



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG

CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE - CES

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS

NATURAIS E BIOTECNOLOGIA - PPGCNBIOTEC

THAMIRES MABEL QUEIROZ DE OLIVEIRA

**DESCRIÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DAS SEMENTES
DE JACA (*Artocarpus heterophyllus Lam.*) E ANÁLISE FÍSICO-
QUÍMICA DAS SEMENTES E ENDOCARPOS**

Cuité - PB

2020

THAMIRES MABEL QUEIROZ DE OLIVEIRA

DESCRIÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DAS SEMENTES DE JACA (*Artocarpus heterophyllus Lam.*) E ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DAS SEMENTES E ENDOCARPOS

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

Orientador: Prof. Dr. Aluizio Freire da Silva Júnior.

Coorientadora: Prof.ª Dr.ª Vera Solange de Oliveira Freitas.

Cuité - PB

2020

O48d Oliveira, Thamires Mabel Queiroz de.

Descrição da cinética de secagem das sementes de jaca (*Artocarpus heterophyllus Lam.*) e análise físico-química das sementes e endocarpos. / Thamires Mabel Queiroz de Oliveira. – Cuité: CES, 2020.

122 fl.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais e Biotecnologia) – Centro de Educação e Saúde / UFCG, 2020.

Orientador: Dr. Aluizio Freire da Silva Júnior.

Coorientadora: Dra. Vera Solange de Oliveira Freitas.

1. Secagem de produtos biológicos. 2. *Artocarpus heterophyllus Lam.* 3. Jaca – secagem de sementes. 4. Secagem convertiva. I. SILVA JÚNIOR, Aluizio Freire da. II. FREITAS, Vera Solange de Oliveira. III. Título.

Biblioteca do CES - UFCG

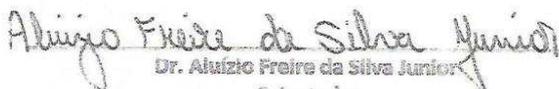
CDU 547.9

Ficha catalográfica elaborada na fonte - Responsabilidade Jesiel Ferreira Gomes – CRB 15 – 256

"DESCRIÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM DAS SEMENTES DE JACA (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) E ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DAS SEMENTES E ENDOCARPOS"

THAMIRES MABEL QUEIROZ DE OLIVEIRA

Dissertação Aprovada em 15/04/2020 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:


Dr. Aluizio Freire da Silva Junior
Orientador
UAFM/CES/UFGO


Dra. Yanessa Bordin Vieira
Examinadora Interna
UAS/CES/UFGO


Dr. Milton Pereira da Silva
Examinador Externo
UFGO

A Deus,

Aos meus pais, Aldenisa e Cleidimar,

A minha irmã Thayane,

A toda minha família,

E a todos que estiveram verdadeiramente ao meu lado,

Obrigada!

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e aos meus pais (Aldenisa e Cleidimar) por entenderem que a educação é o caminho para a construção de valores e libertação de pensamentos, por isso acreditaram, ajudaram, torceram e fizeram possível a minha conquista, que na verdade é de todos nós;

À minha família, em especial a minha titia Aldeiza, a minha avó Maria e ao meu avô Cândido, por todo o apoio expressado durante toda a caminhada;

À minha irmã linda, Thayane, por todo o carinho e amor e por ser um dos motivos pra eu acreditar em um mundo melhor e mais generoso;

Ao meu orientador Aluízio Freire por estar incansavelmente comprometido com a minha orientação e pelas imensas contribuições na vida acadêmica;

A minha coorientadora Vera Solange pelas contribuições expressas tanto neste trabalho quanto em outros momentos acadêmicos;

A Carlos Dantas, Técnico dos Laboratórios de Nutrição do CES, pela imensa ajuda nas análises físico-químicas, me orientando e guiando na execução dos procedimentos e na tabulação dos dados das análises;

A Vanessa Martins, companheira de todas as horas, pela incansável ajuda que me deu na execução da pesquisa de campo, ora em horário de pico, ora nas madrugadas. “Ela foi pau pra toda obra”;

Aos alunos do curso de exatas do *campus* de Cuité Isaac, André, Willian e Ismael, muito obrigada pela ajuda com os experimentos de secagem, vocês foram essenciais;

A Raquel Medeiros e Henrique, obrigada pelas caronas de volta para casa durante as madrugadas de pesquisas;

A FAPESQ pelo fornecimento de bolsa de mestrado durante alguns meses de curso, sendo de fundamental importância para financiar minha pesquisa;

Aos funcionários que trabalham no apoio nos blocos dos laboratórios, obrigada pela disponibilidade;

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

À administração e a secretaria do PPGCNBIOTEC por todo o apoio e esclarecimento durante o curso;

A UFCG, especialmente ao CES por toda a estrutura fornecida tanto na parte estrutural quanto pelos funcionários envolvidos, possibilitando a nossa estadia mais agradável e harmoniosa.

“O poder dos oprimidos assusta àqueles que esperavam submissão.
Continue assustando-os, mostre sua força, conquiste seu lugar, garota!
E lembre-se sempre que você tem o direito de ser tudo aquilo que
você quiser” (Autor desconhecido).

OLIVEIRA, T. **Descrição da cinética de secagem das sementes de jaca (*Artocarpus heterophyllus Lam*) e análise físico-química das sementes e endocarpos.** 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais e Biotecnologia) – Programa de Pós-graduação em Ciências Naturais e Biotecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité, 2020.

RESUMO

A presente pesquisa teve como objetivo descrever e otimizar os processos de secagem de sementes de jaca com a presença e ausência do endocarpo e analisar a influência da temperatura e a presença do endocarpo sobre os parâmetros e as propriedades físico-químicas das amostras. Para a realização do experimento, as sementes de jaca com e sem endocarpo foram dispostas em cestos vazados e tiveram a massa aferida antes, durante e após a secagem (60°C e 70°C) em horários previamente estipulados, até atingir o teor de umidade de equilíbrio. Concomitante a isso, foram aferidas as medidas do comprimento, espessura e largura das sementes de jaca sem endocarpo para determinação do encolhimento. Para a descrição da cinética de secagem foram utilizados modelos empíricos e difusivos considerando o caso de um cilindro finito. Também realizou-se a otimização do tempo de secagem das sementes. Por meio dos dados obtidos na descrição da cinética de secagem e otimização do tempo de secagem, realizou-se a secagem e elaboração da farinha de sementes e endocarpos de jaca com posterior análise físico-química. De acordo com os resultados obtidos, foi observado que a modelagem empírica descrita pelo modelo de Silva et alii descreveu de forma satisfatória os dados experimentais. A presença do endocarpo apresentou influência significativa no aumento do tempo de secagem das sementes. A difusividade efetiva de água calculada por meio da solução analítica e numérica teve seu aumento influenciado pela elevação da temperatura de secagem. As sementes com endocarpo apresentaram resistência superficial e interna verificada por meio do coeficiente de transferência convectiva de massa e pela redução do número de Biot. O encolhimento das amostras se intensificou com o aumento da temperatura. A solução numérica descreveu satisfatoriamente os dados experimentais quando comparada a analítica. A economia de energia gerada por meio das otimizações do tempo de secagem foram de 7h30min para a SJCE a 60°C e 15h45min para a amostra SJCE a 70°C. Quanto as análises físico-químicas, obteve-se farinhas com um ótimo teor proteico e baixo teor de gorduras. A umidade e A_w das FESJ estavam de acordo com o preconizado. Entretanto, o conteúdo de umidade, A_w , pH e acidez de algumas amostras de FSJ não apresentaram conformidade com as normas vigentes.

Palavra-chaves: Secagem convectiva; Modelos difusivos; Modelos empíricos; Soluções analíticas; Soluções numéricas; Resíduos orgânicos; Aproveitamento integral dos alimentos.

OLIVEIRA, T. **Description of the drying kinetics of jackfruit seeds (*Artocarpus heterophyllus Lam.*) and physical-chemical analysis of seeds and endocarps.** 2020. Dissertation (Master in Natural Sciences and Biotechnology) - Postgraduate Program in Natural Sciences and Biotechnology, Federal University of Campina Grande, Cuité, 2020.

ABSTRACT

The present research aimed to describe and optimize the drying processes of jackfruit seeds with the presence and absence of the endocarp and to analyze the influence of temperature and the presence of the endocarp on the parameters and physical-chemical properties of the samples. For the experiment to be carried out, the jackfruit seeds with and without endocarp were placed in hollow baskets and had their mass measured before, during and after drying (60 °C and 70 °C) at previously stipulated times, until reaching the equilibrium moisture content. Concomitant to this, the length, thickness and width of jackfruit seeds without endocarp were measured in order to determine the shrinkage. For the description of drying kinetics, empirical and diffusive models were used considering the case of a finite cylinder. The time of seed drying was also optimized. Through the data obtained in the description of drying kinetics and optimization of drying time, drying and preparation of jackfruit seeds and endocarps was carried out with subsequent physical-chemical analysis. According to the results obtained, it was observed that the empirical modeling described by the Silva et alii model described the experimental data satisfactorily. The presence of the endocarp had a significant influence on increasing the drying time of the seeds. The effective water diffusivity calculated by means of the analytical and numerical solution had its increase influenced by the elevation of the drying temperature. The seeds with endocarp showed superficial and internal resistance verified through the convective mass transfer coefficient and by reducing the Biot number. The shrinkage of the samples intensified with increasing temperature. The numerical solution described the experimental data satisfactorily when compared to the analytical one. The energy savings through the drying time optimizations were 7.5 hours for the SJCE at 60°C and 15.75 hours for the SJCE sample at 70°C. As for the physical-chemical analyzes, flours with an excellent protein content and low fat content were obtained. The moisture content and A_w of the FESJ were in line with the recommended. However, the moisture content, A_w , pH and acidity of some samples of FSJ analyzed did not comply with current regulations.

Keywords: Convective drying; Diffusive model; Empirical models; Analytical solutions; Numerical solutions; Organic waste; Full use of food.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Representação dos componentes que formam a estrutura interna da jaca.....	27
Figura 2. 2 - Dados gerais do levantamento nos bancos de dados das tecnologias registradas sobre a utilização de sementes de jaca.....	33
Figura 2. 3 - Evolução anual dos registros de patentes sobre a utilização da semente de jaca.....	34
Figura 2. 4 - Relação entre o número de patentes depositadas e o país de concessão.....	34
Figura 2. 5 - Panorama dos tipos de titulares detentores da concessão das patentes.....	35
Figura 2. 6 - Tipos de ocorrência de utilização das patentes concedidas.....	35
Figura 2. 7 - Quantidade de registros de patentes de acordo com a área de concentração de pesquisa.....	36
Figura 2. 8 - Relação entre o número de patentes concedida e o código de Classificação Internacional de Patentes (CIP).....	36
Figura 2. 9 - Sistema de coordenadas do cilindro finito.....	46
Figura 3. 1 - Representação das jacas utilizadas para a realização dos experimentos.	51
Figura 3. 2 - Sementes de jaca com endocarpo utilizadas no processo de secagem.....	52
Figura 3. 3 - Fluxograma das etapas de preparo das amostras de sementes de jaca com endocarpo.....	52
Figura 3. 4 - Procedimento de retirada do endocarpo das sementes: (a) retirada das sementes de jaca; (b) Imersão das sementes em água por 1 minuto; (c) retirada das sementes da água quente; (d) extração do endocarpo; (e) semente sem endocarpo.....	53
Figura 3. 5 - Fluxograma das etapas de preparo das amostras das sementes de jaca sem endocarpo.....	54
Figura 3. 6 - Procedimentos realizados durante a secagem convectiva de sementes de jaca: (a) Cestos utilizados para mensuração da massa das amostras; (b) Cestos utilizados para mensuração das medidas de comprimento, espessura e largura das amostras; (c) Paquímetro.	55
Figura 3. 7 - Interface gráfica do <i>Software</i> Analitical.....	59
Figura 3. 8 - (a) Interseção de um cilindro infinito e de parede infinita; (b) Cilindro finito de raio R e comprimento C.....	60

Figura 3. 9 - Interface gráfica do <i>Software</i> Cilindro Finito.....	64
Figura 3.10 - Retângulo obtido com as hipóteses de simetria.....	65
Figura 3.11 - Malha bidimensional para o caso do cilindro finito.....	66
Figura 3. 12 - Volume de controle para geometria cilíndrica.....	66
Figura 3. 13 - Tipos de volumes de controle da malha bidimensional.....	67
Figura 3. 14 - Fluxograma de elaboração das farinhas de sementes de jaca com e sem endocarpo submetidas à secagem.....	69
Figura 3. 15 - Endocarpos e películas úmidas retiradas das sementes de jaca.....	70
Figura 3. 16 - Fluxograma de obtenção da farinha do endocarpo das sementes de jaca.....	71
Figura 3. 17 - Representação do endocarpo e da película interna da semente de jaca.....	71
Figura 4. 1 - Curvas do ajuste do modelo de Silva et alii aos dados experimentais do teor de umidade adimensional em função do tempo em minutos gerados por meio do software LABFit: (a) SJCE 60°C ; (b) SJSE 60°C; (c) SJCE 70°C; (d) SJSE 70°C.....	77
Figura 4. 2 - Curvas de simulações da cinética de secagem em função da umidade adimensional das sementes de jaca com e sem endocarpo submetidas a temperaturas de 60°C e 70°C obtidas por meio do modelo de Silva et alii.....	78
Figura 4. 3 - Curvas da taxa de secagem das sementes de jaca em base seca das amostras sem endocarpo obtida através do modelo de Silva et alii: (a) 60°C e 70°C com endocarpo; (b) 60°C e 70°C sem endocarpo.....	79
Figura 4. 4 - Gráficos da cinética de secagem de sementes de jaca por meio da solução analítica nas condições experimentais de: a) 60°C com endocarpo; b) 60°C sem endocarpo; c) 70°C com endocarpo e d) 70°C sem endocarpo.	852
Figura 4. 5 - Representação da semente de jaca utilizada para a análise da distribuição do teor de umidade para determinados intervalos de tempo.....	85
Figura 4. 6 - Distribuição da água no interior do cilindro nos tempos de (a) $t = 30.72$ min; (b) $t = 120$ min e (c) $t = 330.20$ min.....	86
Figura 4. 7 - Distribuição da água no interior do cilindro nos tempos de (a) $t = 30.36$ min; (b) $t = 120.1$ min e (c) $t = 330$ min.....	87
Figura 4. 8 - Distribuição da água no interior do cilindro nos tempos de (a) $t = 30.40$ min; (b) $t = 120.70$ min e (c) $t = 330.60$ min.....	85

Figura 4. 9 - Distribuição da água no interior do cilindro nos tempos de (a) $t = 30.24$ min; (b) $t = 120.20$ min e (c) $t = 330.50$ min.....	88
Figura 4. 10 - Gráficos dos ajustes das sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 60°C obtidos pelo Software Lab Fit para o raio e comprimento adimensionais em função do teor de umidade adimensional médio: (a) Comprimento das SJSE 60°C ; (b) Raio das SJSE 60°C	93
Figura 4. 11 - Gráficos dos ajustes das sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 70°C obtidos pelo Software Lab Fit para o raio e comprimento adimensionais em função do teor de umidade adimensional médio: (a) Comprimento das SJSE 70°C ; (b) Raio das SJSE 70°C	94
Figura 4. 12 - Encolhimento das amostras: (a) SJSE no $t=0$ a 60°C ; (b) SJSE no tempo final a 60°C ; (c) SJSE no $t=0$ a 70°C ; (d) SJSE no tempo final a 70°C	94
Figura 4. 13 - Cinética de secagem de sementes de jaca obtidas por meio da solução numérica: (a) 60°C sem endocarpo e (b) 70°C sem endocarpo.....	96
Figura 4. 14 - Difusividade efetiva de água em função do teor de umidade analisada para as amostras de SJSE submetidas a 60°C e 70°C	97
Figura 4. 15 - Farinhas de sementes de jaca com endocarpo: (a) FSJCE in natura; (b) FSJCE 60°C por 1470 min (24h30min); (c) FSJCE 60°C por 1920 min (32h); (d) FSJCE 70°C por 1155min (19h25min); (e) FSJCE 70°C por 2100 min (35h).....	102
Figura 4. 16 - Farinhas de sementes de jaca sem endocarpo: (a) FSJSE in natura; (b) FSJSE 60°C por 11h; (c) FSJSE 70°C por 12h.....	101
Figura 4. 17 - Farinhas de endocarpo de sementes de jaca: (a) FSE in natura; (b) FSE a 60°C por 1470 min (24h30min); (c) FSE 60°C por 1920 min (32h); (d) FSE a 70°C por 925 min (15h25min); (e) FSE a 70°C por 2100 min (35h).....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 4. 1 - Dados experimentais de temperatura, teor de umidade inicial e de equilíbrio e tempo de secagem das sementes de jaca com e sem endocarpo.....	77
Tabela 4. 2 - Resultados das simulações das cinéticas de secagem descritas por expressões empíricas por meio do Software LABFit.	78
Tabela 4. 3 - Resultado da secagem de sementes de jaca utilizando solução analítica para a equação de difusão.....	83
Tabela 4. 4 - Dados experimentais do teor de umidade inicial, teor de umidade de equilíbrio, raio inicial e comprimento inicial.....	89
Tabela 4. 5 - Valores do raio e comprimento para secagem de sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 60°C.	90
Tabela 4. 6 - Valores do raio e comprimento para secagem de sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 70°C.	91
Tabela 4. 7 - Valores percentuais do raio e comprimento finais em relação ao início do processo de secagem de sementes de jaca.	91
Tabela 3. 8 - Resultados obtidos na otimização dos dados por meio da solução numérica. ...	95
Tabela 4. 9 - Redução dos tempos de secagem das sementes de jaca submetidas a intervenção do tempo ótimo.....	100
Tabela 4. 10 - Análises físico-químicas das farinhas de sementes de jaca com endocarpo e farinhas de sementes de jaca sem endocarpo.....	108
Tabela 4. 11 - Análises físico-químicas de endocarpos de sementes de jaca.	109

LISTA DE QUADROS

Quadro 2. 1 - Análises físico-químicas de sementes de jaca com endocarpo realizada por diversos autores.	30
Quadro 2. 2 - Modelos empíricos utilizados na descrição da secagem de produtos agrícolas.	43
Quadro 3. 1 - Médias e desvio padrão da massa e das medidas de comprimento, espessura e largura iniciais das sementes utilizadas na secagem convectiva.	54
Quadro 3. 2 - Expressões empíricas utilizadas para descrever a cinética de secagem.....	57
Quadro 3. 3 - Tempo de secagem das sementes para elaboração da farinha de sementes de jaca.	68

LISTA DE SÍMBOLOS

a, b - Parâmetros de ajuste dos modelos empíricos

An1, Am2- Coeficientes da solução analítica unidimensional para o valor médio da grandeza de interesse.

A_w - Atividade de Água

Bi - Número de Biot de transferência de massa

Bn1, Bm2 - Coeficientes da solução analítica bidimensional para o valor médio da grandeza de interesse

b.u. - Teor de umidade em base úmida

b.s. - Teor de umidade em base Seca

mL - Mililitros

M - Mol

min - Tempo em minutos

µg - Micrograma

mg - Miligramas

m²min⁻¹ - Metros por minutos

D - Coeficiente de difusão líquida, $m^2.s^{-1}$

D₀ - Fator de Arrhenius (m^2/s)

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

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

E, W, N, S - Pontos nodais

E_a - Energia de ativação (J/mol)

g - Gramas

h_w - Coeficiente de transferência convectiva de massa (m^2min^{-1})

k, k₀ e k₁ – Constantes de secagem em min^{-1}

L₀(mm) - Comprimento inicial do cilindro em milímetros

L - Valor do Comprimento Final

L(\bar{X}^)* - Representa o comprimento em função do teor de umidade adimensional médio no tempo *t*.

M_{bs} - Teor de umidade em base seca

M_{bu} - Teor de umidade em base úmida

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

PI - Parte Interna, relacionada com a película da semente de jaca

PE - Parte Externa, relacionada com o endocarpo da semente de jaca

$R(\bar{X}^*)$ - Representa o raio em função do teor de umidade adimensional médio no tempo t .

R - Constante universal dos gases (8,1314 J/mol K);

$R_0(mm)$ - Raio inicial do cilindro em milímetros

R - Valor do Raio Final

R^2 - Coeficiente de determinação

RU - Razão de umidade do produto, adimensional;

$R(\bar{X}^*)$ - Representa o raio em função do teor de umidade adimensional médio no tempo t .

T (°C) - Temperatura medida em Grau Celsius

T - Temperatura absoluta (K).

t (min) - Tempo em minutos

U* - Teor de água do produto, decimal (b.s.)

\bar{X}_1 (b. u.) - Teor de umidade inicial em base úmida

X_i (bs) - Teor de umidade inicial em base seca

X_{eq} (bs) - Teor de umidade de equilíbrio em base seca

x - Distância em relação a um ponto de referência no corpo, m

χ^2 - Qui-quadrado

v^{\rightarrow} - Vetor velocidade do meio

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AOAC** - Official Methods of Analysis
- ANOVA** - Análise de Variância
- CES** - Centro de Educação e Saúde
- CIP** - Classificação Internacional de Patentes
- DTA** - Doenças Transmitidas por Alimentos
- EPO** - Espacenet, European Patent Register
- FSJ** - Farinha de Semente de Jaca
- FSJCE** - Farinha de Semente de Jaca com Endocarpo
- FSJSE** - Farinha de Semente de Jaca sem Endocarpo
- FESJ** - Farinha de Endocarpo de Semente de jaca
- HIV** - Vírus da Imunodeficiência Humana
- INPI** - Instituto Nacional de Propriedade Industrial
- LATED** - Laboratório de Técnica Dietética
- LTA** - Laboratório de Tecnologia de Alimentos
- LABROM** - Laboratório de Bromatologia
- MDF** - Método das Diferenças Finitas
- MEF** - Método dos Elementos Finitos
- MVF** - Método dos Volumes Finitos
- PIBIC** - Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica
- PPM** - Partículas por Milhão
- pH** - Potencial Hidrogeniônico
- RDC** - Resolução da Diretoria Colegiada
- RMF** - Determinação de Cinzas ou Resíduo Mineral Fixo
- SJCE 60°C** - Sementes de Jaca com Endocarpo submetidos a 60°C
- SJSE 60°C** - Sementes de Jaca sem Endocarpo submetidos a 60°C
- SJCE 70°C** - Sementes de Saca com Endocarpo submetidos a 70°C
- SJSE 70°C** - Sementes de Jaca sem Endocarpo submetidas a 70°C
- SJCE *In natura*** - Semente de Jaca com Endocarpo *In natura*
- SJSE *In natura*** - Semente de Jaca sem Endocarpo *In natura*
- UFMG** - Universidade Federal de Campina Grande
- WIPO** - World Intellectual Property Organization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 JUSTIFICATIVA	23
1.2 OBJETIVO GERAL.....	24
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 PRODUÇÃO E IMPORTÂNCIA NUTRICIONAL DA JACA.....	26
2.1.1 Sementes de jaca utilizada como matéria-prima para desenvolvimento de farinha: obtenção, aplicação e teor nutricional	29
2.1.2 Prospecção tecnológica da utilização de sementes de jaca	33
2.2 PROCESSAMENTO TÉRMICO: SECAGEM	37
2.2.1 Fenômeno da secagem	38
2.2.1.1 Períodos da secagem.....	39
2.2.2 Teor de Umidade	40
2.2.3 Teorias da secagem	41
2.3 SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DA SECAGEM DE ALIMENTOS	42
2.3.1 Descrição da secagem por modelos empíricos	42
2.3.2 Descrição da secagem por modelos difusivos	44
2.3.2.1 Geometrias: cilindro finito	46
2.3.2.2 Tipos de condições de contorno	47
2.3.2.3 Solução analítica para a equação de difusão	47
2.3.2.4 Solução numérica para a equação de difusão	49
3 METODOLOGIA	51
3.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA	51
3.2 OBTENÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	51
3.3 PREPARO DAS AMOSTRAS	51
3.3.1 Procedimento para obtenção das sementes com endocarpo	51
3.3.2 Procedimento para obtenção das sementes sem endocarpo	53
3.4 SECAGEM CONVECTIVA	54

3. 5 MODELAGEM MATEMÁTICA	56
3. 5. 1 Descrição da cinética de secagem por meio de modelos empíricos	57
3.5.2 Modelos Difusivos	58
<i>3.5.2.1 Solução Analítica para a equação de difusão</i>	<i>58</i>
3.5.2.1.1 Hipóteses para a obtenção da solução analítica para a equação de difusão	59
4.5.2.1.2 Solução analítica da equação de difusão para a geometria cilíndrica.....	60
<i>3.5.2.2 Solução numérica para a equação de difusão</i>	<i>64</i>
3. 5. 2. 2. 1 Solução numérica para o caso do Cilindro Finito.....	65
3.6 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM POR MEIO DE INTERVENÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA	67
3.7 PROCESSO DE ELABORAÇÃO DAS FARINHAS	68
3.7.1 Elaboração das Farinhas de Sementes de Jaca.....	68
3.7.2 Elaboração das Farinhas do Endocarpo da Semente de Jaca	70
3. 8 DETERMINAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	71
3.8.1 Determinação de umidade	71
3.8.2 Determinação de Cinzas ou Resíduo Mineral Fixo (RMF)	72
3.8.3 Determinação de acidez	73
3.8.4 Determinação de pH.....	74
3.8.5 Determinação de lipídios.....	74
3.8.6 Determinação do teor de proteínas	75
3.8.7 Determinação de carboidratos	76
3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	76
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1 DADOS EXPERIMENTAIS DA SECAGEM.....	77
4.2 MODELOS EMPÍRICOS USADOS NA MODELAGEM DOS DADOS EXPERIMENTAIS	77
4.2.1 Dados do melhor ajuste dos modelos empíricos aos dados experimentais.....	77
<i>4.2.1.1 Cinética de secagem</i>	<i>80</i>
<i>4.2.1.2 Dados da taxa de secagem por meio de modelos empíricos</i>	<i>81</i>
<i>4.2.1.2.1 Taxa de secagem.....</i>	<i>81</i>
4.3 OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO POR MEIO DA SOLUÇÃO ANALÍTICA	83

4.2.2 Distribuição do teor de umidade no interior do cilindro	85
4.2.2.1 Amostras de sementes submetidas a 60°C com endocarpo	85
4.3.1.2 Amostras de sementes submetidas a 60°C sem endocarpo	86
4.3.1.3 Amostras de sementes submetidas a 70°C com endocarpo	87
4.3.1.4 Amostras de sementes submetidas a 70°C sem endocarpo	88
4.4 OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO UTILIZANDO A SOLUÇÃO NUMÉRICA	89
4.4.1 Dados Experimentais	89
4.4.2 Variações das dimensões dos cilindros de sementes de jaca durante a secagem	89
4.4.3 Otimização e Simulação: Cinética de secagem e difusividade efetiva de água	95
4.4.3.1 Otimização e cinética de secagem	95
4.4.3.2 Difusividade efetiva de água	96
4.5 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM POR MEIO DE INTERVENÇÃO UTILIZANDO MODELAGEM MATEMÁTICA	97
4.5.1 Adimensionalizações das amostras	98
4.5.1.1 Sementes de jaca com endocarpo submetidas a 60°C	98
4.5.1.2 Sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 60°C	98
4.5.1.4 Sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 70°C	98
4.5.2 Cálculos dos tempos ótimos de intervenção	99
4.5.2.1 Sementes de jaca com endocarpo submetidas a 60°C	99
4.5.2.2 Sementes de jaca com endocarpo submetidas a 70°C	99
4.6 FARINHA DE SEMENTES DE JACA E FARINHA DE ENDOCARPO E ANÁLISE FÍSICA E FÍSICO-QUÍMICA	101
4.6.1 Farinha de sementes de jaca com endocarpo	101
4.6.2 Farinha de sementes de jaca sem endocarpo	102
4.6.3 Farinha de endocarpos de sementes de jaca	103
4.6.4 Análises físico-químicas das farinhas elaboradas	104
5 CONCLUSÃO	111
REFERÊNCIAS	113

1 INTRODUÇÃO

A jaca é uma fruta oriunda da jaqueira (*Artocarpus heterophyllus Lam.*) pertencente à família *Moraceae* originária do continente asiático, especificamente da Índia, mas apresenta-se amplamente cultivável e distribuída em países de climas tropicais e subtropicais, tais como a Tailândia, Indonésia, Filipinas, Malásia, Bangladesh e Brasil sendo a região nordeste a maior produtora do país (SOUZA et al., 2015; ULLOA et al., 2017).

As jacas são compostas de bagas amareladas com sabor adocicado e aroma acentuado, além de sementes envoltas em películas resistentes (ULLOA et al., 2017). A polpa *in natura* é constituída principalmente de carboidratos (13% a 25%), proteínas (0,6 a 15%), lipídios (<1%), fibras, vitaminas A, C, B₁, B₂ e B₃ e minerais como cálcio, potássio, ferro, sódio e zinco por isso seu uso possui efeito tanto na prevenção quanto na promoção da saúde, além de ser utilizado na indústria apresentando grande potencial econômico e tecnológico (SWAMI; KALSE, 2018; ESPARZA et al., 2018).

Entretanto, o alto teor de umidade presente na jaca *in natura* (70%-80%) é um impasse para a sua comercialização, impactando no aumento das perdas dos bulbos e sementes que representam cerca de 30% a 35% e 8% a 15%, respectivamente, do peso total da fruta, sendo 70% desse classificado como resíduo (OLIVEIRA; GODOY; BORGES, 2011; ULLOA et al., 2017; ESPARZA et al., 2018).

No Brasil, cerca de 60% do resíduo gerado são oriundos de alimentos, sendo as frutas as que mais sofrem desperdícios. A utilização integral dos alimentos surge como alternativa viável para a mudança desse cenário, através da inserção das partes geralmente não utilizadas na alimentação, como por exemplo, folhas, talos e sementes nas preparações diárias promovem dentre outros benefícios tanto a redução dos resíduos sólidos quanto o aumento do valor nutricional das refeições (STORCK et al., 2013).

Nessa perspectiva, as sementes de jacas possuem alto potencial tecnológico e nutritivo fornecendo grandes quantidades de amido, proteínas, fibras, potássio, cálcio e sódio possibilitando a geração de subprodutos altamente nutritivos, além de apresentar versatilidade no modo de preparo podendo ser consumidas cozidas em água ou açúcar, assadas ou processadas para a utilização em lanches como sobremesa ou ingredientes em preparações culinárias (TULYATHAN et al., 2002; SWAMI; KALSE, 2018; MADRUGA et al., 2014; SPADA et al., 2018).

No entanto, por causa de sua instabilidade microbiológica o processamento dessas sementes para obtenção de farinha tem sido utilizado como alternativa de conservação e

aplicação na elaboração de vários subprodutos empregados em diversos setores industriais, desde a alimentícia tais como incremento na formulação de bolo de chocolate, capuccino, bolinha de queijo, biscoitos amanteigados, pães e quibes até a produção de biopolímeros e isolamento de biomoléculas de proteínas (TULYATHAN et al., 2002; ARPIT; JOHN, 2015; ISLAM et al., 2015; DAVID et al., 2016; ULLOA et al., 2017; LOTHFY et al., 2018; SPADA et al., 2018).

A desidratação é o método mais antigo de conservação de alimentos e o mais utilizado para a obtenção de farinha de sementes de jaca. Através desse é possível reduzir o teor de umidade e promover a estabilidade por meio do aumento da vida útil do produto o que facilitará as operações de armazenamento e transporte, além agregar valor as sementes tornando-as um produto nobre (GAN; POH, 2014).

Apesar do seu potencial tecnológico, ainda não existe uma metodologia padronizada da técnica de desidratação empregada no processo de obtenção da farinha de sementes de jaca. Apesar disso, a farinha é uma ótima opção de incremento nas preparações devido ao seu teor nutricional constituído de 78% de carboidratos, 11,2% de proteínas e lipídios (0,99%) (TULYATHAN et al., 2002).

No entanto, além das perdas nutricionais e sensoriais que podem ser minimizadas com o emprego de pré-tratamentos, essa técnica detém muito custo financeiro as indústrias. Portanto, a descrição da cinética de secagem por meio da simulação de dados por modelagem matemática é utilizada como alternativa para a otimização adequada do processo com o intuito de prever as variáveis ótimas de tempo, temperatura e tipos de secadores, visando à redução de custos e perdas e a obtenção de um produto seco de melhor qualidade (GAN; POH, 2014).

1.1 JUSTIFICATIVA

O aproveitamento dos resíduos, em especial as sementes de jaca desidratadas são uma alternativa para a redução dos desperdícios e quando inserido na alimentação proporciona o enriquecimento das preparações e subprodutos gerados (STORCK et al., 2013). Entretanto, a produção da farinha de sementes de jaca por meio da desidratação é um processo muito oneroso para indústria, pois gera um enorme dispêndio de energia (FERNANDES et al., 2006).

Com base no pressuposto, foi feito um levantamento de pesquisas sobre a descrição da cinética de secagem de sementes de jaca com e sem endocarpo e a metodologia padrão para a

elaboração de farinha a partir dessa matéria-prima, porém, foi constatado a escassez de estudos com tais designações. As pesquisas encontradas estavam relacionadas à secagem para a extração de amido ou biomoléculas e a obtenção de farinha com aplicação em subprodutos alimentícios, ou aplicação biotecnológica (DUTTA et al., 2011; NAYAK; PAL, 2013; MADRUGA et al., 2014; DESHMUKH, 2014; LYU et al., 2015).

Portanto, devido à falta de informações precisas de pesquisas que abordem o tema e a inexistência de uma metodologia padrão para o desenvolvimento da secagem das sementes e endocarpo de jaca e processamento de farinha, a realização desta pesquisa pautou-se da importância de disponibilizar informações científicas sobre a descrição da cinética de secagem de sementes de jaca com e sem endocarpo, análise físico-química da semente e endocarpo de semente de jaca e otimização do referido processo objetivando a redução dos gastos energéticos do processamento em escala industrial, diminuição das perdas das propriedades do alimento e obtenção de um produto final de qualidade.

1.2 OBJETIVO GERAL

Descrever e otimizar processos de secagem de sementes de jaca com e sem endocarpo e analisar a influência da temperatura e a presença do endocarpo sobre os parâmetros e propriedades físico-químicas das amostras.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a secagem de sementes de jaca com endocarpo e sem endocarpo submetidas às temperaturas de 60°C e 70°C;
- Realizar a secagem dos endocarpos das sementes de jaca submetidas às temperaturas de 60°C e 70°C;
- Utilizar os dados experimentais obtidos no processo de secagem para determinar o melhor ajuste para os dados experimentais, a cinética de secagem e as taxas através de modelos empíricos;

- Realizar otimizações considerando os dados obtidos nos experimentos;
- Aplicar modelos difusivos para a geometria de cilindro finito tendo em vista analisar as melhores expressões para a difusividade efetiva de água em função do teor de umidade local e obter os coeficientes de transferência convectiva de massa;
- Utilizar os parâmetros termo-físicos obtidos no processo de otimização para simular e analisar os processos de secagem;
- Verificar a influência da temperatura de secagem nos parâmetros termo-físicos e sobre a variação da espessura das sementes;
- Estabelecer um teor de umidade das sementes em base úmida e otimizar o tempo de secagem com posterior processamento da farinha e análise físico-química;
- Determinar a composição físico-química das amostras de farinha de sementes e do endocarpo de sementes de jaca.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUÇÃO E IMPORTÂNCIA NUTRICIONAL DA JACA

O setor da agricultura, especificamente a fruticultura é um dos mais importantes no Brasil, tanto em termos econômicos quanto em fatores sociais, culturais e de segurança alimentar, pois é através desses alimentos que provém a maior parte dos nutrientes necessários para a ingestão humana, principalmente as vitaminas e minerais (BASTOS; OLIVEIRA; FEITOSA, 1998; LEMOS et al., 2012).

A jaca como popularmente é conhecida no Brasil, é um fruto produzido pela jaqueira (*Artocarpus heterophyllus Lam.*) oriunda da família *Moraceae*. A palavra jaca foi derivada de uma língua regional da Índia (malaiala), ao qual se chamava Chakka (BALIGA et al., 2011). A árvore é nativa da Índia, mas sua produção encontra-se amplamente distribuída em países tropicais e subtropicais, como Bangladesh, Filipinas, Indonésia, Tailândia, Malásia, Austrália, Porto Rico, algumas ilhas do Pacífico e Brasil, especificamente na Amazônia e na costa tropical indo do estado do Pará ao Rio de Janeiro (PRAKASH et al., 2009; LEMOS et al., 2012; SWAMI; KALSE, 2018).

De acordo com o senso agropecuário de 2006 obtido através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, as áreas de plantações da lavoura permanente de jaca nos estabelecimentos agropecuários com mais de 50 pés existentes são de 1.147 a nível nacional (Brasil), sendo que 37 desses estão localizados no estado da Paraíba (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2006).

A jaqueira é uma árvore de porte médio e atinge cerca de 10 a 25 metros de altura, possui o tronco reto, cilíndrico, áspero e bastante ramificado (FALCÃO et al., 2001). Seu cultivo normalmente ocorre em florestas verdes e quentes com altitudes de 450 a 1200 metros (PRAKASH et al., 2009).

A jaca é uma fruta sazonal, ou seja, sua produção não ocorre durante todo o ano. No Brasil, especificamente no estado do Nordeste, a fruta *in natura* é consumida somente durante os meses de janeiro a abril (período de safra) (DUARTE et al., 2012).

A jaca é gerada tanto nos galhos principais quanto nos galhos localizados nas margens laterais da árvore. O fruto pode pesar até no máximo 25 kg, porém comumente o peso médio encontrado é de 3,5 a 10 Kg. Desse, a maior parte é composta de cascas verde ou amarronzada (54%), sementes (12%) e somente 29% de polpa (SWAMI; KALSE, 2018). O consumo da

polpa geralmente ocorre *in natura* ou processada como doces ou geleias. Outro ponto importante a se destacar é a presença de canais exsudativos de látex, no eixo central, necessário para manter os bulbos aderidos ao núcleo da fruta (PRAKASH et al., 2009; BALIGA et al., 2011).

As sementes da jaca são envolvidas pela polpa (bulbos) que se caracterizam por serem doces, macios ou duros (dependendo da variedade “mole” ou “dura”) fibrosos e com coloração que varia de tons de amarelo escuro a claro; outra característica bastante presente é o cheiro forte e característico da fruta (FALCÃO et al., 2001). A representação da estrutura interna da jaca está designada na Figura 2.1.

Na Figura 2.1 é mostrado a composição estrutural da jaca.

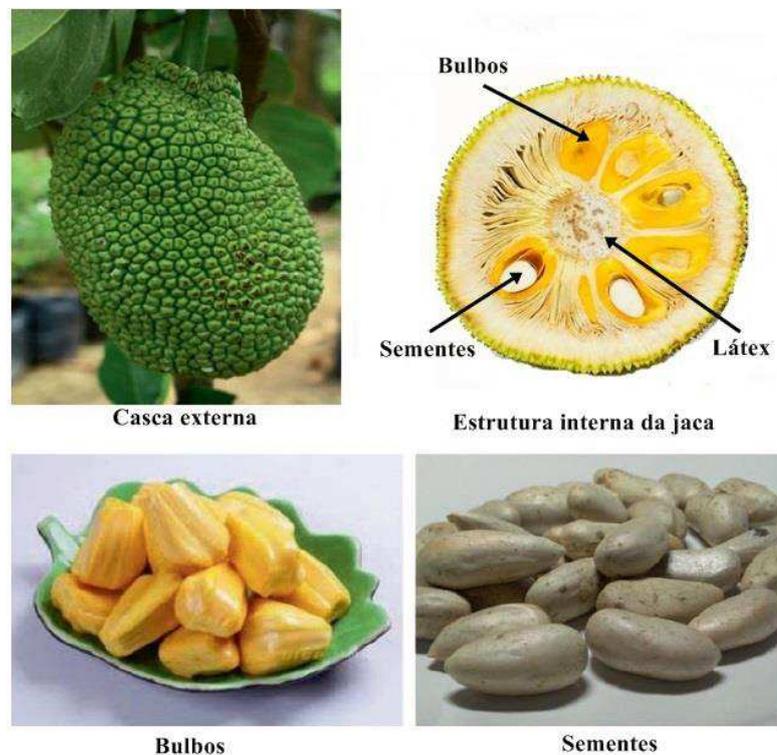


Figura 2. 1 - Representação dos componentes que formam a estrutura interna da jaca.

Fonte: Imagem adaptada de (MUNDO ECOLOGIA, 2020; SWAMI; KALSE, 2018).

Quanto à qualidade nutricional e seus efeitos na saúde humana, Baliga et al. (2011) após a revisão de vários estudos concluíram que a polpa da jaca possui propriedades funcionais que atuam como antioxidante, antiinflamatório, antineoplásico e também como hipoglicêmico. Esses benefícios são oriundos da sua rica composição físico-química composta por teores significativos de proteínas (1,72g/100g), carboidratos (23g/100g), cálcio (24mg/100g), potássio

(448mg/100g) e fibra alimentar (1,5g/100g) (DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS, 2016).

Lemos et al. (2012) estudaram a composição físico-química e química da jaca “mole” e “dura” avaliando-as em dois estágios de maturação, porém em três tratamentos, aos quais foram designados como jaca dura (verde), jaca dura (madura) e jaca mole (madura). Ao final do estudo concluíram que a jaca dura verde apresentou os maiores teores de pH e acidez, fato que possivelmente se relaciona a quantidade de ácido presente na fruta verde. Por outro lado, o teor de umidade foi menor na variedade citada, isso aumenta o prolongamento do armazenamento do produto devido à redução da carga de micro-organismos deteriorante presentes na fruta. Os teores de açúcares analisados foram maiores nas jacas maduras, devido a conversão de ácidos em açúcar incidindo no aumento da quantidade de açúcares simples de acordo com o prolongamento do estágio de maturação. Já os teores de cinzas (0,80%) e ferro (0,40 mg) foram maiores para jaca mole madura, e o fósforo (28,66 mg) e cálcio (51,11 mg) apresentaram maior quantidades para jaca dura no mesmo estágio de maturação. Por fim, os autores afirmam que as discrepâncias no teor nutricional apresentadas no estudo estão relacionadas a diversos fatores como diferenças geográficas da região de cultivo e ao estágio de maturação, não apresentando significância a variedade da fruta.

Basso (2017) também estudou a jaca da variação mole e dura quanto a sua composição química e tipo de processamento, desidratada, *in natura* e liofilizada, porém, para na presente discussão serão relatados apenas os dados das amostras de polpa de jaca *in natura*. Após a realização das análises na jaca *in natura* foi possível observar que os maiores teores de cálcio (36mg) e zinco (0,49mg) foram encontrados na jaca dura, já o potássio (472 mg) e sódio (6,6 mg) apresentaram maiores quantidades na jaca mole. Entretanto, para o magnésio não foram encontradas diferenças significativas entre as amostras.

Apesar de seus efeitos benéficos a saúde relatados por meio dos estudos citados, o tempo de conservação da jaca *in natura* é bastante limitado devido a sua perecibilidade, ou seja, o teor de umidade presente é muito alto possibilitando a proliferação de micro-organismos deteriorantes e incidindo nas perdas do produto. Sendo assim, alternativas viáveis, como o emprego da secagem são estudadas para aumentar tanto a conservação quanto a preservação dos nutrientes com o objetivo de diminuir as perdas, os impactos econômicos e gerar um produto final de qualidade (OLIVEIRA; GODOY; BORGES, 2011).

2.1.1 Sementes de jaca utilizada como matéria-prima para desenvolvimento de farinha: obtenção, aplicação e teor nutricional

Os resíduos orgânicos gerados através do processamento de alimentos é um dos problemas recorrentes no Brasil. Dentre esses, encontra-se as cascas e sementes de jaca. Especificamente as sementes de jaca, constituem de 15 a 25% do fruto, cuja quantidade pode chegar de 100 a 500 unidades em cada jaca (SILVA et al., 2007; SANTOS et al., 2013).

Quanto a sua caracterização morfológica, as sementes possuem cor marrom com formato arredondado medindo em média de 2 a 3 cm de comprimento e 1 a 1,5 cm de diâmetro, envoltas por uma casca esbranquiçada (PRAKASH et al., 2009).

Constatou-se que as sementes de jaca são bastante versáteis quanto a sua utilização, sendo que a maior produção científica se dá através do processamento das sementes para extração de amido empregado em diversos ramos da biotecnologia. Também foram empregadas tecnologias para a produção de enzimas (endoglucanase), isolamento de macromoléculas (proteína), obtenção de biopolímero e produção de farinha através do processamento da semente de jaca, sendo utilizada como incremento em subprodutos alimentícios, entre outros, obtidos através de métodos de secagem e procedimentos distintos (RENGSUTTHI; CHAROENREIN, 2011; PACHECO et al., 2015; ULLOA et al., 2017; LOTHFY et al., 2018; SPADA et al., 2018).

Apesar das inúmeras pesquisas acerca das propriedades nutricionais das sementes de jaca seu potencial ainda não foi totalmente explorado. Porém através dos estudos realizados descobriu-se que as sementes possuem grandes quantidades de proteínas, fibras alimentares e vitaminas do complexo B, além de apresentarem lignanas, saponinas e isoflavonas em sua composição. O amido resistente foi outro componente identificado que possui bastante relevância na saúde humana, dentre outros efeitos, atua na regulação da glicose e do intestino, além de apresentar atividades antimicrobianas atuando no combate de Doenças Transmitidas por Alimentos (DTA) (WAGHMARE et al., 2019), efeitos diuréticos e constipantes (PRAKASH et al, 2009). As sementes de jaca também possuem compostos fenólicos (2770mg/100g), responsáveis pelas atividades antioxidantes e teores de carotenóides de 1910µg/100g (AYALA-ZAVALA et al., 2011).

Madruga et al. (2014) analisou a composição química e a quantidade de amido presentes nas sementes de jaca “mole” e “dura” e obteve os teores de 7,98% e 5,56% para proteínas, 0,59% e 0,24% de lipídios e 92,8% e 94,5% de amido para as respectivas variedades. Ainda de acordo com o autor, o amido da semente de jaca é considerado melhor que os extraídos a partir

de outros tubérculos e cereais, podendo após sua transformação tecnológica ser utilizado em vários setores industriais, como por exemplo, na indústria farmacêutica e alimentícia, nessa última é empregada na fabricação de molhos e corantes alimentares, por exemplo.

No Quadro 2.1 pode ser visualizada a composição físico-química das sementes de jaca com endocarpo relatada por três pesquisadores.

Quadro 2. 1 - Análises físico-químicas de sementes de jaca com endocarpo realizada por diversos autores.

Análises	Referências	
	Madrigal-Aldana <i>et al.</i> (2011)	Ocloo <i>et al.</i> (2010)
Umidade (%)	54,06 ± 0,85	6,09 ± 0,01
Proteína (%)	21,99± 0,51	13,50± 0,06
Lipídios (%)	0,70 ± 0,01	1,27 ± 0,01
Cinzas (%)	3,14±0,22	2,70±0,02
Fibras (%)	7,32± 0,14	3,19 ± 0,01
Carboidrato (%)	ND*	79,34 ± 0,06
Energia (Kcal)	ND*	382,79 ± 1,20

*ND: não determinado. Fonte: adaptado de (MAHANTA; KALITA, 2015).

Os teores de nutrientes das sementes de jaca com endocarpo relatado pelos estudos citados no Quadro 2.1 variaram em todas as análises desenvolvidas. Tais discrepâncias podem estar relacionadas ao tipo de técnica empregada na análise, as diferenças geográficas do local de cultivo da jaca, o estado de maturação da fruta dentre outros fatores que podem incidir diretamente na determinação da composição nutricional das sementes analisadas (MAHANTA; KALITA, 2015).

Feitosa et al. (2017) analisou a composição físico-químicas de amêndoas de jaca, variedade “mole”, cozida. Para determinar a composição, as sementes foram submetidas apenas ao cozimento. Após a aplicação dos testes, foi observado que as amêndoas forneceram quantidades consideráveis de proteínas (4,75%), amido (18,92%), potássio (247,97%) e fósforo (104,80%) e os menores teores encontrados estavam relacionadas ao cálcio (68,65%), ferro (0,98%) e sódio (10,38%).

Apesar dos seus inúmeros benefícios elencados anteriormente, as sementes de jaca possuem a jacalin, principal proteína da classe lectina, encontrada na composição (50%) das sementes, sua utilidade tem sido associada ao uso na avaliação imunológica dos pacientes

infectados com o Vírus da Imunodeficiência Humana (HIV) (PRASKAS et al., 2009). Apesar de seus benefícios, as lectinas são consideradas um fator antinutricional podendo interferir na digestão e absorção de nutrientes, entre outras funções do organismo, entretanto, o emprego de tratamento térmico pode reduzir ou destruir esses efeitos (VASCONCELOS; OLIVEIRA, 2004; MADRUGA et al., 2014).

Quanto a sua utilização na alimentação humana, as sementes de jaca são bastante usadas após processadas, das mais diversas formas, sejam cozidas, torradas, assadas, ou em forma de farinha, consumidas como lanches ou como fonte de enriquecimento de preparações alimentícias (SILVA et al., 2007; SANTOS et al., 2013).

Em algumas partes da Índia, devido as sementes frescas (*in natura*) possuírem pouco tempo de validade, em torno de um mês quando mantidas em ambientes úmidos, essas são submetidas a técnicas rudimentares de conservação que consistem no processo de secagem natural, ao qual são expostas ao sol, e posteriormente armazenadas para serem consumidas no período chuvoso. Entretanto, o índice de perdas ainda é elevado devido à dificuldade de armazenamento e processamento dessas sementes (WAGHMARE et al., 2019).

De acordo com Borges, Bonilha e Mancini (2006) os produtos biológicos são altamente perecíveis por conterem grandes quantidades de água na sua composição, sendo esse um grande impasse para a sua conservação.

Porém, com o avanço da tecnologia e com o objetivo de reduzir esses riscos de perdas, como também agregar valor aos produtos gerados, a secagem artificial surge como uma das alternativas mais utilizadas para o processamento dessa matéria-prima. Entretanto, vale frisar a importância do controle das variáveis de tempo e temperatura empregadas neste processo, pois, um excesso dos dois pode acarretar perdas na composição química do produto (BORGES; BONILHA; MANCINI, 2006).

Um dos produtos gerados através do processamento das sementes por meio do método de secagem é a farinha de sementes de jaca usada no enriquecimento de preparações ou ainda como ingredientes em produtos panificáveis destinada tanto para população saudável ou portadores de restrição alimentar, como por exemplo, os celíacos que possuem alergia ao glúten (HOSSAIN, et al., 2014).

A farinha de sementes de jaca pode ser utilizada como substituto parcial de outras farinhas, como por exemplo, o trigo, pois apresenta boa capacidade de absorção de água e óleo além de apresentar alto teor de carboidratos, proteínas, fibra alimentar e minerais, tornando-se uma alternativa viável e de baixo custo para elaboração de produtos alimentícios (MAHANTA; KALITA, 2015).

Apesar de ser um produto bastante promissor para o ramo alimentício, ainda não existe um consenso entre os estudiosos que desinem uma metodologia padrão para o processo de obtenção da referida farinha. Essas divergências metodológicas podem ser observadas nos estudos citados abaixo que descrevem o processo de obtenção e aplicação da farinha de sementes de jaca de forma distinta.

Nesse contexto, Landim et al. (2015) analisaram a aceitação e as propriedades físico-químicas de quibes adicionados de farinha de sementes de jaca sem endocarpo, previamente tratadas com 0,2% de solução aquosa de bissulfito de sódio. O processo empregado para a obtenção da farinha foi segmentado em duas etapas de secagem, que consistiu em secagem das sementes em estufa a 70 °C por 1h com posterior trituração e obtenção da farinha, e submissão da mesma à secagem em estufa por 75°C por 6h, posteriormente moída e peneirada para a padronização da granulometria. Para a elaboração dos quibes foram estabelecidas formulações contendo 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, sendo que a primeira é designada por formulação padrão, ao qual não foi adicionada a farinha teste. Quanto à análise sensorial constatou-se que os quibes contendo 20%, 40% e 60% foram bem aceitas pelos provadores. Além disso, as análises físico-químicas mostraram-se significativas ao teor de proteínas, fibras e cinzas sinalizando a farinha como um bom substituto parcial na formulação do produto.

Uma metodologia diferente foi aplicada na pesquisa desenvolvida por Santos et al. (2012) ao desenvolver pão francês adicionado de farinha de sementes de jaca. A secagem se deu através de uma estufa de circulação de ar forçado por 5 dias a 65°C. Logo após, as sementes foram moídas em moinho de facas *Willis* e peneiradas para padronização da granulometria e obtenção da farinha. Para a elaboração do pão foram consideradas três formulações contendo 10%, 20% e 30% da farinha de sementes, sendo que os produtos acrescidos de 10% e 20% obtiveram os melhores resultados. Porém, o percentual de proteínas encontrado foi menor (7,54%) quando comparado a pesquisa de Landim et al. (2015) (14,69% a 17,63%).

Spada et al. (2018) também secaram sementes de jaca com o objetivo de adicionar a farinha na formulação de cappuccinos. O procedimento experimental se deu a partir da farinha de sementes de jaca seca e sementes fermentadas. Para a desidratação, as sementes foram submetidas à estufa com circulação de ar a 60°C por 48 h. Posteriormente, foram submetidas à torrefação em um forno elétrico rotativo a 171°C por 47 minutos. Para a farinha de sementes fermentadas, procedeu-se a secagem e torrefação a 154°C por 35 minutos. Neste experimento foram produzidos sete tipos de cappuccinos: 15% de cacau em pó (controle), três produtos com substituição integral do cacau em pó com 3,75%, 7,5% e 11,25% de farinha de semente de jaca e mais três utilizando a farinha fermentada com o mesmo perceptual. Os resultados obtidos com

o teste de aceitabilidade mostraram que a farinha de sementes de jaca desidratada é um bom substituto e deve ser utilizada como alternativa ao cacau em pó na elaboração do cappuccino.

2.1.2 Prospecção tecnológica da utilização de sementes de jaca

Um levantamento nos bancos de depósitos de patentes de abrangência nacional (Instituto Nacional de Propriedade Industrial - INPI) e internacional (Espacenet, European Patent Register - EPO, PatentScope: World Intellectual Property Organization - WIPO, Web of Science – Derwent) realizado em novembro de 2018 pela presente autora, visou analisar o desenvolvimento das tecnologias referentes à utilização das sementes de jaca.

Através dessa pesquisa foram encontradas 48 patentes, porém, após a exclusão das tecnologias duplicadas, a amostra utilizada para a elaboração deste estudo consistiu em 27 registros (Figura 2.2).

De acordo com a Figura 2.2, as bases de dados que mais registraram patentes associadas ao uso da semente de jaca foi a PatentScope (19) e o Derwent (18) ambos de abrangência internacional. Os bancos de dados da Espacenet e do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (nacional), registraram 10 patentes, sendo 5, protegidas em cada banco.

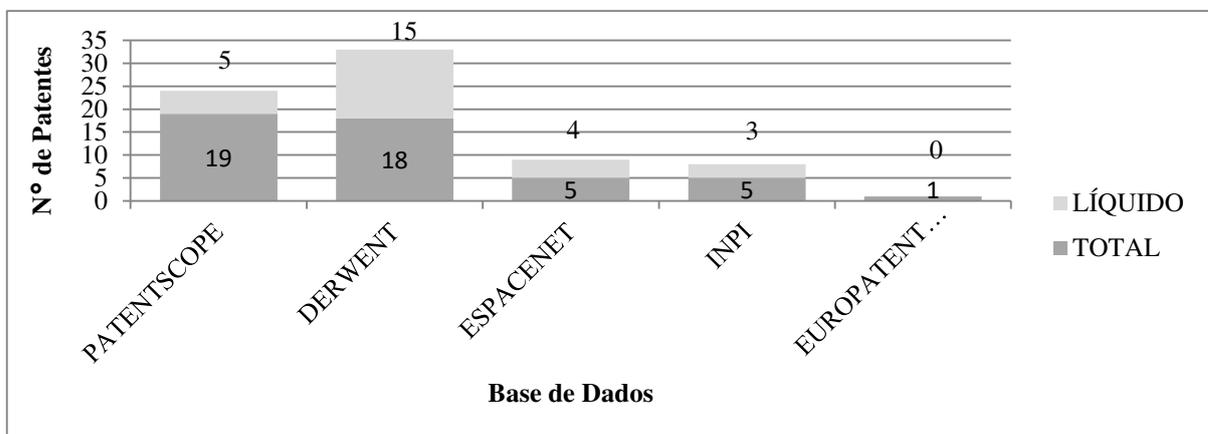


Figura 2. 2 - Dados gerais do levantamento nos bancos de dados das tecnologias registradas sobre a utilização de sementes de jaca.

Na Figura 2.3 é possível observar o aumento do número de depósitos de patentes relacionadas ao uso da referida semente.

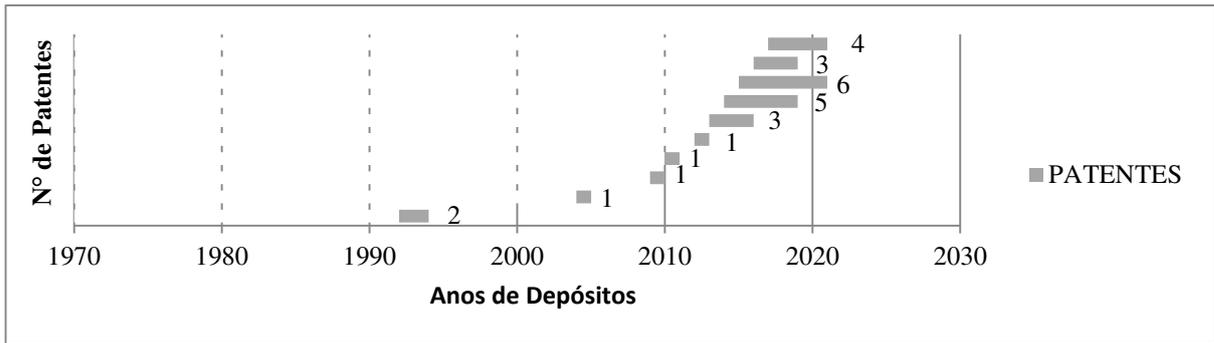


Figura 2.3 - Evolução anual dos registros de patentes sobre a utilização da semente de jaca.

De acordo com o gráfico da Figura 2.3 ainda são poucos os depósitos de patentes utilizando a semente de jaca como matéria-prima. Os dois primeiros registros ocorreram em 1992 na China e se referiam a produção de aglutinina por meio das sementes. Após 12 anos, especificamente no intervalo entre 2004 a 2012 foram registradas 4 tecnologias. Somente a partir de 2013 ocorreu a melhora dos índices de depósito, especificamente em 2015, com o registro de 6 patentes.

Na Figura 2.4 pode ser observada a quantidade de depósitos de patentes registrados por países.

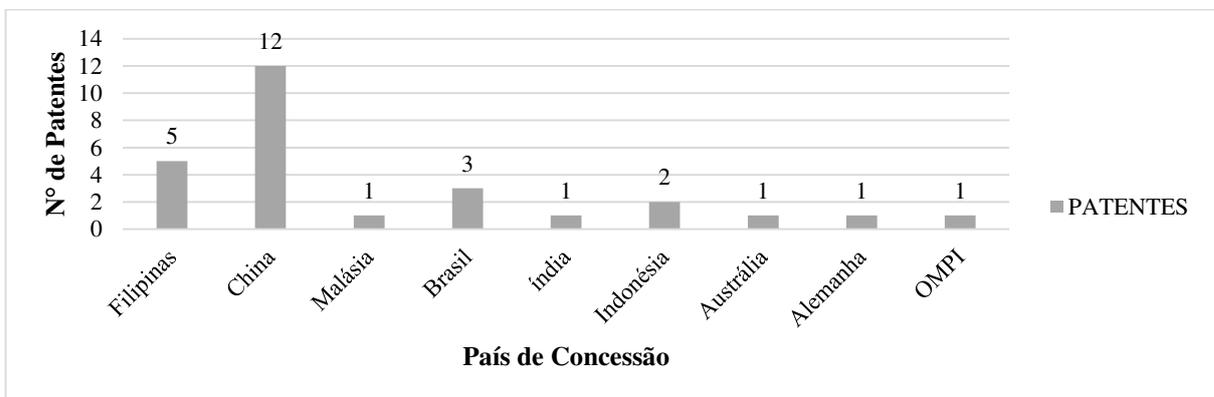


Figura 2.4 - Relação entre o número de patentes depositadas e o país de concessão.

Dentre os países com tecnologias patenteadas, a China detém o maior número de registros (12), seguida das Filipinas (5) e Brasil (3). A expressividade do desenvolvimento tecnológico dos países do continente asiático (China e Filipinas) pode estar relacionado com o fato da jaqueira ser uma espécie nativa dessa região.

A Figura 2.5 mostra a quantidade de patentes depositadas por universidades, empresas e inventores independentes (pessoa física).

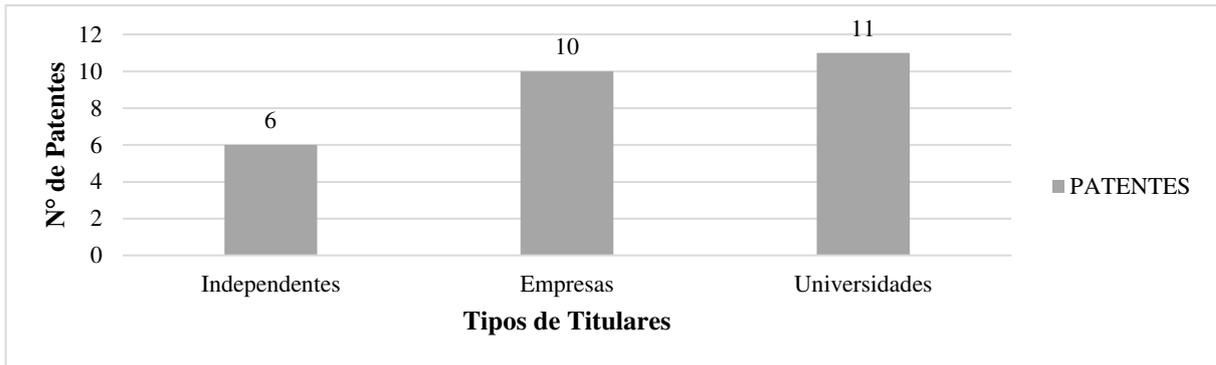


Figura 2. 5 - Panorama dos tipos de titulares detentores da concessão das patentes.

Os maiores números de tecnologias foram desenvolvidos nas instituições de ensino superior (11) e empresas privadas (10) devido essas apresentarem maiores recursos destinados ao desenvolvimento de pesquisas patenteáveis. As patentes independentes, ou seja, concedidas a pessoas físicas contabilizaram 6 registros, representando o menor índice da categoria.

Na Figura 2.6 está listada a quantidade de patentes registradas de acordo com a ocorrência de utilização.

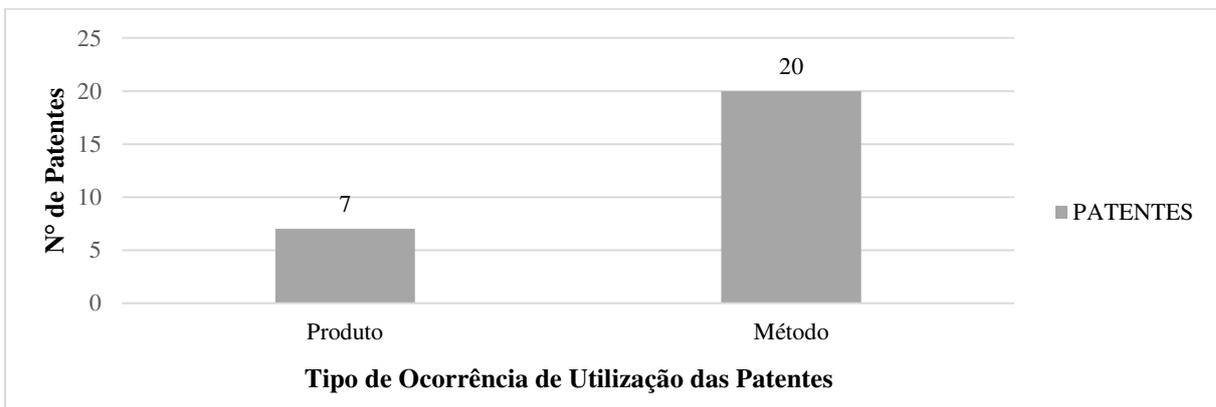


Figura 2. 6 - Tipos de ocorrência de utilização das patentes concedidas.

Dentre os dados obtidos, foram encontradas 20 concessões de patentes referentes a metodologia de processamento da semente de jaca para uso diverso, o que equivale ao maior índice da pesquisa. As demais (7) foram categorizadas na proteção de produtos gerados. Com isso, pode-se observar que a maior porcentagem de titulares e /ou inventores não visualizaram a possibilidade de patentear tanto o processo de obtenção quanto o produto obtido em cada tecnologia gerada, sendo essa falha evidenciada através da relação do número geral de patentes obtidas (27), o que poderia duplicar o número de registros.

As áreas de pesquisa científica relacionadas a produção de patentes sobre sementes de jaca estão designadas na Figura 2.7.

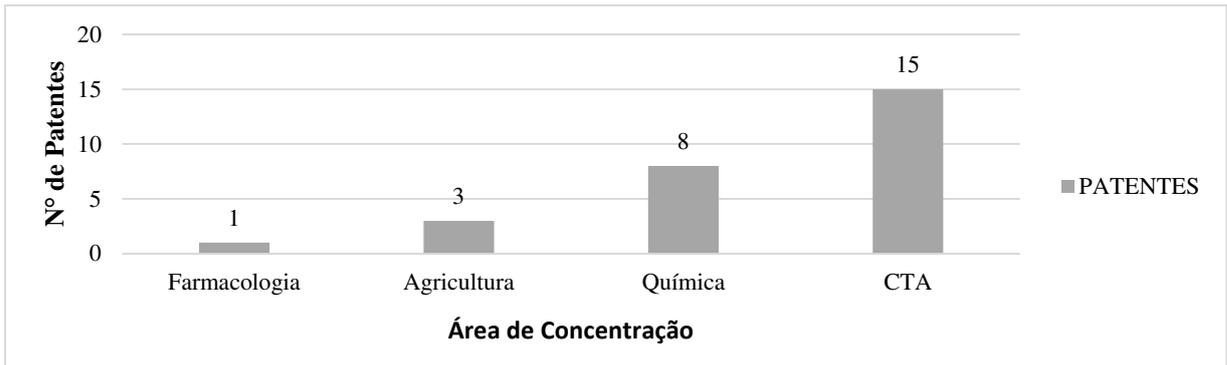


Figura 2.7 - Quantidade de registros de patentes de acordo com a área de concentração de pesquisa.

Sobre a Figura 2.7, análise de concentração das áreas de conhecimento, o ramo da Ciência e Tecnologia de Alimentos (CTA) é o mais estudado, contando com 15 tecnologias protegidas referentes ao acréscimo parcial de sementes processadas na formulação de doces, barra de cereal, kefir, achocolatado, dentre outros. Já a área de desenvolvimento de elementos químicos, contabilizou 8 patentes relacionadas a obtenção de arginina, aglutinina, etanol e fitase. A farmacologia (1) e agricultura (3) apresentaram os maiores déficits de tecnologia patenteada.

A Classificação Internacional de Patentes (CIP) também foi analisada e encontra-se descrita na Figura 2.8.

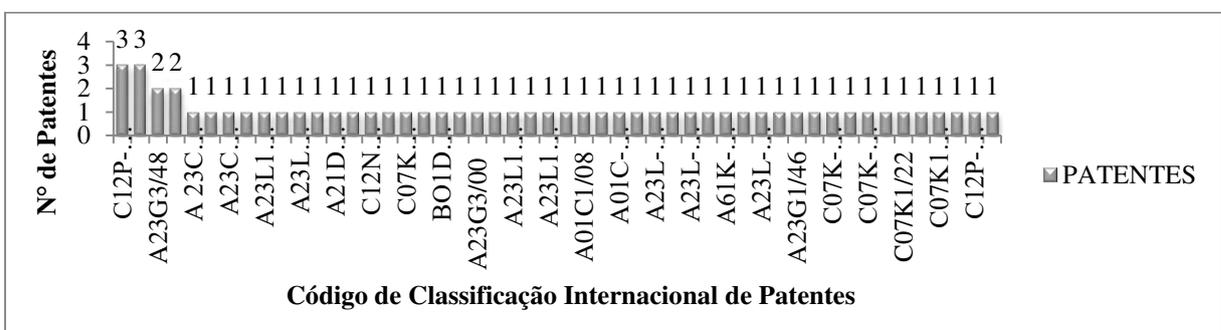


Figura 2.8 - Relação entre o número de patentes concedida e o Código de Classificação Internacional de Patentes (CIP).

Dentre as 27 patentes foram contabilizadas 57 classificações por meio da CIP, referentes as patentes que continuam mais de uma classificação. As categoria mais incidentes foram a **C12P- 013/10 e A01C1/06** ambos com 3 patentes relacionadas a SEÇÃO C - Química; Metalúrgica - preparação de compostos orgânicos contendo nitrogênio; citrulina; arginina; ornitina e Seção A – Necessidades Humanas - Revestimento ou cobertura de semente, respectivamente. A seção A registrou o maior número de patentes (33), as demais subdividiram-se nas seções B, C e D.

Com base nos dados discutidos observou-se que ainda são poucas as tecnologias patenteadas e as áreas de estudos engajadas no desenvolvimento de tecnologias patenteáveis relacionadas a utilização das sementes de jaca, apresentando o maior número de depósitos em bancos de dados internacionais pertencentes a pessoa jurídica (universidade e empresas) relacionada a área de ciência e tecnologia de alimentos. Sendo assim, faz-se necessário maior investimento em pesquisas com as sementes, visto o seu potencial tecnológico e sua vasta aplicabilidade industrial, visando a potencialização do campo da ciência e tecnologia e atuando como mola propulsora no desenvolvimento do país.

2.2 PROCESSAMENTO TÉRMICO: SECAGEM

A água livre presente nos produtos biológicos é uma das principais causas de deterioração, por isso são utilizadas técnicas para prolongar a vida útil desses alimentos. Nessa perspectiva, a secagem é uma das técnicas mais antigas empregadas na conservação de alimentos, essa opera por meio de energia térmica e da transferência simultânea de massa (água e vapor) e calor entre o ar de secagem e o produto, removendo a maior parte da água presente. Para o processo ocorrer corretamente de acordo com o objetivo almejado, é necessário o controle das variáveis de temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem (SILVA, et al., 2003).

De acordo com Okada et al. (2002) e Gava, Silva e Frias (2008) a secagem é “a remoção de água, ou de qualquer outro líquido, de um material sólido, na forma de vapor, para uma fase gasosa insaturada, através de um mecanismo de vaporização térmica, numa temperatura inferior à de ebulição”.

Os principais objetivos da secagem gira em torno da redução da atividade de água (A_w) do alimento, entendida como a água disponível para reações químicas, crescimento microbiano e atividades enzimáticas aumentando conseqüentemente a vida de prateleira do produto; redução do peso e volume dos alimentos para facilitar o transporte e armazenamento, visto que ocupará menos espaço; aumento da oferta de subprodutos gerados, por meio da obtenção de novos produtos com características sensoriais diversificadas (ORDÓÑEZ et al., 2005; FELLOWS, 2006)

A secagem pode ser dividida em duas formas: secagem natural e secagem artificial. A primeira geralmente ocorre através da exposição do produto ao sol e ao vento. Tal procedimento é de baixo custo, mas ocorre sem controle das variáveis envolvidas acarretando perdas, além de

dependem das condições climáticas da região, geralmente disseminam-se mais no interior, principalmente da região nordeste, onde a incidência de sol ocorre praticamente durante todo o ano. Já a secagem artificial é um método mais oneroso, pois ocorre através do fornecimento de energia por meio de secadores utilizados pelas indústrias com o objetivo de secar grandes quantidades de produto, além de reduzir as perdas através do controle das variáveis, como por exemplo, temperatura e velocidade do ar, possibilitando a aquisição do produto seco de melhor qualidade (SANTOS et al., 2010).

Os processos de secagem artificial podem ser divididos em quatro grupos (FIOREZE, 2004b):

- a) **secagem com ar quente:** o ar aquecido passa sobre ou entre o produto vaporizando a água livre que é retirada pelo fluxo de ar;
- b) **secagem em contato com uma superfície quente:** ocorre por meio da condução da energia de uma superfície quente ao produto, secando-o, de modo que o vapor de água é retirado por diferença de densidade;
- c) **secagem à vácuo:** utilizada para produtos que necessitam ser secados em baixas temperaturas, fazendo-o em ambientes de baixa pressão, como por exemplo, estufas a vácuo;
- d) **secagem a frio (liofilização):** a água livre do produto é congelada passando rapidamente do estado sólido para o vapor (sublimação) surgindo pequenos capilares vazios e mantendo o formato de produto *in natura*.

2.2.1 Fenômeno da secagem

Apesar da secagem de produtos biológicos ser utilizada há muito tempo, nem sempre conheceu-se as variáveis envolvidas no processo. Geralmente, essa era regida a partir de conhecimentos empíricos por meio da sabedoria popular (secagem natural), o que dificultava o entendimento do funcionamento da técnica e conseqüentemente a otimização do processo e a padronização do produto final adquirido. Na secagem desses produtos são inúmeras as variáveis que atuam no processo tornando-o bastante complexo, como por exemplo, a umidade relativa do ar, temperatura do ar, vazão do ar, umidade inicial e final do produto, coeficiente de difusão

de massa e etc. Além disso, ainda ocorrem alterações na estrutura física, química, sensoriais e nutricional do produto gerado (FIOREZE, 2004c).

Durante a secagem ocorre a transferência simultânea de calor e massa tanto no interior do sólido quanto na camada externa que entra em contato com o agente secante. O calor geralmente é fornecido ao produto por meio de convecção (ar de secagem) ou condução (superfície quente). Ou seja, a diferença da temperatura entre o ambiente externo (ar) e a matriz (alimento) possibilita a transferência de calor do ar ao alimento úmido ocorrendo assim a evaporação da água. Usualmente o agente de secagem mais utilizado é o ar aquecido, não saturado. Por meio desse, o produto úmido em contato com o ar reduz o seu teor de umidade e conseqüentemente umidifica o ar presente (CARMO, 2004).

A secagem exercida por meio da convecção forçada do ar ocorre por meio de dois processos simultâneos: transferência da água superficial para o ar e migração dessa do interior do produto para a superfície, desenvolvendo um gradiente de concentração, de modo que o teor de umidade encontra-se mais concentrado no interior do produto (GARCIA, et al., 2004).

2.2.1.1 Períodos da secagem

O processo de secagem se dá a partir de três períodos distintos, representados pelo período de estabilização, período de taxa constante e período de taxa decrescente.

As taxas de secagem, ou seja a velocidade com que o alimento seca, pode estar relacionada a vários fatores, dentre eles estão (FELLOWS, 2006):

- a) fatores relacionados as condições de processamento;
- b) fatores relacionados a natureza do alimento;
- c) fatores relacionados ao desenho do secador.

De acordo com Park, Yado e Brod (2001), o terceiro período (taxa decrescente) é o mais observado na secagem de produtos biológicos.

Quanto a definição dos citados, o período de estabilização ocorre no início da secagem e se caracteriza pelo equilíbrio entre as condições da superfície do produto e do ar de secagem por meio da elevação da temperatura.

O segundo período conhecido como taxa de velocidade constante se baseia na saturação da superfície do sólido. A transferência da água livre do interior para a superfície ocorre concomitantemente a sua evaporação, tornando a velocidade de secagem constante.

O terceiro e último período (taxa decrescente) ocorre devido a redução da transferência de massa ocorrida por causa da redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. Esse período é influenciado principalmente pelas características da matriz e pela resistência ao transporte de umidade dentro do sólido (CARMO, 2004).

2.2.2 Teor de Umidade

Os produtos agrícolas são constituídos de duas partes: a parte sólida, também conhecida como matéria seca, formada por proteínas, lipídeos, carboidratos, amidos e etc., e a água combinada (absorvida e água ligada). A absorvida está presente na superfície das macromoléculas por meio da força de Van der Waals e pontes de hidrogênio. A ligada está quimicamente ligada a substâncias presentes no produto e normalmente não é eliminada (CELESTINO, 2010).

A umidade é uma das variáveis envolvidas na proliferação microbiana, de modo que a sua redução a níveis abaixo do ótimo, cria condições desfavoráveis para o crescimento de micro-organismos (GAVA; SILVA; FRIAS, 2008).

A quantidade de água presente no produto pode ser calculada através da base seca (b.s) e base úmida (b.u) (FIOREZE, 2004c).

O teor de umidade em base seca pode ser calculado através da seguinte equação:

$$M_{bs} = \frac{\textit{peso da água}}{\textit{peso da matéria seca}} = \frac{W_a}{W_s} \quad (2.1)$$

O teor de umidade em base úmida pode ser obtido através da Equação 2.2:

$$M_{bu} = \frac{\textit{peso da água}}{\textit{peso do produto}} = \frac{w_a}{w_a + W_s} \quad (2.2)$$

onde w_a é o peso da água e w_s é o peso da matéria seca.

Comumente se apresenta o teor de umidade em percentual, por meio da multiplicação das Equações (2.1) e (2.2) por 100.

O processo de secagem encerra-se a partir do momento que o produto alcança a umidade de equilíbrio, momento que atinge-se o teor de umidade mínimo, de acordo com as condições

submetidas de temperatura e umidade relativa do ar. Fisicamente esse fenômeno ocorre quando a pressão parcial do vapor de água na superfície do produto se iguala a pressão parcial do vapor de água do ar de secagem (CELESTINO, 2010).

2.2.3 Teorias da secagem

Devido as inúmeras variáveis atuantes no processo de secagem tornando-o de complexo entendimento, ao longo do tempo foram desenvolvidas diversas teorias com o objetivo de explicar o processo. Abaixo será abordado brevemente cada teoria citada de acordo com (SILVA JUNIOR, 2015; SILVA, 2016):

- a) **Teoria da difusão líquida:** é considerado que a migração da água no interior do produto ocorra apenas na fase líquida por meio de um gradiente de concentração no sólido. Essa teoria é a mais utilizada para explicar a migração de umidade do interior de sólidos;
- b) **teoria da condensação-evaporação:** nessa teoria acredita-se que a água contida em um meio poroso migra do interior do sólido na forma gasosa;
- c) **teoria capilar:** essa apresenta bons resultados em alimentos secos a altas temperaturas, pois fundamenta-se no conceito do potencial capilar, que atua através da diferença de pressão entre a água e o ar na interface da água;
- d) **teoria de Krischer:** considera-se que ocorra a transferência simultânea de calor e massa aplicada, acreditando-se que o teor de umidade durante a secagem pode ocorrer no estado líquido, de vapor ou por capilaridade, podendo ser aplicada em vários meios porosos;
- e) **teoria de Philip e De Vries:** acredita-se que o movimento da água do interior do sólido aconteça através de poros por meio de mecanismos de difusão de líquido e capilaridade.

A maioria das teorias discutidas apresentam limitações principalmente na descrição da secagem do sólido em taxa decrescente. Dessa forma, são passíveis de erros experimentais principalmente se não for levado em consideração as faixas de temperaturas e umidades ideais.

2.3 SIMULAÇÃO MATEMÁTICA DA SECAGEM DE ALIMENTOS

O processo de secagem de produtos agrícolas, em sua maioria, demanda muito tempo e dependem principalmente do tipo de produto a ser seco, do pré-processamento empregado na matéria e da técnica de secagem ao qual foi submetida. Estudos realizados com a secagem de sementes de jaca demonstraram processos que duraram horas e outros dias para a obtenção do produto seco. Tal situação exige além do empenho de mão de obra, um grande gasto de energia para alcançar o objetivo traçado, sendo que esses gastos aumentam quando são necessários realizar testes práticos para definir qual o melhor tratamento a ser empregado. Porém, através da simulação matemática executada por meio de *softwares*, é possível realizar a otimização do processo de forma relativamente mais rápida e com baixo custo (DALPASQUALE; SPERANDIO, 2010). Através dessas simulações, o pesquisador pode testar o efeito das combinações de diversas variáveis, definir o melhor tipo de secador, o tempo ideal para a secagem, bem como conhecer o comportamento das variáveis envolvidas possibilitando a padronização e a redução dos custos no processo (LEITE et al., 2005).

A secagem de produtos biológicos pode ser analisada e simulada por meio de modelos empíricos e teóricos. Os modelos empíricos descrevem a cinética e taxa de secagem do produto considerando apenas os efeitos das condições externas, como por exemplo, a temperatura e velocidade do ar de secagem, não fornecendo informações sobre o que acontece no interior do produto. Entretanto, os teóricos, como por exemplo, os modelos de difusão (solução analítica e numérica) utilizam os fundamentos da transferência de calor e massa, dessa forma, é possível determinar a distribuição de umidade de um produto para cada instante de tempo selecionado, desde que esse produto seja correlacionado a sua forma a de um sólido perfeito (CARLESSO et al., 2007).

Esses modelos são aplicados a diversos produtos agrícolas submetidos a várias combinações experimentais, mas neste trabalho foi enfatizado as pesquisas desenvolvidas com sementes, como é o caso dos estudos realizados por (AFONSO JUNIOR; CÔRREA, 1999; AFONSO JÚNIOR, 2003; CÔRREA; RESENDE; FERREIRA; ALMEIDA, 2010; ARAÚJO; RESENDE et al., 2011; FARIA et al., 2012; CAMICIA et al., 2015).

2.3.1 Descrição da secagem por modelos empíricos

A descrição do processo de secagem por meio de modelos semi-empíricos e empíricos consideram apenas as variáveis externas ao produto, como por exemplo, a temperatura e a umidade relativa do ar. Nos modelos empíricos usa-se dados experimentais e análises adimensionais estabelecendo correlação entre o teor médio de água e o tempo de secagem resultando na curva de secagem do produto, entretanto, seus parâmetros não apresentam significado físico. Nesses ocorrem o negligenciamento do transporte de calor e massa dentro do produto, bem como consideram que o processo de secagem ocorre apenas no período de taxa decrescente (CORRÊA et al., 2007). Esses modelos são muito utilizados na descrição da cinética de secagem de produtos em camada fina (CÔRREA; RESENDE; RIBEIRO, 2006).

Os semi-empíricos relacionam modelos empíricos com fundamentos de transferência de massa e são baseados na lei de resfriamento de Newton. Ainda determinam que a resistência a transferência de massa ocorra apenas na superfície do produto (ABALONE et al., 2006).

Os modelos empíricos descritos no Quadro 2.2 são os mais utilizados para descrever as características de secagem de produtos agrícolas.

Quadro 2. 2 - Modelos empíricos utilizados na descrição da secagem de produtos agrícolas.

Designação do modelo	Modelo
$RU = 1 + at + bt^2$	Wang e Singh
$RU = a \exp(-k t) + (1 - a)\exp(-k_1 t)$	Verna
$RU = \exp(-k t^n)$	Page
$RU = \exp(-k t)$	Newton
$RU = a \exp(-k t^n) + b t$	Midilli
$RU = a \exp(-k t) + c$	Logarítmico
$RU = a \exp(-k t)$	Henderson e Pabis
$RU = a \exp(-k t) + (1 - a)\exp(-k a t)$	Exponencial de Dois Termos
$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k b t)$	Aproximação da Difusão

Fonte: adaptado de Córrea et al. (2007)

onde:

RU – razão de umidade do produto, adimensional;

t – tempo de secagem, h;

k, k0 e k1 – constantes de secagem em min^{-1} ;

a, b, c, n – coeficientes dos modelos.

Aplicando alguns dos modelos citados acima, Araújo et al. (2017) estudou a secagem de sementes de amendoim em camada delgada secos em estufa com ventilação forçada nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C. Para a descrição dos dados experimentais foram utilizados 10 modelos matemáticos (Aproximação da difusão, Dois termos, Exponencial de dois termos, Henderson e Pabis modificado, Logarítmico, Midilli, Page, Thompson, Verna e Wang e Sing). Após as análises, observou-se que todos os modelos testados, com exceção do de Wang e Sing descreveram satisfatoriamente os dados experimentais de secagem obtendo coeficientes de determinação superiores a 0,98.

Santos et al. (2019) analisou a descrição da cinética de secagem, por meio dos modelos de Page, Henderson e Pabis, Exponencial de dois termos, Logarítmico e Midilli, de fatias de acuri submetidas a 60, 70, 80 e 90°C em estufa com circulação forçada de ar. Com base nos resultados obtidos, o modelo logarítmico apresentou os melhores parâmetros de ajuste das curvas aos dados experimentais.

Outro estudo realizado por Resende et al. (2019) utilizando modelos empíricos para a descrição da cinética de secagem de fruta-pão concluiu que o modelo de Page se adequou melhor aos dados experimentais com $R^2 > 0,98$.

2.3.2 Descrição da secagem por modelos difusivos

A utilização de modelos matemáticos que descrevam os fenômenos de distribuição de massa dentro do produto estão cada vez mais sendo utilizadas para prever os efeitos da secagem nos alimentos, além de auxiliar no cálculo de variáveis, na redução das perdas e na obtenção de um produto final de qualidade (ADORNO et al., 2013).

O modelo de difusão é o mais utilizado dentre os modelos teóricos para descrever o fenômeno de secagem (GONELI et al., 2014b).

De acordo com Silva (2012) o modelo de difusão leva em consideração tanto a resistência interna quanto a externa, além de prever o teor de umidade no interior do sólido em qualquer instante de tempo. Ainda de acordo com a pesquisadora, os estudiosos desenvolvem e utilizam as soluções das equações de difusão para um problema de secagem com variáveis específicas e não necessariamente as mesmas soluções podem ser utilizadas para a resolução de outros estudos.

Com base no relatado por Resende et al. (2005) e Silva (2012) as pesquisas desenvolvidas sobre secagem usando a teoria da difusão líquida têm sido encontradas bastantes

discrepâncias sobre os valores do coeficiente de difusividade que podem estar relacionadas tanto a natureza do material a ser seco, como ao tipo de processo escolhido para a secagem e as variáveis envolvidas nessa.

Os modelos de secagem baseados na teoria da difusão líquida têm merecido atenção especial por parte dos pesquisadores. Esses modelos assumem que não há influência da capilaridade, desprezam os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, dada a dificuldade de se quantificarem esses múltiplos efeitos na massa de produto e, também, por considerarem que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente, o que pode induzir a discrepâncias entre os resultados encontrados (GONELLI et al, 2007, p. 135).

“A teoria difusional se apoia exclusivamente sobre a lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água” (PARK; YADO; BROD, 2001).

A segunda lei de Fick tem sido usada para calcular a difusividade da água em função do gradiente de concentração (Equação 2.3), na teoria da difusão líquida (GONELLI et al., 2007).

$$\frac{\partial U^*}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left(D \cdot \frac{\partial U^*}{\partial X} \right) \quad (2.3)$$

onde U^* : teor de água do produto, decimal (b.s.); D : coeficiente de difusão líquida, $m^2 \cdot s^{-1}$; t : tempo, s; e x : distância em relação a um ponto de referência no corpo, m.

O mecanismo de transporte é descrito pelas Equações 2.5 e 2.6 (SILVA JUNIOR, 2015).

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \vec{v} \Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S \quad (2.5)$$

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

Para problemas difusivos considera-se $\vec{v} = 0$ na Equação 2.5 e obtêm-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S \quad (2.6)$$

A equação de difusão pode ser resolvida por meio de soluções analíticas e/ou numéricas. Entretanto fatores como, a geometria aproximada do objeto de estudo e as condições de contorno devem ser descritas antes de resolvê-la.

2.3.2.1 Geometrias: cilindro finito

São diversas as geometrias simples aplicadas para descrever os objetos estudados, dentre essas estão placas planas, cilindros, esferas entre outros. Por considerar o cilindro finito a aproximação do objeto de estudo do presente trabalho, esse será descrito brevemente abaixo.

Com base em Silva (2009) e Silva Junior (2015) quando o fluxo axial é significativo usa-se a geometria do cilindro finito para aproximar o objeto em questão e assim modela-lo.

Sendo assim, um cilindro de raio R e comprimento L , tem-se:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\Gamma\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right)$$

(2.7)

onde y é a coordenada na direção axial.

O sistema de coordenadas considerado para a equação (2.7) está representado na Figura 2.9.

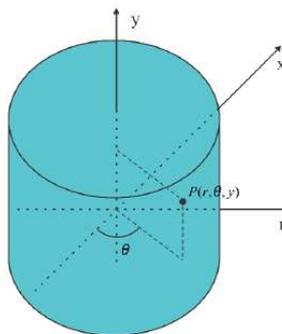


Figura 2. 9 - Sistema de coordenadas do cilindro finito.

(Fonte: SILVA JUNIOR, 2015)

2.3.2.2 Tipos de condições de contorno

As condições de contorno mais utilizadas são as citadas a seguir:

- a) **condição de contorno de equilíbrio** também conhecida como condição de contorno de primeiro tipo, condição de contorno prescrita ou condição de contorno de Dirichlet. Nessa condição é considerado que o valor da grandeza de interesse é conhecido na superfície do objeto de estudo (FARIAS, 2011);
- b) **condição de contorno com fluxo prescrito** também denominada de condição de contorno de segundo tipo ou condição de contorno de Neumann. De acordo com Bird et al. (2001) e Maliska (2010) apud Gama (2014) p. 25, nessa condição “a derivada da variável de interesse em relação à posição que define o fluxo da variável de interesse na fronteira é conhecida”.
- c) **condição de contorno convectiva** é também conhecida como condição de contorno do terceiro tipo ou condição de contorno de Cauchy. Nessa condição o transporte da grandeza de interesse ocorre por meio de convecção com um coeficiente de transferência h . Considera-se que haja uma camada limite entre o meio externo e o fluxo da grandeza de interesse impedindo que a grandeza de interesse assuma o seu valor de equilíbrio instantaneamente (FARIAS, 2011; GAMA, 2014).

2.3.2.3 Solução analítica para a equação de difusão

Com base no descrito por Silva (2012) e Borges (2016) o método de separação de variáveis é utilizado para resolver a equação de difusão em corpos com geometrias aproximadas simples, como por exemplo, placa infinita, cilindros, esferas e etc. As condições de contorno são simplificadas, também considera-se a difusividade de água constante, além de negligenciar a contração volumétrica do produto.

Segundo Maliska (2010) o método analítico detém pouco custo computacional tornando-o uma ferramenta mais rápida e acessível.

Uma das vantagens de utilizar a solução analítica é a identificação da variável de interesse em qualquer área do domínio contínuo para qualquer instante de tempo (SILVA, 2012). A ferramenta analítica ainda é utilizada para validar soluções numéricas (MALISKA, 2010). Além de fornecer estimativa de valores iniciais de parâmetros termofísicos para processos de otimizações por meio de ferramentas numéricas (GAMA, 2014).

Para a resolução da equação por esse método é necessário definir as condições iniciais e de contorno e o estabelecer algumas hipóteses para o objeto em estudo, tais quais:

- a) a distribuição inicial de umidade deve ser uniforme;
- b) O mecanismo de transporte de água no interior do sólido é somente a difusão líquida;
- c) as dimensões do sólido não variam durante a difusão de água;
- d) o coeficiente convectivo de transferência de massa é constante durante a difusão de água;
- e) a difusividade efetiva da água não varia durante a difusão;
- f) o sólido é considerado homogêneo e isotrópico.

Estudos encontrados na literatura utilizaram as ferramentas analíticas para a solução da equação de difusão. Nessa vertente, a pesquisa realizada por Goneli et al. (2014a) calculou o coeficiente de difusão efetivo de folhas de aroeira secas a 40, 50, 60 e 70°C por meio da solução analítica aproximando o objeto de estudo a forma geométrica de uma placa plana. Após as análises a difusividade encontrada para a matéria estudada variou entre $0,1476 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $1,5811 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ da menor para a maior temperatura, notando-se que ocorreu um aumento da difusividade com a elevação da temperatura do ar de secagem que também foi descrita por meio da equação de Arrhenius.

A solução analítica também foi utilizada por Fiorentin et al. (2012) para identificar a difusividade de água na secagem de bagaço de laranja. Os valores apresentados estavam na faixa de 10^{-9} a 10^{-10} .

Prates et al. (2012) e Reis et al. (2012) também estudaram o coeficiente de difusão efetivo de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo) e folhas de manjeriço, respectivamente, aproximando o objeto de estudo a forma geométrica de uma placa plana por meio do ajuste da solução analítica para a equação de difusão. Ambos observaram que a difusividade variou entre $2,81 \times 10^{-11}$ a $8,85 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e $9,10 \times 10^{-12}$ a $2,92 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, além de terem apresentado influência da elevação da temperatura no aumento da difusividade.

2.3.2.4 Solução numérica para a equação de difusão

A solução numérica é mais utilizada para resolver problemas mais complexos. Nessa solução pode-se considerar a variação volumétrica e a difusividade variável do objeto estudado. Na ferramenta numérica é utilizado domínio discreto, cuja discretização é feita através de volumes de controles calculados separadamente por meio de equações algébricas. Ao contrário das soluções analíticas, a ferramenta numérica é mais vantajosa, pois pode ser utilizada para solucionar problemas em objetos com geometrias mais complexas possibilitando a aproximação ao formato real, meio não-homogêneo e não-isotrópico. Entretanto, para resolver a solução é necessário o cálculo de grandes quantidades de volumes de controle, o que torna o método bastante caro pois demanda grandes custo computacional tornando-o desvantajoso em alguns casos (SILVA, 2012; GAMA, 2014).

A solução numérica pode ser obtida através de vários métodos, dentre eles estão:

- a) método das Diferenças Finitas (MDF);
- b) método dos Elementos Finitos (MEF);
- c) método dos Volumes Finitos (MVF).

Devido o Método dos Volumes Finitos ter sido utilizado para a resolução da solução numérica no presente trabalho, esse será um pouco descrito a seguir.

No MVF o domínio contínuo é dividido em subdomínios de volumes elementares denominados volumes de controles ou volumes finitos. Cada domínio tem como base a lei da conservação. Esse método é bastante utilizado na resolução de problemas que envolvem transferência de calor e massa por ser considerado mais estável e não apresentar convergência nos dados gerados (SILVA, 2012).

A discretização é feita integrando todos os termos da equação que governa o fenômeno, sobre cada volume de controle, no espaço e no tempo. A solução resultante implica que a conservação da grandeza de interesse é satisfeita em qualquer volume de controle e, conseqüentemente, em todo domínio físico estudado (CADÉ et al., 2005 apud FARIAS, 2011, p. 35; MALISKA, 2010).

São várias as pesquisas desenvolvidas abordando a solução numérica para a resolução da equação de difusão de diversos problemas que vão além dos produtos agrícolas, principalmente os mais complexos, pois através dessa é possível aproximar a geometria ao objeto real de estudo obtendo uma descrição mais precisa do problema estudado, como por exemplo, análise do escoamento em válvula ascendentes (PINHO, 2016), avaliação do

comportamento mecânico de polímeros híbridos (BATISTA, 2017) e fluxo de reservatório (RIOS, 2018).

3 METODOLOGIA

3.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DA PESQUISA

Os experimentos da pesquisa foram realizados nos Laboratório de Técnica Dietética (LATED), Laboratório de Tecnologia de Alimentos (LTA), Laboratório de Bromatologia (LABROM) e Laboratório de Farmacobotânica, Farmacognosia e Fitoterapia do Centro de Educação e Saúde (CES) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) *Campus Cuité-PB*.

3.2 OBTENÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

As jacas de variação mole e dura foram obtidas na feira livre da cidade de Cuité-PB. De acordo com Lemos et al. (2012) as variedades citadas não apresentam diferenças significativas entre si no teor nutricional. Os critérios adotados para a seleção dos frutos foram ausência de danos mecânicos, integridade fisiológica e variedades que não apresentassem estado de maturação avançado (Figura 3.1).



Figura 3. 1 - Representação das jacas utilizadas para a realização dos experimentos.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019)

3.3 PREPARO DAS AMOSTRAS

3.3.1 Procedimento para obtenção das sementes com endocarpo

As jacas foram submetidas ao processo de higienização prévia, que consistiu em pré-lavagem em água corrente com o auxílio de uma escova para remoção da sujidade superficial. Posteriormente, foram imersas em uma solução clorada de 200 ppm por 15 minutos e enxaguadas em água corrente potável. Em seguida, iniciou-se o despulpamento caracterizado pela separação das sementes da polpa ocorrido através de processo manual com o auxílio de uma faca para a realização dos cortes na estrutura externa do fruto, por meio desse, as sementes foram separadas, lavadas em água potável e reservadas em um recipiente plástico devidamente vedado e posteriormente encaminhadas ao laboratório de Tecnologia de Alimentos para a realização da secagem que será descrita na seção 3.4. As sementes com endocarpo e as etapas do processo de obtenção da amostra estão representadas nas Figuras 3.2 e 3.3.



Figura 3. 2 - Sementes de jaca com endocarpo utilizadas no processo de secagem.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019)

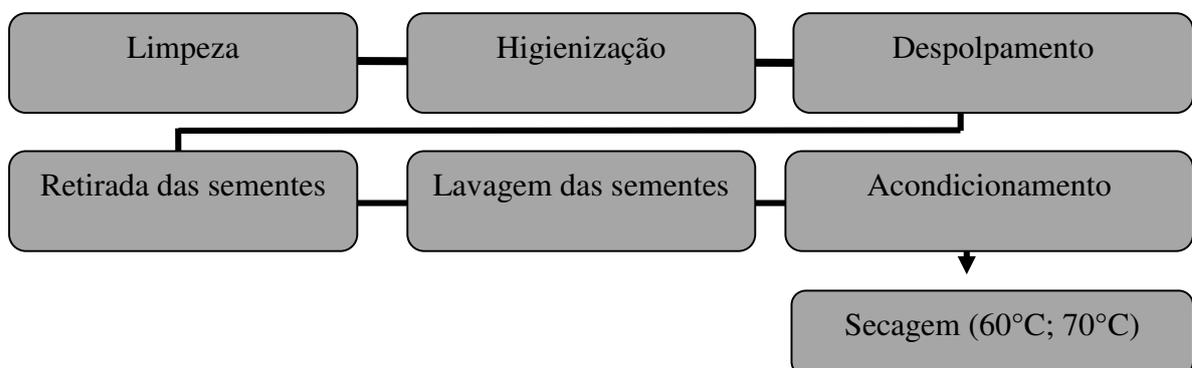


Figura 3. 3 - Fluxograma das etapas de preparo das amostras de sementes de jaca com endocarpo.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019)

3.3.2 Procedimento para obtenção das sementes sem endocarpo

As jacas passaram pelo mesmo procedimento de limpeza, higienização e despulpamento descritas no tópico 3.3.1. Logo após, ocorreu a retirada do endocarpo de acordo com a metodologia utilizada por Jerônimo (2012), através da imersão das sementes em água em ebulição por aproximadamente 1 minuto, tempo necessário para o desprendimento desse. Em seguida, as sementes foram transferidas para uma peneira de inox para a retirada da água superficial, por fim, os endocarpos foram removidos manualmente com o auxílio de uma faca. Após o procedimento, as sementes foram acondicionadas em um recipiente plástico devidamente vedado e encaminhado para a secagem. As fotos do procedimento se encontram na Figura 3.4.

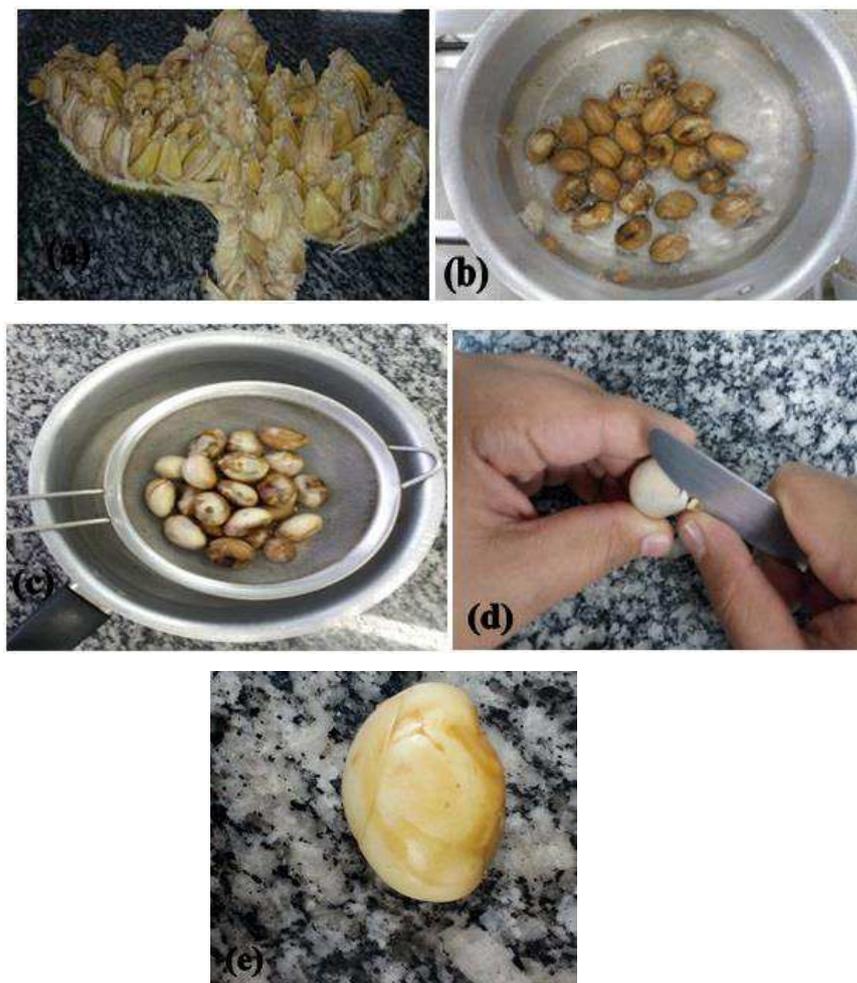


Figura 3. 4 - Procedimento de retirada do endocarpo das sementes: (a) retirada das sementes de jaca; (b) Imersão das sementes em água por 1 minuto; (c) retirada das sementes da água quente; (d) extração do endocarpo; (e) semente sem endocarpo.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019)

Na Figura 3.5 observamos o fluxograma de obtenção das sementes de jaca sem endocarpo.

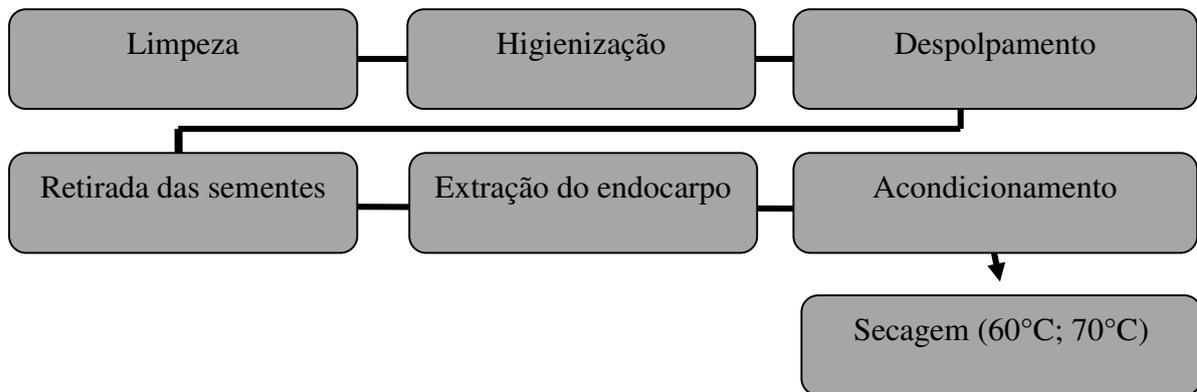


Figura 3.5 - Fluxograma das etapas de preparo das amostras das sementes de jaca sem endocarpo.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019)

3.4 SECAGEM CONVECTIVA

As secagens foram conduzidas em estufa com circulação e renovação forçada de ar nas temperaturas de 60°C e 70°C e divididas em quatro experimentos reproduzidos em triplicata, sendo: SJCE 60°C – sementes de jaca com endocarpo submetidas a 60°C; SJSE 60°C - sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 60°C; SJCE 70°C - sementes de jaca com endocarpo submetidas a 70°C e SJSE 70°C – sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 70°C. As médias e desvio padrão da massa, das medidas de comprimento, espessura e largura iniciais e do teor de umidade inicial em base úmida das sementes submetidas a secagem e utilizadas na descrição da cinética de secagem foram calculadas por meio do *Software Microsoft Office Excel 2007* e está descrito no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Médias e desvio padrão da massa e das medidas de comprimento, espessura e largura iniciais das sementes utilizadas na secagem convectiva.

MÉDIA E DESVIO PADRÃO (DP±)					
Amostras	Massa inicial (g)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	\bar{X}_1 (b. u.) (%)
SJCE 60°C	15,03±0,55	-	-	-	56,90±0,72

Continua...

MÉDIA E DESVIO PADRÃO (DP±)					
Amostras	Massa inicial (g)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)	\bar{X}_1 (b. u.) (%)
SJSE 60°C	24,76±0,08	29,56±0,71	16,46±0,46	19,31±0,48	49,40±1,2
SJCE 70°C	59,67±0,55	-	-	-	0,52±0,01
SJSE 70°C	24,29±1,37	29,57±1,07	17,87±0,21	20,05±1,22	50,85±1,15

SJCE 60°C: sementes de jaca com endocarpo submetidas a 60°C; **SJSE 60°C:** sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 60°C; **SJCE 70°C:** sementes de jaca com endocarpo submetidas a 70°C e **SJSE 70°C:** sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 70°C; (-): não foram verificadas as medidas nas amostras com endocarpo; \bar{X}_1 (b. u.): teor de umidade inicial em base úmida.

Para cada tratamento foram utilizados cestos vazados (Figura 3.6a) com pesos previamente mensurados. Após a disposição das amostras em cada cesto, os mesmos foram submetidos a pesagens por meio de balança semi analítica da marca Bioprecisa com precisão de 0,1 gramas, antes do início da secagem (peso inicial), durante e ao término do processo, que se configura após a amostra atingir a umidade de equilíbrio. Além disso, para os tratamentos SJSE 60°C e SJSE 70°C foi disposto um cesto com três divisórias (Figura 3.6b) contendo três sementes com a finalidade de verificar o encolhimento por meio da aferição das medidas de comprimento, espessura e largura medidas através de um paquímetro (Figura 3.6c). Para todas as análises de massa e encolhimento, as pesagens e a verificação de medidas decorreram simultaneamente nos intervalos de tempos de 0, 2, 5, 10, 20, 30, 1 hora (h), 2h e 3h, sendo que essas foram conduzidas até as amostras alcançarem o equilíbrio. Após atingir o teor de umidade de equilíbrio, as amostras foram submetidas à secagem em estufa previamente estabilizada a 105°C durante 24h para a obtenção da massa seca.

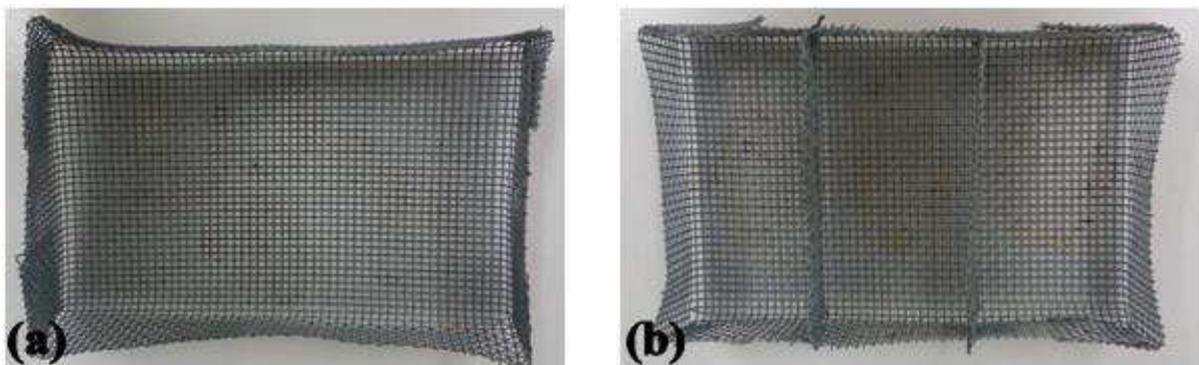


Figura 3. 6 - Procedimentos realizados durante a secagem convectiva de sementes de jaca: (a) Cestos utilizados para mensuração da massa das amostras; (b) Cestos utilizados para mensuração das medidas de comprimento, espessura e largura das amostras; (c) Paquímetro.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019)

Continua...



Figura 3. 6 - Procedimentos realizados durante a secagem convectiva de sementes de jaca: (a) Cestos utilizados para mensuração da massa das amostras; (b) Cestos utilizados para mensuração das medidas de comprimento, espessura e largura das amostras; (c) Paquímetro.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019)

3. 5 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática permite simular os resultados obtidos em campo experimental com o intuito de utilizá-los na escala de processos industriais visando prever condições adequadas de secagem, desempenho de processos, secadores ou sistemas de secagem (GOLESTANI; RAISI; AROUJALIAN, 2013).

A simulação atualmente é feita através de computadores e pode ser aplicada em diversas situações obtendo-se a vantagem de um processo rápido e de baixo custo o que não condiz com a execução dos processos reais que geralmente demandam muito tempo e possuem custos de execução elevados. Nessa modelagem aplicam-se equações que utilizam métodos teóricos ou empíricos ajustados aos dados experimentais obtidos em laboratório que devem ser comparados para validação do modelo utilizado (FIOREZE, 2004a).

Portanto, para descrever a cinética de secagem das sementes de jaca com endocarpo e sem endocarpo foi utilizado à modelagem matemática por meio dos modelos empíricos, solução analítica e solução numérica para a equação de difusão. O encolhimento das amostras foi considerado somente para as sementes sem endocarpo utilizadas na solução numérica, devido haver dificuldade de mensurar as medidas nas sementes com endocarpo.

Os dados obtidos no experimento foram armazenados em planilha personalizada do Programa *Microsoft Office Excel* versão 2007. Posteriormente, empregou-se a modelagem matemática na descrição dos dados experimentais por meio dos *softwares* LAB Fit desenvolvido por Silva e Silva (2009), Analitical e Cilindro Finito, os quais serão apresentados.

3. 5. 1 Descrição da cinética de secagem por meio de modelos empíricos

Os modelos empíricos são construídos por meio de técnicas de regressão e utilizados quando não existe fundamentação teórica para explicar a relação entre as variáveis de um determinado sistema (FINKLER, 2003).

Esses apresentam um método de abordagem que se baseia em correlações matemáticas dos dados experimentais e na análise adimensional. Além disso, apresenta uma relação direta entre o teor médio de umidade e o tempo de secagem apresentando parâmetros sem significado físico (SINGH; KULSHRESTHA, 1987).

A descrição através desses modelos é limitada, pois estão atrelados somente as variáveis externas que atuam no ambiente de secagem como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem (CORRÊA et al., 2007). Entretanto, a vantagem de utilização desses modelos consiste no fornecimento da velocidade de secagem do produto conhecido como taxa de secagem, além de um baixo custo operacional (AH-HEN et al., 2011).

Para a descrição da cinética de secagem das sementes de jaca, os dados experimentais foram ajustados às expressões empíricas (Quadro 3.2) submetidos ao *Software* de ajuste de curvas LAB Fit para a obtenção do melhor modelo de descrição da cinética e taxa de secagem.

Quadro 3. 2 - Expressões empíricas utilizadas para descrever a cinética de secagem.

Modelo	Nome	Expressão empírica	Referências
1	Lewis	$X^* = e^{-at}$	Kaleta e Górnicki (2010)
2	Henderson and Pabis	$X^* = ae^{-bt}$	Diamante et al. (2010)
3	Wang e Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$	Kaleta e Górnicki (2010)
4	Peleg	$X^* = 1 - t / (a + bt)$	Mercali et al. (2010)
5	Page	$X^* = e^{-at^b}$	Diamante et al. (2010)
6	Silva et alii	$X^* = e^{-at - b\sqrt{t}}$	Silva et al. (2012)
7	Dois Termos	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-k_1t)$	Madamba, Driscoll e Buckle, (1996)
8	Exponencial de 2 termos	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kat)$	Ertekin e Yaldiz (2004)
9	Midilli et al	$MR = a \exp(-kt^n + bt)$	Ertekin e Yaldiz (2010)
10	Logarítmo	$MR = a \exp(-kt) + c$	Serhat, Küçüköner e Karacabey (2018)

De acordo com Silva et al. (2004), o LABFit é um *software* de ajuste de curvas por meio de regressão não-linear aplicada de forma iterativa e utilizado para análise e tratamento de dados experimentais.

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

3.5.2 Modelos Difusivos

Os modelos difusivos ou teóricos baseiam-se em leis físicas e são considerados os melhores descritores da cinética de secagem quando comparados aos modelos empíricos, pois, por meio desses é possível analisar a distribuição de água no interior do produto durante qualquer ponto da secagem desde que a sua forma seja correlacionada a geometria de um sólido perfeito. Entretanto, devido à complexidade das soluções e ao alto custo computacional esses modelos ainda são pouco utilizados na descrição da cinética de produtos biológicos (CARLESSO et al., 2005).

3.5.2.1 Solução Analítica para a equação de difusão

Essas soluções permitem a obtenção do valor exato da variável em qualquer ponto e qualquer intervalo de tempo (SILVA JUNIOR, 2015). Também admite-se a suposição que o volume e a difusividade são constantes ao longo do processo, por isso o encolhimento do produto é negligenciado nessa análise. Uma das vantagens é a rapidez das análises configurando em baixo custo computacional (GAMA, 2014).

A solução analítica para a equação de difusão considerando a geometria de um cilindro finito foi utilizada para descrever as cinéticas de secagem das sementes de jaca sem levar em consideração o fenômeno de encolhimento, como também para a obtenção da difusividade e coeficiente de transferência convectiva de massa por meio do *Software* Analítico desenvolvido durante o período de vigência do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) orientado por Silva Junior (2019) e coorientado pela presente autora. Através do otimizador acoplado ao *software* foi possível determinar os parâmetros físicos ocorridos nos

dados experimentais obtidos pela secagem de sementes de jaca com endocarpo sem a determinação do encolhimento das amostras.

O *software* apresenta quatro menus intitulados “Novo”, “Abrir”, “Exec” e “Result”. Ao clicar em “Novo” o programa abrirá uma aba que lhe dará a opção de colar os dados amostrais. Outra forma de inserção de dados está disposta no menu “Abrir” que direciona o usuário a busca do arquivo no próprio computador ou hardware’s acoplados ao mesmo. Em “Exec” o usuário terá a opção de escolher a condição de contorno que melhor se adeque a amostra, sendo as opções entre primeiro tipo ou terceiro tipo. Ao selecionar a condição de contorno aparecerá a escolha do tipo de geometria da amostra que pode ser parede infinita ou cilindro finito. Após a escolha da geometria, o usuário poderá executar uma simulação ou otimização dos dados. E por fim, “Resul” apresenta os resultados obtidos nos processos de otimização ou simulação em um arquivo de extensão “txt” e “bmp”. A representação da interface do Analitical se encontra na Figura 3.7.

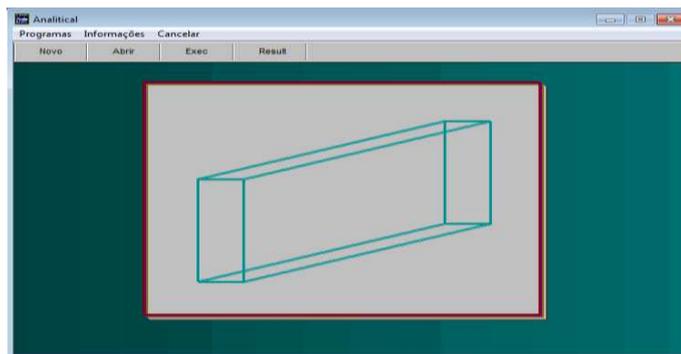


Figura 3.7 - Interface gráfica do Software Analitical.

Fonte: (SILVA JUNIOR, 2015)

3.5.2.1.1 Hipóteses para a obtenção da solução analítica para a equação de difusão

De acordo com o reportado por Silva (2012) na sua tese de doutorado, a solução analítica da equação de difusão é sujeita às seguintes hipóteses:

- a) o cilindro deve ser considerado homogêneo e isotrópico;
- b) a distribuição do teor de umidade dentro do cilindro deve ter simetria radial e axial, e é considerada inicialmente uniforme;
- c) as condições do meio de secagem permanecem as mesmas durante todo o processo;

- d) o único mecanismo de transporte de água dentro do sólido é a difusão líquida;
- e) as dimensões do cilindro não variam durante a difusão;
- f) a difusividade efetiva não varia durante o processo;
- g) a condição de contorno é do terceiro tipo.

4.5.2.1.2 Solução analítica da equação de difusão para a geometria cilíndrica

Para as hipóteses estabelecidas anteriormente, a equação de difusão tem solução analítica para várias geometrias simples, dentre as quais a geometria referente ao cilindro finito. Vale salientar que um cilindro finito pode ser obtido pela interseção de dois sólidos ainda mais simples: o cilindro infinito e a parede infinita, conforme a Figura 3.8a.

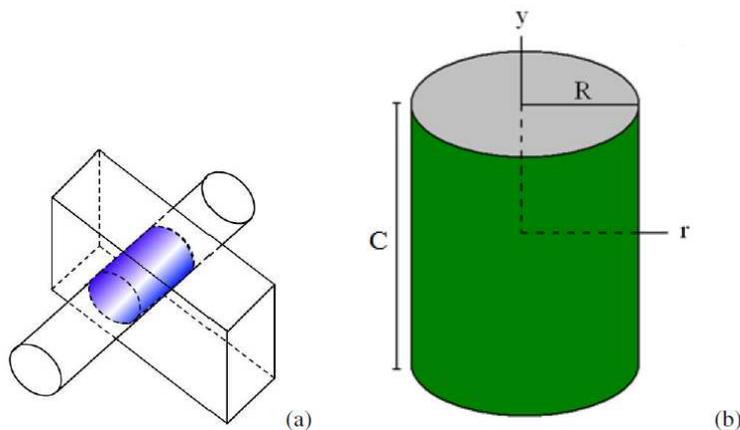


Figura 3. 8 - (a) Interseção de um cilindro infinito e de parede infinita; (b) Cilindro finito de raio R e comprimento C.

Fonte: (SILVA, 2012)

Para a geometria cilíndrica apresentada na Figura 3.8(b), a equação de difusão bidimensional aplicada à difusão de uma propriedade pode ser escrita, em coordenadas cilíndricas, pressupondo as hipóteses estabelecidas ($\partial\Phi/\partial\theta = 0$), da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\Gamma\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right) + S, \quad (3.1)$$

em que:

Φ é a variável dependente de interesse no processo difusivo;

λ e Γ^Φ são os parâmetros do processo;

S é um termo fonte.

Na Equação (3.1), r é definido em relação ao eixo central do cilindro e, juntamente com y define a posição de um ponto no interior do sólido a ser estudado.

Fazendo $\lambda = 1$, $\Gamma^\Phi = D$ (difusividade efetiva de massa), $\Phi = X$ (teor de umidade em base seca) e $S = 0$, a Equação (3.1) pode ser reescrita para descrever o transporte de umidade em um sólido considerado como um cilindro finito, do seguinte modo:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial X}{\partial y} \right), \quad (3.2)$$

A solução analítica a ser apresentada neste trabalho para a Equação (3.2) é referente à condição de contorno convectiva, também chamada de condição de contorno do terceiro tipo, ou ainda condição de contorno de Cauchy. Esta condição é expressa através da imposição de igualdade entre o fluxo interno (difusivo) na superfície do cilindro finito e fluxo externo (convectivo) nas vizinhanças desta superfície:

$$-D \frac{\partial X(r, y, t)}{\partial r} \Big|_{r=R} = h \left[X(r, y, t) \Big|_{r=R} - X_{eq} \right] \quad (3.3)$$

e

$$-D \frac{\partial X(r, y, t)}{\partial y} \Big|_{y=\pm C/2} = h \left[X(r, y, t) \Big|_{y=\pm C/2} - X_{eq} \right] \quad (3.4)$$

em que cada variável das equações anteriores será definida mais à frente.

Para um cilindro homogêneo e isotrópico, de raio R e comprimento C , com teor de umidade inicial uniformemente distribuído X_i , com teor de umidade de equilíbrio X_{eq} , a solução $X(r, y, t)$ da Equação (3.2), para as condições de contorno definidas pelas Equações (3.3) e (3.4), é obtida por separação de variáveis (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992) e resulta em:

$$X(r, y, t) = X_{eq} - (X_{eq} - X_i) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{n,1} A_{m,2} J_0 \left(\mu_{n,1} \frac{r}{R} \right) \cos \left(\mu_{m,2} \frac{y}{C/2} \right) \times \exp \left[- \left(\frac{\mu_{n,1}^2}{R^2} + \frac{\mu_{m,2}^2}{(C/2)^2} \right) Dt \right] \quad (3.5)$$

Conforme foi mencionado anteriormente, nesta solução apresentada está implícita a ideia de que um cilindro finito pode ser obtido pela interseção de dois sólidos ainda mais simples: um cilindro infinito de raio R e uma parede infinita de espessura C.

Retornando à Equação (3.5), deve ser observado que X (r,y,t) é o teor de umidade em base seca numa posição (r,y) do cilindro num instante t, e D é a difusividade efetiva de massa. Ainda com relação à Equação (3.5), os coeficientes $A_{n,1}$ e $A_{m,2}$ são definidos como segue:

$$A_{n,1} = \frac{2Bi_1}{J_0(\mu_{n,1})(Bi_1^2 + \mu_{n,1}^2)}, \quad (3.6)$$

e

$$A_{m,2} = (-1)^{m+1} \frac{2Bi_2(Bi_2^2 + \mu_{m,2}^2)^{1/2}}{\mu_{m,2}(Bi_2^2 + Bi_2 + \mu_{m,2}^2)} \quad (3.7)$$

Nas Equações (3.6) e (3.7), as variáveis referentes ao segundo membro serão definidas mais à frente. Por outro lado, a expressão para o valor médio do teor de umidade, num instante t, é dada da seguinte forma:

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{V} \int X(r, y, t) dV \quad (3.8)$$

A solução da equação de difusão para o valor médio X (t) num cilindro finito em um instante t é obtida pela substituição da Equação (3.5) na Equação (3.8), e é dada por:

$$\bar{X}(t) = X_{eq} - (X_{eq} - X_i) \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} B_{n,1} B_{m,2} \exp \left[- \left(\frac{\mu_{n,1}^2}{R^2} + \frac{\mu_{m,2}^2}{(C/2)^2} \right) Dt \right] \quad (3.9)$$

onde X(t) é o teor de umidade médio em base seca no instante t.

O coeficiente $B_{n,1}$ é definido do seguinte modo:

$$B_{n,1} = \frac{4Bi_1^2}{\mu_{n,1}^2 (Bi_1^2 + \mu_{n,1}^2)} \quad (3.10)$$

em que Bi_1 é o número de Biot referente ao cilindro infinito, e é dado por

$$Bi_1 = \frac{hR}{D} \quad (3.11)$$

O coeficiente $B_{m,2}$ é definido como segue:

$$B_{m,2} = \frac{2Bi_2^2}{\mu_{m,2}^2 (Bi_2^2 + Bi_2 + \mu_{m,2}^2)} \quad (3.12)$$

E nesta expressão Bi_2 é o número de Biot referente à parede infinita, sendo dada pela expressão

$$Bi_2 = \frac{hC/2}{D} \quad (3.13)$$

Nas Equações (3.3), (3.4), (3.11) e (3.13), h é o coeficiente de transferência convectiva de massa e, na solução apresentada, foi imposto o mesmo valor de h para todas as superfícies do cilindro.

Nas Equações (3.6) e (3.10), $M_{n,1}$ μ são as raízes da equação característica para o cilindro infinito, e são calculadas através da seguinte equação transcendental:

$$\frac{J_0(\mu_{n,1})}{J_1(\mu_{n,1})} = \frac{\mu_{n,1}}{Bi_1} \quad (3.14)$$

Sendo J_0 e J_1 as funções de Bessel de primeiro tipo de ordens 0 e 1, respectivamente.

Nas Equações (3.7) e (3.12), $M_{m,2}$ μ são as raízes da equação característica para a parede infinita, e são calculadas através da seguinte equação transcendental:

$$\cot \mu_{m,2} = \frac{\mu_{m,2}}{Bi_2} \quad (3.15)$$

3.5.2.2 Solução numérica para a equação de difusão

A solução numérica é utilizada para descrever casos mais complexos que considera a variação dos parâmetros físicos e/ou do volume do material (SILVA JUNIOR, 2015).

Para a otimização dos parâmetros e simulação do processo foi utilizado uma atualização do *Software Cilindro Finito* desenvolvido por Silva Junior (2015). A nova versão simula a distribuição de umidade no interior do produto para cada ponto (r, y) do cilindro ao longo do tempo, como também simula a distribuição de umidade para cada setor circular ao longo do tempo.

Através do referido foram obtidas as cinéticas de secagem considerando o encolhimento das amostras de sementes de jaca sem endocarpo e a variação da difusividade nas amostras. Também foi verificada a melhor expressão para a difusividade de massa e determinado a distribuição de umidade no interior do produto para diversos intervalos de tempo. Para tal, considerou-se a condição de contorno de terceiro tipo, com a qual é possível verificar a existência de resistência ao fluxo de massa na superfície do produto.

O *Software Cilindro Finito* (Figura 3.9) atua com o intuito de otimizar e simular o processo de secagem.

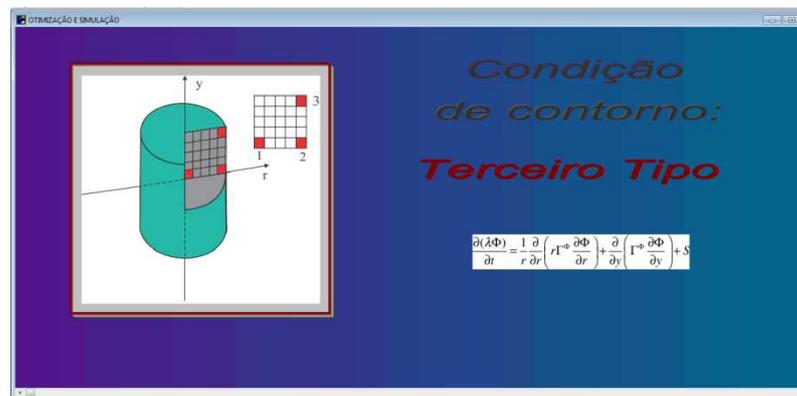


Figura 3. 9 - Interface gráfica do Software Cilindro Finito.

Fonte: (SILVA JUNIOR, 2015)

O *software* possui três menus, os quais são nomeados de “Arquivo”, “Resultados” e “Cancelar otimização/simulação”. Ao clicar na aba “Arquivo” aparecerá quatro opções: “Otimização”, “Simulação”, “Salvar gráfico” (só poderá ser utilizado no final da otimização e simulação) e “Sair”. Para o início do processo de otimização foi aberto o respectivo menu e foi feita a inserção dos dados experimentais, que incluiu a expressão para o raio, expressão para o comprimento, volumes de controle em r, volumes de controle em y, steps de tempo, o valor inicial e de equilíbrio da grandeza de interesse e os coeficientes do termo fonte linearizado.

3. 5. 2. 2. 1 Solução numérica para o caso do Cilindro Finito

Com base na tese de Silva Junior (2015), para a obtenção da solução numérica, foram assumidas as seguintes hipóteses:

- a) o cilindro possui raio R e comprimento L ;
- b) o sólido é homogêneo e isotrópico;
- c) a distribuição da grandeza de interesse no interior do sólido tem simetria radial e axial;
- d) o único mecanismo de transporte de massa dentro do sólido é o mecanismo da difusão;
- e) o raio e o comprimento podem variar durante o processo;
- f) a difusividade efetiva pode variar durante o processo, e o coeficiente de transferência convectiva de massa permanece constante.

O método utilizado para discretização da equação de difusão foi o Método dos Volumes Finitos com uma formulação totalmente implícita (PATANKAR, 1980; SCHÄFER, 2006; MALISKA, 2013).

Devido as hipóteses de simetria, foi considerado apenas o retângulo ilustrado na Figura 3.10, no qual foi criada uma malha uniforme.

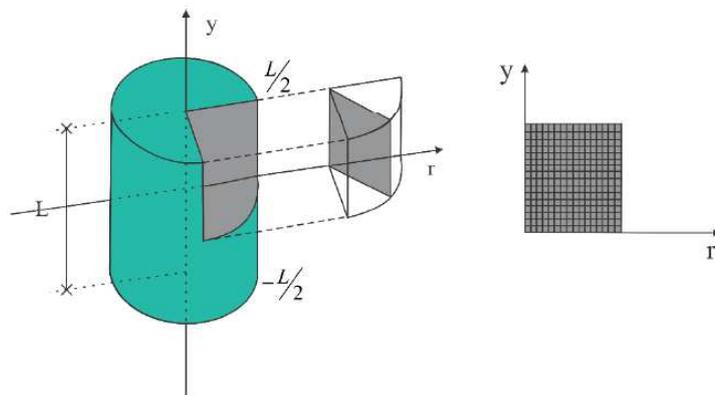


Figura 3. 10 - Retângulo obtido com as hipóteses de simetria.

(SILVA JUNIOR, 2015)

Na Figura 3.11 é apresentado um elemento da malha uniforme, onde é destacado o ponto nodal P , a largura (Δr) e o comprimento (Δy).

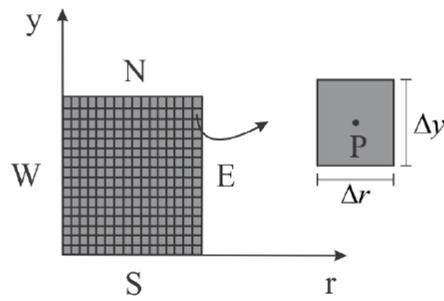


Figura 3. 11 - Malha bidimensional para o caso do cilindro finito.

(SILVA JUNIOR, 2015)

O volume de controle definido para cada elemento da malha é ilustrado na Figura 3.12.

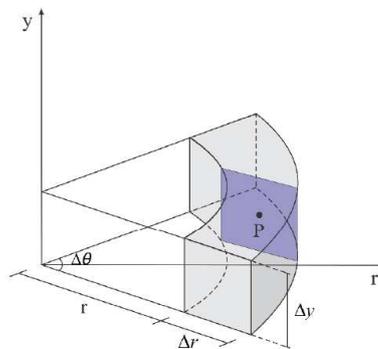


Figura 3. 12 - Volume de controle para geometria cilíndrica.

(SILVA JUNIOR, 2015)

Através da Figura 3.13 é possível notar que existem 9 tipos distintos de volumes de controle: os volumes de controle internos (que não estão em contato com meio externo, e possui vizinhos a oeste, a leste ao norte e ao sul); os volumes de controle ao norte (em contato com meio externo ao norte, e vizinhos a oeste, a leste e ao sul); os volumes de controle ao sul (com o fluxo zero ao sul, e vizinhos a oeste, ao norte e a leste); os volumes de controle a oeste (com fluxo zero a oeste, e vizinhos ao norte, sul e a leste); os volumes de controle ao leste (em contato com o meio externo a leste, e vizinhos ao sul, ao norte e a oeste); o volume de controle nordeste (em contato com o meio externo ao norte e a leste, e vizinhos ao sul e a oeste); o volume de controle sudoeste (com vizinhos ao norte e a leste, e fluxo zero ao sul e a oeste); o volume de controle noroeste (com fluxo zero a oeste, em contato com o meio externo ao norte, e vizinhos a leste e ao sul) e o volume de controle sudeste (com fluxo zero ao sul, em contato com o meio externo a leste, e vizinhos ao norte e a oeste).

Para saber maiores detalhes sobre a discretização da equação de difusão para cada tipo de volume de controle, o leitor deve consultar Silva Junior (2015).

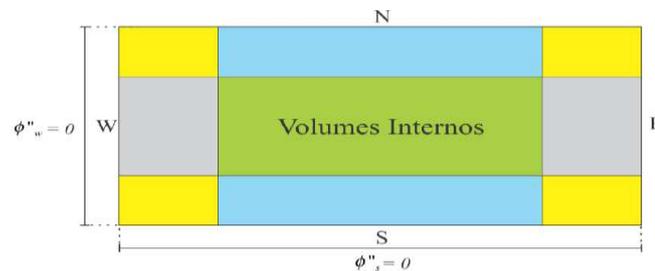


Figura 3. 13 - Tipos de volumes de controle da malha bidimensional.

(SILVA JUNIOR, 2015)

3.6 OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM POR MEIO DE INTERVENÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA

Após a secagem das sementes para a realização da descrição da cinética de secagem, foi realizada otimizações do tempo de secagem das amostras para a elaboração da farinha de sementes de jaca. Os cálculos das otimizações tiveram como base o parâmetro máximo de 15% (g/100g) (b.u.) de teor de umidade determinado para farinhas, amido de cereais e farelos preconizado na RDC N° 263, DE 22 DE SETEMBRO DE 2005 (BRASIL, 2005) que dispõe sobre o regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos.

Para obter a otimização do tempo de secagem para as amostras de sementes de jaca com e sem endocarpo, foram utilizados os dados de teor de umidade em base seca (Equação 3.16) das SJCE 60°C; SJSE 60°C, SJCE 70°C e SJSE 70°C referente à secagem experimental e convertido em base úmida, através da equação abaixo:

$$Mbs = \frac{Mbu}{1 - Mbu} \quad (3.16)$$

onde Mbs é o teor de umidade em base seca e Mbu é o teor de umidade em base úmida.

Assim, se Mbu = 15%, então

$$Mbs = \frac{0,15}{1 - 0,15}$$

$$Mbs = 0,1765$$

Os demais cálculos relacionados a obtenção dos tempos ótimos de intervenção, serão apresentados na seção 4.5.

3.7 PROCESSO DE ELABORAÇÃO DAS FARINHAS

3.7.1 Elaboração das Farinhas de Sementes de Jaca

As sementes de jaca com e sem endocarpo passaram pelas etapas descritas nas Figuras 3.3 e 3.4. Para o processamento da Farinha de Sementes de Jaca com Endocarpo (FSJCE) foi considerado tanto a inserção da película (Parte Interna – PI), quanto do endocarpo (Parte Externa - PE), essas podem ser melhores visualizadas na Figura 3.17. Em seguida, as sementes devidamente acondicionadas em recipientes plásticos foram encaminhadas para o processo de secagem, com exceção das amostras *in natura* que não receberam tratamento térmico e foram imediatamente acondicionadas e analisadas. As demais amostras foram dispostas em cestos (Figura 3.6a) devidamente identificados e encaminhadas para a estufa previamente estabilizada nas respectivas temperaturas permanecendo até o término do tempo descrito para cada amostra (Quadro 3.3).

Quadro 3.3 - Tempo de secagem das sementes para elaboração da farinha de sementes de jaca.

Amostras	Tempo de secagem	
	Intervenção	Final
SJSE <i>in natura</i>	*	*
SJCE <i>in natura</i>	*	*
SJCE 60°C	1470 min (24h30min)	1920 min (32h)
SJSE 60°C	**	660 min (11h)
SJCE 70°C	925 min	2100 min (35h)
SJSE 70°C	**	720 min (12h)

SJCE: semente de jaca com endocarpo; **SJSE:** semente de jaca sem endocarpo. * Não foi aplicado tratamento térmico (secagem); **Para as amostras sem endocarpo não foram calculados os tempos de otimizações, pois o teor de umidade dessas não atingiu os 15% (b.u) utilizado como parâmetro no cálculo.

Os fluxogramas de elaboração das FSJCE e FSJSE estão representados na Figura 3.14.

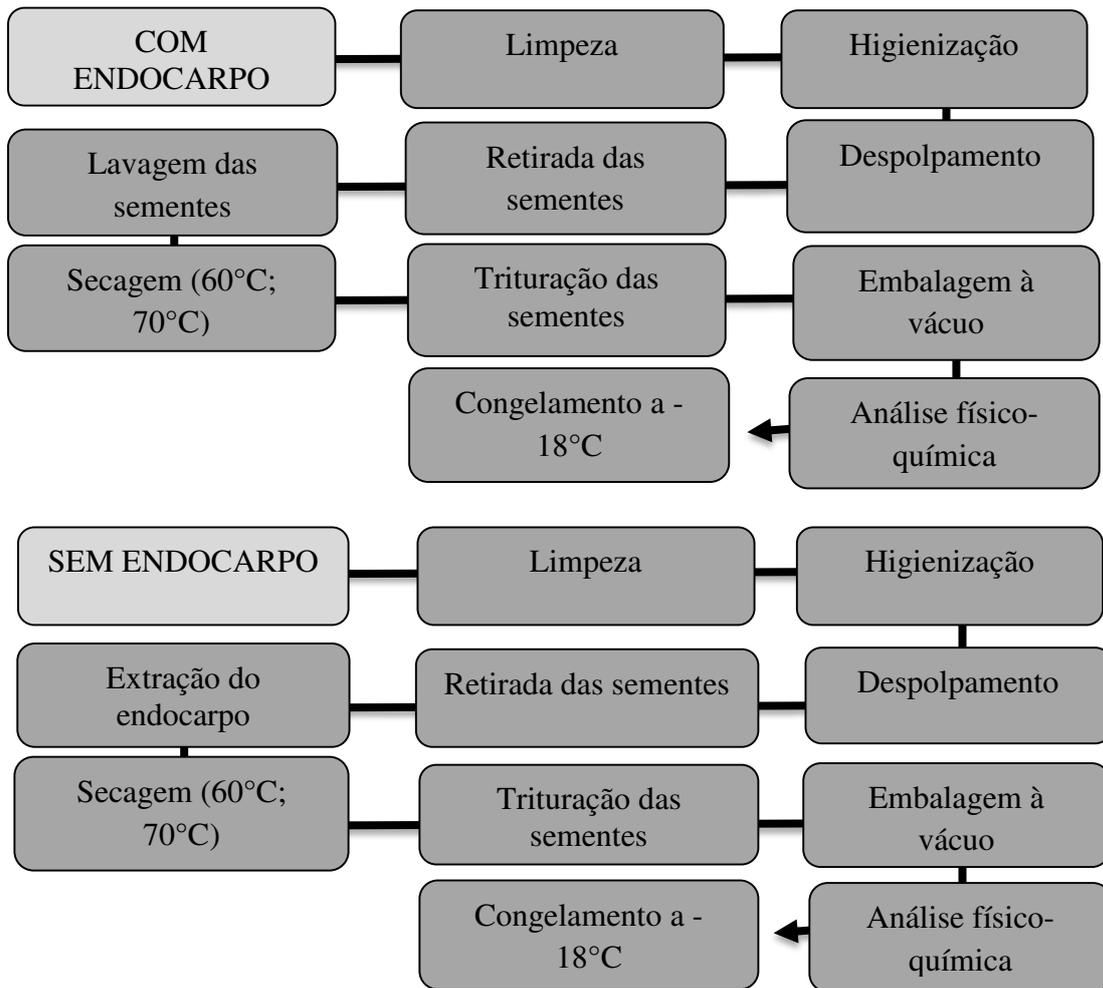


Figura 3. 14 - Fluxograma de elaboração das farinhas de sementes de jaca com e sem endocarpo submetidas à secagem.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

Após a secagem, as sementes foram trituradas em liquidificador industrial da marca Colombo *Premium*, modelo BR com capacidade para 4 litros. Posteriormente, as amostras foram embaladas a vácuo em embaladora Sulpack modelo SVC 200 Digitale e encaminhadas para a realização das análises físico-química de umidade, atividade de água, pH e acidez. Logo após, as amostras foram armazenadas em temperatura de -18°C para a realização das demais análises, proteína, lipídios e cinzas.

3.7.2 Elaboração das Farinhas do Endocarpo da Semente de Jaca

Para a obtenção das farinhas do endocarpo das sementes de jaca primeiramente foi realizada a limpeza e higienização da jaca. Logo após ocorreu o despulpamento caracterizado pela separação da polpa e semente de jaca, sendo as sementes lavadas e dispostas em recipientes para se submeter à etapa de extração do endocarpo (PE) e película (PI). Para a retirada, as sementes foram colocadas em água em ebulição por cerca de 1 minuto. Logo após foram retiradas da água e colocadas em uma peneira inox para a saída da água superficial. Finalmente com o auxílio de uma faca as PE e PI foram removidas e acondicionadas em recipiente plástico fechado. Após a obtenção dos endocarpos e películas úmidas (Figura 3.15) decorreu a secagem em estufa previamente estabilizadas nas temperaturas de 60°C e 70°C. Posteriormente, ocorreu o processamento da farinha, obtida pelo processo de trituração dos endocarpos e películas em liquidificador industrial da marca Colombo *Premium*, modelo BR com capacidade para 4 litros. Por fim, as amostras foram embaladas a vácuo em embaladora Sulpack modelo SVC 200 Digitale e encaminhadas para a análises físico-química de umidade, atividade de água, pH e acidez. As amostras foram armazenadas em temperatura de -18°C para a realização das demais análises, proteína, lipídios e cinzas.

Os tempos de secagens empregados na elaboração dessas farinhas foram os mesmos utilizados para a secagem das sementes de jaca com endocarpo (Quadro 3.3). As etapas de elaboração da farinha de endocarpo estão representadas na Figura 3.16.



Figura 3. 15 - Endocarpos e películas úmidas retiradas das sementes de jaca.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

Para a visualização das partes utilizadas desferiu-se um corte longitudinal na semente representando as duas partes sendo a primeira o endocarpo (PE) e a segunda a película (PI) (Figura 3.17). Para facilitar a escrita e entendimento do trabalho, as farinhas elaboradas com endocarpo e película serão referidas apenas como Farinha de Endocarpos de Sementes de Jaca (FESJ).

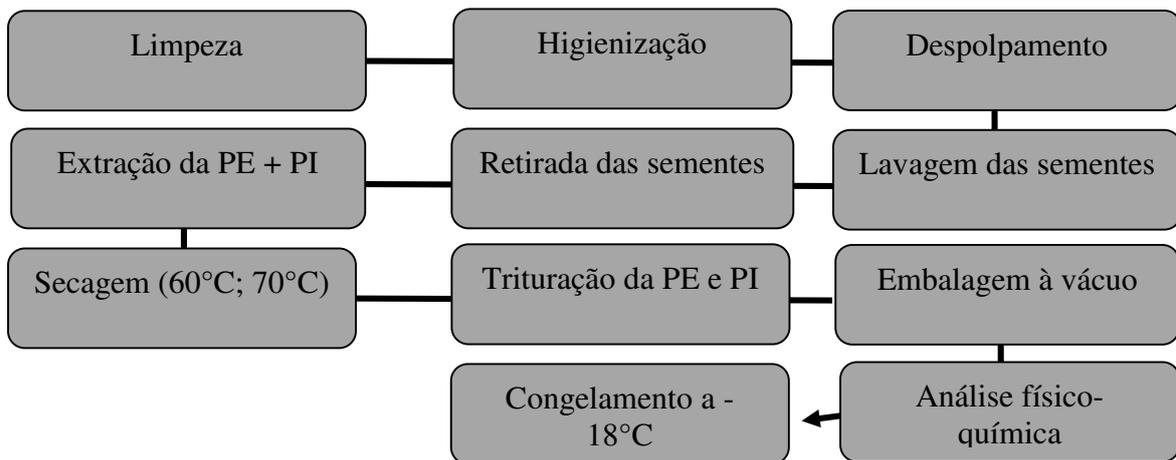


Figura 3. 16 - Fluxograma de obtenção da farinha do endocarpo das sementes de jaca.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019).



Figura 3. 17 - Representação do endocarpo e da película interna da semente de jaca.

PE: Endocarpo (parte externa); **PI:** Película (parte interna). Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2019).

3. 8 DETERMINAÇÃO DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

3.8.1 Determinação de umidade

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

Inicialmente foram colocadas as cápsulas de alumínio na estufa por aproximadamente 1 hora, logo após retirou-se e colocou-se no dessecador até atingir a temperatura ambiente (aproximadamente 20 minutos). Os pesos das cápsulas foram aferidos e anotados e logo após foi pesado em cada cápsula cerca de 3,0 g da amostra. Posteriormente, as amostras foram colocadas em estufa previamente estabilizada a 105°C durante 24 horas. Logo após, foram transferidas para o dessecador até alcançar a temperatura ambiente. Em seguida, foi mensurada a massa seca por meio da pesagem em balança analítica. Por fim, procedeu-se o cálculo da Equação (3.17) para a obtenção do teor de umidade.

Cálculo:

Umidade (%) =

$$\frac{N \times 100}{P \text{ ou } V}$$

(3.17)

Onde: N = perda de peso (amostra seca) e P ou V = peso ou volume da amostra úmida (g ou mL)

3.8.2 Determinação de Cinzas ou Resíduo Mineral Fixo (RMF)

As cinzas ou RMF foram determinadas por meio do resíduo oriundo da incineração em forno tipo mufla estabilizado a temperatura de 550°C de acordo com o descrito nos métodos físico-químicos para análise de alimentos do Instituto Adolf Lutz (ZENEBO; PASCUET; TIGLEA, 2008).

Foi pesado cerca de 3g das amostras e colocadas em cápsulas de porcelana previamente aquecidas em mufla a 550°C ± 5°C por 24 horas e resfriada em dessecador até atingir a temperatura ambiente e posterior determinação do peso. As amostras foram colocadas sobre uma manta aquecedora para carbonização. Em seguida, as mesmas foram encaminhadas para a incineração em forno mufla estabilizado a 550°C ± 5°C por 5 horas até a eliminação completa do carvão, obtendo cinzas de coloração branca. Posteriormente, as amostras foram resfriadas em dessecador até a temperatura ambiente e depois pesadas por meio de balança analítica. O processo de aquecimento e resfriamento repetiu-se com intervalo de 1 hora até as amostras

atingirem o peso constante. O cálculo da Equação (3.18) foi realizado para determinação das cinzas.

Cálculo:

Cinzas (%) =

$$\frac{100 \times N}{P}$$

(3.18)

Onde: N= peso em g de cinzas e P = peso em g de amostra

3.8.3 Determinação de acidez

Para as farinhas das sementes de jaca, a acidez foi determinada por meio do método de acidez titulável de acordo com o descrito nos métodos físico-químicos para análise de alimentos do Instituto Adolf Lutz (2008). Entretanto, para as farinhas da película de sementes de jaca, devido às mesmas apresentarem coloração escura, foi utilizado o método da titulação potenciométrica.

Para a determinação da acidez das farinhas das sementes de jaca, foi pesado em Elenmeyer cerca de 10,0 g da amostra por meio de balança analítica. Logo após foram adicionados 100 mL de água destilada para a homogeneização da matéria. Posteriormente, colocou-se 3 gotas da solução de fenolftaleína a 1% dentro da amostra e titulou-se com solução de hidróxido de sódio 0,1 M até a obtenção do ponto de viragem indicado pelo surgimento da coloração rósea. Praticamente o mesmo procedimento foi executado para a determinação da acidez nas farinhas da película de sementes de jaca, entretanto, não foi utilizada a solução de fenolftaleína, mas sim o pHmetro para indicar o pH da amostra ao titular a solução de hidróxido de sódio até a faixa de pH de 8,2 a 8,4 utilizado como referência para indicar o ponto de viragem da fenolftaleína. Nos dois procedimentos anotou-se a quantidade de hidróxido de sódio utilizado para o referido cálculo da Equação (3.19) para determinação da acidez, ao qual procede:

Cálculo:

Acidez em solução normal (%) =

$$\frac{V \times f \times 100}{P \times c}$$

(3.19)

Onde:

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

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

P = nº de g da amostra usado na titulação

c = correção para solução de NaOH 1M

3.8.4 Determinação de pH

A leitura do pH foi executada pela determinação da atividade dos íons hidrogênio por meio da medida potenciométrica usando eletrodo acoplado no pHmetro de acordo com o descrito nos métodos físico-químicos para análise de alimentos (ZENEBOON; PASCUET; TIGLEA, 2008).

Com o auxílio de béckeres foram pesados aproximadamente 10,0g das amostras e adicionados 100 mL de água destilada para homogeneização da matéria. Em seguida, com o PHmetro previamente higienizado com água destilada e calibrado com as soluções tampões de pH 7,0 e pH 4,0 foi determinada a leitura do pH das amostras com a introdução do eletrodo na solução em agitação suave, após a estabilização da leitura o valor do pH foi anotado.

3.8.5 Determinação de lipídios

O teor de lipídios das amostras foi obtido por meio do método de determinação de gordura de FOLCK (1957).

Com o auxílio de béckeres foram pesados aproximadamente 2,0g da amostra e logo após adicionado 30 mL da solução de clorofórmio metanol. A mistura foi colocada em um funil acoplado em uma proveta graduada contendo papel absorvente para ocorrer a filtração da mistura. Em seguida, transferiu-se mais 10mL de clorofórmio metanol para decorrer uma segunda filtração. Posteriormente a quantidade do volume do conteúdo filtrado foi anotado. Em seguida, 20% do volume lido anteriormente foi adicionado de solução de sulfato de sódio a 1,5%, procedendo-se posterior agitação resultando na separação de fases da mistura. O material da fase superior foi descartado anotando-se o valor obtido da fase inferior e retirando-se três alíquotas de 5 mL desse para submeter a 105°C em estufa durante 5 minutos, com posterior resfriamento em dessecador por cerca de 20 minutos, por fim, procedeu-se a pesagem em balança analítica previamente tarada para proceder o cálculo da Equação (3.20), como descrito abaixo:

Cálculo para determinação do teor de gordura:

Gordura (%) =

$$\frac{(P_1 \times V_b) \times 100}{(V_a \times P_2)}$$

(3.20)

P_1 = Peso dos lipídeos na alíquota tomada (após a estufa)

P_2 = Peso da amostra

V_a = Volume da alíquota (5mL)

V_b = Volume inferior do extrato lido na proveta

3.8.6 Determinação do teor de proteínas

A determinação do teor de proteínas se deu por meio do método de Kjeldahl modificado com algumas alterações com base no estabelecido na AOAC (2005).

Para a análise, primeiramente foi pesado no tubo de Kjeldahl 1,0g de mistura catalítica (sulfato de potássio e sulfato de cobre na proporção 96:4). Logo após, pesou-se dentro do papel manteiga cerca de 0,3g da amostra que foi enrolada e colocada dentro do tubo. Após a pesagem pipetou-se 4 mL de ácido sulfúrico e iniciou-se a etapa de digestão executado com temperatura inicial de 100°C e aumento de 50°C a cada meia hora até o máximo de 350°C até a obtenção de uma solução límpida com coloração esverdeada. Após, iniciou-se a etapa de destilação, o tubo foi colocado no destilador ao qual vai receber uma solução de hidróxido de sódio a 40% até ocorrer a neutralização da amostra e excesso de base sendo caracterizada pela mudança da coloração da substância apresentando-se marrom, momento que foi suspenso a adição do hidróxido de sódio. Posteriormente, ligou-se o vapor e destilou-se em um erlenmeyer contendo uma substância de ácido bórico a 2% e um indicador misto com coloração rosa avermelhado até a coleta de cerca de 60mL da substância amostral que ao entrar em contato com as substâncias contidas no erlenmeyer obteve um tom azulado. Por fim, titulou-se com ácido clorídrico a 0,1 M até a obtenção da cor inicial (rosa avermelhado). O volume gasto na titulação foi anotado e utilizado no cálculo da Equação (3.21) para determinação da proteína bruta.

O nitrogênio total (NT) é determinado pela seguinte equação:

$$NT = \frac{(V_a - V_b) \times F \times 0,1 \times 0,014 \times 100}{P_1}$$

Onde:

NT – teor de nitrogênio total na amostra, em percentagem;

Va – volume da solução de ácido clorídrico gasto na titulação da amostra, em mililitros;

Vb – volume da solução de ácido clorídrico gasto na titulação do branco, em mililitros;

F – fator de correção para o ácido clorídrico 0,01 mol/L;

P1 – massa da amostra (em gramas).

Cálculo para determinação da Proteína Bruta (PB)

$$PB = NT \times F_N \quad (3.21)$$

Onde:

PB – teor de proteína bruta na amostra, em percentagem;

F_N – 6,25

3.8.7 Determinação de carboidratos

O teor de carboidratos das amostras foi determinado por meio da diferença entre as médias das porcentagens de umidade, cinzas, lipídeos e proteínas, considerando a diferença como a quantidade de carboidratos presente na amostra (Equação 3.22).

Cálculo:

$$\text{Carboidratos (\%)} = 100 - (\% \text{ *umidade* } + \text{ *cinzas* } + \text{ *lipídeos* } + \text{ *proteínas*}) \quad (3.22)$$

3.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram compilados em planilha personalizada do Microsoft Office Excel 2007 e posteriormente submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% através do *Software* Statistica 7.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DADOS EXPERIMENTAIS DA SECAGEM

Na Tabela 4.1 estão dispostos os dados experimentais de teor de umidade inicial, teor de umidade de equilíbrio e tempo de secagem das sementes de jaca com e sem endocarpo submetido a 60°C e 70°C.

Após a análise dos dados pode ser observado que a presença de endocarpo nas amostras mostrou-se diretamente proporcional com o aumento do tempo de secagem. Os maiores tempos de secagem foram de 1920 min e 2100 min observados na secagem das sementes com endocarpos submetidas a 60°C e 70°C, respectivamente. Entretanto, a ausência do endocarpo refletiu na redução de 1260 min para as sementes a 60°C e 1380 min para as sementes a 70°C impactando significativamente na redução das perdas de nutrientes, no gasto de energia envolvida no processo e consequentemente nos custos total de produção.

Tabela 4. 1 - Dados experimentais de temperatura, teor de umidade inicial e de equilíbrio e tempo de secagem das sementes de jaca com e sem endocarpo.

Amostras	\bar{X}_i (bs)	\bar{X}_{eq} (bs)	T (min)
SJCE 60°C	1,324	0,123	1920
SJSE 60°C	0,977	0,232	660
SJCE 70°C	1,070	0,078	2100
SJSE 70°C	1,035	0,176	720

SJCE: semente de jaca com endocarpo; SJSE: semente de jaca sem endocarpo; X_i (bs): teor de umidade inicial; X_{eq} (bs): teor de umidade de equilíbrio; t (min): tempo em minutos.

Em contrapartida, a temperatura do ar de secagem não apresentou influência na redução do tempo de secagem das sementes, quando comparado a presença do endocarpo que aumentou consideravelmente o tempo de secagem das sementes. O menor tempo de secagem foi observado nas amostras sem endocarpo submetidas a temperatura de 60°C e 70°C.

4.2 MODELOS EMPÍRICOS USADOS NA MODELAGEM DOS DADOS EXPERIMENTAIS

4.2.1 Dados do melhor ajuste dos modelos empíricos aos dados experimentais

Na tabela 4.2 são apresentados os parâmetros utilizados para determinar o melhor ajuste dos dados experimentais aos modelos empíricos.

Tabela 4. 2 - Resultados das simulações das cinéticas de secagem descritas por expressões empíricas por meio do Software LABFit.

Amostras	Modelo	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	χ^2
SJCE 60°C	1	1,555x10 ⁻³	5,988x10 ⁻²	0,9911	4,328x10 ⁻²
	2	0,978	1,504x10 ⁻³	0,9925	3,638x10 ⁻²
	3	1,184x10 ⁻³	3,550x10 ⁻⁷	0,9982	3,480x10 ⁻²
	4	6,430x10 ²	0,624	0,9960	2,503x10 ⁻²
	5	3,943x10 ⁻²	3,943x10 ⁻²	0,9911	4,328x10 ⁻²
	6	1,520x10 ⁻³	8,035x10 ⁻⁴	0,9910	4,305x10 ⁻²
	7	0,976	1,509x10 ⁻³	0,9924	3,700x10 ⁻²
	8	1,555x10 ⁻²	9,775x10 ⁻²	0,9916	3,897x10 ⁻²
	9	0,889	-5,959x10 ⁻⁴	0,9348	0,270
	10	0,978	1,504x10 ⁻³	0,9925	3,638x10 ⁻²
SJSE 60°C	1	8,120x10 ⁻³	0,105	0,9859	0,105
	2	0,909	6,749x10 ⁻³	0,9843	4,754x10 ⁻²
	3	-4,670x10 ⁻³	5,166x10 ⁻⁶	0,9435	0,394
	4	7,938x10 ¹	0,918	0,9941	2,104x10 ⁻²
	5	9,020x10 ⁻²	9,003x10 ⁻²	0,9859	0,105
	6	3,647x10 ⁻³	4,408x10 ⁻²	0,9975	7,818x10 ⁻³
	7	0,905	6,907x10 ⁻³	0,9848	4,562x10 ⁻²
	8	0,158	4,082x10 ⁻²	0,9946	3,429x10 ⁻²
	9	0,744	-1,460x10 ⁻³	0,8097	0,545
	10	0,909	6,749x10 ⁻³	0,9843	4,754x10 ⁻²
SJCE 70°C	1	1,934x10 ⁻³	5,861x10 ⁻²	0,9987	7,228x10 ⁻³
	2	0,100	1,950x10 ⁻³	0,9987	6,880x10 ⁻³
	3	-1,356x10 ⁻³	4,458x10 ⁻⁷	0,9870	8,309x10 ⁻²
	4	4,545x10 ⁻²	0,739	0,9956	2,283x10 ⁻²
	5	4,397x10 ⁻²	4,397x10 ⁻²	0,9987	7,228x10 ⁻³
	6	2,093x10 ⁻³	-3,204x10 ⁻³	0,9992	4,512x10 ⁻³
	7	0,100	1,958x10 ⁻³	0,9986	7,164x10 ⁻³
	8*	-	-	-	-
	9	0,850	5,587,10 ⁻⁴	0,8431	0,770
	10	0,100	1,950x10 ⁻³	0,9987	6,880x10 ⁻³
SJSE 70°C	1	7,544x10 ⁻³	5,966x10 ⁻²	0,9907	8,487x10 ⁻²
	2	0,918	6,395x10 ⁻³	0,9892	3,621x10 ⁻²
	3	-4,312x10 ⁻³	4,392x10 ⁻⁶	0,9477	0,385
	4	8,781x10 ¹	0,907	0,9971	1,276x10 ⁻²
	5	8,693x10 ⁻²	8,679x10 ⁻²	0,9907	8,487x10 ⁻²
	6	3,717x10 ⁻³	3,884x10 ⁻²	0,9987	4,361x10 ⁻³
	7	0,913	6,538x10 ⁻³	0,9896	3,420x10 ⁻²
	8*	-	-	-	-
	9	0,747	-1,346x10 ⁻³	0,8090	0,589
	10	0,918	6,395x10 ⁻³	0,9892	3,621x10 ⁻²

Não houve ajuste por meio da expressão de Two Term Exponential para as amostras de sementes de jaca com e sem películas submetidas à temperatura de 70°C. χ^2 : Qui-quadrado.

De acordo com as análises dos parâmetros de Coeficiente de Determinação (*R*²) e qui-quadrado (χ^2), dispostos na tabela 4.2, foi observado que o modelo 6 (Silva et alii) de Silva et al. (2012) apesar de não ter determinado a melhor descrição para o experimento de 60°C com endocarpo com parâmetros de *R*² (0,9910) e χ^2 (4,305x10⁻²) foi considerado o modelo que

descreveu de forma satisfatória os dados experimentais de 60°C sem endocarpo R^2 (0,9975) e χ^2 ($7,818 \times 10^{-3}$), 70°C com endocarpo R^2 (0,9992) e χ^2 ($4,512 \times 10^{-3}$), e 70°C sem endocarpo R^2 (0,9987) e χ^2 ($4,361 \times 10^{-3}$), pois apresentou os melhores valores nos parâmetros descritos anteriormente. O modelo de Midilli et al (2010) apresentou o pior ajuste para as condições experimentais.

O modelo de Silva et alii também descreveu satisfatoriamente a cinética de secagem de broto da palma apresentando $R^2 > 0,99$ e χ^2 variando entre 0,1474 a 0,1937 (PEREIRA et al., 2017).

Resultados diferentes foram encontrados na descrição da secagem de produtos agrícolas, concluindo que os melhores modelos foram os de Page encontrados por Silva et al., (2018) para grãos de feijão carioca, os modelos de Midilli e de aproximação da difusão para secagem de sementes de melão por Melo et al., (2016).

A Figura 4.1 apresenta as curvas de ajustes do modelo de Silva et alii aos dados experimentais.

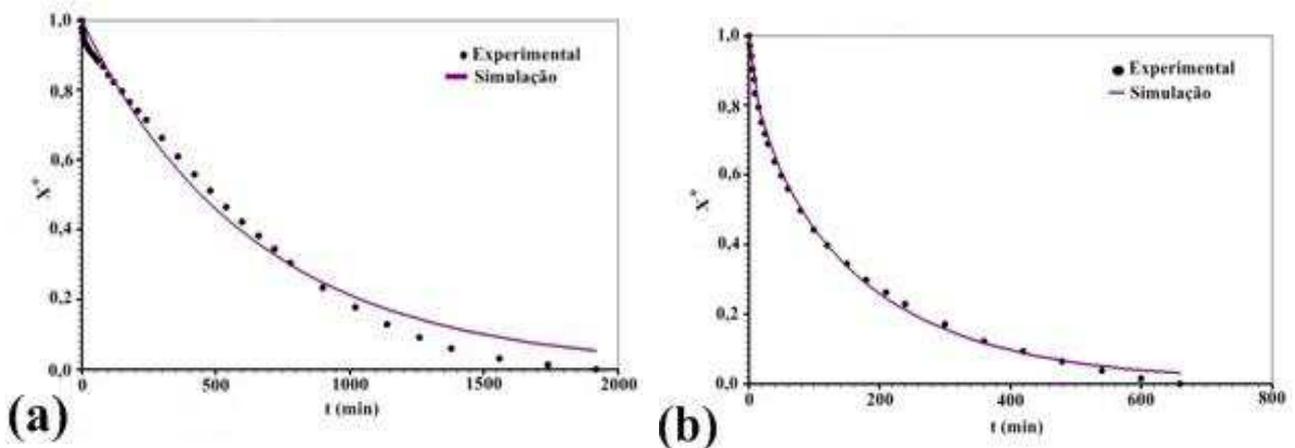


Figura 4.1 - Curvas do ajuste do modelo de Silva et alii aos dados experimentais do teor de umidade adimensional em função do tempo em minutos gerados por meio do software LABFit: (a) SJCE 60°C ; (b) SJSE 60°C; (c) SJCE 70°C; (d) SJSE 70°C.

Continua...

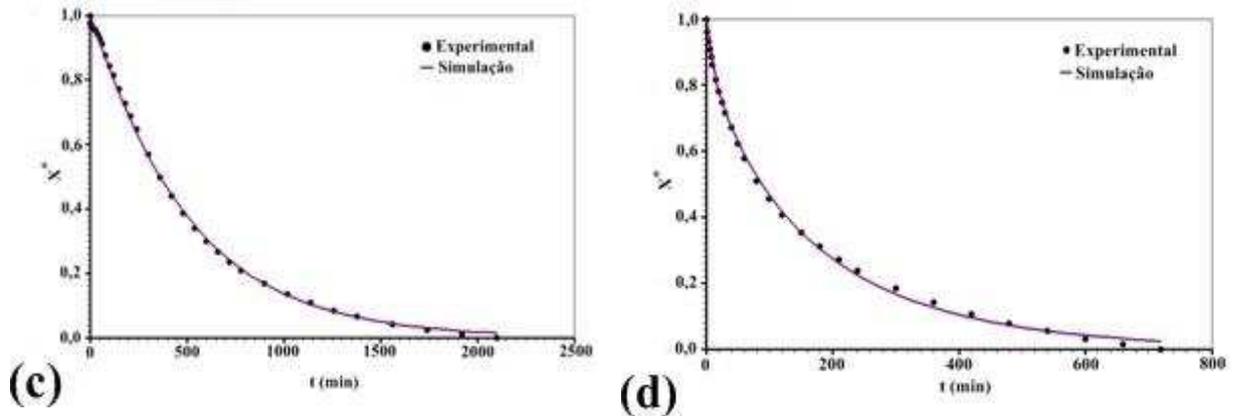


Figura 4.1 - Curvas do ajuste do modelo de Silva et alii aos dados experimentais do teor de umidade adimensional em função do tempo em minutos gerados por meio do software LABFit: (a) SJCE 60°C; (b) SJSE 60°C; (c) SJCE 70°C; (d) SJSE 70°C.

Os gráficos da figura acima corroboram com o observado através dos parâmetros de Coeficiente de Determinação (R^2) e Qui-quadrado (χ^2), descritos na Tabela 4.2, indicando que o modelo de Silva et alii proporcionou o melhor ajuste aos dados experimentais.

4.2.1.1 Cinética de secagem

A Figura 4.2 representa as simulações da cinética de secagem obtida através do modelo de Silva et alii para todas as condições experimentais.

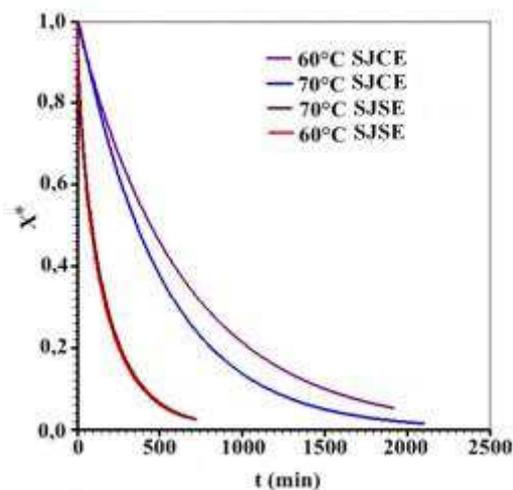


Figura 4.2- Curvas de simulações da cinética de secagem em função da umidade adimensional das sementes de jaca com e sem endocarpo submetidas a temperaturas de 60°C e 70°C obtidas por meio do modelo de Silva et alii.

Notou-se que a temperatura do ar de secagem não apresentou influência significativa no tempo de secagem das sementes sem endocarpo, porém a presença do endocarpo está

diretamente relacionada ao aumento do tempo de secagem (Figura 4.2), sugerindo uma influência do endocarpo na resistência da entrada de calor e perda de umidade da matéria experimental.

Resultados diferentes foram encontrados no estudo de Jerônimo (2012) ao qual analisou sementes de jaca sem endocarpo e verificou a influência do aumento da temperatura na velocidade da transferência de massa.

4.2.1.2 Dados da taxa de secagem por meio de modelos empíricos

Após a definição do melhor modelo de descrição dos dados, esse foi utilizado para a obtenção da taxa de secagem através da derivada do modelo de Silva et alii representada pela Equação 4.1, descrita abaixo (SILVA et al., 2014):

$$\frac{dX^*}{dt} = -\left(a + bt^{-1/2} / 2\right)e^{-at-b\sqrt{t}} \quad (4.1)$$

4.2.1.2.1 Taxa de secagem

A Figura 4.3 descreve as taxas de secagem obtidas por meio do modelo de Silva et al. (2012).

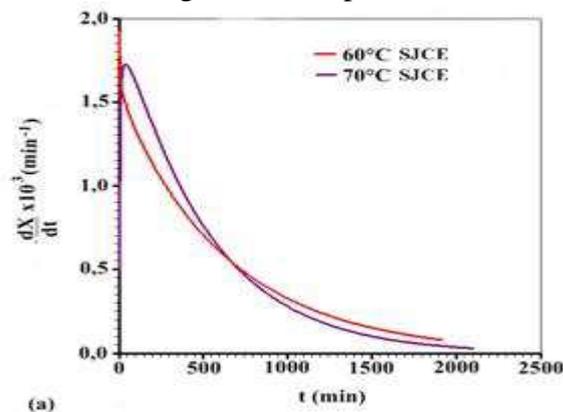


Figura 4. 3 - Curvas da taxa de secagem das sementes de jaca em base seca das amostras sem endocarpo obtida através do modelo de Silva et alii: (a) 60°C e 70°C com endocarpo; (b) 60°C e 70°C sem endocarpo.

Continua...

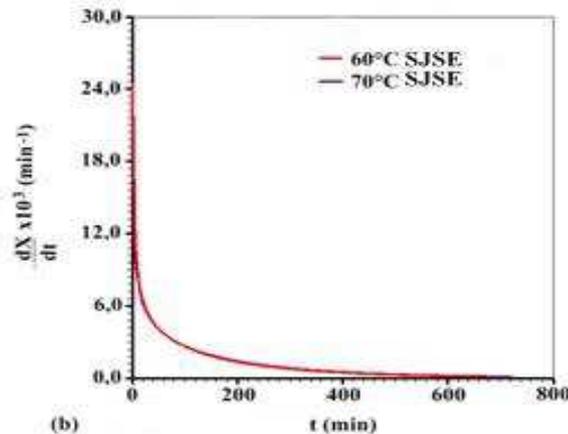


Figura 4.3 - Curvas da taxa de secagem das sementes de jaca em base seca das amostras sem endocarpo obtida através do modelo de Silva et alii: (a) 60°C e 70°C com endocarpo; (b) 60°C e 70°C sem endocarpo.

Na Figura 4.3a observou-se um curto período de indução para a temperatura de 70°C no tempo inicial da secagem, período este que ocorre a estabilização da temperatura superficial das sementes com o ar de secagem, logo após, o período de taxa decrescente foi predominante observado até o X_{eq} . Outro fato interessante é o aumento da taxa de secagem das amostras submetidas a 60°C em relação a 70°C, a partir dos 700 min de secagem permanecendo até o alcance do equilíbrio. Tais fenômenos podem ter ocorrido devido ao retardo provocado pelo período de indução impactando na redução da taxa de secagem e consequente aumento do tempo na amostra submetida a 70°C.

Influência foi observada com a presença e ausência do endocarpo nas sementes. De acordo com as Figuras 4.3a e 4.3b, respectivamente, é possível afirmar que a presença do endocarpo reduz a taxa de secagem, ou seja, as sementes secam mais lentamente com tempo de secagem estimado entre 1920 min para 60°C e 2100 min para 70°C, entretanto, na ausência do endocarpo obtemos maiores taxas de secagem de acordo com o constatado pelo tempo estimado de secagem de 660 min para 60°C e 720 min para 70°C. Deste modo, sugere-se que o endocarpo exerce forte influência sobre o tempo e velocidade de secagem das sementes de jaca.

Entretanto, observando separadamente as Figuras 4.3a e 4.3b podemos concluir que o período de taxa de secagem das amostras de sementes submetidas a 60°C e 70°C com endocarpo foi maior no início do processo, e reduziu a medida que as sementes alcançavam o teor de umidade de equilíbrio. Para as amostras de 60°C e 70°C sem endocarpo o período de taxa decrescente foi predominante no processo.

Comportamento similar foi observado na secagem de sementes de amendoim realizada por Nascimento (2009) que verificou que as sementes de amendoim com endocarpo

apresentaram menor taxa de secagem, ou seja, a secagem ocorreu mais lentamente quando comparado a sementes sem endocarpo, sugerindo que o endocarpo atuou como barreira ao transporte de massa.

4.3 OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO POR MEIO DA SOLUÇÃO ANALÍTICA

Na Tabela 4.3 são apresentados os dados da otimização por meio da solução analítica para as sementes de jaca. As cinéticas de secagem de sementes de jaca obtidas por meio da solução analítica para as amostras de sementes submetidas a 60°C com endocarpo, 60°C sem endocarpo, 70°C com endocarpo e 70°C sem endocarpo, podem ser visualizadas na Figura 4.4.

Tabela 4. 3 - Resultado da secagem de sementes de jaca utilizando solução analítica para a equação de difusão.

Amostras	h_w ($m^2 \text{ min}^{-1}$)	D_w ($m^2 \text{ min}^{-1}$)	Bi	R ²	χ^2
SJCE 60°C	$6,21 \times 10^{-6}$	$6,46 \times 10^{-7}$	$8,84 \times 10^{-2}$	0,9906	$3,64 \times 10^{-2}$
SJSE 60°C	$1,32 \times 10^{-4}$	$6,21 \times 10^{-8}$	19,01	0,9985	$4,15 \times 10^{-3}$
SJCE 70°C	$7,99 \times 10^{-6}$	$7,99 \times 10^{-7}$	$9,19 \times 10^{-2}$	0,9986	$6,93 \times 10^{-3}$
SJSE 70°C	$1,28 \times 10^{-4}$	$6,44 \times 10^{-8}$	18,85	0,9993	$2,04 \times 10^{-3}$

h_w : Coeficiente de transferência convectiva de massa; D_w : Difusividade efetiva de massa.

Analisando a Tabela 4.3 notou-se que o número de Biot aumentou com a ausência do endocarpo, sugerindo que as amostras com endocarpo apresentaram resistência à saída do fluxo de água verificada tanto pelo número de Biot $8,84 \times 10^{-2}$ para SJCE 60°C e $9,19 \times 10^{-2}$ para SJCE 70°C (Tabela 4.3) quanto pelo coeficiente de transferência convectiva de massa (resistência superficial) de $6,21 \times 10^{-6}$ para 60°C e $7,99 \times 10^{-6}$ para 70°C. Tal resistência está atrelada a barreira formada pela casca (endocarpo) da semente que atua na redução da taxa de secagem da matéria dificultando a saída do fluxo de água.

Não foi verificada influência significativa da temperatura sobre o número de Biot no presente trabalho. Entretanto Aires et al. (2017) ao estudar a desidratação osmótica e secagem complementar de fatias de maçã, identificou que o aumento da temperatura exerceu efeito tanto sobre o número de Biot quanto na difusividade efetiva de massa.

Ainda na Tabela 4.3 pode ser observado que o aumento da difusividade efetiva de massa (meio interno) foi diretamente influenciado pela elevação da temperatura, ou seja, a velocidade de transferência de massa do interior do cilindro para a superfície ocorreu mais rapidamente

para as amostras submetidas a 70°C, resultante da redução da resistência a saída de água devido ao aumento da energia empregada no processo.

Sousa et al. (2017) e Silva et al. (2018) ao analisarem a secagem de sementes de melão e polpa de pequi, respectivamente, também constataram que a difusividade aumentou de acordo com a elevação da temperatura.

Para Reis et al. (2011) tal fato pode ser explicado pela redução da viscosidade da água devido ao aumento da temperatura, facilitando a remoção da massa por meio do aumento da difusão da água da semente.

Já Santos et al. (2014) explica que esse comportamento está relacionado ao aumento da vibração das moléculas de água facilitando o processo de difusão.

De acordo com os indicadores estatísticos coeficiente de determinação (R^2) e qui-quadrado (χ^2) representados na Tabela 4.3, a simulação da modelagem por meio da solução analítica representou de forma satisfatória os dados das sementes sem endocarpo (Figuras 4.4b e 4.4d) apresentando R^2 de 0,9985 e χ^2 de $4,15 \times 10^{-3}$ para 60°C sem endocarpo e 0,9993 e $2,04 \times 10^{-3}$ para 70°C sem endocarpo, entretanto para as sementes com endocarpo os dados experimentais não se ajustaram de forma satisfatória podendo essa variação ser melhor observada na Figura 4.4a.

De acordo com os gráficos representados na Figura 4.4b e 4.4d foi observado que não houve influência significativa da temperatura, verificando-se que a presença do endocarpo reduziu a taxa de secagem, de modo que a velocidade de secagem foi maior para as sementes submetidas a 60°C sem endocarpo, podendo este fato estar relacionado a ausência da casca (endocarpo) das sementes que tende a atuar como barreira na saída do fluxo de água diminuindo a taxa de secagem.

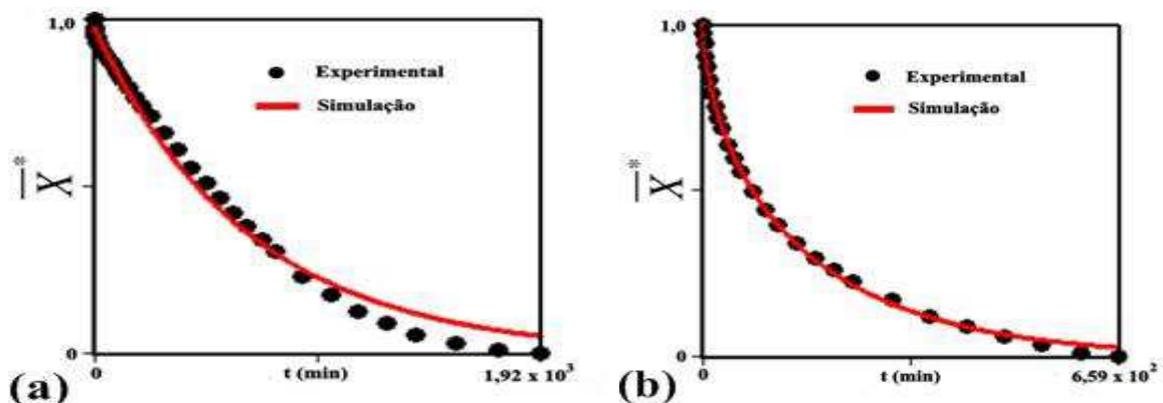


Figura 4. 4 - Gráficos da cinética de secagem de sementes de jaca por meio da solução analítica nas condições experimentais de: a) 60°C com endocarpo; b) 60°C sem endocarpo; c) 70°C com endocarpo e d) 70°C sem endocarpo. Continua...

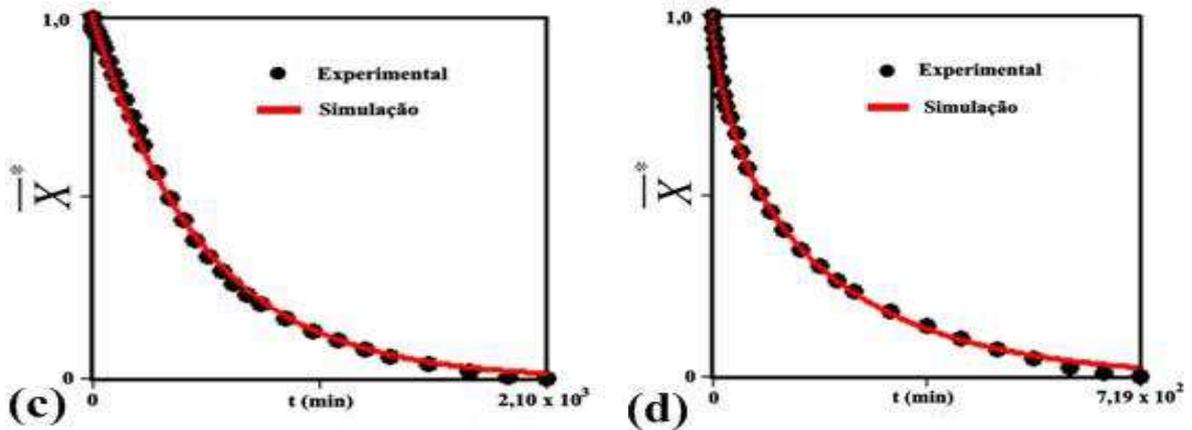


Figura 4.4 - Gráficos da cinética de secagem de sementes de jaca por meio da solução analítica nas condições experimentais de: a) 60°C com endocarpo; b) 60°C sem endocarpo; c) 70°C com endocarpo e d) 70°C sem endocarpo.

4.2.2 Distribuição do teor de umidade no interior do cilindro

Para a análise por meio da modelagem matemática proposta assumiu-se a semente como sendo um cilindro. Considerando as simetrias admitidas para a obtenção da solução foi utilizado para análise apenas um quadrante do cilindro (Figura 4.5).

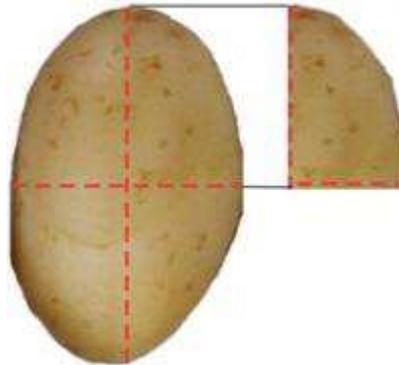


Figura 4.5 - Representação da semente de jaca utilizada para a análise da distribuição do teor de umidade para determinados intervalos de tempo.

4.2.2.1 Amostras de sementes submetidas a 60°C com endocarpo

Na Figuras 4.6 a 4.9 estão representadas as distribuições da água no interior do cilindro para os tratamentos das sementes de jaca submetidas a 60°C com endocarpo, 60°C sem endocarpo, 70°C com endocarpo e 70°C sem endocarpo.

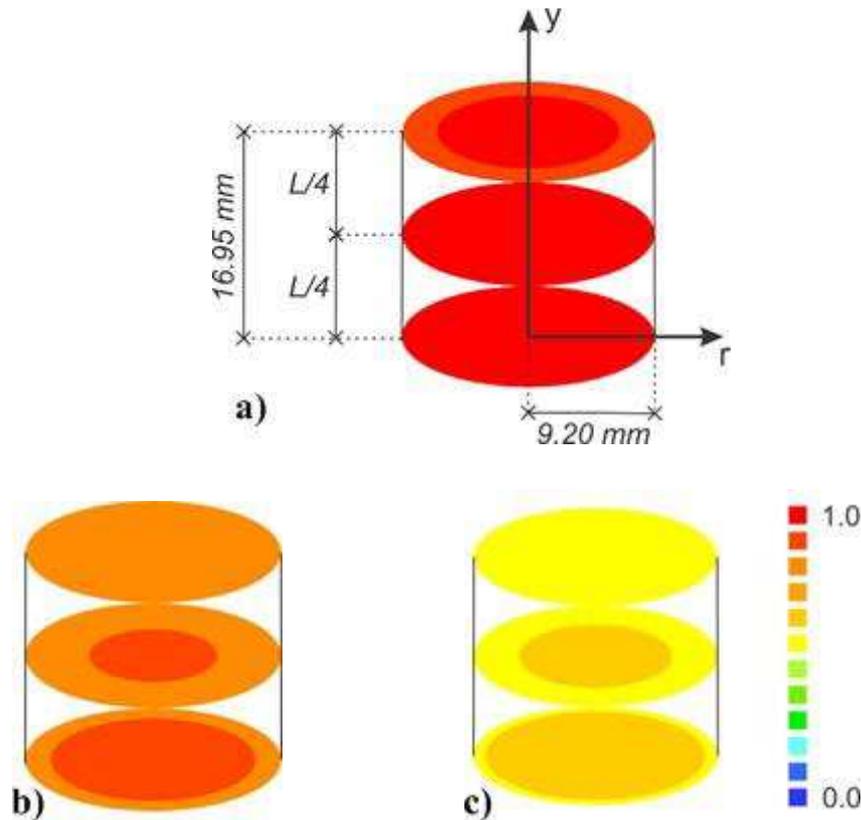


Figura 4. 6 - Distribuição da água no interior do cilindro nos tempos de (a) $t = 30.72$ min; (b) $t = 120$ min e (c) $t = 330.20$ min.

Na Figura 4.6 os gráficos de distribuição do teor de umidade mostram-nos que o fluxo de saída de umidade ocorre do centro do cilindro para a superfície, de forma que a camada em contato com o meio externo seca mais rapidamente. Outro fato bastante importante que deve ser destacado é a resistência a perda de massa ocasionada devido a presença da casca da semente atuando como “barreira” e incidindo na homogeneidade do teor de umidade ao longo de todo o cilindro a um dado instante de tempo e na redução da taxa de secagem, corroborando com os valores obtidos para o número de Biot apresentados na seção 4.3.

4.3.1.2 Amostras de sementes submetidas a 60°C sem endocarpo

Na Figura 4.7 podemos observar que o fluxo de saída de massa ocorre do interior do cilindro para a superfície, concentrando-se o menor teor de umidade na camada superior (superfície) e nas partes externas que estão em contato direto com o ar de secagem facilitando a saída de água nos tempos iniciais do processo, tanto que as referidas camadas atingiram o teor de umidade próximo ao equilíbrio nos 30 min iniciais da secagem (Figura 4.7a).

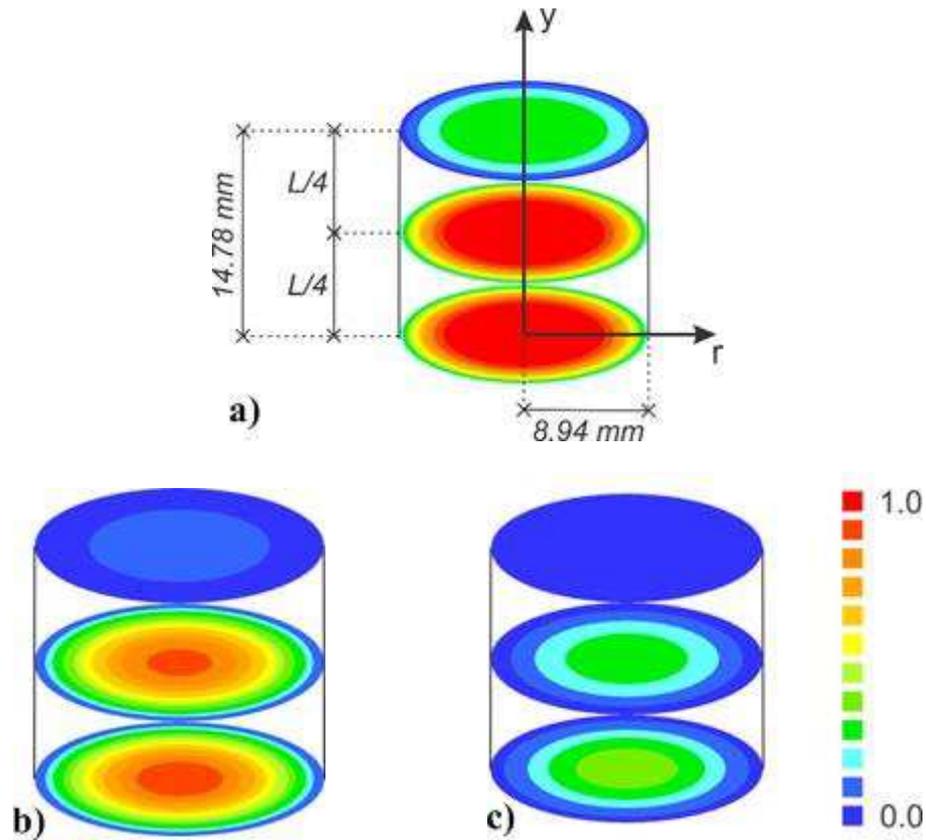


Figura 4. 7 - Distribuição da água no interior do cilindro nos tempos de (a) $t = 30.36$ min; (b) $t = 120.1$ min e (c) $t = 330$ min.

Ainda nota-se que as camadas do fluxo do teor de umidade do produto são bem definidas, diferentemente do que ocorre nas Figuras 4.6 e 4.8 em que essas se encontram constantes (homogêneas).

4.3.1.3 Amostras de sementes submetidas a 70°C com endocarpo

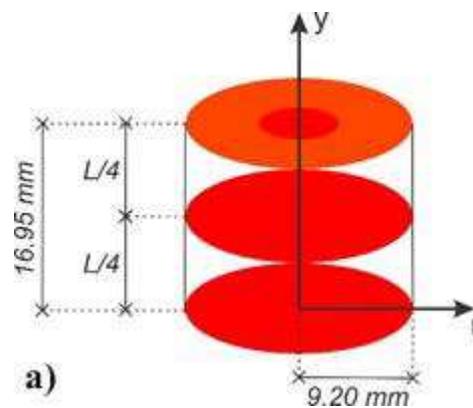


Figura 4. 8 - Distribuição da água no interior do cilindro nos tempos de (a) $t = 30.40$ min; (b) $t = 120.70$ min e (c) $t = 330.60$ min.

Continua...

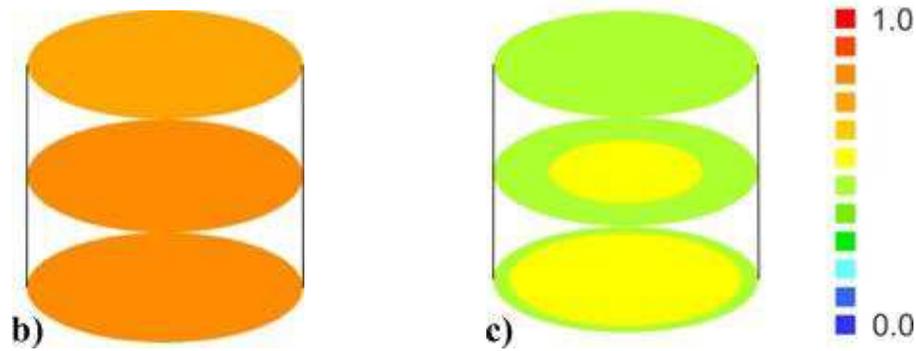


Figura 4. 8 - Distribuição da água no interior do cilindro nos tempos de (a) $t = 30.40$ min; (b) $t = 120.70$ min e (c) $t = 330.60$ min.

Na Figura 4.8 foi observado o mesmo comportamento da Figura 4.6 em relação à resistência apresentada à saída do fluxo de água. Entretanto, o aumento da temperatura incidu diretamente sobre o aumento da taxa de secagem nos instantes de tempo observados.

4.3.1.4 Amostras de sementes submetidas a 70°C sem endocarpo

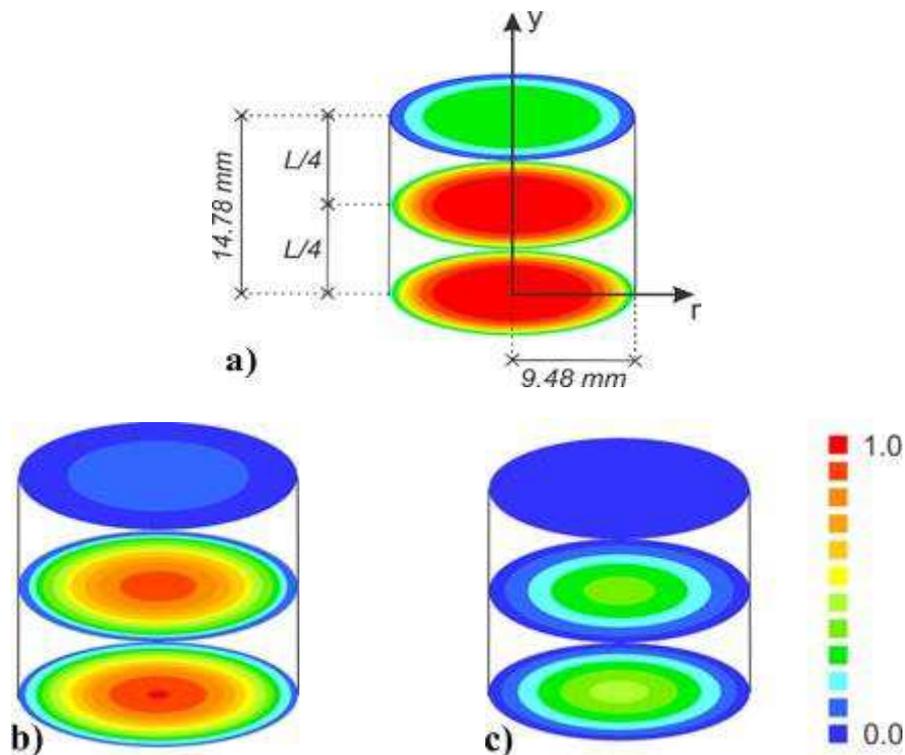


Figura 4. 9 - Distribuição da água no interior do cilindro nos tempos de (a) $t = 30.24$ min; (b) $t = 120.20$ min e (c) $t = 330.50$ min.

Nas Figuras 4.6 e 4.8 no intervalo de tempo $t = 330$ min observa-se que para as sementes com endocarpo não houve o alcance do teor de umidade de equilíbrio em nenhuma das camadas, entretanto para as sementes sem endocarpo (Figuras 4.7 e 4.9) as camadas superficiais e as

partes mais externas alcançaram o teor de umidade de equilíbrio. Também observou-se que os gradientes de umidade nas Figuras 4.7 e 4.9 foram bem definidos representando que o fluxo de massa estava ocorrendo normalmente corroborando com a hipótese que o endocarpo atua como barreira evitando o contato direto entre o meio secante (ar) e as sementes tornando o fluxo de água uniforme dentro do produto (Figura 4.6 e 4.8).

Moreira et al. (2005) observou o mesmo fenômeno na secagem de castanhas e atribuiu a diminuição da taxa de secagem a presença do endocarpo causando resistência da transferência de massa.

Para Vásquez (2005), além da barreira física (endocarpo) as substâncias adesivas que o compõe aumentam a resistência da saída do fluxo de água, uma vez que o endocarpo também adere a parte externa da semente.

4.4 OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO UTILIZANDO A SOLUÇÃO NUMÉRICA

As otimizações e simulações por meio da solução numérica só foram aplicadas nas sementes sem endocarpo.

4.4.1 Dados Experimentais

Na Tabela 4.4 pode ser observado os dados do teor de umidade inicial e de equilíbrio em base seca, o raio e comprimento iniciais das sementes de jaca.

Tabela 4. 4 - Dados experimentais do teor de umidade inicial, teor de umidade de equilíbrio, raio inicial e comprimento inicial.

Amostras	T(°C)	\bar{X}_i (bs)	\bar{X}_{eq} (bs)	R_0(mm)	L_0(mm)
SJSE	60°C	0,977	0,232	8,94	29,56
SJSE	70°C	1,035	0,176	9,48	29,57

SJSE: semente de jaca sem endocarpo **T(°C):** temperatura; **\bar{X}_i (bs):** teor de umidade inicial; **\bar{X}_{eq} (bs):** teor de umidade de equilíbrio; **R_0 (mm):** raio inicial em milímetros; **L_0 (mm):** comprimento inicial em milímetros.

Na Tabela 4.4 verificou-se que a temperatura do ar de secagem apresentou influência no teor de umidade de equilíbrio.

4.4.2 Variações das dimensões dos cilindros de sementes de jaca durante a secagem

O encolhimento das amostras experimentais só foi aferido nas sementes sem endocarpo, pois na secagem das sementes com endocarpo ocorreu o encolhimento apenas das sementes, fenômeno que não foi acompanhado pelo endocarpo permanecendo com sua estrutura inicial, ou seja, a semente ficou “solta” dentro da casca, o que levaria a subestimação das medidas afetando diretamente os resultados finais.

Na Tabela 4.5 encontra-se os dados de medida do teor de umidade em base seca, raio e comprimento em milímetros para as amostras de sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 60°C com massa média inicial de 24,76g \pm 0,08, teor médio de umidade inicial em base úmida (b.u) 49,40 \pm 1,2, comprimento médio inicial (mm) 29,56 \pm 0,71, espessura média inicial (mm) 16,46 \pm 0,46 e largura média inicial (mm) 19,31 \pm 0,48.

Tabela 4. 5 - Valores do raio e comprimento para secagem de sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 60°C.

Tempo (min)	X (bs)	R (mm)	L (mm)
0	1,000	8,94	29,56
2	0,972	8,91	29,47
4	0,942	8,87	29,36
6	0,904	8,85	29,23
8	0,875	8,81	29,08
10	0,835	8,75	28,90
15	0,793	8,66	28,75
20	0,751	8,46	28,63
25	0,718	8,50	28,43
30	0,689	8,57	28,35
40	0,639	8,47	28,18
50	0,599	8,42	28,07
60	0,560	8,36	27,98
80	0,498	8,25	27,80
100	0,441	8,19	27,68
120	0,397	8,12	27,55
150	0,344	8,02	27,39
180	0,297	7,92	27,22
210	0,261	7,84	27,06
240	0,228	7,79	26,96
300	0,171	7,72	26,79

X (bs): teor de umidade; R_0 (mm): raio em milímetros; L_0 (mm): comprimento em milímetros.

De acordo com a metodologia apresentada na seção 3.4, as medidas das amostras foram aferidas para cada intervalo de tempo determinado, com o objetivo de verificar o comprimento e o raio das sementes.

Na Tabela 4.6 estão agrupados os dados de medida do teor de umidade em base seca, raio e comprimento em milímetros para as amostras de sementes de jaca sem endocarpo submetido a 70°C com massa média inicial de 24,29g \pm 1,37, teor médio de umidade inicial em base úmida (b.u) 50,85 \pm 1,15, comprimento médio inicial (mm) 29,57 \pm 1,07, espessura média inicial (mm) 17,87 \pm 0,21 e largura média inicial (mm) 20,05 \pm 1,22.

Tabela 4. 6 - Valores do raio e comprimento para secagem de sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 70°C.

Tempo (min)	X (bs)	R (mm)	L (mm)
0	1,000	9,48	29,57
4	0,932	9,55	29,50
6	0,907	9,58	29,40
8	0,885	9,38	29,16
10	0,860	9,43	29,03
15	0,817	9,37	28,84
20	0,780	9,21	28,64
25	0,747	9,17	28,49
30	0,717	9,13	28,37
40	0,671	9,04	28,23
50	0,622	8,94	27,96
60	0,578	8,84	27,78
80	0,509	8,78	27,58
100	0,456	8,69	27,35
120	0,406	8,56	27,23
150	0,354	8,45	27,10
180	0,310	8,24	26,91
210	0,270	8,10	26,80
240	0,237	8,08	26,68
300	0,184	7,95	26,39
360	0,141	7,82	26,20
420	0,106	7,83	26,01

X (bs): teor de umidade; **R₀(mm)**: raio em milímetros; **L₀(mm)**: comprimento em milímetros.

Na Tabela 4.7 observa-se a influência do fenômeno do encolhimento nas amostras estudadas.

Tabela 4. 7 - Valores percentuais do raio e comprimento finais em relação ao início do processo de secagem de sementes de jaca.

Amostras	$R/R_0 \times 100$	$L/L_0 \times 100$
SJSE 60°C	86,353	90,629
SJSE 70°C	82,595	87,961

R: raio final; **R₀**: raio inicial; **L**: comprimento final; **L₀**: comprimento inicial

Após a análise dos dados apresentados na Tabela 4.7 constatou-se que houve influência da temperatura no encolhimento das amostras, sendo mais significativa nas amostras submetidas a 70°C, chegando a um percentual aproximado de 18% no raio e 12% no comprimento. Ainda na mesma tabela observou-se que o efeito do encolhimento ocorreu mais em direção ao raio para ambas as amostras.

Silva Junior (2015) verificou valores aproximados ao encontrados no presente estudo, para o encolhimento do comprimento de fatias de bananas submetidas a desidratação osmótica e secagem complementar.

Resultados semelhantes também foram encontrados por Goneli et al. (2011) ao secar mamona da variedade Guarani em temperatura de 40°C em secador com ventilação forçada. Os resultados obtidos mostraram uma redução de 16,68%, 20,44% e 18,82% para o comprimento, largura e espessura das amostras mostrando-se uma contração desuniforme entre as medidas, o que também pode ser observado no presente trabalho em que há uma diferença de encolhimento entre o raio e o comprimento das amostras (Tabela 4.7).

Côrrea Filho et al. (2015) ao analisar a secagem de figos observou que a contração volumétrica resultou na redução do volume inicial de 84,04%, 87,71% e 75,22 % para as amostras submetidas a 40°C, 55°C e 70°C, respectivamente.

Por meio dos dados das Tabelas 4.5 e 4.6 foram realizados ajustes através do *Software Lab Fit* desenvolvido por Silva e Silva (2009) a fim de obter a melhor expressão para representar o comprimento e o raio das sementes de jaca nas suas respectivas condições experimentais.

Através da utilização dos dados da segunda e quarta coluna da Tabela 4.5 foi obtida a melhor expressão para o comprimento em função do teor de umidade adimensional médio das sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 60°C.

$$L(\bar{X}^*) = \frac{1}{(-4,15 \times 10^{-3} \times \bar{X}^* + 3,8 \times 10^{-2})} \quad (4.2)$$

onde $L(\bar{X}^*)$ representa o comprimento em função do teor de umidade adimensional médio no tempo t .

De forma similar, porém usando os dados da segunda e terceira coluna da Tabela 4.5 foi obtida a melhor expressão para o raio em função do teor de umidade adimensional médio para as amostras de sementes sem endocarpo submetidas a 60°C.

$$R(\bar{X}^*) = \sqrt{(2,22 \times 10^2 - (\bar{X}^* - 1,29 \times 10^1)^2)} \quad (4.3)$$

onde $R(\bar{X}^*)$ representa o raio em função do teor de umidade adimensional médio no tempo t .

Na Figura 4.10 são apresentados os gráficos dos ajustes do comprimento e raio adimensionais em função do teor de umidade adimensional médio obtidos por meio do *Software Lab Fit* para as amostras de sementes de jaca submetidas a 60°C.

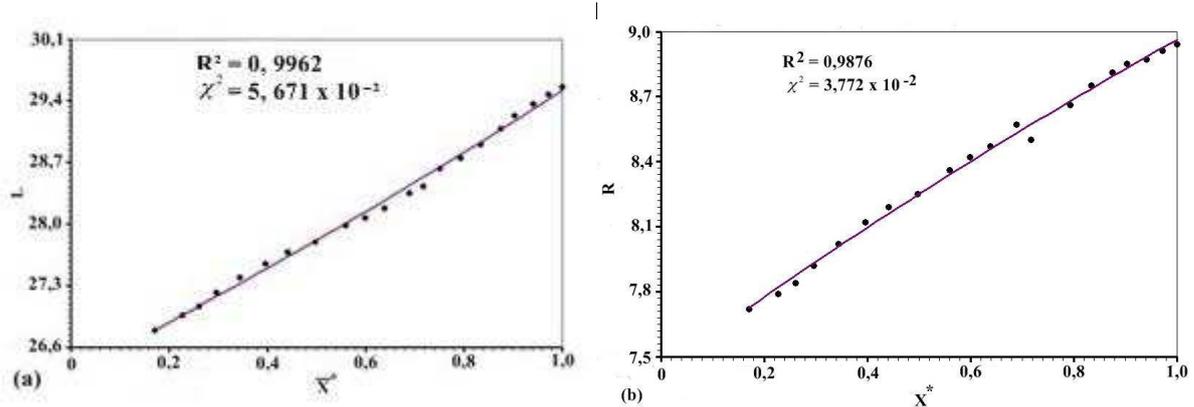


Figura 4. 10 - Gráficos dos ajustes das sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 60°C obtidos pelo Software Lab Fit para o raio e comprimento adimensionais em função do teor de umidade adimensional médio: (a) Comprimento das SJSE 60°C; (b) Raio das SJSE 60°C.

Usando a mesma metodologia discorrida acima também foi obtida a melhor expressão para o comprimento e o raio em função do teor de umidade adimensional médio, porém utilizando os dados agrupados na Tabela 4.6, para as amostras de sementes sem endocarpo submetidas a 70°C.

Expressão para o comprimento em função do teor de umidade adimensional médio:

$$L(\bar{X}^*) = \frac{1}{(-4,97 \times 10^{-3} \times \bar{X}^* + 3,87 \times 10^{-2})} \quad (4.4)$$

onde $L(\bar{X}^*)$ representa o comprimento em função do teor de umidade adimensional médio no tempo t .

Expressão para o raio em função do teor de umidade adimensional médio:

$$R(\bar{X}^*) = [71 \times 10^2 \times \ln(X + 29 \times 10^2)] \quad (4.5)$$

onde $R(\bar{X}^*)$ representa o raio em função teor de umidade médio no tempo t .

Os gráficos de ajustes da melhor expressão obtidos por meio do *Software* Lab Fit são apresentados na Figura 4.11.

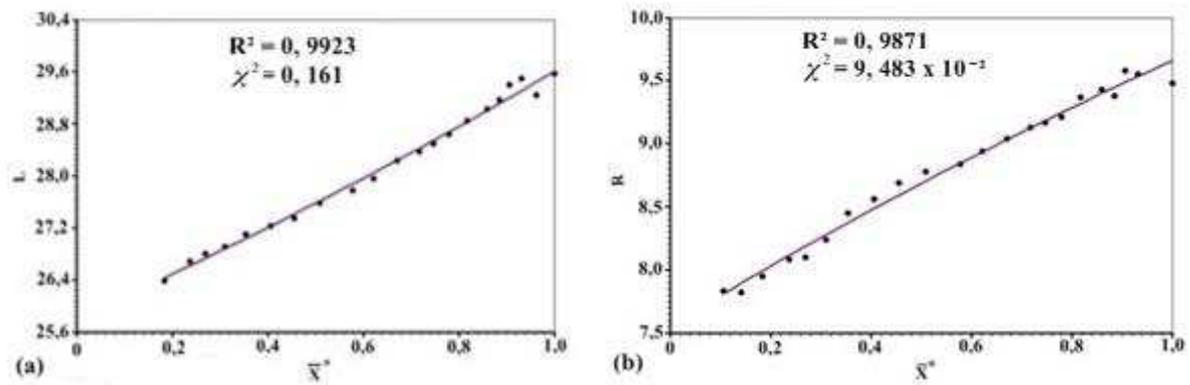


Figura 4. 11 - Gráficos dos ajustes das sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 70°C obtidos pelo Software Lab Fit para o raio e comprimento adimensionais em função do teor de umidade adimensional médio: (a) Comprimento das SJSE 70°C; (b) Raio das SJSE 70°C.

Ao analisar as Figuras 4.10 e 4.11 pode-se concluir que houve redução tanto no comprimento quanto no raio das sementes de acordo com a saída de água durante a secagem. Quanto aos parâmetros de análise R^2 e χ^2 verificou-se que o modelo descreveu de forma satisfatória o comprimento das amostras, pois apresentou o coeficiente de determinação mais próximo a 1, se ajustando melhor a amostra de 70°C com $\chi^2 = 0,161$.

Na Figura 4.12 pode ser observado o encolhimento das sementes na amostra real no tempo inicial $t=0$ e final do processo.

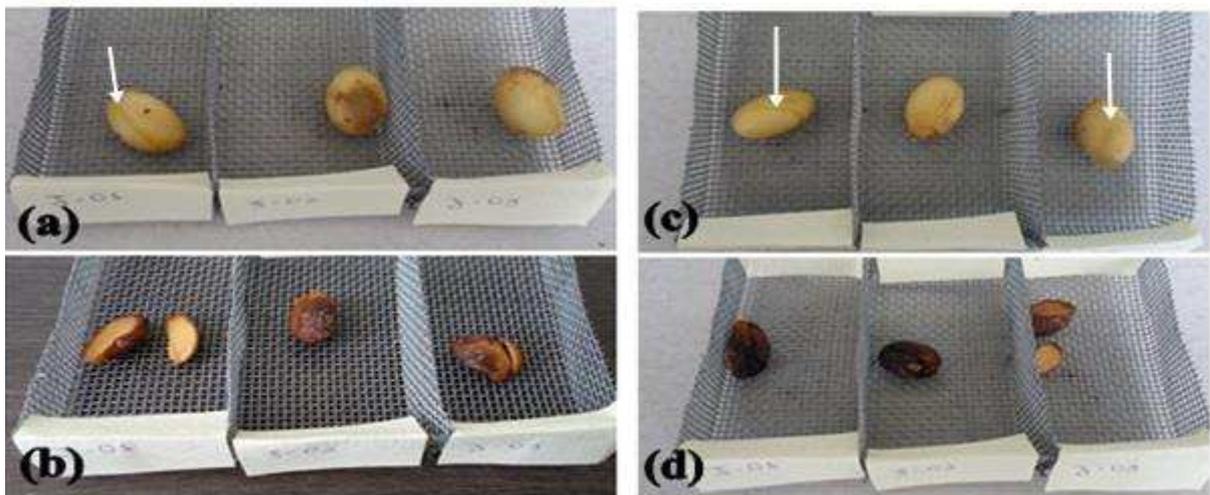


Figura 4. 12 - Encolhimento das amostras: (a) SJSE no $t=0$ a 60°C; (b) SJSE no tempo final a 60°C; (c) SJSE no $t=0$ a 70°C; (d) SJSE no tempo final a 70°C.

Na Figura 4.12 pode ser observado que além do encolhimento ter ocorrido mais em direção ao raio, outro fenômeno observado foram as “trincas” destacando as sementes em duas partes [Figura 4.13 (b e d)]. A demarcação dessas “trincas” pode ser observada nas amostras (4.12a e 4.12c) antes de serem desidratadas, sugerindo que as mesmas estão naturalmente

presentes nas amostras utilizadas, mas que sofreram alterações estruturais ao serem submetidas a temperaturas elevadas ocasionando o fenômeno do trincamento.

De acordo com Peske e Villela (2003) as altas temperaturas de secagem é uma das causas de trincamento de sementes, pois acarreta uma diferença muito grande no teor de umidade na superfície e no centro da semente gerando um gradiente de pressão resultando na trinca.

4.4.3 Otimização e Simulação: Cinética de secagem e difusividade efetiva de água

Nas otimizações realizadas por meio da solução numérica foram considerados tanto a difusividade variável quanto o encolhimento para descrever o comportamento da secagem de sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 60°C e 70°C. A malha considerada no processo foi de (27 x 27) a 500 passos de tempo, após alguns testes de malha.

4.4.3.1 Otimização e cinética de secagem

Na Tabela 4.8 encontra-se as otimizações dos dados experimentais obtidas por meio da solução numérica.

Tabela 4. 8 - Resultados obtidos na otimização dos dados por meio da solução numérica.

Amostras	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h_w</i> (m ² min ⁻¹)	<i>R</i> ²	χ^2
SJSE 60°C	- 0,517	4,63 x 10 ⁻⁸	1,90 x 10 ⁻⁴	0,9988	3,352 x 10 ⁻³
SJSE 70°C	-1,59	4,44 x 10 ⁻⁸	1,05 x 10 ⁻⁴	0,9994	1,776 x 10 ⁻³

a, b: parâmetros de ajuste da expressão para a difusividade; *h_w*: Coeficiente de transferência convectiva de massa.

Na Figura 4.13 estão apresentados os gráficos de cinética de secagem dos dados experimentais obtidos por meio da solução numérica.

Os ajustes realizados por meio da solução numérica para as amostras sem endocarpo mostraram-se satisfatórios quando analisou-se o *R*² (0,9988; 0,9994) e χ^2 (3,352 x 10⁻³; 1,776 x 10⁻³) para 60°C e 70°C, respectivamente. Ainda, nota-se que os parâmetros de ajustes para as sementes submetidas a 70°C foram melhores.

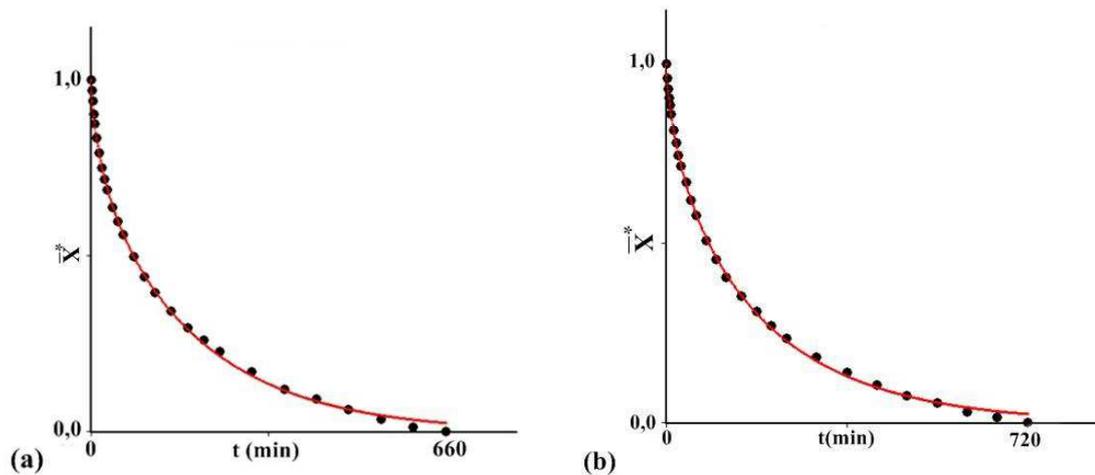


Figura 4.13 - Cinética de secagem de sementes de jaca obtidas por meio da solução numérica: (a) 60°C sem endocarpo e (b) 70°C sem endocarpo.

As sementes sem endocarpo também apresentaram resistência superficial demonstrada pelo coeficiente de transferência convectiva de massa (Tabela 4.8), sendo que a amostra submetida a 70°C apresentou uma resistência levemente maior em relação a 60°C, tal fato explica o aumento do tempo de secagem das sementes a 70°C (720 min) em relação a 60°C (660 min) (Figura 4.13).

4.4.3.2 Difusividade efetiva de água

Após a realização de alguns estudos, concluiu-se que a melhor expressão para descrever a difusividade efetiva de água das sementes de jaca sem endocarpo foi o cosseno hiperbólico (Equação 4.6):

$$f(M^*) = b \cosh(aM^*) \quad (4.6)$$

A Figura 4.14 representa a difusividade efetiva de água em função do teor de umidade das amostras sem endocarpo secas a 60°C e 70°C.

Na Figura 4.14 pode-se verificar que a elevação da temperatura influenciou o aumento da difusividade, que foi maior nos tempos iniciais do processo. Por outro lado, a difusividade analisada para as amostras submetidas a 60°C apresentou somente um pequeno aumento no início do processo, de forma que ao decorrer a secagem permaneceu constante até o final do processo.

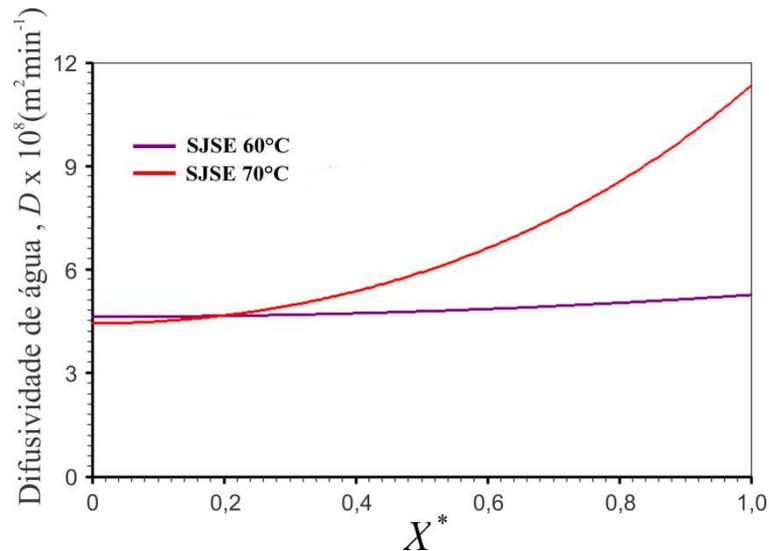


Figura 4. 14 - Difusividade efetiva de água em função do teor de umidade analisada para as amostras de SJSE submetidas a 60°C e 70°C.

No estudo de Siqueira, Resende e Chaves (2012) sobre a difusividade efetiva de água nos grãos e frutos de pinhão-manso foi observado que o aumento da temperatura influenciou diretamente o aumento da difusividade efetiva de água, ou seja, os grãos apresentaram menor resistência a saída do fluxo de água quando a difusividade era maior. Silva et al. (2015) também observaram o mesmo resultado ao analisarem a secagem de folhas de jenipapo.

Silva Junior (2015) também observou a maior difusividade para a temperatura de secagem de fatias bananas submetidas a 40° Brix e secagem complementar a 70°C.

Os parâmetros de coeficiente de determinação e qui-quadrado foram utilizados para analisar o ajuste da solução analítica e numérica aos dados experimentais e determinar qual modelo descreveu melhor a secagem das sementes de jaca. Com isso, concluiu-se que a solução numérica melhor descreveu os dados experimentais, apresentando R^2 0,9988 e χ^2 $3,352 \times 10^{-3}$ para as sementes sem endocarpos secas a 60°C e R^2 0,9994 e χ^2 $1,776 \times 10^{-2}$ para SJSE 70°C. Tal modelo se adequou melhor aos dados devido considerar o encolhimento e a difusividade variável nas amostras, fatores que são negligenciados na solução analítica.

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

Abaixo podem ser observados os resultados da intervenção no tempo de secagem das sementes de jaca executado de acordo com a metodologia abordada no tópico 3.6.

Considerando que nos ajustes realizados foi observado que Silva et alii foi o melhor modelo, então:

$$X^*(t) = e^{-at-b\sqrt{t}} \quad (4.7)$$

Reescrevendo a equação acima para deixá-la em função do teor de umidade adimensional, obtêm-se:

$$\tau = [(-b \pm \sqrt{b^2 - 4a \ln X^*}) / (2a)]^2 \quad (4.8)$$

Como o teor de umidade nas equações (4.7) e (4.8) estão na forma adimensional, $X_{bs} = 0,1765$ deve ser adimensionalizada.

4.5.1 Adimensionalizações das amostras

4.5.1.1 Sementes de jaca com endocarpo submetidas a 60°C

$$X^* = \frac{0,1765 - 0,123}{1,324 - 0,123} = 0,0445 \quad (4.9)$$

4.5.1.2 Sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 60°C

As sementes sem endocarpo submetidas a secagem de 60°C não atingiram os 15% (b.u).

4.5.1.3 Sementes de jaca com endocarpo submetidas a 70°C

$$X^* = \frac{0,1765 - 0,078}{1,070 - 0,078} = 0,0993 \quad (4.10)$$

4.5.1.4 Sementes de jaca sem endocarpo submetidas a 70°C

$$X^* = \frac{0,1765 - 0,176}{1,035 - 0,176} = 0,00058$$

(4.11)

Não houve otimização do tempo de secagem, devido a mesma atingir os 15% (b.u) no tempo próximo a zero (referente ao final da secagem).

4.5.2 Cálculos dos tempos ótimos de intervenção

Finalmente, utilizando a equação (4.12 e 4.14) para sementes com endocarpo submetidas a temperaturas de 60°C e 70°C, juntamente com os parâmetros obtidos nos ajustes, têm-se:

4.5.2.1 Sementes de jaca com endocarpo submetidas a 60°C

$$\tau = \left[\left(-0,0008035 \pm \sqrt{0,0008035^2 - 4,0,001529 \cdot \ln 0,0445} \right) / (2,0,001520^2) \right]$$

$$\tau = \cong 2024$$

(4.12)

Como o ajuste não foi muito bom, o tempo foi sobrestimado. Deste modo, fez-se uma interpolação como segue:

$$\frac{0,0445 - 0,031}{1560 \text{ min} - \tau} = \frac{0,058 - 0,031}{1560 \text{ min} - 1380 \text{ min}}$$

$$\tau = 1470 \text{ min} \cong 24,5 \text{ horas}$$

(4.13)

Através desta, foi possível alcançar uma economia de 7 horas e 30 minutos.

4.5.2.2 Sementes de jaca com endocarpo submetidas a 70°C

$$\tau = \left[\left(0,003204 \pm \sqrt{(-0,003204)^2 - 4,0,002093 \cdot \ln 0,0993} \right) / (2,0,002093) \right]^2$$

$$\tau = 1155 \text{ min} \cong 19h25min$$

(4.14)

Através desta, foi possível alcançar uma economia de 15 horas e 45 minutos.

Na tabela 4.9 estão os tempos de secagem obtidos por meio da intervenção.

Tabela 4.9 - Redução dos tempos de secagem das sementes de jaca submetidas a intervenção do tempo ótimo.

Amostras	Tempo de secagem (min/h)		Economia de tempo/energia
	Intervenção	Final	
SJCE <i>In Natura</i>	*	*	-
SJSE <i>In Natura</i>	*	*	-
SJCE 60°C	1470 min (24h30min)	1920 min (32h)	450 min (7h30min)
SJSE 60°C	**	660 min (11h)	-
SJCE 70°C	1155 min (19h25 min)	2100 min (35h)	945 min (15h45min)
SJSE 70°C	**	720 min (12h)	-

SJCE: semente de jaca com endocarpo; **SJSE**: semente de jaca sem endocarpo; *não foram submetidas a tratamento térmico; **não foi calculado o tempo de intervenção.

Os cálculos de otimizações dos tempos de secagem foram realizados a partir do momento que as amostras com endocarpo atingiram teor de umidade de 15% (b.u) estando de acordo com (BRASIL, 2005). Entretanto, as amostras sem endocarpo submetidas a 60°C não atingiram os 15% (b.u.) e a 70°C atingiu a umidade preconizada perto do final da secagem, portanto não foi possível realizar tais intervenções.

De acordo com a Tabela 4.9 nota-se que o aumento da temperatura não exerceu efeito sobre a redução do tempo de secagem para as amostras no tempo final de secagem, entretanto, para as amostras que foram submetidas a intervenção pode ser observado a influência da temperatura na redução do tempo de secagem.

Tal observação pode estar associada a baixa resistência a saída de água nos tempos iniciais e intermediários ocasionando o aumento da taxa de secagem, porém com o passar do tempo a resistência a saída de água aumentou reduzindo tanto a velocidade de secagem das sementes quanto a influência da temperatura nesse processo.

A presença do endocarpo foi identificada como a principal influência na resistência da saída do fluxo de massa, apresentando diferença de 21 horas de secagem entre as amostras SJCE e SJSE a 60°C e 23 horas para as SJCE e SJSE a 70°C, ambas obtidas no tempo final. Sendo

assim, as sementes com endocarpo foram responsáveis por um alto dispêndio de energia gastando em média de 32h a 35h para atingir o teor de umidade de equilíbrio.

Entretanto, utilizando-se o modelo matemático para realização da intervenção no tempo ótimo de secagem obteve-se uma redução bastante significativa no tempo de secagem resultando na economia de 7h30min para a SJCE a 60°C e 15h45min para a amostra SJCE a 70°C totalizando uma economia geral de 23h15min.

Dantas (2007) e Santos et al. (2012) encontraram tempos maiores de secagem de sementes de jaca para a obtenção da farinha, sendo que o primeiro estudo secou sementes inteiras com e sem endocarpo por aproximadamente 37h50min horas a 60°C e 33h50min horas a 70°C, e o segundo apenas sementes com endocarpo durante 5 dias (aproximadamente 120 horas) a 65°C, ambos apresentaram um grande gasto de tempo e energia, especialmente o segundo que utilizou cerca de 120 horas para a obtenção do produto.

Tais observações justificam a importância e relevância do presente estudo de otimização do tempo de secagem das sementes de jaca, apontando o emprego da simulação matemática como técnica viável e de baixo custo que pode ser aplicada para a otimização de processos de secagem garantindo a redução dos custos com energia, mão de obra e etc., e a diminuição dos danos nas características sensoriais, físico-químicas e nutricionais proporcionando a obtenção de um produto seco de melhor qualidade.

4.6 FARINHA DE SEMENTES DE JACA E FARINHA DE ENDOCARPO E ANÁLISE FÍSICA E FÍSICO-QUÍMICA

4.6.1 Farinha de sementes de jaca com endocarpo

As farinhas obtidas apresentaram uma granulometria composta por pequenas partículas, assemelhando-se a um pó fino e macio, com exceção da amostra *in natura* (a). Já a coloração variou em tonalidades marrons que intensificou-se para as amostras (d) e (e) da Figura 4.15, submetidas a 70°C. A amostra *in natura* (a) apresentou aspecto fibroso com frações marrons bem visíveis oriundas da presença da película e endocarpo.

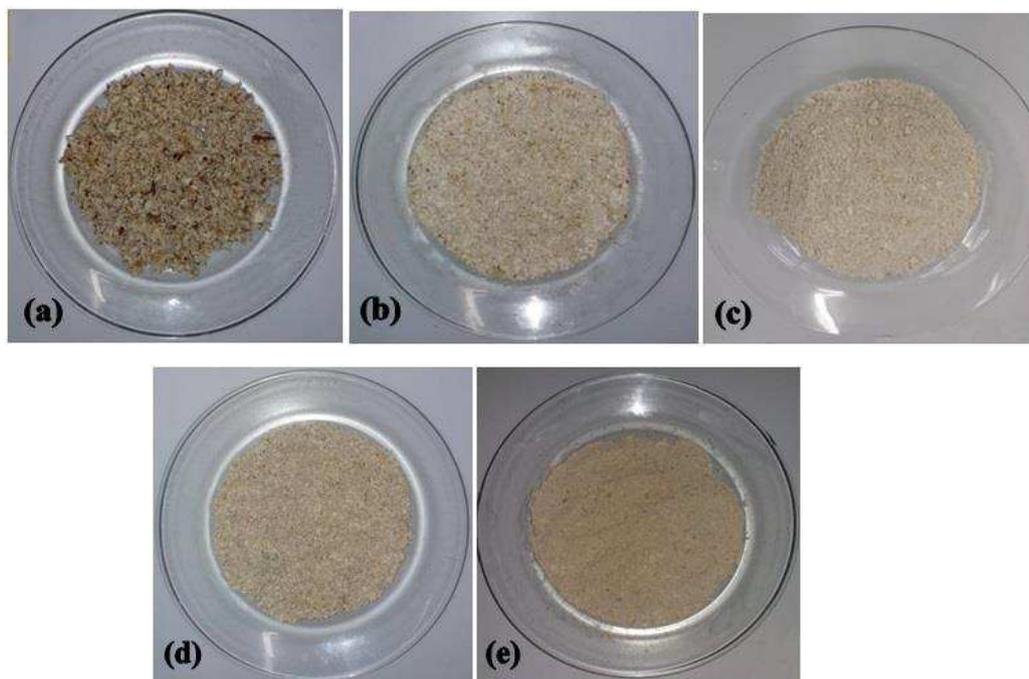


Figura 4.15 - Farinhas de sementes de jaca com endocarpo: (a) FSJCE in natura; (b) FSJCE 60°C por 1470 min (24h30min); (c) FSJCE 60°C por 1920 min (32h); (d) FSJCE 70°C por 1155min (19h25min); (e) FSJCE 70°C por 2100 min (35h).

4.6.2 Farinha de sementes de jaca sem endocarpo

As farinhas apesar de estarem sem o endocarpo apresentaram coloração amarronzada, com exceção da amostra (c), processada a 70°C, apresentou coloração esbranquiçada (Figura 4.16).

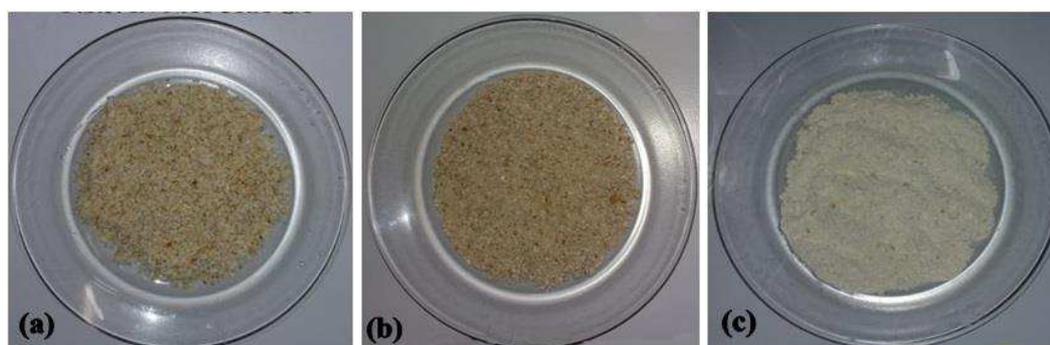


Figura 4.16 - Farinhas de sementes de jaca sem endocarpo: (a) FSJSE in natura; (b) FSJSE 60°C por 11h; (c) FSJSE 70°C por 12h.

As sementes de jaca têm chamado bastante atenção devido seu potencial que se estende tanto do seu vasto teor nutricional (rica em amido, proteínas, vitaminas do complexo B, alto teor de fibras alimentares, magnésio etc.), como também da sua capacidade de aplicação tecnológica (WAGHMARE et al., 2019).

4.6.3 Farinha de endocarpos de sementes de jaca

Para o processamento dessa farinha foi utilizado tanto o endocarpo (casca) quanto a película ambos oriundos das sementes de jaca.

As farinhas de endocarpo foram processadas de acordo com o tempo e temperatura utilizados na secagem das sementes com endocarpo que pode ser observado no Quadro 3.3 da seção 3.7.1.

Na Figura 4.17 podem ser observadas as fotos das farinhas elaboradas a partir da matéria-prima descrita.

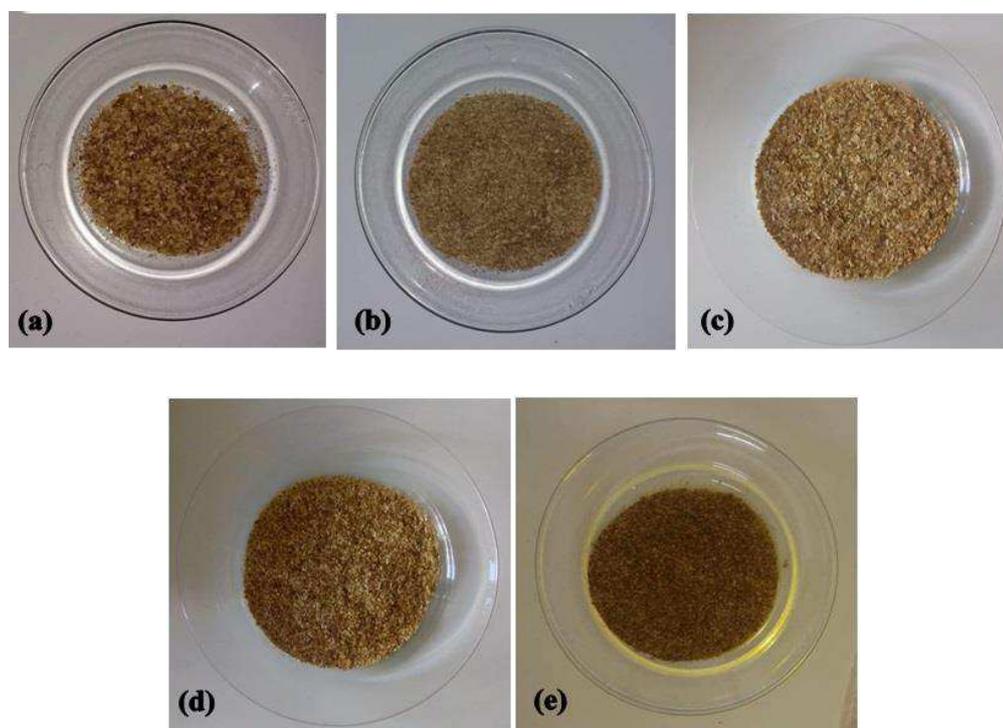


Figura 4.17 - Farinhas de endocarpo de sementes de jaca: (a) FSE in natura; (b) FSE a 60°C por 1470 min (24h30min); (c) FSE 60°C por 1920 min (32h); (d) FSE a 70°C por 925 min (~15h25min); (e) FSE a 70°C por 2100 min (35h).

As farinhas obtidas por meio do processamento do endocarpo e película apresentaram aparência fibrosa com partículas maiores e não homogêneas quando misturadas com líquido (água). Esse fato pode estar relacionado ao alto teor de fibras presente na casca da semente de jaca.

Todas as farinhas apresentaram variações de marrons com tonalidade mais intensa nas amostras (d) e (e) submetidas a 70°C, corroborando com o aumento da intensidade das amostras de farinha de sementes de jaca com endocarpo submetidas a 70°C, sugerindo que o aumento da temperatura influencia na intensificação da cor das farinhas obtidas.

4.6.4 Análises físico-químicas das farinhas elaboradas

Segundo a RDC n° 263, de 22 de setembro de 2005 que trata sobre a aprovação de regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos, a farinha é entendida como “os produtos obtidos de partes comestíveis de uma ou mais espécies de cereais, leguminosas, frutos, sementes, tubérculos e rizomas por moagem e ou outros processos tecnológicos considerados seguros para produção de alimentos” (BRASIL, 2005).

Nesse contexto, nas Tabelas 4.10 e 4.11 estão os resultados das análises físico-químicas da farinha de sementes de jaca com endocarpo (FSJCE), farinha de sementes de jaca sem endocarpo (FSJSE) e farinha de endocarpo de sementes de jaca (FESJ).

Os carboidratos constituíram a maior quantidade dos macronutrientes presentes em todas as farinhas. Para as farinhas de endocarpo de sementes de jaca (Tabela 4.11) o teor de carboidrato foi maior para FESJ 70°C intervenção, FESJ 60°C final e FESJ 60°C intervenção, sendo que a FESJ *in natura* apresentou o menor teor de carboidratos comparada com as demais amostras ($p < 0,05$). Já na FSJ as maiores quantidades encontradas foram nas farinhas com endocarpo (79,24% - FSJCE 70°C final), (73,55% - FSJCE 60°C intervenção), (72,63% - FSJCE 60°C final), tais resultados possivelmente se associam a presença do alto teor de fibras presentes na casca (endocarpo). As farinhas FSJCE e FSJSE *in natura* apresentaram os menores teores de carboidratos diferindo ($p < 0,05$) das demais amostras, ou seja, o endocarpo não exerceu influência no teor de carboidrato das amostras.

Influência significativa da elevação da temperatura no aumento do teor de carboidratos foi observada nas amostras FSJCE 60°C e FSJCE 70°C submetidas ao tempo final de secagem. Também foi encontrada diferença significativa do aumento do tempo de secagem na elevação do teor de carboidratos entre as amostras FSJCE 70°C intervenção (925min) e FSJCE 70°C final (2100min). Não houve diferença significativa entre os tempos de secagem das FESJ. Valores inferiores de carboidratos (51,26g e 52,33g) foram encontrados para sementes de jaca mole e dura, respectivamente, por (ALMEIDA, 2016).

Corroborando com a hipótese levantada, sobre a maior quantidade de carboidratos nas FESJ ser oriunda da presença de fibras, Almeida (2016) pesquisando a composição de farinhas de sementes de jaca da variedade mole e dura constatou que o teor de fibra bruta foi de (15,17g e 14,87g). De acordo com Mahan, Stump e Raymond (2012) essa quantidade de fibras supriria mais da metade da Ingestão média diária recomendada para mulheres. Dessa forma, seria uma boa opção para inserção na alimentação diária.

Pode-se verificar que a FSJCE 60 °C (final) apresentou o maior teor de proteína, diferindo significativamente das demais amostras (Tabela 4.10). As farinhas *in natura*, FSJCE e FSJSE não diferiram ($p>0,05$) entre si e das farinhas FSJCE 70 °C (intervenção) e FSJSE 70 °C (final) apresentando os menores valores de proteína entre as amostras ($p>0,05$) (Tabela 4.10). Com relação a farinha do endocarpo (Tabela 4.11) verificou-se que a FESJ 70 °C (final) apresentou o maior teor de proteína não diferindo estatisticamente da FESJ 60 °C (intervenção) ($p>0,05$).

Foi verificada a influência da elevação da temperatura na redução do teor de proteínas entre as amostras FSJCE 60°C e FSJCE 70°C final. Entretanto, verificou-se que a elevação da temperatura nas amostras FSJSE 60°C e FSJSE 70°C final incidiu no aumento do teor de proteínas verificada por meio da diferença estatística ($p<0,05\%$) (Tabela 4.10).

Valores próximos do teor de proteínas encontrados nas FSJCE foram relatados no estudo de Leite (2017) ao analisar farinha de sementes de jaca germinada obtendo uma média geral de 10,57%. Porém, Almeida (2016) encontrou valores superiores de proteínas de 16,78g para sementes de jaca mole e 16,18g para sementes de jaca dura.

Os teores de proteínas encontrados na FESJ também foram bastante consideráveis visto que as maiores quantidades encontradas foram de 8% para FESJ 70°C final e 6,37% para FESJ 60°C intervenção. Foi verificada influência significativa no tempo de secagem entre as amostras FESJ 70°C intervenção (925 min) e FESJ 70°C final (2100 min). Também ocorreu influência da elevação da temperatura no aumento do teor de proteínas na amostra FESJ submetidas a temperatura final.

Carvalho et al. (2004) também observou o mesmo fenômeno quando verificou a composição química e energética de sementes de milho submetidas a secagem natural e artificial (80°C, 100°C e 120°C) em diferentes períodos de armazenamento (0, 60, 120 e 180 dias).

Após as análises observou-se que a Farinha de Semente de Jaca (FSJ) pode ser considerada uma boa fonte proteica, principalmente quando essa é processada com o endocarpo, ao qual ocorre o aumento do percentual desse macronutriente.

Foi verificado que a presença do endocarpo não apresentou diferença significativa no teor de umidade das amostras (Tabela 4.10). Os menores teores de umidade (4,85% - SJCE 70°C final), (8,52% - FSJCE 60°C final) e (12,19% - FSJCE 60°C intervenção) foram encontrados para as amostras submetidas aos maiores tempos de secagem, respectivamente. Somente essas amostras atingiram os requisitos de umidade preconizados pela RDC n° 263/2005 que determina a máxima de 15,0 % (g /100 g) (BRASIL, 2005). Quanto às

especificidades entre as amostras foi verificada influência da elevação da temperatura na redução do teor de umidade entre FSJSE 60°C final e FSJSE 70°C final, como também no tempo de secagem entre as amostras FSJCE 60°C intervenção (1470min) e FSJCE 60°C final (1920min) e entre FSJCE 70°C intervenção (925min) e FSJCE 70°C final (2100min).

Já a umidade averiguada nas FESJ variou de 1,59% a 3,78% para as amostras submetidas à secagem, estando de acordo com o estabelecido pela referida RDC n° 263/2005. Para as FESJ 60°C e 70°C final houve influência significativa da elevação da temperatura e do aumento do tempo de secagem na redução do teor de umidade.

Teor de umidade diferente (9,24%) foi encontrado por Santos (2009), porém, o procedimento utilizado para obtenção da farinha se deu a partir da trituração das sementes *in natura*, secagem a 50°C seguida de trituração e análise.

Quanto à atividade de água foi observado que somente as FSJCE 70°C final – 2100 min (0,36 a_w) e FSJCE 60°C final – 1920 min (0,45 a_w) ($p < 0,05$) apresentaram teores de a_w abaixo do limite considerado seguro para a não proliferação de microorganismos ($a_w < 0,6$), porém devem ser levados em consideração outros fatores como temperatura ótima, disponibilidade de nutrientes, pH, entre outros, para manter a estabilidade microbiológica do produto (FELLOWS, 2006). As farinhas que apresentaram A_w entre 0,85 e 0,60 são descritas como alimentos com umidade intermediária (IMF) e são consideradas seguras no ponto de vista sanitário visto que os mofos xerófilos e leveduras osmofílicas que podem estar presentes, não produzem micotoxinas. Já no produto com A_w superior a 0,85 e $< 0,93$ pode ocorrer risco sanitário devido a produção de micotoxinas pelos mofos (ORDÓÑEZ et al., 2005).

Porém as FESJ apresentaram os menores níveis de atividade de água registrados na presente pesquisa (0,1 a 0,15) com exceção da amostra *in natura* (0,98), representando a menor quantidade de água livre disponível nas farinhas, condizendo com um nível de estabilidade microbiológica seguro (Tabela 4.11). Na Tabela 4.10 não foi observado diferença significativa da presença do endocarpo nas amostras *in natura*. Entretanto, o aumento do tempo de secagem exerceu influência significativa na redução do teor de atividade de água entre as amostras de FSJCE e FSJSE (intervenção e final) e nas amostras de FESJ (Tabela 4.11).

A faixa de pH presente tanto na farinha na FSJCE e FSJSE quanto na FESJ são classificadas como baixa acidez ($> 4,5$), ou seja, as farinhas são mais propícias a deterioração microbiana tanto de bactérias patogênicas quanto de deteriorantes (FRANCO; LANDGRAF, 2004). Foi observado que a presença do endocarpo exerceu diferença significativa na faixa de acidez entre as amostras *in natura*. Houve diferença significativa no aumento do tempo de secagem para as amostras com endocarpo submetidas a 70°C intervenção e final provocando

uma redução no pH das amostras (Tabela 4.10). Também foi verificado o mesmo para as amostras de FESJ intervenção e final (Tabela 4.11).

O conteúdo de lipídios encontrado nas FSJ e FESJ foram abaixo do esperado. Entretanto as farinhas de sementes apresentaram o maior teor lipídico, sendo a maior quantidade encontrada (1,65%) obtida da amostra de FSJSE 60°C final. Já, as FESJ apresentaram o teor de lipídios (<1%) como pode ser observado na Tabela 4.11.

Valores superiores foram encontrados no estudo de Almeida (2016) o qual pesquisou a composição química de jaca mole e dura e constatou que o extrato etéreo presente nas amostras foram de 5,04g e 5,16g, respectivamente, e Santos (2009) 8,98%.

Entretanto, Leite (2017) reportou quantidades de lipídios inferiores, comparada a presente pesquisa, encontrada em farinha de semente de jaca germinada (0,067%). Desse modo, de acordo com a RDC n° 54/2012 as farinhas analisadas no presente estudo apresentaram baixas quantidades de gorduras totais pois, o conteúdo de lipídeos encontrados foi menor que 3g/100g do produto (BRASIL, 2012). Não houve influência significativa da temperatura e tempo de secagem sobre nenhuma amostra de FSJCE. Também foi observado que as mesmas variáveis não afetaram significativamente as FESJ.

A maior quantidade de cinzas encontrada foi de 2,72% para FSJCE 70°C final. Não foi observada diferença significativa entre a presença do endocarpo nas amostras de FSJ *in natura*. O mesmo resultado foi relatado por Khan, Saqib e Alim (2016) ao estudar a composição de farinha de sementes de jaca (2,72%). Já Santos (2009) encontrou teores de cinzas semelhantes (1,53%) ao encontrado no presente estudo. Almeida (2016) relatou resultados superiores encontrados nas farinhas de sementes de jaca da variação mole 3,08g e dura 3,18g.

Baixos teores de cinzas, como obtido na maioria das amostras do presente estudo, estão relacionados à melhor qualidade da farinha, enquanto, quantidades elevadas indicam a maior presença de resíduos (farelos) implicando em um produto de baixa qualidade final (SILVA et al., 2015).

Ainda não existe regulamento técnico para farinhas de sementes e endocarpos de jaca, porém, com base no Regulamento técnico de identidade e qualidade da farinha de trigo, a quantidade de cinzas é utilizada como parâmetro para determinar a qualidade e a classificação das farinhas, sendo que a partir de 2,5% (b.s.) a farinha é considerada integral (BRASIL, 2005). O que condiz com a (FSJCE 70°C - 2100 min, final) citada acima, pois foi obtida a partir da secagem e moagem da semente integral da jaca.

Tabela 4. 10 - Análises físico-químicas das farinhas de sementes de jaca com endocarpo e farinhas de sementes de jaca sem endocarpo.

AMOSTRAS	Tempo de Secagem	Análises Físico-químicas								
		Umidade (%)	Cinzas	pH	A _w	Acidez (%)	Proteína (%)	Lipídios (%)	Carboidratos (%)	
<i>In natura</i> FSJCE	**	57,09±0,2 ^a	1,25±0,03 ^e	6,17±0,06 ^a	0,99±0,002 ^a	4±0,15 ^e	6,48±0,19 ^{cd}	0,9±0,36 ^{bc}	34,28±0,44 ^d	
FSJSE	**	58,76±0,17 ^a	1,38±0,02 ^e	6,07±0,03 ^b	0,99±0,002 ^a	3,02±0,2 ^e	5,7±0,86 ^{cd}	0,59±0,21 ^c	33,59±1,16 ^d	
Intervenção										
FSJCE 60°C	1470 min	12,19±0,04 ^d	2,18±0,07 ^d	5,23±0,02 ^f	0,66±0,001 ^d	18,99±0,95 ^a	10,84±0,61 ^b	1,23±0,07 ^{abc}	73,55±0,53 ^b	
FSJCE 70°C	925 min	18,85±0,21 ^c	2,4±0,04 ^{bc}	5,36±0,02 ^e	0,85±0,001 ^c	13,95±0,3 ^c	10,18±0,58 ^{bc}	1,13±0,29 ^{abc}	67,44±0,64 ^c	
Final										
FSJCE 60°C	1920 min	8,52 ±0,27 ^e	2,49±0,07 ^b	5,23±0,006 ^f	0,45±0,007 ^e	17,9±0,62 ^{ab}	14,81±1,86 ^a	1,54±0,02 ^{ab}	72,63±2,12 ^b	
FSJSE 60°C	660 min	24,67 ±0,2 ^b	2,24±0,006 ^{cd}	5,91±0,02 ^c	0,91±0,001 ^b	7,29±0,21 ^d	7,82±0,03 ^{cd}	1,65±0,18 ^a	63,61±0,2 ^c	
FSJCE 70°C	2100 min	4,85 ±3,62 ^f	2,72±0,1 ^a	5,27±0,02 ^f	0,36±0,03 ^f	17,4±0,65 ^b	12,03±0,66 ^b	1,16±0,33 ^{abc}	79,24±2,94 ^a	
FSJSE 70°C	720 min	20,68±0,36 ^c	2,26±0,06 ^{cd}	5,79±0,01 ^d	0,88±0,004 ^{bc}	8,27±0,45 ^d	11,75±0,45 ^b	1,51±0,15 ^{ab}	63,81±0,68 ^c	

FSJCE: Farinha de semente de jaca com endocarpo; FSJSE: Farinha de semente de jaca sem endocarpo; UM: Umidade (%); Aw: Atividade de água. Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Tabela 4. 11 - Análises físico-químicas de farinha de endocarpos de sementes de jaca.

AMOSTRAS	Tempo de Secagem	Análises Físico-químicas							
		Umidade (%)	Cinzas	pH	Aw	Acidez (%)	Proteína (%)	Lipídios (%)	Carboidratos (%)
FESJ <i>In natura</i>	**	42,21±0,8 ^a	1,05±0,04 ^d	5,73±0,02 ^a	0,98±0,0 ^a	4,47±0,3 ^b	3,57±0,95 ^c	0,4±0,08 ^{ab}	52,78±1,57 ^c
Intervenção									
FESJ 60°C	1470 min	3,78±0,1 ^b	1,91±0,1 ^b	5,57±0,03 ^b	0,15±0,02 ^b	11,07±0,45 ^a	6,37±0,5 ^{ab}	0,76±0,11 ^a	87,19±0,63 ^b
FESJ 70°C	925 min	3,16±0,09 ^b	1,75±0,08 ^{bc}	5,69±0,02 ^a	0,13±0,0 ^{bc}	11±0,47 ^a	4,70±0,34 ^{bc}	0,4±0,08 ^{ab}	90,0±0,38 ^a
Final									
FESJ 60°C	1920 min	3,47±0,04 ^b	1,70±0,03 ^c	5,45±0,02 ^d	0,1±0,0 ^c	11,88±1,15 ^a	4,63±0,58 ^{bc}	0,31±0,23 ^b	89,88±0,86 ^{ab}
FESJ 70°C	2100 min	1,59±0,13 ^c	2,38±0,03 ^a	5,62±0,04 ^b	0,1±0,02 ^c	12,61±0,95 ^a	8,0±1,16 ^a	0,14±0,13 ^b	87,9±1,3 ^{ab}

FESJ: Farinha de endocarpo de semente de jaca; UM: Umidade (%); Aw: Atividade de água. Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Quanto à acidez titulável encontrada nas farinhas foi bastante elevada chegando a teores de 18,99% nas FSJ. A farinha com a acidez elevada pode sofrer alterações no teor nutricional, aroma, cor e textura, além de influenciar na má qualidade de produtos derivados.

Lima et al. (2020) encontrou acidez na faixa 0,13 a 0,92 (meq) na análise de diferentes farinhas de mandiocas comercializadas em Recife - PE. Analisando a mesma matéria-prima Silva et al. (2013) encontrou uma média de acidez (0,77%) em duas marcas de farinhas comercializadas no estado do Pará, ambos estudos apresentaram farinhas de boa qualidade de acordo com o parâmetro considerado, diferente do que foi obtido na presente pesquisa.

Bender et al. (2016) analisou a farinha obtida a partir de resíduos de cascas de uvas e sua aplicação em snack extrusado e concluiu que o conteúdo de cinzas, fibras, carboidratos e compostos antioxidantes (resveratrol, luteolina e kaempferol) foram bastantes expressivos. Além disso, os snacks contendo 5% de adição de farinha de casca de uva foi bem avaliado quanto aos atributos textura e cor.

Os estudos das características físico-químicas do endocarpo e película das sementes de jaca ainda são bastante escassos. Entretanto, sabe-se da importância da utilização integral dos alimentos, visto que o Brasil vive um paradoxo bem peculiar, de um lado apresenta-se como um dos maiores exportadores de produtos agrícolas do mundo e do outro é detentor de uma das maiores taxas de desperdício de alimentos, com um potencial agravante, em que milhões de pessoas vivem em insegurança alimentar sem acesso a alimentos de qualidade e em quantidade suficientes (GONDIM, et al. 2005).

Ainda para Cardoso et al. (2015), o uso integral dos alimentos além de permitir a oferta de alimentos mais nutritivos atua como ferramenta de combate à fome e desnutrição e permite a redução dos impactos ambientais oriundos dos descartes dos resíduos gerados na natureza.

As variâncias encontradas nos teores de nutrientes estudados tanto nas pesquisas citadas quanto no presente estudo podem estar relacionadas aos métodos de análise físico-químico empregados, a variação das jacas utilizadas, a região geográfica de cultivo, como também aos métodos de secagem empregados (AKTER; HAQUE, 2018).

Apesar das não conformidades das variáveis de umidade, A_w , pH e acidez de algumas amostras com os parâmetros vigentes pelos órgãos responsáveis, tanto a FSJ quanto as FESJ apresentam potencial para a inserção na alimentação humana, com vista na sua qualidade nutricional ao qual apresentou alto teor de proteínas, carboidratos e baixa quantidade de gorduras. Porém, são necessários outros estudos com o intuito de obter farinhas de melhor qualidade microbiológica.

5 CONCLUSÃO

- Quanto a descrição dos dados experimentais por meio dos modelos empíricos, o modelo de Silva et alii apresentou os melhores parâmetros de coeficiente de determinação (R^2) e qui-quadrado (χ^2) resultando no melhor ajuste aos dados experimentais. Através desse foi descrita a cinética e taxa de secagem e viu-se que a temperatura não apresentou influência significativa no tempo de secagem das sementes sem endocarpo, porém a presença do endocarpo reduziu a taxa de secagem incidindo no aumento do tempo do processo sugerindo-se uma resistência a saída do fluxo de água das sementes. O mesmo foi observado na cinética adquirida por meio da solução analítica.

- Observou-se que a difusividade efetiva de água tanto (constante, sem encolhimento) quanto considerando-a variável e com a presença do encolhimento teve o seu aumento influenciado pela elevação da temperatura, sendo maior nas sementes submetidas a 70 °C.

- Foi verificado por meio da solução analítica uma resistência a saída do fluxo de água nas sementes com endocarpo indicada tanto pelo coeficiente de transferência convectiva de massa (superficial), quanto pela redução do número de Biot nas amostras de SJCE 60°C ($8,84 \times 10^{-2}$) e de SJCE 70°C ($9,19 \times 10^{-2}$). Não houve influência da temperatura no número de Biot. Já considerando a difusividade variável e o encolhimento (solução numérica) observou-se que a resistência superficial também foi verificada para as amostras sem endocarpo, sendo maior nas submetidas a 70 °C.

- Por meio da distribuição de água no interior do cilindro (constante, sem encolhimento) verificou-se que as sementes com endocarpo apresentaram resistência a saída do fluxo de água, tal fato foi atrelado a “barreira” física formada pela casca do produto.

- Quanto as contrações volumétricas das sementes, constatou-se que o aumento da temperatura (70°C) apresentou maior influência no encolhimento das amostras e essa ocorreu mais em direção ao raio do cilindro.

- A solução analítica descreveu satisfatoriamente os dados experimentais das sementes sem endocarpo, entretanto, algumas variações foram observadas para as sementes com endocarpo, indicados por meio do R^2 e χ^2 . Já a solução numérica se ajustou a todas as amostras analisadas.

- De acordo com os parâmetros estatísticos de análise (R^2 0,9988 e $3,352 \times 10^{-3}$ para SJSE 60°C) e (R^2 0,9994 e χ^2 $1,776 \times 10^{-2}$ para SJSE 70°C) foi observado que a solução

numérica descreveu satisfatoriamente os dados experimentais das sementes de jaca quando comparada com a solução analítica. Tal melhoria apresentada por meio dos indicadores da solução numérica se relaciona com a inserção do encolhimento e da difusividade variável das amostras.

- Em relação ao estudo das otimizações do tempo de secagem, não houve ajustes para as sementes de jaca sem endocarpo devido não atingirem o teor de umidade de 15% (b.u) ou o mesmo está próximo ao equilíbrio. Entretanto, a economia de economia calculada a partir da intervenção para as sementes com endocarpo foi de 7h30min para a SJCE a 60°C e 15h45min para a amostra SJCE a 70°C, sendo bastante considerável tanto para a qualidade final do produto quanto para o aumento dos lucros gerados no processo.

- Quanto as análises físico-químicas foi observado de acordo com a faixa de pH que as farinhas estão mais propícias a deterioração microbiana por apresentaram baixa acidez (>4,5). A redução do teor de umidade das FSJ apresentou relação direta com o aumento do tempo de secagem. Todas as amostras de FESJ apresentaram teor de umidade abaixo de 15%. Os níveis de a_w estavam abaixo ao recomendado (<0,6 a_w). Os carboidratos foi o nutriente mais encontrado nas farinhas. Tanto as FSJ quanto a FESJ se apresentaram como boa fonte proteica, com teores de 14,81% e 8%, respectivamente. As farinhas apresentaram baixo teor de lipídios. Ainda foi verificada influência significativa da temperatura e do tempo de secagem em algumas amostras analisadas.

- Embora o conteúdo de umidade, A_w , pH e acidez de algumas amostras de FSJ analisadas não estiveram em conformidade com as normas vigentes para manutenção da estabilidade microbiológica das farinhas, é notório que o uso da farinha de sementes de jaca e farinha de endocarpos de sementes de jaca apresentaram alto potencial de inserção na alimentação humana destacando-se como ótima alternativa tanto na suplementação e fortificação de produtos alimentícios convencionais, tornando-os mais saudáveis e palatáveis, quanto para a elaboração e incremento de preparações isentas de glúten, quando leva-se em consideração a qualidade nutricional apresentada, principalmente, a boa fonte proteica e o baixo conteúdo de gorduras. Entretanto, fazem-se necessários outros estudos para averiguar faixas de tempo e temperaturas ideais objetivando a obtenção de um produto (farinha) mais seguro.

REFERÊNCIAS

- AOAC - **Association of Official Analytical Chemists**. Official Methods of analysis of AOAC International. 18. ed. Washington: AOAC, 2005.
- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n. 3, p. 349-353, 1999.
- AIRES, J. E. F. et al. Convective drying of osmo-dehydrated apple slices: kinetics and spatial behavior of effective mass diffusivity and moisture content. **Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 4, p. 1121-1134, 2017.
- ALMEIDA, Iverlan da Silva. **Avaliação bromatológica da farinha de sementes de jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) como possível substituinte da aveia para elaboração de barras de cereais**. 2016. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em farmácia) – Faculdade Maria Milza, Governador Mangabeira, 2016.
- ABALONE, R. et al. Thin layer drying of amaranth seeds. **Biosystems Engineering**, v. 93, n. 2, p. 179-188, 2006.
- ADORNO, W.T. Modelagem matemática aplicada á transferência de massa em alimentos. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.9, n.16, p. 1465-1478, 2013.
- ESPARZA, L. M. A. et al. Effects of Minimal Processing Technologies on Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) Quality Parameters. **Food and Bioprocess Technology**, v. 11, n. 9, p. 1761-1774, 2018.
- ARAÚJO, W. D. et al. Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 3, p. 448-457, 2017.
- ARPIT, S.; JOHN, D. Effects of different levels of Jackfruit Seed Flour on the Quality Characteristics of Chocolate cake. **Research Journal of Agriculture and Forestry Sciences**, Chhattisgarh, v. 3, n. 11, p. 6-9, 2015.
- AKTER, B.; HAQUE, M. A. L. Utilization of Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) Seed's Flour in Food Processing: A Review. **The Agriculturists**, Bangladesh v. 16, n. 02, p. 131-142, 2018.
- AYALA-ZAVALA, J. F. et al. Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives. **Food Research International**, v. 44, n. 7, p. 1866-874, 2011.
- AH-HEN, K. et al. Moisture Diffusivity Coefficient and Convective Drying Modelling of Murta (*Ugni molinae* Turcz): Influence of Temperature and Vacuum on Drying Kinetics. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 4, p. 919-930, 2011.
- BASSO, Adriano Martinez. **Estudo da composição química da jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) desidratada, in natura e liofilizada**. 2017. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

- BASTOS, M. S. R.; OLIVEIRA, M. E. B.; FEITOSA, T., 1998. **Diagnóstico setorial da agroindústria de polpa de fruta na região Nordeste**. Brasília: Embrapa, 1998 (Publicações da Embrapa- Boletim de Pesquisa).
- BATISTA, Ana Cláudia de Melo Caldas. **Comportamento mecânico de compósitos poliméricos híbridos: estudos experimentais, analíticos e numéricos**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- BALIGA, M. S. et al. Phytochemistry, nutritional and pharmacological properties of *Artocarpus heterophyllus* Lam (jackfruit): A review. **Food Research International**, v. 44, n. 7, p. 1800-1811, 2011.
- BENDER, A. B. B. et al. Obtenção e caracterização de farinha de casca de uva e sua utilização em snack extrusado. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 19, p. 1-9, 2016.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena**. 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 912 p, 2001.
- BORGES, Fabrício Batista. **Descrição da secagem convectiva de grãos de milho através de modelos difusivos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- BORGES, S. V.; BONILHA, C. C.; MANCINI, M. C. Sementes de jaca (*Artocarpus integrifolia*) e de abóbora (*curcubita moschata*) desidratadas em diferentes temperaturas e utilizadas como ingredientes em biscoitos tipo cookie. **Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v. 17, n. 3, p. 317-321, 2006.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 262, de 22 de setembro de 2005**. Brasília: Ministério da Saúde, 23 set. 2005.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 54, de 12 de novembro de 2012. Regulamento técnico Mercosul sobre informação nutricional**. Brasília: Ministério da Saúde, 12 nov. 2012. Disponível em:<http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2012/rdc0054_12_11_2012.html>. Acesso em: 22 dez. 2019.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Instrução Normativa n. 8, de 2 de junho de 2005. **Regulamento técnico de identidade e qualidade da farinha de trigo**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), 27 jun. 2005. Disponível em:<<http://www.cidasc.sc.gov.br/classificacao/files/2012/08/INM00000008.pdf>>. Acesso em: 22 dez. 2019.
- BUTOOL, S.; BUTOOL, M. Nutritional quality on value addition to jack fruit seed flour. **International Journal of Science and Research**, Chhattisgar, v. 4, n. 4, p. 2406-2411, 2015.

- CADÉ, M. A.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. Secagem de tijolos cerâmicos vazados: uma aproximação por volumes finitos. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 3, p. 433-453, 2005.
- CAMICIA, R. G. D. M. et al. Modelagem do processo de secagem de sementes de feijão-caupi. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 3, p. 206-214, 2015.
- CARDOSO, F. T. et al. Aproveitamento integral de alimentos e o seu impacto na saúde. **Sustentabilidade em debate**, Brasília, v. 6, n. 3, p. 131-143, 2015.
- CARLESSO, V. O. et al. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 29, n. 2, p. 28-37, 2007.
- CARLESSO, V. O. et al. Thin-layer drying of passion fruit seeds. **Revista Brasileira de Fruticultura**, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 444-448, 2005.
- CARMO, João Evangelista Franco do. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos esferoidais oblatos. Estudo de caso: secagem de lentilhas**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.
- CARVALHO, D. C. O. et al. Composição química e energética de amostras de milho submetidas a diferentes temperaturas de secagem e períodos de armazenamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 358-364, 2004.
- CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2010.
- CORRÊA, P. C.; ARAÚJO, E. F.; AFONSO JÚNIOR, P. C. Determinação dos parâmetros de secagem em camada delgada de sementes de milho doce (*Zea mays L.*). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 2, n. 2, p. 110-119, 2003.
- CORRÊA, P. C., et al. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.
- CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M. Drying characteristics and kinetics of coffee berry. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2006.
- CORRÊA FILHO, L. C. et al. Cinética de secagem, contração volumétrica e análise da difusão líquida do figo (*Ficus carica L.*). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 8, p. 797-802, 2015.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**, Clarendon Press, Oxford, UK, 1992, 414 p.
- DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D. Modelo de simulação de secagem de produtos agrícolas usando entalpia do ar constante. **Engenharia Agrícola**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 726-731, 2010.

DANTAS, Hermeval Jales. **Secagem solar e convencional de amêndoas de jaca**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2007.

DAVID, J. et al. Antioxidant Properties of Fibre Rich Dietetic Chocolate Cake Developed by Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* L.) Seed Flour. **International Journal of Food Engineering**, v. 2, n. 2, 2016.

Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - USDA. Serviço de Conservação de Recursos Naturais - NRCS. (2016). **O banco de dados de PLANTS**. Greensboro: Equipe Nacional de Dados da Planta.

DESHMUKH, Pallavi Shringrao. **Development of Jackfruit seed flour by different methods**. 2014. Tese (Doutorado em Processos e Engenharia de Alimentos) - College of Agricultural Engineering and Technology, Dapoli, 2014.

DIAMANTE, L. M. et al. A new mathematical model for thin layer drying of fruits. **International journal of food science & technology**, Londres, v. 45, n. 9, p. 1956-1962, 2010.

DUARTE, M. E. M. et al. Desidratação osmótica de fatias de jaca. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 478-483, 2012.

DUTTA, H. et al. Effect of acid concentration and treatment time on acid–alcohol modified jackfruit seed starch properties. **Food Chemistry**, v. 128, n. 2, p. 284-291, 2011.

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

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

FALCÃO, M. A. et al. Fenologia e produtividade da fruta-pão (*Artocarpus altilis*) e da jaca (*A. heterophyllus*) na Amazônia Central. **Acta amazônica**, Manaus, v. 31, n. 2, p. 179-179, 2001.

FARIAS, Vera Solange de Oliveira. **Difusão 3d em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

FARIA, R. Q. D. et al. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n. 5, p. 573-583, 2012.

FEITOSA, R. M. et al. Avaliação físico-química e sensorial de amêndoas de jaca cozida. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, v. 15, n. 1, p. 83-89, 2017.

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

FIorentin, L. D. et al. Análise da secagem do bagaço de laranja em camada fina utilizando modelos semi-teóricos e empíricos. **Engevista**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 22-33, 2012.

Fioreze, R. Simulação matemática. In: Fioreze, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. Editora Universitária: João Pessoa, 2004a. p. 166.

Fioreze, R. Introdução. In: Fioreze, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. Editora Universitária: João Pessoa, 2004b. p. 33-34.

Fioreze, R. Secagem: Teoria. In: Fioreze, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. Editora Universitária: João Pessoa, 2004c. p. 64, 69-70.

Finkler, Tiago Fiorenzano. **Desenvolvimento de uma ferramenta para obtenção de modelos empíricos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

Franco, B. D. G. M.; Landgraf, M. **Microbiologia dos alimentos**. São Paulo: Atheneu, 2004.

Gama, Fernando José de Almeida. **Acoplamento massa-energia na descrição da secagem de produtos cilíndricos**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

GAN, P. L.; POH, P. E. Investigation on the effect of shapes on the drying kinetics and sensory evaluation study of dried Jackfruit. **International Journal of Science and Engineering**, v. 7, n. 2, p. 193-198, 2014.

GARCIA, D. C. et al. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004.

GAVA, A. J.; SILVA, C. A. B.; FRIAS, J. R. G. **Tecnologia dos Alimentos: princípios e aplicações**. São Paulo: Nobel, 2008. p. 301.

Golestani, R.; Raisi, A.; Aroujalian, A. Mathematical Modeling on Air Drying of Apples Considering Shrinkage and Variable Diffusion Coefficient. **Drying Technology**, Londres, v. 31, n. 1, p. 40-51, 2013.

GONELLI, A. L. D. et al. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Food Science and Technology**, Campinas v. 27, n. 1, p. 135-140, 2007.

GONELI, A. L. D. et al. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 1-8, 2011.

GONELI, A. L. D. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa agropecuária tropical**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014a.

GONELI, A. L. D. et al. Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenacea* DC.). **Revista brasileira de plantas medicinais**, Paulínia, v. 16, n. 2, p. 434-443, 2014b.

GONDIM, J. A. M. et al. Composição centesimal e de minerais em cascas de frutas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 4, p. 825-827, 2005.

HOSSAIN, M. T. et al. Development and quality evaluation of bread supplemented with jackfruit seed flour. **International Journal of Nutrition and Food Sciences**, Londres, v. 3, n. 5, p. 484-487, 2014.

ISLAM, S. et al. A study on nutritional and functional properties analysis of jackfruit seed flour and value addition to biscuits. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 4, n. 12, p. 139-147, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2006. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/2518#resultado>>. Acesso em: 21 abr. 2020.

JERONIMO, C. E.M. Modelagem da Cinética de desidratação de caroços de jaca (*Artocarpus integrifolia*). **Scientia Plena**, Aracaju, v. 8, n. 6, p. 1-7, 2012.

KALETA, A.; GÓRNICKI, K. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. **International journal of food science & technology**, v. 45, n. 5, p. 891-898, 2010.

KHAN, S. A.; SAQIB, M. N.; ALIM, M. A. Evaluation of quality characteristics of composite cake prepared from mixed jackfruit seed flour and wheat flour. **Journal of the Bangladesh Agricultural University**, Bangladesh, v. 14, n. 2, p. 219-227, 2016.

LANDIM, L. B. et al. Formulação de Quibes Com Farinha de Semente de Jaca. **Journal of Health Sciences**, v. 14, n. 2, 2015.

LEITE, Daniela Dantas de Farias. **Obtenção da farinha da semente de jaca germinada**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

LEITE, J. C. A. et al. Simulação de secagem de milho (*Zea mays L.*) utilizando o modelo matemático de Thompsom. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Aracaju, v. 5, n. 2, 2005.

LEMOS, D. M. et al. Propriedades físico-químicas e químicas de duas variedades de jaca. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 7, n. 3, p. 90-93, 2012.

LIMA, G. S. et al. Qualidade de farinhas de mandioca comercializadas em Recife, Pernambuco. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Recife, v. 5, n. 1, p. 01-10, 2020.

LOTHFY, F. A. et al. Mechanical properties of bioplastic from jackfruit seed flour and polypropylene. **Malaysian Journal of Analytical Sciences**, Selangor, v. 22, n. 3, p. 429-434, 2018.

LYU, J. et al. Purification and characterization of a trypsin inhibitor from the seeds of *Artocarpus heterophyllus* Lam. **Acta biochimica et biophysica Sinica**, v. 47, n. 5, p. 376-382, 2015.

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

MADRIGAL-ALDANA, D. L. et al. Isolation and characterization of Mexican jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* L.) seeds starch in two mature stages. **Starch-Stärke**, v. 63, n. 6, p. 364-372, 2011.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of food engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.

MADRUGA, M. S. et al. Chemical, morphological and functional properties of Brazilian jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* L.) seeds starch. **Food chemistry**, v. 143, p. 440-445, 2014.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. Ed. Revisada e ampliada. LTC Editora S.A., Rio de Janeiro, 2010, 453 p.,.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. LTC: Rio de Janeiro, 2013, 453 p.

MAHAN, L. K.; STUMP, S. E.; RAYMOND, J. L. **Krause: alimentos, Nutrição e dietoterapia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

MAHANTA, C. L.; KALITA, D. Processing and utilization of jackfruit seeds. In: **Processing and Impact on Active Components in Food**. Academic Press, 2015. p. 395-400.

MELO, P. C. et al. Modelagem matemática das curvas de secagem de grãos de feijão carioca. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 11, n. 3, p. 247-252, 2016.

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

MOREIRA, R. et al. Mathematical modelling of the drying kinetics of chestnut (*Castanea sativa* Mill.): influence of the natural shells. **Food and bioproducts processing**, v. 83, n. 4, p. 306-314, 2005.

MUNDO ECOLOGIA. **Para que serve folha de jaca no álcool e chá**. Disponível em: <<https://www.mundoecologia.com.br/plantas/para-que-serve-folha-de-jaca-no-alcool-e-no-cha/>>. Acesso em: 15 janeiro 2020.

NASCIMENTO, Bruna de Souza. **Secagem de sementes de *Arachis hipogae* L. com capa protetora**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

NAYAK, A. K.; PAL, D. Blends of jackfruit seed starch–pectin in the development of mucoadhesive beads containing metformin HCl. **International journal of biological macromolecules**, v. 62, p. 137-145, 2013.

OCLOO, F. C. K. et al. Physico-chemical, functional and pasting characteristics of flour produced from Jackfruits (*Artocarpus heterophyllus*) seeds. **Agriculture and Biology Journal of North America**, v. 1, n. 5, p. 903-908, 2010.

ORDÓÑEZ, J. A. et al. Componentes dos alimentos e processos In:_____. **Tecnologia de alimentos**. Porto Alegre: Artmed, 2005, pag.221-222.

OLIVEIRA, L.; GODOY, R. L. O.; BORGES, S. V. Quality of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*, Lam.) dehydrated under different processing conditions. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 14, n. 3, p. 241-248, 2011.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980, 197 p.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001.

PEREIRA, E. M. et al. Empirical models in the description of prickly pear shoot (*Nopal*) drying kinetics. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 11, p. 798-802, 2017.

PESKE, S. T.; VILLELA, F. Secagem de sementes. In: PESKE, S. T.; ROSENTHAL, M.; ROTA, G.R.M. **Sementes: Fundamentos Científicos e Tecnológicos**. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária (UFPel), 2003, p. 283-322.

PINHO, Hannah Alves. **Análise numérica do escoamento em aorta ascendente**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PRAKASH, Om et al. *Artocarpus heterophyllus* (Jackfruit): an overview. **Pharmacognosy Reviews**, Bangalore, v. 3, n. 6, p. 353-358, 2009.

REIS, R. C. et al. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 347-353, 2011.

REIS, R.C. et al. Cinética de secagem de folhas de manjericão (*Ocimum basilicum L.*) via infravermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 12, p. 1346-1352, 2012.

RESENDE, O. et al. Contração volumétrica na difusão líquida durante o processo de secagem do arroz em casca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 163-171, 2005.

RESENDE, O. et al. Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-mansão (*Jatropha curcas L.*) durante a secagem. **Engenharia Agrícola**, São Paulo, v. 31, n. 6, p. 1123-1135, 2011.

RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão Adzuki (*Vigna angularis*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.12, n. 2, p. 171-178, 2010.

RESENDE, K. K. O. et al. Cinética de secagem e avaliação físico-química de fruta-pão (*Artocarpus altilis*) variedade semínifera. **Journal of Neotropical Agriculture**, Cassilândia, v. 6, n. 1, p. 74-81, 2019.

RIOS, Ana Carolina Loyola Caetano. **Análise numérica do fluxo em reservatórios de petróleo**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2018.

SANTOS, Calila Teixeira. **Farinha da semente de jaca: caracterização físico-química e propriedades funcionais**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, Bahia, 2009.

SANTOS, D. C. et al. Modelagem e propriedades termodinâmicas da secagem de fatias de acuri. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 22, p. 1-12, 2019.

SANTOS, L. S. et al. Efeito dos métodos de extração na composição, rendimento e propriedades da pasta do amido obtido da semente de jaca. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 255-261, 2013.

SANTOS, C. T. et al. Cinética e modelagem da secagem de carambola (*Averrhoa carambola L.*) em secador de bandeja. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 32, n. 3, p. 209-313, 2010.

SANTOS, D. C. et al. Difusividade efetiva e energia de ativação em farinhas de grãos residuais de urucum. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 5, n. 1, p. 75-82, 2014.

SANTOS, D. B. Desenvolvimento de pão francês com a adição de farinha de caroço de jaca (*Artocarpus Integrifolia L.*). **Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v.8, n.15, p 597-602, 2012.

SCHÄFER, M. **Computational Engineering –Introduction to Numerical Methods**. Springer: Germany, 2006, 321 p.

SERHAT, S. T.; KÜÇÜKÖNER, E.; KARACABEY, E. Improvements in drying characteristics and quality parameters of tomato by carbonic maceration pretreatment. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 2, p. e13282, 2018.

SILVA JÚNIOR, A. F. et al. Numerical approach to describe complementary drying of banana slices osmotically dehydrated. **Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 2, p. 267-276, 2018.

SILVA, C. M. D. P. S. **Ferramentas analíticas e numéricas para a descrição da secagem de sólidos na forma de cilindros e de elipsóides**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2012.

SILVA, W.P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Lab fit curve fitting software, V.7.2.46** (2009); Online. Disponível em: <www.labfit.net>. Acesso em: jun. 2011.

SILVA, W. P. et al. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 13, n. 1, p. 67-74, 2014.

SILVA, W. P. et al. LAB fit curve fitting: a software in portuguese for treatment of experimental data. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 26, n. 4, p. 419-427, 2004.

SILVA, W. P. et al. Numerical simulation of diffusive processes in solids of revolution via the finite volume method and generalized coordinates. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v. 52, p. 4976–4985, 2009.

SILVA, L. A. et al. Cinética de secagem e difusividade efetiva em folhas de Jenipapo (*Genipa americana*). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Paulínia, v. 17, n. 4, p. 953-963, 2015.

SILVA, W.P.; SILVA, C. M. D. P. S. Lab fit curve fitting software, V.7.2.46 (2009); online, disponível em: www.labfit.net, data de acesso: Abril/2015).

SILVA, I. L. et al. Secagem e difusividade de sementes de melão. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 41, n. 2, p. 21-30, 2018.

SILVA, A. F. V et al. Análise de diferentes marcas de farinha de trigo: Teor de acidez, cor e cinzas. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, Garanhuns, v. 5, n. 1, p. 18-22, 2015.

SILVA, P. A. et al. Caracterização de farinhas de tapioca produzidas no estado do Pará. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 1, p. 185-191, 2013.

SILVA, F. A. M., BORGES, M. F. M., FERREIRA, M. A. Métodos para avaliação do grau de oxidação lipídica e da capacidade antioxidante. **Química Nova**, São Paulo, v.22, n.1, p.94-103. 1999.

SILVA, J. H. V. et al. Efeitos da inclusão do farelo de sementes de jaqueira (*Artocarpus heterophyllus Lam.*) na ração sobre a produção, pigmentação da gema e umidade fecal em codornas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 2, p. 523-530, 2007.

SILVA, F. D. et al. Desidratação osmótica de banana da terra (*musa sapientum*) aplicação de modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 1, n. 1, p. 69-76, 2003.

SILVA JUNIOR, Aluizio Freire da. **Desenvolvimento de ferramentas numéricas e computacionais para a descrição de transferência de massa em corpos cilíndricos: aplicação em desidratação osmótica e secagem complementar de banana**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2015.

SINGH, B. P. N.; KULSHRESTHA, S. P. Kinetics of water sorption by soybean and pigeonpea grains. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 52, n. 6, p. 1538-1544, 1987.

SINGH, A.; KUMAR, S.; SINGH, I. S. Functional properties of jack fruit seed flour. **Lebensmittel-Wissenschaft+ Technologie**, Londres, v. 24, n. 4, p. 373-374, 1991.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Difusividade efetiva de grãos e frutos de pinhão-manso. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 1, p. 2919-2929, 2012.

SOUSA, E. P. et al. Mathematical modeling of pequi pulp drying and effective diffusivity determination. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 7, p. 493-498, 2017.

SOUZA, M. S. S. et al. **Desenvolvimento e avaliação de passas de jaca obtidas por desidratação osmótica seguida de secagem convectiva**. UNOPAR Científica Ciências Biológicas e da Saúde, Londrina, v. 13, n. 2, p. 89-94, 2011.

SOUZA, M. S. S. et al. Desenvolvimento e avaliação de passas de jaca obtidas por desidratação osmótica seguida de secagem convectiva. **Journal of Health Sciences**, v. 13, n. 2, p. 89-94, 2015.

SPADA, F. P. et al. Physicochemical characteristics and high sensory acceptability in cappuccinos made with jackfruit seeds replacing cocoa powder. **PloS one**, São Francisco, v. 13, n. 8, p. 1-12, 2018.

STORCK, C. R. et al. Folhas, talos, cascas e sementes de vegetais: composição nutricional, aproveitamento na alimentação e análise sensorial de preparações. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 537-543, 2013.

TULYATHAN, S. B. et al. Jackfruit and its many functional components as related to human health: a review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 11, n. 6, p. 565-576, 2012.

TULYATHAN, V. et al. Some physicochemical properties of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam) seed flour and starch. **Science Asia**, Bangkok, v. 28, n. 1, p. 37-41, 2002.

SWAMI, S. B.; KALSE, S. B. Biodiversity, Nutritional Contents, and Health. **Bioactive Molecules in Food**, p. 1-23, 2018.

ULLOA, J. A. et al. Production, physico-chemical and functional characterization of a protein isolate from jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) seeds. **CyTA-Journal of Food**, v. 15, n. 4, p. 497-507, 2017.

VASCONCELOS, I. M.; OLIVEIRA, J. T. A. Antinutritional properties of plant lectins. **Toxicon**, v. 44, n. 4, p. 385-403, 2004.

VÁZQUEZ, G. et al. Proposals for the exploration of food and wood industry lignocellulosic wastes based on their chemical composition. In: **Proceeding of X Mediterranean Congress of Chemical Engineering**. 2005.

WAGHMARE, R. et al. Jackfruit seed: an accompaniment to functional foods. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 22, p.1-9, 2019.

ZENEBON, O.; PASCUET, N. S.; TIGLEA, P. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. p. 1020.