secagem, que dificultam a sua contração.

Leite *et al* (2015) analisaram a contração volumétrica de fatias de banana da Terra e mostraram o efeito da redução rápida de umidade sob altas temperaturas, o que

torna a passagem do estado gomoso para o vítreo mais rápido, reduzindo o encolhimento.

Mota (2016) estudou o processo de secagem em estufa de circulação com renovação forçada de ar nas temperaturas de 30, 40 e 50°C, e armazenagem por seis meses sob temperaturas de 15 e 25°C de feijão carioca após o processo de desidratação, analisando suas propriedades a cada mês. Assim, concluiu que com a redução do teor de umidade a porosidade e contração volumétrica sofreram redução em seus valores à medida que as sementes foram submetidas à secagem.

Engelhardt e Arrieche (2016) analisaram amêndoas de cacau, previamente fermentadas durante 5 e 7 dias, submetidas a secagem convectiva em monocamada com temperatura de 70°C, velocidade do ar entre 0,5 e 3 m/s e três tipos de secadores, destacando o túnel de vento e a estufa de convecção natural. Desse modo, concluíram que o encolhimento e a forma das amêndoas foram diferentes entre si para cada tipo de secador utilizado, como também, que o melhor modelo de ajuste à cinética de secagem experimental foi o de Brooker.

3.6. Consumo energético específico

O consumo energético específico depende de propriedades do sólido, do fluido e do equipamento, fazendo-se necessária a busca por condições operacionais que proporcionem menor custo e maior qualidade do produto. Oliveira *et al* (2017) notaram a forte influência do aumento do peso da amostra no consumo energético quando otimizaram o consumo energético da secagem do crambe em um secador de leito fixo.

Darvishi *et al* (2013) investigaram o consumo energético e a cinética de secagem híbrida (convecção + micro-ondas) de sementes de girassol, de modo a concluir que o aumento da potência do micro-ondas resultou na maior eficiência do processo, juntamente com diminuição significativa do consumo de energia.

Segundo Calín-Sánchez *et al* (2013), que estudaram a secagem de fatias de alho, usando pré-secagem convectiva para posterior secagem por microondas a vácuo, seu material apresentou comportamento típico de produtos vegetais quando a amostra exigiu incremento do consumo energético específico nas últimas etapas do processo de secagem, devido o encolhimento que dificultou a perda de umidade da amostra.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e as metodologias utilizadas na caracterização e secagem das sementes de melancia, tais como: material e equipamento utilizado, caracterizações física e óptica, planejamento experimental, secagem infravermelha contínua, híbrida e intermitente, análise do encolhimento e consumo energético do processo.

4.1. Material

As sementes da melancia *Citrullus lanatus* foram obtidas através do consumo pessoal e diário da fruta. Com o material coletado, as sementes foram separadas por cor, conforme a Figura 4.1, permanecendo para análises as escuras, que possuem maior absorção infravermelha, encontram-se em maior quantidade no fruto e são férteis para germinação.



Figura 4.1: Separação de sementes de melancia por cor.

As amostras foram lavadas em água corrente e armazenadas em freezer convencional, a fim de manter as condições naturais. O processo de descongelamento, para realização da secagem, ocorreu à temperatura ambiente.

A determinação da umidade das amostras *in natura* foi obtida pelo método gravimétrico em estufa a $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ por 24 h, conforme norma do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2009).

4.2. Equipamentos

O equipamento de secagem infravermelha está localizado no Laboratório de Fenômenos de Transporte do Departamento de Engenharia Química na Universidade Federal de Sergipe.

O secador utilizado nos processos é composto por lâmpada *Philips* modelo IR 250 RH IR2 operando entre 230-250 V e 250 W, dimmer para ajuste de temperatura, termopar, câmara de secagem com (26 x 26 x 16) cm³, revestida de isopor, para minimizar as perdas de calor, e alumínio, que reflete os raios infravermelhos para o centro do equipamento em direção as sementes, gerando maior rendimento do equipamento. Além disso, o equipamento possui um cooler acoplado ao fundo, que possibilita o controle de velocidade do ar interna. A representação do aparelho pode ser vista na Figura 4.2:

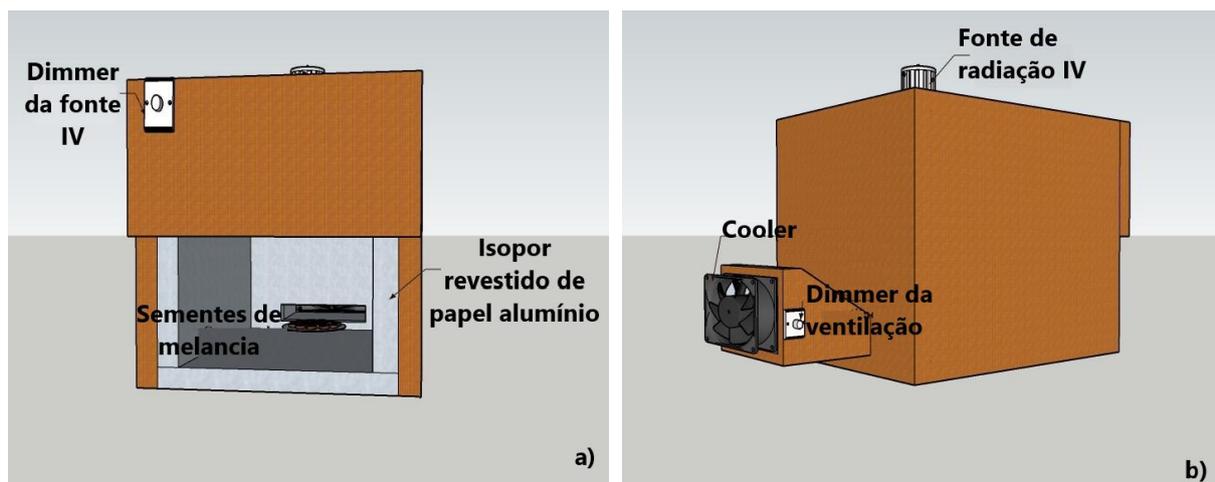


Figura 4.2: a) Vista frontal do equipamento. b) Vista lateral do equipamento.

4.3. Metodologia

As metodologias abrangem as caracterizações físicas das amostras, e os processos de secagem que serão utilizados (radiação IV contínua, IV intermitente e a secagem híbrida), bem como o planejamento experimental e o tratamento de dados.

4.3.1. Caracterização física das sementes

A caracterização de 200 sementes, previamente selecionadas, foi realizada por um paquímetro digital do modelo *Digimess* com precisão de 10^{-2} mm para obtenção da espessura (z) da semente e do software *Image Pró-Plus* para aferição da largura (x) e comprimento (y), conforme esquematizado na Figura.

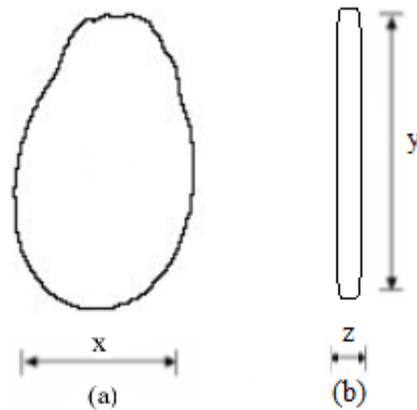


Figura 4.3: Dimensões características da semente de melancia: x , largura; y , comprimento; z , espessura. (a) vista frontal (b) vista lateral.

A partir de tais dimensões foram calculados o diâmetro equivalente e esfericidade do material, segundo as equações descritas por Mohsenin (1986), respectivamente:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{x \cdot y \cdot z} \quad (4.1)$$

$$\varphi = \frac{D_{eq}}{y} \quad (4.2)$$

4.3.1.1. Volume da semente

O volume real da semente (V_p), em cm^3 , foi determinado por picnometria gasosa, conforme método aplicado por Prado *et al* (2001), utilizando de maneira eficiente o gás hélio que penetra entre os poros do sólido, não interagindo com os constituintes da amostra. O picnômetro a gás é da série AccuPyc II 1340, totalmente automático, e se encontra no Laboratório Multiusuário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFS.

O volume aparente da amostra (V_{ap}) foi obtido através do cálculo do volume, aproximando a partícula para um elipsoide oblato, já que o material apresenta características semelhantes a esta forma:

$$V_{ap} = \frac{4\pi x \cdot y \cdot z}{3} \quad [\text{kg.m}^{-3}] \quad (4.3)$$

Todos os testes volumétricos aqui referidos foram feitos em triplicatas, a fim de obter resultados mais precisos do material analisado.

4.3.1.2. Massa específica real e aparente

I) *Massa específica real*

A massa específica real foi determinada a partir da razão entre a massa da partícula (m) e o volume real da semente (V_p):

$$\rho_p = \frac{m}{v_p} \quad [\text{kg.m}^{-3}] \quad (4.4)$$

II) *Massa específica aparente*

A massa específica aparente foi determinada pela razão entre massa da amostra e volume aparente da semente (V_{ap}):

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_{ap}} \quad [\text{kg.m}^{-3}] \quad (4.5)$$

4.3.1.3. Porosidade

A quantidade de espaços vazios do sólido foi obtida através da relação entre volumes real (V_p) e aparente (V_{ap}) da amostra, conforme a Equação:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{V_p}{V_{ap}}\right) \times 100 \quad [\%] \quad (4.6)$$

4.3.2. Experimentos de secagem

O processo de secagem foi realizado utilizando o equipamento descrito no item 4.2, com distância fixa da fonte de 17 cm, e as sementes dispostas em monocamada sobre uma bandeja de alumínio, conforme a Figura 4.4. Foram empregados três estratégias de secagem: aplicação contínua da radiação IV, aplicação intermitente da radiação IV e aplicação contínua da radiação IV combinada à convecção forçada de ar não aquecido.



Figura 4.4: Sementes de melancia em monocamada para secagem IV.

Com o objetivo de comparar os métodos utilizados, os experimentos foram realizados com amostras de, aproximadamente, 11,5 g e temperaturas fixas de 45, 65 e 85°C. A massa da amostra foi pesada em tempos pré-determinados em balança analítica com precisão de 10^{-4} kg, da SHIMADZU modelo AUX 220, até atingir variação da massa de 10^{-2} g.

A temperatura superficial do sólido nos processos de secagem foi aferida por um pirômetro infravermelho a laser da Impac, modelo IP – 850. A determinação do teor de umidade das amostras foi realizada pelo método gravimétrico em estufa a $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ por 24 h, conforme norma do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2009).

I) Secagem com sistema infravermelho contínuo

A secagem infravermelha contínua ocorreu de maneira ininterrupta até atingir os critérios de parada pré-estabelecidos (variação da massa de até 10^{-2} g).

II) Secagem com sistema infravermelho intermitente

Na secagem intermitente foram consideradas relações de intermitência lenta e rápida conforme estudo realizado por Costa (2010), sendo determinadas as proporções de 1:1, 1:5 e 1:9 para a exposição das sementes à radiação IV.

III) Secagem híbrida

Para a secagem híbrida (infravermelho + convecção forçada) foram utilizadas as velocidades do ar de 0,4, 0,8 e 1,2 m.s^{-1} medidas com um anemômetro da INSTRUTHERM modelo AD-250 e precisão de 10^{-2} m.s^{-1} .

A definição das velocidades do ar de secagem teve como base o limite operacional da ventoinha (1,4 m.s^{-1}) e os trabalhos de López *et al* (2015) e Azzouz *et al* (2017) que realizaram a secagem convectiva de grão de bico e sementes de uva, respectivamente.

4.3.3. Planejamento experimental

O planejamento fatorial foi utilizado como ferramenta auxiliar na realização dos experimentos que tiveram como variáveis a temperatura da fonte de radiação infravermelho, a velocidade do ar de secagem e o tempo de intermitência do processo.

Assim, para a secagem com radiação infravermelha contínua teremos 1 fator e 3 níveis do processo baseados na temperatura da fonte, como mostra a Tabela 4.1, totalizando 3 experimentos para esse modo de secagem, com duplicata em todos os pontos e triplicata nos pontos centrais.

Tabela 4.1: Valores codificados e reais das variáveis utilizadas no planejamento experimental da secagem contínua.

Variável	Nível: valor codificado		
	-1	0	+1
	Nível: valor real		
Temperatura (°C)	45	65	85

Nas secagens intermitente e híbrida, ambas terão 2 fatores e 3 níveis, de modo que foi necessário a realização de 19 experimentos em cada modo de secagem, já que cada processo de secagem contou com duplicata em todos os pontos e triplicata nos pontos centrais. As variáveis que foram utilizadas no experimento podem ser vistas nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2: Valores codificados e reais das variáveis utilizadas no planejamento experimental da secagem intermitente.

Variável	Nível: valor codificado		
	-1	0	+1
	Nível: valor real		
Temperatura (°C)	45	65	85
Intermitência (min)	1:1	1:5	1:9

Tabela 4.3: Valores codificados e reais das variáveis utilizadas no planejamento experimental da secagem híbrida.

Variável	Nível: valor codificado		
	-1	0	+1
	Nível: valor real		
Temperatura (°C)	45	65	85
Velocidade do ar (m/s)	0,4	0,8	1,2

4.3.4. Tratamentos dos dados de secagem

Com os dados da massa obtidos nos processos de secagem em monocamada e com a massa de sólido seco, foram feitas as curvas de cinética de secagem do material, a partir do adimensional representado na Equação.

$$X = \left(\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \right) \quad (4.7)$$

Sendo X é o teor de umidade em determinado tempo, X_e a umidade de equilíbrio e X_0 a umidade inicial da amostra.

As equações teórica e semi-empíricas para análise da cinética de secagem foram apresentadas no item 3.4. A difusividade efetiva foi obtida a partir da aplicação da solução do modelo difusivo, Equação 3.5, aos dados experimentais no período de taxa decrescente.

De acordo com Rodovalho *et al* (2015) e Santos *et al* (2014) a relação entre a difusividade efetiva e o aumento da temperatura de secagem pode ser simplificada por meio da equação do tipo Arrhenius.

$$D_{eff} = D_0 \cdot \exp \left[-\frac{E_a}{R \cdot T_a} \right] \quad (4.8)$$

Em que D_0 é o fator pré-exponencial ($m \cdot s^{-1}$), E_a a energia de ativação ($J \cdot mol^{-1}$), R a constante universal dos gases ($8,314 J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$) e T_a a temperatura absoluta (K).

Os coeficientes do modelo de Arrhenius serão obtidos por meio da linearização logarítmica representada na forma da equação:

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R \cdot T_a} \quad (4.9)$$

A energia de ativação, que representa a dificuldade de retirada de umidade do sólido, será determinada pela inclinação de $\ln(D_{eff}) \times \frac{1}{T_a}$.

Os ajustes e análises das curvas determinadas foram realizados com auxílio do OriginPro 8 através do “Nonlinear curve fit”, adotando critérios estatísticos utilizadas por Rodovalho *et al.* (2015): coeficiente de determinação (R^2), os erros estimados (SE), além do teste qui-quadrado (X^2):

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y - Y_0)^2}{GLR}} \quad (4.10)$$

$$X^2 = \frac{\sum(Y - Y_0)^2}{GLR} \quad (4.11)$$

Onde Y é o valor observado experimentalmente, Y_0 o valor estimado pelo modelo, n o número de observações experimentais e GLR o grau de liberdade do modelo.

4.3.5. Encolhimento das partículas

A análise do encolhimento foi realizada em tempos pré-determinados, onde 10 sementes foram retiradas aleatoriamente do processo de secagem, pesadas em balança analítica modelo *Shimadzu* e submetidas ao sistema para obtenção das imagens conforme a Figura 4.5.

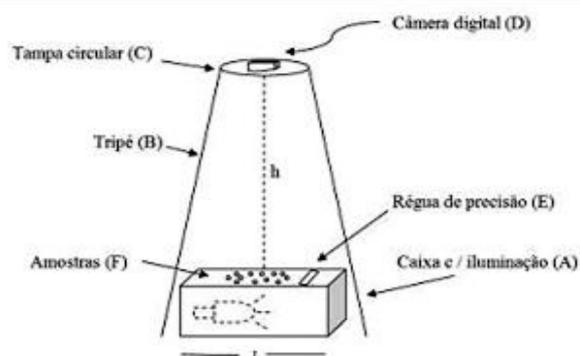


Figura 4.5: Esquema de coletor de imagens.
Fonte: SERRA, 2017.

As dimensões das sementes foram aferidas de acordo com o item 4.3.1, com o intuito de avaliar o encolhimento do material ao longo do experimento após a exposição à radiação IV.

4.3.6. Caracterização óptica

A cor das sementes foi medida conforme procedimento adotado por Borel (2014). Com um colorímetro portátil (MiniScan Ez, marca Hunterlab) com fonte de luz D_{65} , ângulo de observação 10° , abertura de célula de 30 mm e escala L^* (luminosidade

do material), a^* (faixa de cor do verde ao vermelho) e b^* (a cor do material do azul ao amarelo) do sistema CIELab, foram efetuadas as medidas das coordenadas cromáticas nas sementes *in natura* e ao longo de cada processo de secagem.

4.3.7. Consumo energético específico

O consumo de energia foi quantificado com o auxílio de um multímetro alicate da marca *minipla*®. A tensão e a corrente foram medidas, da fonte IV e do cooler, em intervalos de 20 minutos durante os experimentos, para assim obter a potência:

$$P = V \cdot I \quad (4.12)$$

Sendo P é a Potência (kW), V a Tensão (V) e I a Corrente (A).

Podendo, assim, efetuar o cálculo do consumo energético específico:

$$E = \frac{P \cdot t}{m_w} \quad [\text{kWh/g}] \quad (4.13)$$

Em que m_w é a massa de água removida (g) e t o tempo de secagem (h).

Na secagem intermitente foi descontado o tempo que a amostra não ficou exposta ao infravermelho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados correspondentes aos experimentos realizados em laboratório, dentre eles a caracterização física, cinética de secagem, análise química, fisiológica e consumo energético.

5.1. Caracterização física

Após a separação das sementes por cor, 200 sementes “*in natura*” foram escolhidas aleatoriamente para aferição de suas dimensões, a fim de caracterizar as amostras utilizadas no processo de secagem.

As medidas de largura, comprimento e espessura destas sementes foram obtidas através do paquímetro digital e do software *Image Pró-Plus*, a fim de avaliar qual o melhor método para análise física das mesmas, baseando-se no desvio padrão e variância. Os valores encontrados estão expostos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Valores médios do comprimento (y), largura (x), espessura (z), diâmetro equivalente (D_{eq}), esfericidade (φ), desvio padrão e variância das sementes de melancia “*in natura*”.

	y (mm)	x (mm)	z (mm)	D_{eq} (mm)	φ (mm)
Paquímetro Digital	9,38	6,05	2,21	5,01	0,534
Software <i>Image Pró-plus</i>	9,15	5,80	-	4,97	0,543
Desvio Padrão	0,16	0,18	-	0,03	0,01
Variância	0,03	0,03	-	$8,0 \times 10^{-4}$	$4,05 \times 10^{-5}$

Ao comparar as medidas encontradas pelo paquímetro digital e pelo software, e analisar os dados de desvio padrão e variância, pode-se perceber a diferença mínima existente entre os resultados aferidos. Assim, por conta do fácil manuseio do equipamento e agilidade do procedimento, a largura e o comprimento das sementes foram baseados no software *Image Pró-Plus*, enquanto que a espessura foi mensurada pelo paquímetro digital, pois o software não realiza a leitura desta.

Com o método de caracterização definido, as 200 sementes “*in natura*” foram separadas em três grupos, de modo a utilizar as sementes pertencentes ao maior grupo, objetivando porções homogêneas. Tais dimensões podem ser vistas na Figura 5.1.

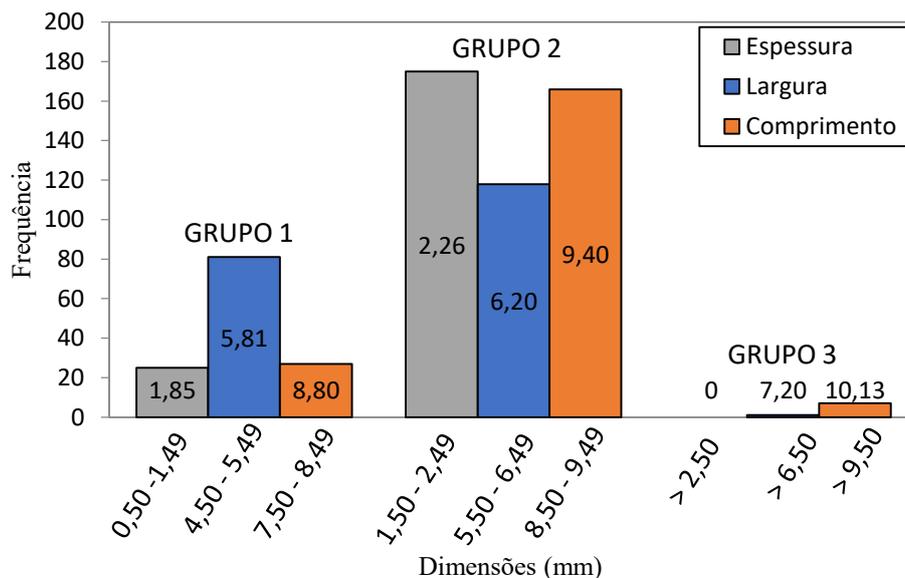


Figura 5.1: Dimensões e frequência das sementes “*in natura*”.

Ao analisar a Figura 5.1, nota-se a baixa frequência das sementes que se enquadram nos grupos 1 e 3, com exceção da largura das amostras analisadas que tiveram frequência de 81 e 118 nos grupos 1 e 2, respectivamente.

No entanto, a média da largura dos grupos 1 e 2 ficaram próximas: 5,81 e 6,2 mm, respectivamente, proporcionando baixos valores de desvio padrão (0,28) e variância (0,08). Logo, ao se analisar os grupos com maiores índices de frequência das sementes (Grupos 1 e 2), pode-se caracterizar as dimensões físicas do material estudado da seguinte forma: espessura variando de 1,50 a 2,49 mm, largura de 5,50 a 6,49 mm e comprimento de 8,50 a 9,49 mm.

Para estudo do material e fins comparativos, adotaram-se as dimensões fixas das sementes, a partir das médias apresentadas na Tabela 5.1 do software *Image Pro-Plus*, ou seja, 2,21 mm de espessura, 5,80 mm de largura e 9,15 mm de comprimento.

Diante disso, nota-se que o comprimento da semente é muito maior que sua espessura e largura, como também os baixos valores da esfericidade, permitindo, dessa forma, a aproximação do material ao modelo de placa plana da Lei de Fick, justificando assim a escolha da geometria para aplicação do modelo difusivo.

Sihui *et al* (2012) analisaram as propriedades físicas de três tipos de sementes de melancia visando melhorias na germinação destas, encontrando médias de espessura, largura, comprimento e esfericidade iguais a 2,20, 6,58, 9,50 mm e 0,54 mm, respectivamente, corroborando com os dados apresentados na Tabela 5.1.

No entanto, o estudo desenvolvido por Seyed *et al* (2006) mostrou dimensões distintas das encontradas neste trabalho com exceção da esfericidade. As análises mostraram variações de 2,91 a 3,10 mm; 8,4 a 10,7 mm; 13,45 a 18,97 mm e 0,44 a 0,51 mm, para a espessura, largura, comprimento e esfericidade, respectivamente.

A diferença das dimensões encontradas entre os trabalhos analisados pode ser justificada pela variedade da melancia estudada, já que essa sofre influência da região, do solo, do clima ou da maneira como é cultivada.

5.2. Cinética de secagem

As amostras de sementes de melancia apresentaram teor de umidade médio, em base úmida (X_{bu}), de $(44 \pm 4,4) \%$.

Esse teor de umidade das sementes se assemelha aos obtidos por Koocheki *et al* (2007) e Chaji e Hedayatizadeh (2017), que avaliaram algumas propriedades da semente de melancia e determinaram teores de umidade de, aproximadamente, 50% em base úmida.

A cinética de secagem foi discutida separadamente para cada método aplicado no processo, de modo a observar as melhores condições e influências das variáveis estudadas.

1) Secagem via infravermelho: aplicação contínua

O comportamento da temperatura superficial das sementes pode ser analisado em conjunto com a perda de umidade do material para diferentes temperaturas de secagem, como observado na Figura 5.2.

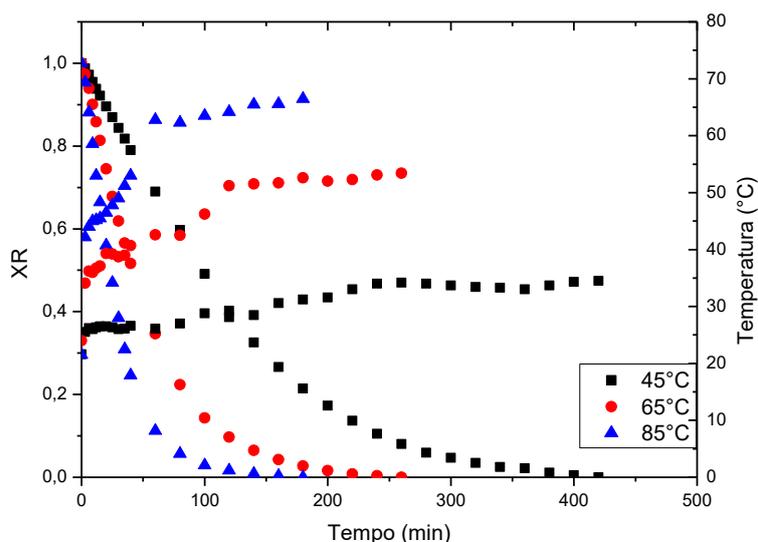


Figura 5.2: Teor de umidade e temperatura em função do tempo.

Ao analisar a Figura 5.2 nota-se que tanto a temperatura superficial da amostra, quanto o teor de umidade, sofrem influência da temperatura da fonte, mostrando que quanto maior a intensidade do infravermelho, maior será o aumento da temperatura superficial da semente e, conseqüentemente maior perda de umidade. Destaca-se que a secagem a 45°C, mesmo com comportamento semelhante às outras duas condições analisadas, não teve muita variação da temperatura superficial da amostra (28 a 33°C), pois além da temperatura da fonte ser relativamente baixa, existem perdas de energia para o meio que diminuindo o aquecimento do material.

Pode-se perceber que a superfície das sementes tendem a temperatura constante de 33, 50, 63°C nas secagens referentes às temperaturas da fonte de 45, 65 e 85°C, respectivamente. Esse comportamento é explicado pela perda de energia térmica para o meio, que impossibilita que temperatura superficial do material se iguale a da fonte, assim, pode-se afirmar que quanto maior a temperatura da fonte, maior e mais rápida a perda de umidade do material como mostram os dados de taxa de secagem apresentados na Figura 5.3.

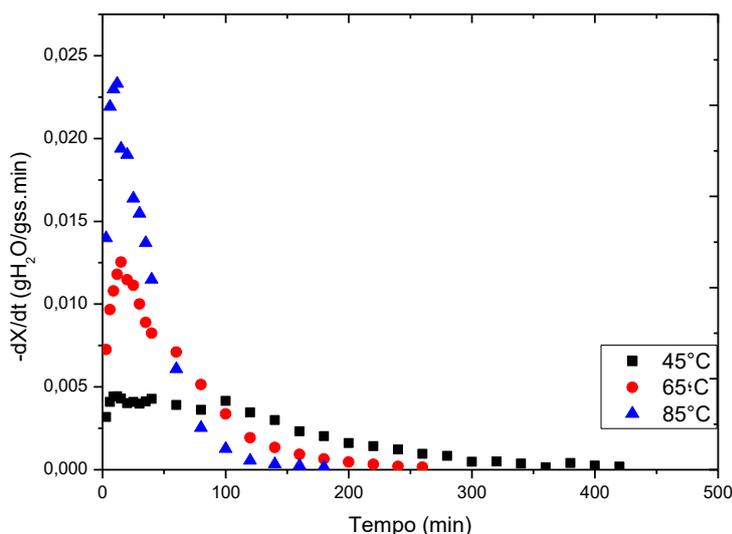


Figura 5.3: Taxa de secagem em função do tempo.

Ao analisar a taxa de secagem da amostra em função do tempo, nota-se um comportamento, predominantemente, decrescente nas secagens, passando por um breve período de indução. No entanto, a secagem a 45°C difere das outras duas secagens pela presença do período a taxa constante, como pode ser observado na Figura 5.3.

O período de aquecimento da secagem com fonte a 45°C é breve quando comparado aos outros, sendo explicado pela pequena diferença de temperatura inicial da amostra (17°C) e a fonte, uma vez que as sementes se encontram em temperatura inferior a da fonte. Tal processo ocorreu até o momento em que a energia recebida pela transferência de calor foi suficiente para vaporizar a umidade superficial inicial da amostra.

A taxa constante presente na secagem contínua com fonte a 45°C ocorreu de 15 a 50 min, durante a constante transferência de calor e massa na superfície do material, mostrando que a pressão de vapor da água e temperatura na superfície da amostra são praticamente constantes, ou seja, a migração da água intrínseca na amostra é rápida o suficiente para suprir a perda de umidade superficial das sementes. Tal período é considerado incomum na secagem de materiais biológicos, conforme é explicado por Park *et al* (2014), mas é justificado no material devido à baixa temperatura de secagem.

O período à taxa decrescente, presente em todas as condições secagens, inicia-se a partir do instante de tempo 12, 15 e 50 min para as secagens com T_{IV} de 85, 65 e 45°C, respectivamente, em que o gradiente de teor de umidade é mínimo na superfície das sementes, diminuindo a velocidade de secagem do produto, devido a resistência

interna à transferência de massa, na qual a água intrínseca precisa vencer essa resistência para chegar a superfície da amostra.

O processo acaba quando as secagens atingem 420, 260 e 180 min de processamento para temperaturas da fonte a 45, 65 e 85°C, respectivamente, em que a taxa se torna praticamente nula, porque as pressões de vapor da água das sementes e do ar entram em equilíbrio, cessando a transferência de massa. Assim, percebe-se que a secagem a 85°C possibilitou menor tempo de secagem, já que esta possibilita rápida elevação da temperatura superficial da amostra em curto instante de tempo.

Doymaz (2016) estudou a secagem e reidratação da semente de abóbora e também constatou a predomínio da taxa decrescente durante a realização do processo, onde o aumento da intensidade do infravermelho também reduziu o tempo da desidratação significativamente, e aumentou a difusividade efetiva do material.

A partir do modelo teórico de Fick adotado foi possível à realização da obtenção da difusividade efetiva das sementes durante o processo de secagem, esta é apresentada na Tabela 5.2 para as diferentes temperaturas utilizadas no processo. Desse modo, nota-se o aumento da difusividade efetiva com o aumento da intensidade de raios infravermelhos, porque com o aumento da radiação infravermelho, a amostra tende a aquecer mais, aumentando a pressão de vapor, o que acelera a transferência de umidade (Araujo *et al*, 2015).

Tabela 5.2: Valores do coeficiente de difusão (D_{eff}) para cada temperatura de secagem, teste do qui-quadrado (χ^2), erro estimado (SE) e coeficiente de determinação (R^2).

Condições de secagem	D_{eff}	χ^2	SE (10^4)	R^2
Temperatura (°C)	($10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$)			
45	0,617	0,002	1,782	0,910
65	1,113	0,005	5,549	0,942
85	2,048	0,004	9,217	0,948

A partir dos parâmetros estatísticos analisados, notou-se um bom ajuste para a estimativa da difusividade efetiva, de modo a afirmar que a maior difusividade efetiva foi encontrada na condição de 85°C, confirmando os resultados apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3, que mostram maior retirada de umidade da semente nesta condição. A representação gráfica, deste ajuste encontra-se no Apêndice A.

Siqueira *et al* (2012) analisaram o efeito da contração volumétrica na difusividade efetiva em grãos e frutos de pinhão manso, e constataram que o coeficiente

difusivo foi menor quando considerado o encolhimento, como também que a diferença entre os coeficientes difusivos, baseados ou não no encolhimento, foi mínima, variando de $0,5 \times 10^{-10}$ a $2,94 \times 10^{-10}$ m²/s, assim, constatando que a contração volumétrica não interferiu de forma significativa no ajuste de dados.

Três equações semiempíricas foram utilizadas para o ajuste de dados da secagem: Brooker, Lewis e Page. A Figura 5.4 e a Tabela 5.3 mostram os ajustes e parâmetros, respectivamente, via método de regressão não linear, juntamente com seus critérios estatísticos.

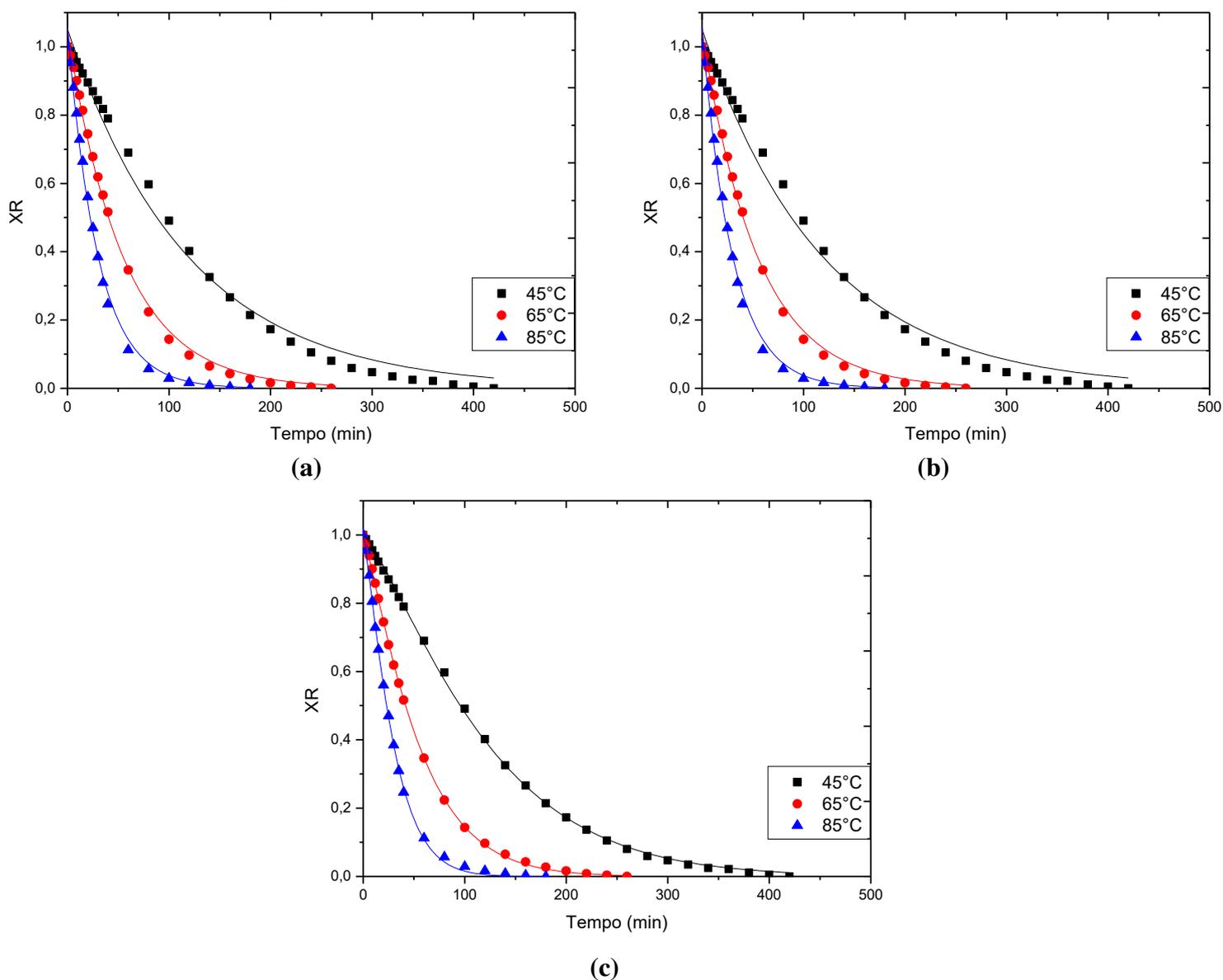


Figura 5.4: Adimensional de umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page.

Tabela 5.3: Parâmetros, teste do qui-quadrado (χ^2), erro estimado (SE) e coeficiente de determinação (R^2).

Modelos	Temperatura (°C)	Parâmetros		χ^2	SE		R^2
		a	k		a	k	
Brooker	45	1,05191	0,00844	0,00112	0,01317	$2,608 \times 10^{-4}$	0,993
	65	1,04787	0,01829	$3,378 \times 10^{-4}$	0,00950	$4,095 \times 10^{-4}$	0,998
	85	1,05477	0,03333	$5,102 \times 10^{-4}$	0,01430	$9,671 \times 10^{-4}$	0,996
Lewis	45	k		0,002	k		0,989
	65	0,00792		$7,548 \times 10^{-4}$	$2,56 \times 10^{-4}$		0,995
	85	0,01703		$9,447 \times 10^{-4}$	$4,47 \times 10^{-4}$		0,993
Page	45	k	n	$7,885 \times 10^{-5}$	k	n	0,999
	65	0,00219	1,26215	$2,577 \times 10^{-5}$	$1,467 \times 10^{-4}$	0,0137	0,999
	85	0,00878	1,17074	$5,700 \times 10^{-5}$	$2,805 \times 10^{-4}$	0,0081	0,999
		0,01493	1,22229		$7,740 \times 10^{-4}$	0,0156	0,999

Analisando os valores do coeficiente de determinação, erro estimado e teste do qui-quadrado tem-se que a equação semi-empírica de Page melhor representa a cinética de secagem do material analisado. Essa afirmação se baseia nos altos valores do R^2 para os parâmetros apresentados e baixos valores do χ^2 e SE. Corroborando com a análise da difusividade efetiva a secagem a 85°C obteve a maior constante cinética de secagem (k).

Doymaz (2015) realizou a secagem infravermelha de sementes de feijão em diferentes potências para ajuste de dados cinéticos em 10 equações encontradas na literatura e modelo teórico de Fick. Dentre as equações analisadas, a equação de Page apresentou bom ajuste para sua cinética. O valor da difusividade efetiva da semente de feijão ($1,75 \times 10^{-9}$ a $1,02 \times 10^{-8}$ m²/s) foi maior que a da semente de melancia, possivelmente pela diferença estrutural dos materiais comparados, onde a estrutura do feijão oferece menor resistência a transferência de massa do que a da semente de melancia.

II) Secagem híbrida

A secagem híbrida da semente de melancia proporcionou o estudo dos parâmetros cinéticos da secagem do material, de modo a analisar a influência da temperatura da fonte e da convecção forçada.

A umidade relativa do ar no ambiente de realização dos experimentos variou entre 60 e 65% e sua temperatura se manteve entre 25 e 28°C.

- Influência da temperatura da fonte IV

A influência da temperatura da fonte IV no processo de secagem híbrida para velocidades do ar de 0,4; 0,8 e 1,2 m/s; é apresentada na Figura 5.5.

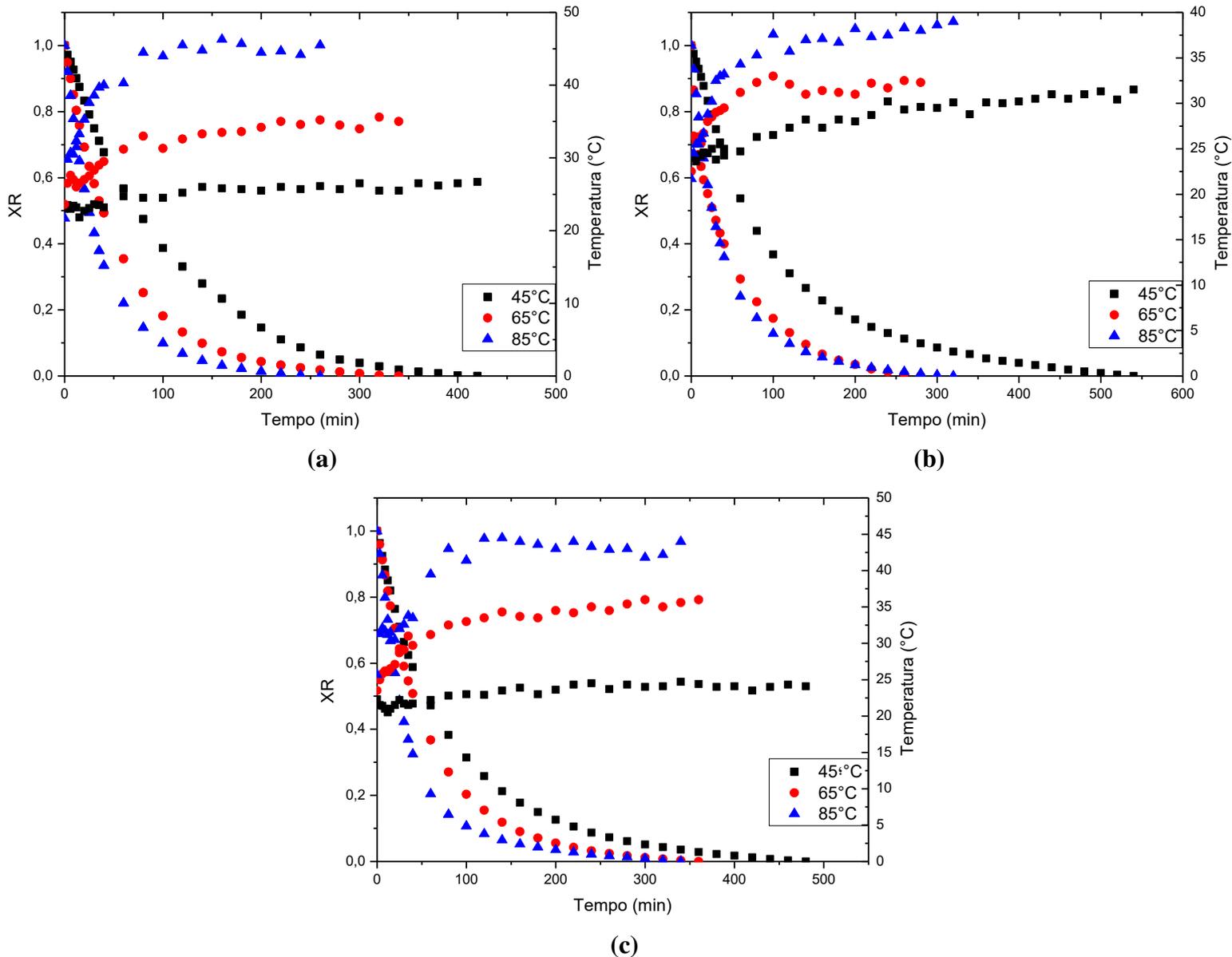


Figura 5.5: Adimensional umidade e temperatura em função do tempo para as velocidades: a) 0,4 m/s; b) 0,8 m/s; c) 1,2 m/s.

É possível observar através da Figura 5.5 que maiores temperaturas da fonte IV favoreceram o processo de secagem. A secagem híbrida com temperatura da fonte de

85°C apresentou melhor resultado frente aos experimentos a 45 e 65°C, conforme esperado, já que a elevada temperatura da fonte de aquecimento infravermelho aumentou a absorção de radiação IV pelas moléculas de água, causando elevação da taxa de condução de calor dentro das partículas e, por conseguinte, uma rápida difusão da umidade para a superfície (Onwude *et al.*, 2018).

As curvas da Figura 5.5 mostram, também, a influência da velocidade do ar de secagem na temperatura superficial das amostras, em que o aumento da velocidade do ar reduz a temperatura superficial das amostras.

A influência da temperatura da fonte IV nas taxas de secagem das sementes é apresentada na Figura 5.6.

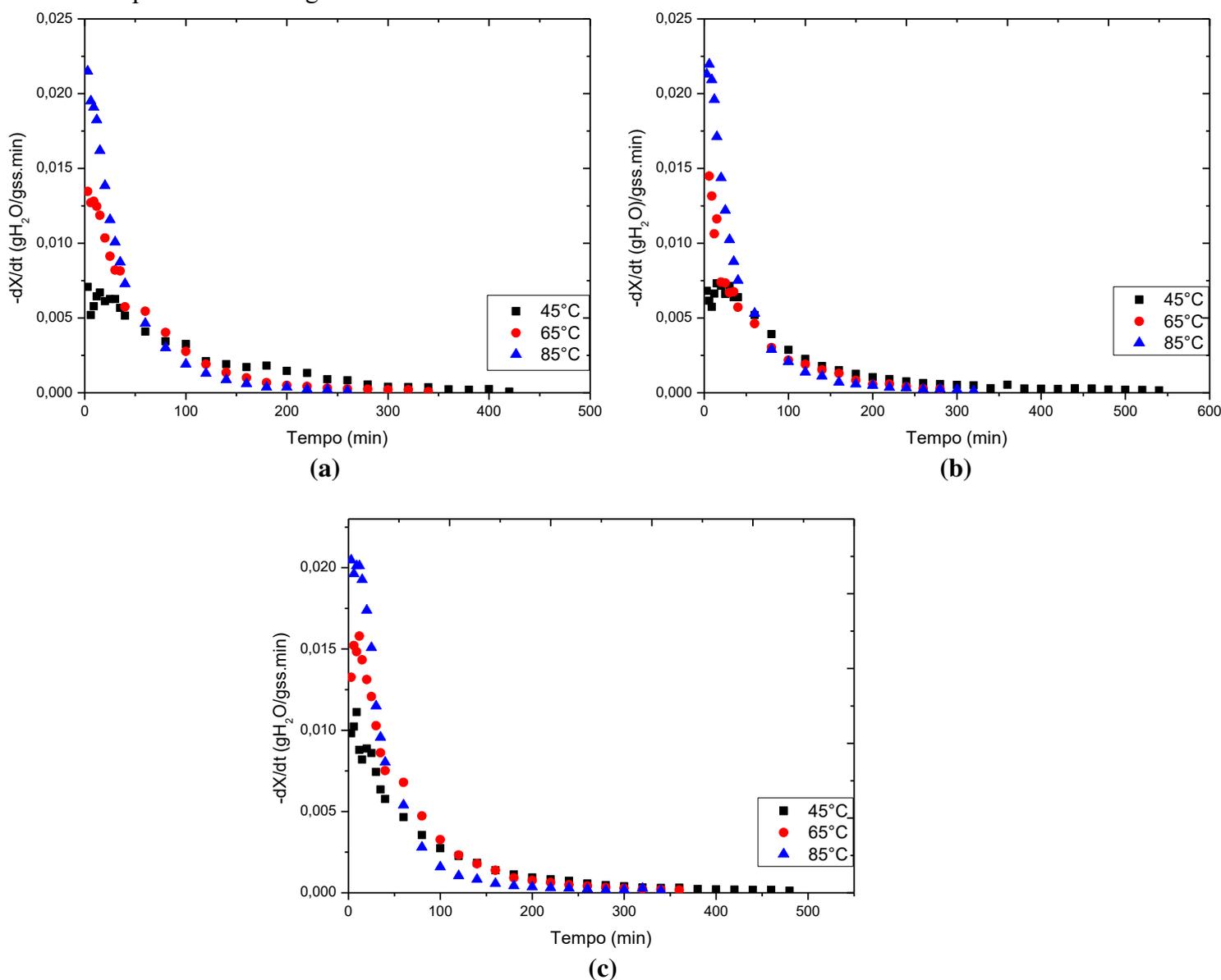


Figura 5.6: Taxa de secagem em função do tempo para as velocidades: a) 0,4 m/s; b) 0,8 m/s; c) 1,2 m/s.

A Figura 5.6 corrobora com a análise anterior, sendo possível notar que o aumento da temperatura influencia o fenômeno de transferência de massa, predominantemente, difusivo. E que para $T_F = 85^\circ\text{C}$ obtém-se maiores taxas de secagem no início do processo, atingindo cerca de $0,023 \text{ gH}_2\text{O/gss.min}$ e menores tempos de secagem independente da velocidade do ar.

Desse modo, a secagem a 85°C e velocidade do ar de $0,4 \text{ m/s}$ apresenta os melhores resultados, já que a taxa de secagem do material se mantém mais elevada que as outras durante, aproximadamente, 50 min , proporcionando uma redução no tempo de operação de 280 min frente a pior condição de secagem, $T_F = 45^\circ\text{C}$ e $V = 0,8 \text{ m/s}$.

Observa-se, também a presença de período a taxa constante na Figura 5.6 (a), que é justificado pela baixa temperatura da fonte (45°C) e velocidade do ar ($0,4 \text{ m/s}$) durante a realização do processo. O mesmo não pode ser observado nos itens (b) e (c), já que o aumento das variáveis analisadas proporcionou uma rápida evaporação da água superficial, de forma que a quantidade de água disponível no interior do sólido não é suficiente para manter as condições de saturação na superfície e, portanto o período a taxa decrescente inicia mais rapidamente, não ficando perceptível o período à taxa constante.

Ao comparar a cinética de secagem na Figura 5.6 (a), (b) e (c), nota-se que após certo tempo ocorreu uma inversão das curvas, ou seja, inicialmente a taxa de secagem permanece maior para a temperatura de 85°C , como esperado, e depois a maior taxa é observada à temperatura de 45°C . Tal resultado é justificado pelo aumento da resistência à remoção de água, ou seja, quando toda água superficial evaporar, o processo passa a ser comandado pela resistência interna, a qual é maior que a resistência externa. Esse comportamento é mais nítido em maiores temperaturas, como já foi observado. Assim, a taxa de secagem decai mais rápido quanto maior for a temperatura da fonte, provocando a inversão das curvas na Figura em questão.

- Influência da velocidade do ar

A Figura 5.7 apresenta as “curvas” (a), (b) e (c), a partir das quais pode ser avaliada a influência da convecção no processo, para as temperaturas da fonte de 45, 65 e 85°C.

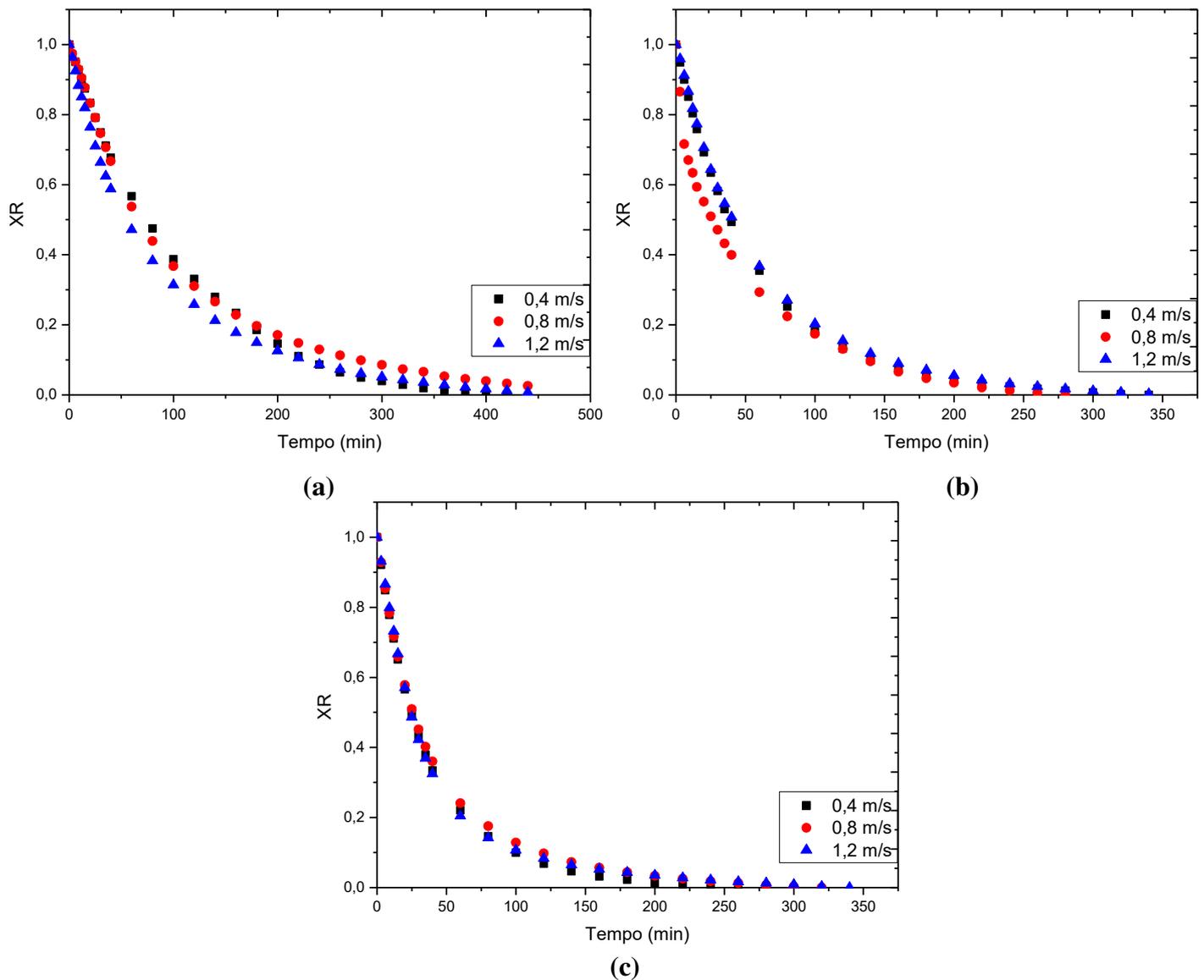


Figura 5.7: Adimensional de umidade e temperatura em função do tempo: a) TF = 45°C; b) TF = 65°C; c) TF = 85°C.

Inicialmente, na Figura 5.7 (a), pode-se observar que a velocidade de 1,2 m/s favoreceu o processo aumentando a taxa de secagem (Figura 5.8, cura a), e consequentemente, reduzindo o tempo necessário para atingir a umidade de equilíbrio. Isso porque velocidades mais elevadas provocam o aumento do número de Reynolds e,

portanto, do coeficiente convectivo de transferência de massa facilitando à remoção de umidade superficial do material, ou seja, à transferência de massa por convecção.

Na Figura 5.7, os itens (b) e (c) mostraram comportamentos semelhantes no processo de secagem, onde a velocidade do ar não influenciou significativamente na transferência de massa e, por conseguinte, no tempo da secagem. Isso aconteceu por conta da elevada diferença de temperatura entre a fonte e a amostra, fazendo com que a velocidade do ar não fosse significativa no processo de transferência de massa.

As taxas de secagem referentes à análise da influência da velocidade no processo híbrido podem ser observadas na Figura 5.8.

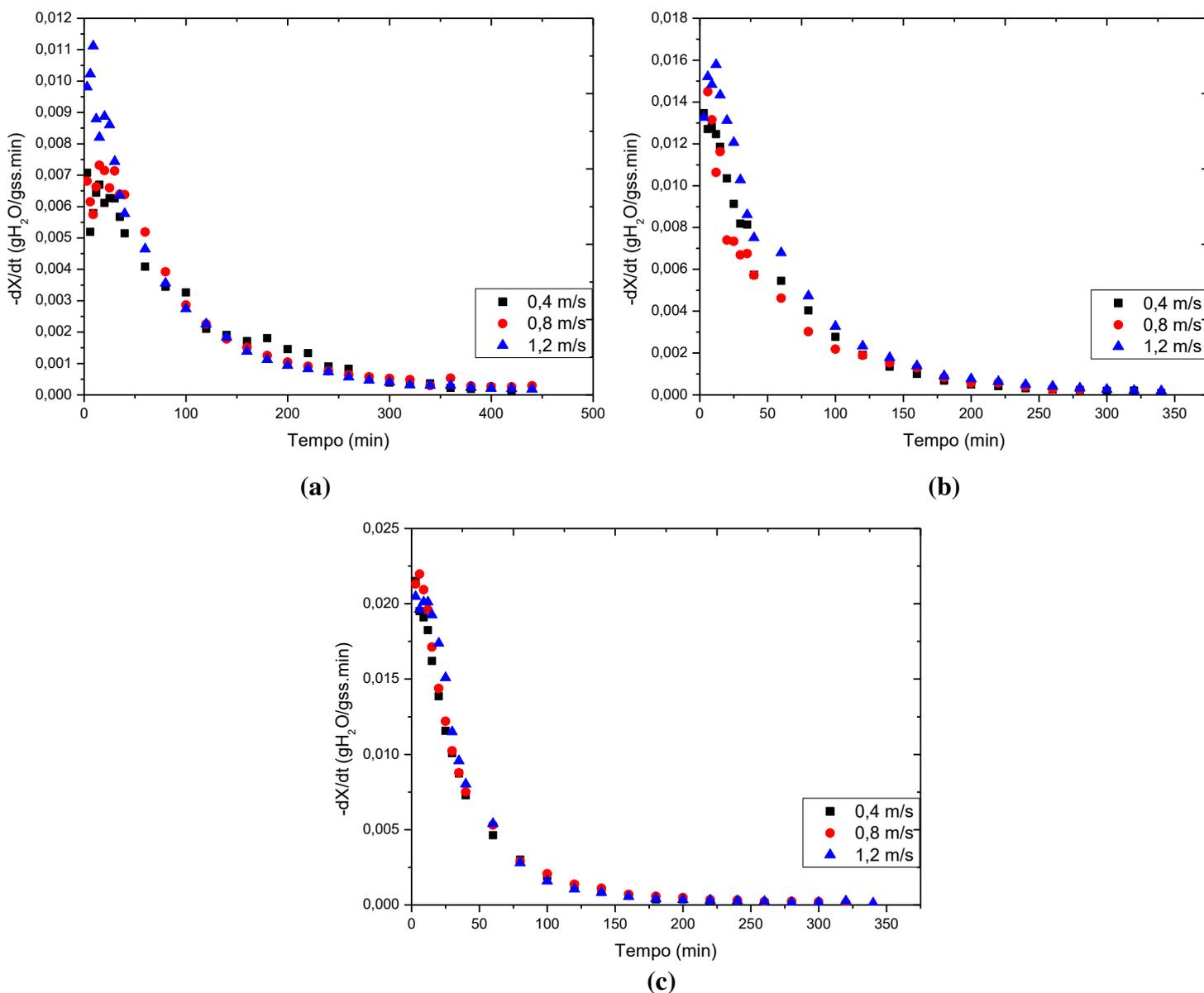


Figura 5.8: : Taxa de secagem em função do tempo: a) $TF = 45^{\circ}C$; b) $TF = 65^{\circ}C$; c) $TF = 85^{\circ}C$.

A Figura 5.8 permite notar a predominância do período à taxa decrescente nas secagens híbridas, como esperado, já que esse comportamento é comum em produtos biológicos (Park *et al*, 2014).

O período a taxa decrescente no processo se inicia, porque a transferência de massa interna do material passa a não suprir a retirada de umidade da superfície da amostra. Esse fenômeno difusivo corre até o momento em que a pressão de vapor de água das sementes se iguala a pressão de vapor da água no ambiente externo ao da amostra, finalizando a secagem.

Após o período de aquecimento apresentado em todas as condições de secagem exibidas na Figura 5.8, tem-se que as curvas (a) e (b), mostraram influência da velocidade do ar no fenômeno de transferência de massa por conta das baixas temperaturas da fonte IV. Comportamento, esse, que é contrário na curva (c), já que a operação é realizada a uma temperatura da fonte relativamente alta, aumentando a pressão de vapor interna da água e favorecendo o processo.

Verifica-se também na Figura 5.8, que os maiores valores da taxa de secagem se encontraram nos processos realizados com temperatura da fonte IV a 85°C, pois a alta temperatura da fonte favorece o aquecimento da amostra, que alcança níveis mais elevados de temperatura superficial, como mostrado na Figura 5.5, acelerando o processo de secagem ao proporcionar a elevação da difusividade efetiva da água como observado na Tabela 5.4, que reflete a velocidade de remoção de umidade do material.

A influência das variáveis, temperatura da fonte e da velocidade do ar, foi apresentada nas Figuras 5.9 e 5.10 segundo as ferramentas estatísticas, diagrama de Pareto e gráfico de superfície resposta, respectivamente.

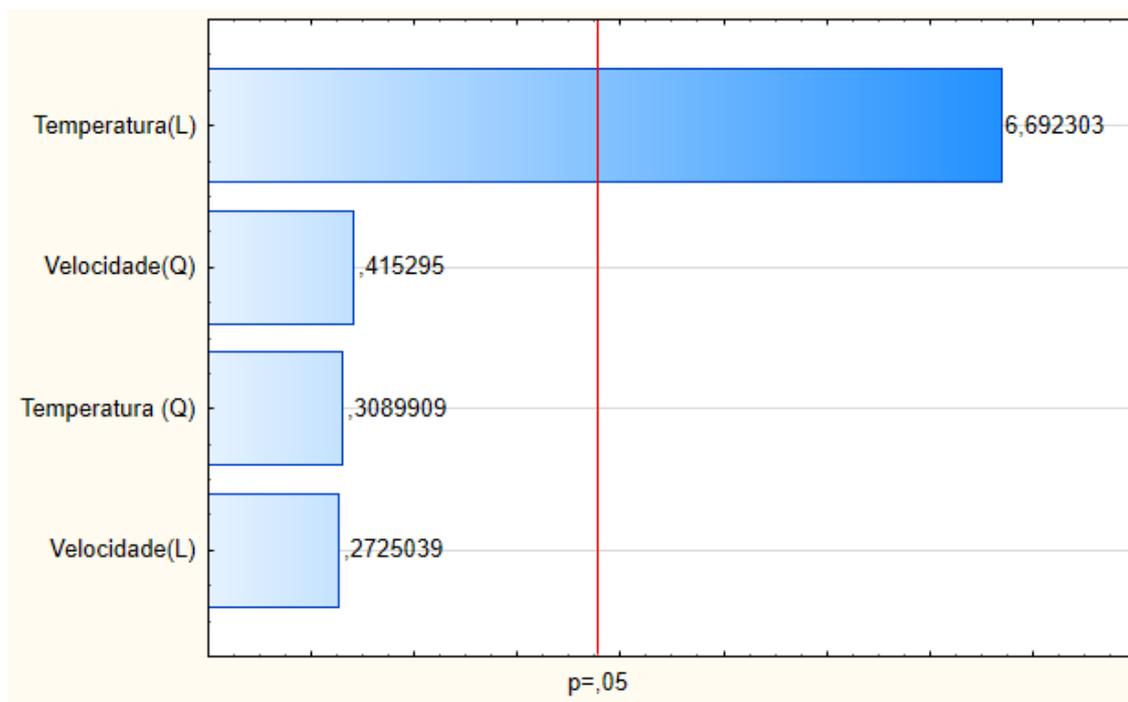


Figura 5.9: Diagrama de Pareto com estimativa de efeitos das variáveis sobre a difusividade efetiva.

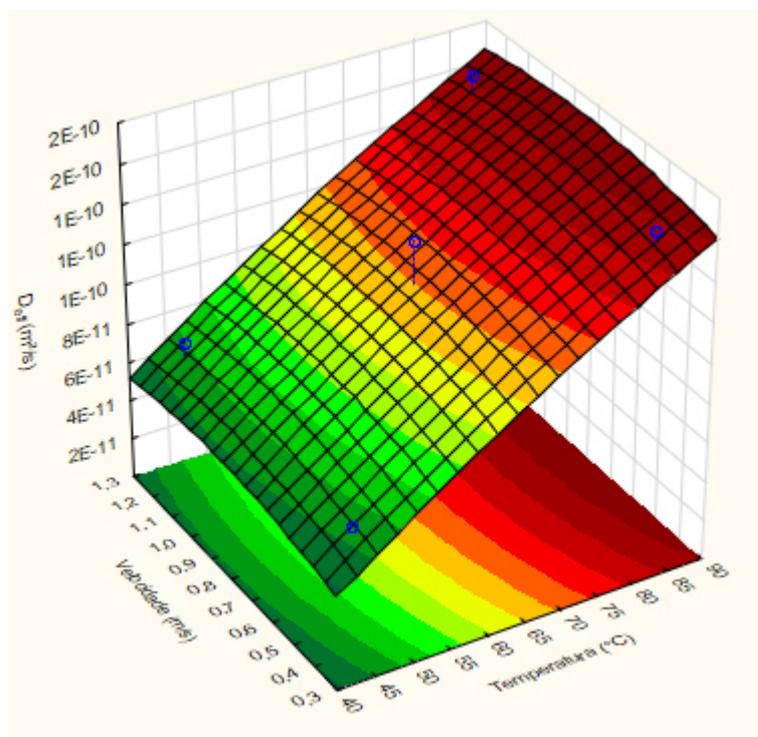


Figura 5.10: Superfície de resposta da difusividade efetiva em função da temperatura e velocidade do ar.

De acordo com a Figura 5.9, nota-se que a temperatura possui influência positiva e significativa no processo, diferentemente da velocidade do ar. Além disso, a

Figura 5.10, corrobora com tal afirmação, mostrando que a melhor condição de secagem se encontra na secagem híbrida com temperatura da fonte a 85°C, aumentando, conseqüentemente, o coeficiente difusivo da transferência de massa, independentemente da velocidade do ar.

A pouca influencia na cinética de secagem pela velocidade do ar e a importância da temperatura da fonte no processo foi observada Möhler (2010), que avaliou as características da secagem dos grãos de soja, justificando tal comportamento pela predominante presença do período a taxa decrescente, em que a taxa de evaporação é controlada pela resistência à transferência de massa interna no grão, predominando o efeito da temperatura do ar de secagem diante da velocidade.

O coeficiente difusivo da água analisado foi calculado a partir do modelo teórico da Lei de Fick para placa plana em diversas condições e apresentado na Tabela 5.4, juntamente com os valores dos parâmetros do qui-quadrado, erro estimado e coeficiente de determinação.

Tabela 5.4: Valores do coeficiente de difusão (D_{eff}) para cada temperatura de secagem, teste do qui-quadrado (χ^2), erro estimado (SE) e coeficiente de determinação (R^2).

Condições de secagem		D_{eff} ($10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$)	χ^2	SE (10^{12})	R^2
Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)				
45	0,4	0,643	0,002	3,019	0,964
	0,8	0,630	$2,625 \times 10^{-4}$	0,982	0,992
	1,2	0,750	$3,686 \times 10^{-4}$	1,467	0,993
65	0,4	1,068	0,002	5,866	0,974
	0,8	1,410	$3,153 \times 10^{-4}$	3,024	0,993
	1,2	1,017	0,002	4,697	0,979
85	0,4	1,662	0,005	13,043	0,960
	0,8	1,480	0,002	6,975	0,981
	1,2	1,607	0,001	6,486	0,982

A partir dos valores apresentados na Tabela 5.4, percebe-se que a condição de secagem, temperatura da fonte 85°C e convecção a 0,4 m/s, obteve maior coeficiente difusivo ($1,662 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$), como esperado, bem como parâmetros estatísticos de χ^2 e SE considerados satisfatórios. Tais dados confirmam os obtidos na Figura 5.8 que mostram tal condição de secagem com menor tempo de secagem.

Os ajustes cinéticos do adimensional de umidade em função do tempo foram realizados de acordo com as equações de Brooker, Lewis e Page. Assim, foi possível

apresentar na Tabela A.1, anexa no apêndice A, os coeficientes de cada equação semiempírica, bem como suas respectivas análises estatísticas.

A partir destes resultados foi possível notar os bons ajustes das equações semiempíricas da cinética de secagem, principalmente as equações de Brooker e Page nos processos para temperaturas da fonte de 45 e 65°C, respectivamente, em que estes apresentaram os valores mais próximos de 1 para o coeficiente de determinação (R^2) e menores valores para o teste do qui-quadrado (χ^2) e erro estimado (SE).

Nota-se ainda na Tabela B.1 que a constante cinética de secagem k apresenta seus maiores valores para a secagem a 85°C com velocidade do ar a 0,4 m/s, corroborando com os dados da difusividade efetiva exposta na Tabela 5.4.

Chaji e Hedayatizadeh (2017) estudaram as qualidades de germinação e cor das sementes de melancia após secagem híbrida com temperatura de 40 a 60°C e convecção de 0,5 a 1,5 m/s, e constataram que a secagem híbrida a 50°C e velocidade do ar a 1 m/s é a melhor para os quesitos analisados. Corroborando com os dados apresentados na Tabela 5.4, os pesquisadores apresentaram a difusividade efetiva do material variando de $6,805 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ a $3,009 \times 10^{-10}$. Os autores destacaram que a equação semiempírica de Page é uma das que melhor representa o comportamento cinético da secagem do material, e comprovam a influência significativa da temperatura da fonte no processo.

III) *Secagem intermitente*

A aplicação da intermitência em métodos de secagem como o infravermelho possibilita a diminuição do consumo energético do equipamento durante os períodos de intermitência e, conseqüentemente, a redução do dano térmico causado no material a ser seco. Por isso, o processo de secagem intermitente foi realizado nas sementes de melancia a fim de avaliar sua cinética durante o tempo corrido do processo, mostrando a variação dos itens estudados, também, no período de intermitência.

- **Influência da temperatura da fonte IV**

A influência da temperatura da fonte na secagem intermitente foi estudada ao fixar uma intermitência e variar as temperaturas da fonte ao longo do processo, como pode ser observado na Figura 5.11.

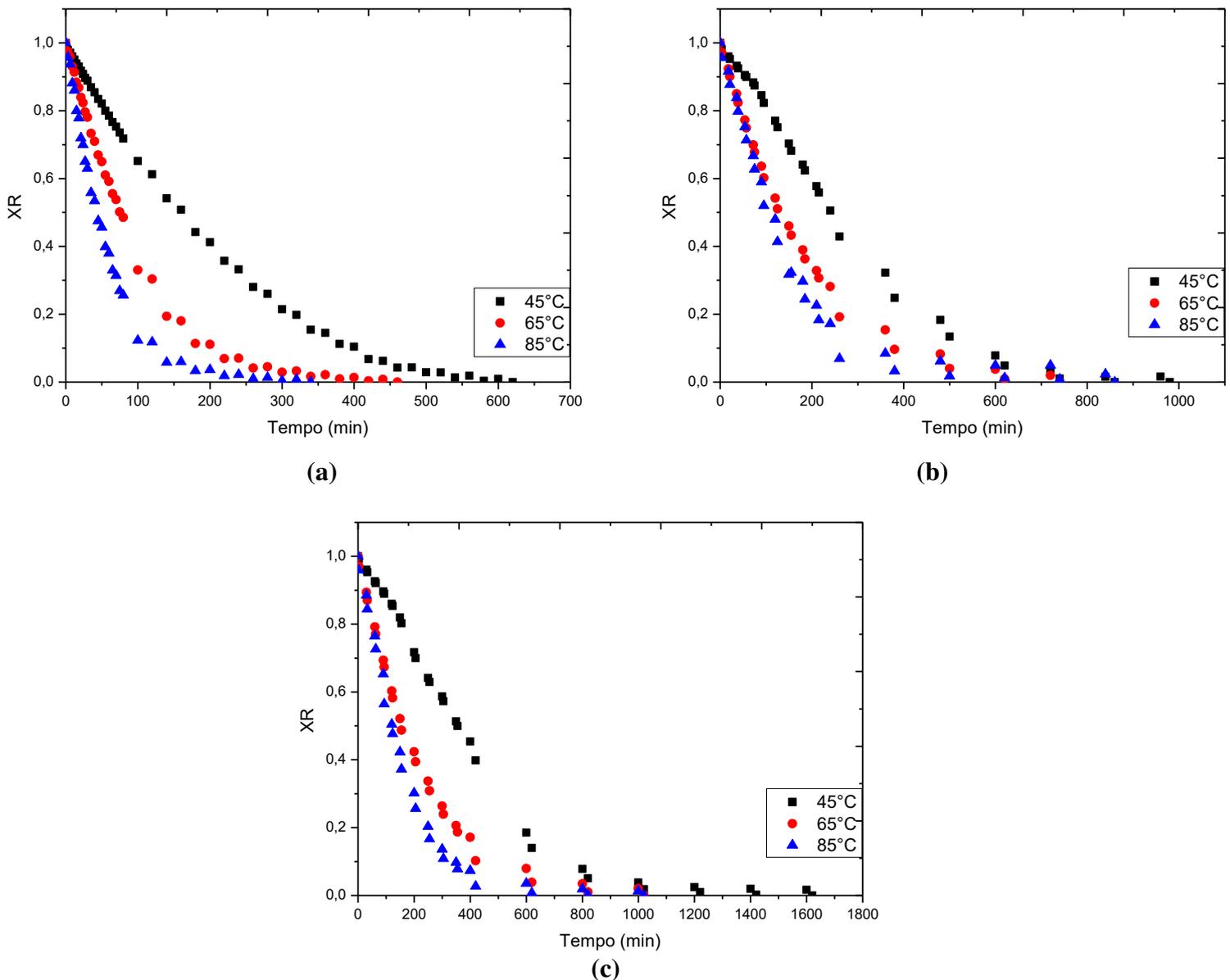


Figura 5.11: Adimensional de umidade em função do tempo: a) Intermittência de 1:1; b) Intermittência de 1:5; c) Intermittência de 1:9.

Ao analisar a Figura 5.11 nota-se similaridade no comportamento das curvas (a), (b) e (c) em todas as condições avaliadas, em que o aumento da temperatura de secagem acelera o processo difusivo da água, reduzindo o tempo de secagem.

As Figuras 5.11 (b) e (c) apresentam o mesmo tempo de secagem para as temperaturas de 65 e 85°C independente do período de intermitência utilizado. Esse comportamento acontece porque a temperatura de 65°C atende a demanda de retirada da água superficial da amostra que aumenta durante o período de intermitência, atingindo a velocidade máxima de secagem (tempo de migração da água interna para a superfície).

O comportamento da temperatura superficial das sementes ocorreu de maneira análoga a secagem contínua, onde o aumento da intensidade da fonte proporciona maior aquecimento da amostra, como pode ser visto na Figura 5.12.

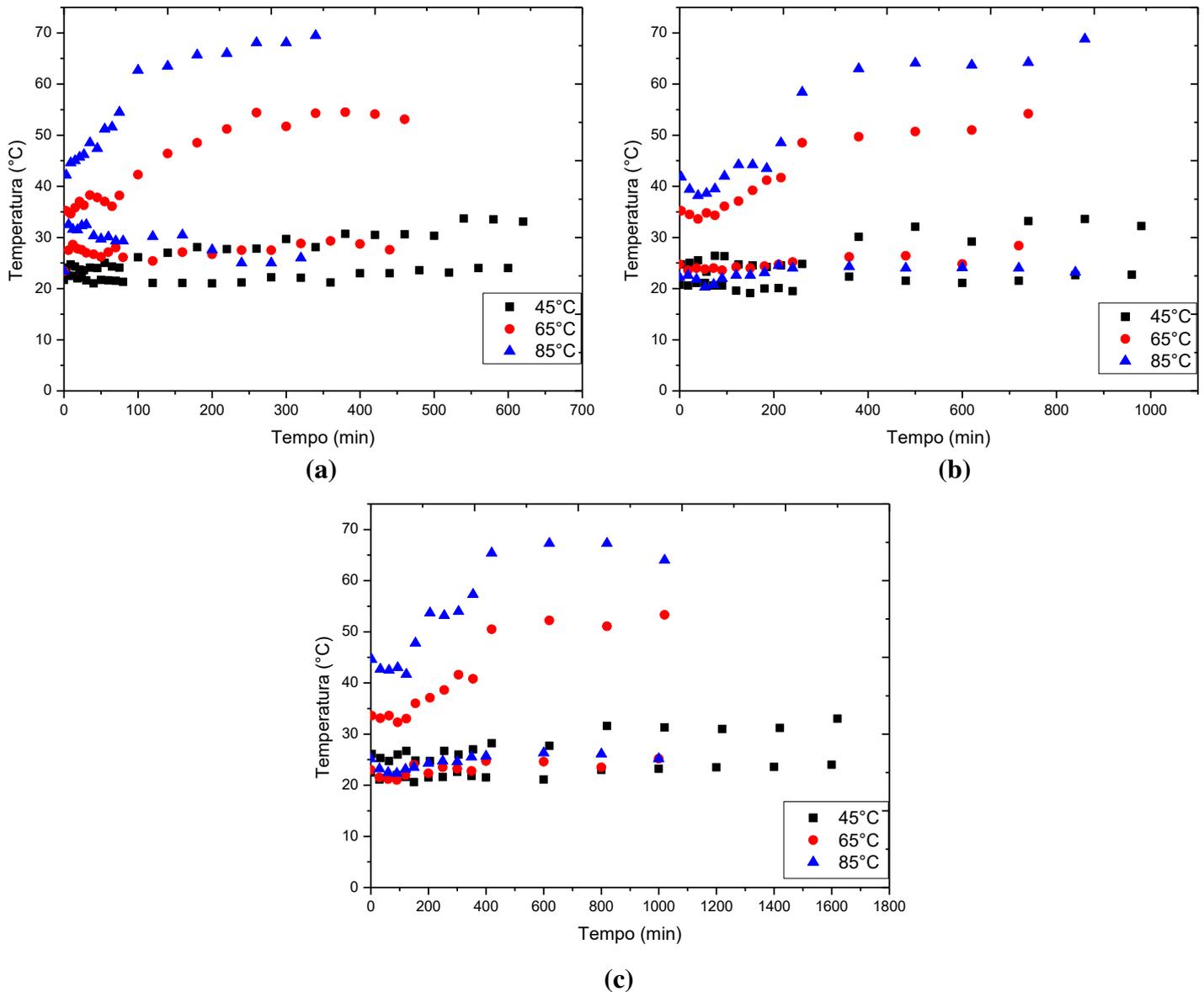


Figura 5.12: Temperatura superficial da amostra em função do tempo: a) Intermittência de 1:1; b) Intermittência de 1:5; c) Intermittência de 1:9.

Ao analisar os gráficos da Figura 5.12, observa-se comportamento semelhante das temperaturas superficiais das amostras para todas as condições analisadas, onde no momento de contato da amostra com o infravermelho a troca térmica aumenta juntamente com a perda do teor de umidade até atingir o equilíbrio, enquanto que durante a intermitência a temperatura tende a ficar próxima a temperatura ambiente.

A partir de então se pode analisar a velocidade de secagem do material para as diferentes condições de secagem estudadas, conforme exposto nos gráficos apresentados na Figura 5.13.

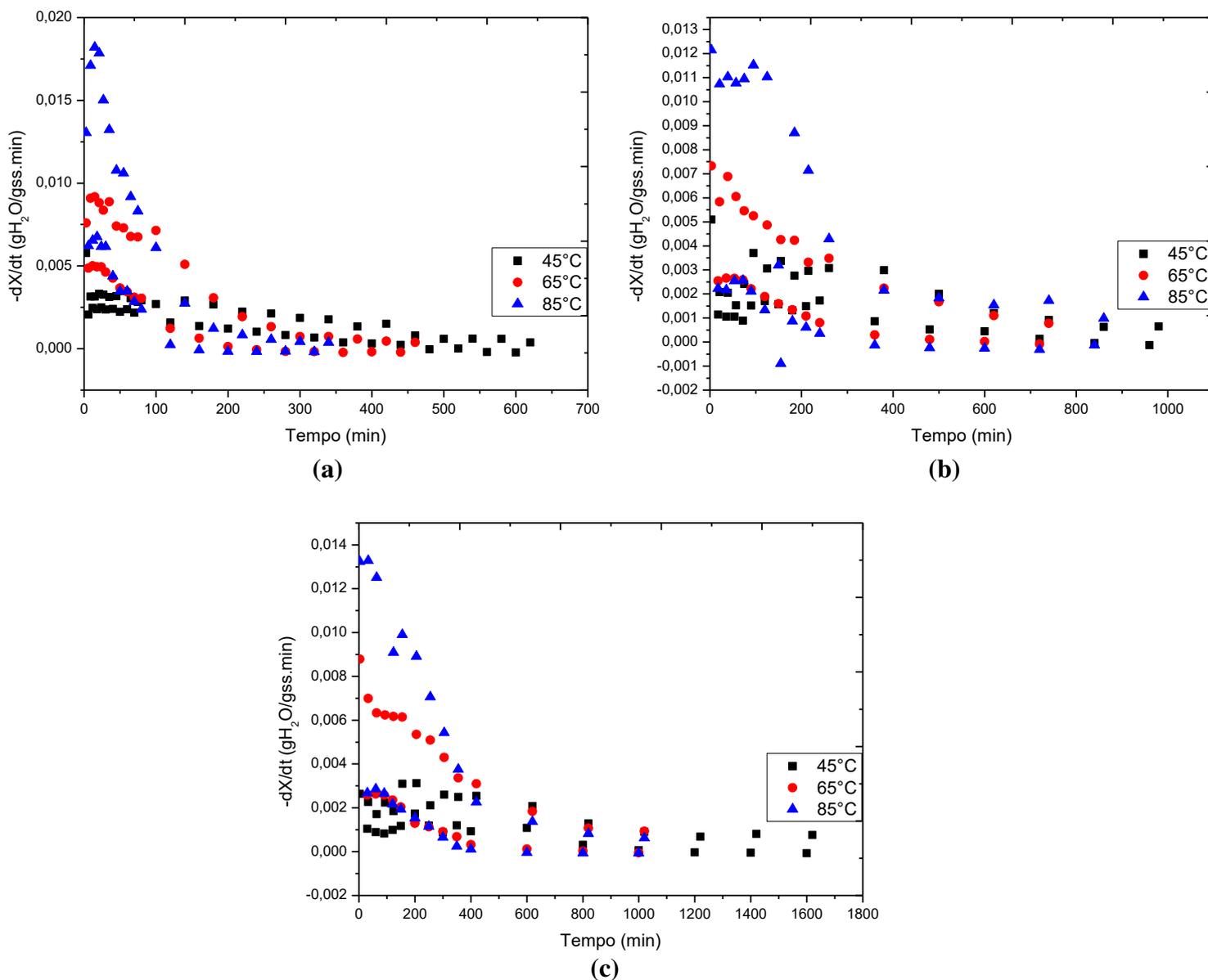


Figura 5.13: Taxa de secagem em função do tempo: a) Intermittência de 1:1; b) Intermittência de 1:5; c) Intermittência de 1:9.

Observa-se na Figura 5.13 que a temperatura da fonte de secagem é diretamente proporcional a velocidade de secagem, onde quanto maior a temperatura da fonte, maior a velocidade de secagem, independente da condição de intermitência.

Pode-se perceber também que a taxa de secagem decresce até um instante de tempo “ t ” em que se torna negativa, sendo justificada pela absorção de umidade do material, a fim de se atingir a umidade de equilíbrio.

Observa-se na Figura 5.13 que as maiores taxas de secagem ocorre a temperatura da fonte de 85°C, evidenciando a influência da temperatura na velocidade de secagem do processo.

- Influência da intermitência

Inicialmente, faz-se a análise da intermitência no processo nas três temperaturas de secagem fixas (45, 65 e 85°C) Os dados adquiridos no decorrer do processo podem ser observados a Figura 5.14.

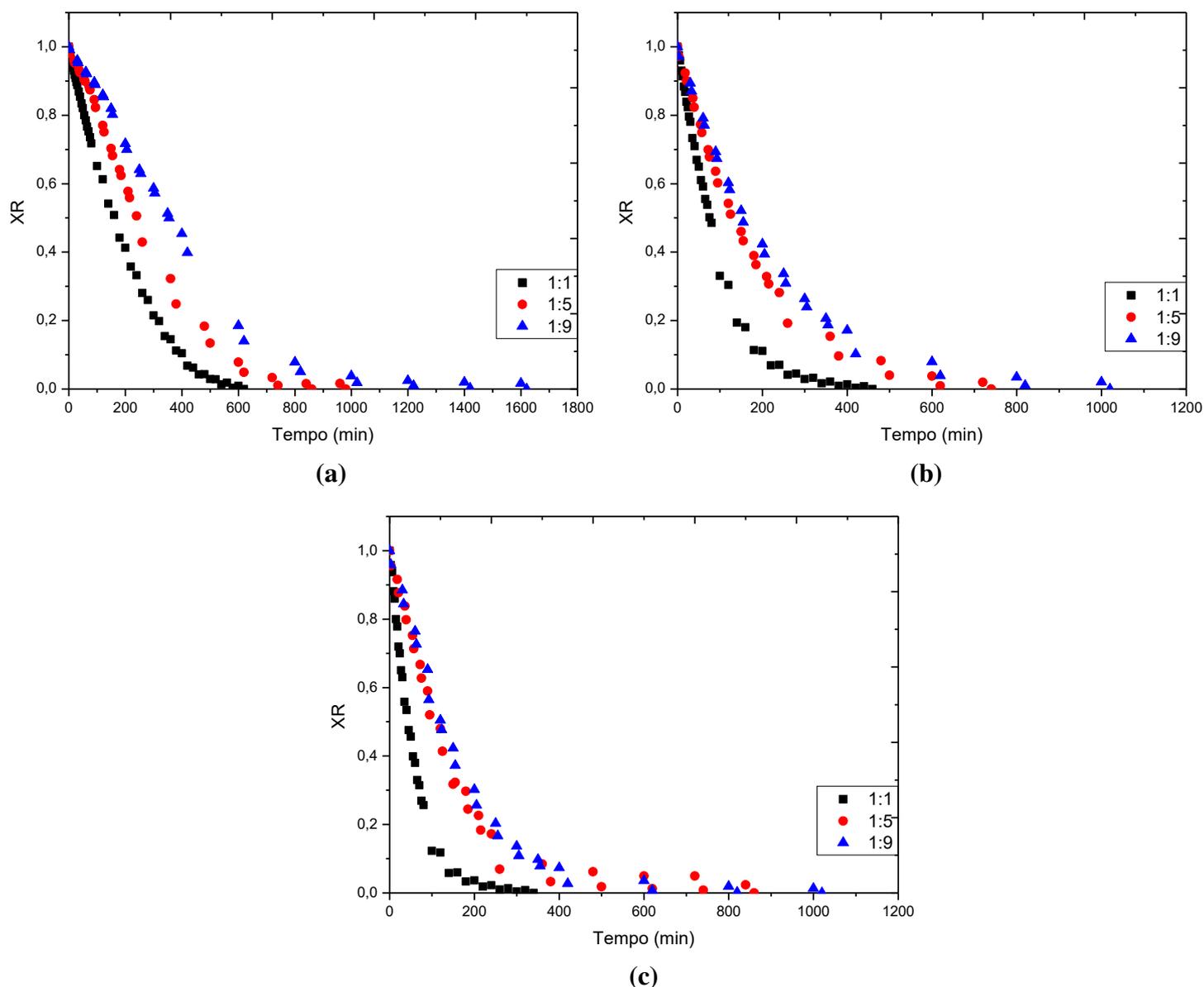


Figura 5.14: Adimensional de umidade em função do tempo: a) TF = 45°C; b) TF = 65°C; c) TF = 85°C.

Ao analisar as características de secagem apresentadas na Figura 5.14, nota-se que em todas as temperaturas a intermitência 1:1 propiciou maior rapidez na perda de umidade do material, porque tal proporção aumenta o tempo de contato do material com o infravermelho, acelerando o processo de vaporização da água da amostra.

No entanto quando se analisa mais a fundo, tem-se que no gráfico “a”, por exemplo, o uso do equipamento para a secagem foi utilizado durante 310, 180 e 160 min para as proporções de intermitência de 1:1, 1:5 e 1:9, respectivamente, desse modo observando que maiores períodos de intermitência proporcionam menor tempo de exposição do material a radiação IV e possivelmente ameniza os efeitos térmicos na amostra.

Observa-se, ainda, que diante dos tempos de exposição ao infravermelho para os três tipos de intermitência existem diferenças pequenas entre a proporção de 1:5 e a de 1:9, evidenciando a baixa influência da intermitência no processo.

Ao analisar o adimensional de umidade em função do tempo, tem-se um instante em que este se torna negativo, porque o material começa a absorver a umidade do ambiente durante o processo de intermitência, de modo a tender ao equilíbrio higroscópico com o ambiente externo.

A intermitência da amostra evita a submissão do material a altas temperaturas por períodos continuados de tempo, visando reduzir possíveis danos térmicos e o consumo energético. Esse comportamento pode ser observado a partir da Figura 5.15, que relaciona as temperaturas da amostra de antes e após a intermitência.

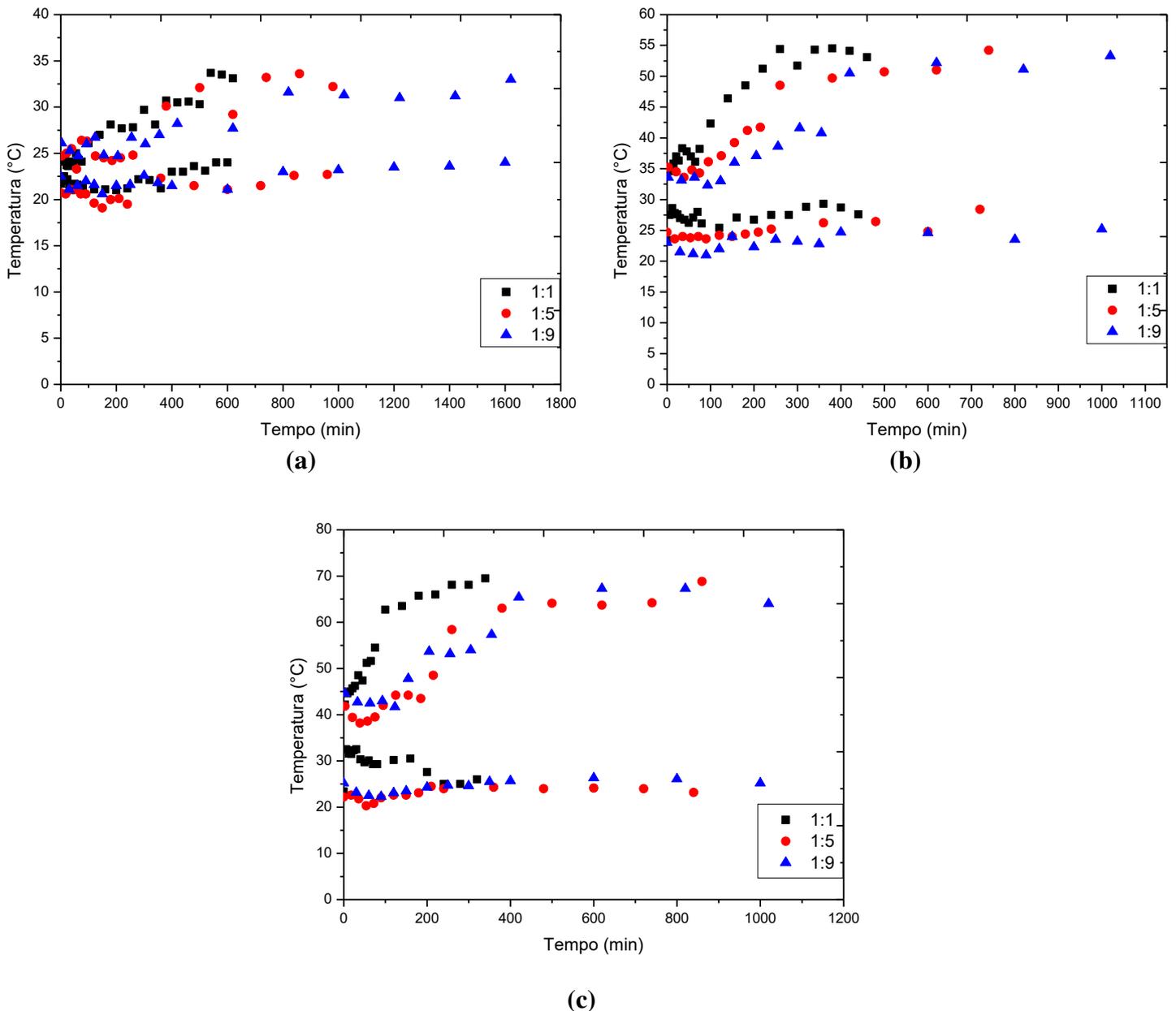


Figura 5.15: Temperatura superficial da amostra em função do tempo: a) TF = 45°C; b) TF = 65°C; c) TF = 85°C.

A temperatura superficial da amostra se comporta de maneira semelhante para as três condições de intermitência, onde a troca térmica tende a estabilidade independente da proporção intermitente utilizada no processo.

O constante aumento da temperatura na amostra até sua estabilização está associado com a concentração de água na superfície do material após o período de intermitência, que possibilita maior troca térmica no sistema.

Percebe-se ainda que o período de aquecimento acontece mais rápido nas amostras secas à proporção de intermitência de 1:1 e mais lentamente na condição de 1:9, comportamento justificado pelo tempo em que as mostras ficaram resfriando, sendo

uma diferença significativa que influenciou diretamente na velocidade de aquecimento da superfície das sementes.

Com o aumento da temperatura superficial das sementes ao longo do tempo a taxa de secagem reduz inversamente proporcional aquela, de modo que a velocidade de secagem tende a estabilizar no fim do processo, como observado na Figura 5.16.

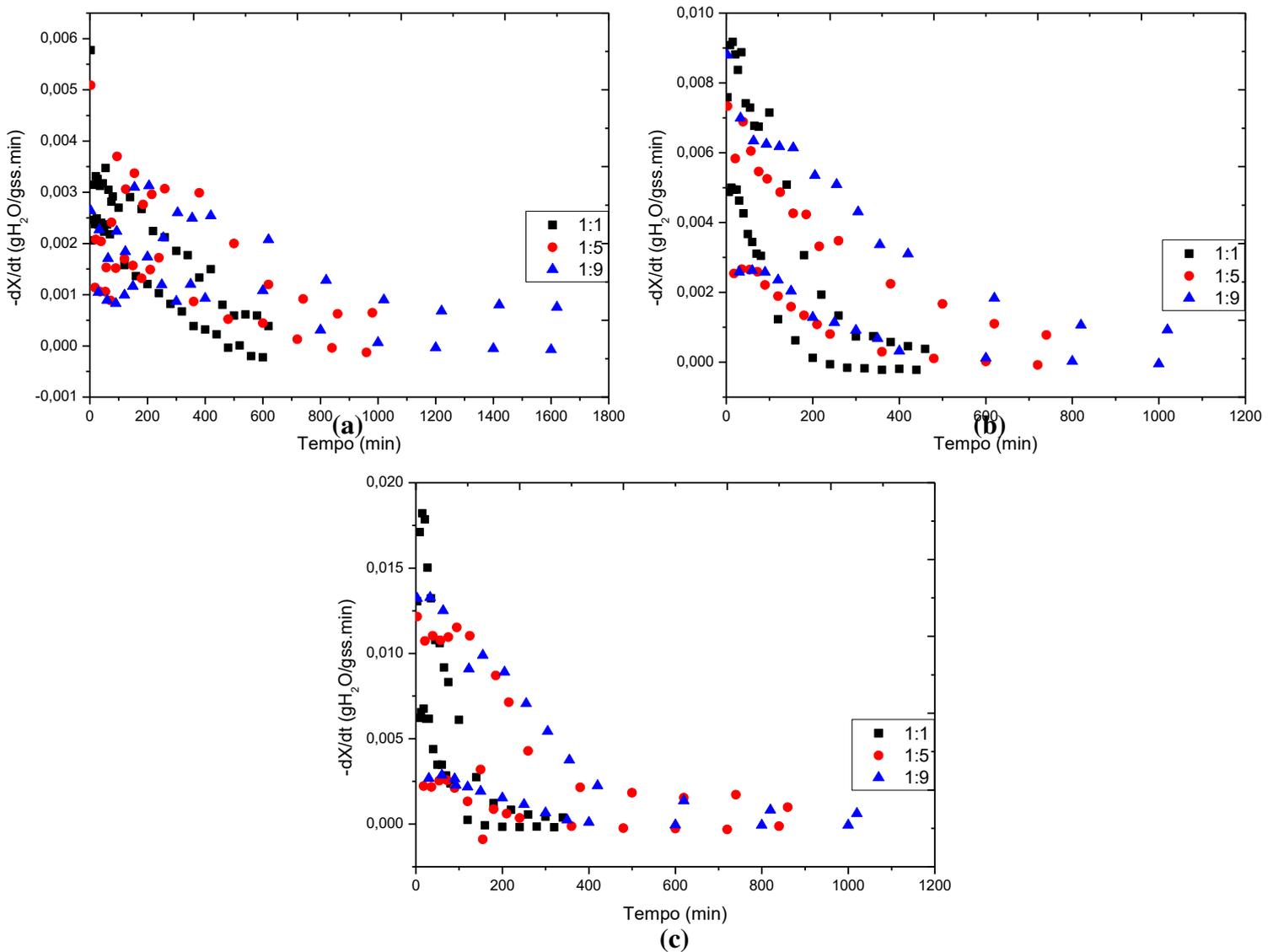


Figura 5.16: Taxa de secagem em função do tempo: a) $T_F = 45^\circ\text{C}$; b) $T_F = 65^\circ\text{C}$; c) $T_F = 85^\circ\text{C}$.

As velocidades de secagem apresentadas acima mostram predominância das taxas decrescentes, comum no material utilizado. No entanto a curva “a” apresenta a formação de uma taxa constante, justificada pela baixa temperatura da fonte.

O comportamento da amostra ao fim do processo, mostrando taxas negativas, é justificado pela absorção de umidade das sementes em períodos de intermitência,

porque neste ponto, o material já perdeu muita água de modo que o ambiente ao seu redor está com umidade relativa maior que o mesmo, forçando-o a buscar o equilíbrio higroscópico.

Diante da exposição de tais dados, tem-se por ajuste a Lei de Fick os valores dos coeficientes difusivos para cada processo, representados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Valores do coeficiente de difusão (D_{eff}) para cada temperatura de secagem, teste do qui-quadrado (χ^2), erro estimado (SE) e coeficiente de determinação (R^2).

Condições de secagem		D_{eff} ($10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$)	χ^2	SE (10^{12})	R^2
Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Intermitência				
45	1:1	0,308	0,014	2,586	0,896
	1:5	0,273	0,002	1,717	0,878
	1:9	0,152	0,009	1,334	0,872
65	1:1	0,647	0,004	3,620	0,940
	1:5	0,333	0,005	2,002	0,939
	1:9	0,282	0,007	2,051	0,932
85	1:1	1,040	0,004	5,983	0,947
	1:5	0,498	0,002	1,960	0,943
	1:9	0,397	0,008	3,166	0,923

Ao observar a Tabela 5.5, percebe-se que a maior difusividade durante a intermitência ocorreu na condição de secagem: 85°C de temperatura da fonte e proporção de 1:1.

Dentre os modelos matemáticos semiempíricos apresentados no Apêndice C, o de Page teve melhor ajuste na secagem a 45°C com proporção 1:9, bem como nas outras condições de processamento avaliadas.

Portanto, ao comparar os três processos de secagem utilizados tem-se que para melhor difusão na semente de melancia, o processo de secagem contínuo a 85°C obteve os melhores resultados, mesmo proporcionando maior temperatura superficial da amostra.

A influência das variáveis, temperatura da fonte e período de intermitência, foi apresentada nas Figuras 5.17 e 5.18 segundo as ferramentas estatísticas, diagrama de Pareto e gráfico de superfície resposta, respectivamente.

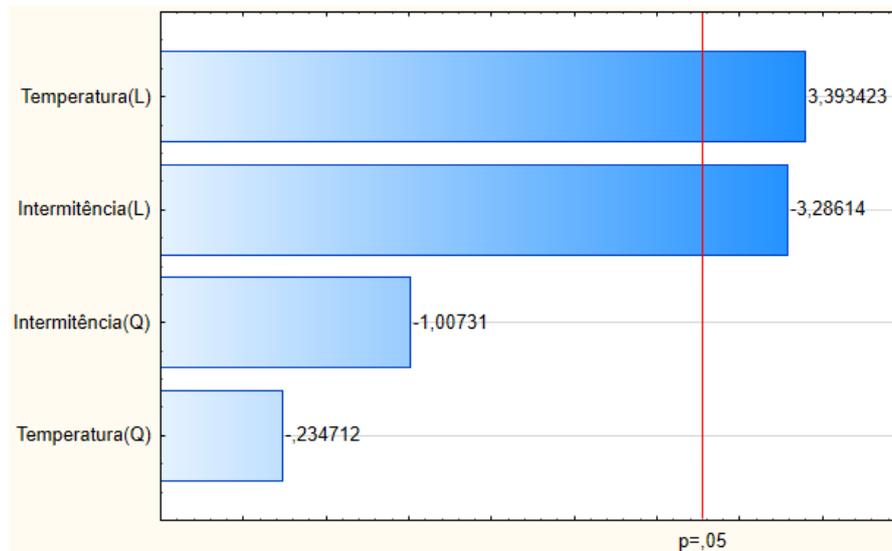


Figura 5.17: Diagrama de Pareto com estimativa de efeitos das variáveis na difusividade efetiva.

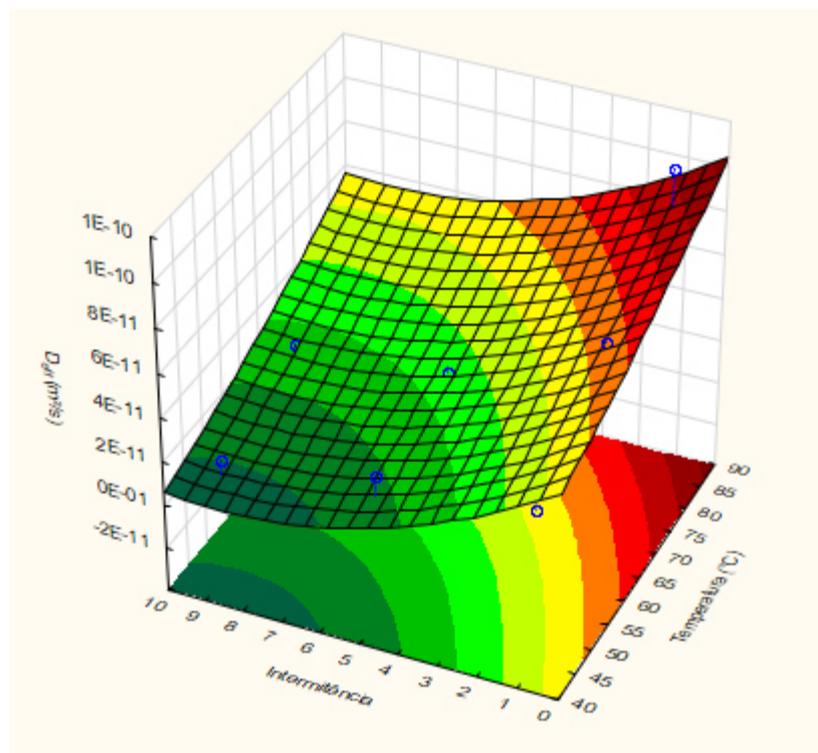


Figura 5.18: Superfície resposta para a difusividade efetiva em função das suas variáveis temperatura da fonte e período de intermitência.

A superfície da Figura 5.18 mostra a influência negativa da intermitência e a positiva da temperatura da fonte na difusividade efetiva da água, comprovando os dados explícitos da difusividade efetiva da Tabela 5.17.

5.3. Energia de ativação

A relação entre a difusividade de umidade efetiva e a temperatura superficial da amostra, para os três tipos de secagem analisados, foi descrita por uma relação do tipo Arrhenius, que foi linearizada de forma logarítmica e apresentada na Figura 5.19.

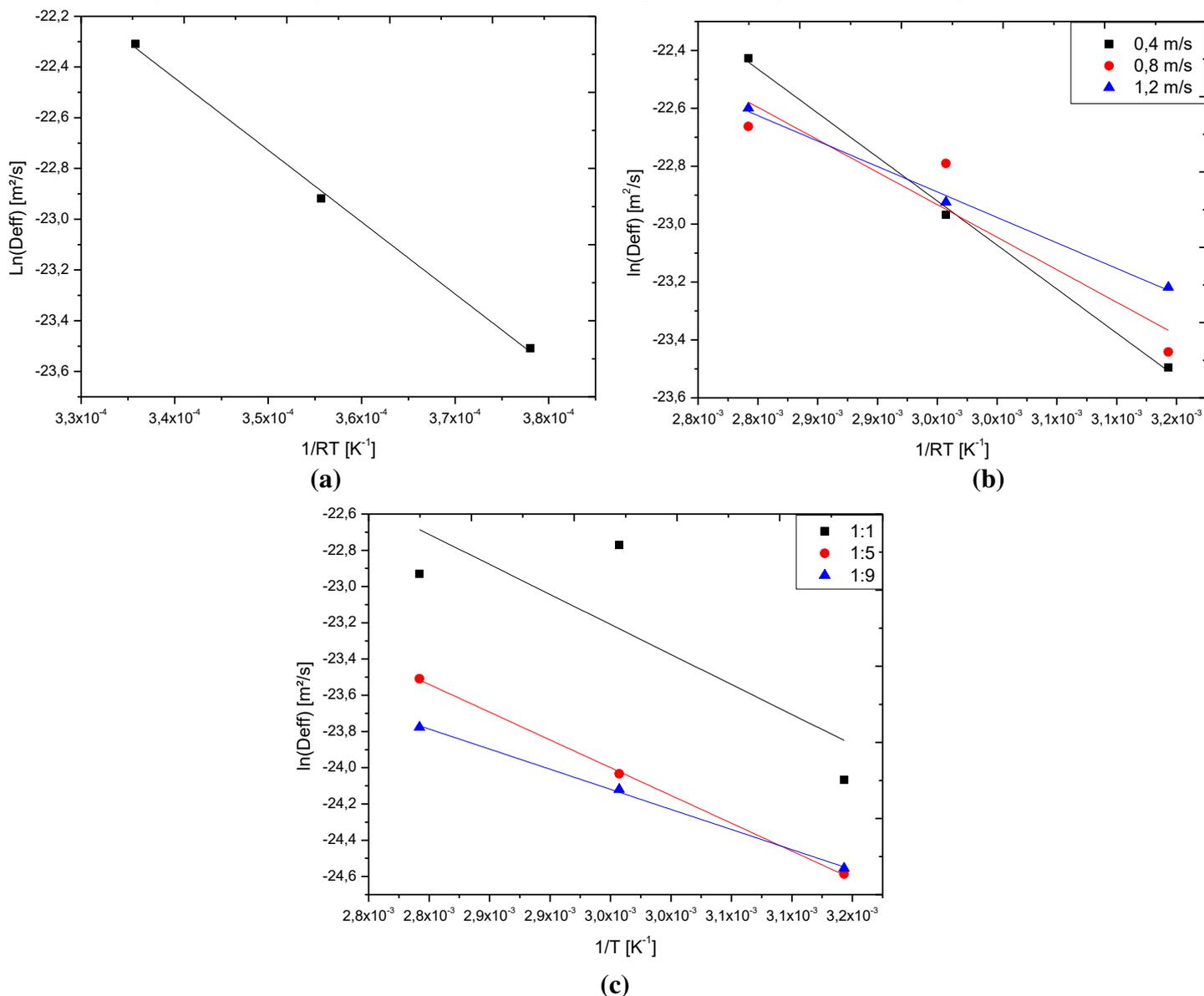


Figura 5.19: : Difusividade efetiva em função da temperatura superficial absoluta da amostra para diferentes tipos de secagem: a) Secagem contínua; b) Secagem Híbrida e c) Secagem intermitente.

A partir da Figura 5.19, temos que a inclinação da reta nos apresenta $-E_a/R$ e o ponto de intersecção $\ln(D_0)$, desse modo podendo ser apresentados de maneira direta na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Valores da energia de ativação e D_0 nas condições analisadas.

Secagem contínua			
E_a (kJ/mol)	28,37		
D_0 (m ² /s)	$2,77 \times 10^{-6}$		
R^2	0,9962		
Secagem híbrida			
Velocidade (m/s)	0,4	0,8	1,2
E_a (kJ/mol)	25,28	18,67	14,63
D_0 (m ² /s)	$8,73 \times 10^{-7}$	$8,25 \times 10^{-8}$	$2,06 \times 10^{-8}$
R^2	0,9967	0,7834	0,9921
Secagem intermitente			
Intermitência	1:1	1:5	1:9
E_a (kJ/mol)	27,54	25,50	18,44
D_0 (m ² /s)	$1,46 \times 10^{-6}$	$3,21 \times 10^{-7}$	$2,33 \times 10^{-8}$
R^2	0,3577	0,9993	0,9975

A energia de ativação é um parâmetro significativo nos processos de secagem dos materiais agrícolas, conforme exposto por Khanali *et al* (2016), de modo que ela representa a energia necessária para iniciar a migração de umidade.

A Tabela 5.6 mostra que tanto o aumento da velocidade do ar na secagem híbrida, quanto a elevação do tempo de intermitência na secagem intermitente, proporcionaram menores valores de energia de ativação, pois estes favoreceram a remoção da umidade superficial das sementes, assim, reduzindo a energia necessária para iniciar o processo difusivo. No entanto, a secagem contínua fornece a maior difusividade e menor fator pré-exponencial (D_0), indicando maior facilidade de perda de umidade da amostra.

Desse modo, ao compararmos os três processos de secagem, observou-se que a maior energia de ativação e menor fator pré-exponencial ocorreu na secagem com o infravermelho contínuo, já que esta possibilita o aumento da umidade superficial das sementes, favorecendo a retirada de água do material e, conseqüentemente, reduzindo o tempo de exposição das amostras à fonte de radiação infravermelha.

Chaji e Hedayatizadeh (2017) analisaram a secagem de sementes de melancia sob influencia da temperatura da fonte IV (40, 50 e 60°C) e da velocidade do ar (0,5; 1,0; 1,5 m/s), encontrando a energia de ativação no valor de 40,82 kJ/mol. Enquanto que Almeida *et al* (2014) estudaram a secagem híbrida de sementes de moringa sob velocidade do ar de 1,5 m/s e temperaturas da fonte IV variando de 40 a 80°C, ou seja, com maiores temperaturas da fonte de radiação infravermelha, mais próximas das

trabalhadas no presente estudo, e apresentaram energia de ativação de 23,33 kJ/mol, corroborando com os resultados apresentados na Tabela 5.6.

5.4. Avaliação da qualidade física

Todas as sementes secas foram submetidas a uma nova caracterização física ao fim de cada operação, assim, a Tabela 5.7 apresenta as dimensões do material seco pelos métodos contínuo, híbrido e intermitente.

Tabela 5.7: Valores médios do comprimento (y), largura (x), espessura (z), diâmetro equivalente (D_{eq}) e esfericidade (ϕ) das sementes de melancia pós-secagem.

Condição de secagem		y (mm)	x (mm)	z (mm)	D_{eq} (mm)	ϕ (mm)	
Secagem Contínua	45°C	8,19	5,03	1,90	4,28	0,52	
	65°C	8,30	5,06	1,84	4,26	0,51	
	85°C	8,37	5,14	1,82	4,28	0,51	
Secagem Híbrida	45°C	0,4 m/s	8,48	5,59	2,02	4,57	0,54
		0,8 m/s	8,41	5,57	1,90	4,46	0,53
		1,2 m/s	8,83	5,49	1,85	4,48	0,51
	65°C	0,4 m/s	8,70	5,40	1,91	4,47	0,51
		0,8 m/s	8,68	5,35	1,89	4,44	0,51
		1,2 m/s	8,66	5,75	1,92	4,57	0,53
	85°C	0,4 m/s	9,00	5,79	1,87	4,61	0,51
		0,8 m/s	8,49	5,31	1,92	4,43	0,52
		1,2 m/s	8,70	5,76	1,91	4,57	0,53
Secagem Intermitente	45°C	1:1	8,36	5,55	1,91	4,46	0,53
		1:5	8,78	5,52	1,99	4,59	0,52
		1:9	8,65	5,39	1,93	4,48	0,52
	65°C	1:1	8,42	5,54	1,92	4,47	0,53
		1:5	8,66	5,34	1,86	4,42	0,51
		1:9	8,25	5,37	1,95	4,42	0,54
	85°C	1:1	8,18	5,33	1,91	4,37	0,53
		1:5	8,07	5,01	1,84	4,20	0,52
		1:9	8,46	5,28	1,99	4,47	0,53

Ao analisar os valores referentes à redução percentual relativa nas diferentes dimensões, é possível constatar que, ao final de todos os processos de secagem nas diferentes condições, as amostras apresentaram maior redução na espessura (z) das sementes, atingindo valores de 17,65; 15,38 e 15,84% para as secagens contínua, híbrida e intermitente, respectivamente, confirmando que a difusão acontece predominantemente na direção “z” e validando a hipótese de transferência de massa unidirecional nessa direção.

A partir desses resultados, percebe-se maior encolhimento da espessura durante a secagem contínua, justificada pela ação direta e ininterrupta da fonte de calor IV, que é suavizada pela ventilação forçada na secagem híbrida e pelos períodos de intermitência na secagem intermitente, minimizando dessa forma a deformação das sementes.

Verifica-se também, que a redução das dimensões das sementes não é acompanhada por alterações significativas na forma da partícula, devido principalmente à rigidez do seu tegumento, que limita as deformações durante o processo de secagem.

As características físicas das sementes variaram de acordo com a condição de secagem utilizada, de modo que foram avaliados os resultados dos volumes aparente e real, junto com suas respectivas densidades, porosidade e o encolhimento. Esses valores podem ser observados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Dados de volume real (V_p), massa específica real (ρ_p), volume aparente (V_{ap}), massa específica aparente (ρ_{ap}), porosidade (ε) e encolhimento volumétrico (S) da semente de melancia antes e depois da secagem.

Condição do material		V_p (cm ³)	ρ_p (g/cm ³)	V_{ap} (cm ³)	ρ_{ap} (g/cm ³)	ε (%)	S (%)	
<i>In natura</i>		0,081	1,57	0,48	0,18	83,13	-	
Secagem Contínua	45°C	0,045	1,66	0,33	0,13	86,27	31,7	
	65°C	0,041	1,83	0,32	0,15	87,33	32,6	
	85°C	0,042	1,86	0,33	0,13	87,19	31,7	
Secagem Híbrida	45°C	0,4 m/s	0,042	1,20	0,40	0,12	89,52	16,6
		0,8 m/s	0,040	1,34	0,37	0,13	89,25	22,5
		1,2 m/s	0,043	1,08	0,38	0,12	88,58	21,6
	65°C	0,4 m/s	0,043	1,05	0,38	0,12	88,54	21,9
		0,8 m/s	0,043	1,07	0,37	0,13	88,29	23,5
		1,2 m/s	0,037	1,18	0,40	0,13	90,76	16,6
	85°C	0,4 m/s	0,050	1,12	0,41	0,11	87,78	14,8
		0,8 m/s	0,045	1,01	0,36	0,13	87,62	24,3
		1,2 m/s	0,043	1,23	0,40	0,14	89,25	16,7
Secagem intermitente	45°C	1:1	0,042	1,14	0,37	0,13	88,66	22,9
		1:5	0,045	1,06	0,40	0,12	88,86	15,9
		1:9	0,047	1,02	0,38	0,13	87,55	21,4
	65°C	1:1	0,043	1,14	0,38	0,14	88,53	22,0
		1:5	0,044	1,10	0,36	0,14	87,81	24,8
		1:9	0,044	1,13	0,36	0,14	87,83	24,7
	85°C	1:1	0,043	1,13	0,35	0,14	87,67	27,4
		1:5	0,042	1,12	0,31	0,16	86,51	35,2
		1:9	0,045	1,09	0,37	0,12	87,94	22,3

Os valores determinados da massa específica aparente das sementes de melancia pós-secagem, Tabela 5.8, variaram de 0,11 a 0,16 g.cm⁻³, de modo a observar que houve redução desta densidade quando comparada com a do material *in natura* (0,18 g.cm⁻³).

Assim, observa-se comportamento proporcional entre o teor de umidade e sua massa específica aparente, consoante ao trabalho de Monteiro (2017) que avaliou a massa específica aparente do grão de quinoa de acordo com o teor de umidade e também constatou a redução da massa específica aparente com a redução do teor de umidade.

Sihui *et al* (2012) encontraram volume aparente da semente de melancia *in natura* de 0,30 cm³, que se aproxima ao valor de 0,48 cm³ apresentado na Tabela 5.8. Tal diferença pode ser justificada com base na heterogeneidade de material no seu estado natural.

A secagem com exposição contínua ao infravermelho permite observar através da Tabela 5.8 os valores do volume aparente e do encolhimento do material, que estabilizaram em 0,32 cm³ e 32%, respectivamente, em todas as condições da secagem contínua, porque o contato direto entre a fonte IV e as sementes, sem nenhum método de redução da temperatura superficial da amostra, atenua os efeitos térmicos no material, enrijecendo o tegumento da amostra.

Na secagem híbrida a redução do volume aparente após a secagem (Tabela 5.8) deve ser analisada em conjunto com o encolhimento, já que estas estão diretamente ligadas. Assim, observa-se que nas velocidades do ar de 0,4 e 0,8 m.s⁻¹, o aumento da temperatura da fonte IV propiciou maior encolhimento, pois a velocidade do ar, relativamente baixa, não reduziu os efeitos térmicos da troca de calor entre a fonte e a amostra.

Comportamento contrário pode ser notado na Tabela 5.8 quando se analisa a influência da temperatura da fonte sob a velocidade do ar de 1,2 m.s⁻¹. Com o aumento da convecção, com o ar a temperatura ambiente, a amostra foi resfriada o suficiente para minimizar a atuação das tensões internas, que ocorrem com a desidratação do produto, possibilitando um encolhimento de 16,7%.

A influência da velocidade do ar no encolhimento pode ser observada na Tabela 5.8. O aumento da velocidade provocou redução do encolhimento para todas as temperaturas de secagem utilizadas, principalmente na secagem a 85°C, já que o

aumento da convecção influencia diretamente nas tensões atuantes no material como explicado anteriormente.

Ao avaliar a secagem intermitente observa-se que o encolhimento do material analisado tende a aumentar com a temperatura da fonte, e que o volume e densidade aparente, por serem inversamente proporcionais ao encolhimento, tendem a diminuir. Esse comportamento é justificado pela troca térmica existente entre a fonte e o material que provoca altas temperaturas superficiais nas sementes, favorecendo a retirada de umidade interna das sementes e aumentando as tensões internas atuantes.

Quando se analisa a influência da intermitência no processo a partir da Tabela 5.8 nota-se que em todas as temperaturas da fonte o encolhimento tende a aumentar até o período de intermitência de 1:5, enquanto que o oposto acontece na intermitência de 1:9, porque esta proporciona menores tempos de contato entre as sementes e a radiação IV, reduzindo os efeitos térmicos no encolhimento.

De acordo com a Tabela 5.8 a porosidade e massa específica real do material aumentam com a retirada de água das sementes, enquanto que o volume real das sementes diminui, como esperado, pois a extração de água aumenta os espaços vazios da amostra, aumentando as tensões internas que favorecem o encolhimento, que por sua vez influencia diretamente no volume e densidade real.

Observa-se na Tabela 5.8 que a convecção forçada possibilitou o aumento da porosidade do material com o resfriamento da amostra, bem como a aplicação de períodos de intermitência durante a secagem.

Quando comparado os dados dos três métodos de secagem apresentados na Tabela 5.8, pode-se perceber que a secagem contínua foi a que teve maiores encolhimentos, menores porosidades, volume e densidade aparente, como esperado, pois a convecção e a intermitência reduzem as tensões internas atuantes nas sementes durante o processo de secagem.

5.5.Caracterização óptica

A cor do material é um requisito que influencia diretamente no seu comércio, pois pode indicar a degradação química do material processado. Tal propriedade é analisada a partir das medidas das coordenadas L^* , a^* e b^* do sistema Hunter, que possibilitaram o cálculo do índice colorimétrico ΔE^* para indicar o índice de variação

da cor da semente com 12% b.s. de umidade em relação ao material *in natura*. Esses resultados são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Parâmetros colorimétricos das sementes de melancia *in natura* e com 12% b.s. de umidade.

Condição do material		L^*	a^*	b^*	ΔE^*
<i>In natura</i>		23,55	8,59	10,86	-
Temperatura (°C)		Secagem contínua			
45		37,79	5,41	11,09	14,59
65		37,72	5,42	12,61	14,62
85		38,31	5,17	11,33	15,15
Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Secagem híbrida			
45	0,4	37,05	7,93	14,03	13,88
	0,8	37,92	6,33	17,19	15,70
	1,2	38,11	8,55	13,45	14,96
65	0,4	37,32	6,35	13,40	14,18
	0,8	37,85	6,12	12,56	14,61
	1,2	37,86	8,18	14,86	14,86
85	0,4	37,69	6,26	12,42	14,41
	0,8	36,64	5,38	10,85	13,48
	1,2	37,09	9,20	14,82	14,11
Temperatura (°C)	Intermitência	Secagem intermitente			
45	1 : 1	38,76	7,68	15,04	15,80
	1 : 5	38,07	7,89	14,51	14,99
	1 : 9	40,91	7,94	16,03	18,12
65	1 : 1	37,80	8,79	16,12	15,19
	1 : 5	38,83	6,89	13,49	15,60
	1 : 9	39,41	8,15	15,98	16,67
85	1 : 1	38,30	8,18	16,54	15,80
	1 : 5	38,72	7,54	14,84	15,71
	1 : 9	37,25	6,70	13,16	14,02

De acordo com a Tabela 5.9 observa-se que as alterações colorimétricas se assemelharam em todos os processos de secagem, indicando a baixa influencia que as variáveis velocidade do ar e período de intermitência tiveram na alteração da cor do material.

Ao analisar os valores da luminosidade (L^*) apresentados na Tabela 5.9 percebe-se um aumento desses valores nas sementes de melancia secas, evidenciando a luminosidade do material após a submissão aos raios IV, que é justificado pela retirada de umidade das sementes em curtos períodos de tempo durante o processo. Destaca-se

nesse sentindo a secagem intermitente com temperatura da fonte de 45°C e período de intermitência de 1:9 que aumentou sua luminosidade em, aproximadamente, 74%.

A coordenada a^* apresentou tendência a cor verde na secagem contínua, o que é amenizado durante as secagens híbrida e intermitente, deixando o material com uma cor mais próxima do natural. Essa proximidade da coloração entre as sementes secas e *in natura* ocorre devido a combinação da velocidade do ar e dos períodos de intermitência com a fonte IV nas secagens híbrida e intermitente, respectivamente, porque tais variáveis proporcionam um resfriamento do material, amenizando os efeitos da fonte de calor na cor das sementes.

Nota-se, ainda, que na secagem híbrida a coordenada a^* se manteve mais próxima do valor inicial com o aumento da velocidade do ar de secagem, como esperado, pois o aumento da convecção proporciona redução dos efeitos térmicos com o resfriamento da semente e, conseqüentemente, deixando-a com a coloração mais natural.

Quando se avalia a influencia da temperatura da fonte IV no processo de secagem híbrida sobre a coordenada a^* , tem-se que o aumento da temperatura de secagem provocou maior alteração dessa coordenada no material. Esse comportamento também pode ser observado na secagem intermitente, através de uma tendência a deterioração da cor das sementes, devido as altas temperaturas atingidas pela superfície do material.

Percebe-se na Tabela 5.9 na secagem intermitente que durante a secagem com temperatura da fonte de 45°C o parâmetro a^* se manteve, aproximadamente, constante independente do período de intermitência utilizado no processo. O mesmo não ocorre nos processos com temperaturas da fonte de 65 e 85°C, porque estas temperaturas, consideradas altas, provocam uma rápida transferência de calor da fonte IV para a semente atenuando os efeitos do calor no material como na secagem contínua.

A alteração nos parâmetros colorimétricos, comumente, provoca reações de escurecimento enzimático ou não no material, por isso o índice de escurecimento das sementes foi calculado com base nos valores das coordenadas colorimétricas apresentadas na Tabela 5.9.

O índice de escurecimento está relacionado a cor castanha presente na amostra, que indica a formação de pigmentos amarronzados provenientes das reações de escurecimento que ocorrem no processo de secagem. Dito isso, os índices de

escurecimento (IE) das amostras, o ângulo *hue* (H^*) e a coordenada croma (C^*) em todas as condições de secagem são apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Valores da coordenada croma (C^*), do ângulo de *hue* (H^*) e índice de escurecimento (IE) das sementes de melancia pós-processo de secagem.

Condição do material		C^*	H^*	IE
Temperatura (°C)		Secagem contínua		
45		12,33	63,99	226,88
65		13,72	66,73	232,76
85		12,45	65,48	226,58
Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Secagem híbrida		
45	0,4	16,11	60,53	244,65
	0,8	19,20	63,57	257,75
	1,2	14,86	64,81	237,18
65	0,4	14,83	64,64	238,44
	0,8	13,97	64,02	233,74
	1,2	16,96	61,17	247,01
85	0,4	13,90	63,24	233,72
	0,8	12,10	63,64	227,50
	1,2	17,44	58,16	250,43
Temperatura (°C)	Intermitência	Secagem intermitente		
45	1:1	16,89	62,96	244,97
	1:5	16,51	61,48	244,55
	1:9	17,88	63,66	245,25
65	1:1	18,36	61,40	253,72
	1:5	15,15	62,96	237,20
	1:9	17,94	62,98	248,40
85	1:1	18,45	63,69	253,22
	1:5	16,64	63,08	243,98
	1:9	14,77	62,97	238,28

Ao avaliar o índice de escurecimento da amostra *in natura* constatou-se um valor de 269,03 que ao ser comparado com o resultado apresentado na Tabela 5.10 nota-se a redução do IE das sementes de melancia. No entanto, esse índice tende a se manter mais próximo ao valor do material em condições naturais no ponto central da secagem da contínua.

Quando se analisa a influência da temperatura da fonte no índice de escurecimento na Tabela 5.10, durante a secagem híbrida, observa-se que as secagens a 0,4 e 0,8 m/s de convecção reduziram os valores do IE com o aumento da temperatura

da fonte, o que acontece inversamente na secagem híbrida com velocidade do ar a 1,2 m/s, já que a alta temperatura da fonte aliada a maior convecção do ar de secagem proporcionaram um efeito sinérgico no material, acelerando o processo de retirada de água das sementes, reduzindo o tempo de contato entre a fonte IV e a amostra e, conseqüentemente, amenizando os efeitos térmicos na cor do material.

A influência da velocidade do ar no índice de escurecimento durante a secagem híbrida permite afirmar que altas convecções favorecem a coloração do material processado, porque as mesmas resfriam a amostra amenizando o aumento da temperatura superficial e, portanto, deixando as sementes com a coloração mais próxima do natural.

O índice de escurecimento, apresentado na Tabela 5.10, da secagem intermitente se comporta de maneira praticamente constante na secagem a 45°C, devido a baixa temperatura de secagem utilizada no processo. O mesmo não ocorre nas secagens a 65 e 85°C, já que a alta temperatura degrada a cor original das sementes independentemente do período de intermitência, pois quanto maior for este período, maior será a redução do IE.

Ao comparar os três métodos de secagem notou-se que tanto o uso da convecção quanto do período de intermitência durante as secagens proporcionaram menor alteração da cor do material, deixando-o mais próximo da cor natural, ao fim do processo. Além disso, é possível que alguns fatores como a composição química das sementes, a alteração do índice de escurecimento das amostras e as temperaturas atingidas pelo material durante sua exposição à radiação IV tenham favorecido a ocorrência das reações de Maillard.

Os valores do ângulo de *hue*, apresentados na Tabela 5.10, mostram estar entre 60 e 70° em todas as condições de secagem, de modo a indicar o aumento da cor amarelada das sementes de melancia, já que estas inicialmente possuíam um ângulo de 51,66°.

Em conjunto com tal ângulo, a coordenada *C** indica a intensidade da cor das amostras, que tiveram pouca variação em relação a coordenada inicial (13,85). É possível observar que na secagem híbrida a temperatura da fonte de 45°C e velocidade do ar de 0,8 m/s, a amostra apresentou a maior leitura da coordenada *C** (19,20), bem como o maior IE (257,75).

5.6. Consumo energético

Além da qualidade do material após a secagem, outro fator importante é sua viabilidade econômica, por isso os processos foram acompanhados de maneira a ter contabilizado o consumo energético ao fim de cada secagem realizada. Esses resultados são listados na Tabela 5.12.

Tabela 5.11: Consumo energético específico das secagens ($X_{bu} = 20\%$).

Tipo de secagem	Condição	Consumo energético (kWh/g)	Desvio Padrão	
Contínua	45°C	57,53	1,53	
	65°C	31,19	1,93	
	85°C	21,63	0,95	
Híbrida	45°C	0,4 m/s	73,16	1,23
		0,8 m/s	61,16	1,54
		1,2 m/s	48,51	2,75
	65 °C	0,4 m/s	40,33	1,34
		0,8 m/s	42,59	4,96
		1,2 m/s	48,11	2,34
	85°C	0,4 m/s	29,91	1,35
		0,8 m/s	36,50	2,23
		1,2 m/s	34,71	2,43
Intermitente	45°C	1:1	48,63	0,89
		1:5	23,14	2,41
		1:9	15,07	4,00
	65 °C	1:1	30,13	0,62
		1:5	21,81	2,75
		1:9	15,41	0,83
	85°C	1:1	26,63	0,62
		1:5	17,84	0,02
		1:9	11,51	1,54

Quando se analisa a influência da temperatura da fonte sobre o consumo energético, tem-se que seu aumento implica em reduções de consumo em todas as condições de secagem analisadas, já que altas temperaturas da fonte provocam maior aquecimento das sementes favorecendo o fenômeno difusivo e, portanto, reduzindo o tempo de secagem. Esse comportamento é nítido quando o consumo do secador reduz 62,4; 59,12 e 76,33% nas secagens contínua, híbrida e intermitente, respectivamente.

Ao avaliarmos a influência da velocidade do ar na secagem híbrida pela Tabela 5.12, percebe-se que o aumento da convecção, quando a temperatura da fonte IV está a

45°C, proporciona diminuição no consumo energético do secador, isso porque a baixa temperatura da fonte torna a transferência de massa por convecção mais significativa e, conseqüentemente, o processo relativamente mais rápido.

Notou-se, ainda, que o aumento da velocidade do ar na secagem híbrida com temperaturas da fonte IV de 65 e 85°C provocou a elevação do consumo energético, já que o aumento da velocidade do ar resfriou a temperatura superficial da amostra, exigindo maior período de exposição do material à radiação IV para atingir a umidade de equilíbrio da amostra e, portanto, consumiu mais energia.

Observa-se na Tabela 5.12 que o maior consumo energético encontrado (73,16 kWh/g) ocorreu durante a secagem híbrida a 45°C e velocidade do ar de 0,4 m/s, justificado pela baixa temperatura da fonte e velocidade do ar, que combinadas exigiram mais do secador utilizado.

A partir da Tabela 5.12, percebeu-se que na secagem intermitente a intermitência do processo favoreceu o consumo energético, de modo que o aumento dos períodos de intermitência proporcionou os menores resultados de gasto de energia, pois a intermitência proporciona um aumento na concentração de umidade na superfície do material e, assim, facilita a retirada de água do material quando exposto novamente a radiação IV. Esse favorecimento pode ser observado na secagem intermitente a 85°C na proporção de 1:9, que proporcionou o menor consumo energético (11,51 kWh/g) durante o processo de secagem.

A fim de avaliar a influência das variáveis estudadas no consumo energético, durante os processos de secagem, foram realizadas análises na superfície resposta e diagrama de Pareto. Os resultados referentes à secagem híbrida foram apresentados nas Figuras 5.20 e 5.21.

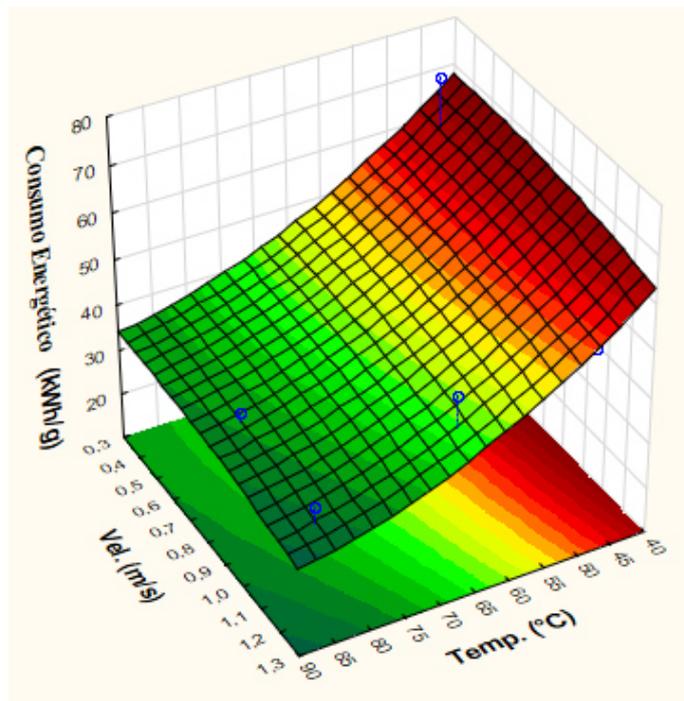


Figura 5.20: Superfície de resposta do consumo energético em função da temperatura e velocidade do ar na secagem híbrida.

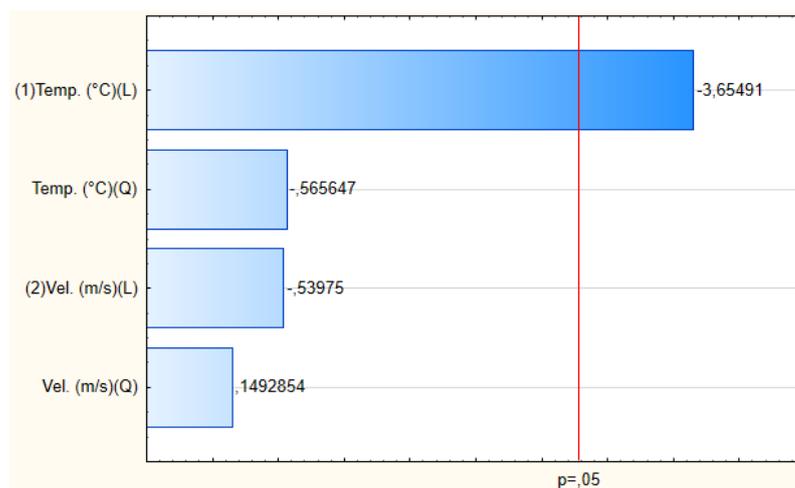


Figura 5.21: Diagrama da Pareto com estimativa de efeitos das variáveis no consumo energético para a secagem híbrida.

A partir da Figura 5.21 é possível verificar que a temperatura tem uma influência linear no consumo energético específico.

As análises estatísticas da secagem intermitente foram apresentadas nas Figuras 5.22 e 5.23.

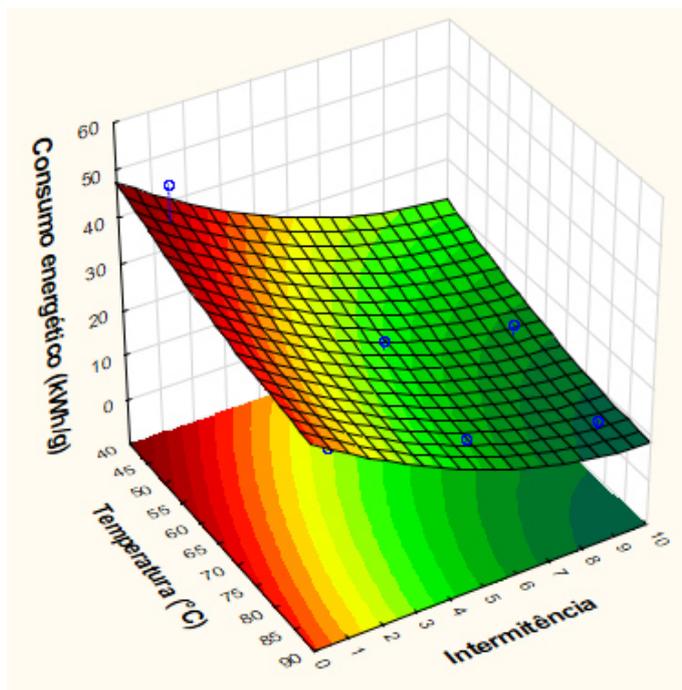


Figura 5.22: Superfície de resposta do consumo energético em função da temperatura e velocidade do ar na secagem intermitente.

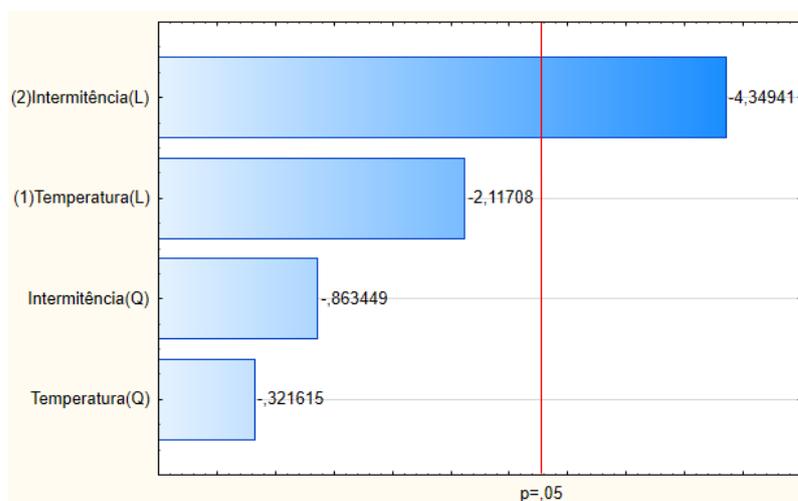


Figura 5.23: Diagrama da Pareto com estimativa de efeitos das variáveis no consumo energético para a secagem intermitente.

Observa-se através da Figura 5.23 que a intermitência tem uma influência linear no consumo energético específico, já que estes possibilitam a não utilização do secador em tais momentos, economizando assim tempo de processamento, ou seja, quanto maior a intermitência e temperatura da fonte, menor o consumo energético do secador utilizado.

6. CONCLUSÃO

A partir dos objetivos apresentados e resultados encontrados no decorrer da pesquisa foi possível obter as seguintes conclusões das secagens contínua, híbrida e intermitente das sementes de melancia.

Diante das cinéticas analisadas, nas diversas condições, tem-se que a secagem contínua a 85°C proporcionou maior difusividade efetiva ($1,91 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$), devido a influência significativa que a temperatura da fonte possui no processo como foi observado nos Diagramas de Pareto apresentados. As análises estatísticas realizadas na cinética de secagem também mostraram a influência negativa da intermitência na difusividade da água.

O modelo da placa plana da Lei de Fick se adequou aos processos de secagem analisados, de modo a proporcionar resultados satisfatórios, bem como os ajustes realizados a partir das equações de Lewis, Page e Brooker.

A secagem com radiação contínua propiciou maior energia de ativação e menor fator pré-exponencial. Assim, a energia de ativação das sementes variou de 14,63 a 28,37 kJ/mol.

A caracterização física das sementes de melancia *in natura* permitiu observar o encolhimento do material ao ser submetido ao processo de secagem, principalmente na contínua, que proporcionou maiores tensões internas causadas pela alta temperatura superficial atingida pelas sementes. No entanto, notou-se que a combinação da radiação IV com a convecção forçada e intermitência proporcionou menores encolhimentos, baixando de 32,6% na secagem contínua a 65°C para 14,8% na híbrida com temperatura da fonte de 85°C e ventilação a 0,4 m/s.

A análise colorimétrica mostrou variação de cor em todas as condições de secagem, de modo que a exposição das sementes a radiação IV clareou a superfície do material de maneira mais intensa na secagem contínua, porque a convecção forçada e os períodos de intermitência reduziram os efeitos térmicos na coloração do material durante o processo.

A partir de ferramentas estatísticas, observa-se na análise do consumo energético do equipamento que a temperatura da fonte de 85°C aliada a uma intermitência de 1:9 proporcionou menores consumos energéticos, mesmo com maiores

tempos de processamento, isso porque nos períodos de intermitência o equipamento não é utilizado.

Assim, se o objetivo da secagem for a retirada de umidade das sementes de melancia em menor tempo, destaca-se a secagem com radiação IV contínua a 85°C, enquanto que a secagem intermitente com proporção de 1:9 e fonte a 85°C proporciona menor consumo energético do equipamento, além de boa transferência de massa, mas com um alto tempo de processamento.

O processo de secagem assistido por radiação IV mostra-se promissor se aplicado de maneira adequada para se atingir o objetivo no processamento de sementes de melancia. Em que possibilita menores consumos energéticos, maiores coeficientes difusivos, menores tempos de processamento, bem como, alterações de cor aceitáveis.

7. SUGESTÕES

Como sugestões para trabalhos futuros, têm-se:

- Avaliar o poder germinativo das sementes após as secagens;
- Análise quantitativa e qualitativa dos valores nutricionais no material, a fim de avaliar a presença de aminoácidos como a citrulina e comprovar a ocorrência das reações de Maillard durante a secagem IV;
- Produzir bio-óleo por pirólise a fim de avaliar suas propriedades.

REFERÊNCIAS

- A loja do chá de Aracaju.** Disponível em: <https://www.alojadochadearacaju.com.br/shop/produto/floral-essencial-semente-de-melancia/>. Acessado em: 09/01/2018.
- ALI, M. M.; HASHIM, N.; BEJO, S. K.; SHAMSUDIN, R. Laser-induced backscattering imaging for classification of seeded and seedless watermelons. **Computers and Electronics in Agriculture**. V. 140, p. 311-316, 2017.
- ALMEIDA, P. S.; XAVIER, T. P.; BACELOS, M. S.; BARROZO, M. A. S.; LIRA, T. S. Estudo experimental da secagem do carpelo da macadâmia em leito de jorro. **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis – SC, 2014.
- ARRIECHE, L. S. **Evolução da forma e encolhimento de um sistema gel durante a secagem por convecção forçada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2003.
- ARAÚJO, C. S.; VALENTE, M. C. C.; SANTANA, E. B.; COSTA, C. M. L.; FARIA, L. J. G. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de jambu durante a secagem. **XXXVII ENEMP – Congresso Brasileiro de Sistemas particulados**. São Carlos – SP, 2015.
- AZZOUZ, S.; HERMASSI, I.; CHOUIKH, R.; GUIZANI, A.; BELGHITH, A. The convective drying of grape seeds: Effect of shrinkage on heat and mass transfer. **Journal of Food Process Engineering**. Ed. Wiley, 2017.
- *BARBOSA NETO, A. M.; LIMA, J. O.; MARQUES, L. G.; PRADO, M. M. Secagem infravermelho de caroços de açaí para a obtenção de biomassa. **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Florianópolis – SC, 2014.
- BARBOSA NETO, A. M.; PRADO, M. M.; MARQUES, L. G.; SARTORI, D. J. M. Mass transfer in infrared drying of gel-coated seeds. **Advances in Chemical Engineering and Science**, V. 4, p. 39-48, 2014.
- BOREL, L. D. M. S. **Aplicação de um secador de leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho para o beneficiamento do pólen apícola**.

Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, 2014.

BOTELHO, F. M.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; MARTINS, M. A.; MAGALHÃES, F. E. A.; CAMPOS, S. C. Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V. 15, n. 8, p. 845-852, Campina Grande – PB, 2011.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária, Brasília: MAPA/ACS, 2009.

CALÍN-SÁNCHEZ, A.; FIGIEL, A.; WOJDYLO, A.; SZARYCZ, M.; CARBONELL-BARRACHINA, A. A. Drying of Garlic Slices Using Convective Pre-drying and Vacuum-Microwave Finishing Drying: Kinetics, Energy Consumption, and Quality Studies. **Food Bioprocess Technol**. Springer, 2013.

CARNEIRO, A. A. J.; ALVES-PRADO, H. F.; GOMES, E.; SILVA, R. Escurecimento enzimático em alimentos: ciclodextrinas como agente antiescurecimento. **Alim. Nutr**. V.17, n.3, p. 345-352, Araraquara - SP, 2006.

CELMA, A. R.; ROJAS, S.; LOPEZ-RODRÍGUEZ, F. Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. **Chemical Engineering and Processing**. V. 47, p. 1810-1818, 2008.

CHAJI, H.; HEDAYATIZADEH, M. Quality assessment and kinetics of dehydrated watermelon seeds: Part 1. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, Elsevier, p. 9-17, 2017.

CHAYJAN, R. A.; RADMARD, S. A. Moisture and thermal diffusivity of lentil seed under convective infrared-microwave: Modelling with and without shrinkage. **Research in Agricultural Engineering**. V. 62, p. 129-140, 2016.

CHIELLE, D. P.; BERTUOL, D. A.; MEILI, L.; TANABE, E. H.; DOTTO, G. L. Convective drying of papaya seeds (*Carica papaya* L.) and optimization of oil extraction. **Industrial Crops and Products**. Elsevier, V. 85, p. 221-228, 2016.

- COSTA, D. M. **Estudo da secagem infravermelho de sementes de girassol.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracaju - SE, 2010.
- DARVISHI, H.; KHOSHTAGHAZA, M. H.; NAJAFI, J.; ZAREIN, M. Characteristics of sunflower seed drying and microwave energy consumption. *International Agrophysics*. Versita, V. 27, p. 127-132, 2013.
- DESHMUKH, C. D.; JAIN, A. Hypoglycemic effect of methanolic extract of *Citrullus lanatus* seeds. **International journal of pharmaceutical, chemical and biological sciences**. V. 5(4), p. 807-816, 2015.
- DOYMAZ, I. Experimental study on drying characteristics of pumpkin seeds in an infrared dryer. **Latin American Applied Research**, V. 46, p. 167-172, 2016.
- DOYMAZ, I. Infrared drying characteristics of bean seeds. **Journal of Food Processing and Preservation**. Wiley Periodicals, V. 39, p. 933-939, 2015.
- ENGELHARDT, B. A. S.; ARRIECHE, L. S. Análise da secagem de amêndoas de cacau por convecção forçada a partir de diferentes secadores. **Brazilian Journal of Production Engineering**, V. 2, n. 2, 2016.
- ERHIRHIE, E. O.; EKENE, N. E. Medicinal Values on *Citrullus lanatus* (Watermelon): Pharmacological Review. **International journal of research in pharmaceutical and biomedical sciences**. V. 4(4), 2013.
- FAO - **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Top Production - Watermelons 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acessado em: 21/12/2017.
- FILHO, L. C. C.; ANDRADE, E. T.; MARTINAZZO, A. P.; D'ANDREA, E. M.; SOUZA, F. A.; FIGUEIRA, F. G. Cinética de secagem, contração volumétrica e análise da difusão líquida do figo (*Ficus carica* L.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V. 19, n. 8, p. 797-802, 2015.
- GAMA, R. N. C. S. **Marcadores microssatélites ligados a locus de resistência ao oídio e ao padrão externo de frutos de melancia.** Tese (Doutorado em

Recursos Genéticos Vegetais) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana – BA, 2015.

GHASEMI, A.; SADEGHI, M.; MIREEI, S. A. Multi-Stage Intermittent Drying of Rough Rice in Terms of Tempering and Stress Cracking Indices and Moisture Gradients Interpretation. **Drying Technology An International Journal**. Taylor e Francis Group, p. 1532-2300, 2017.

GINZBURG, A. S. Application of infrared radiation in food processing. **Chemical and process engineering series**. London: Leonard Hill, 1969.

GLOUANNEC, P; SALAGNAC, P; GUÉZENOC, H; ALLANIC, N. Experimental study of infrared-convective drying of hydrous ferrous sulphate. **Powder Technology**. V. 187; 280-288, 2008.

IBGE. Produção Agrícola Municipal – Culturas Temporárias e Permanentes, V. 41, p. 1-100, Rio de Janeiro – RJ, 2014.

IBGE. Produção Agrícola Municipal – Culturas Temporárias e Permanentes, V. 43, p. 1-62, Rio de Janeiro – RJ, 2016.

IKPEME, E. V.; UDENSI, O. U.; EKERETTE, E. E.; OKON, U. H. Potential of Ginger (*Zingiber officinale*) Rhizome and Watermelon (*Citrullus lanatus*) Seeds in Mitigating Aspartame-Induced Oxidative Stress in Rat Model. **Research Journal of Medicinal Plant**, 2016.

JUNG, H.; YOON, W. B. The effect of intermittent drying on the cracking ratio of soybeans (*Glycine max*) at different relative humidity using reaction engineering approach modeling. **Food Science and Nutrition**. Original Research, V. 6, p. 1492-1500, 2018.

KHANALI, M.; BANISHARIF, A.; RAFIEE, S. Modeling of moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in fluidized bed drying of rough rice. **Heat Mass Transf.** V. 2, p. 2551-2549, 2016.

KIIN-KABARI, D. B.; AKUSU, O. M. Effect of processing on the proximate composition, functional properties and storage stability of water melon

- (*Citrullus lanatus*) seed flour. **International Journal of Biotechnology and Food Science**. V. 2(7), p. 143-148, 2014.
- KOOCHEKI, A.; RAZAVI, S. M. A.; MILANI, E.; MOGHADAM, T. M.; ABENDINI, M.; ALAMATIYAN, S.; IZADKHAH, S. Physical properties of watermelon seed as a function of moisture content and variety. **Int. Agrophysics**. V. 21, p. 349-359, 2007.
- KOWALSKI, S. J.; RAJEWSKA. Convective Drying Enhanced with Microwave and infrared Radiation. **Drying Technology**, V. 27, p. 878-887, 2009.
- KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. **Advanced drying technologies**. 2^a ed. Boca Raton, Estados Unidos: CRC Press, 2002. xvi, 462 p.
- KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDDER, M. U. H. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering**, V. 121, p. 48-57, 2014.
- LEITE, A. L. M. P.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; PIASSON, D.; SANTOS, P. Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. **e-ISSN**, 1983-4063, *Pesq. Agropec. Trop.*, V. 45, n. 2, p. 155-162, Goiânia – GO, 2015.
- LIMA, A. G. B.; DELGADO, J. M. P. Q.; NETO, S. R. F.; FRANCO, C. M. R. Intermittent Drying: Fundamentals, Modeling and Applications. **Drying and Energy Technologies, Advanced Structured Materials**. Springer International Publishing Switzerland, V. 63, p. 19-41, 2016.
- LOPES, F. J. **Estudo do fenômeno de encolhimento na secagem convectiva de abacaxi com aplicação de micro-ondas**. Dissertação (Mestrado em produção vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ, 2013.
- LÓPEZ, R.; VACA, M; TERRES, H.; LIZARDI, A.; MORALES, J.; FLORES, J. CHÁVEZ, S. Heat and mass transfer analysis of convective drying of chickpea (*Cicer arietinum*). VII International Congress of Engineering Physics. **Journal of Physics: Conference**, 2015.

- MÖHLER, B. C. **Avaliação das características de secagem dos grãos de soja.** Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2010.
- MOHSEININ, N. N. Physical properties of plant and animal materials: structure, physical, characteristics and mechanical properties. **New York: Gordon and Breach Science Publishers.** 664 p. 1986.
- MOTA, D. H. **Propriedades físicas durante a secagem e qualidade tecnológica em cultivares de feijão carioca em diferentes condições de armazenamento.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília – DF, 2016.
- MONTEIRO, N. O. C. **Determinação de algumas propriedades físicas de grãos de quinoa e amaranto em função do teor de água.** Trabalho de conclusão do curso de Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2017.
- MUJUMDAR, A. S.; **Handbook of Industrial Drying.** 1334p, 4ª edição, CRC Press, 2015.
- NASCIMENTO, V. R. G. **Secagem convectiva e com radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera* Lam.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2014.
- OKEYO, A. A.; OLATUNDE, G.; ATUNGULO, G. G.; SADAKA, S.; MCKAY, T. Infrared Drying Characteristics of Long-Grain Hybrid, Long-Grain Pureline, and Medium-Grain Rice Cultivars. **Cereal Chemistry**, V. 94, n. 2, p. 251-261, 2017.
- OLAWUMI, I. B.; FRANCA, E. Chemical Properties of Watermelon Seed and the Utilization of Dehulled Seed in Cookies Production. **Carpathian Journal of Food Science and Technology**, Ifesan and Ebosele, V. 9 (1), p. 126-135, 2017.

- OLIVEIRA, D. E. C. O.; RESENDE, O.; COSTA, L. M. Efeitos da secagem na coloração dos frutos de baru (*Dipteryx alata* Vogel). **Revista Agro**, V. 10, n. 4, p. 364-370, Boa Vista – RR, 2016.
- OLIVEIRA, K. C.; SILVA, E. A.; JOHANN, G.; PALÚ, F. Otimização do consumo energético da secagem do crambe em um secador de leito fixo. **ENGEVISTA**. V. 19, n. 5, p. 1431-1448, 2017.
- OLIVEIRA, M. T. R.; BERBERT, P. A.; CARLESSO, V. O.; THIÉBAUT, J. T. L.; VIEIRA, H. D.; PEREIRA, R. C. Efeito da secagem por convecção na germinação de sementes de carambola. **Revista Brasileira de Sementes**. V. 33, n. 2, p. 233-240, 2011.
- OLIVEIRA, V. B.; QUEIROZ, M. A.; LIMA, J. A. A. Fontes de resistência em melancia aos principais potyvirus isolados de cucurbitáceas no Nordeste brasileiro. **Horticultura Brasileira**, V. 20, n. 4, p. 589-592, Brasília, 2002.
- ONWUDE, D.; HASHIMA, M.; ABDANA, K.; JANIUS, G.; CHEN, G. The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. **Journ of Food Eng.**, n. 241, p. 75-87, 2018.
- PAIVA, J. R. C. **Qualidade fisiológica de sementes e desempenho agrônômico de melancia ‘crimson sweet’ em função da procedência das sementes**. Dissertação (Mestrado em agronomia: Fitotecnia) – Universidade Rural do Semi-árido, Mossoró – RN, 2015.
- PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. Secagem: fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande – PB, V. 16, n. 1, p. 93-127, 2014.
- PEREIRA, D. R. M. **Desempenho agrônômico da melancia por semeadura direta e transplântio de mudas**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia – GO, 2017.
- PERKINS-VEAZIE, P.; MA, G.; DEAN, L.; HASSEL, R. Comparison of free citrulline and arginine in watermelon seeds and flesh. **American Society for Horticultural Science (ASHA)**, 2015.

- PESKE, S. T.; ROSENTHAL, M. D.; ROTA, G. R. M. **Sementes Fundamentos Científicos e Tecnológicos**. 1ª Ed. Pelotas – RS, 2003.
- PRADO, M. M.; SARTORI, D. J. M. **Estudo do fenômeno do encolhimento durante a secagem de sementes com diferentes características superficiais**. Trabalho apresentado no XXIX ENEMP, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2001.
- RIADH, M. H.; AHMAD, S. A. B.; MARHABAN, M. H.; SOH, A. C. Infrared Heating in Food Drying: An Overview. *Drying Technology*. v. 33, n. 3, p. 322-335, 2015.
- RIBEIRO, L. C. **Produção de acerola em pó: métodos de secagem e avaliação da estabilidade**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2014.
- RODOVALHO, R. S.; SILVA, H. W.; SILVA, I. L.; ROSETTO, C. A. V. Cinética de secagem dos grãos de pimenta bode. *Global Science and Technology*. V. 8, p. 128-142, 2015.
- SANTOS, C. J. R. **Secagem de sementes de girassol via radiação infravermelho e convecção forçada de ar aquecido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracaju – SE, 2009.
- SANTOS, C. S.; RIBEIRO, A. S. Apicultura uma Alternativa na Busca do Desenvolvimento Sustentável. *Revista Verde*. V. 4, n. 3, p. 01- 06. jul/set. Mossoró – RN – Brasil, 2009.
- SANTOS, M. N. S.; OLIVEIRA, D. E. C.; RUFFATO, S.; PEREIRA, V. S. Cinética de secagem de grãos de milho da cultivar Pioneer P3646. *Global Science and Technology*. V. 7, n. 2, p. 119-129, 2014.
- SERRA, R. L. **Aplicação da radiação infravermelha no processo de secagem de resíduos da agroindústria do açaí**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, Aracaju – SE, 2017.

- SEYED, M. A.; RAZAVI; MILANI, E. Some physical properties of the watermelon seeds. **African J. Agricultural Research**. V. 1 (3), p. 65-69, 2006.
- SIHUI, D.; XINGYAO, X.; XIAOWU, S.; JUN, Y.; PING, D.; MING, L. Some Physical Properties of Triploid Watermelon Seed. **International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application**. IEEE, 2012.
- SILVA, B. E. D.; OLIVEIRA, T. M.; PINTO, E. G.; BARBOSA, T. A.; SOARES, D. S. B. Efeito de diferentes revestimentos sobre o escurecimento enzimático em maçã. **Revista Agrarian**. V. 10, n. 38, p. 355-362, Dourado – MS, 2017.
- SILVA NETO, M. L.; PRADO, M. M.; MARQUES, L. G. Transferência de massa na secagem infravermelho de sementes de pinhão-mansô (*Jatropha curcas* L.). **Scientia Plena**. V. 10, n. 3, 2014.
- SILVA, N. A. A. **Efeito da suplementação com extrato alcoólico das diferentes partes da melancia (*Citrullus lanatus* (thunb.) matsum. & nakai.) e da L-citrulina sobre os testículos de camundongos suíços adultos**. Dissertação (Mestrado em Biologia celular e estrutural) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2017.
- SILVA, R. B.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; ALVES, A. P. Estudo da cinética de secagem de polpa de carambola. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**. Ponta Grossa, V. 10, n. 2, p. 2069-2080, 2016.
- SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Difusividade efetiva de grãos e frutos de pinhão-mansô. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, V. 33, suplemento 1, p. 2919-2930, 2012.
- SONAWANW, S. K.; BAGUL, M. B.; LEBLANC, J. G.; ARYA, S. S. Nutritional, functional, thermal and structural characteristics of *Citrullus lanatus* and *Limonia acidissima* seed flours. **Food Measure**, V. 10, p. 72-79, 2016.
- SWASDISEVI T.; DEVAHASTIN, S.; NGAMCHUM, R.; SOPONRONNARIT, S. Optimization of a drying process using infrared vacuum drying of Cavendish banana slices. **Songklanakarín Journal Science Technology**, V. 29, n. 3, p. 809-816, 2007.

- USTRA, L. A. R. **Secagem de grãos de arroz em leito fluidizado**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós- Graduação em Ciência e Tecnologia Agroindustrial. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas. 95f. Pelotas, 2005.
- VILELA, N. J.; AVILA, A. C.; VIEIRA, J. V. **Dinâmica do agronegócio brasileiro da melancia: produção, consumo e comercialização**. Brasília, Embrapa: Hortaliças, 12p. (Circular Técnica. Embrapa Hortaliças, 42), 2006.
- VILLA-CORRALES, L.; FLORES-PRIETO, J. J.; XAMÁN-VILLASEÑOR, J. P.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, E. Numerical and experimental analysis if heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango. **Journal of Food Engineering**, V. 98, p. 198-206, 2010.
- WANG, Y.; ZHANG, M., MUJUMDAR, A. S.; CHEN, H. Drying and Quality Characteristics of Shredded Squid in an Infrared-Assisted Convective Dryer. **Drying Technology**. Taylor & Francis Group, V. 32, p. 1828-1839, 2014.
- WANYO, P.; SIRIAMORNUN, S. MEESO, N. Improvement of quality and antioxidant properties of dried mulberry leaves with combined farinfrared radiation anda ir convection in thai tea process. **Food and Bioprod Process**. V. 89, p. 22-30, 2011.
- YOUNIS, M.; ABDELKARIM, D.; EL-ABDEIN, A. Z. Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. **Saudi Journal of Biological Sciences**. V. 25, p. 332–338, 2018.

APÊNDICE A

O ajuste cinético de secagem do modelo teórico de Fick para o método do infravermelho contínuo segue representado a seguir.

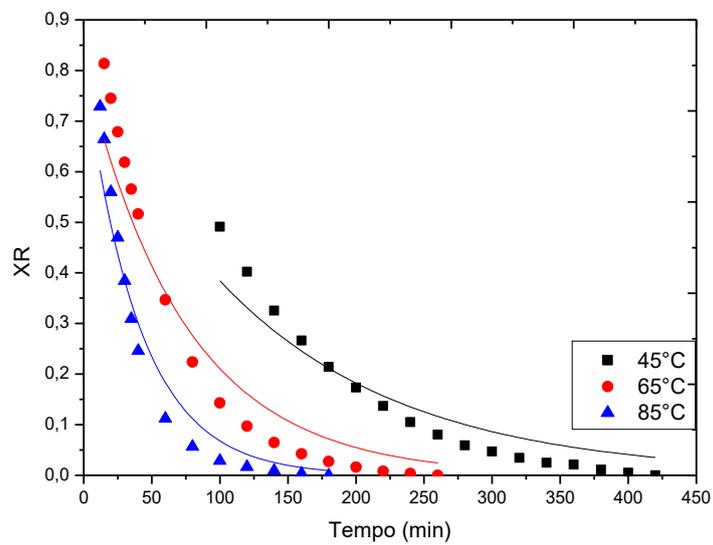
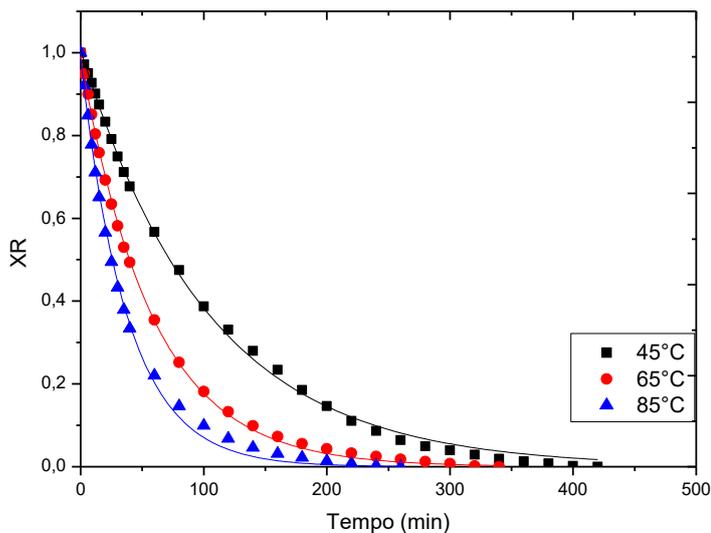


Figura A. 1: Adimensional de umidade no modelo teórico da Lei de Fick.

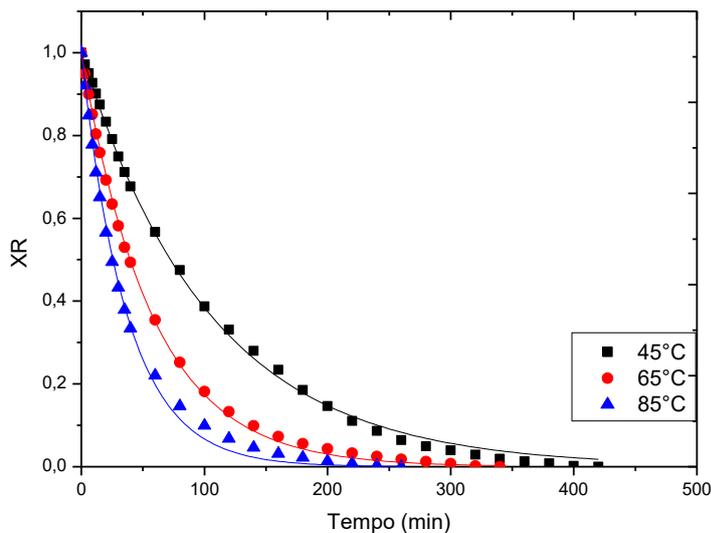
APÊNDICE B

Os gráficos de secagem referentes aos ajustes cinéticos das equações de Brooker, Lewis, Page e modelo teórico de Fick para secagem híbrida com velocidade do ar fixa seguem abaixo juntamente com a tabela que dispõe dos seus parâmetros e coeficientes estatísticos.

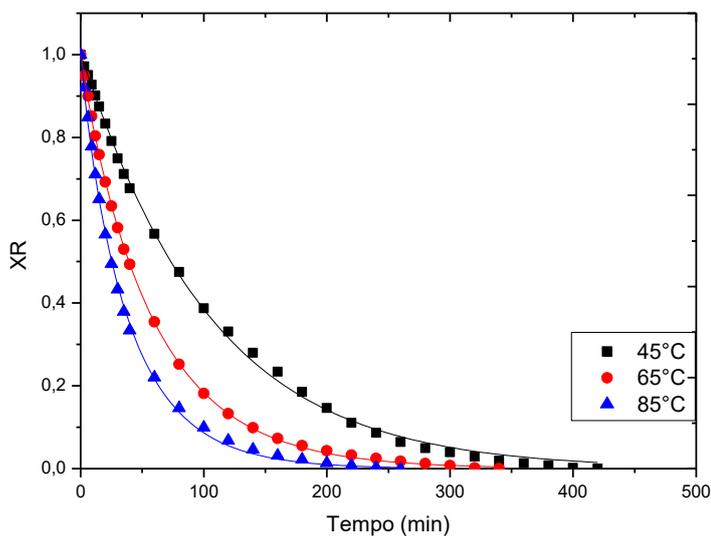
- Para 0,4 m/s:



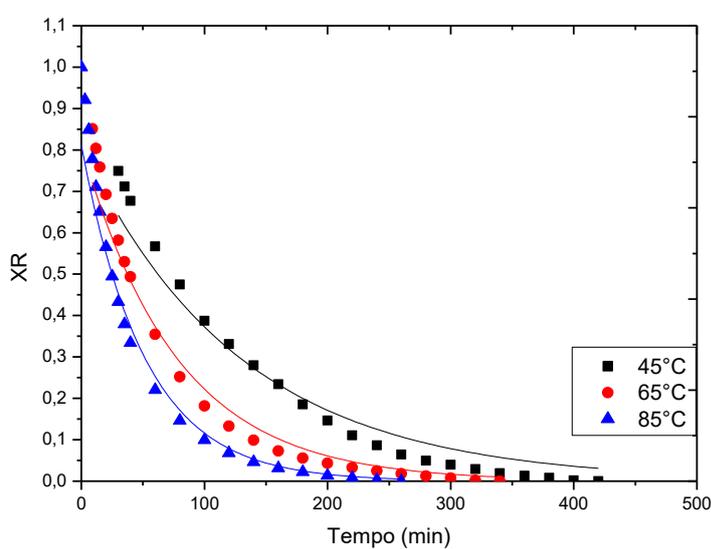
(a)



(b)



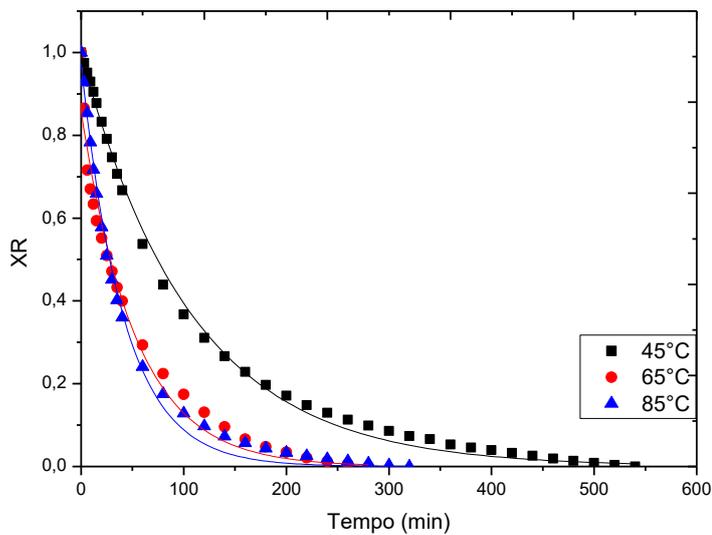
(c)



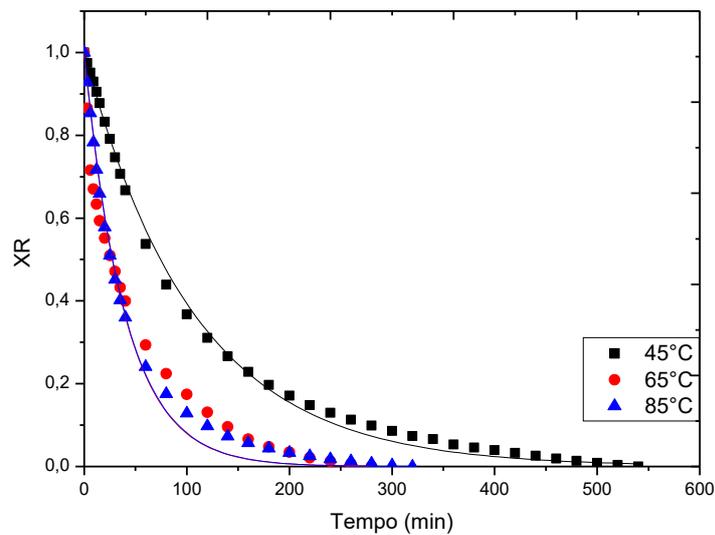
(d)

Figura B. 1: Adimensional umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page; d) Modelo Fick.

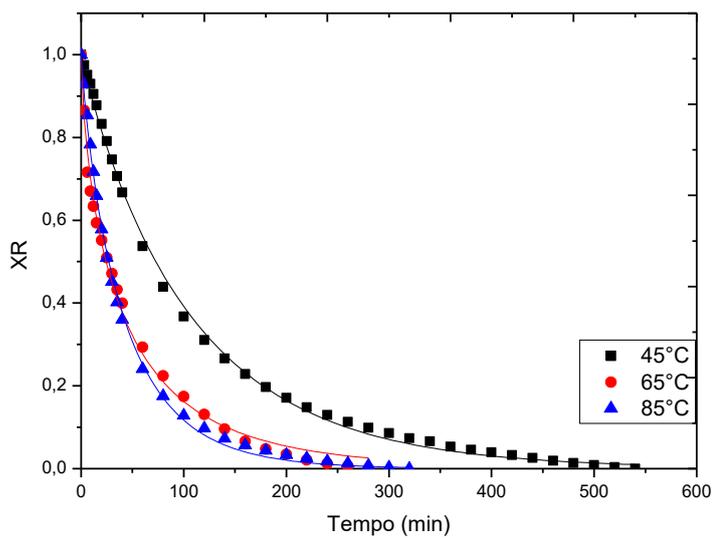
• Para 0,8 m/s:



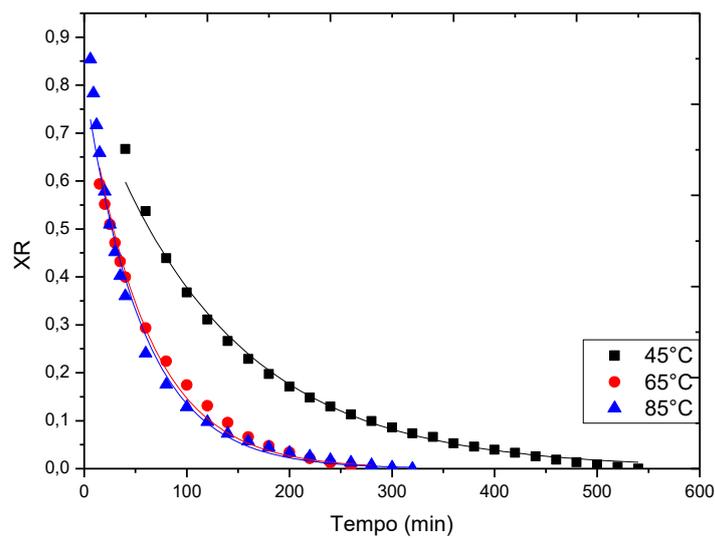
(a)



(b)



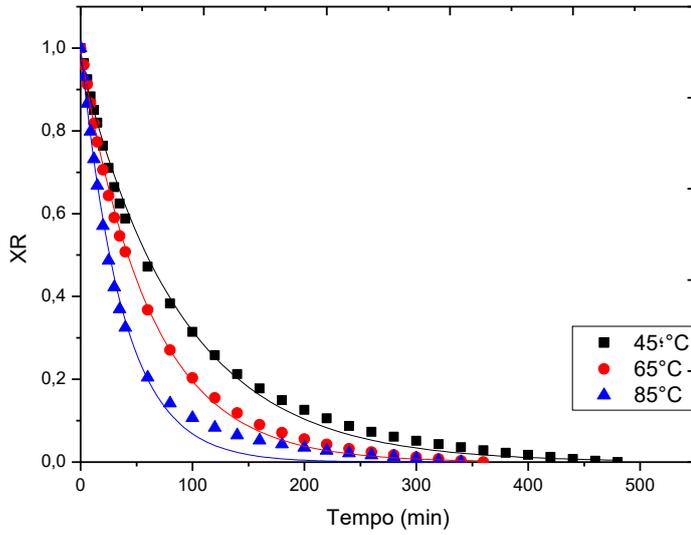
(c)



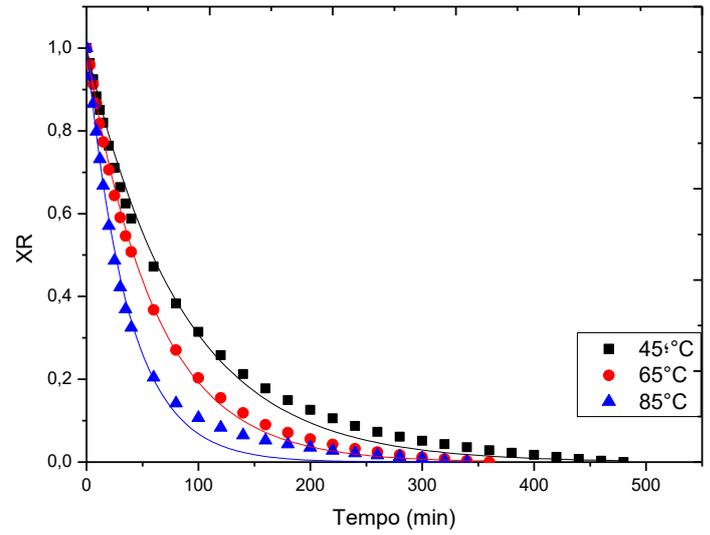
(d)

Figura B. 2: Adimensional umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page; d) Modelo Fick.

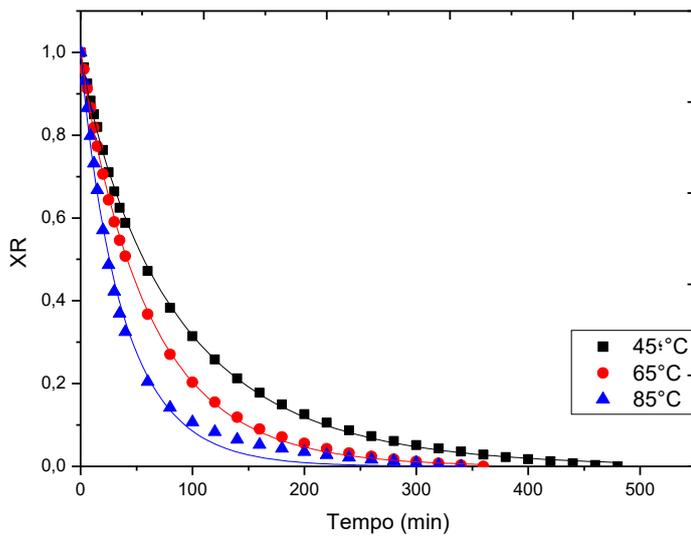
• Para 1,2 m/s:



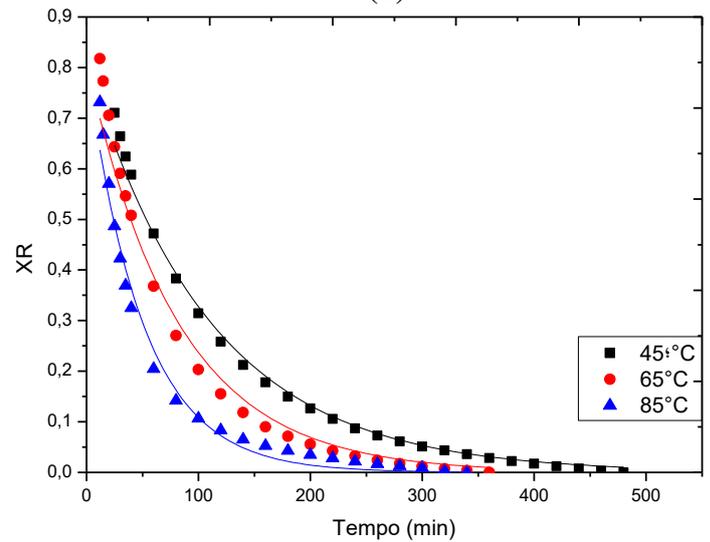
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura B. 3: Adimensional umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page; d) Modelo Fick.

Tabela B. 1: Parâmetros, teste do qui-quadrado (χ^2), erro estimado (SE) e coeficiente de determinação (R^2) dos modelos cinéticos de secagem.

Condições		Modelos	Parâmetros		$\chi^2 (10^{-4})$	SE		R^2
Temp. (°C)	Velocidade (m/s)							
45	0,4 0,8 1,2	Brooker	a	k	$1,602 \times 10^{-4}$	a	k	0,999
			1,008	0,010	$2,900 \times 10^{-4}$	0,005	$1,244 \times 10^{-4}$	0,998
			0,995	0,009	$3,299 \times 10^{-4}$	0,007	$1,581 \times 10^{-4}$	0,997
	0,4 0,8 1,2	Lewis	k		$1,666 \times 10^{-4}$	k		0,999
			0,011		$2,861 \times 10^{-4}$	$1,024 \times 10^{-4}$		0,998
			0,016		$4,813 \times 10^{-4}$	$1,290 \times 10^{-4}$		0,996
	0,4 0,8 1,2	Page	k	n	$1,337 \times 10^{-4}$	k	n	0,999
			0,008	1,033	$1,979 \times 10^{-4}$	$5,085 \times 10^{-4}$	0,013	0,998
			0,012	0,947	$5,799 \times 10^{-5}$	$7,898 \times 10^{-4}$	0,014	0,999
65	0,4 0,8 1,2	Brooker	a	k	$6,152 \times 10^{-4}$	a	k	0,999
			0,990	0,017	0,002	0,003	$1,713 \times 10^{-4}$	0,978
			0,858	0,020	$1,441 \times 10^{-4}$	0,024	0,001	0,999
	0,4 0,8 1,2	Lewis	k		$7,482 \times 10^{-4}$	k		0,999
			0,018		0,005	$1,448 \times 10^{-4}$		0,950
			0,025		$1,488 \times 10^{-4}$	$1,904 \times 10^{-4}$		0,999
	0,4 0,8 1,2	Page	k	n	$1,797 \times 10^{-5}$	k	n	0,999
			0,021	0,956	$4,848 \times 10^{-4}$	$4,168 \times 10^{-4}$	0,005	0,994
			0,079	0,681	$6,733 \times 10^{-5}$	$7,730 \times 10^{-4}$	0,019	0,999
85	0,4 0,8 1,2	Brooker	a	k	$2,538 \times 10^{-4}$	a	k	0,998
			0,985	0,026	$6,088 \times 10^{-4}$	0,009	$5,722 \times 10^{-4}$	0,995
			0,972	0,024	$5,676 \times 10^{-4}$	0,014	$8,091 \times 10^{-4}$	0,995
	0,4 0,8 1,2	Lewis	k		$2,728 \times 10^{-4}$	k		0,998
			0,027		$6,761 \times 10^{-4}$	$4,404 \times 10^{-4}$		0,994
			0,025		$5,449 \times 10^{-4}$	$6,432 \times 10^{-4}$		0,995
	0,4 0,8 1,2	Page	k	n	$1,034 \times 10^{-4}$	k	n	0,999
			0,036	0,917	$2,048 \times 10^{-4}$	0,002	0,013	0,998
			0,041	0,862	$4,737 \times 10^{-4}$	0,002	0,017	0,996
0,4 0,8 1,2	Page	k	n	$1,034 \times 10^{-4}$	k	n	0,999	
		0,036	0,917	$2,048 \times 10^{-4}$	0,002	0,013	0,998	
		0,041	0,862	$4,737 \times 10^{-4}$	0,002	0,017	0,996	

APÊNDICE C

Os gráficos de secagem referentes aos ajustes cinéticos dos modelos de Brooker, Lewis, Page e Fick para secagem intermitente com períodos de intermitência fixos seguem abaixo juntamente com a tabela que dispõe dos seus parâmetros e coeficientes estatísticos.

• Para 1:1:

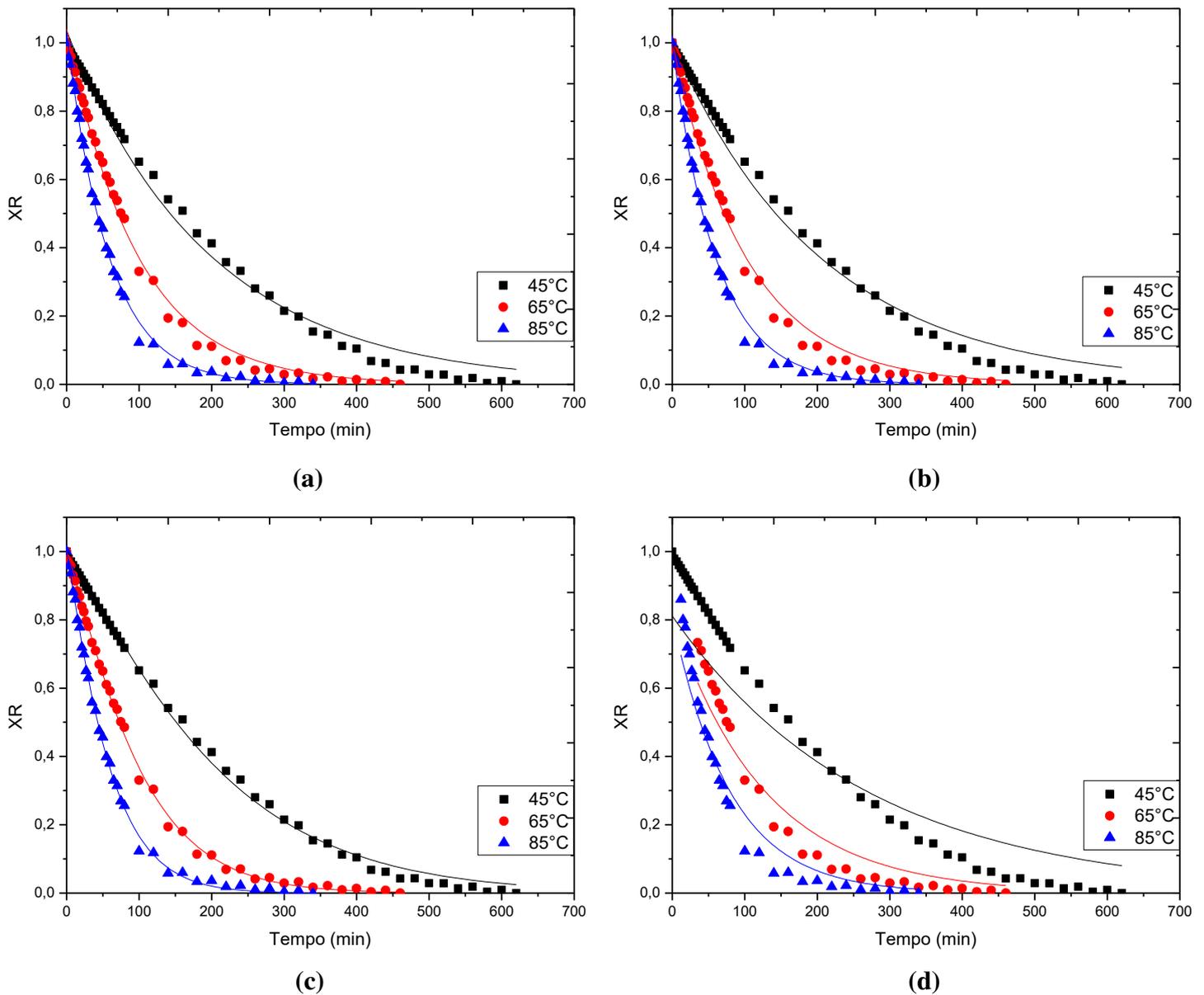
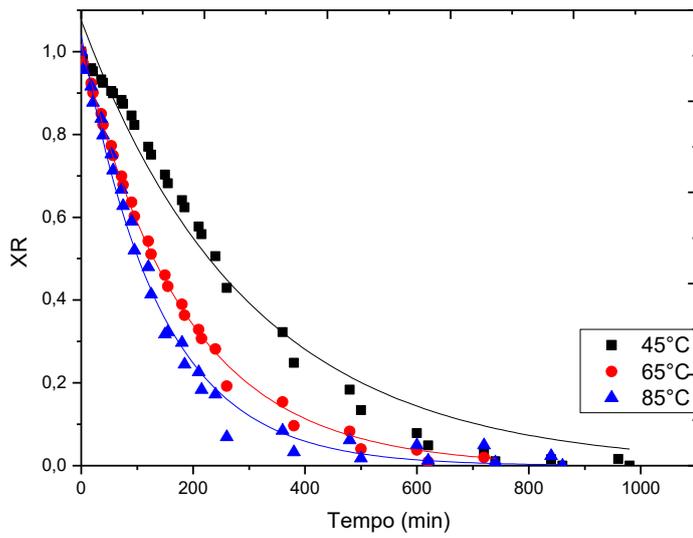
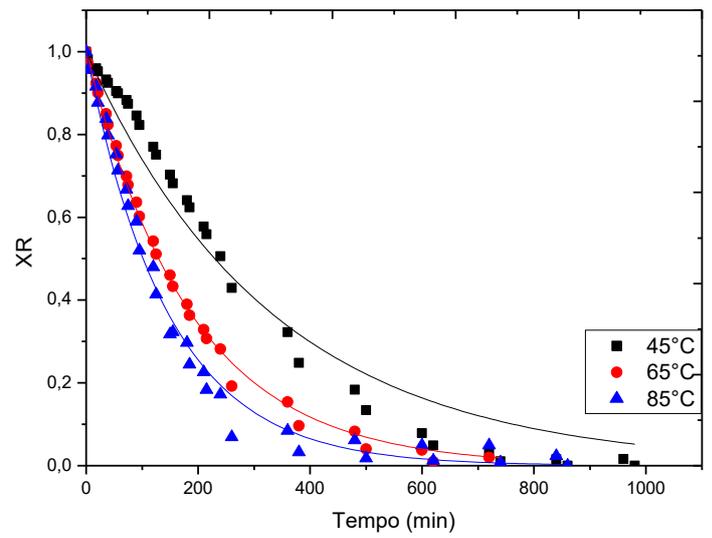


Figura C. 1: Adimensional umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page; d) Modelo Fick.

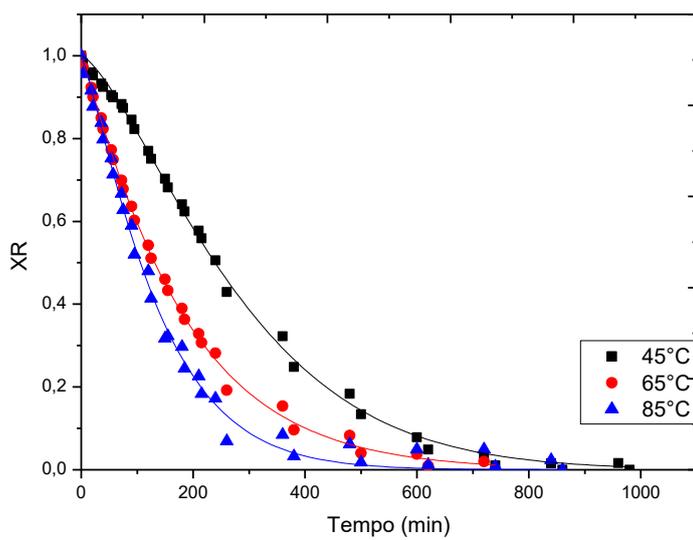
• Para 1:5:



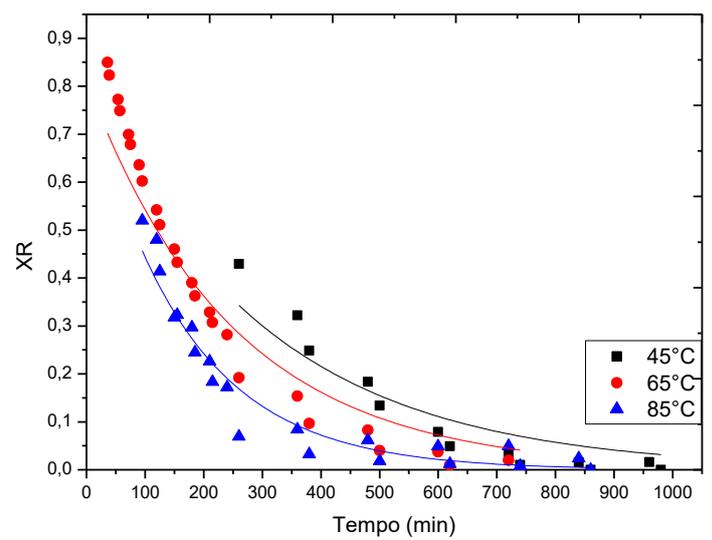
(a)



(b)



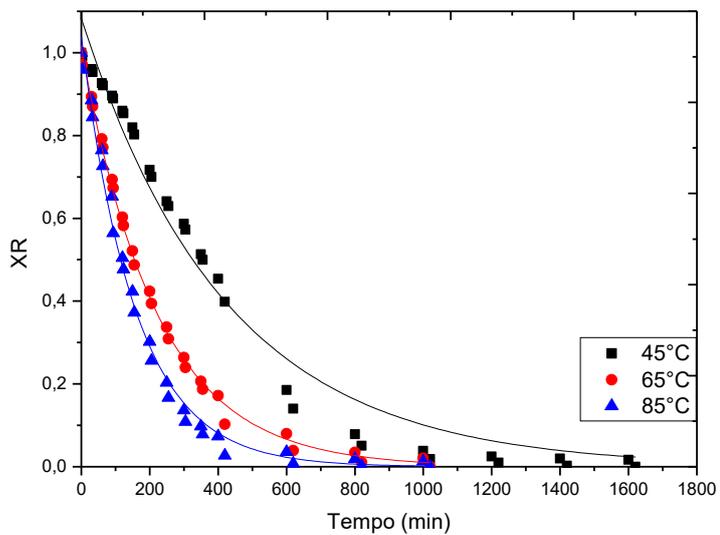
(c)



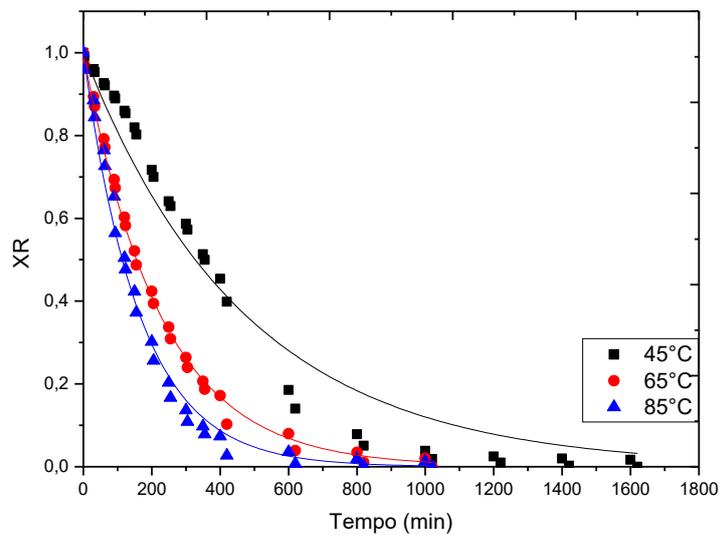
(d)

Figura C. 2: Adimensional umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page; d) Modelo Fick.

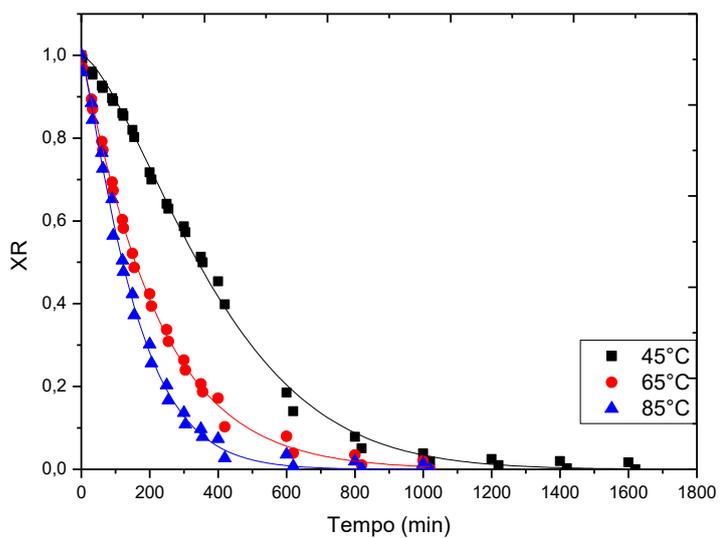
• Para 1:9:



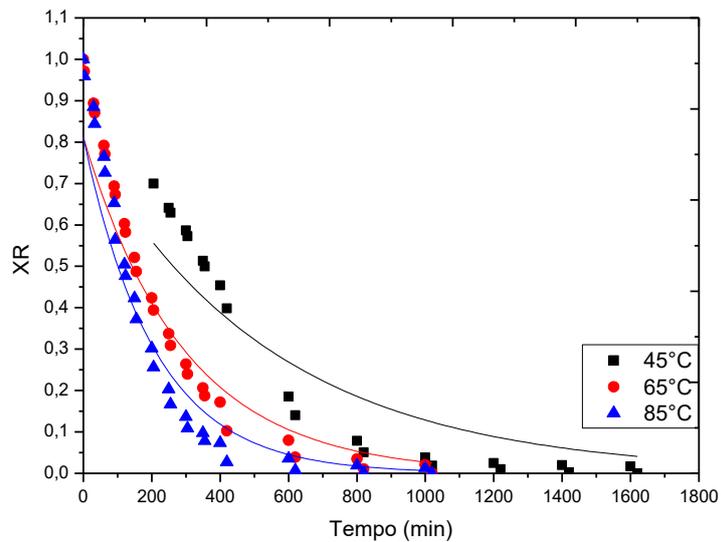
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura C. 3: Adimensional umidade em função do tempo: a) Equação de Brooker; b) Equação de Lewis; c) Equação de Page; d) Modelo Fick.

Tabela C. 1: Parâmetros, teste do qui-quadrado (χ^2), erro estimado (SE) e coeficiente de determinação (R^2) dos modelos cinéticos de secagem.

Condições		Modelos	Parâmetros		χ^2	SE		R^2
Temp. (°C)	Intermitência							
45	1:1 1:5 1:9	Brooker	a	k	0,001 0,003 0,003	a	k	0,991 0,981 0,978
			1,035	0,005		0,010	$1,246 \times 10^{-4}$	
			1,075	0,003		0,020	$1,487 \times 10^{-4}$	
	1,083	0,002	0,002	$1,147 \times 10^{-4}$				
	1:1 1:5 1:9	Lewis	k		0,001 0,004 0,004	k		0,990 0,972 0,969
			0,005			$1,083 \times 10^{-4}$		
			0,003			$1,281 \times 10^{-4}$		
	0,002		$9,720 \times 10^{-5}$					
	1:1 1:5 1:9	Page	k	n	$3,527 \times 10^{-4}$ $2,377 \times 10^{-4}$ $3,438 \times 10^{-4}$	k	n	0,997 0,998 0,998
0,002			1,188	$1,856 \times 10^{-4}$		0,020		
$3,3 \times 10^{-4}$			1,397	$4,697 \times 10^{-5}$		0,026		
$1,3 \times 10^{-4}$	1,472	$2,797 \times 10^{-5}$	0,036					
65	1:1 1:5 1:9	Brooker	a	k	$5,578 \times 10^{-4}$ 0,003 $2,647 \times 10^{-4}$	a	k	0,996 0,997 0,997
			1,040	0,010		0,009	$2,210 \times 10^{-4}$	
			1,017	0,005		0,008	$8,981 \times 10^{-5}$	
	1,015	0,005	$2,647 \times 10^{-4}$	0,008	$7,108 \times 10^{-5}$			
	1:1 1:5 1:9	Lewis	k		$8,204 \times 10^{-4}$ $3,352 \times 10^{-4}$ $2,878 \times 10^{-4}$	k		0,994 0,997 0,997
			0,010			$1,911 \times 10^{-4}$		
			0,005			$6,887 \times 10^{-5}$		
	0,004		$2,878 \times 10^{-4}$	$5,430 \times 10^{-5}$				
	1:1 1:5 1:9	Page	k	n	$1,669 \times 10^{-4}$ $1,952 \times 10^{-4}$ $1,796 \times 10^{-4}$	k	n	0,999 0,998 0,998
0,005			1,166	$3,248 \times 10^{-4}$		0,016		
0,004			1,075	$3,349 \times 10^{-4}$		0,018		
0,003	1,069	$1,796 \times 10^{-4}$	$3,001 \times 10^{-4}$	0,018				
85	1:1 1:5 1:9	Brooker	a	k	$2,981 \times 10^{-4}$ 0,001 $9,115 \times 10^{-4}$	a	k	0,997 0,990 0,992
			1,034	0,017		0,008	$2,862 \times 10^{-4}$	
			1,039	0,007		0,017	$2,299 \times 10^{-4}$	
	1,039	0,006	$9,115 \times 10^{-4}$	0,017	$1,863 \times 10^{-4}$			
	1:1 1:5 1:9	Lewis	k		$4,480 \times 10^{-4}$ 0,001 0,001	k		0,996 0,988 0,990
			0,017			$2,459 \times 10^{-4}$		
			0,007			$1,771 \times 10^{-4}$		
	0,006		$4,480 \times 10^{-4}$	$1,503 \times 10^{-4}$				
	1:1 1:5 1:9	Page	k	n	$1,570 \times 10^{-4}$ $6,969 \times 10^{-4}$ $3,573 \times 10^{-4}$	k	n	0,999 0,994 0,997
0,010			1,119	$6,826 \times 10^{-4}$		0,017		
0,003			1,196	$5,140 \times 10^{-4}$		0,040		
0,002	1,193	$3,573 \times 10^{-4}$	$3,530 \times 10^{-4}$	0,030				