



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Tese de Doutorado

APROVEITAMENTO DE POLPA E RESÍDUOS
DE JACA (*Artocarpus heterophyllus* Lam.)
ATRAVÉS DE SECAGEM CONVECTIVA

ANA PAULA PRETTE

Campina Grande
Paraíba



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA

APROVEITAMENTO DE POLPA E RESÍDUOS DE JACA (*Artocarpus heterophyllus*
Lam.) ATRAVÉS DE SECAGEM CONVECTIVA

ANA PAULA PRETTE

Campina Grande, Paraíba

Outubro, 2012

ANA PAULA PRETTE

**APROVEITAMENTO DE POLPA E RESÍDUOS DE JACA (*Artocarpus heterophyllus*
Lam.) ATRAVÉS DE SECAGEM CONVECTIVA**

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

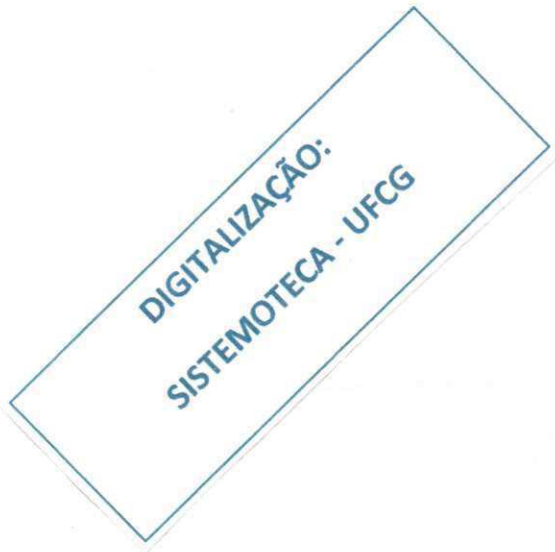
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE
PRODUTOS AGRÍCOLAS**

Orientadores: Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida

Prof. Dr. Javier Telis Romero

Campina Grande, Paraíba

Outubro, 2012



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

P942a Prette, Ana Paula.
Aproveitamento de polpa e resíduos de jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) através de secagem convectiva / Ana Paula Prette. - Campina Grande, 2012.
144 f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
Orientadores: Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida, Prof. Dr. Javier Telis Romero.
Referências.

1. *Artocarpus heterophyllus*. 2. Análise Química. 3. Isotermas de Sorção. 4. Propriedades Termodinâmicas. 5. Resíduos Agrícolas. I. Título.

CDU 634.393(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA




PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE

ANA PAULA PRETTE

APROVEITAMENTO DE POLPA E RESÍDUOS DE JACA (*Artocarpus heterophyllus*, Lam) ATRAVÉS DE SECAGEM CONVECTIVA

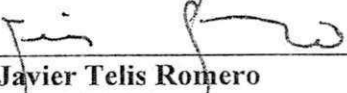
BANCA EXAMINADORA

PARECER



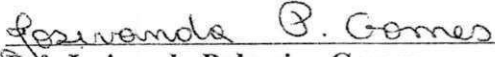
Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida
Orientador (UAEA/CTRN/UFPA)

Aprovada




Dr. Javier Telis Romero
Orientador (UNESP)

APROVADO



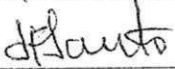
Dr. Josivanda Palmeira Gomes
Examinador (UAEA/CTRN/UFPA)

Aprovado



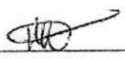
Dr. Hofsky Vieira Alexandre
Examinador (UNIT/CNPq)

APROVADA



Dr. João Felinto dos Santos
Examinador (EMEPA/PB)

Aprovada



Dr. Niédja Marizze Cezar Alves
Examinadora (UAEA/CNPq)

Aprovada

OUTUBRO – 2012

*Dedico este trabalho aos meus filhos Bernardo e
Guilherme que são meus eternos amores, a razão e
inspiração de minha vida, o melhor presente de
Deus.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida e pela beleza da natureza.

Aos meus dois Anjos Bernardo e Guilherme Prette Silveira da Mota que amo tanto e cada vez mais, que são uma benção de Deus em minha vida, agradeço por ser mãe.

Aos meus amados pais Ordalino Álvaro Prette e Nadir Buosi que dedicaram todo amor em me criar e por sempre estar ao meu lado me ajudando na caminhada da vida.

Aos meus queridos avós paternos Manoel Prette e Elvira Gobbi Prette e maternos Fernando Buosi e Angélica Poli Buosi (*in memoriam*) por terem me aninhado em seus colos e me ensinado com seus exemplos o verdadeiro sentido da vida: semear amor.

Às minhas irmãs Fabia Alessandra Prette e Maria Angélica Prette pela convivência fraternal, pelas folias, brincadeiras e amizade.

Às minhas tias Eudite e Celina e meu tio Claudino Buosi por tantos momentos felizes.

À minha madrinha Tia Nilde por ser muito doce e exemplo de bondade.

Aos meus primos Diogo, Osmar, Lucas e Cristiane (*in memoriam*) pela amizade.

Aos meus amigos Roberta, Eduardo e Nazaré que sempre deram força e ajuda nos momentos difíceis e pelo prazer e alegria de compartilhar os bons momentos, agradeço.

Ao Manoel Octávio Silveira da Mota pelos anos de aprendizado juntos e pela amizade.

Ao Harvey Alexander Villas Vélez amigo dedicado que tanto me ajudou na execução deste projeto.

Ao Nilo Sérgio Gimenes querido amigo de alma, agradeço pelo sincero amor.

Ao IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística pelo apoio e concessão ao doutorado.

Aos meus orientadores Francisco de Assis Cardoso Almeida e Javier Telis Romero pela amizade e paciência e pela orientação, conselhos e formação acadêmica.

À UNESP, ao Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, às professoras Vânia Regina Nicoletti e Maria Aparecida Mauro pela concessão dos laboratórios e a professora Ana Lucia Gabas pelo apoio dado.

Aos técnicos, Luiz, Gilnaldo e Jesuino pelo apoio no projeto.

À UFCG, Universidade Federal de Campina Grande-PB e aos meus professores pela grande formação que me brindaram durante minha pós-graduação e em especial a Professora Josivanda Palmeira Gomes.

E a todos que direta ou indiretamente participaram para execução e conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS	IV
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1. Introdução e justificativas	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo geral	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Aspectos gerais da jaca (<i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.)	6
2.1.1. Descrição botânica	6
2.1.2. Composição físico-química	9
2.1.3. Utilizações de <i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.	10
2.2. A água nos alimentos	12
2.3. Isotermas de sorção	14
2.3.1. Determinação da isoterma de sorção	16
2.3.2. Modelos matemáticos para avaliação e ajuste das isotermas de sorção	17
2.3.3. Efeito da temperatura nas isotermas de sorção	19
2.4. Propriedades termodinâmicas da água	20
2.5. O processo de secagem	24
2.5.1. Cinética de secagem por convecção com ar quente	24
2.5.2. Modelagem da cinética de secagem	27

2.5.2.1.	Período de taxa constante	27
2.5.2.2.	Período de taxa decrescente	28
2.5.2.2.1.	Modelos empíricos empregados no período de taxa decrescente	29
2.5.2.2.2.	Modelos teóricos empregados no período de taxa decrescente	30
2.5.3.	Fatores que afetam a difusividade	32
2.6.	Aproveitamento tecnológico de resíduos agroindustriais	32
2.7.	Qualidade dos produtos	34
2.8.	Referências.	35
CAPÍTULO 3: ISOTERMAS DE SORÇÃO DA POLPA E RESÍDUOS DE JACA		45
3.1.1.	Resumo	46
3.1.2.	Abstract	47
3.2.	Introdução	48
3.3.	Material e métodos	49
3.3.1.	Material	49
3.3.2.	Isotermas de sorção	50
3.3.2.1.	Preparação das amostras	50
3.3.2.2.	Determinação das isotermas de sorção	51
3.3.2.3.	Modelagem das isotermas de sorção	52
3.3.2.4.	Determinação das propriedades termodinâmicas	53
3.3.2.5.	Estimativa dos parâmetros e análise estatística	54
3.4.	Resultados e discussão	55
3.4.1.	Isotermas de sorção	55
3.4.2.	Modelagem e simulação das isotermas de sorção	57
3.4.4.	Propriedades termodinâmicas de sorção da água	65
3.5.	Conclusões	77

3.6. Referências	78
CAPÍTULO 4: CINÉTICAS DE SECAGEM DA CASCA, POLPA E SEMENTES DE JACA	85
4.1.1. Resumo	86
4.1.2. Abstract	87
4.2. Introdução	88
4.3. Material e Métodos	90
4.3.1. Material	90
4.3.2. Cinética de secagem	90
4.3.2.1. Descrição do equipamento de secagem	90
4.3.2.2. Curvas de secagem	91
4.3.2.3. Determinação do conteúdo de umidade de equilíbrio	92
4.3.2.4. Modelagem da cinética de secagem	93
4.3.2.5. Ferramentas de otimização e análise estatística	95
4.4. Resultados e discussão	96
4.4.1. Curvas experimentais de secagem	96
4.4.2. Taxa de secagem	101
4.4.3. Modelagem matemática	105
4.5. Conclusões	112
4.6. Referências	113
CAPÍTULO 5: ELABORAÇÃO DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS DA POLPA E RESÍDUOS DE JACA	118
5.1.1. Resumo	119
5.1.2. Abstract	120
5.2. Introdução	121

5.3. Materiais e Métodos	123
5.3.1. Material	123
5.3.2. Análise físico-química da polpa e resíduos de jaca in natura	123
5.3.3. Elaboração de produtos alimentícios da polpa e resíduos de jaca	124
5.3.3.1 Elaboração das farinhas de jaca	125
5.3.3.2. Elaboração da polpa desidratada de jaca	128
5.3.4. Análise físico-química, sensorial e microbiológica dos produtos alimentícios da polpa e resíduos de jaca	128
5.4. Resultados e Discussão	129
5.4.1. Análise físico-química da polpa e resíduos de jaca in natura	129
5.4.2. Elaboração de produtos alimentícios da polpa e resíduos de jaca	130
5.4.3. Análises físico-química, sensorial e microbiológica dos produtos alimentícios da polpa e resíduos de jaca	131
5.5. Conclusões	136
5.6. Referências	136
CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS	142
6.6.1. Considerações finais	142
6.6.2. Sugestões para trabalhos futuros	143

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Inflorescência masculina e feminina de <i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.	7
Figura 2.2 - Árvore e frutos de <i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.	8
Figura 2.3 - Esquema da estabilidade dos alimentos em função da atividade de água	13
Figura 2.4 - Tipos de isotermas de sorção de Van Der Waals	15
Figura 2.5 - Mudanças na atividade de água de alimentos submetidos à variação na temperatura	20
Figura 2.6 - Tendência das linhas do gráfico $\log a_w$ vs. $1/T$ para predição da a_w ..	22
Figura 2.7 - Variação do conteúdo de umidade em função do tempo	25
Figura 2.8 - Variação da velocidade de secagem em função do tempo	25
Figura 2.9 - Variação da velocidade de secagem em função da umidade	26
Figura 3.1 - Preparação das amostras para determinação das isotermas de sorção	50
Figura 3.2 - Isotermas de dessorção da polpa de jaca empregando o modelo de GAB...	63
Figura 3.3 - Isotermas de dessorção do eixo central de jaca empregando o modelo de Oswin	63
Figura 3.4 - Isotermas de dessorção do mesocarpo de jaca empregando o modelo de GAB	64
Figura 3.5 - Isotermas de dessorção da casca de jaca empregando o modelo de GAB	64
Figura 3.6 - Isotermas de dessorção das sementes de jaca empregando o modelo de Oswin	65
Figura 3.7 - Calor isostérico ou entalpia de sorção da água da polpa de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	68
Figura 3.8 - Calor isostérico ou entalpia de sorção da água do eixo central de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	68

Figura 3.9 - Calor isostérico ou entalpia de sorção da água do mesocarpo de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	69
Figura 3.10 - Calor isostérico ou entalpia de sorção da água da casca de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	69
Figura 3.11 - Calor isostérico ou entalpia de sorção da água da semente de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	70
Figura 3.12 - Entropia diferencial de sorção da água da polpa de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	71
Figura 3.13 - Entropia diferencial de sorção da água do eixo central de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	72
Figura 3.14 - Entropia diferencial de sorção da água do mesocarpo de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	72
Figura 3.15 - Entropia diferencial de sorção da água da casca de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	73
Figura 3.16 - Entropia diferencial de sorção da água da polpa de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	73
Figura 3.17 - Energia livre de Gibbs' da água da polpa de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	75
Figura 3.18 - Energia livre de Gibbs' da água do eixo central de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	75
Figura 3.19 - Energia livre de Gibbs' da água do mesocarpo de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	76
Figura 3.20 - Energia livre de Gibbs' da água da casca de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.	76
Figura 3.21 - Energia livre de Gibbs' da água das sementes de jaca em função do	

conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C	77
Figura 4.1 - Esquema do equipamento de secagem	91
Figura 4.2 - Ilustração dos procedimentos para secagem das cascas (A), polpa (B) e sementes (C) de jaca.	94
Figura 4.3 - Taxa de secagem decrescente das cascas de jaca nas velocidades de 0,7; 1,4 e 1,8 m·s ⁻¹ e temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.	103
Figura 4.4 - Taxa de secagem decrescente da polpa de jaca na velocidade de 1,8 m·s ⁻¹ e temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.	104
Figura 4.5 - Taxa de secagem decrescente das sementes de jaca na velocidade de 1,8 m·s ⁻¹ e temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.	104
Figura 4.6 - Modelagem das curvas de secagem das cascas de jaca empregando o modelo de Page às diferentes velocidades do ar e temperaturas.	110
Figura 4.7 - Modelagem das curvas de secagem da polpa de jaca empregando o modelo de Peleg.	111
Figura 4.8 - Modelagem das curvas de secagem das sementes de jaca empregando o modelo de Peleg.	112
Figura 5.1 - Formulação das farinhas elaboradas com polpa e resíduos de jaca em pó.	127
Figura 5.2 - Elaboração da polpa desidratada de jaca	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Proporções dos componentes do fruto da jaqueira	9
Tabela 2.2 - Composição por 100g de fruto	10
Tabela 3.1 - Soluções salinas e umidades relativas a 40, 50, 60 e 70 °C	51
Tabela 3.2 - Umidades de equilíbrio experimentais da polpa e resíduos de jaca na faixa de temperatura de 40 a 70 °C.	56
Tabela 3.3 - Modelagem e análise estatística das isotermas de sorção da polpa e resíduos de jaca empregando o modelo de GAB.	57
Tabela 3.4 - Intervalos de confiança (95%) dos parâmetros calculados com o modelo de GAB.	58
Tabela 3.5 - Modelagem e análise estatística das isotermas de sorção da polpa e resíduos de jaca empregando os modelos empíricos.	60
Tabela 3.6 - Intervalos de confiança (95%) dos parâmetros calculados com os modelos empíricos.	61
Tabela 4.1 - Cinéticas de secagem das cascas de jaca a velocidade de 0,7 m·s ⁻¹	96
Tabela 4.2 - Cinéticas de secagem das cascas de jaca a velocidade de 1,4 m·s ⁻¹	97
Tabela 4.3 - Cinéticas de secagem das cascas de jaca a velocidade de 1,8 m·s ⁻¹	98
Tabela 4.4 - Cinéticas de secagem da polpa de jaca a velocidade de 1,8 m·s ⁻¹	99
Tabela 4.5 - Cinéticas de secagem das sementes de jaca a velocidade de 1,8 m·s ⁻¹	100
Tabela 4.6 - Dados experimentais empregados na modelagem das curvas de secagem da casca, polpa e sementes de jaca	105
Tabela 4.7 - Parâmetros estimados dos modelos de Peleg, Henderson-Pabis, Lewis e Difusivo	107

Tabela 4.8 - Avaliação estatística dos modelos de Peleg, Henderson-Pabis, Lewis e Difusivo	108
Tabela 5.1 - Métodos para análise físico-química da polpa e resíduos de jaca.	124
Tabela 5.2 - Formulação das farinhas elaboradas com polpa e resíduos de jaca.	125
Tabela 5.3 - Composição centesimal da polpa e resíduos de jaca in natura.	129
Tabela 5.4 - Estimativa do valor nutricional das farinhas de polpa e resíduos de jaca	130
Tabela 5.5 - Conteúdo nutricional dos produtos alimentícios de jaca.	132
Tabela 5.6 - Caracterização físico-química dos produtos alimentícios de jaca.	132
Tabela 5.7 - Caracterização sensorial dos produtos alimentícios de jaca.	134
Tabela 5.8 - Caracterização microbiológica dos produtos alimentícios de jaca.	135

RESUMO

A relação entre o conteúdo de umidade e a atividade de água proporciona informações úteis para o armazenamento e processamento de alimentos. Objetivou-se a aplicação do processo de secagem para polpa e resíduos de jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.), visando seu possível aproveitamento na indústria. Na pesquisa foram determinadas isotermas de desorção para a polpa, casca, mesocarpo, eixo central e sementes de jaca a 40, 50, 60 e 70 °C, na faixa de conteúdo de umidade entre 0,001 e 0,278 kg·kg⁻¹ e atividades de água entre 0,02 a 0,753. O modelo teórico de GAB e os modelos empíricos de Oswin, Halsey, Henderson e Iglesias-Chirife foram empregados para a modelagem. Foi proposta a primeira derivada da solução analítica da equação de Clausius-Clapeyron para calcular o calor isostérico de sorção e a entropia diferencial para os resíduos e polpa de jaca, através dos modelos de GAB e Oswin quando o efeito da temperatura em equilíbrio higroscópico foi considerado. Secagem de casca, polpa e sementes de jaca foram realizadas em um secador de leito fixo, nas velocidades do ar de 0,7; 1,4 e 1,8 m·s⁻¹ e temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. Os modelos de Peleg, Page, Henderson-Pabis e difusivo foram empregados na modelagem das curvas de secagem. Observou-se período de taxa decrescente nos experimentos. Com as informações obtidas na secagem, foram formulados produtos alimentícios a base de polpa e resíduos de jaca, os quais foram caracterizados via química, nutricional, sensorial e microbiológica.

Palavras-chave: *Artocarpus heterophyllus*; análise química; formulação; isotermas de sorção; modelagem; propriedades termodinâmicas; resíduos agrícolas; secagem.

ABSTRACT

The objective of this paper is the drying process implementation for pulp and jackfruit waste items (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) for a possible application in the industry. The relationship between moisture content and water activity provides useful information for processing and storage of jackfruit wastes. The desorption isotherms for pulp, peel, mesocarp, central axis and seeds of jackfruit were determined at four different temperatures (40, 50, 60 and 70 °C) over wide ranges of moisture content (0,001-0,278 kg·kg⁻¹ and water activity (0,02 -0,753). The theoretical model of GAB and the empirical models of Oswin, Halsey, Henderson and Iglesias-Chirife were used to modeling the desorption isotherms. The analytical solution of the Clausius-Clapeyron equation was proposed to compute the isosteric heat of sorption and the differential entropy, for peel, mesocarp and pulp of jackfruit, by means of the GAB and Oswin models when the effect of temperature on hygroscopic equilibrium was considered. Drying kinetics for peel, pulp and seeds of jackfruit in convective hot air forced equipment were determined, at three air velocities (0,7; 1,4 and 1.8 m·s⁻¹) and four temperatures (40, 50, 60 and 70 °C). In the graphical analysis, a falling rate period was found for all experimental curves. Finally, with the information obtained in the drying process, products were formulated with the pulp and others jackfruit items, which were characterized via chemical, nutritional, sensory and microbiological.

Keywords: *agricultural wastes; Artocarpus heterophyllus; chemical analysis; drying; formulation; modeling; sorption isotherms; thermodynamic properties.*

Capítulo 1

Introdução e Objetivos

1.1. Introdução e justificativas

O Brasil possui imensa riqueza vegetal tanto de espécies nativas como de espécies introduzidas que se adaptaram as suas condições edafo-climáticas. Isto permite a elaboração de vários alimentos ainda não explorados, visto que as espécies já investigadas representam um pequeno percentual da rica diversidade presente no país.

A jaqueira (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) é uma das diversas espécies introduzidas que se adaptaram perfeitamente as condições do Brasil e até hoje é pouco estudada. Produz a maior de todas as frutas nascidas em árvore e é rica em nutrientes. Seu consumo entre os brasileiros é pouco difundido se restringindo aos locais de produção sendo muito apreciada no Nordeste do país.

Atualmente a jaqueira apresenta poucas perspectivas de um aproveitamento econômico sustentável carecendo de pesquisas nas mais variadas áreas como melhoramento genético, manejo de plantios comerciais que basicamente inexistem, controle fitossanitário, além do aproveitamento de suas partes e seus compostos.

A polpa, parte comestível do fruto, é consumida basicamente in natura e é muito perecível o que leva a um índice elevado de perda na pós-colheita, mostrando a necessidade de processos simples e de baixo custo para o aproveitamento do fruto. A secagem é uma opção, pois reduzindo a umidade se dificulta o desenvolvimento dos microrganismos e ocorrência de reações bioquímicas que dependem da água, evitando a rápida deterioração que ocorre nos frutos frescos.

A jaca apresenta subprodutos como cascas, eixo central e sementes que não são utilizados na incipiente agroindústria do doce. As sementes são usadas na alimentação humana de forma rudimentar, podendo ser cozidas ou torradas. As cascas e o eixo central da infrutescência basicamente são descartados ou utilizados frescos na alimentação animal.

Devido às suas qualidades organolépticas, a jaca e seus resíduos podem representar um potencial socioeconômico e alimentício a ser explorado, constituindo-se numa alternativa ao incremento da renda familiar, além de oferecer aos pequenos e micro industriais opções de investirem no processamento de doces, passas, sucos, compotas, farinhas entre outros.

O aproveitamento total da matéria-prima, ou seja, utilização da parte principal e dos resíduos do fruto é um dos pontos favoráveis na economia do processo. Frutas como a jaca escondem grandes utilidades culinárias com potencial para serem aperfeiçoadas e industrializadas, entretanto, faltam estudos que destaquem os seus valores nutricionais e experimentos para maior utilização da fruta, uma vez que grande parte desta é desperdiçada.

Diante das inúmeras utilizações da polpa das frutas e de toneladas de resíduos gerados nas agroindústrias, uma das formas de agregar valor ao fruto é investir no desenvolvimento tecnológico da produção e conservação de produtos alimentícios obtidos a partir destes resíduos. No caso da jaca, poucos trabalhos foram realizados.

Inovação no desenvolvimento de produtos com intenção de incrementar o uso industrial da jaca a fim de aproveitá-la de forma que a promova a sustentabilidade alimentar e agrícola é necessária, valorizando assim a produção e o consumo de jaca. Neste intuito, o presente trabalho estudou através da secagem convectiva o aproveitamento integral do fruto da jaqueira na elaboração de produtos alimentícios, almejando assim contribuir para maior utilização desta fruta.

Para melhor organização a tese foi dividida em introdução e objetivos (capítulo 1), revisão bibliográfica geral sobre os principais tópicos estudados (capítulo 2), três capítulos de resultados, subdivididos em resumo, introdução, material e métodos, resultados e conclusões e um capítulo final com as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Estudar a secagem convectiva da polpa e resíduos de jaca visando seu aproveitamento na elaboração de produtos alimentícios.

1.2.2. Objetivos específicos

- ❑ Determinar as isotermas de desorção da polpa e resíduos de jaca através do método gravimétrico estático nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.
- ❑ Simular e modelar as isotermas de desorção da polpa e resíduos de jaca empregando o modelo teórico de GAB e os modelos empíricos de Henderson, Oswin, Halsey e Iglesias-Chirife.
- ❑ Calcular o calor isostérico, a entropia diferencial de sorção e a energia livre de Gibbs' da água da polpa e resíduos de jaca.
- ❑ Determinar a cinética de secagem da polpa, casca e sementes de jaca utilizando um secador de leito fixo convectivo nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C e velocidades do ar de 0,7; 1,4 e 1,8 m·s⁻¹ para casca e de 1,8 m·s⁻¹ para polpa e sementes.
- ❑ Elaborar produtos alimentícios a partir da polpa e dos resíduos desidratados de jaca.
- ❑ Fazer a caracterização físico-química, nutricional, sensorial e microbiológica dos produtos elaborados a partir da polpa e resíduos de jaca.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1. Aspectos gerais da jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.)

A jaca é uma das mais significativas árvores em hortas domésticas tropicais e talvez a mais ampla e útil do importante gênero *Artocarpus*. É uma árvore fácil de cultivar, apresenta vários usos e é mais adaptável do que algumas das outras espécies comuns do gênero, tais como a fruta-pão (*A. altilis*). Apresenta médio porte atingindo 8 a 25m de altura e é facilmente reconhecida pelos seus frutos, o maior entre as plantas cultivadas. Nativa das florestas tropicais da Malásia e da Índia Ocidental tem sido cultivada desde os tempos pré-históricos e foi naturalizada em muitas partes dos trópicos, particularmente no Sudeste da Ásia, onde é hoje uma importante cultura na Índia, Birmânia, China, SriLanka, Malásia, Indonésia, Tailândia e Filipinas. Também é cultivada em algumas regiões da África, Brasil, Suriname, no Caribe, Flórida e na Austrália (ELEVITCH; MANNER, 2006).

Foi introduzida e difundida no Brasil pelos portugueses durante o século XVIII e adaptou-se tão bem que recebeu classificação de *Artocarpus brasiliensis* por botânicos brasileiros que a consideraram espécie nativa (GOMES, 1977). Atualmente, distinguem-se três variedades de jaca, (a) *Jaca-dura* ou crocante com os maiores frutos, variando de 15 a 40 Kg, tem bagos de consistência rígida, (b) *Jaca-mole* com frutos menores, bagas doces e com consistência mole, contém menos látex (látex este que existe em toda planta) e (c) *Jaca-manteiga* que apresenta bagos adocicados e de consistência intermediária muito comum no estado do Rio de Janeiro (SAIRAEB, 2004).

2.1.1. Descrição botânica

A jaqueira é uma espécie monóica (Figura 2.1) com inflorescências masculinas e femininas na mesma árvore suportadas separadamente em curtos caules robustos que brotam

de ramos mais velhos e do tronco (TRINDADE, 2005). Inflorescências masculinas são encontradas nos ramos mais jovens acima das femininas. Os agrupamentos das flores masculinas são densos, carnudos e cilíndricos, com 5 a 10 cm de comprimento e das femininas são maiores, elípticas ou arredondadas, com flores minúsculas e apétalas crescendo na casca do tronco e dos galhos grossos, desde quase o nível do solo (SAESP, 1980; OLIVEIRA, 2009). As flores são polinizadas por insetos e vento, com uma elevada porcentagem de polinização cruzada (ELEVITCH; MANNER, 2006).



Figura 2.1 - Inflorescência masculina e feminina de *Artocarpus heterophyllus* Lam.

O fruto é formado por uma reunião de frutos simples unidos em torno de um eixo central (Figura 2.2), denominado sincarpo, de formação globosa, oval e alongada. Cada fruto simples contém um grande caroço ou semente, envolvido individualmente por uma polpa cremosa, de cor amarela acastanhada, viscosa, visguenta, de sabor doce, de consistência mole à dura, conforme a variedade e muito aromática (SAIRAEB, 2004). Os frutos oblongo-cilíndricos apresentam tipicamente 30 a 40 cm de comprimento, mas às vezes até 90 cm. Eles geralmente pesam 4,5 a 30 kg, embora pesos de 50 kg ou mais tenha sido relatado

(ELEVITCH; MANNER, 2006; MORTON, 1987). Este pesado fruto é suportado principalmente no tronco e parte interior dos ramos principais e sua casca é grossa verrugosa.

O fruto contém partes florais infertilizáveis, ricas em sabor e aroma, consideradas não comestíveis por serem altamente fibrosas (SAIRAEB, 2004; VIEIRA, 2002; JOHN; NARASIMHAM, 1993; NARASIMHAM, 1990) e vulgarmente chamadas de pívides. Necessitam de 90 a 180 dias para atingir a maturação produzindo nos meses de outubro a fevereiro.

O amadurecimento da jaca envolve um processo complexo e acelerado que resulta no aparecimento do sabor e odor característico, geralmente devido à transformação do amido em açúcares solúveis, a diminuição de acidez e ao desaparecimento da adstringência (AWAD, 1993). Esse amadurecimento está associado à mudança de coloração da casca e da polpa, textura, composição de ácidos e compostos voláteis relativos ao aroma e sabor e também a síntese e/ou acúmulo de açúcares solúveis, que levam ao adoçamento de frutos tropicais (GONZAGA-NETO; SOARES, 1994).

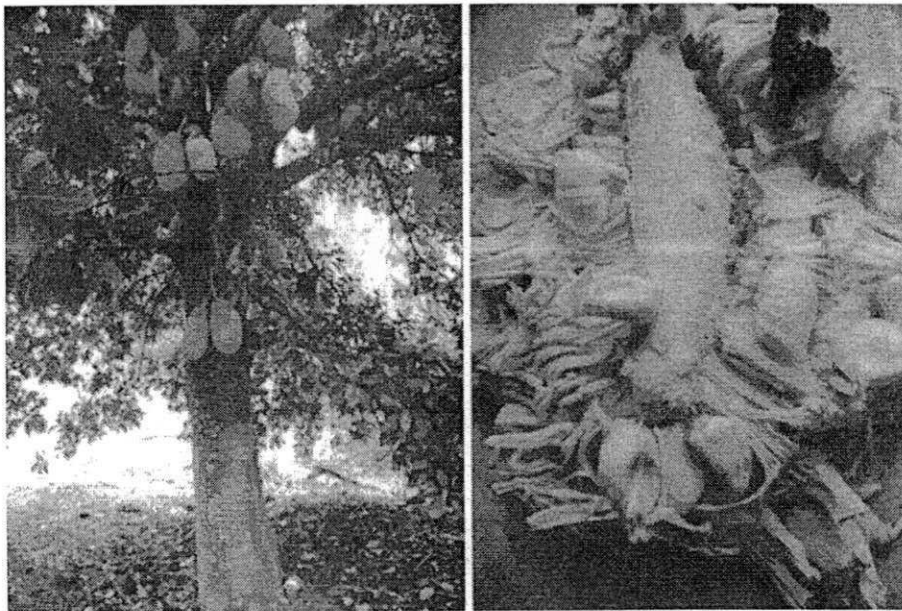


Figura 2.2 - Árvore e frutos de *Artocarpus heterophyllus* Lam.

As sementes são marrom claro a escuro, arredondadas, com 2 a 3 cm de comprimento por 1 a 1,5 cm de diâmetro, envolvidas em uma membrana fina e esbranquiçada. São recalcitrantes e podem ser armazenadas até um mês em local fresco e úmido (ELEVITCH; MANNER, 2006).

2.1.2. Composição físico-química

O fruto da jaqueira é constituído basicamente de três partes: polpa, sementes e casca. Maia (1980) determinou as porcentagens das partes dos frutos de jaca dura e mole (Tabela 2.1) concluindo que em média a polpa representa apenas 30% do fruto e as cascas são o constituinte majoritário.

Tabela 2.1 - Proporções dos componentes do fruto da jaqueira

Determinações	Jaca dura	Jaca mole
% Polpa	25,20	35,00
% Casca	68,00	51,10
% Carçoço	6,80	13,90

Características como aroma, cor e textura da porção comestível da jaca além da porcentagem de polpa, sementes e número de sementes por fruto foram relatadas por Elevitch e Manner (2006) para seis cultivares encontradas no Havaí. A porcentagem de polpa variou de 32 a 41% e as de sementes de 5 a 17% contendo 42 a 192 sementes por fruto.

Ugulino et al. (2006) determinaram os valores médios das características físico-químicas da jaca in natura, encontrando 1,82% de glicose; 11,6% de açúcares totais e 9,8% de açúcares não redutores. A acidez total em porcentagem de ácido cítrico ficou em torno de 0,15%; os sólidos solúveis em 26 °Brix; pH 4,7; teor de água de 66% e 0,45% de cinzas.

A composição de macro e micronutrientes da polpa, semente e fruto imaturo de jaca estudado por vários autores são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Composição por 100g de fruto.

Composição	Fruto**			Polpa*
	Imaturo	Polpa madura	Semente	
Umidade (%)	85,20	72,40	57,60	84,00
Calorias (cal)	51,00	97,00	43,00	52,00
Proteína (g)	2,00	1,40	5,60	1,90
Gordura (g)	0,60	0,40	0,60	0,10
Carboidrato total (g)	11,50	24,00	34,90	18,90
Fibras (g)	2,60	0,80	1,40	1,10
Cinzas (g)	0,70	1,00	1,30	-
Cálcio (mg)	53,00	23,00	23,00	20,00
Ferro (mg)	0,40	1,10	0,80	0,5
Sódio (mg)	3,00	2,00	3,00	
Potássio (mg)	323,00	107,00	763,00	
Vitamina A (U I),	30,00	175,00	---	540,00
Tiamina (mg)	0,12	0,90	0,60	30,00
Rivoflavina (mg)	0,05	0,05	0,06	
Niacina (mg)	0,50	0,90	0,60	
Ácido ascórbico (mg)	12,0	5,00	10,00	

* SAIRAEB, 2004; ** AFISJ, 2011.

Segundo AFISJ (2011) o teor de sólidos solúveis totais de quatro variedades de jaca variou entre 16 e 27 °Brix.

Estudos que visem estabelecer os parâmetros físicos, químicos e sensoriais da jaca e de seus produtos devem ter em vista as condições de produção dos frutos, majoritariamente cultivados em escala doméstica e a variabilidade genética existente entre espécimes encontradas no Brasil.

2.1.3. Utilizações de *Artocarpus heterophyllus* Lam.

Nas práticas agro-florestais a jaqueira pode ser usada para estabilizar o solo evitando erosão, ser consorciada com outras culturas como coco, manga e banana, servir de quebra-vento e ornamentar jardins domésticos com sua sombra e grande produção de frutos. Os frutos in natura são consumidos frescos pelo homem, quando processados podem ser

transformados em doces, compotas, polpas congeladas, refrescos, sucos, bebidas (licor). As sementes, ricas em amido, pode ser consumidas assadas. Quando assada e moída produzem farinha utilizável para preparo de biscoitos, doces, entre outros. Em medicina caseira a semente trata desarranjos intestinais (BALBACH; BOARIM, 1992).

Asquieri et al. (2008) desenvolveram uma bebida fermentada de jaca e caracterizaram mediante análises físico-químicas após 11 meses de armazenamento. Ainda avaliaram a aceitação por meio de escala hedônica de nove pontos. Os resultados encontrados foram comparados aos estabelecidos pela legislação para vinhos de uva e apenas o teor de cloreto apresentou-se elevado, os demais valores foram compatíveis aos de outros fermentados de frutas. O fermentado de jaca apresentou resultados próximos aos estabelecidos para vinho de mesa tipo meio-seco, atingindo um grau alcoólico de 13 °GL. A análise sensorial obteve um índice de aceitação de 78%, calculado pela porcentagem de notas superiores a 5, revelando uma boa aceitação por parte dos provadores.

Um estudo visando determinar a melhor concentração de lecitina de soja e goma arábica para produzir jaca em pó usando a metodologia de superfície de resposta (MSR) foi realizado por Pua et al. (2007). A lecitina de soja e a goma arábica foram incorporadas ao purê de jaca em diferentes concentrações que variaram de 1 a 5% e 5 a 15%, respectivamente. Os emulsificantes foram fatores significantes (a 95% nível de confiança) para o conteúdo de umidade, densidade e sensorial. Os resultados mostraram que a formulação de purê de jaca para produzir o pó de boa qualidade foi obtida incorporando 2,65% de lecitina de soja e 10,28% de goma arábica.

Dantas et al. (2008) estudaram a obtenção da polpa de jaca em pó pelo método de secagem em camada de espuma e determinaram que o modelo matemático de Midilli melhor representou o processo, constatando que a secagem em camada de espuma pode ser empregado para a obtenção da polpa de jaca em pó.

Salviano et al. (2007) estudaram a elaboração e aceitação sensorial de uma aguardente bi-destillada de jaca concluindo ser necessário maiores estudos para reduzir o teor alcoólico e aumentar a aceitabilidade da bebida.

Uma pesquisa realizada por Barreira (2004) comprovou que a semente de jaca possui uma proteína, a lecitina KM+, com alto poder regenerativo para casos de queimaduras.

Cruz et al. (2007) produziram biscoito substituindo parcialmente a farinha de trigo por farinha de caroço de jaca e compararam sensorialmente com biscoito produzido somente com farinha de trigo. Observaram que o biscoito contendo farinha de caroço de jaca foi bem aceito, não tendo apresentado diferença significativa entre as formulações. Já Borges et al. (2006) estudaram sementes de jaca e de abóbora desidratadas em duas temperaturas de secagem (60 e 70 °C) e avaliaram sua composição química. A partir daí, obtiveram farinhas de sementes secas a 60 °C e utilizaram 30% destas farinhas na produção de biscoitos cookies que foram submetidos ao teste de consumidor. A secagem a 70 °C promoveu uma ligeira redução de proteína e lipídio sem afetar os demais nutrientes. Ambas as farinhas são ricas em fibras e minerais sendo que a de semente de abóbora apresentou maior teor de proteína, lipídio e ferro e a de jaca maior teor de fibras e carboidratos. Os biscoitos cookies tiveram excelente aceitação (superior a 80% entre os escores gostei extremamente e muito) e alta intenção de compra (superior a 77%). Resultados globais indicaram secagem das farinhas a 60 °C e adição de 30% em biscoitos cookies como suplemento nutricional.

2.2. A água nos alimentos

Numerosos tipos de reações químicas podem ocorrer em alimentos resultando na deterioração do produto em pouco tempo. A água influencia as reações químicas tanto no aspecto quantitativo (controle da cinética) quanto no qualitativo (controle da ocorrência ou

não de reação). A função da água na estabilidade dos alimentos é muito importante devido ao potencial que esta tem em contribuir nos processos de deterioração, nas reações químicas, físicas e microbiológicas, como mostrado na Figura 2.3.

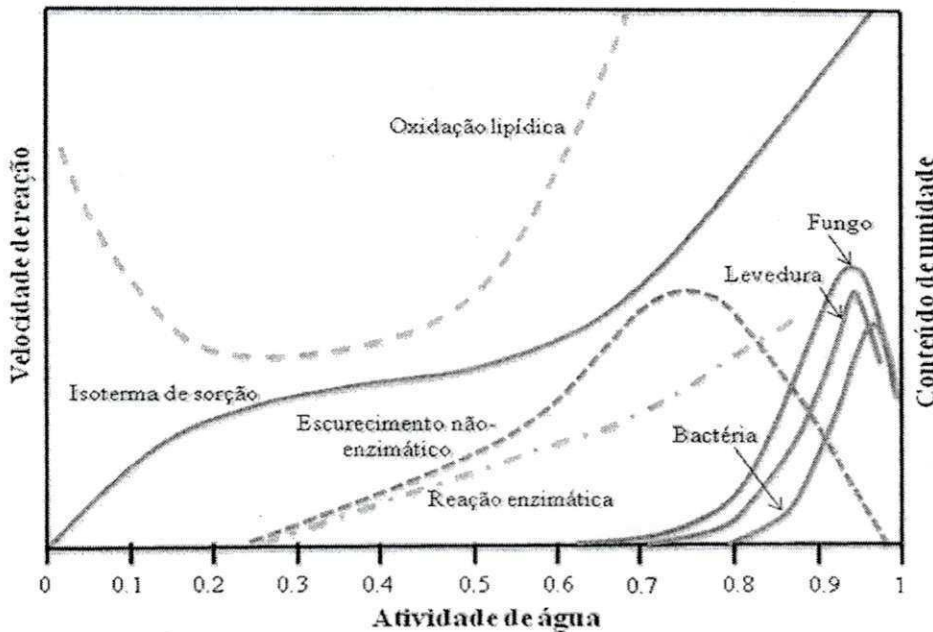


Figura 2.3 - Esquema da estabilidade dos alimentos em função da atividade de água (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007).

Atividade de água (a_w) é a medida do estado da água nos alimentos e é definida como o potencial químico no sistema que fornece equilíbrio na maioria da estrutura do alimento. Porém, a a_w pode ser obtida pela razão da pressão de vapor de água do alimento (P) e a pressão de vapor de água pura (P_0) a uma única condição de temperatura e pressão (Equação 2.1). Assim, a relação entre potencial químico, pressão de vapor e a_w indica que a a_w é uma propriedade do alimento dependente da temperatura:

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{\text{Umidade relativa}}{100} \quad (2.1)$$

A oxidação é uma reação comum em ácidos graxos e ascórbicos promovendo mudanças na aparência do produto final e diminuindo o potencial das matérias primas (BRENNAN, 2006). Portanto, a estabilidade dos alimentos e sua resistência à oxidação é função de seu conteúdo de umidade, onde baixos valores de a_w catalisam favoravelmente as reações de oxidação em alimentos, provavelmente pelo fato dos catalisadores se concentrarem. As reações hidrolíticas que causam a formação de ácidos graxos livres são catalisadas pela enzima lipase ou pela ação de calor e umidade (BORDIGNON, 2009).

2.3. Isotermas de sorção

As isotermas de sorção são funções da a_w ou da umidade relativa ($UR\%$) à temperatura constante. O vapor de sorção de alimentos depende de muitos fatores, como composição química, estado físico-químico dos ingredientes e estrutura física. A relação entre o conteúdo total de umidade e a a_w no alimento, sobre faixas de valores a temperaturas constantes, produz isotermas de sorção que podem ser expressas graficamente. Essas curvas de isotermas podem ser obtidas de duas formas:

- ☒ Isotermas de adsorção: são obtidas em locais onde o material está completamente seco e o incremento da umidade relativa a várias pressões faz com que o material ganhe peso devido à entrada de água na estrutura.
- ☒ Isotermas de dessorção: são obtidas em locais onde o material está completamente úmido e dependendo da umidade relativa do sistema, a umidade do material diminui na medida em que perde peso.

Na maioria das representações gráficas das isotermas nos alimentos observam-se tendências não lineares ou formas sigmóides. Pesquisadores como Brunauer et al. (1940) classificaram as isotermas nos alimentos pela capacidade que têm os poros de adsorver gases

por meio de forças como as de Van Der Waals. Na Figura 2.4 são ilustrados os diferentes estados das isotermas segundo Brunauer:

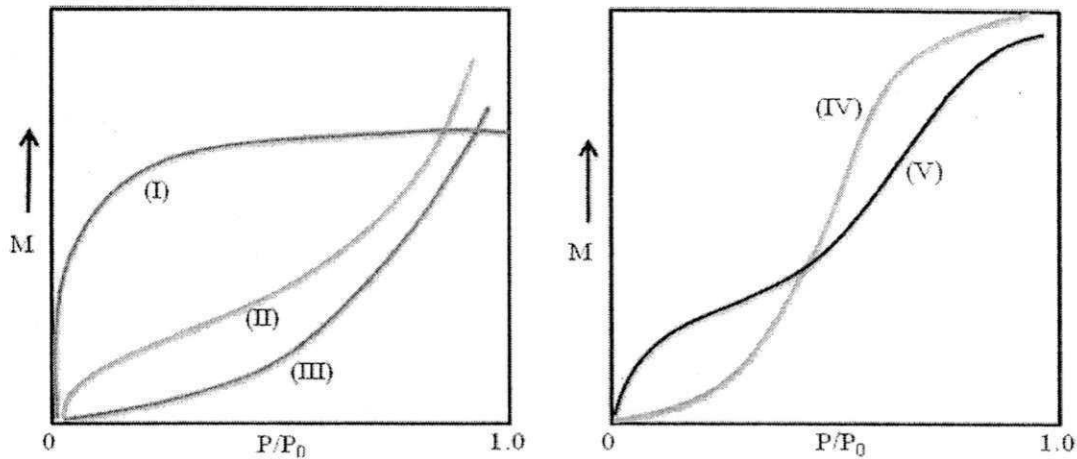


Figura 2.4 - Tipos de isotermas de sorção de Van Der Waals (BRUNAUER et al., 1940).

Onde M é a umidade de equilíbrio e P/P_0 é a atividade de água.

Na Figura 2.4 pode-se observar que na curva tipo I a água está fortemente ligada ao produto. Na curva tipo II a água está pouco ligada e geralmente presente em pequenos capilares. Na curva tipo III o conteúdo de água presente no produto encontra-se em grandes capilares podendo ser considerada como água livre. Nas curvas tipo IV e V, a adsorção máxima ocorre a uma pressão inferior à pressão de vapor do gás (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007).

O tamanho dos poros na estrutura interna dos sólidos é um limitante para adsorver água e as isotermas de sorção da maioria dos alimentos são não-lineares, geralmente sigmoidais. A forma das isotermas pode ser modificada correspondentemente, passando do tipo II para III e do tipo IV para V (AL-MUHTASEB et al., 2002).

2.3.1. Determinação da isoterma de sorção

Muitos métodos são viáveis para determinar isotermas de sorção de água. Estes métodos podem ser classificados em três categorias: gravimétrico, manométrico e higrométrico (AL-MUHTASEB et al., 2002).

- ☐ Método gravimétrico: envolve a medição da variação de peso que pode ser determinada por métodos contínuos e descontínuos em sistemas dinâmicos ou estáticos (o ar pode ser circulante ou estacionário). Métodos contínuos empregam o uso de eletro-balanças ou balanças de mola de quartzo. Nos métodos descontínuos, soluções de sais ou de ácido sulfúrico são utilizadas em atmosferas controladas com o alimento até atingir um equilíbrio entre a umidade do produto e a umidade relativa do sistema.
- ☐ Método manométrico: emprega medições da pressão de vapor da água no espaço de vapor circundante do alimento. Para melhorar a precisão das medições, utilizam-se manômetros de mercúrio em vez de óleo. Todo o sistema é mantido a uma temperatura constante onde as amostras do alimento perdem água à medida que se equilibra com o vapor do sistema. Esta perda de peso é observada por meio do manômetro.
- ☐ Método higrométrico: utiliza medições do equilíbrio entre a umidade relativa do ar em contato com o alimento em um conteúdo de umidade. Higrômetros de ponto de orvalho detectam a condensação da água resfriada no vapor. Higrômetros elétricos medem a variação na capacitância e condutância de higrossensores. Muitos higrossensores são feitos com sais higroscópicos (LiCl) os quais absorvem a umidade proveniente da amostra.

A técnica gravimétrica é a mais utilizada e padronizada para água. Muitos artigos publicados utilizam este método em várias temperaturas e atividades de água. Entre as vantagens, encontram-se (GAL, 1981): determina o peso exato da amostra, minimiza a

atuação da temperatura entre a superfície da amostra e o vapor de água circundante, registra as variações de pesos das amostras em equilíbrio com sua respectiva pressão de vapor de água e consegue um equilíbrio higroscópico entre as amostras e a pressão de vapor da superfície.

2.3.2.. Modelos matemáticos para avaliação e ajuste das isotermas de sorção

Para a tecnologia de processos, em especial na indústria dos alimentos, farmacêutica, bebidas e álcool, é essencial um bom entendimento da umidade de equilíbrio nas isotermas de sorção para estabelecer o conteúdo crítico do conteúdo de umidade de materiais de origem biológica e para potenciar a predição das mudanças na estabilidade dos alimentos. Para a predição do conteúdo de umidade de sorção encontram-se cerca de 270 modelos matemáticos em uso, com dois ou mais parâmetros como constantes. Os modelos são propostos para avaliar o conteúdo de umidade nas isotermas de sorção e classificam-se em: teóricos, semi-empíricos e empíricos (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007).

Modelos baseados na cinética da monocamada, multicamada e a camada condensada são agrupados nos modelos teóricos. As constantes destes modelos, ao contrário dos modelos empíricos ou semi-empíricos, são propriedades físicas da matéria. Dependendo do modelo baseado na análise das isotermas, existe um segmento onde as constantes podem não ser satisfatórias, ou seja, que para cada tipo de alimento (dependendo de sua composição) a a_w influencia na determinação dos cálculos destas constantes (HALL, 2006).

Entre os modelos teóricos dois se destacam por serem os mais empregados para determinar o conteúdo de umidade da monocamada nos alimentos (KAREL, 1975; LABUZA, 1975). São os modelos de Brunauer, Emmet e Teller (BET) e o de Guggenheim, Anderson e de Boer (GAB), representados pelas Equações 2.2 e 2.3 respectivamente.

$$X = \frac{(X_m c a_w)(1 - (N+1) a_w^N N a_w^{N+1})}{(1 - a_w)(1 - (c-1) a_w - c a_w^{N+1})} \quad (2.2)$$

$$X = X_m \frac{CKa_w}{[(1 - Ka_w)(1 - Ka_w + CKa_w)]} \quad (2.3)$$

onde N é o número de camadas moleculares, c é a constante energética do modelo de BET ($c = e^{Q_{st}/RT}$, Q_{st} : calor de sorção ($J \cdot mol^{-1}$), R : constante universal dos gases $8,316 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$, T : temperatura absoluta (K)), X é o conteúdo de umidade equilíbrio do material ($kg \cdot kg^{-1}$, b.s.), a_w é a atividade de água, X_m é o conteúdo de umidade da monocamada ($kg \cdot kg^{-1}$, b.s.), C é a constante de Guggenheim referente ao calor de sorção e K é a constante relacionada às propriedades das moléculas da multicamada (CASSINI et al., 2006; IGLESIAS; CHIRIFE, 1995; LABUZA et al., 1985).

Os modelos empíricos foram desenvolvidos considerando a condensação da multicamada a uma distância relativamente grande da superfície. Entre os modelos mais famosos destacam-se o modelo de Oswin (1946) (Equação 2.4), o modelo de Halsey (1948) (Equação 2.5), o modelo de Henderson (1952) (Equação 2.6) e o modelo de Chung e Pfof (1967) (Equação 2.7). Estes modelos são muito importantes para descrever isotermas sigmóides características de produtos com baixo teor de umidade, como grãos, cereais, sementes e algumas hortaliças (ROBERTS et al., 2008; SAMAPUNDO, 2007; RIZVI, 2005).

$$X = k \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^n \quad (2.4)$$

$$a_w = e^{\left(\frac{-k}{X^n} \right)} \quad (2.5)$$

$$1 - a_w = e^{(-kTX^n)} \quad (2.6)$$

$$X = a + b \ln(-\ln a_w) \quad (2.7)$$

onde a, b, k, n são as constantes dos modelos (adimensionais) e T é a temperatura em graus Kelvin.

Alguns modelos podem ser considerados mais adequados que outros porque descrevem com maior precisão o fenômeno de sorção numa ampla faixa de atividade de água, fornecendo parâmetros que permitem relacionar o efeito da temperatura (LABUZA et al., 1985).

2.3.3. Efeito da temperatura nas isotermas de sorção

O efeito da temperatura na isoterma de sorção é de grande importância dado que os alimentos são expostos a variações de temperatura durante o armazenamento e processamento, mudando constantemente a atividade de água. Quando se obtém uma umidade em uma isoterma de sorção, a temperatura deve ser especificada e mantida constante, por afetar a mobilidade das moléculas da água e a dinâmica de equilíbrio entre o vapor e as fases adsorvidas. Portanto, quando se determinam as umidades de equilíbrio em uma isoterma de sorção, a temperatura deve estar constante. Em geral, o efeito da temperatura no incremento da a_w a uma umidade de equilíbrio constante é alta para atividades de água intermediária. Observando a Figura 2.5, a atividade de água aumenta à medida que aumenta a temperatura para um teor de umidade constante. Como exemplo, devido à natureza da ligação da água, a a_w constante, alimentos que seguem a isoterma tipo II têm menos água a temperaturas superiores que a temperaturas mais baixas (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007).

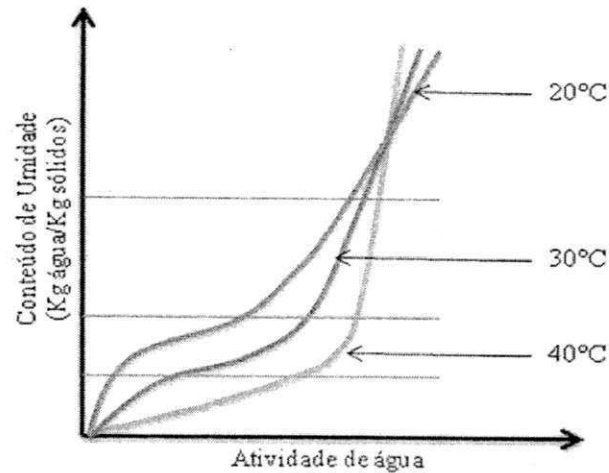


Figura 2.5 - Mudanças na atividade de água de alimentos submetidos à variação na temperatura (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007).

Irvin Langmuir em 1916 foi o primeiro pesquisador em descrever a dependência das camadas superficiais com a pressão de vapor a uma temperatura fixa. O efeito da temperatura na umidade das isotermas de sorção é bem discutido em detalhe, servindo como base na hora de definir as diferentes propriedades termodinâmicas da água nos alimentos (STRUMILLO et al., 2006).

2.4. Propriedades termodinâmicas da água

As propriedades termodinâmicas da água e as isotermas de sorção de umidade são ferramentas úteis na determinação das interações água/material, água contida na superfície e no interior da estrutura dos alimentos e também para fornecer informações úteis na avaliação das operações de processamento de alimentos, tais como secagem, mistura e armazenamento (PÉREZ-ALONSO et al., 2006). O conhecimento das isotermas de sorção a diferentes temperaturas permite uma avaliação do calor de sorção, que determina a interação entre o adsorvente e o adsorvido. Normalmente, a determinação desta propriedade significa analisar

os dados experimentais das isotermas de sorção através da equação de Clausius-Clapeyron (Equação 2.8) a um teor de umidade constante:

$$\frac{\partial(\ln a_w)}{\partial(1/T)} = -\frac{q_s}{R} \quad (2.8)$$

onde q_s é o calor isostérico líquido de sorção ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$). Na Equação 2.9 vemos que o calor isostérico de sorção (Q_{st}) é a soma do calor isostérico líquido de sorção e a energia de vaporização da água pura (λ) (BASU et al., 2006).

$$Q_{st} = q_s + \lambda \quad (2.9)$$

O calor de sorção calcula o excesso de energia para a remoção da água e não existem na literatura dados sobre esta propriedade para diferentes alimentos. Portanto, para prever a a_w de um alimento a qualquer temperatura, a umidade de equilíbrio das isotermas de sorção devem ser determinadas pelo menos em duas temperaturas. Assim, quando analisamos graficamente $\log a_w$ vs. $1/T$, pode-se observar uma linha reta a um teor de umidade constante (Figura 2.6), e a a_w , para qualquer temperatura a um conteúdo de umidade, pode ser encontrada (GARCÍA-PÉREZ et al., 2008; MULET et al., 1999).

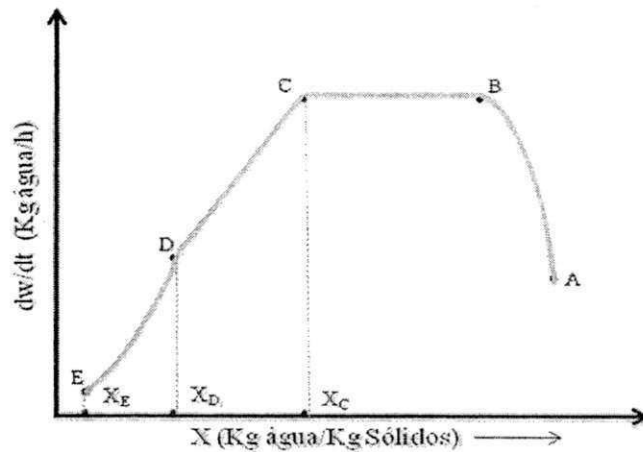


Figura 2.9 - Variação da velocidade de secagem em função da umidade (HALL, 2006).

Os mecanismos de movimentação interna do líquido na estrutura de um alimento durante a secagem determinam o período de velocidade constante. Este período emprega a energia ou calor de evaporação como a força principal para que aconteça a desidratação e é provável que a movimentação do líquido seja controlada por forças capilares e gravitacionais.

O ponto C, chamado de conteúdo de umidade crítica (X_C), está relacionado com a espessura do material e com a velocidade de secagem e indica a transição do conteúdo de umidade no final do período de velocidade constante. Neste ponto, o conteúdo de umidade do alimento não é suficiente para saturar totalmente sua superfície. Entre C e D encontra-se o período de baixa velocidade onde a movimentação da água do interior para a superfície é menor que sua evaporação sobre a mesma. A partir do ponto D, o fenômeno de difusão ocorre com maior força sendo chamado de segundo período de velocidade baixa. O Ponto E, conhecido como conteúdo de umidade de equilíbrio (X_E) é o limite do processo de secagem, já que a água restante é a ligada ao alimento (HALL, 2006).

As sementes em geral apresentam o período de secagem à velocidade constante muito curto ou inexistente porque nas condições operacionais de secagem, as resistências às transferências de água encontram-se essencialmente no seu interior, tornando a taxa de

evaporação superficial acentuadamente superior à taxa de reposição de água do interior para a superfície (LASSERAN, 1978; BROOKER et al., 1974).

2.5.2. Modelagem da cinética de secagem

O estudo de sistemas de secagem, seu dimensionamento, otimização e determinação da viabilidade de sua aplicação comercial podem ser feitos por simulação matemática. Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa satisfatoriamente a perda de umidade durante o período de secagem (AFONSO-JÚNIOR; CORRÊA, 1999).

2.5.2.1. Período de taxa constante

Matematicamente o período de taxa constante pode ser determinado pela Equação 2.13:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{hA(T_{amb} - T_{bu})}{\lambda} \quad (2.13)$$

onde dX/dt é a taxa de secagem, A é a área da superfície exposta (m^2), h é o coeficiente de transferência de massa ($W \cdot (m^2)^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$), λ é o calor de vaporização ($J \cdot mol^{-1}$), T_{amb} é a temperatura ambiente ($^\circ C$) e T_{bu} é a temperatura de bulbo úmido ($^\circ C$) (HALL, 2006).

Devido à superfície do material estar úmida e a temperatura ser igual à temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, despreza-se a transferência de calor por condução e radiação. Normalmente a equação de transferência de calor dá uma estimativa mais segura da taxa de secagem do que a equação de transferência de massa, porém, correlações são propostas na literatura para permitir que as constantes nestas relações sejam fixadas com segurança. Estas

constantes são função da espessura do filme de ar que envolve o produto na secagem e são afetadas pela velocidade do ar e seu ângulo de colisão sobre a superfície seca. Expresso em termos de fluxo de massa de ar (G), o coeficiente de transferência para fluxo de ar paralelo a superfície do produto é dado por:

$$h = C_1(G)^{0.8} \quad (2.14)$$

Para o fluxo de ar no ângulo direto da superfície de secagem o coeficiente de transferência de calor é dado por:

$$h = C_2(G)^{0.4} \quad (2.15)$$

onde C_1 e C_2 são constantes.

As equações anteriores indicam que o aumento do fluxo de massa de ar acelera a taxa de secagem. Adicionalmente, uma velocidade mais alta minimiza as diferenças de umidade entre o interior e o exterior de um sistema de secagem e desta forma o teor de umidade do produto pode-se manter constante (FORSON et al., 2007).

2.5.2.2. Período de taxa decrescente

De acordo com Queiroz et al. (1985) são dois os métodos comumente usados para analisar a secagem de produtos biológicos no período de taxa decrescente: o empírico e o teórico. O método empírico consiste em formar grupos físicos adimensionais que podem ser facilmente investigados por experimentos de laboratório e baseia-se nas condições externas como temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem. Entretanto, não fornece indicação sobre o transporte de energia e de água no interior dos produtos. Os métodos teóricos usados para descrever o processo de secagem são baseados em leis físicas que tentam explicar o mecanismo de transferência de água (KAR et al., 2008).

2.5.2.2.1. Modelos empíricos empregados no período de taxa decrescente

Estes modelos empíricos de secagem em camada delgada seriam aqueles que concorreriam para que houvesse harmonia entre a teoria e a facilidade de uso. A secagem em camada delgada refere-se ao processo no qual o material a ser seco está inteiramente exposto ao ar que se move através dele; utiliza-se a Lei de Newton (Equação 2.16) para representar a taxa de variação da temperatura de um corpo circundado por um fluido à temperatura constante (HALL, 2006).

$$\frac{d\theta}{dt} = -\xi(\theta - \theta_e) \quad (2.16)$$

onde ξ é a constante de resfriamento ou aquecimento ($K \cdot s^{-1}$); θ (K) é a temperatura do produto em qualquer tempo t e θ_e (K) é a temperatura do meio que envolve o produto.

Esta equação é uma equação diferencial linear de primeira ordem, cuja solução pode ser obtida por separação de variáveis e posterior integração resultando na equação exponencial mostrada a seguir:

$$\int_{\theta_e}^{\theta} \frac{d\theta}{(\theta - \theta_e)} = \int_{t_0}^t -\xi dt \quad (2.17)$$

$$\frac{\theta - \theta_e}{\theta_0 - \theta_e} = e^{-\xi t} \quad (2.18)$$

Atualmente são empregados muitos modelos empíricos para as análises de curvas de secagem os quais derivam do resultado anterior, como:

O modelo de Page:

$$M = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \exp(-kt^N) \quad (2.19)$$

O modelo de Lewis:

$$M = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \exp(-kt) \quad (2.20)$$

O modelo de Henderson-Pabis:

$$M = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = a \cdot \exp(-kt) \quad (2.21)$$

O modelo de Peleg:

$$X = \frac{X_i - t}{k_1 + k_2 t} \quad (2.22)$$

onde M é a razão de umidade (adimensional), X ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, b.s.) é a umidade do produto no tempo t , X_i é o conteúdo de umidade inicial ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, b.s.), X_e é o conteúdo de umidade de equilíbrio ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, b.s.), k, k_1, k_2 são as constantes de velocidade de secagem ($\text{s}^{-1}, \text{m}^{-1}, \text{h}^{-1}$), N e a são constantes (ROBERTS et al., 2008; CARLESSO et al., 2005).

2.5.2.2.2. Modelos teóricos empregados no período de taxa decrescente

A principal teoria utilizada para interpretar a secagem de alimentos e de produtos agrícolas é a teoria da difusão da umidade como líquido ou vapor, representada pela segunda lei de Fick, mostrada na Equação 2.23 (CRANK, 1975).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla (D_{ap} \nabla_x) \quad (2.23)$$

onde X é a umidade ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, b.s.), t é o tempo (s, min, h) e, D_{ap} é a difusividade aparente ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Os modelos que empregam a teoria da difusão podem descrever de forma aceitável o perfil da distribuição de água no interior de determinado produto agrícola desde que seja possível correlacionar sua forma à geometria de um sólido perfeito, além da exigência do

estabelecimento de uma relação funcional entre o coeficiente de difusão, o teor de umidade e a temperatura (RATTI, 2009; CLEMENTE et al., 2007).

Crank (1975) apresenta uma série de soluções analíticas a partir da segunda lei de Fick para determinar a difusividade aparente de sólidos com formas geométricas regulares. Assumindo que seja: a transferência interna de umidade unidirecional durante a secagem, o coeficiente de difusão constante, o conteúdo de umidade inicial distribuído uniformemente no interior do produto, desprezada as resistências externas e a transferência de massa, que permaneça constante o teor de umidade na superfície do produto durante o processo e que seu valor corresponda ao termo de umidade de equilíbrio do produto, tem-se para uma placa infinita (Equação 2.24), cilindro infinito (Equação 2.25) e esfera (Equação 2.26) as seguintes soluções analíticas da Lei de Fick:

$$M = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ap} t}{4L^2}\right] \quad (2.24)$$

$$M = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{r^2 \alpha_n^2} \exp(-D_{ap} \alpha_n^2 t), J_0(r \alpha_n) = 0 \quad (2.25)$$

$$M = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 \pi^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{ap} t}{r^2}\right) \quad (2.26)$$

onde D_{ap} é a difusividade aparente ($m^2 \cdot s^{-1}$), L é a meia espessura do produto (m), r é o raio equivalente da esfera e do cilindro (m), J_0 é a função de Bessel primeiro tipo e ordem zero, α_n são as raízes da função de Bessel e n é o número de séries na solução analítica (SRIKIATDEN; ROBERTS, 2006; CRANK, 1975).

2.5.3. Fatores que afetam a difusividade

A difusividade tem uma forte dependência da temperatura e do conteúdo de umidade. Em materiais porosos, a fração porosa afeta significativamente a difusividade e depende da sua estrutura e distribuição. A dependência da difusividade na temperatura é descrita geralmente pela equação de Arrhenius, expressa por:

$$D_{ap} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (2.27)$$

onde D_0 é o fator de Arrhenius ($m^2 \cdot s$) e E_a é a energia de ativação para difusão ($J \cdot mol$).

A dependência da difusividade no conteúdo de umidade pode ser introduzida na equação de Arrhenius considerando um fator empírico na energia de ativação, sendo função da umidade (HALL, 2006; SRIKIATDEN; ROBERTS, 2006; JOWITT et al., 1987).

2.6. Aproveitamento tecnológico de resíduos agroindustriais

Sabe-se que dentre os produtos de origem vegetal, a jaca é um dos maiores frutos do mundo nascidos em árvore e muito nutritivos. No entanto, seu consumo entre os brasileiros é pouco difundido se restringindo aos locais de produção nativa. Segundo Oliveira (2009), uma das hipóteses levantadas para entender o baixo consumo deste fruto é seu aroma característico muito acentuado, o que leva de imediato a apreciação ou a rejeição da jaca. Neste sentido, o processamento de jaca através da desidratação, com seu melhoramento tecnológico (textura, aparência, aroma e sabor) pode ser uma alternativa viável que agregue valor a uma matéria-prima pouco ou não comercializada, já que aplicação de calor remete diretamente à perda de compostos voláteis, responsáveis pela rejeição nos indivíduos não apreciadores. Esta perspectiva poderá atender as exigências presentes e futuras do

consumidor e ajustar-se à necessidade do desenvolvimento de novos tipos de produtos, que vão ao encontro não só das demandas de consumo, mas também das novas atitudes do consumo, como por exemplo, o crescente interesse por alimentos saudáveis com alto valor nutritivo e com redução de aditivos químicos. Além disso, possibilita aos pequenos e médios produtores o seu aproveitamento, contribuindo para a sustentabilidade, geração de emprego e renda e a segurança alimentar, em seus aspectos qualitativos e quantitativos.

Mesmo com a atual crise devido ao aumento dos preços dos alimentos, o desperdício em toda a cadeia de produção de alimentos é muito grande. Muito do que é considerado resíduo (cascas, sementes, caules, etc.) a nível industrial e doméstico, tem como destino à alimentação animal ou são descartados como lixo. Muitas pesquisas são realizadas com o objetivo de minimizar esses desperdícios e agregar valor a um produto, que antes teria pouco ou nenhum valor, processando e utilizando para formulação de produtos já conhecidos ou novos (ARVANITOYANNIS, 2008).

Nos últimos anos, vários pesquisadores brasileiros vêm estudando o aproveitamento de resíduos de frutas gerados pelas agroindústrias para a produção de alimentos, tais como as frutas refugadas, cascas e centros das frutas, as sementes, os caroços e o bagaço. Uma alternativa é a transformação destes resíduos em pós alimentícios ou farinhas, que além de possuírem diversos componentes, tais como: fibra, vitaminas, minerais, substâncias fenólicas e flavonóides, apresentam efeitos benéficos à saúde, podendo auxiliar na prevenção de diversas doenças crônicas não transmissíveis (BRENNAN, 2006).

Os resíduos de frutas e hortaliças são geralmente desprezados por preconceito ou falta de informação, quando na grande maioria das vezes são os que contêm maior concentração de nutrientes e poderiam ser utilizados como fontes alternativas com o objetivo de aumentar o valor nutritivo da dieta de populações carentes, bem como solucionar deficiências dietéticas do excesso alimentar (PEREIRA et al., 2003).

O aumento da preocupação e das ações envolvendo o combate à pobreza e a miséria e a conservação ambiental tem crescido no Brasil nos últimos anos e ações relacionadas com a diminuição do desperdício de alimentos e o aproveitamento dos resíduos do processamento agroindustrial abrangem questões econômicas e sociais e contribuem para a preservação ambiental. Esforços para a criação de parcerias agroindústria e comunidade local poderiam resultar na formação de associações para a utilização e processamento dos resíduos agrícolas, contribuindo com o desenvolvimento social. Por outro lado, o aproveitamento dos resíduos, que são poluentes, contribuiria também na conservação ambiental (THASSITOU; ARVANITOYANNIS, 2001; SCHAUB; LEONARD, 1996), colaborando para a preservação dos recursos naturais e promovendo a maximização do aproveitamento energético aplicado.

2.7. Qualidade dos produtos

A atividade de processamento e armazenamento de produtos alimentícios está diretamente vinculada à preocupação de se manter suas propriedades preservadas. Segundo Rahman (2005), o conhecimento das propriedades dos alimentos é necessário no projeto e desenvolvimento de processos, no controle de qualidade e no acondicionamento dos produtos, visando preservar suas características pelo maior tempo possível. De maneira geral, as propriedades dos alimentos são classificadas em propriedades físicas e físico-químicas, cinéticas, sensoriais e funcionais.

A qualidade de um alimento é determinada pelas características de cor, aparência, aroma, textura, sabor e valor nutritivo, que são aspectos de grande importância tecnológica para o grau de aceitabilidade do produto. Esta qualidade depende não somente das condições iniciais do material, mas também das alterações ocorridas durante o processamento e

estocagem, envolvendo modificação na estrutura física e química do alimento especialmente durante a secagem (KHARAISEM et al., 1997).

Strumillo e Adamiec (1991) classificaram as alterações nas propriedades dos produtos biológicos durante o processo de secagem em quatro tipos: bioquímica (ação de leveduras, fungos e bactérias), enzimática (perda de atividade por oxidação); química (decréscimo de valores nutritivos); e física (perda de aroma e encolhimento) que afetam a textura, a densidade, a capacidade de reidratação, a aglomeração e as propriedades mecânicas de alimentos desidratados.

Essas alterações dependem de fatores como as propriedades e características da matéria-prima, métodos e condições de secagem. Portanto, na secagem de alimentos, a relação entre as condições de processamento e a qualidade do produto é mais complexa que em outros tipos de processos. Tal fato é devido, principalmente, à temperatura e umidade. As taxas de degradação dos atributos de qualidade, normalmente, são funções destes dois parâmetros (EL-AOUAR, 2005).

2.8. Referências

AFISJ- Agriculture and Fisheries Information Service -**Jackfruit**, Department of Agriculture.

(2011). Disponível em: <<http://www.da.gov.ph/tips/jackfruit.pdf>> Acesso em: 3/9/2011.

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. 349-53, 1999.

- AL-MUHTASEB, A. H.; McMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. **Food and Bioproducts Processing**, Rugby, v. 80, n. 2, p. 118-128, 2002.
- ARVANITOYANNIS, L. S. **Waste management for the food industries**. New York: Food Science and Technology, International Series, 500 p, 2008.
- ASQUIERI, E. R.; RABÊLO, A. M. S.; SILVA, A. G. M. Fermentado de jaca: estudo das características físico-químicas e sensoriais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 28, n. 4, p. 881-887, 2008.
- AWAD, M. **Fisiologia pós-colheita de frutas**. São Paulo: Nobel, 185 p, 1993.
- BALBACH, A.; BOARIM, D. S. F. **As frutas na medicina natural**, São Paulo: Editora Missionária, 89 p, 1992.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; FONTANA-JR, A. J.; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. **Water activity in foods: fundamentals and applications**. Ames: Blackwell Publishing Professional, 438 p, 2007.
- BARREIRA, M. C. R. **Pomada cicatrizante de semente de jaca**, 2004. Disponível em: <<http://www.universia.com.br/materia/materia.jsp=4384>>, Acesso em: 15 /9/ 2010.
- BASU, S.; SHIVHARE, U. S.; MUJUMDAR, A. S. Models for sorption isotherms for foods: a review. **Drying Technology**, Singapore, v. 24, n. 8, p. 917-930, 2006.
- BORDIGNON, B. C. S. **Relação das condições de armazenamento com a qualidade fisiológica de sementes e composição do óleo extraído de cultivares de soja**. Tese (mestrado) - Departamento de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria, 90 p., 2009.

- 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. **Alim. Nutr.**, Araraquara, v. 17, n. 3, p. 317-321, 2006.
- BRENNAN, J. G. **Food processing handbook**. Weinheim: Wiley-VCH, 602 p., 2006.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**. Connecticut, the AVI publishing company, inc., 265 p., 1974.
- BRUNAUER, S.; DEMING, L. S.; DEMING, E. W.; TELLER, E. On the theory of Van der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical Society**, Washington, v. 62, p. 1723-1732, 1940.
- CARLESSO, V. O.; BERBERI, P. A.; DA SILVA, R. F.; VIANNA, A. P.; DETMANN, E.; DIONELLO, R. G. Secagem de sementes de maracujá em camada delgada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 444-448, 2005.
- CASSINI, A. S.; MARCZAK, L. D.; NOREÑA, C. P. Water adsorption isotherms of texturized soy protein. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 77, n. 1, p. 194-199, 2006.
- CHUNG, D. S.; PFOST, H. Adsorption and desorption of water by cereal grains and their products. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineering**, New York, v. 10, p. 549-554, 1967.
- CLEMENTE, G.; BON, J.; GARCÍA-PÉREZ, J. V.; MULET, A. Natural convection drying at low temperatures at previously frozen salted meat. **Drying Technology**, New York, v. 25, n. 11, p. 1885-1891, 2007.

- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. London: Clarendon Press Oxford, 421 p., 1975.
- CRUZ, E. N.; RIBEIRO, J. C. A.; LIRA, K. M.; SILVA, L. A.; MOREIRA, R. T. SANTOS, E. P. Análise sensorial de biscoitos produzidos com substituição parcial de farinha de trigo por farinha de caroço de jaca (*Artocarpus heterophyllus*). **Anais II Jornada Nacional da Agroindústria**, Bananeiras- PB, dezembro, 2007.
- DANTAS, H. J.; SILVA, A. S.; LIMA, E. E.; FARIAS, P. A.; ANDRADE, M. A. Obtenção da polpa de jaca em pó pelo método de secagem em camada de espuma (foam-matdrying) **Anais III Jornada Nacional da Agroindústria**, Bananeiras- PB, agosto, 2008.
- EL-AOUAR, A. A. **Estudo do processo de secagem de mamão formosa (*Carica papaya* L.) fresco e pré-tratado osmoticamente**. Tese: Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 241 p., 2005.
- ELEVITCH, C. R.; MANNER, H. I. *Artocarpus heterophyllus* (jackfruit): Moraceae (mulberry family). **Species Profiles for Pacific Island Agroforestry**, p 1-17, 2006. Disponível em: <<http://www.nationaltree.org>>. Acesso em: 15/08/ 2010.
- FORSON, F. K.; NAZHA, M. A. A.; AKUFFO, F. O.; RAJAKARUNA, H. Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: application of principles and rules of thumb. **Renewable Energy**, Oxford, v. 32, n. 14, p. 2306-2319, 2007.
- FOUST, A. S., WENZEL, L. A., CLUMP, C. W., ANDERSON, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 172 p., 1982.
- GAL, S. **Techniques for obtain completes sorption isotherms, water activity: influences on food quality**. New York: Academic Press, 60 p, 1981.

- GARCÍA, C. F.; MOYANO, P. C.; PEDRESCHI, F. Enthalpy-entropy compensation for water loss of vegetable tissues during air drying. **Drying Technology**, Singapore, v. 26, n. 10-12, p. 1563-1569, 2008.
- GARCÍA-PÉREZ, J. V.; CÁRCEL, J. A.; CLEMENTE, G.; MULET, A. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. **LWT -Food Science Technology**, Zurich, v. 41, n. 1, p. 18-25, 2008.
- GOMES, R. P. **Fruticultura brasileira**. São Paulo: Nobel, 448 p., 1977.
- GONZAGA NETO, L., SOARES, J. M. **Acerola para exportação: aspectos técnicos da produção**. Coleção Frutex, Brasília: EMBRAPA-SPI, 42 p., 1994.
- HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI Publishing Company, 556 p., 1980.
- HALL, C. W. **Handbook of industrial drying**. Montreal: Taylor & Francis Group, 1312 p., 2006.
- HALSEY, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. **Journal of Chemistry Physics**, Pennsylvania, v. 16, p. 931-937, 1948.
- HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural Engineering**, Seattle, v. 33, p. 29-32, 1952.
- IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. An alternative to the GAB model for the mathematical description of moisture sorption isotherms of foods. **Food Research International**, Barking, v. 28, p. 317-321, 1995.

JOHN, P. J.; NARASIMHAM, P. Processing and evaluation of carbonated beverage from jackfruit waste (*Artocarpus heterophyllus*). **Journal of Food Processing and Preservation**, v.16, n.6, p. 373-380, 1993.

JOWITT, R.; ESCHER, F.; HALLSTOM, B.; MEFFERT, H. F. T.; SPIESS, W. E. L.; VOS, G. **Physical Properties Methods of Foods**. London: Applied Science Publishers, 564 p., 1987.

KAR, S.; CHEN, X. D.; ADHIKARU, B. P.; LIN, S. X. Q. The impact of various drying kinetics models on the prediction of sample temperature-time and moisture content-time profiles during moisture removal from stratum corneum. **Chemical Engineering Research and Design**, London, v. 86, p. 1-17, 2008.

KAREL, M. Physico-chemical modifications of the state of water in foods: a speculative survey. In: DUCKWORTH, R. B. **Water relations of foods**. 2. ed. London: Academic Press, 180 p., 1975.

KHARAIHEM, M.A.M.; COOPER, T.J.R.; MAGEE, T.R.A. Shrinkage characteristics of potatoes dehydrated under combiner microwave and convective air conditions. **Drying Technology**, Singapore, v. 15, n. 3, p.1003-1022, 1997.

KROKIDA, M. K.; MARINOS-KOURIS, D. Rehydration kinetics of dehydrated products. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 57, p. 1-7, 2003.

LABUZA, T. P. Sorption phenomena in foods: theoretical and practical aspects. In: REIDEL, D. **Theory, determination and control of physical properties of food materials**. Dordrecht: Reidel Publishing Company, 250 p., 1975.

- LABUZA, T. P.; KAAANANE, A.; CHEN, J. Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrates foods. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 50, p. 385-389, 1985.
- LASSERAN, J. C. Características técnicas dos secadores. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 4, n. 2, p. 4-14, 1978.
- MAIA, G., A. Aproveitamento industrial da jaca *Artocarpus integrifolia* L.. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 11, p. 115-121, 1980.
- MORTON, J. Breadfruit. In: Fruits of warm climates. Eds: Morton, J. F. p. 50-80. 1987.
Disponível em: <http://www.hort.purdue.edu/newcrop/morton/breatfruit.html>. Acesso em: 15/08/2010.
- MULET, A.; GARCÍA-REVERTER, J.; SANJUÁN, R.; BON, J. Sorption isosteric heat determination by thermal analysis and sorption isotherms. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 64, p. 64-68, 1999.
- NARASIMHAM, P. Breadfruit and jackfruit, In: S. Nagy, P. E. Shaw and W. F. Wardowski, eds.). Fruits of tropical and subtropical origin. **Florida, Science Source**, p. 193-259, 1990.
- OLIVEIRA, L. F. **Efeito dos parâmetros do processo de desidratação de jaca (*Artocarpus heterophyllus*, Lam.) sobre as propriedades químicas, físico-químicas e aceitação sensorial**. Seropédica, RJ, 121 p. Julho de 2009.
- OSWIN, C. R. The kinetics of package life III. The isotherm. **Journal of Chemistry Industry**, London, v. 65, p. 419-421, 1946.

PEREIRA, G. I. S.; PEREIRA, R. G. F. A.; BARCELOS, M. F.; MORAIS, A. R. Avaliação química da folha de cenoura visando ao seu aproveitamento na alimentação humana. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 4, p. 852-857, 2003.

PÉREZ-ALONSO, C.; BERISTAIN, C. I.; LOBATO-CALLEROS, C.; RODRÍGUES, M. E.; VERNON-CARTER, E. J. Thermodynamic analysis of the sorption isotherms of pure and blended carbohydrate polymers. **Journal of Food Engineering**. Davis, v. 77, p. 753-760, 2006.

PUA, C. K.; SHEIKH, A. B. D.; HAMID, N.; RUSUL, G.; RAHMAN, R. Production of drum-dried jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder with different concentration of soy lecithin and gum arabic. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 78, n. 2, p. 630-636, 2007.

QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A.; MELO, E. C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 59 p., 1985.

RAHMAN, M. S. Dried food properties: challenges ahead. **Drying Technology**, Singapore, v. 23, p. 695-715, 2005.

RATTI, C. **Advances in food dehydration**. New York: Taylor & Francis Group, 480 p., 2009.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA A. K.: **Engineering properties of foods**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 340 p., 2005.

ROBERTS, J. S.; KIDD, D. R.; PADILLA-ZAKOUR, O. Drying kinetics of grape seeds.

Journal of Food Engineering, Davis, v. 89, p. 460-465, 2008.

SAESP. SECRETARIA de AGRICULTURA de SÃO PAULO. **Casa da Agricultura**, São

Paulo v. 2, n. 7, 1980.

SAIRAEB – SECRETARIA de AGRICULTURA, IRRIGAÇÃO e REFORMA AGRÁRIA

do ESTADO da BAHIA, **Cultura - Jaca**, Governo da Bahia, 2004.

SALVIANO, A. T. M., AMARAL, C. R. S., LUCENA, J. E. MOREIRA, R. T., NÓBREGA,

I. C. C. Elaboração e aceitação sensorial de uma aguardente bi-destilada de jaca (*Artocarpus heterophilus* Lam). **Anais: II Jornada Nacional da Agroindústria**. Bananeiras- PB, dezembro, 2007.

SAMAPUNDO, S.; DEVLIEGHIERE, F.; De MEULENAER, B.; ATUKWASE, A.;

LAMBONI, Y.; DEBEVERE, J. M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 79, p. 168-175, 2007.

SÁNCHEZ, E.; SAN JUAN, N.; SIMAL, S.; ROSSELLÓ, C. Calorimetric techniques

applied to the determination of isosteric heat desorption for potato. **Journal of the Science Food and Agriculture**, London, v. 74, p. 57-63, 1997.

SCHAUB, S. M.; LEONARD, J. J. Composting: an alternative waste management option for

food processing industries. **Trends in Food Science & Technology**, Norwich, v.7, p. 263-268, 1996.

SIMAL, S.; FEMENIA, A.; CASTELL-PALOU, Á.; ROSSELLÓ, C. Water desorption

thermodynamic properties of pineapple. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 80, p. 1293-1301, 2007.

- SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J. S. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 74, p. 143-152, 2006.
- STRUMILLO, C.; ADAMIEC, J. **Advancing of biosynthesis products**. Congresso: XIX Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos. Campinas, SP, v. 1, p 17-61, 1991.
- STRUMILLO, C.; JONES, P. L.; ZYLLA, R. Energy aspects in drying. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 120 p., 2006.
- THASSITOU, P. K.; ARVANITOYANNIS, I. S. Bioremediation: a novel approach to food waste management. **Trends in Food Science & Technology**, v. 12, p. 185- 196, 2001.
- TRINDADE, M. B. **Purificação, caracterização e estudos estruturais de duas lecitinas ligantes de quitina das sementes do gênero *Artocarpus***. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2005.
- UGULINO, S. M. P.; GOUVEIRA, D. S.; DUARTE, M. E. M.; CAVALTANTE MATA, M. E. R. M.; DUARTE, S. T. G.; SANTANA, P. B. Avaliação da aceitação de jaca elaboradas por diferentes tratamentos de secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 2, p. 143-152, 2006.
- VIEIRA, R. D. N. **Frutíferas potenciais para os tabuleiros costeiros e baixadas litorâneas**. Embrapa Tabuleiros Costeiros / Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe- Emdagro. p. 71-86, Aracaju, 2002.

Capítulo 3

Isoterma de sorção da
polpa e resíduos de jaca

3.1.1. Resumo

Neste capítulo são apresentadas as isotermas de dessorção da polpa, semente, casca, mesocarpo e eixo central de jaca madura in natura determinadas para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 ° C, utilizando o método estático gravimétrico, na faixa de atividade de água de 0,020 a 0,753. Cinco modelos matemáticos de sorção amplamente usados na literatura (GAB, Halsey, Oswin, Henderson e Iglesias e Chirife) foram usados para ajustar os dados experimentais das isotermas por regressão não linear. A avaliação do melhor modelo de ajuste foi através do maior coeficiente de determinação (R^2) e o menor erro médio relativo ($MRE\%$). O modelo de GAB foi o que melhor ajustou as isotermas de dessorção da casca, mesocarpo e polpa de jaca, demonstrando sua flexibilidade para representar as isotermas de produtos alimentícios. Por outro lado, o modelo de Oswin foi o que melhor descreveu as curvas experimentais das isotermas de sementes e eixo central de jaca. As propriedades termodinâmicas de sorção da água para os componentes do fruto foram determinados diretamente usando a primeira derivada parcial analítica da atividade de água da equação de Clausius-Clapeyron. Nas isotermas de sorção foi encontrada a existência de um equilíbrio termodinâmico no sistema na faixa de temperatura e umidade de equilíbrio estudada ($\Delta G < 0$).

Palavras-chave: isotermas de sorção, propriedades termodinâmicas, GAB, Oswin, jaca.

3.1.2. Abstract

In this chapter, desorption isotherms of the different parts of the jackfruit (pulp, seed, peel, mesocarp and central axis) were determined at four temperatures (40, 50, 60 and 70 °C) in a water activity range of from 0.020-0.753 using the static gravimetric method, and theoretical and empirical models were used to model the desorption isotherms. The performance of the models were evaluated using the coefficient of correlation (R^2) and the mean relative error (MRE %). In the modeling, the GAB model showed the best fitted results for the peel, mesocarp and pulp of jackfruit, demonstrate the flexibility of the model to represent the sorption isotherms by foodstuff. In other hand, the Oswin model shows the best results to modeling the sorption isotherms of seeds and peduncle of jackfruit. An analytical solution of the Clausius-Clapeyron equation was proposed to compute the isosteric heat of sorption, the differential entropy and Gibbs' free energy by way of the GAB and Oswin models, when the effect of temperature on the hygroscopic equilibrium was considered. Finally, a thermodynamic equilibrium ($\Delta G < 0$) for all sorption isotherms of jackfruit items was found.

Keywords: *sorption isotherms; thermodynamic properties; GAB model; Oswin model; jackfruit.*

3.2. Introdução

A jaqueira (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) é originária das florestas tropicais do oeste da Índia e no Brasil é pouco consumida (HAQ, 2006) sendo mais popular na região Nordeste. É a maior fruta proveniente de árvore no mundo chegando aos 80 Kg. Muito rica em fibras, fósforo, cálcio, potássio, magnésio e vitamina C (CAMPBELL; EL-SAWA, 1998; CHANDRIKA et al., 2005).

A fruta comestível, caracterizada pela polpa, é consumida basicamente in natura e é altamente perecível, acarretando grandes perdas pós-colheita. Isto mostra a necessidade de processos simples e baratos que podem proporcionar maneiras de maior aproveitamento da fruta. A secagem, ao reduzir o conteúdo de umidade, limita o desenvolvimento microbiano e as reações bioquímicas, evitando seu apodrecimento (CHEN; HEN, 1975). A jaca apresenta subprodutos como casca, mesocarpo, eixo central e sementes que podem servir como matéria prima para produtos alimentícios.

As sementes são usadas como alimento cozidas ou assadas, são nutritivas, saborosas e adequadas para tratamentos de distúrbios intestinais (CAMPBELL; EL-SAWA, 1998). A casca e o eixo central da inflorescência são basicamente descartados ou utilizados na alimentação animal. Devido às suas qualidades organolépticas, a jaca e seus resíduos representam uma fonte sócioeconômica potencial, constituindo uma alternativa para aumentar a renda familiar, bem como oferecendo as opções de investimento no processamento de doces, passas, sucos, geléias, entre outros, para pequenas e micro empresas (ASQUIERI et al., 2008; KHYRUNNISA et al., 1989).

O conhecimento do teor de umidade final fornece informações que podem ser utilizadas para estimar os requisitos energéticos para o processamento e também as condições ótimas para o armazenamento e a secagem (EIM et al., 2011). As propriedades

termodinâmicas podem também ajudar a estabelecer o teor de umidade final e estimar as exigências de energia para o processamento. Propriedades como a entalpia, entropia e energia livre de Gibbs' são essenciais para representar e descrever as reações e os fenômenos que ocorrem a nível intermolecular em materiais. Essas propriedades representam a quantidade de energia, a ordem ou grau de excitação e o equilíbrio químico das moléculas da água no interior do material, respectivamente (BROVCHENKO; OLENIKOVA, 2008). Alterações em umas das propriedades termodinâmicas com respeito ao teor de umidade e a temperatura podem proporcionar uma boa descrição dos mecanismos de sorção da água, podendo ser empregados para estimar os pontos de transição no sistema (GONELLI et al., 2010; SIMAL et al., 2007). Tendo em vista a importância de compreender a higroscopicidade de produtos agrícolas, objetivou-se a determinação do mecanismo entálpico-entrópico para a polpa, eixo central, mesocarpo, casca e sementes de jaca, através das isotermas de sorção obtidas sobre diversas condições de temperatura e atividade de água.

3.3. Material e métodos

3.3.1. Material

As jacas (*Artocarpus heterophyllus*) variedade "mole" em estado inicial de maturação foram adquiridas na central de abastecimento CEASA de São José do Rio Preto - SP. As frutas foram levadas ao laboratório de medidas físicas do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos da UNESP - Campus de São José do Rio Preto e mantidas em refrigeração (17 °C) até atingirem a maturação completa com cor e aroma característicos para o início dos trabalhos.

3.3.2. Isotermas de sorção

3.3.2.1. Preparação das amostras

Inicialmente lavou-se a jaca com água destilada e escova macia para retirada de partículas estranhas que pudessem interferir na experimentação. Depois de seca (24 horas à temperatura ambiente) as frutas foram cortadas para separação de seus componentes. O eixo central foi retirado manualmente da fruta deixando em evidência o mesocarpo (pivide) e a polpa (Figura 3.1). Logo, a polpa foi separada do mesocarpo e imediatamente retirada a semente de seu interior. O mesocarpo foi separado da casca externa com auxílio de faca de inox. Em todos os materiais (polpa, eixo central, mesocarpo, casca e sementes) foi feito uma redução de tamanho de partículas empregando um processador de alimentos (modelo RI 17625/71, Philips) até obter aproximadamente 500 g de amostra subdivididas em sacos plásticos e refrigerados para posterior experimentação.

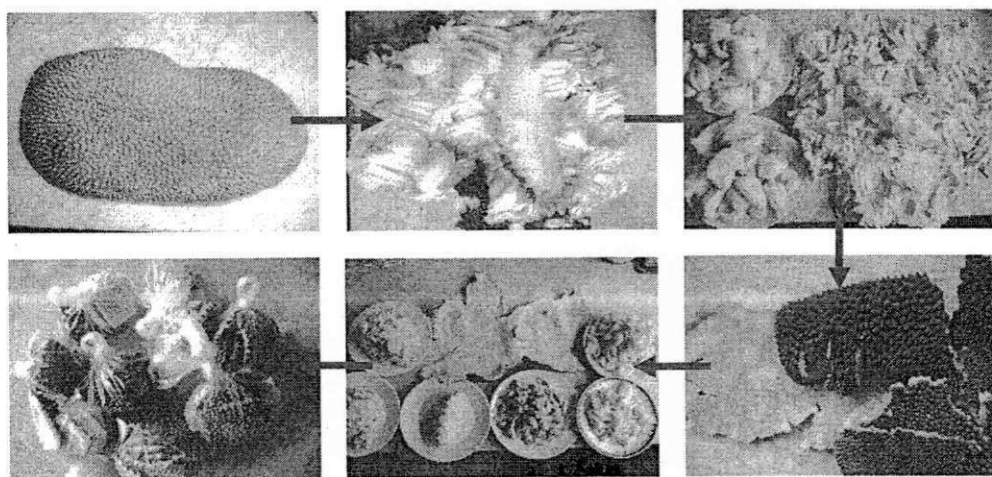


Figura 3.1 - Preparação das amostras para determinação das isotermas de sorção.

3.3.2.2. Determinação das isotermas de sorção

Os conteúdos de umidade de equilíbrio da polpa, eixo central, mesocarpo, casca e sementes da jaca foram determinados pelo método gravimétrico estático (JOWITT et al., 1987) na obtenção das isotermas de dessorção nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C ± 1 °C. Oito soluções salinas saturadas (Tabela 3.1) foram preparadas correspondentes as umidades relativas entre 2,0 e 76,0%. Para a obtenção da condição de equilíbrio foram utilizados potes herméticos de 200 ml possuindo internamente um tripé de acrílico que serviu de suporte para as amostras. Primeiramente, os potes foram limpos com algodão embebido em formol comercial a 40% a fim de evitar ou retardar possíveis contaminações da amostra. Cada pote recebeu cerca de 40 ml de solução salina saturada com 3 gotas de formol. Amostras em triplicata de polpa, eixo central, mesocarpo, casca e sementes foram pesadas e colocadas em pequenos recipientes e estes acondicionados sobre tripés nos potes com as soluções salinas. Os potes armazenados em B.O.D (Modelo TE-391, TECNAL, Brasil) foram pesados semanalmente em balança analítica até obter variação de massa igual ou inferior a 0,1% (0,001 kg·kg⁻¹, b.s.). O tempo de equilíbrio requerido foi de 4 a 5 semanas e a umidade de equilíbrio foi determinada pelo método de estufa a vácuo (AOAC, 1997).

Tabela 3.1 – Soluções salinas e umidades relativas a 40, 50, 60 e 70 °C.

SAIS	Umidade Relativa (%)			
	Temperatura			
	40°C	50°C	60°C	70°C
NaOH	6,6	5,9	4,5	2,0
LiCl	11,1	11,0	11,0	11,0
KC ₂ H ₃ O ₂	20,6	18,9	17,5	16,2
MgCl ₂	31,9	31,4	30,7	29,4
K ₂ CO ₃	43,2	43,2	43,2	43,2
Mg(NO ₃) ₂	50,6	48,9	47,3	45,8
NaNO ₂	61,5	59,9	59,0	58,7
NaCl	75,3	74,6	74,0	73,9

3.3.2.3. Modelagem das isotermas de sorção

Os dados experimentais obtidos das isotermas de sorção para polpa, eixo central, mesocarpo, casca e sementes da jaca foram modelados e simulados empregando modelos teóricos e empíricos, Equações. 3.1 a 3.5. Nos modelos, o conteúdo de umidade é descrita em função tanto da atividade de água, como da temperatura (IGLESIAS; CHIRIFE, 1976; CHEN; MOREY, 1989; ANDERSON, 1946).

$$X = \frac{X_m CKa_w}{(1 - Ka_w)(1 + (C - 1)Ka_w)} \quad \text{Modelo de GAB} \quad (3.1)$$

$$X = \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{-A(B + T)} \right]^{\frac{1}{C}} \quad \text{Modelo de Henderson} \quad (3.2)$$

$$X = (A + BT) \left[\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^{\frac{1}{C}} \quad \text{Modelo de Oswin} \quad (3.3)$$

$$X = \left[\frac{\exp(A - BT)}{-\ln(a_w)} \right]^{\frac{1}{C}} \quad \text{Modelo de Halsey} \quad (3.4)$$

$$X = (A + BT) \left[\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right] + C \quad \text{Modelo de Iglesias e Chirife} \quad (3.5)$$

onde A , B e C são as constantes dos modelos empíricos (adimensionais); a_w é a atividade de água; X é o conteúdo de umidade de equilíbrio ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, b.s.); X_m é a umidade da monocamada do modelo de GAB ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, b.s.). Para o modelo teórico de GAB, as constantes C e K foram escritas de acordo com as Equações. 3.6 e 3.7, respectivamente:

$$C = C_0 \exp\left(\frac{H_m - H_n}{RT}\right) \quad (3.6)$$

$$K = K_0 \exp\left(\frac{\lambda - H_n}{RT}\right) \quad (3.7)$$

onde C_0 e K_0 são os parâmetros do modelo de GAB (adimensionais); H_m e H_n são a entalpia de sorção da monocamada e multicamada ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), respectivamente; λ é o calor de vaporização da água pura ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$); T é a temperatura (K) e R é a constante dos gases ($8.314 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kmol}^{-1}$) (TIMMERMANN et al., 2001).

3.3.2.4. Determinação das propriedades termodinâmicas

O calor isostérico de sorção (Q_{st} , $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) foi calculado usando a equação de Clausius-Calpeyron (Equação 3.8) e as normas da ASAE (1998) e foram empregadas para estimar o calor de vaporização da água pura (λ) em relação à temperatura:

$$Q_{st} = \lambda - R \frac{\partial(\ln a_w)}{\partial(1/T)} = \lambda + \frac{RT^2}{a_w} \frac{\partial a_w}{\partial T} \quad (3.8)$$

Para isto, o modelo que melhor representou as isotermas de sorção foi empregado para determinar a primeira derivada parcial analítica da atividade de água com respeito à temperatura (Equação 3.8). O cálculo do Q_{st} correspondeu às máximas e mínimas temperaturas usadas no estudo. Este método é chamado de “método direto” ou “método integral” que evita a linearização entre $\ln a_w$ vs. $1/T$ aplicado na termodinâmica estatística em produtos como: casca de uva (KAYA; KAHYAOGU, 2005), nozes (TOGRUL; ARSLAN, 2007) e milho (CHAYJAN et al., 2010), que calcularam o Q_{st} a diferentes níveis de conteúdo de umidade.

A entropia diferencial ΔS ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) foi calculada diretamente empregando a Equação 3.9:

$$\ln a_w = -\frac{(Q_s - \lambda)}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \quad (3.9)$$

Da mesma forma foi calculada a energia livre de Gibbs' (ΔG) ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) através da Equação 3.10:

$$\Delta G = RT \ln a_w \quad (3.10)$$

3.3.2.5. Estimativa dos parâmetros e análise estatística

Os parâmetros do modelo de GAB e dos modelos empíricos de Henderson, Halsey, Oswin e Iglesias e Chirife (Equações. 3.1 - 3.5) foram estimados pelo ajuste das equações nos dados experimentais utilizando a função “nlinfit” do Toolbox estatístico do programa Matlab ® 7.1 (The Math Works Inc., Natick, MA, USA) considerando a opção de ajuste “robust”. Esta função usa o algoritmo de Gauss-Newton, com modificações Levenberg-Marquardt, que permite a interação constante dos valores recalculando o ajuste do modelo não linear por meio dos mínimos quadrados. Os intervalos de confiança de 95% para os parâmetros estimados dos modelos foram calculados usando “nlparci”, função do Toolbox Matlab.

O coeficiente de determinação (R^2) (Equação 3.11) e o erro médio relativo (MRE) (Equação 3.12) foram empregados para avaliar a precisão do modelo. O parâmetro estatístico R^2 define a eficiência do modelo com a variação dos dados e o MRE mede o erro padrão na estimativa dos dados simulados com os experimentais (SHESKIN, 2004).

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (y_k^* - \bar{y})^2}{\sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y})^2} \quad (3.11)$$

$$MRE = \frac{100}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|y_k - y_k^*|}{y_k^*} \quad (3.12)$$

Nas Equações. 3.11 e 3.12, y representa os valores experimentais, y^* representa os valores estimados, \bar{y} é a média e N é o numero de valores experimentais.

3.4. Resultados e discussão

3.4.1. Isotermas de sorção

Os resultados experimentais para a polpa e os resíduos de jaca, com seu correspondente desvio-padrão, são ilustrados na Tabela 3.2. O conteúdo de umidade de equilíbrio encontra-se na faixa de 0,001 e 0,278 kg·kg⁻¹b.s. para a polpa; 0,043 e 0,229 kg·kg⁻¹b.s. para o eixo central; 0,001 e 0,231 kg·kg⁻¹b.s. para o mesocarpo; 0,001 e 0,203 kg·kg⁻¹b.s. para a casca e 0,010 e 0,100 kg·kg⁻¹b.s. para as sementes, na faixa de atividade de água de 0,020 e 0,753. Observou-se uma mesma tendência nos dados experimentais da polpa e do mesocarpo, o que faz sentido visto que a polpa é composta pela fusão das fibras do mesocarpo, que foram hidrolisadas durante o período de maturação da fruta (ASQUIERI et al., 2008; AWAD, 1993). Também é observada uma tendência nos valores da umidade de equilíbrio em diminuir com o incremento da temperatura e de aumentar com o incremento da atividade de água. Estes materiais são compostos em sua maioria por fibras, celulose, pectina e hemicelulose e a baixas temperaturas, quando a pressão de saturação é pequena no sistema, favorece o intumescimento, ou seja, absorção de água (QUIÉVY et al., 2010; BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007).

Tabela 3.2 - Umidades de equilíbrio experimentais da polpa e resíduos de jaca na faixa de temperatura de 40, 50, 60 e 70 °C.

T (°C)	(a_w)	(X_e)				
		Polpa	Eixo	Mesocarpo	Casca	Semente
40	0,066	0,008±0,000	0,052±0,001	0,006±0,000	0,003±0,000	0,019±0,000
	0,111	0,013±0,000	0,067±0,002	0,010±0,000	0,006±0,000	0,026±0,000
	0,206	0,027±0,001	0,097±0,002	0,022±0,001	0,013±0,000	0,037±0,001
	0,319	0,048±0,001	0,113±0,002	0,038±0,002	0,024±0,001	0,048±0,001
	0,432	0,076±0,001	0,135±0,002	0,061±0,001	0,039±0,000	0,059±0,001
	0,506	0,101±0,004	0,158±0,005	0,081±0,004	0,051±0,002	0,069±0,002
	0,615	0,154±0,001	0,190±0,005	0,122±0,001	0,092±0,000	0,079±0,002
	0,753	0,278±0,005	0,229±0,003	0,223±0,005	0,203±0,003	0,100±0,002
50	0,059	0,005±0,000	0,049±0,000	0,005±0,000	0,003±0,000	0,022±0,000
	0,110	0,011±0,000	0,064±0,001	0,009±0,000	0,005±0,000	0,028±0,000
	0,189	0,021±0,000	0,088±0,002	0,019±0,000	0,009±0,000	0,038±0,000
	0,314	0,041±0,000	0,105±0,001	0,036±0,000	0,017±0,000	0,047±0,001
	0,432	0,068±0,000	0,127±0,002	0,060±0,000	0,031±0,000	0,056±0,001
	0,489	0,086±0,002	0,145±0,004	0,075±0,001	0,040±0,000	0,059±0,001
	0,599	0,134±0,002	0,174±0,003	0,121±0,001	0,066±0,000	0,071±0,001
	0,746	0,260±0,002	0,221±0,002	0,231±0,002	0,151±0,001	0,084±0,001
60	0,045	0,003±0,000	0,046±0,001	0,003±0,000	0,001±0,000	0,014±0,000
	0,110	0,009±0,000	0,060±0,000	0,008±0,000	0,004±0,000	0,022±0,000
	0,175	0,015±0,000	0,082±0,001	0,014±0,000	0,008±0,000	0,027±0,000
	0,307	0,033±0,001	0,099±0,003	0,030±0,000	0,016±0,000	0,036±0,001
	0,432	0,059±0,000	0,119±0,000	0,053±0,000	0,028±0,000	0,043±0,000
	0,473	0,071±0,001	0,132±0,001	0,062±0,001	0,033±0,000	0,046±0,000
	0,590	0,117±0,002	0,163±0,001	0,106±0,001	0,055±0,001	0,052±0,000
	0,740	0,237±0,001	0,206±0,001	0,210±0,002	0,132±0,001	0,065±0,000
70	0,020	0,001±0,000	0,043±0,000	0,001±0,000	0,001±0,000	0,010±0,000
	0,110	0,007±0,000	0,058±0,000	0,006±0,000	0,003±0,000	0,019±0,000
	0,162	0,012±0,000	0,075±0,002	0,010±0,000	0,006±0,000	0,022±0,001
	0,294	0,026±0,000	0,093±0,000	0,023±0,001	0,012±0,000	0,030±0,000
	0,432	0,051±0,000	0,112±0,000	0,046±0,000	0,023±0,000	0,039±0,001
	0,458	0,058±0,001	0,121±0,002	0,052±0,000	0,025±0,000	0,042±0,001
	0,587	0,104±0,000	0,146±0,001	0,094±0,000	0,049±0,000	0,047±0,001
	0,739	0,220±0,001	0,191±0,001	0,198±0,000	0,106±0,001	0,058±0,001

Desvio padrão proveniente dos resultados em triplicata para cada material; a_w : atividade de água (adimensional); X_e : conteúdo de umidade de equilíbrio ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, b.s).

Com a finalidade de explicar a forte relação entre a temperatura e a atividade de água, algumas pesquisas indicam que a diminuição do conteúdo de umidade é devido ao incremento do estado de excitação das moléculas de água a altas temperaturas, aumentando a distâncias entre as moléculas, reduzindo assim suas forças atrativas. Outros estudos sugerem

que o aumento da temperatura causa incorporação de água, que reduz o número de sítios ativos e promove mudanças físicas ou químicas no material de estudo (SAMAPUNDO et al., 2007; AL-MUHTASEB et al., 2002).

Resultados de umidade de equilíbrio reportados na literatura de produtos como casca de caqui (TELIS et al., 2000), pectina (TSAMI et al., 1998), folhas de oliveira (BAHLOUL et al., 2008), polpa de tomate (GUOLA et al., 2008) e sementes de gergelim (AVIARA et al., 2002), mostraram uma similaridade entre seus dados experimentais com as isotermas de sorção de casca, eixo central, mesocarpo, polpa e sementes de jaca, respectivamente.

3.4.2. Modelagem e simulação das isotermas de sorção

Os resultados dos parâmetros para o modelo de GAB e as validações estatísticas são mostrados na Tabela 3.3. Os resultados estatísticos mostraram um R^2 e um $MRE(\%)$ de 0,999 e 1,922% para a polpa, 0,998 e 3,439% para o mesocarpo e 0,997 e 7,592% para a casca, indicando uma concordância satisfatória entre os valores experimentais e os calculados para esses produtos. Os intervalos de confiança para os parâmetros do modelo de GAB com um nível de confiança de 95% são mostrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.3 - Modelagem e análise estatística das isotermas de sorção da polpa e resíduos de jaca empregando o modelo de GAB.

Material	Parâmetros modelo de GAB					R^2	$MRE(\%)$
	X_m	C_0	K_0	H_m	H_n		
Polpa	0,103	$5,771 \times 10^{-4}$	226,25	77,13	57,54	0,999	1,922
Eixo	12,519	$6,047 \times 10^{-3}$	77,20	76,69	63,74	0,925	20,21
Mesocarpo	$8,513 \times 10^{-2}$	$2,696 \times 10^{-3}$	264,14	73,50	57,95	0,998	3,439
Casca	$3,523 \times 10^{-2}$	$2,393 \times 10^{-3}$	87,62	70,90	54,66	0,997	7,592
Sementes	0,272	$1,374 \times 10^{-2}$	3,47	86,31	61,23	0,940	15,56

X_m : umidade de equilíbrio da monocamada ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, b.s.), C_0 e K_0 : parâmetros do modelo de GAB (adimensional), H_m : calor de sorção da monocamada ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), H_n : calor de sorção da multicamada ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Tabela 3.4 - Intervalos de confiança (95%) dos parâmetros calculados com o modelo de GAB.

Material	Parâmetros modelo de GAB				
	X_m	C_0	K_0	H_m	H_n
Polpa	0,093	$3,228 \times 10^{-4}$	211,69	75,78	57,33
	0,113	$8,313 \times 10^{-4}$	240,80	78,49	57,74
Eixo	-3565,8	-3,857	-27893	-43,51	-21,31
	3590,8	3,869	28048	46,26	23,60
Mesocarpo	$-8,861 \times 10^{-2}$	$-2,154 \times 10^{-2}$	-58,251	45,98	54,07
	$2,589 \times 10^{-1}$	$2,693 \times 10^{-2}$	586,53	101,01	61,83
Casca	$2,722 \times 10^{-2}$	$-3,701 \times 10^{-3}$	73,180	63,14	54,27
	$4,334 \times 10^{-2}$	$8,488 \times 10^{-3}$	102,070	78,66	55,06
Semente	-3,133	-55,310	-13918	-441,29	-220,32
	3,679	55,340	13925	444,20	222,52

X_m : umidade de equilíbrio da monocamada ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, b.s.), C_0 e K_0 parâmetros do modelo de GAB (adimensional), H_m : calor de sorção da monocamada ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), H_n : calor de sorção da multicamada ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Para polpa, mesocarpo e casca, o parâmetro estimado X_m (constante na faixa de temperatura entre 40 e 70 °C) apresentou valores calculados de 0,103; $8,513 \times 10^{-2}$ e $3,523 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectivamente. Por outro lado, para estes três produtos foi observado que os valores do parâmetro C decresceram com o aumento da temperatura e os valores do parâmetro K aumentaram quando a temperatura incrementa. Para todos os produtos o valor da constante K é menor que um, indicando a existência de uma diferença na entalpia livre das moléculas do sorbato no líquido puro e no segundo estado de absorção, ou seja, na camada acima da monocamada (RIZVI, 2005).

O calor de sorção da monocamada (H_m) foi de 77,13; 73,50 e 70,90 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ para polpa, mesocarpo e casca respectivamente (usando valores de λ entre 44,2 e 42,0 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ que correspondem à faixa de temperatura entre 40-70 °C). Valores com essa mesma ordem de grandeza foram obtidos por outros autores: 97,0 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ para abacaxi (SIMAL et al., 2007), 50,6 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ para amora (MULET et al., 2002) e 43,0 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ para casca de limão (GARCÍA-PÉREZ et al., 2008). Para o valor estimado do calor de sorção da multicamada (

H_n) foram encontrados valores de 57,54; 57,95 e 54,66 kJ·mol⁻¹ para polpa, mesocarpo e casca respectivamente. Estes valores são próximos, o que é consistente com a teoria que sugere que o estado das moléculas do sorbato na segunda camada e nas superiores é igual, diferenciando-se daquelas que estão em estado líquido (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007; TIMMERMANN et al., 2001).

Para o eixo central e as sementes de jaca, o modelo de Oswin foi o que melhor representou os dados experimentais das isotermas de sorção com valores estatísticos de $R^2 = 0,993$, $MRE(\%) = 3,933$ e $R^2 = 0,982$, $MRE(\%) = 5,914$, respectivamente. Como pode ser observado na Tabela 3.5, alguns dos modelos empíricos empregados na modelagem e simulação obtiveram bons resultados na avaliação estatística ($R^2 > 0,952$), porém, o resultado do $MRE(\%)$ mostrou um comportamento desuniforme entre os dados simulados e os experimentais, limitando a avaliação das isotermas de sorção dos resíduos mencionados. Na Tabela 3.6 encontram-se os valores dos intervalos de confiança para os parâmetros dos modelos empíricos empregados na modelagem e simulação das isotermas dos resíduos de jaca.

Tabela 3.5 - Modelagem e análise estatística das isotermas de sorção da polpa e resíduos de jaca empregando os modelos empíricos.

Material	Parâmetros modelo de Henderson			R^2	MRE(%)
	A	B	C		
Polpa	$-1,425 \times 10^{-4}$	$-2,437 \times 10^4$	0,658	0,982	22,114
Eixo	$-6,075 \times 10^{-4}$	$-5,837 \times 10^4$	2,047	0,955	8,147
Mesocarpo	$9,348 \times 10^{-3}$	73.382	0,654	0,994	20,071
Casca	$3,818 \times 10^{-2}$	-222,93	0,549	0,993	29,323
Semente	7,948	-292,73	2,041	0,976	7,241
Material	Parâmetros modelo de Oswin			R^2	MRE(%)
	A	B	C		
Polpa	0,325	$-7,336 \times 10^{-4}$	0,990	0,997	8,296
Eixo	0,411	$-8,220 \times 10^{-4}$	2,624	0,993	3,933
Mesocarpo	0,208	$-4,121 \times 10^{-4}$	0,968	0,992	7,557
Casca	0,269	$-6,925 \times 10^{-4}$	0,849	0,995	12,158
Semente	0,334	$-8,559 \times 10^{-4}$	2,727	0,982	5,914
Material	Parâmetros modelo de Halsey			R^2	MRE(%)
	A	B	C		
Polpa	-0,378	$-5,692 \times 10^{-3}$	0,745	0,992	52,115
Eixo	-0,471	$-1,045 \times 10^{-2}$	1,769	0,978	7,148
Mesocarpo	-1,079	$-3,793 \times 10^{-3}$	0,733	0,987	45,619
Casca	1,280	$-1,139 \times 10^{-2}$	0,643	0,996	25,461
Semente	3,868	-2971×10^{-2}	1,843	0,952	12,115
Material	Parâmetros modelo de Iglesias e Chirife			R^2	MRE(%)
	A	B	C		
Polpa	0,175	$-2,824 \times 10^{-4}$	$1,625 \times 10^{-3}$	0,993	18,071
Eixo	0,123	$-2,713 \times 10^{-4}$	$8,754 \times 10^{-2}$	0,870	22,802
Mesocarpo	0,095	$-7,596 \times 10^{-5}$	$1,371 \times 10^{-3}$	0,990	16,033
Casca	0,349	$-8,953 \times 10^{-4}$	$-7,706 \times 10^{-3}$	0,977	79,370
Semente	0,113	$-3,134 \times 10^{-4}$	$3,487 \times 10^{-2}$	0,962	32,763

A, B, C: parâmetros dos modelos empíricos.

Tabela 3.6 - Intervalos de confiança (95%) dos parâmetros calculados com os modelos empíricos.

Modelos	Material	Parâmetros			
		A	B	C	
Henderson	Polpa	$-7,267 \times 10^{-3}$	$-1,226 \times 10^6$	0,609	
		$6,982 \times 10^{-3}$	$1,177 \times 10^6$	0,706	
	Eixo	-0,222	$-2,126 \times 10^7$	1,832	
		0,221	$2,114 \times 10^7$	2,262	
	Mesocarpo	$3,910 \times 10^{-3}$	-155,54	0,622	
		$1,479 \times 10^{-2}$	301,30	0,687	
	Casca	$2,607 \times 10^{-2}$	-248,76	0,499	
		$5,028 \times 10^{-2}$	-197,09	0,597	
	Semente	3,111	-298,28	1,868	
		12,785	-287,19	2,212	
Oswin	Polpa	0,298	$-8,157 \times 10^{-4}$	0,969	
		0,353	$-6,515 \times 10^{-4}$	1,011	
	Eixo	0,356	$-9,895 \times 10^{-4}$	2,526	
		0,466	$-6,545 \times 10^{-4}$	2,723	
	Mesocarpo	0,180	$-4,977 \times 10^{-4}$	0,943	
		0,237	$-3,265 \times 10^{-4}$	0,992	
	Casca	0,249	$-7,510 \times 10^{-4}$	0,826	
		0,288	$-6,340 \times 10^{-4}$	0,873	
	Semente	0,298	$-9,651 \times 10^{-4}$	2,549	
		0,370	$-7,468 \times 10^{-4}$	2,905	
	Halsey	Polpa	-0,934	$-7,429 \times 10^{-3}$	0,711
			0,178	$-3,955 \times 10^{-3}$	0,779
		Eixo	-1,711	$-1,433 \times 10^{-2}$	1,655
			0,768	$-6,569 \times 10^{-3}$	1,882
Mesocarpo		-1,589	$-5,374 \times 10^{-3}$	0,701	
		-0,569	$-2,210 \times 10^{-3}$	0,765	
Casca		1,001	$-1,229 \times 10^{-2}$	0,627	
		1,559	$-1,049 \times 10^{-2}$	0,659	
Semente		1,652	$-3,717 \times 10^{-2}$	1,647	
		6,084	$-2,226 \times 10^{-2}$	2,039	
Iglesias e Chirife	Polpa	0,147	$-3,677 \times 10^{-4}$	$-1,979 \times 10^{-3}$	
		0,203	$-1,972 \times 10^{-4}$	$5,230 \times 10^{-3}$	
	Eixo	0,021	$-5,808 \times 10^{-4}$	$7,445 \times 10^{-2}$	
		0,223	$3,818 \times 10^{-5}$	0,101	
	Mesocarpo	0,071	$-1,551 \times 10^{-4}$	$-1,974 \times 10^{-3}$	
		0,121	$3,127 \times 10^{-6}$	$4,717 \times 10^{-3}$	
	Casca	0,295	$1,061 \times 10^{-3}$	$1,230 \times 10^{-2}$	
		0,403	$7,300 \times 10^{-4}$	$3,107 \times 10^{-3}$	
	Semente	0,065	$-4,583 \times 10^{-4}$	$2,874 \times 10^{-2}$	
		0,159	$-1,684 \times 10^{-4}$	$4,100 \times 10^{-2}$	

A, B, C: parâmetros dos modelos empíricos.

O modelo de Oswin tem sido aplicado em alimentos como sementes e grãos, porém, quando comparado com o modelo de GAB e outros modelos empíricos, sua aplicabilidade é reduzida (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007). Em termos de especificidade, o modelo de Oswin pode ser vantajoso para representar isotermas de sorção a diferentes temperaturas e baixos conteúdos de umidade e atividades de água. No presente trabalho, os valores empíricos destes modelos foram calculados em função da temperatura. Assim, para produtos com baixos conteúdos de umidade, como sementes e eixo central da jaca, este modelo pode ser recomendado. Algumas pesquisas que trabalharam com isotermas de sorção de produtos como: grão de arroz (DA-WEN, 1999), milho (SAMAPUNDO et al., 2007), abacaxi (HOSSAIN et al., 2001), sementes de ervilhas e sementes em geral (MENKOV, 2000) e grãos de painço (GONELLI et al., 2010), sugerem que o modelo de Oswin é um dos mais apropriados para descrever o fenômeno de higroscopicidade em produtos com estes tipos de características.

Nas Figuras 3.2 a 3.6 estão representados graficamente os resultados do comportamento dos dados calculados e experimentais empregando o modelo que melhor se ajustou às isotermas de sorção de polpa, eixo central, mesocarpo, casca e sementes de jaca.

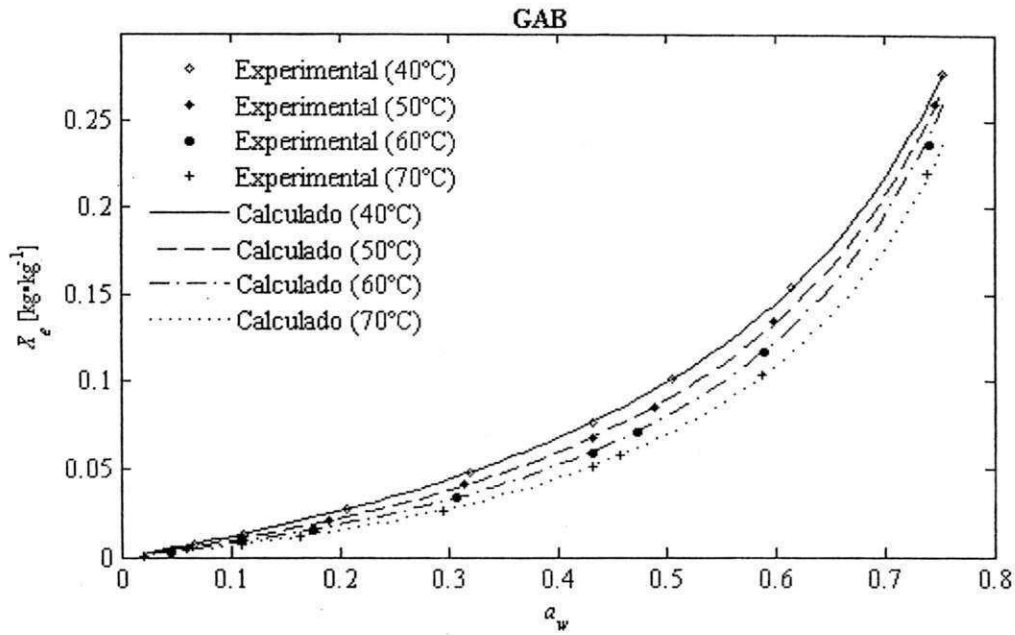


Figura 3.2 - Isotermas de dessorção da polpa de jaca empregando o modelo de GAB.

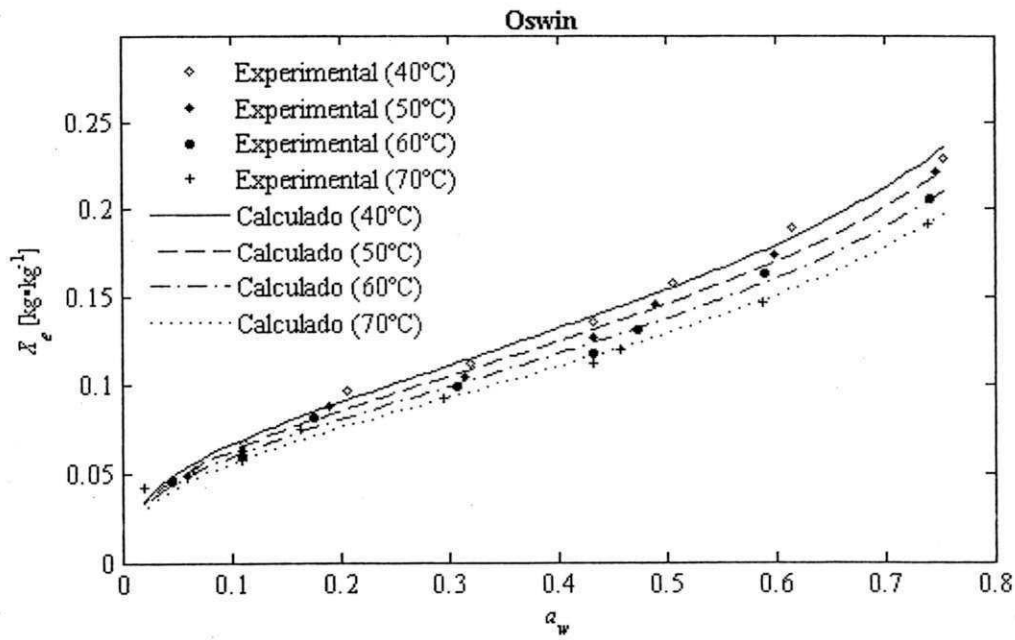


Figura 3.3 - Isotermas de dessorção do eixo central de jaca empregando o modelo de Oswin.

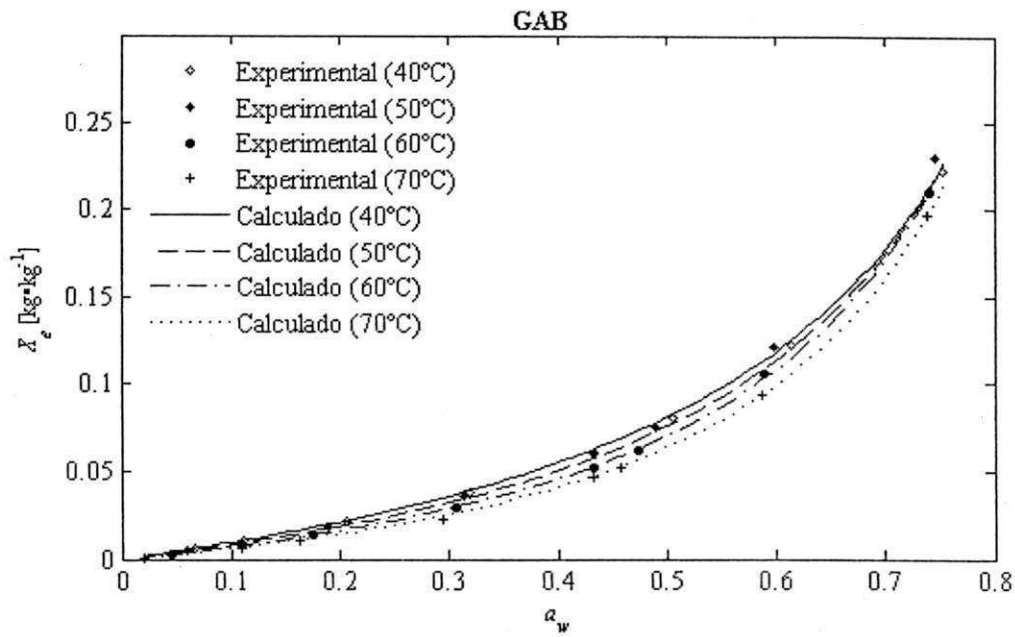


Figura 3.4 - Isotermas de dessorção do mesocarpo de jaca empregando o modelo de GAB.

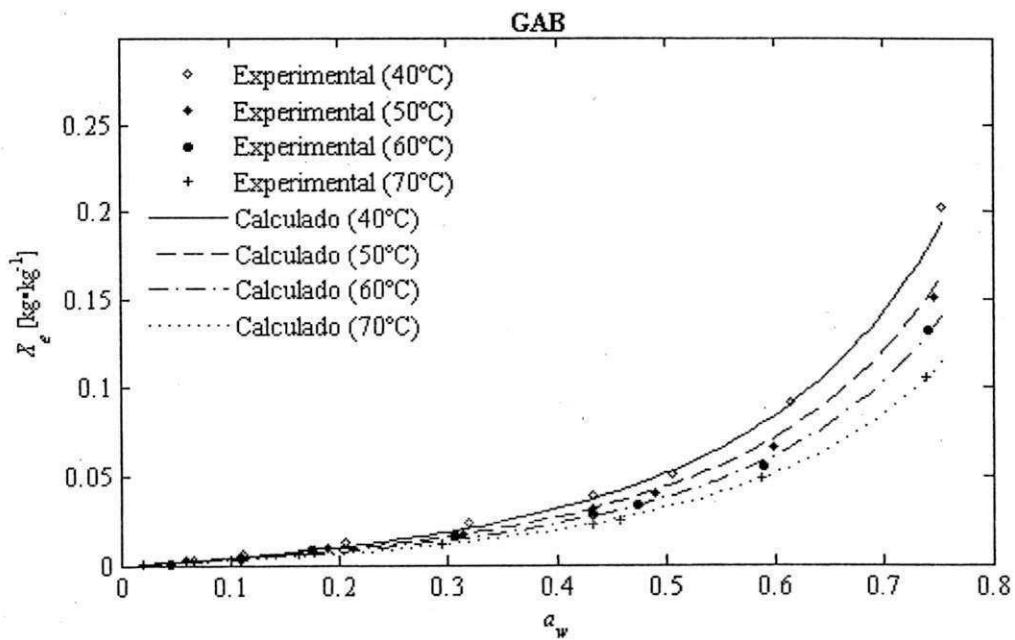


Figura 3.5 - Isotermas de dessorção da casca de jaca empregando o modelo de GAB.

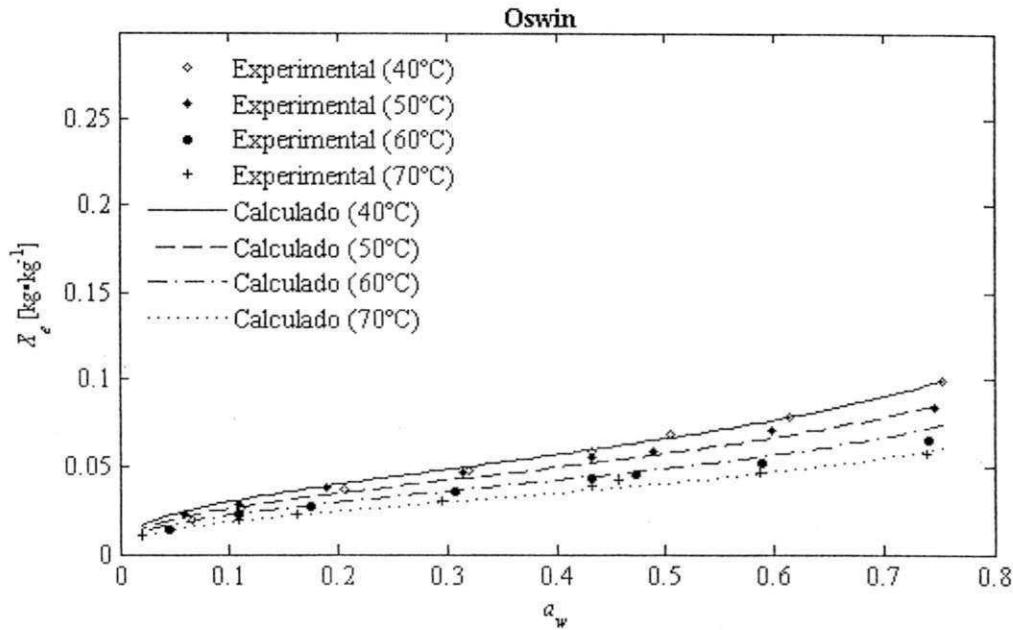


Figura 3.6 - Isotermas de desorção das sementes de jaca empregando o modelo de Oswin.

Segundo Brunauer et al. (1940), as isotermas ajustadas com o modelo de GAB, polpa, mesocarpo e casca de jaca, descrevem curvas Tipo III, características de produtos com alto conteúdo de umidade e açúcar em altos níveis de umidade relativa. Para eixo central e sementes de jaca, simulados com o modelo de Oswin, foi descrita uma curva sigmóide Tipo II, ou seja, curva característica de produtos com baixo teor de umidade, em altos níveis de umidade relativa. De acordo com Rizvi 2005, esta tendência das curvas para cada um dos produtos é característica, mostrando a eficiência dos modelos empregados na simulação e modelagem das isotermas.

3.4.4. Propriedades termodinâmicas de sorção da água

A equação de Clausius-Clapeyron (Equação 3.8) foi empregada para calcular o calor isostérico de sorção para a polpa, eixo central, mesocarpo, casca e sementes de jaca, usando a primeira derivada parcial analítica da atividade de água em função da temperatura (Equações

3.14 e 3.16), através da solução analítica (Equações 3.13 e 3.15) dos parâmetros dos modelos de GAB e Oswin (Equações 3.1 e 3.3) respectivamente.

$$\alpha = (C-1)K^2; \quad \beta = [2-C(1-X_m/X)]K \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial a_w}{\partial T} = \frac{(\beta a_w - 1) \frac{d\alpha}{dT} - \alpha a_w \frac{d\beta}{dT}}{\alpha(2\alpha a_w + \beta)} \quad (3.14)$$

$$a_w = \left[\left(\frac{A+BT}{X} \right)^{(C)} + 1 \right]^{-1} \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial a_w}{\partial T} = - \frac{\left[BC \left(\frac{A+BT}{X} \right)^{(C-1)} \right]}{\left[X \left(\left(\frac{A+BT}{X} \right)^C + 1 \right)^2 \right]} \quad (3.16)$$

Nas Figuras 3.7 a 3.11 tem-se graficamente o calor isostérico de sorção encontrados nas temperaturas de 40 e 70 °C para todos os componentes da jaca. O método de análise empregado permitiu determinar o valor das propriedades nas temperaturas máximas e mínimas de estudo. Foram calculados valores máximos do Q_{st} de 51,49 e 56,61 kJ·mol⁻¹ para a polpa, 58,34 e 54,75 kJ·mol⁻¹ para o eixo central, 50,96 e 54,14 kJ·mol⁻¹ para o mesocarpo, 46,53 e 49,46 kJ·mol⁻¹ para a casca e 98,29 e 72,08 kJ·mol⁻¹ para as sementes, correspondentes às temperaturas de 70 e 40 °C, respectivamente. Nas curvas pode-se observar que os valores entre as temperaturas são próximos um do outro. Estes resultados concordam com os publicados na literatura sobre a proximidade dos calores isostéricos de sorção quando são estimados pelo método direto (VILLA-VÉLEZ et al., 2012; GONELLI et al., 2010).

O calor isostérico de sorção diminui com o aumento do conteúdo de umidade e para teores de umidade superior a 0,200 kg·kg⁻¹ b.s estes valores chegam perto da energia de

vaporização da água pura para cada temperatura de estudo. Isto pode ser quantitativamente explicado pelo fato de que a baixos conteúdos de umidade a sorção ocorre nos sítios ativos disponíveis, dando origem a uma grande interação energética. Os valores iniciais do calor isostérico de sorção podem ter sido resultado da quimiosorção dos grupos polares. Os valores do Q_{st} são maiores que zero em cada conteúdo de umidade e tendem a zero quando o conteúdo de umidade aumenta (RIZVI, 2005; MULET et al., 2002). Nas figuras, para o eixo central e sementes de jaca, foi observado um cruzamento nos valores de Q_{st} nos conteúdos de umidade de 0,130 e 0,040 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{b.s.}$, respectivamente. Este fenômeno ocorre nos valores iniciais para o calor isostérico de sorção à temperatura de 70 °C, resultado da alta taxa de evaporação da água causada pela reação dos lipídeos nas sementes e dos compostos aromáticos presentes no eixo central da jaca (CHINACHOTI, 1998). Os elevados valores do calor isostérico de sorção obtidos para a água a baixos conteúdos de umidade indicam uma forte relação água-componentes nas frutas da jaqueira.

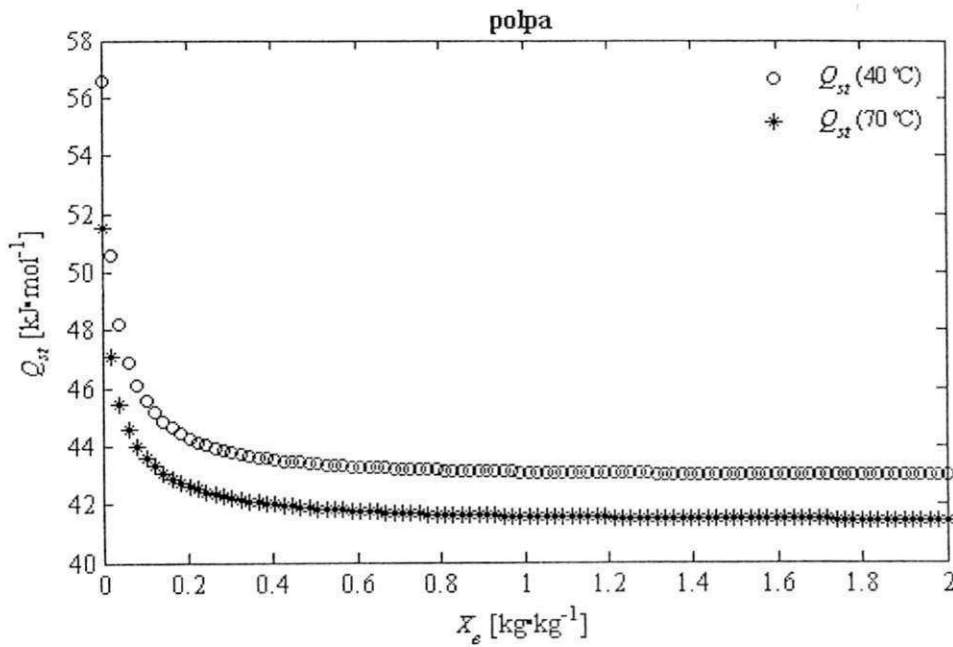


Figura 3.7 - Calor isostérico ou entalpia de sorção da água da polpa de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

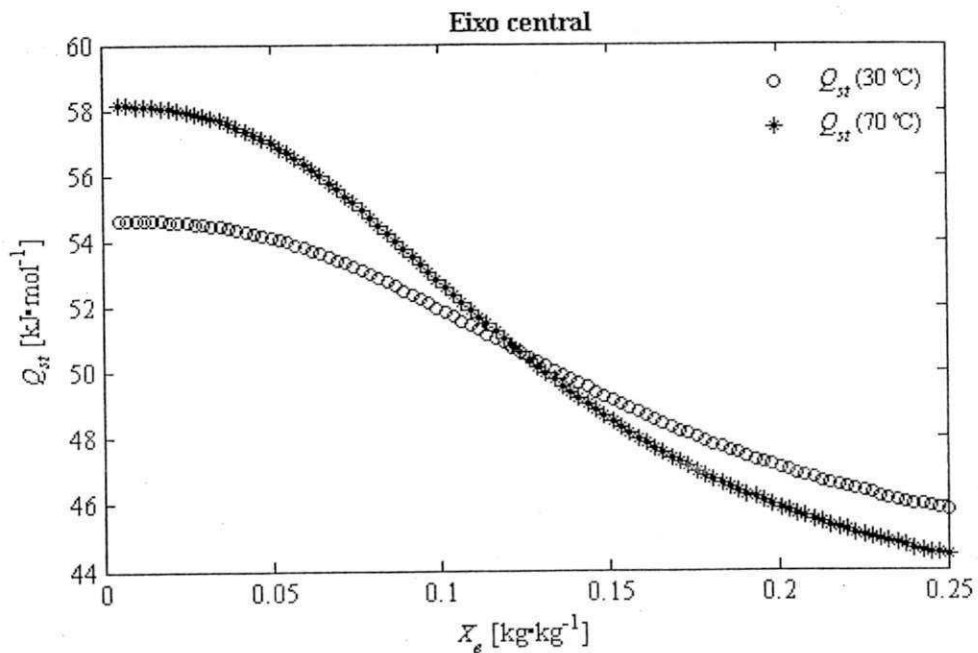


Figura 3.8 - Calor isostérico ou entalpia de sorção da água do eixo central de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

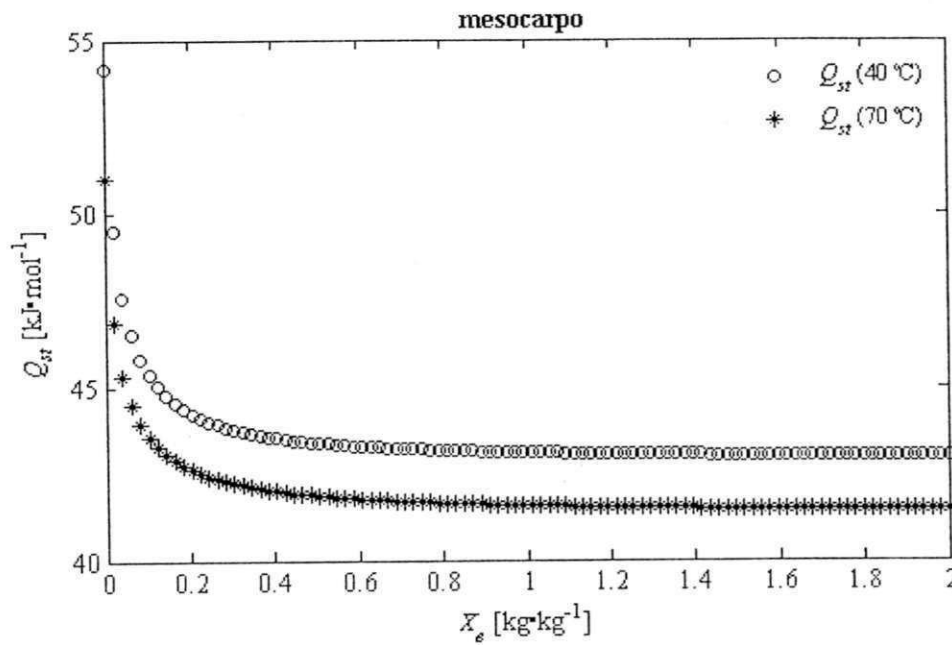


Figura 3.9 - Calor isostérico ou entalpia de sorção da água do mesocarpo de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

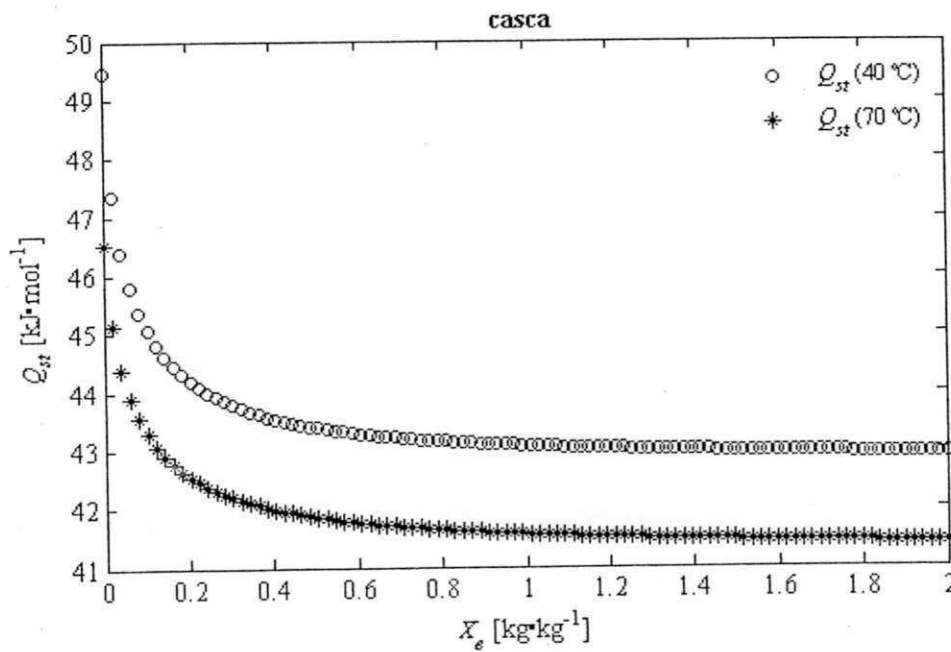


Figura 3.10 - Calor isostérico ou entalpia de sorção da água da casca de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

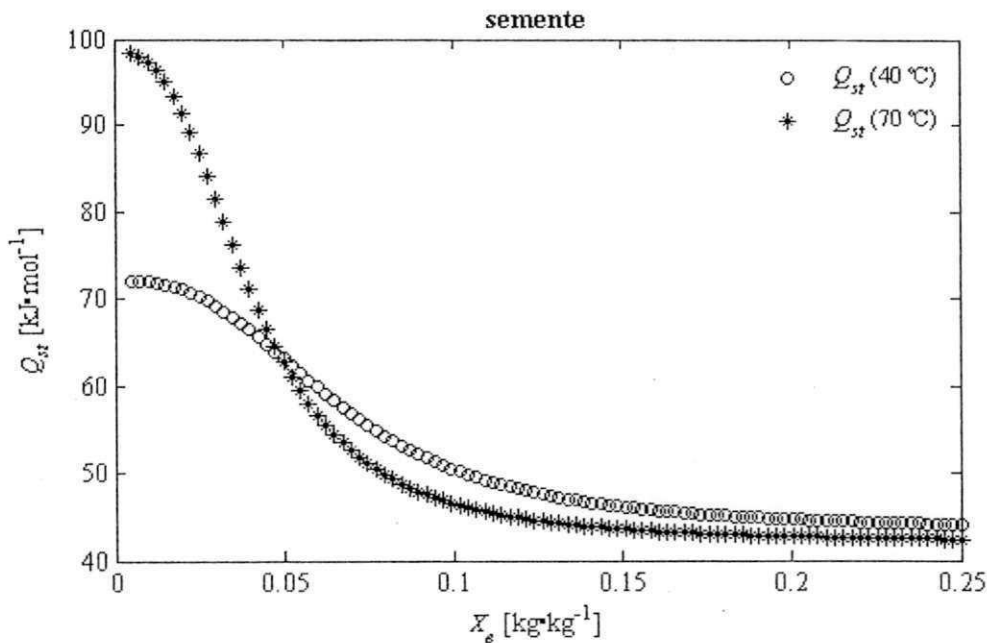


Figura 3.11 - Calor isostérico ou entalpia de sorção da água da semente de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

Nas Figuras 3.12 a 3.16 encontram-se a evolução da entropia diferencial com o conteúdo de umidade nas temperaturas de 40 e 70 °C. A entropia diferencial representa a soma algébrica da entropia integral em um nível de hidratação particular, além da mudança da ordem ou desordem quando novas moléculas de água são absorvidas pelo sistema no mesmo nível de hidratação. Se os valores do conteúdo de umidade da entropia mínima integral e a entropia diferencial são diferentes, este nível de hidratação em particular na mínima entropia diferencial não pode ser considerada como o máximo ponto de estabilidade, porque nem todos os sítios ativos disponíveis foram ocupados por um conteúdo de água em particular e, portanto, é possível obter a partir deste ponto, menores mudanças diferenciais que proporcionam uma melhor organização das moléculas de água absorvidas nos alimentos (SIMAL et al., 2007; TELIS et al., 2000). Os valores obtidos da ΔS foram de 34,1 e 39,63 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para a polpa, 71,36 e 75,60 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para o eixo central, 33,64 e 37,98

$\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para o mesocarpo, 28,02 e 33,38 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para a casca e 47,25 e 58,94 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ para as sementes, correspondentes às temperaturas de 70 e 40°C, respectivamente.

O conteúdo de água na mínima entropia diferencial neste caso foi semelhante aos valores da monocamada de GAB para polpa, mesocarpo e casca de jaca, porque a mudança de entropia máxima foi provocada pela sorção de água nos sítios mais ativos. O valor da monocamada é correspondente à saturação dos grupos polares da água adsorvida nos sítios mais ativos.

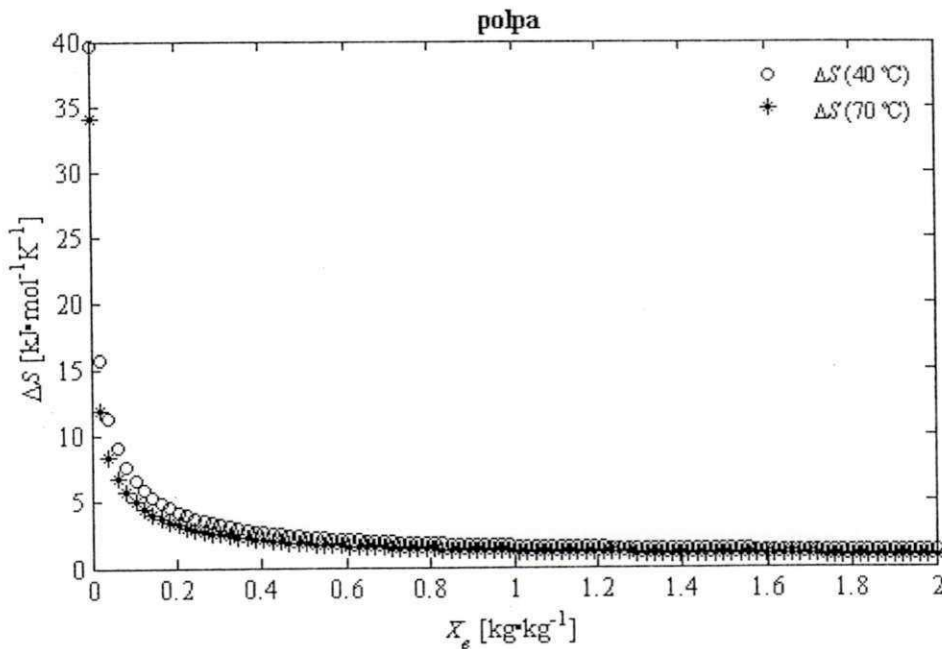


Figura 3.12 - Entropia diferencial de sorção da água da polpa de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

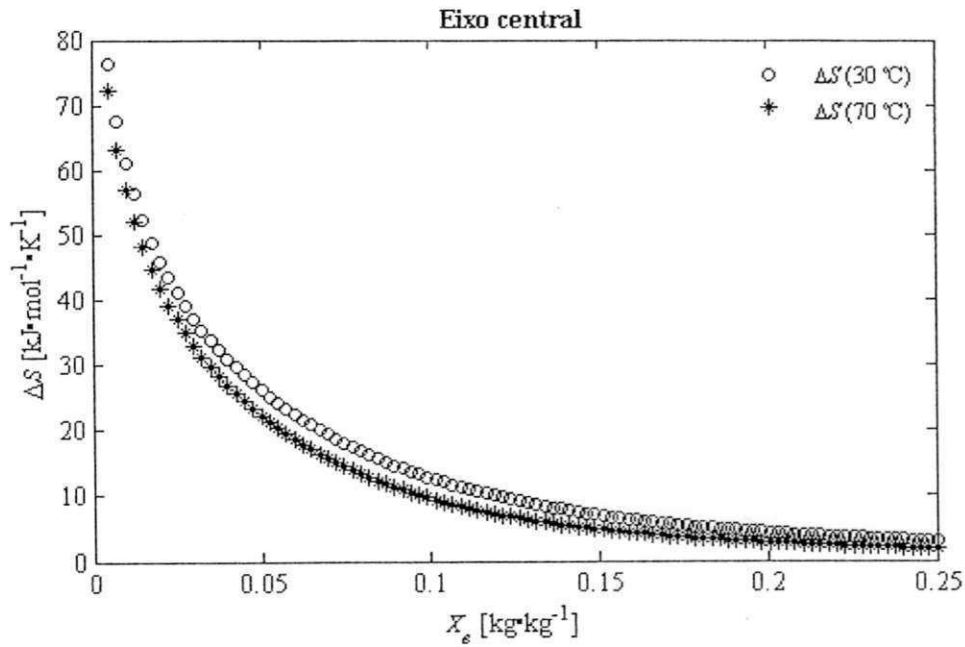


Figura 3.13 - Entropia diferencial de sorção da água do eixo central de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

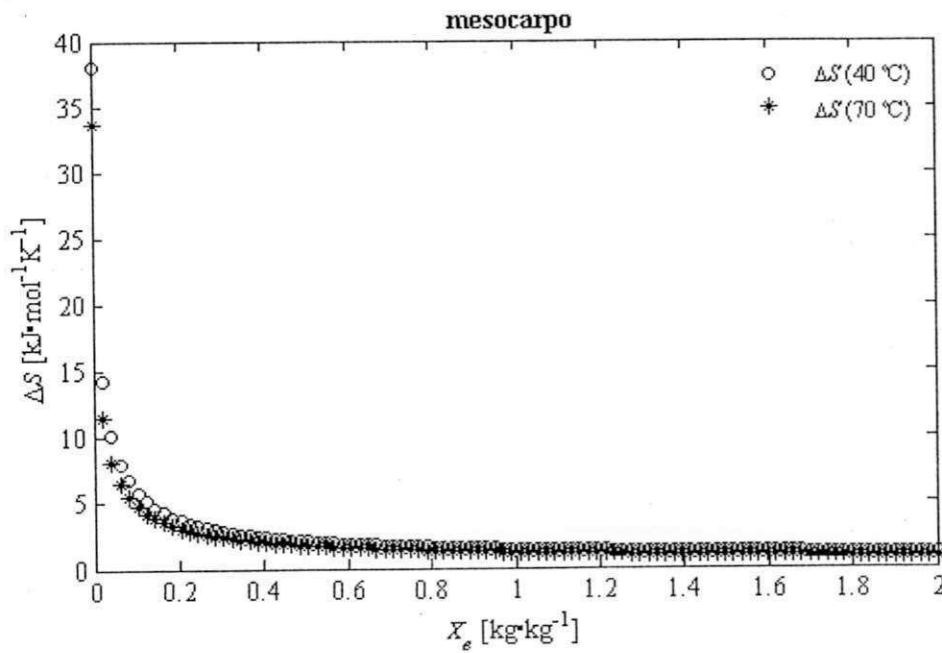


Figura 3.14 - Entropia diferencial de sorção da água do mesocarpo de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

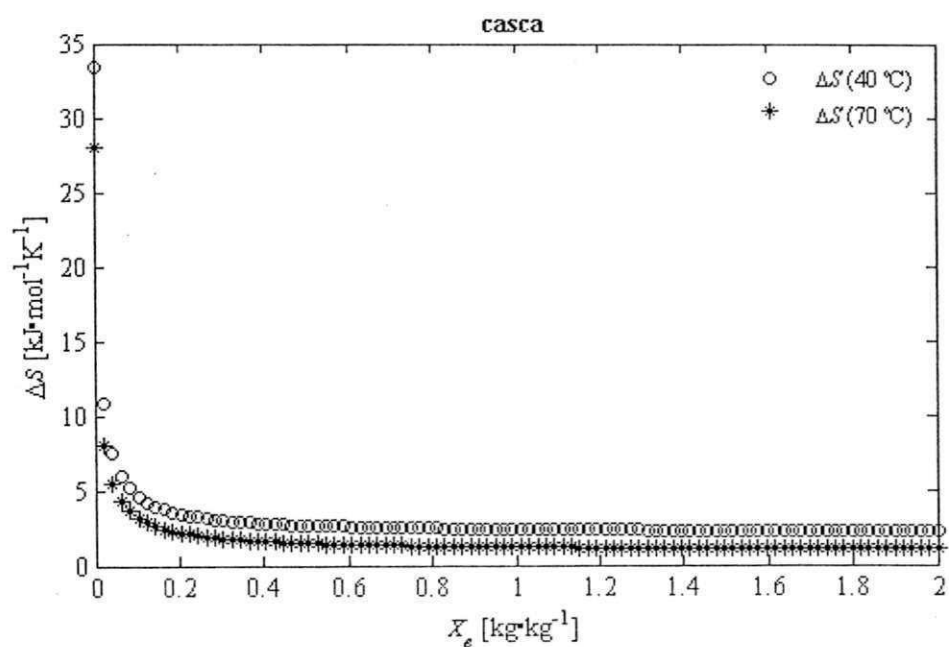


Figura 3.15 - Entropia diferencial de sorção da água da casca de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

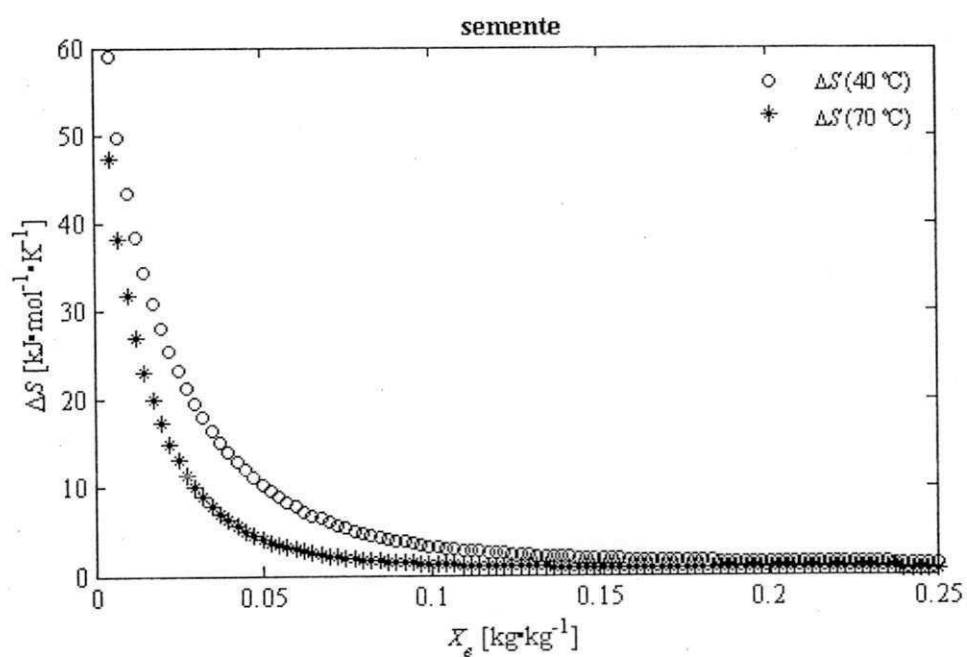


Figura 3.16 - Entropia diferencial de sorção da água da semente de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

Nas Figuras 3.17 a 3.21 foi observada uma tendência na energia livre de Gibbs' em aumentar com o incremento do conteúdo de umidade. Segundo Gonelliet et al. (2010) e Brovchenko e Oleinikova (2008), produtos com baixo teor de umidade em atividades de água baixas, tem estados de excitação maior nas moléculas de água. Isto se deve a água que estando em maior contato com a estrutura do alimento (água ligada), precisa de maior energia para poder reagir com o sistema. Os valores para ΔG foram de -11,54 e -12,17 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para a polpa, -24,36 e -23,42 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para o eixo central, -11,38 e -11,63 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para o mesocarpo, -9,43 e -10,16 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para a casca e -16,28 e -18,34 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ para as sementes, às temperaturas de 70 e 40 °C, respectivamente. Estes valores calculados são muito próximos em ambas as temperaturas, sendo todos os valores menores que zero na faixa de conteúdo de umidade estudado, o que indica que todas as reações ocorreram espontaneamente.

Nos resultados gráficos das Figuras 3.7 a 3.11 e 3.12 a 3.16 foi observada uma forte interação ou ligação intramolecular (relacionado à entalpia) que conduziu a uma maior redução dos graus de liberdade no sistema. Consequentemente, ocorreu uma maior ordem (relacionado à entalpia) no sistema. Essa relação pode permitir a aplicação da teoria de compensação entalpia-entropia na polpa e nos resíduos de jaca sendo que a taxa de reação deve ser semelhante para todas as reações envolvidas nas temperaturas avaliadas (KRUG et al., 1976 a; KRUG et al., 1976 b). A existência da teoria de compensação implica dizer que apenas um mecanismo da reação é seguido por todos os membros da série de reação e portanto, uma avaliação confiável da relação isocinética ajuda elucidar os mecanismos de reação (GARCÍA-PÉREZ et al., 2008).

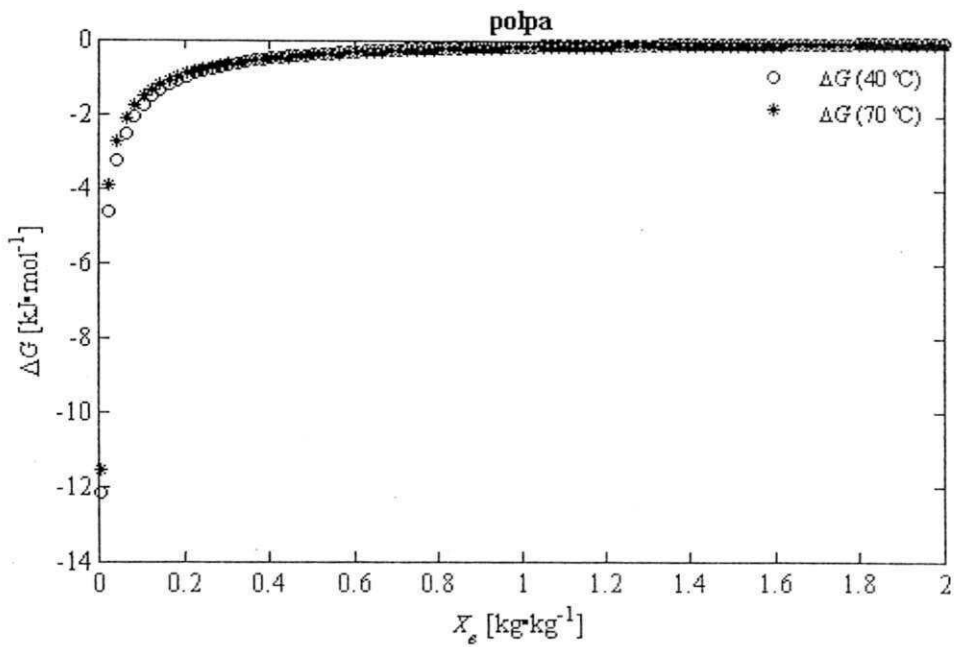


Figura 3.17 - Energia livre de Gibbs' da água da polpa de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

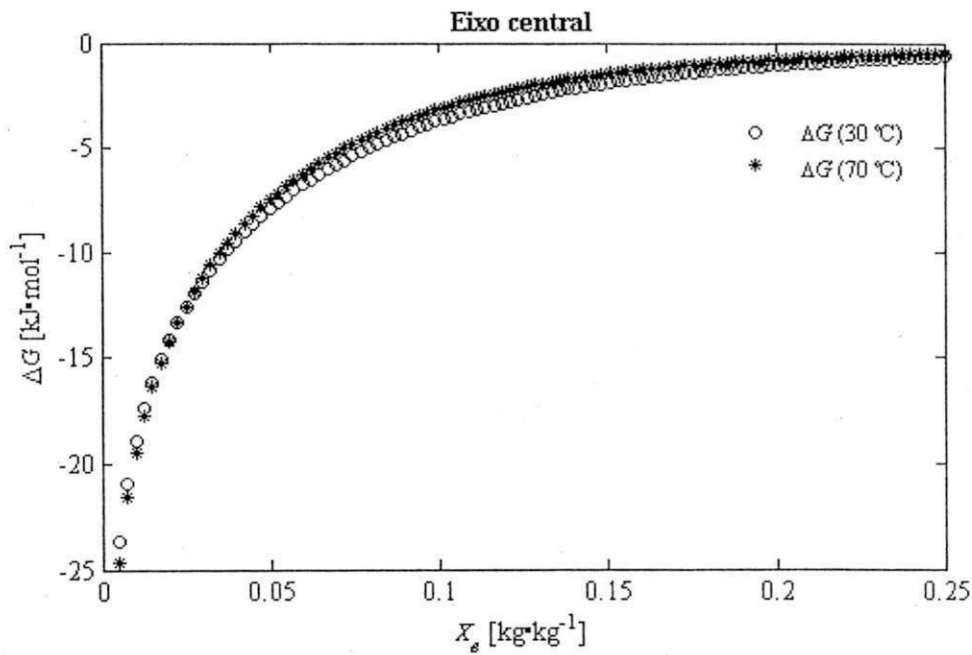


Figura 3.18 - Energia livre de Gibbs' da água do eixo central de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

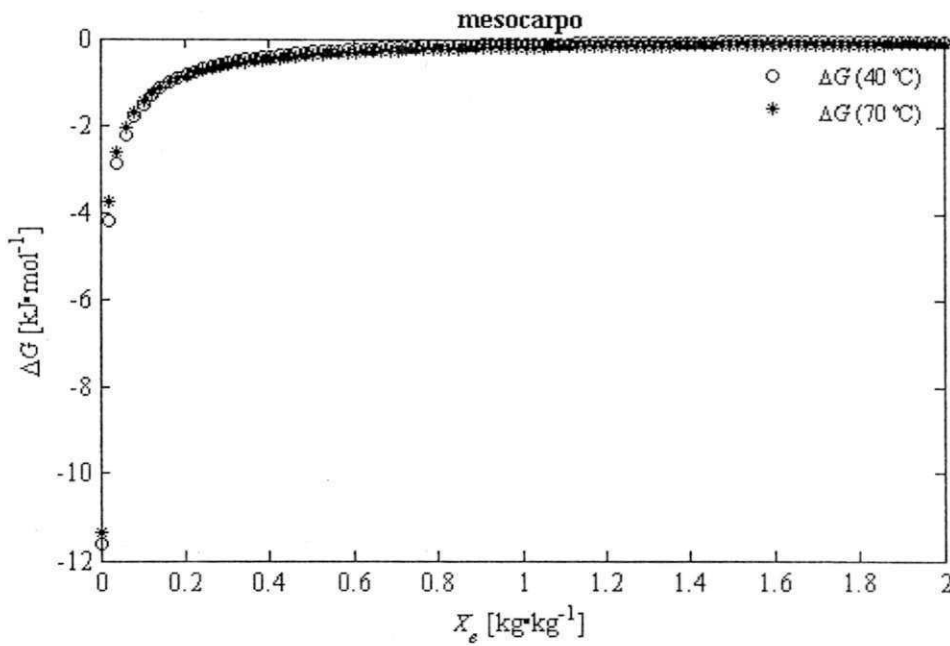


Figura 3.19 - Energia livre de Gibbs' da água do mesocarpo de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

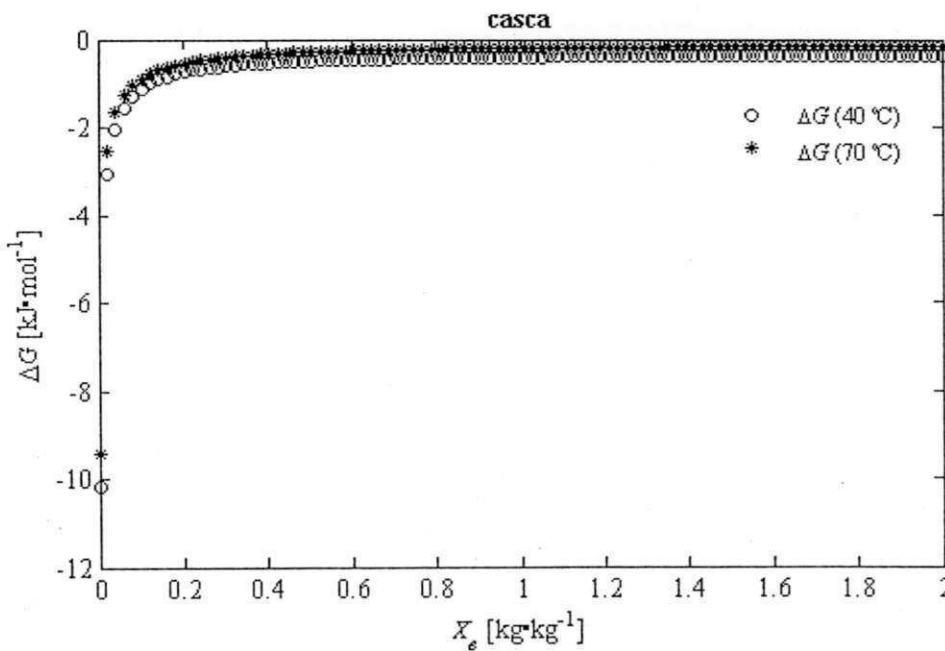


Figura 3.20 - Energia livre de Gibbs' da água da casca de jaca em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

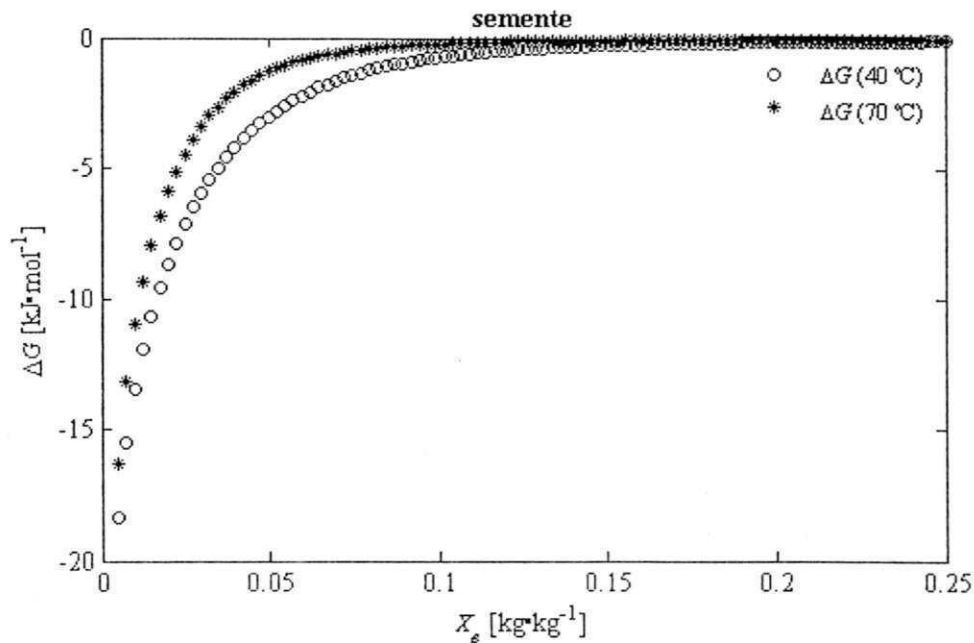


Figura 3.21 - Energia livre de Gibbs' da água das sementes, em função do conteúdo de umidade de equilíbrio nas temperaturas de 40 e 70 °C.

3.5. Conclusões

- ▣ As isotermas de sorção da polpa, mesocarpo e casca de jaca apresentaram um comportamento típico da curva tipo III e as sementes e eixo central do tipo II na classificação de Brunauer.
- ▣ O teor de umidade de equilíbrio diminuiu com o aumento da temperatura a uma dada atividade de água e aumentou com o incremento da atividade de água a temperatura constante em todos os experimentos.
- ▣ O modelo de GAB foi o que melhor representou as isotermas de dessorção da polpa, mesocarpo e casca de jaca e o de Oswin foi o que melhor ajustou os dados experimentais das sementes e eixo central nas temperaturas de estudo.

- ☒ Os modelos de GAB e Oswin empregados para determinar a primeira derivada parcial analítica da atividade de água com respeito à temperatura através da equação de Clausius-Clapeyron foram satisfatórios para determinar o calor isostérico de sorção da água da polpa e resíduos de jaca.
- ☒ O calor isostérico de sorção diminuiu com o aumento do conteúdo de umidade de equilíbrio em todos os experimentos. Para teores de umidade superior a 0,200 kg·kg⁻¹b.s estes valores chegaram perto à energia de vaporização da água pura, para cada temperatura de estudo.
- ☒ O maior estado de excitação das moléculas de água ocorreu a baixos conteúdos de umidade de equilíbrio e com o aumento da umidade, o grau de excitação diminui.
- ☒ A energia livre de Gibbs's aumentou com o aumento do conteúdo de umidade em todos os experimentos apresentando valores menores que zero, indicando que todas as reações ocorreram espontaneamente.
- ☒ No estudo das isotermas de dessorção da polpa e resíduos de jaca foi observado um equilíbrio termodinâmico ($\Delta G < 0$) em todos os sistemas.

3.6. Referências

- AL-MUHTASEB, A. H.; McMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review. **Trans IChemE**, Porto, v. 80, p. 118-128, 2002.
- ANDERSON, R. B. Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller equation. **Journal of the American Chemical Society**, Utah, v. 68, p. 686-691, 1946.

AOAC - Association of Official Analytical Chemists International, Moisture and volatile matter in oils and fats: vacuum oven method. **Official Methods of Analysis** 16th ed. Gaithersburg: AOAC., p. 1-5, 1997.

ASAE - American Society of Agricultural Engineers D271.2 DEC99. **Psychrometric data**. Madison:, 981 p., 1998.

ASQUIERI, E. R.; RABÊLO, A. M. D. S.; SILVA, A. G. M. Fermented jackfruit: study on its physicochemical and sensorial characteristics. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 28, n. 4, p. 881-887, 2008.

AVIARA, N. A.; AJIBOLA, O. O.; DAIRO, U. O. Thermodynamics of moisture sorption in sesame seed. **Biosystems Engineering**, Herts, v. 83, n. 4, p. 423-431, 2002.

AWAD, M. **Fisiologia pós-colheita de frutas**. 1 ed. São Paulo: Nobel, p. 1-185, 1993.

BAHLOUL, N.; BOUDHRIOUA, N.; KECHAOU, N. Moisture desorption-adsorption isotherms and isosteric heats of sorption of Tunisian olive leaves (*Olea europea* L). **Industrial Crops and Products**, St Martin d'Heres, v. 28, p. 162-176, 2008.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; FONTANA, J. A.; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. **Water activity in foods: fundamentals and applications**. Ames: Blackwell Publishing Profesional, 438 p., 2007.

BROVCHENKO, I.; OLEINIKOVA, A. **Interfacial and confined water**. 1 ed. Oxford: Elsevier, 317 p., 2008.

BRUNAUER, S.; DEMING, L. S.; DEMING, W. E.; TROLLER, E. On the theory of Van Der Waals adsorption of gases. **Journal of the American Chemical Society**, Utah, v. 62, p. 1723-1732, 1940.

- CAMPBELL, R.; EL-SAWA, S. F. The jackfruit, fairchild horticulture series. Miami: Fairchild Tropical Garden, p. 23-30, 1998.
- CHANDRIKA, U. G.; JANSZ, E. R.; WARNASURIYA, N. D. Analysis of carotenoids in ripe jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) kernel and study of their bioconversion in rats. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Davis, v. 85, p. 186-190, 2005.
- CHAYJAN, R. A.; PARIAN, J. A.; ESMA-ASHARI, M.; PEYMAN, M. H. Mathematical modelling of corn thermodynamic properties for desorption energy estimation. **International Agrophysics**, Lublin, v. 24, p. 213-218, 2010.
- CHEN, C.; MOREY, R. V. Comparisons of four EMC/ERH equations. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 32, n. 3, p. 983-990, 1989.
- CHEN, H. T.; HEN, R. A. Dehydration and storage stability of jackfruit leather. **Journal of Food Science**, North Carolina, v. 49, p. 1920-1930, 1975.
- CHINACHOTI, P. Water migration and food storage stability. In TAUB, I. A. e SINGH, R. P. (Eds.) **Food storage stability**. 1 ed. New York: CRC Press., cap. 9, p. 1-23, 1998.
- DA-WEN, S. Comparison and selection of EMC/ERH isotherm equations for rice. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 35, p. 249-264, 1999.
- EIM, V. S.; ROSSELLÓ, C.; FEMENIA, A.; SIMAL, S. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of carrot. **International Journal of Food Engineering**, Melbourne, v. 7, n. 3, p. 1-18, 2011.
- GARCÍA-PÉREZ, J. V.; CÁRCEL, J. A.; CLEMENTE, G.; MULET, A. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. **LWT**, Zurich, v. 41, p. 18-25, 2008.

- GONELLI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; HORTA DE OLIVEIRA, G. H.; GOMES, C. F.; BOTELHO, F. M. Water sorption isotherms and thermodynamic properties of pearl millet grain. **International Journal of Food Science and Technology**, Manchester, v. 45, p. 828-838, 2010.
- GUOLA, A. M.; KARAPANTSIOS, T. D.; ACHILIAS, D. S.; ADAMOPOULOS, K. G. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 85, p. 73-83, 2008.
- HAQ, N. **Jackfruit: *Artocarpus heterophyllus***. 1 ed. Southamton: Southamton Centre for Underutilised Crops, 192 p., 2006.
- HOSSAIN, M. D.; BALA, B. K.; HOSSAIN, M. A.; MONDOL, M. R. A. Sorption isotherms and heat of sorption of pineapple. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 48, p. 103-107, 2001.
- IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food materials. **Journal of Food Technology**, Minnesota, v. 11, p. 109-116, 1976.
- JOWITT, R.; ESCHER, F.; HALLSTOM, B.; MEFFERT, H. F. T.; SPIESS, W. E. L.; VOS, G. **Physical properties methods of foods**. 2 ed. London: Applied Science Publishers, 564 p., 1987.
- KAYA, S.; KAHYAOGLU, T. Thermodynamic properties and sorption equilibrium of pestil (grape skin). **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 71, p. 200-207, 2005.

- KHYRUNNISA, B.; PADMA, U. K.; DANIEL, V. A.; SWAMINATHAM, M. Effect of replacement of cereal in rice rege diets by jackfruit seeds flour on the nutritive value of diets. **Indian Journal of Nutrition and Dietetics**, Coimbatore, n. 26, p. 141-143, 1989.
- KRUG, R. R.; HUNTER, W. G.; GRIEGER, R. A. Enthalpy-entropy compensation. 1. Some fundamental statistical problems associated with the analysis of Von't Hoff and Arrhenius data. **Journal of Physical Chemistry**, Evanston, v. 80, p. 2335-2341, 1976a.
- KRUG, R. R.; HUNTER, W. G.; GRIEGER, R. A. Enthalpy-entropy compensation. 2. Separation of the chemical from the statistical effect. **Journal of Physical Chemistry**, Evanston, v. 80, p. 2341-2351, 1976b.
- MENKOV, N. D. Moisture sorption isotherms of broan bean seeds. **Nahrung**, Veröffentlichung, v. 44, p. 443-446, 2000.
- MULET, A.; GARCÍA-PASCUAL, P.; SANJUÁN, N.; GARCÍA-REVERTER, J. Equilibrium isotherms and isoteric heats of morel (*Morchela esculenta*). **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 53, p. 75-81, 2002.
- QUIÉVY, N.; JACQUET, N.; SCLAVONS, M.; DEROANNE, C.; PAQUOT, M.; DEVAUX, J. Influence of homogenization and drying on the thermal stability of microfibrillated cellulose. **Polymer Degradation and Stability**, Brighton, v. 95, p. 306-314, 2010.
- RIZVI, S. S. H. Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration. In RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. e DATTA, A. K. (Eds.) **Engineering Properties of Foods**. 3 ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group., cap. 7, p. 1-88, 2005.

- SAMAPUNDO, S.; DEVLIEGHIERE, F.; DE MEULENAER, B.; ATUKWASE, A.; LAMBONI, Y.; DEBEVERE, J. M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 79, p. 168-175, 2007.
- SHEKIN, D. **Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures**. 3 ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 972, 2004.
- SIMAL, S.; FEMENIA, A.; CASTELL-PALOU, Á.; ROSSELLÓ, C. Water desorption thermodynamic properties of pineapple. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 80, p. 1293-1301, 2007.
- TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; MANEGALLI, F. C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, Salamanca, v. 343, p. 49-56, 2000.
- TIMMERMANN, E. O.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 48, p. 19-31, 2001.
- TOGRUL, H.; ARSLAN, N. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of walnut kernels. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 43, p. 252-264, 2007.
- TSAMI, E.; KROKIDA, M. K.; DROUZAS, A. E. Effect of drying method on the sorption Characteristics of model fruits powders. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 38, p. 381-392, 1998.
- VILLA-VÉLEZ, H. A.; VÁQUIRO, H. A.; BON, J.; TELIS-ROMERO, J. Modelling thermodynamic properties of banana waste by analytical derivation of desorption

isotherms. **International Journal of Food Engineering**, Melbourne, v. 8, n. 1, p. 1-21, 2012.

Capítulo 4

Cinética de secagem da
casca, polpa e sementes
de jaca

4.1.1. Resumo

Foram efetuados experimentos de secagem em quatro temperaturas (40, 50, 60 e 70 °C) e velocidades de ar de 0,7; 1,4 e 1,8 m·s⁻¹ para casca e de 1,8 m·s⁻¹ para polpa e sementes de jaca através de um secador de leito fixo. Os modelos empíricos de Page, Peleg, Henderson-Pabis e o modelo teórico difusivo foram empregados na modelagem das cinéticas de secagem. Na análise gráfica foi encontrado um período de taxa decrescente em todo o processo de secagem para os três materiais. Na modelagem e simulação das cinéticas de secagem, o modelo de Page representou melhor o comportamento da umidade com o transcurso do tempo para as casca de jaca nas temperaturas e velocidades de ar estudadas. Já para a polpa e sementes de jaca o modelo de Peleg foi o que melhor descreveu o comportamento das curvas de secagem na velocidade de ar de 1,8 m·s⁻¹ e temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C.

Palavras-chave: *secagem; difusividade aparente; modelo de Peleg; modelo de Page.*

4.1.2. Abstract

Drying kinetics for peel, pulp and seeds of jackfruit were determined experimentally using a convective hot drier at three air velocities (0,7; 1,4 e 1,8 m·s⁻¹) and four temperatures (40, 50, 60 e 70 °C). The empirical models of Pege, Peleg, Henderson-Pabis and the theoretical diffusional model were used to modeling the drying kinetics. In the graphical analysis, falling rate periods for the tree materials were observed. For the kinetic modeling, the Page model showed the best fitting results for jackfruit peel, for all experimental conditions. For pulp and seeds of jackfruit, the Peleg model showed the best fitting results of drying curves at the air velocity of 1,8 m·s⁻¹ and temperatures of 40, 50, 60 e 70 °C.

Keywords: *drying; apparent diffusivity; Peleg model; Page model.*

4.2. Introdução

O processo de secagem realizado de maneira artificial é apontado por vários pesquisadores como uma das principais maneiras de conservação de sementes e alimentos. As características do ar de secagem e as dimensões dos secadores influenciam diretamente o desempenho do mesmo e a qualidade do produto final. A utilização de modelos matemáticos que consideram as características do sistema de secagem e do produto a ser seco, apresenta-se como ferramenta útil no desenvolvimento de secadores eficientes buscando a melhoria da qualidade do produto e otimização energética do processo (MUJUMDAR, 2006). Vários modelos foram propostos para prever o comportamento da secagem de produtos agrícolas, onde os mais comuns são aqueles que descrevem o processo no período de taxa decrescente, que são geralmente baseados no fenômeno de transferência de calor e de massa (SUHERMAN et al., 2012; BROOKER et al., 1992).

A isoterma de equilíbrio relacionando a umidade do alimento e a umidade relativa do ar ambiente em que este se insere, sob determinada temperatura, possibilita a obtenção do teor de água presente no material (PRACHAYAWAKORN et al., 2002). Assim, a umidade de equilíbrio do alimento em função da umidade relativa do meio, fornece informações muito úteis para os processos de secagem, preservação e acondicionamento do material (MOTEEVALI et al., 2012; MARTINS et al., 2004). O estabelecimento de curvas de equilíbrio higroscópico é importante para definir limites de desidratação do produto, estimar as mudanças de umidade sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente e para definir os teores de umidade propícios ao início da atividade de agentes que irão provocar a deterioração do produto (BABALIS; VELESSIOTIS, 2004). No caso da jaca torna-se importante ressaltar que as condições de secagem e o armazenamento adequado são essenciais para manter a qualidade desse produto devido à sua elevada atividade de água.

De acordo com Castell-Palou et al. (2012), os principais fatores que afetam a taxa de secagem são as propriedades físicas do produto, o arranjo geométrico desse em relação à superfície de transferência de calor, as propriedades físicas do ambiente de secagem e a característica do equipamento de secagem.

Dentre os problemas encontrados durante a secagem têm-se a complexidade da composição e estrutura do produto e mais especificamente os coeficientes de transferência de calor e massa, bem como as propriedades termodinâmicas do alimento, que estão em função da temperatura e da umidade (SARAVACOS; MAROULIS, 2001). Vários pesquisadores utilizaram modelos matemáticos para descrever a secagem de alimentos e produtos agroindustriais: Senadeer et al. (2003) utilizaram o modelo de Page e o modelo de Newton para descrever as cinéticas de secagem de vagens, batatas e ervilhas; Gilrado-Zuniga et al. (2010) usaram o modelo de Page e o de Fick para estudar a cinética de secagem de rodela de cupuaçu; Castell-Palou et al. (2012) empregaram um programa computacional baseado no modelo difusivo para simular o perfil de distribuição de umidade de cubos de queijo em 3D durante a secagem. O modelo de Fick foi utilizado por Togrul e Pehlivan (2004) para prever a secagem de uva, pêssego, figo e ameixa e por Babalis e Velessiotis (2004) para figos.

Com base nestas informações, objetivou-se estudar as cinéticas de secagem da casca, polpa e semente de jaca em um secador de leito fixo sob diferentes condições de temperatura e velocidade de secagem.

4.3. Material e Métodos

4.3.1. Material

As jacas (*Artocarpus heterophyllus*) variedade “mole” em estado inicial de maturação foram adquiridas na central de abastecimento CEASA de São José do Rio Preto - SP. As frutas foram levadas ao laboratório de medidas físicas do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos da UNESP - Campus de São José do Rio Preto e mantidas em refrigeração (17 °C) até atingirem a maturação completa com cor e aroma característicos para o início dos trabalhos.

4.3.2. Cinética de secagem

4.3.2.1. Descrição do equipamento de secagem

A cinética de secagem foi realizada em secador de convecção forçada de ar quente, desenhado e fabricado por alunos, professores e técnicos da área de Engenharia de Alimentos da UNESP (Figura 4.1). O equipamento é composto por cinco módulos interconectados. O módulo um ou sistema de extração e ventilação de ar é regulado pelo sistema de controle elétrico que define o fluxo de ar. Em seguida encontra-se o sistema de aquecimento de ar, que consiste em nove resistências elétricas contidas em uma câmara, que podem ser ligadas e desligadas do controle elétrico para atingir às temperaturas desejadas na secagem. O módulo três é um duto transportador do ar aquecido uniformizado por esferas de vidro. O quarto módulo é composto por duas câmaras de secagem com quatro bandejas cada de 25 x 25 cm. O módulo cinco regula a temperatura e entrada de ar no equipamento com nove tomadas que ligam e desligam as resistências e um controle que regula o fluxo de ar no ventilador.

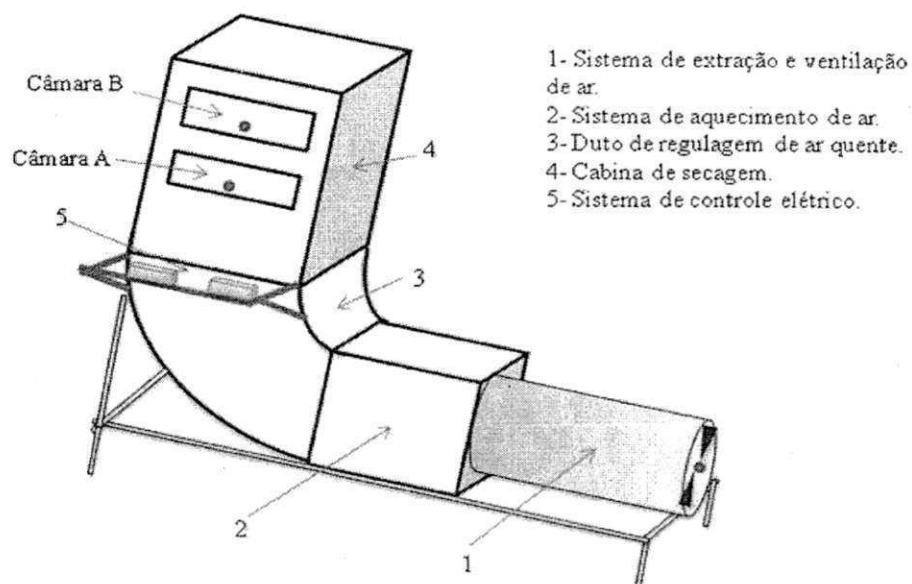


Figura 4.1 - Esquema do equipamento de secagem.

A aferição da temperatura foi através de quatro termopares inseridos na cabine de secagem. Para controle da velocidade do ar foi colocado um anemômetro (modelo AN-3050, ICEL, Brasil) na entrada do duto próximo ao ventilador e para medir a umidade relativa do ar na saída do secador foi colocado um termo-higrômetro (modelo MTH-1367, Minipa, Brasil) acima das bandejas.

4.3.2.2. Curvas de secagem

As temperaturas de secagem utilizadas foram de 40, 50, 60 e 70 ± 2 °C e as velocidades de 0,7; 1,4 e $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \pm 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para as cascas e $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \pm 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para polpa e sementes de jaca. As cascas foram cortadas em quadrados de 3,0 cm (Figura 4.2 (A)) e as polpas abertas longitudinalmente para retirada das sementes (Figura 4.2 (B)). Foram utilizadas três bandejas do secador (triplicatas) para cada experimento. No início da secagem

e em cada bandeja foram tomadas amostras aleatórias para medir a espessura das cascas, polpas e raios das sementes sem as películas (Figura 4.2 (C)) utilizando um paquímetro de precisão de 0,05 mm. Após as medições, as bandejas foram pesadas e colocadas no secador. Os dados de peso foram tomados das três bandejas após 2, 4 e 8 minutos e de 12 em 12 minutos até peso constante empregando uma balança semi-analítica (modelo TS2KS Marte, Ohaus, USA) com precisão de $\pm 0,001$ g. Os pesos das amostras para cada tempo de secagem foram expressos em quilograma de água por quilograma de produto seco ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, b.s.) através da umidade inicial do produto em base seca (método AOAC, 1997). Na análise gráfica das curvas de secagem das cascas, polpa e sementes de jaca foram usadas as taxas de secagem ($dX/dT\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, b.s.) versus as umidades ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, b.s.) para cada tempo, nas temperaturas e velocidades propostas.

4.3.2.3. Determinação do conteúdo de umidade de equilíbrio

O conteúdo de umidade de equilíbrio foi determinado com base no equilíbrio termodinâmico no sistema. Quando as bandejas atingiram peso constante, foi medida a umidade relativa do sistema e através da relação $a_w = UR/100$ obteve-se a atividade de água das amostras. Uma vez obtida atividade de água, empregou-se os modelos de isotermas apresentados no capítulo 3 (GAB para cascas e polpa e Oswin para sementes) para calcular a umidade de equilíbrio em cada experimento.

As umidades relativas de equilíbrio no sistema, umidades de equilíbrio calculadas pelo correspondente modelo de isoterma, umidades iniciais experimentais e espessuras médias das cascas e polpa e raios das sementes foram tabelados para posterior modelagem das curvas de secagem.

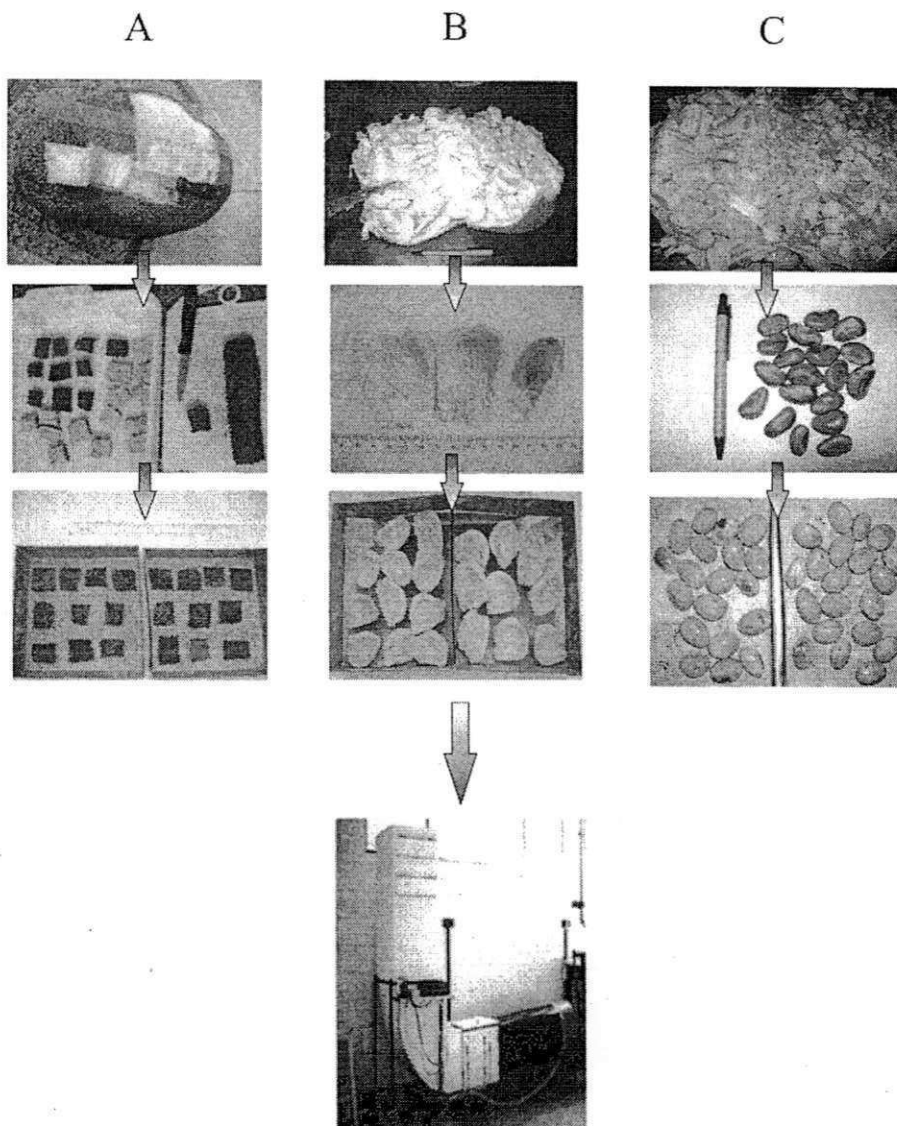


Figura 4.2 - Ilustração dos procedimentos para secagem das cascas (A), polpa (B) e sementes (C) de jaca.

4.3.2.4 Modelagem da cinética de secagem

Para a análise da cinética de secagem da casca, polpa e sementes de jaca foram empregados os modelos de camada fina (Equações 4.1 - 4.3). Os parâmetros destes modelos empíricos foram determinados através das curvas experimentais de secagem as temperaturas

de 40, 50, 60 e 70 °C e velocidades de ar de 0,7; 1,4 e 1,8 m·s⁻¹ para as cascas e 1,8 m·s⁻¹ para a polpa e sementes.

$$M = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \exp(-kt^N) \quad \text{Modelo de Page} \quad (4.1)$$

$$M = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = a \cdot \exp(-kt) \quad \text{Modelo de Henderson-Pabis} \quad (4.2)$$

$$X = \frac{X_i - t}{k_1 + k_2 t} \quad \text{Modelo de Peleg} \quad (4.3)$$

onde M é a razão de umidade (adimensional), X (kg·kg⁻¹, b.s.) é a umidade do produto no tempo t , X_i é o conteúdo de umidade inicial (kg·kg⁻¹, b.s.), X_e é o conteúdo de umidade de equilíbrio (kg·kg⁻¹, b.s.), k, k_1, k_2 são as constantes de velocidade de secagem (s⁻¹, m⁻¹, h⁻¹), N e a são constantes (ROBERTS et al, 2008; CARLESSO et al., 2005).

O modelo teórico difusivo para placa plana (Equação 4.4) foi empregado para determinar a difusividade efetiva da água através das curvas experimentais de secagem da casca e polpa. Já para as sementes de jaca foi utilizada a Equação 4.5 para esferas. Dos modelos foram tomadas as dez primeiras séries da solução analítica para o cálculo da D_{ap} e partindo do pressuposto de que a maior difusão da água ocorre no interior e não na superfície externa (considerando os materiais como semipermeáveis), as metades das espessuras e os raios iniciais foram considerados para o cálculo do coeficiente de difusão.

$$M = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{ap} t}{4L^2}\right] \quad (4.4)$$

$$M = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 \pi^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{ap} t}{r^2}\right) \quad (4.5)$$

onde: X é a umidade média no tempo; X_e é a umidade de equilíbrio; X_i é a umidade inicial da amostra; M é o número adimensional de umidade; D_{ap} é a difusividade aparente (m²·s⁻¹); t é

o tempo; L é a meia espessura da amostra (m); r é o raio da semente (m) e n é o número de termos da série.

4.3.2.5. Ferramentas de otimização e análise estatística

Os dados experimentais de secagem foram submetidos as análises de regressão não linear utilizando o programa Excel (Microsoft Corporation©, EUA). Os problemas de otimização apresentado nas Equações 4.1 - 4.5 foram resolvidos pelo algoritmo Newtoniano através das funções "Sensitivity Report" e "Limits Report" da ferramenta SOLVER. O "Sensitivity Report" fornece um valor ótimo para cada célula ajustável. Quando são reduzidos os valores, o coeficiente da função objetivo pode aumentar ou diminuir para determinar o melhor valor de ajuste para o modelo. O "Limits Report" fornece os limites superiores e inferiores de cada célula ajustável mantendo o resto das células ajustáveis no seu valor atual, dentro das restrições.

O coeficiente de determinação (R^2) (Equação 4.6) e o erro médio relativo ($MRE(\%)$) (Equação 4.7) foram empregados para avaliar a precisão do modelo. O parâmetro estatístico R^2 define a eficiência do modelo com a variação dos dados e o $MRE(\%)$ mede a proximidade dos dados calculados com os experimentais.

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (y_k^* - \bar{y})^2}{\sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y})^2} \quad (4.6)$$

$$MRE = \frac{100}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|y_k - y_k^*|}{y_k^*} \quad (4.7)$$

Nas Equações 4.6 e 4.7, y representa os valores experimentais, y^* representa os valores estimados, e N é o número de valores experimentais (SHESKIN, 2004; DANDAMRONGRAK et al., 2002).

4.4. Resultados e discussão

4.4.1. Curvas experimentais de secagem

Os resultados experimentais da secagem às temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C e velocidades de ar de 0,7; 1,4 e 1,8 m·s⁻¹ para as cascas e de 1,8 m·s⁻¹ para a polpa e sementes de jaca, junto com seus respectivos desvios padrão são apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.5.

Tabela 4.1—Cinéticas de secagem das cascas de jaca a velocidade de 0,7 m·s⁻¹.

Tempo (s)	^a Curvas de secagem experimentais (b.s.)			
	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
0	3,587±0,000	3,587±0,000	3,587±0,000	3,587±0,000
120	2,215±0,020	2,268±0,012	1,976±0,015	1,967±0,029
240	2,472±0,021	1,732±0,014	1,632±0,018	1,415±0,008
720	1,740±0,015	1,222±0,008	0,969±0,008	0,887±0,011
1440	1,597±0,014	0,901±0,007	0,704±0,011	0,590±0,009
2160	1,227±0,009	0,712±0,005	0,490±0,004	0,431±0,005
2880	1,096±0,015	0,580±0,012	0,387±0,004	0,326±0,007
3600	1,004±0,005	0,490±0,005	0,316±0,002	0,256±0,002
4320	0,916±0,012	0,422±0,007	0,259±0,002	0,206±0,004
5040	0,825±0,007	0,385±0,004	0,214±0,002	0,174±0,003
5760	0,761±0,007	0,339±0,004	0,178±0,002	0,143±0,002
6480	0,751±0,007	0,287±0,002	0,151±0,002	0,114±0,001
7200	0,701±0,007	0,274±0,006	0,133±0,005	0,099±0,002
7920	0,623±0,006	0,229±0,003	0,114±0,002	0,078±0,001
8640	0,631±0,009	0,217±0,003	0,093±0,004	0,068±0,001
9360	0,555±0,005	0,185±0,002	0,085±0,001	0,054±0,002
10080	0,529±0,005	0,167±0,001	0,068±0,001	0,045±0,001
10800	0,511±0,004	0,151±0,001	0,062±0,001	0,037±0,001
11520	0,484±0,000	0,138±0,001	0,050±0,001	0,032±0,001
12240	0,456±0,005	0,126±0,002	0,044±0,001	0,027±0,001
12960	0,433±0,005	0,115±0,002	0,038±0,001	0,022±0,001
13680	0,412±0,003	0,103±0,001	0,033±0,001	0,018±0,001
14400	0,412±0,004	0,093±0,001	0,028±0,001	0,016±0,001
15120	0,395±0,004	0,088±0,001	0,025±0,001	0,014±0,001
15840	0,362±0,003	0,080±0,001	0,021±0,000	0,011±0,001

^a Desvio padrão da triplicata; b.s.: unidade em base seca (kg kg⁻¹).

Tabela 4.2 - Cinéticas de secagem das cascas de jaca a velocidade de $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tempo (s)	^a Curvas de secagem experimentais (b.s.)			
	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
0	3,587±0,000	3,587±0,000	3,587±0,000	3,587±0,000
120	2,484±0,017	2,279±0,016	2,185±0,043	2,165±0,029
240	1,915±0,041	2,040±0,015	1,584±0,018	1,370±0,008
720	1,639±0,013	1,370±0,010	1,155±0,026	0,869±0,011
1440	1,123±0,028	1,128±0,004	0,727±0,010	0,590±0,009
2160	0,931±0,012	0,838±0,000	0,560±0,008	0,431±0,005
2880	0,873±0,011	0,712±0,003	0,484±0,021	0,321±0,007
3600	0,695±0,007	0,626±0,006	0,368±0,005	0,252±0,002
4320	0,664±0,007	0,550±0,007	0,307±0,003	0,202±0,004
5040	0,553±0,008	0,481±0,009	0,263±0,005	0,178±0,002
5760	0,504±0,008	0,431±0,008	0,225±0,005	0,145±0,002
6480	0,466±0,009	0,389±0,005	0,196±0,002	0,111±0,001
7200	0,427±0,009	0,370±0,014	0,170±0,002	0,104±0,001
7920	0,387±0,006	0,337±0,005	0,145±0,003	0,076±0,001
8640	0,355±0,014	0,295±0,005	0,126±0,003	0,070±0,001
9360	0,344±0,007	0,289±0,002	0,115±0,003	0,053±0,002
10080	0,319±0,006	0,248±0,002	0,100±0,003	0,045±0,001
10800	0,284±0,002	0,242±0,003	0,085±0,002	0,037±0,001
11520	0,269±0,002	0,212±0,003	0,075±0,000	0,031±0,001
12240	0,247±0,003	0,196±0,002	0,066±0,002	0,027±0,001
12960	0,241±0,004	0,185±0,003	0,060±0,002	0,022±0,001
13680	0,222±0,005	0,171±0,001	0,053±0,001	0,018±0,000
14400	0,203±0,005	0,157±0,002	0,045±0,001	0,015±0,001
15120	0,193±0,007	0,145±0,002	0,041±0,001	0,014±0,000
15840	0,182±0,003	0,140±0,002	0,035±0,001	0,012±0,001

^a Desvio padrão da triplicata; b.s.: umidade em base seca (kg kg^{-1}).

Tabela 4.3 - Cinéticas de secagem das cascas de jaca a velocidade de $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tempo (s)	^a Curvas de secagem experimentais (b.s.)			
	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
0	3,587±0,000	3,587±0,000	3,587±0,000	3,587±0,000
120	2,135±0,013	2,145±0,014	2,030±0,011	2,300±0,020
240	2,802±0,021	1,849±0,027	1,481±0,018	1,398±0,009
720	1,646±0,014	1,165±0,008	0,953±0,005	1,049±0,013
1440	1,667±0,014	0,905±0,006	0,650±0,010	0,585±0,004
2160	1,146±0,012	0,653±0,007	0,484±0,005	0,435±0,004
2880	1,020±0,010	0,538±0,008	0,372±0,004	0,385±0,008
3600	0,953±0,003	0,460±0,005	0,299±0,004	0,266±0,003
4320	0,866±0,020	0,393±0,006	0,244±0,003	0,239±0,007
5040	0,764±0,011	0,335±0,005	0,211±0,003	0,175±0,003
5760	0,701±0,007	0,292±0,004	0,175±0,004	0,145±0,003
6480	0,727±0,006	0,256±0,003	0,142±0,002	0,124±0,001
7200	0,675±0,006	0,236±0,007	0,126±0,002	0,103±0,001
7920	0,570±0,005	0,209±0,004	0,101±0,001	0,085±0,001
8640	0,616±0,009	0,179±0,002	0,091±0,002	0,071±0,001
9360	0,504±0,003	0,170±0,001	0,073±0,001	0,064±0,001
10080	0,481±0,002	0,143±0,001	0,063±0,001	0,054±0,001
10800	0,468±0,007	0,135±0,002	0,054±0,000	0,042±0,001
11520	0,445±0,002	0,115±0,001	0,046±0,001	0,036±0,000
12240	0,410±0,005	0,104±0,003	0,040±0,001	0,030±0,000
12960	0,387±0,004	0,095±0,002	0,034±0,001	0,027±0,001
13680	0,370±0,003	0,086±0,001	0,029±0,001	0,022±0,000
14400	0,385±0,005	0,076±0,001	0,025±0,001	0,018±0,000
15120	0,368±0,008	0,068±0,001	0,021±0,001	0,016±0,001
15840	0,323±0,003	0,064±0,001	0,019±0,001	0,013±0,000

^aDesvio padrão da triplicata; b.s.: umidade em base seca (kg kg^{-1}).

Tabela 4.4 - Cinéticas de secagem da polpa de jaca a velocidade de $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tempo (s)	^a Curvas de secagem experimentais (b.s.)			
	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C
0	4,714±0,000	4,714±0,000	4,714±0,000	4,714±0,000
120	4,758±0,023	3,093±0,037	3,231±0,022	3,082±0,042
240	2,286±0,016	2,774±0,014	2,055±0,011	1,935±0,012
720	2,942±0,019	1,686±0,023	1,494±0,016	1,349±0,026
1440	1,532±0,007	1,595±0,008	1,141±0,006	0,999±0,009
2160	1,340±0,012	1,059±0,012	0,911±0,007	0,780±0,006
2880	1,681±0,018	0,918±0,024	0,734±0,012	0,620±0,022
3600	1,042±0,015	0,834±0,008	0,624±0,005	0,518±0,006
4320	1,247±0,028	0,740±0,019	0,545±0,013	0,445±0,014
5040	0,867±0,013	0,645±0,010	0,532±0,006	0,425±0,006
5760	0,815±0,022	0,579±0,009	0,473±0,007	0,371±0,004
6480	0,801±0,009	0,529±0,006	0,386±0,003	0,302±0,000
7200	0,746±0,007	0,536±0,006	0,403±0,002	0,305±0,000
7920	0,664±0,003	0,493±0,008	0,317±0,002	0,239±0,003
8640	0,616±0,004	0,416±0,004	0,323±0,003	0,239±0,004
9360	0,684±0,007	0,447±0,006	0,263±0,003	0,193±0,005
10080	0,646±0,008	0,360±0,006	0,243±0,003	0,175±0,004
10800	0,524±0,009	0,378±0,005	0,221±0,003	0,157±0,002
11520	0,527±0,006	0,314±0,000	0,205±0,002	0,143±0,000
12240	0,468±0,004	0,296±0,007	0,193±0,002	0,132±0,002
12960	0,522±0,006	0,285±0,004	0,178±0,002	0,120±0,003
13680	0,476±0,005	0,268±0,001	0,161±0,001	0,106±0,001
14400	0,417±0,008	0,245±0,002	0,147±0,002	0,096±0,001
15120	0,416±0,010	0,230±0,003	0,147±0,002	0,094±0,000
15840	0,398±0,009	0,235±0,002	0,136±0,002	0,086±0,000

^aDesvio padrão da triplicata; b.s.: umidade em base seca (kg kg^{-1}).

Tabela 4.5 - Cinéticas de secagem das sementes de jaca a velocidade de 1,8 m·s⁻¹.

Tempo (s)	^a Curvas de secagem experimentais (b.s.)			
	40°C	50°C	60°C	70°C
0	2,846±0,000	2.846±0.000	2,846±0,000	2,846±0,000
120	2,195±0,023	1.970±0.017	2,205±0,016	1,582±0,026
240	1,498±0,011	1.688±0.028	1,419±0,017	1,717±0,009
720	1,094±0,012	0.997±0.009	1,177±0,009	0,876±0,011
1440	0,835±0,011	0.836±0.011	0,698±0,011	0,697±0,009
2160	0,666±0,009	0.558±0.007	0,550±0,004	0,456±0,005
2880	0,535±0,007	0.461±0.006	0,517±0,005	0,364±0,008
3600	0,452±0,002	0.397±0.004	0,370±0,003	0,303±0,002
4320	0,391±0,012	0.337±0.004	0,353±0,003	0,250±0,005
5040	0,374±0,007	0.282±0.004	0,269±0,003	0,203±0,003
5760	0,329±0,004	0.243±0.005	0,234±0,003	0,170±0,003
6480	0,268±0,004	0.212±0.001	0,208±0,003	0,155±0,001
7200	0,273±0,003	0.201±0.005	0,182±0,006	0,132±0,002
7920	0,215±0,002	0.176±0.003	0,156±0,002	0,105±0,001
8640	0,214±0,003	0.145±0.003	0,136±0,006	0,099±0,001
9360	0,174±0,005	0.144±0.002	0,130±0,002	0,077±0,003
10080	0,158±0,001	0.114±0.002	0,115±0,001	0,067±0,001
10800	0,142±0,003	0.112±0.002	0,094±0,001	0,059±0,001
11520	0,130±0,002	0.091±0.001	0,086±0,001	0,050±0,001
12240	0,120±0,002	0.081±0.001	0,074±0,001	0,042±0,001
12960	0,109±0,001	0.074±0.001	0,071±0,001	0,037±0,000
13680	0,098±0,000	0.066±0.001	0,062±0,001	0,032±0,000
14400	0,088±0,002	0.058±0.000	0,053±0,001	0,029±0,000
15120	0,086±0,001	0.052±0.002	0,048±0,001	0,025±0,000
15840	0,078±0,002	0.049±0.000	0,043±0,000	0,021±0,000

^a Desvio padrão da triplicata; b.s.: umidade em base seca (kg kg⁻¹).

As Tabelas 4.1 a 4.5 foram padronizadas apresentando os dados experimentais até o período de 4 horas e 40 minutos de secagem apesar das amostras atingirem peso constante com decorrer do tempo. Em todos os experimentos, as temperaturas de 60 e 70 °C forneceram as menores umidades nas secagens (b.s.) no transcorrer do tempo se comparadas às de 40 e 50 °C. Isto indica que em altas temperaturas ocorre a maior evaporação da água devido à maior transferência de calor do sistema para o produto. Também se observou que a influência da velocidade do ar foi mínima na secagem das cascas de jaca. Segundo Mujumdar (2006) e Strumillo et al. (2006), o processo pode ser classificado como adiabático já que toda

a energia aplicada (convectivamente do ar para o produto) chegou até os materiais evaporando a água contida em seu interior. À medida que a temperatura de secagem aumenta, maiores são os mecanismos difusivos atuando no interior da casca, polpa e sementes obtendo-se maior quantidade de sítios ativos na superfície de evaporação (RIZVI, 2005). Em função disto foi que ocorreu a diminuição da umidade de secagem nas temperaturas de 60 e 70 °C. Para a casca e polpa de jaca estes mecanismos difusivos foram favorecidos pela geometria, semelhante à placa plana, facilitando a distribuição homogênea do ar quente por toda área de secagem. É importante especificar que a umidade da casca e polpa de jaca foi de 80% aproximadamente podendo aumentar dependendo do grau de maturação, fazendo com que a cinética de secagem tenha valores próximos a produtos com composição química similar ou até as outras partes da jaca com alto conteúdo de celulose como o eixo central e o mesocarpo (QUIÉVY et al., 2010).

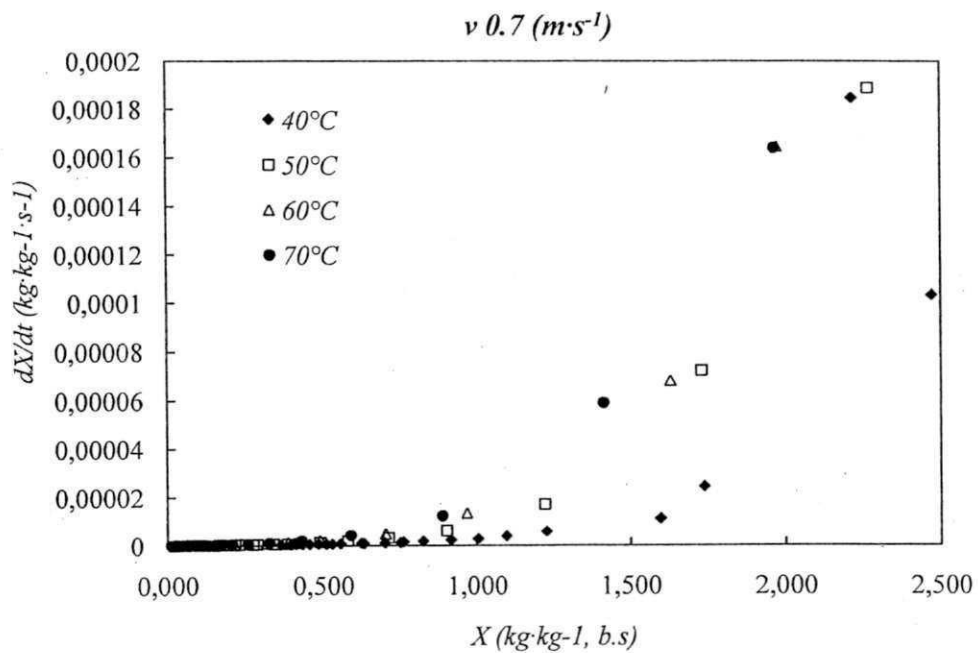
Nas sementes de jaca a umidade diminuiu até 0,021 kg·kg⁻¹ (b.s.) durante a secagem na velocidade de 1,8 m·s⁻¹ e 70 °C. Resultados similares foram obtidos por Dantas (2007) na faixa de temperatura de 40 - 80 °C para sementes de jaca.

4.4.2. Taxa de secagem

Nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 foram apresentadas as taxas de secagem em função da umidade da casca, polpa e sementes de jaca, respectivamente. Observou-se que todas as curvas denotaram ao período de baixa velocidade ou de taxa decrescente de secagem.

Keey (1975) explica a ausência da taxa constante devido à natureza da umidade pois mesmo tendo umidade superficial livre, a água encontra-se em suspensão dentro das células e em solução com açúcares e outras moléculas, isto é, ligada a outras substâncias.

Segundo Hall (1980), o período de taxa decrescente se inicia quando a migração interna da umidade passa a controlar o processo. Este período é natural em produtos com alto grau de maturação onde processos de desnaturação de açúcares e reações enzimáticas ocorrem. O fenômeno difusivo é o mais predominante neste período e a temperatura torna-se fundamental para poder transferir água contida no interior do alimento para o ambiente (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2007).



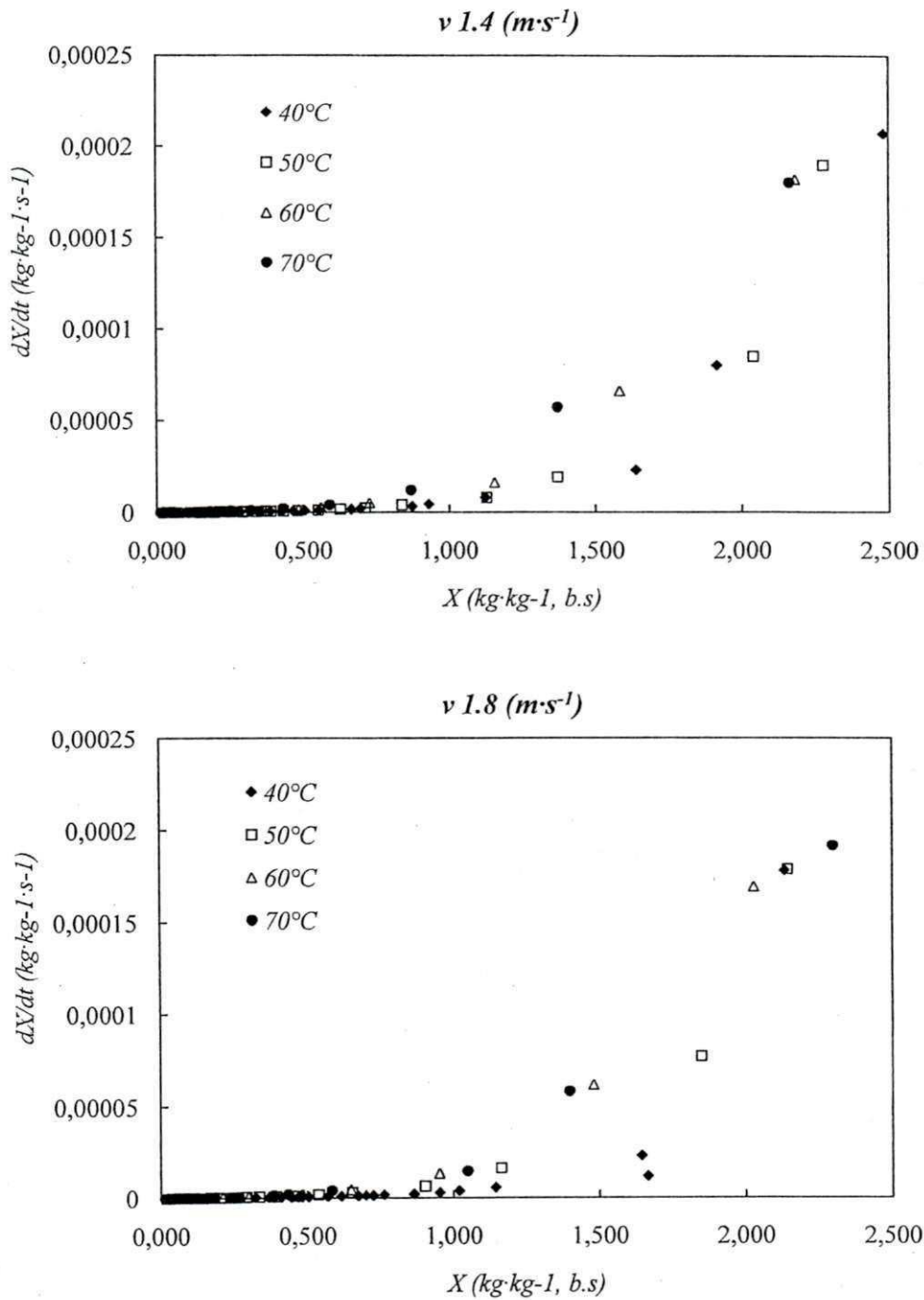


Figura 4.3 - Taxa de secagem decrescente das cascas de jaca nas velocidades de 0,7; 1,4 e $1,8 m \cdot s^{-1}$ e temperaturas de 40, 50, 60 e $70^{\circ}C$.

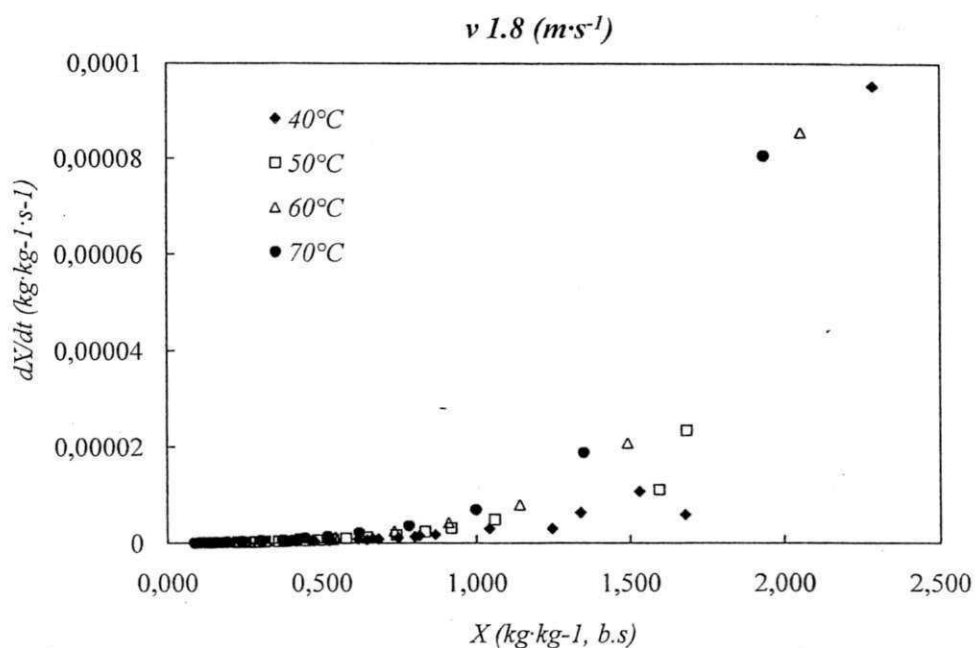


Figura 4.4 - Taxa de secagem decrescente da polpa de jaca na velocidade de $1,8 m \cdot s^{-1}$ e temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.

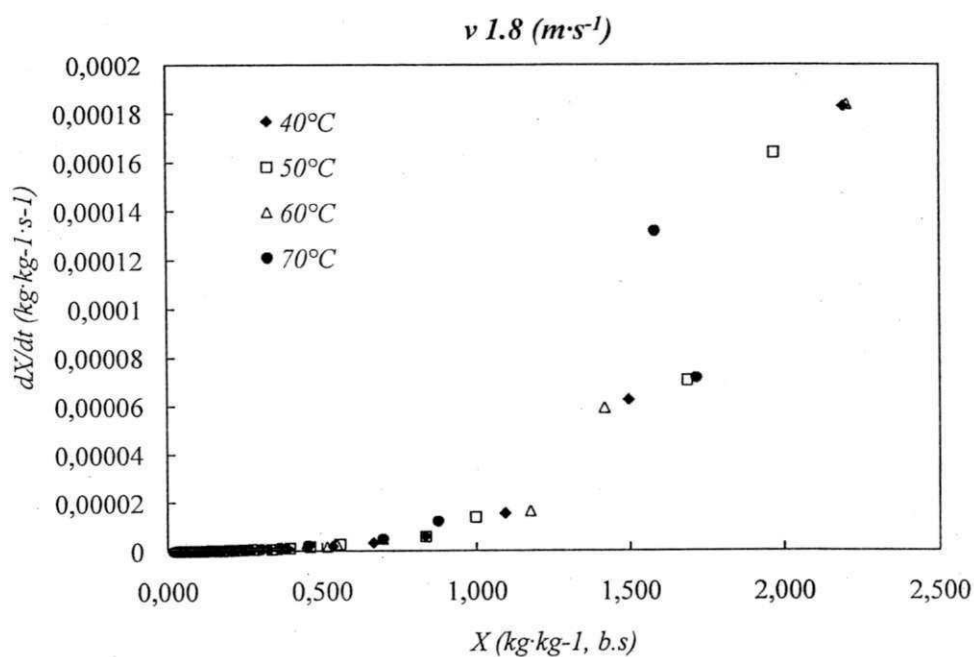


Figura 4.5 - Taxa de secagem decrescente das sementes de jaca na velocidade de $1,8 m \cdot s^{-1}$ e temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.

4.4.3. Modelagem matemática

Na modelagem da cinética de secagem da casca, polpa e sementes de jaca foram empregados os modelos de Page, Henderson-Pabis, Peleg e o modelo difusivo derivado da solução analítica da segunda lei de Fick para geometria de placa plana infinita e esfera. Os valores para cada temperatura, material e velocidade do ar encontram-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Dados experimentais empregados na modelagem das curvas de secagem da casca, polpa e sementes de jaca.

Material e Velocidade (m·s ⁻¹)	T (°C)	UR	a _w	X _e	X _i	L (×10 ⁻³)	W
Casca 0,7 m·s ⁻¹	40	11,80	0,118	4,53×10 ⁻³	3,587	5,0	79,08
	50	11,00	0,110	3,34×10 ⁻³	3,587	5,0	79,08
	60	11,00	0,110	2,72×10 ⁻³	3,587	5,0	79,08
	70	10,40	0,104	2,06×10 ⁻³	3,587	5,0	79,08
Casca 1,4 m·s ⁻¹	40	11,70	0,117	4,48×10 ⁻³	3,587	5,0	79,08
	50	10,80	0,108	3,27×10 ⁻³	3,587	5,0	79,08
	60	10,60	0,106	2,60×10 ⁻³	3,587	5,0	79,08
	70	10,00	0,100	1,97×10 ⁻³	3,587	5,0	79,08
Casca 1,8 m·s ⁻¹	40	11,90	0,119	4,57×10 ⁻³	3,587	5,0	79,08
	50	11,10	0,111	3,38×10 ⁻³	3,587	5,0	79,08
	60	10,00	0,100	2,42×10 ⁻³	3,587	5,0	79,08
	70	9,60	0,096	1,88×10 ⁻³	3,587	5,0	79,08
Polpa 1,8 m·s ⁻¹	40	46,60	0,466	9,28×10 ⁻²	4,714	5,0	82,51
	50	39,85	0,398	5,21×10 ⁻²	4,714	5,0	82,51
	60	27,30	0,273	2,35×10 ⁻²	4,714	5,0	82,51
	70	21,20	0,212	1,35×10 ⁻²	4,714	5,0	82,51
Sementes 1,8 m·s ⁻¹	40	22,20	0,222	4,16×10 ⁻²	2,846	20,5	74,90
	50	18,30	0,183	3,32×10 ⁻²	2,846	20,5	74,90
	60	13,12	0,131	2,44×10 ⁻²	2,846	20,5	74,90
	70	10,19	0,102	1,81×10 ⁻²	2,846	20,5	74,90

UR: umidade relativa (%), L: Meia espessura (casca e polpa) e raio da semente de jaca (m),
W: umidade inicial das amostras (g·100g⁻¹, b.s.), X_e: umidade de equilíbrio (kg·kg⁻¹, b.s.),
X_i: umidade inicial de secagem (kg·kg⁻¹, b.s.), a_w: atividade de água.

Nas Tabelas 4.7 e 4.8 são apresentados os parâmetros obtidos na modelagem das curvas de secagem da casca, polpa e sementes de jaca e sua avaliação estatística. Na análise das cinéticas pode-se observar que o parâmetro do modelo difusivo nas velocidades e temperaturas de estudo não apresentaram uma linearidade com o incremento da temperatura. Esta não linearidade pode ocorrer pelo fato das condições iniciais de contorno assumidas para o modelo difusivo, como por exemplo, tempo de inércia para que o produto atinja a mesma temperatura do secador não tenha sido respeitado (CRANK, 1975). A superfície externa da casca foi considerada semipermeável, o que dificultou a transferência de massa em uma direção, assumindo que a transferência é dada em ambas as faces do material, obtendo-se assim, resultados baixos da D_{ap} ($<9,151 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) que foram pouco comparáveis com a literatura. Estudos realizados por Chowdhury et al. (2011) com cascas de jaca mostraram que o modelo difusivo apresentou dificuldade na simulação dos dados experimentais na velocidade de $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e temperaturas de 50, 60 e 70 °C e o modelo de Page foi o que melhor representou as cinéticas de secagem.

Tabela 4.7 - Parâmetros estimados dos modelos de Peleg, Henderson-Pabis, Lewis e Difusivo.

Material e Velocidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Difusivo	Page		Henderson-Pabis		Peleg	
		D_{ap} ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	k	N	a	k	k_1	k_2
Casca $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	40	$6,679\times 10^{-9}$	0,048	0,400	0,846	$1,990\times 10^{-4}$	324,493	0,295
	50	$9,151\times 10^{-9}$	0,047	0,452	0,830	$3,830\times 10^{-4}$	152,096	0,278
	60	$4,313\times 10^{-9}$	0,039	0,500	0,816	$8,820\times 10^{-4}$	104,198	0,274
	70	$2,368\times 10^{-9}$	0,051	0,481	0,820	$6,240\times 10^{-4}$	97,996	0,273
Casca $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	40	$2,894\times 10^{-9}$	0,046	0,431	0,885	$2,070\times 10^{-4}$	204,284	0,286
	50	$6,096\times 10^{-9}$	0,044	0,446	0,862	$4,460\times 10^{-4}$	192,509	0,282
	60	$1,668\times 10^{-8}$	0,044	0,479	0,827	$1,168\times 10^{-3}$	131,729	0,274
	70	$6,732\times 10^{-9}$	0,058	0,466	0,821	$6,340\times 10^{-4}$	97,932	0,273
Casca $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	40	$2,894\times 10^{-9}$	0,055	0,390	0,885	$1,516\times 10^{-3}$	344,953	0,288
	50	$6,096\times 10^{-9}$	0,043	0,468	0,862	$1,227\times 10^{-3}$	124,284	0,279
	60	$1,668\times 10^{-8}$	0,050	0,475	0,827	$4,460\times 10^{-4}$	110,733	0,273
	70	$2,402\times 10^{-8}$	0,038	0,511	0,819	$2,070\times 10^{-4}$	108,099	0,272
Polpa $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	40	$5,949\times 10^{-9}$	0,056	0,456	0,823	$5,500\times 10^{-4}$	102,761	0,210
	50	$6,098\times 10^{-9}$	0,062	0,426	0,823	$5,640\times 10^{-4}$	119,077	0,212
	60	$3,660\times 10^{-9}$	0,051	0,428	0,836	$3,200\times 10^{-4}$	130,125	0,218
	70	$2,736\times 10^{-9}$	0,081	0,355	0,839	$3,310\times 10^{-4}$	213,073	0,221
Sementes $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	40	$8,864\times 10^{-8}$	0,026	0,553	0,620	$2,015\times 10^{-3}$	185,258	0,342
	50	$3,306\times 10^{-8}$	0,019	0,570	0,642	$5,480\times 10^{-4}$	230,675	0,343
	60	$5,063\times 10^{-8}$	0,024	0,539	0,622	$9,870\times 10^{-4}$	230,632	0,343
	70	$3,077\times 10^{-8}$	0,035	0,481	0,636	$4,700\times 10^{-4}$	263,012	0,346

k_1 e k_2 : constantes do modelo de Peleg (s^{-1}), a e k : constantes do modelo de Henderson-Pabis (adimensional, s^{-1} , respectivamente), k e N : constante do modelo de Page (s^{-1} , adimensional, respectivamente), D_{ap} : difusividade aparente ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$).

Foram encontrados valores de $R^2 \geq 0,911$ devido à queda no conteúdo de umidade (b.s.) nos primeiros tempos do processo de secagem restringindo o comportamento dos resultados na modelagem. As constantes de velocidade de secagem para os três modelos empíricos mostraram linearidade com o incremento da temperatura para todas as velocidades do ar.

Tabela 4.8 - Avaliação estatística dos modelos de Peleg, Henderson-Pabis, Lewis e Difusivo.

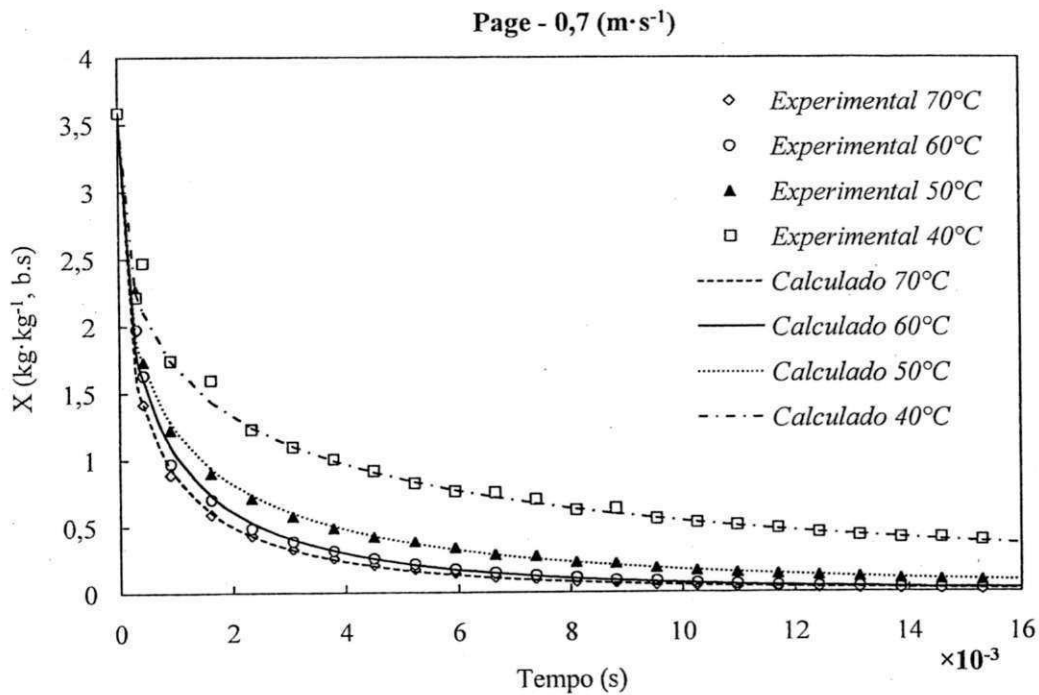
Material e Velocidade e ($m \cdot s^{-1}$)	T ($^{\circ}C$)	Difusivo		Page		Henderson-Pabis		Peleg	
		R^2	$MRE(\%)$	R^2	$MRE(\%)$	R^2	$MRE(\%)$	R^2	$MRE(\%)$
Casca $0,7 m \cdot s^{-1}$	40	0,942	25,48	0,996	15,90	0,931	9,96	0,988	6,78
	50	0,941	25,95	0,998	7,34	0,933	38,92	0,997	12,02
	60	0,971	44,29	0,996	3,48	0,970	36,97	0,999	10,84
	70	0,942	87,04	0,995	2,56	0,938	115,80	0,999	8,70
Casca $1,4 m \cdot s^{-1}$	40	0,928	70,98	0,995	2,90	0,911	35,96	0,995	10,31
	50	0,959	25,04	0,999	3,15	0,960	51,72	0,997	9,95
	60	0,965	53,42	0,996	5,59	0,981	76,57	0,997	7,80
	70	0,943	85,25	0,991	20,24	0,940	114,22	0,996	9,73
Casca $1,8 m \cdot s^{-1}$	40	0,940	19,25	0,981	4,82	0,926	21,63	0,980	6,73
	50	0,947	63,39	0,998	3,88	0,945	97,35	0,999	18,31
	60	0,962	91,97	0,997	11,00	0,980	127,57	0,998	5,92
	70	0,972	80,39	0,991	10,83	0,985	101,57	0,995	9,94
Polpa $1,8 m \cdot s^{-1}$	40	0,943	37,98	0,989	17,47	0,939	35,04	0,992	9,17
	50	0,952	31,56	0,987	5,84	0,948	23,55	0,991	9,14
	60	0,943	27,92	0,993	6,03	0,934	22,42	0,997	10,73
	70	0,915	27,98	0,929	8,79	0,903	12,88	0,958	10,74
Sementes $1,8 m \cdot s^{-1}$	40	0,966	79,18	0,995	33,27	0,968	47,93	0,996	5,89
	50	0,980	98,72	0,990	10,75	0,969	129,22	0,993	6,25
	60	0,980	61,96	0,989	9,57	0,982	80,50	0,993	6,39
	70	0,977	49,39	0,989	5,24	0,962	85,97	0,993	8,07

Segundo Quiévy et al. (2010) e Pérez e Mazeau (2005) produtos com alto conteúdo de celulose ou material lignocelulósico podem interferir na transferência de massa no processo de secagem, por efeitos da deformação estrutural da celulose, evitando que a água livre no interior dos alimentos transite para a superfície do material afetando diretamente o equilíbrio termodinâmico do sistema. Por esta razão e através da estatística obtida no modelo difusivo, concluiu-se que o modelo não é útil para representar a fenomenologia do processo de secagem dos componentes da jaca impossibilitando encontrar uma relação tipo Arrhenius para difusividade da água nas temperaturas de estudo.

Na análise das curvas de secagem da casca de jaca, o modelo de Page foi que melhor representou o efeito da temperatura no aumento da evaporação da água obtendo os melhores resultados na avaliação estatística ($R^2 > 0,981$, $MRE(\%) < 20,24$). Este modelo é muito aplicado

a produtos onde existe uma estreita relação entre a composição centesimal do produto com o estado de maturação (SIMAL et al., 1996), portanto, sua ampla especificidade torna-o um importante modelo para representar a cinética de secagem da casca de jaca (KAR et al., 2008) e possivelmente para os demais resíduos da fruta como mesocarpo e eixo central.

Na Figura 4.6 encontram-se as cinéticas de secagem experimentais e calculadas empregando o modelo de Page para as cascas de jaca nas velocidades de 0,7, 1,4 e 1,8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, e temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C.



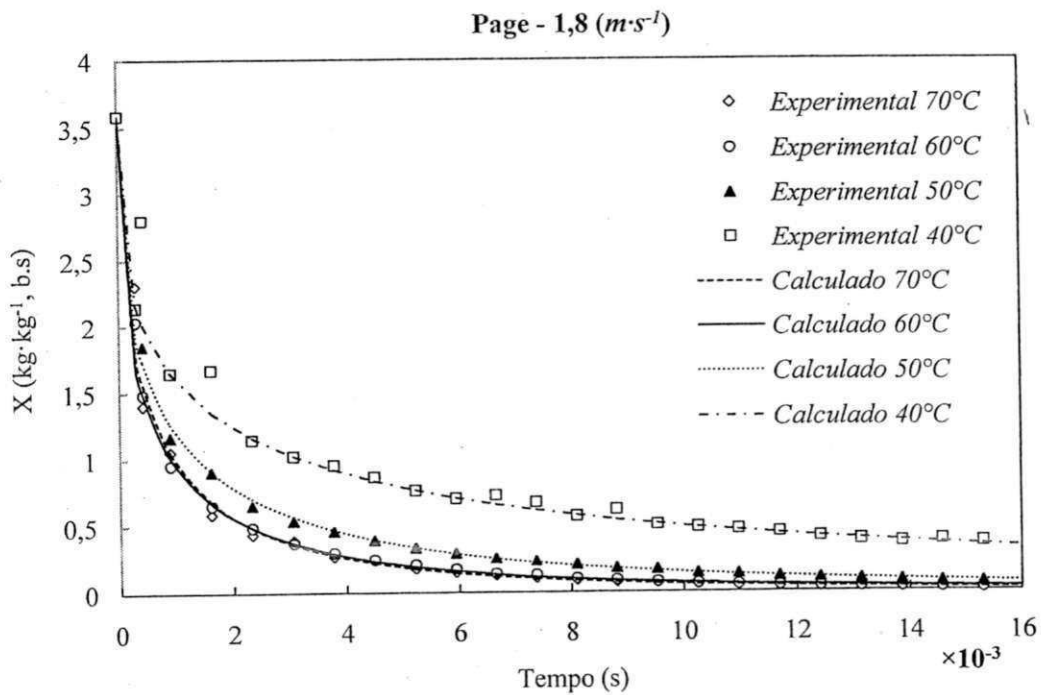
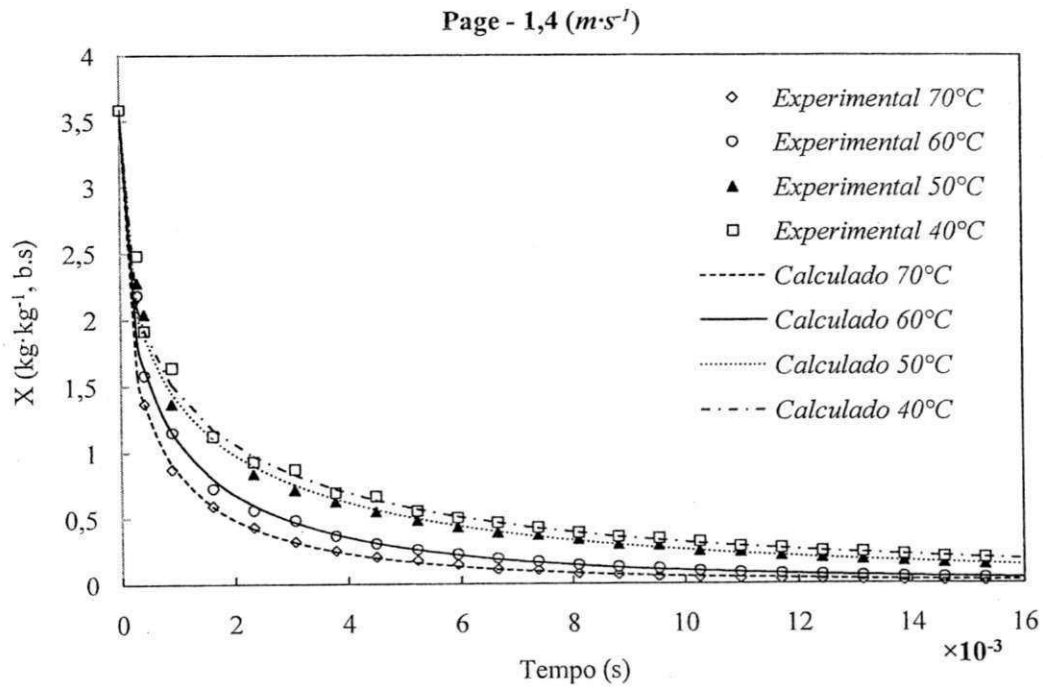


Figura 4.6 - Modelagem das curvas de secagem das cascas de jaca empregando o modelo de Page às diferentes velocidades do ar e temperaturas.

Para a polpa e sementes de jaca o modelo de Peleg foi o que melhor se ajustou as cinéticas de secagem obtendo como resultados estatísticos valores de $R^2 > 0,958$, $MRE(\%) < 10,74$ e $R^2 > 0,993$, $MRE(\%) < 8,07$ respectivamente. Nas Figuras 4.7 e 4.8 observam-se os resultados da simulação empregando o modelo de Peleg.

Estudos realizados por Giraldo-Zuñiga et al. (2006) e Dantas (2007) mostraram que tanto o modelo difusivo como o modelo de Peleg representaram com sucesso os dados experimentais das cinéticas de secagem da polpa e sementes de jaca. Estes resultados foram próximos aos mostrados no presente estudo. Além disso, estes autores relataram que o processo de secagem da jaca foi influenciado pela umidade relativa do ar de secagem, sendo que em temperaturas mais baixas, o processo levou mais tempo. Este comportamento também foi observado nas Figuras 4.7 e 4.8.

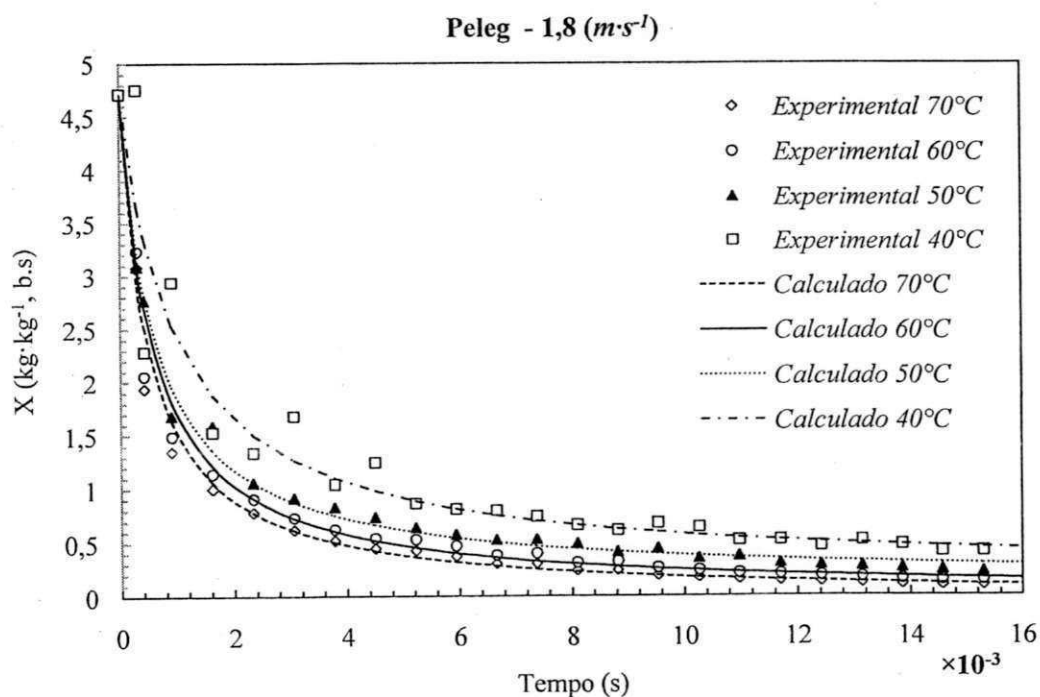


Figura 4.7 - Modelagem das curvas de secagem da polpa de jaca empregando o modelo de Peleg.

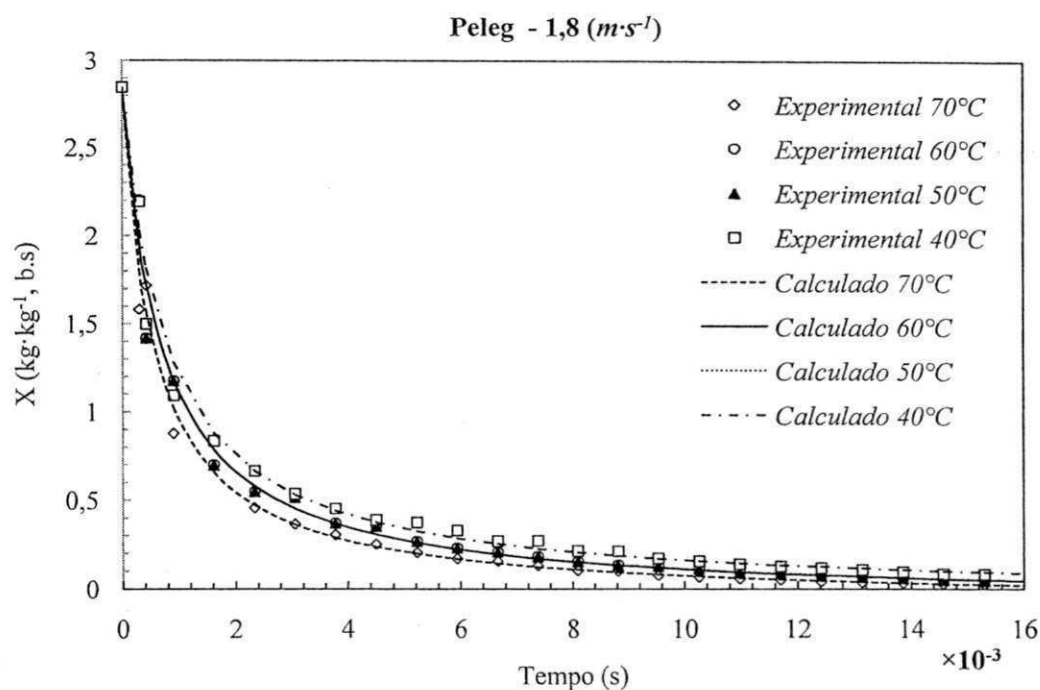


Figura 4.8 - Modelagem das curvas de secagem das sementes de jaca empregando o modelo de Peleg.

Os parâmetros obtidos dos modelos de Page, Henderson-Pabis e Peleg para polpa e semente de jaca apresentaram valores similares aos encontrados para produtos como: polpa de banana (KARIM; HAWLADER, 2005) e sementes de uva (ROBERTS et al., 2008).

4.5. Conclusões

- ☒ As curvas de secagem da casca, polpa e sementes de jaca apresentaram apenas o período de taxa decrescente para todas as temperaturas e velocidades do ar experimentais, indicando que o principal mecanismo de migração da água do interior para a superfície do produto é a difusão. É necessário aprofundar no estudo termodinâmico para descrever de forma mais precisa o mecanismo difusivo que ocorre neste período.
- ☒ O modelo de Page foi o que melhor descreveu o comportamento da cinética de secagem das cascas de jaca. Já para a polpa e as sementes, o modelo de Peleg foi o que melhor

representou os dados experimentais. Estes modelos poderão no futuro possibilitar novos estudos aplicados aos demais resíduos da jaca (mesocarpo e eixo central).

- ▣ A velocidade do ar de secagem não influenciou na perda de umidade durante a desidratação das cascas de jaca. Já as curvas de secagem mostraram a influência da temperatura em todos os experimentos.

4.6. Referências

AOAC - Association of Official Analytical Chemists International, Moisture and volatile matter in oils and fats: vacuum oven method. **Official Methods of Analysis** 16th ed. Gaithersburg: AOAC., p. 1-5, 1997.

ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. ASAE Standards D 271.2. St. Joseph: ASAE, p. 24-31, 1998.

BABALIS, S. J., VELESSIOTIS, V. G. Influence conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 65, p. 449-458, 2004.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; FONTANA-JR, A. J.; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. **Water activity in foods: fundamentals and applications**. Ames: Blackwell Publishing Professional, 438 p., 2007.

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

- CARLESSO, V. O.; BERBERI, P. A.; DA SILVA, R. F.; VIANNA, A. P.; DETMANN, E.; DIONELLO, R. G. Secagem de sementes de maracujá em camada delgada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 444-448, 2005.
- CASTELL-PALOU, A.; VÁQUIRO, H. A.; CÁRCEL, J. A.; ROSSELLÓ, C.; FEMENIA, A.; SIMAL, S.: Mathematical modeling of moisture distribution and kinetics in cheese drying. **Drying Technology**, Singapore, v. 30, p. 1247-1255, 2012.
- CHOWDHURY, M.M.I.; BALA, B.K.; HAQUE, M.A. Mathematical modeling of thin-layer drying of jackfruit leather. **Journal of Food Process and Preservation**, Maryland, 35, p. 797-805, 2011.
- CRANK, J., **The mathematics of diffusion**, Pergamon Press, Oxford, 1975.
- DANDAMRONGRAK, R.; YOUNG, G.; MASON, R. Evaluation of various pre-treatments for the dehydration of banana and selection of suitable drying models. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 55, n. 2, p. 139-146, 2002.
- DANTAS, H. J. **Secagem solar e convectiva de amêndoas de jaca**. Dissertação de Mestrado, curso de pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, 143p., 2007.
- GIRALDO-ZUÑIGA, A. D.; ARÉVALO-PINEDO, A.; SILVA, F.; SILVA, P. F.; VALDES-SERRA.; PAVLAK, M. C. M. Datos experimentales de la cinética de secado y del modelamiento matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) em rodajas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 30, p. 179-182, 2010.
- GIRALDO-ZUÑIGA, A. D.; ARÉVALO-PINEDO, A.; RODRIGUES, R. M.; LIMA, C. S. S.; FEITOSA, A. C. Kinetic drying experimental and mathematical model for jackfruit

- (*Artocarpus integrifolia*) slices. **Ciencia y Tecnologia de Alimentaria**, Ciudad de México, v. 5, p. 89-92, 2006.
- HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI Publishing Company, 556 p., 1980.
- KAR, S.; CHEN, X. D.; ADHIKARI, B. P.; LIN, S. X. Q. The impact of various drying kinetics models on the prediction of sample temperature-time and moisture content-time profiles during moisture removal from stratum corneum. **Chemical Engineering Research and Design**, London, v. 86, p. 1-17, 2008.
- KARIM, M. A.; HAWLADER, M. N. A. Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Chicago, v. 48, p. 4914-4945, 2005.
- KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. Oxford: Pergamon Press, 150 p., 1975.
- MARTINS, P. C.; PORTO, P. S. S.; PINTO, L. A. A. Estudo das propriedades físicas e de transporte na secagem de cebola (*Allium cepa* L.) em camada delgada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 24, n. 3, p. 319-326, 2004.
- MOTEVALI, A.; ABBASZADEH, A.; MINAEI, S.; KHOSHTAGHAZA, M. H.; GHOBADIAN, B. Effective moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in thin-layer drying of jujube (*Zizyphus jujube* Mill). **Journal of Agriculture Science and Technology**, Tehran, v, p. 523-532, 2012.
- MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3 ed. Boca Raton, USA: CRC Press, 1312 p., 2006.

PÉREZ, M.; MAZEAU, K. **Conformations, structures and morphologies of celluloses.**

Capítulo 2. En: Polysaccharides: structural diversity and functional versatility.

DUMITAIU, S. (ed). New York: Marcel Dekker, 1233 p., 2005.

PRACHAYAWAKORN, S.; SOPONRONNARIT, S.; WETCHACAMA, S.; JAISUT, D.:

Desorption isotherms and drying characteristics of shrimp in superheated steam and hot air. **Drying Technology**, Singapore, v. 20, p. 669-684, 2002.

QUIÉVY, N.; JACQUET, N.; SCLAVONS, M.; DEROANNE, C.; PAQUOT, M.;

DEVAUX, J.: Influence of homogenization and drying on the thermal stability of microfibrillated cellulose. **Polymer and Degradation Stability**, Brighton, v. 95, p. 306-314, 2010.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI,

S. S. H.; DATTA A. K.: **Engineering properties of foods**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 340 p., 2005.

ROBERTS, J. S.; KIDD, D. R.; PADILLA-ZAKOUR, O. Drying kinetics of grape seeds.

Journal of Food Engineering, Davis, v. 89, p. 460-465, 2008.

SARAVACOS, G. D., MAROULIS, Z. B. **Transport properties of foods**. New York, USA:

Marcel Dekker, 432 p., 2001.

SENADEERA, W.; BHANDARI, B. R.; YOUNG, G.; WIJESINGHE, B. Influence of shapes

of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 58, p. 277-283, 2003.

SHESKIN, D. **Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures**. 3. ed.

Boca Raton: Taylor & Francis, 79 p., 2004.

SIMAL, S.; MULET, A.; TARRAZO, J.; ROSELLO, C. Drying models for green peas. **Food Chemistry**, Reading, v. 55, p. 121-128, 1996.

STRUMILLO, C.; JONES, P. L.; ZYLLA, R. Energy aspects in drying. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 120 p., 2006.

SUHERMAN, B.F.; SATRIADI, H.; YUARISKI, O.; NUGROHO, R.S.; SHOBIB, A. Thin layer drying kinetics of roselle. **Advance Journal of Food Science and Technology**, London, v4, p. 51-55, 2012.

TOGRUL, I.T., PEHLIVAN, D. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. **Journal of Food Engineering**, Davis, v.65, p.413-425, 2004.

Capítulo 5

Elaboração de produtos alimentícios da polpa e resíduos de jaca

5.1.1. Resumo

Atualmente no Brasil existe cerca de 10 milhões de pessoas que sofrem de deficiências nutricionais causadas pela dieta pobre em vitaminas e minerais. Devido a isto, o governo brasileiro através de seus órgãos institucionais desenvolveu programas para facilitar uma melhor renda às famílias vulneráveis e, por conseguinte, proporcionar uma alimentação mais balanceada. Com este trabalho objetivou-se desenvolver duas farinhas a base de polpa, mesocarpo, eixo central e sementes de jaca e polpa desidratada de jaca, proporcionando alternativas econômicas e nutricionais às regiões de cultivo desta fruta como Norte e Nordeste do Brasil. Foi desenvolvido um formulador com a ferramenta de informática Excel para desenhar duas farinhas que podem ser usadas como complemento alimentício conforme as normas da ANVISA. As matérias primas in natura foram analisadas quimicamente. A secagem dos materiais foi a 50 °C e 1,8 m.s⁻¹ a fim de evitar a perda de nutrientes durante o processo. Análises físico-químicas, sensoriais e microbiológicas foram realizadas para caracterizar os produtos finais. Foi encontrado que a farinha 1, adicionada com polpa de jaca, apresentou melhores resultados no conteúdo nutricional e a polpa desidratada de jaca (jaca-passa) teve uma boa avaliação nutricional e sensorial. Os produtos podem ser aperfeiçoados e divulgados à população brasileira, sendo suas principais características o alto aporte nutricional, o baixo custo operacional e o requerimento mínimo de equipamentos.

Palavras-chave: *caracterização de alimentos; formulação; operações unitárias; nutrição; segurança alimentar.*

5.1.2. Abstract

Currently in Brazil around of 10 million people suffer nutritional deficiencies caused by the low consumption with vitamins and minerals. For this reason, the Brazilian government through its institutional organs develops programs to facilitate a more balanced nutrition and access to food for the most vulnerable households. The aim of this study was to develop two products based from the dehydrated materials of jackfruit: pulp, mesocarp, peduncle and seed, providing nutritional and economic alternatives in the regions from North and Northeast of Brazil, where is mostly cultivated. For this, a formulator (Excel, 2012) for two dietary supplement products were designed and developed according to the ANVISA norm. The raw materials were chemically analyzed in natura, dried and milled. The drying temperature of the materials was 50 °C ($1,8 \text{ m.s}^{-1}$) in order to avoid loss of nutrients during the process. Physical-chemical, microbiological and sensory analyses were performed to characterize the final products. The product 1, added with pulp of jackfruit showed better results in nutritional content, with a good nutritional and sensory evaluation. The dried pulp showed similar results to the product 1. The both products can be improved and disseminated for the population, being the benefits: a high nutritional composition, low operating cost and minimum requirement of equipment for the preparing.

Keywords: *food characterization; formulation; unit operations; nutrition; food security.*

5.2. Introdução

Pesquisas são realizadas para obter informações necessárias à formulação de complementos alimentícios que atendam as exigências nutricionais conforme as normas vigentes no Brasil. Um alimento balanceado possibilita a máxima resposta na absorção de nutrientes e a falta de informação sobre as necessidades nutricionais e o valor nutritivo das matérias primas são os pontos críticos na hora de elaborar este tipo de produto (PESCHEL et al., 2006).

A substituição de alimentos protéicos de origem animal pelos de origem vegetal vem sendo realizada na tentativa de utilizar novas fontes alimentares com boas propriedades tecnológicas e nutritivas (NUNES et al., 2003). Uma dessas novas fontes é o gênero *Artocarpus*. Pesquisas realizadas por Japtap e Bapat (2010) classificaram a jaca como alimento nutracêutico, ou seja, como tratamento tônico para o controle da cirrose hepática, hipertensão e diabetes. Outras partes da jaca como sementes e cascas são usadas no tratamento da malária e no controle da inflamação e contracepção feminina, respectivamente. Em outro estudo, Japtap et al. (2010) concluíram que a polpa de jaca é uma fonte natural de antioxidantes contendo compostos fenólicos e flavonóides.

Baliga et al. (2011) revisaram as propriedades fitoquímicas, nutricionais e farmacológicas das cascas, raízes, folhas e frutos de *Artocarpus heterophyllus* usados em sistemas tradicionais e na medicina caseira. Estudos pré-clínicos demonstraram que a jaca possui propriedades antioxidante, anti-inflamatória, antibacteriana, anticariogênica, antifúngica, antineoplásica, hipoglicemiante, etc.

A extração de antioxidantes e micronutrientes de alimentos naturais com alto impacto na saúde tem pesquisas a nível mundial levadas na área de processamento de alimentos. A maior atenção tem sido dada à administração oral na forma de suplementos alimentares como

o extrato de chá verde (BUETLER et al., 2002) ou preservação de alimentos obtidos a partir de aditivos aromáticos de plantas como extratos de alecrim e sálvia (ZUPKO et al., 2001; KARPINSKA et al., 2000). A jaca nesta área é muito usada na extração de látex e óleo (JAPTAP; BAPAT, 2010). Seus compostos de aroma foram pesquisados por vários autores fornecendo informações para as indústrias de alimento, cosmético e perfume (BICAS et al., 2011; ONG et al., 2008; MAIA et al., 2004).

Clerici e Carvalho-Silva (2011) estudaram compostos nutricionais bioativos de várias frutas nativas e exóticas do Brasil e a jaca apresentou alto valor nutritivo em macro e micronutrientes. Produtos elaborados a partir de frutas devem conter todos os nutrientes em quantidade adequada e estar altamente biodisponíveis evitando-se substâncias e compostos que interfiram na absorção e utilização adequada destes nutrientes no produto final (ROSADO et al., 1999). A proteção dos nutrientes e o controle da oxidação são preocupações comuns nestes tipos de alimentos.

A secagem é uma prática comum e industrialmente econômica para a produção de uma grande variedade de produtos alimentícios obtendo 60 a 90% de eficiência energética, com altas taxas de produção e baixo custo operacional. Para alguns produtos existe um processo de secagem definido que são controlados por fatores como temperatura e tempo de exposição (PUA et al., 2010; PUA et al., 2007; GEANKOPLIS, 1998) responsáveis pela qualidade nutricional.

A utilização da polpa e resíduos de jaca apresenta um potencial socioeconômico e alimentício a ser explorado e diante disto estudou-se a elaboração de produtos alimentícios com os componentes desta fruta através da secagem convectiva.

5.3. Material e Métodos

5.3.1. Material

Jacas maduras (*Artocarpus heterophyllus*) variedade “mole” foram adquiridas na Central de Abastecimento - CEASA de São José do Rio Preto - SP e levadas ao laboratório de medidas físicas do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos da UNESP na mesma cidade. Após seleção e higienização (imersas em água clorada a 200 ppm por 15 minutos) as jacas foram cortadas e suas partes separadas em polpa, casca, eixo central, mesocarpo e sementes e armazenadas em sacolas de polipropileno mantidas em refrigeração (17 °C) até o início dos trabalhos.

5.3.2. Análise físico-química da polpa e resíduos de jaca in natura

Polpa e resíduos (casca, eixo central, mesocarpo e sementes) in natura foram caracterizados físico-quimicamente de acordo com os métodos de análises do IAL (2008) e da AOAC (1997) no Centro de Pesquisa em Ciência- CEPECI da Fundação Educacional do Município de Assis (FEMA) - “Campus José Santilli Sobrinho”, Assis - SP conforme mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Métodos para análise físico-química da polpa e resíduos de jaca.

Análise	Referência do Método	Método	Técnica
Umidade	AOAC 926.12	Secagem em estufa a vácuo	Determinação gravimétrica da água contida por diferença de peso
Proteína	AOAC 920.152 e 955.04c	Micro-Kjeldahl	Desnaturação do material orgânico e determinação titulométrica (meio ácido) empregando o Fator F = 6.25
Fibra alimentar total	IAL 045 / IV	Enzimático-gravimétrico	Extração da gordura, hidrólise do material desengordurado e determinação por diferença de peso
Cinza	AOAC 900.02	Incineração por mufla	Determinação gravimétrica por diferença de peso
Lipídeos	AOAC 945.16 e 963.15	Método de Soxhlet	Determinação gravimétrica do estrato etéreo seco por diferença de peso
Carboidratos totais	IAL 040 / IV	Gravimétrico	Extração da gordura, precipitação em solução alcalina e cálculo por diferença de peso
Sódio	IAL 382 / IV	Titulometria	Determinação por titulação da solução e cálculo indireto pela viragem de cor
Calorias	-----	Indireto	Determinação através de fórmula, empregando os dados obtidos de lipídeos, umidade, carboidratos e fibras.

IAL, 2008; AOAC, 1997.

5.3.3. Elaboração de produtos alimentícios da polpa e resíduos de jaca

A elaboração dos produtos foi baseada na Portaria 29 (1998) sobre alimentos para fins específicos e na Resolução 272 (2005) sobre frutas secas ou dessecadas da Agência Nacional de Vigilância Sanitária- ANVISA.

5.3.3.1. Elaboração das farinhas de jaca

Com exceção das cascas, os demais componentes da jaca foram secos e transformados em pós. Para isto, as polpas foram cortadas e abertas longitudinalmente retirando-se as sementes de seu interior, as quais tiveram suas películas retiradas manualmente. O eixo central foi cortado em rodela e o mesocarpo distribuído em camadas, ambos apresentando 0,5 cm de espessura. Cada material disposto em bandejas de inox de $25 \times 25 \text{ cm}^2$ foram secos separadamente em secador de convecção forçada de ar quente com velocidade de $1,8 \text{ m.s}^{-1}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 48 horas. Após a secagem, foram moídos em moinho de rotor vertical com facas móveis e fixas (modelo MA-340, Marconi, São Paulo - Brasil). O tamanho da partícula de todos os produtos em pó foi na faixa de 100-500 μm .

Para a produção das farinhas, a ferramenta de informática Excel 2012 (Microsoft, Massachusetts, USA) foi utilizada para desenvolver um formulador capaz de informar a quantidade de pó necessária de cada material conforme sua proporção na mistura e também estimar o valor nutricional das farinhas a partir dos dados das análises mencionadas no item 5.3.2 sobre a composição centesimal de cada componente da jaca in natura.

A proporção utilizada de cada pó foi aleatória e seu peso calculado pelo formulador contabilizou uma quantidade final de 500 gramas de cada farinha, conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Formulação das farinhas elaboradas com polpa e resíduos de jaca.

Matéria prima (pó)	Farinha 1		Farinha 2	
	Porcentagem na formulação	*Peso matéria prima (g)	Porcentagem na formulação	*Peso matéria prima (g)
Polpa	48,78	243,90	0,00	0,00
Mesocarpo	19,51	97,56	43,48	217,39
Eixo	7,32	36,59	13,042	65,22
Semente	24,39	121,95	43,478	217,39

* Cálculo para 500 g de produto final.

Estabelecidas as quantidades, procedeu-se com as pesagens em balança digital de 2 kg (modelo BG2000, Gehaka, São Paulo - Brasil).

Os pós foram misturados em panela e levados ao fogo (120 °C) por 5 minutos. Após a cocção, foi feito o empacotamento em sacolas laminadas, seladas a vácuo (0,6 bar) e armazenadas em câmara a 25 °C e umidade relativa de 50-60%. A ilustração da elaboração das farinhas de polpa e resíduos de jaca encontra-se na Figura 5.1.

A estimativa do valor nutricional das farinhas formuladas a partir da polpa e resíduos de jaca em pó calculada pelo Excel levou em consideração perda de 10% dos nutrientes durante o processo de secagem e cocção.

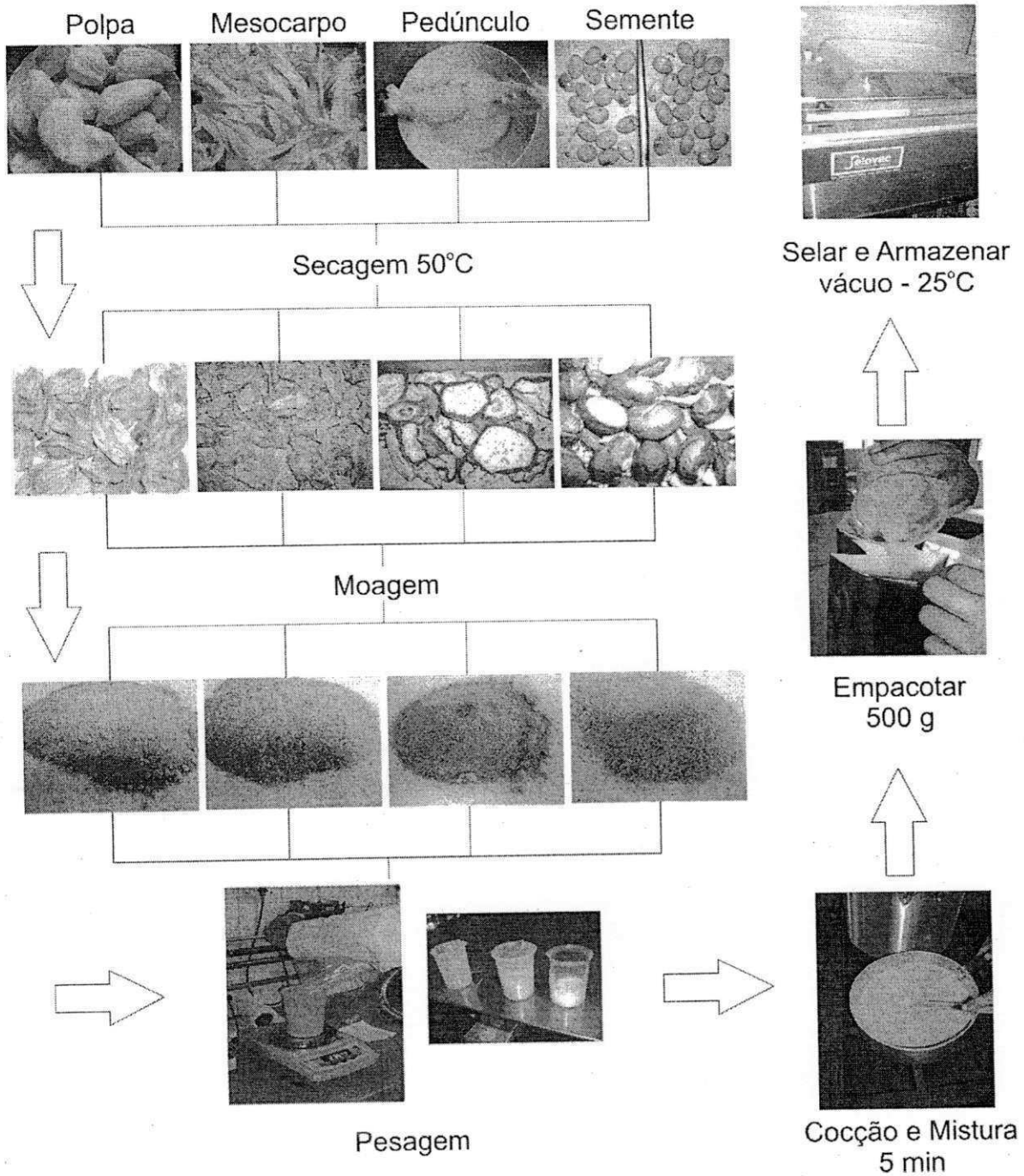


Figura 5.1. Formulação das farinhas elaboradas com polpa e resíduos de jaca em pó.

5.3.3.2. Elaboração da polpa desidratada de jaca

As polpas de jaca foram cortadas na base para retirada das sementes, dispostas em bandejas de inox de $25 \times 25 \text{ cm}^2$ e secas a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ por convecção forçada de ar quente ($1,8 \text{ m.s}^{-1}$) por 24 horas. Após, foram empacotadas em sacolas de polipropileno de alta densidade, seladas a vácuo (0,6 bar) e armazenadas em câmara a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa de 50-60%. A ilustração da elaboração da polpa desidratada de jaca encontra-se na Figura 5.2.

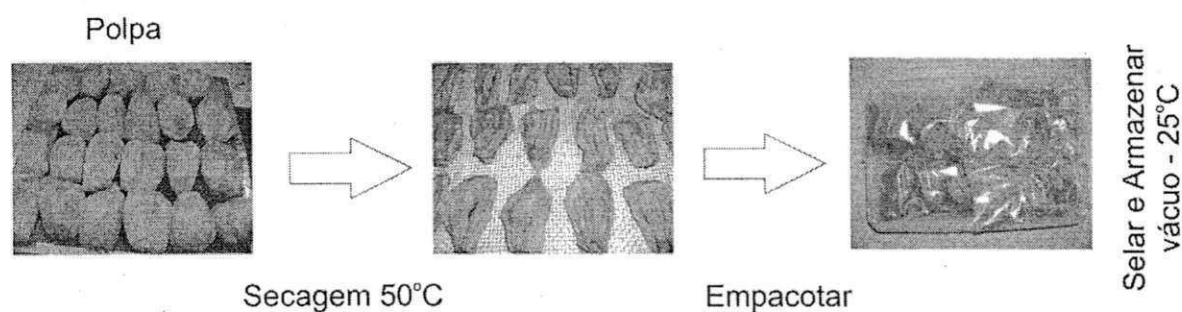


Figura 5.2. Elaboração da polpa desidratada de jaca.

5.3.4. Análise físico-química, sensorial e microbiológica dos produtos alimentícios da polpa e resíduos de jaca

As análises das farinhas e da polpa desidratada foram realizadas no Centro de Pesquisa em Ciência - CEPECI da Fundação Educacional do Município de Assis (FEMA) - "Campus José Santilli Sobrinho" Assis - SP. O modelo de informação nutricional foi baseado na resolução RDC- nº 359 e 360 de 23/12/2003 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde, a caracterização físico-química de acordo com os métodos do IAL (2008) e da AOAC (1997), a análise sensorial através de provadores treinados e realizado o Teste Afetivo de Preferência (escala: ordenação-preferência) como recomenda o Instituto Adolfo Lutz e os padrões da análise microbiológica foi conforme Resolução RDC 12 de 02/01/2001 da ANVISA para frutas, produtos de frutas, farinhas e similares.

5.4. Resultados e Discussão

5.4.1. Análise físico-química da polpa e resíduos de jaca in natura

Os resultados das análises físico-químicas dos componentes da jaca in natura (polpa, eixo central, mesocarpo, casca e sementes) encontram-se na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Composição centesimal da polpa e resíduos de jaca in natura.

Análise	Unidade	Material				
		Polpa	Eixo	Mesocarpo	Casca	Sementes
Carboidratos totais	g 100g ⁻¹	11,09	0,81	0	2,64	0
Fibra alimentar	g 100g ⁻¹	3,71	8,59	7,75	12,53	7,40
Gordura	g 100g ⁻¹	0	0,70	3,70	0,79	0,53
Gordura saturada	g 100g ⁻¹	0	0	1,20	0	0
Proteína	g 100g ⁻¹	1,81	1,54	5,29	2,71	15,51
Sódio (Na)	mg kg ⁻¹	72,73	199,62	199,78	199,66	99,81
Calorias	kcal kg ⁻¹	51,60	15,70	54,46	28,51	66,81
Umidade	g 100g ⁻¹	82,51	86,21	84,36	79,08	74,90
Cinza	g 100g ⁻¹	0,88	2,15	2,70	2,25	3,38

Os resultados obtidos são similares aos valores encontrados por Oliveira (2009); Goswami (2011) e AFISJ (2011). Para polpa de jaca in natura, os autores Clerici e Carvalho-Silva (2011) citaram valores na ordem de 22,5% de carboidrato, 2,4% de fibra, 1,4% de proteína e 0,8% de cinza, valores próximos aos da Tabela 5.3.

O alto conteúdo de umidade em todos os componentes da jaca demonstra a vulnerabilidade à deterioração por causas microbiológicas ou enzimáticas. Isto sugere que a principal causa de deterioração destes materiais deve-se ao amolecimento da estrutura pela perda de água seguida de uma destruição do amido por via enzimática (AWAD, 1993).

As cascas, entre todos os componentes da jaca, foram as que apresentaram maior quantidade de fibra alimentar, o que sugere novas pesquisas para aproveitamento deste recurso.

5.4.2. Elaboração de produtos alimentícios da polpa e resíduos de jaca

As farinhas da polpa e resíduos de jaca em pó com seus respectivos conteúdos nutricionais estimados pelo Excel com base na composição centesimal de cada componente in natura encontram-se na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Estimativa do valor nutricional das farinhas de polpa e resíduos de jaca

Composição	Unidade	Valores simulados*	
		Farinha 1	Farinha 2
Carboidratos totais	g 100g ⁻¹	4,922	0,095
Fibra alimentar	g 100g ⁻¹	5,180	6,937
Gordura	g 100g ⁻¹	0,812	1,737
Gorduras saturadas	g 100g ⁻¹	0,211	0,470
Proteína	g 100g ⁻¹	5,230	8,320
Sódio	mg kg ⁻¹	102,069	140,665
Calorias	kcal 100g ⁻¹	47,917	49,297
Umidade	g 100g ⁻¹	16,843	17,561
Minerais	g 100g ⁻¹	1,656	2,632

* Valores simulados no Excel 2012 supondo perdas de 10%.

A farinha 1 com aproximadamente 49% de polpa em pó diferiu da 2 por apresentar maior conteúdo de carboidratos totais e menor quantidade de sódio. As sementes e o mesocarpo foram os principais ingredientes da farinha 2 contribuindo cada um com aproximadamente 44% na formulação e com exceção do carboidrato e do sódio, pode-se observar similaridade na composição nutricional entre as farinhas.

Como principais características do formulador destacaram-se: a apresentação da quantidade de matéria prima adicionada ao produto, além da proporção de cada um dos nutrientes aportados e a biodisponibilidade de cada um dos componentes das matérias primas no produto final.

5.4.3. Análises físico-química, sensorial e microbiológica dos produtos alimentícios da polpa e resíduos de jaca

As farinhas e a polpa de jaca desidratada foram caracterizadas através do conteúdo nutricional, análises físico-química, sensorial e microbiológica. Os resultados de cada análise são mostrados nas Tabelas 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 respectivamente.

De acordo com a classificação da Portaria no. 29 de 13 de janeiro de 1998 da ANVISA os produtos a base de farinha de jaca podem entrar no grupo de alimentos para fins específicos na classificação de alimentos para grupos populacionais específicos, na linha de outros alimentos destinados aos demais grupos populacionais específicos. Complemento alimentício entende-se como «os produtos alimentícios cuja finalidade é complementar a dieta normal, consistente em fontes concentradas de nutrientes ou de outras substâncias que tenham um efeito nutricional ou fisiológico, em forma simples ou combinada, comercializados em forma dosificada, isto é, comprimidos, cápsulas, produtos em pó e garrafas líquidas que devem subministrar-se em pequenas quantidades unitárias».

As disposições sobre complementos alimentícios aplicam-se aos comercializados em qualidade de produtos alimentícios e são apresentados como tais (OTERO; VERSCHUUR, 2007; ANVISA, 1998).

A quantidade de fibra alimentar nas farinhas que ultrapassou 88% do valor diário recomendado (Tabela 5.5) e o valor energético em torno de 140 e 180 kcal 100g⁻¹ (Tabela 5.6) indicou que estes produtos podem ser uma alternativa satisfatória ao complemento alimentar. A farinha 1 adicionada com polpa de jaca apresentou melhores características físico-químicas, sendo o conteúdo de vitamina C, carboidratos totais e valor calórico os parâmetros que se destacaram nesse produto. A farinha 2 apresentou maior quantidade de proteína, fibra alimentar e amido.

Tabela 5.5 - Conteúdo nutricional dos produtos alimentícios de jaca.

Informação Nutricional (Porção 50 g)	Unidades	Farinha de jaca				Polpa desidratada	
		1		2		Quantidade	%V.D
		Quantidade	%V.D	Quantidade	%V.D		
Valor energético	Kcal	90	5	71	4	111	6
Carboidratos	g	13	5	10	4	25	9
Proteínas	g	2,9	5	3,7	6	1,6	3
Gorduras totais	g	2,8	5	1,7	3	0,6	1
Gorduras saturadas	g	0	0	0	0	0	0
Fibra alimentar	g	25	88	27,7	98	9,4	33
Sódio	mg	2,8	0	4,9	0	3,3	0

V.D: valores diários de referência com base em uma dieta de 2000 calorias. Seus valores diários podem ser maiores ou menores dependendo de suas necessidades energéticas.

Tabela 5.6 - Caracterização físico-química dos produtos alimentícios de jaca.

Determinação	Unidades	Farinha de jaca		Polpa desidratada
		1	2	
Carboidratos totais	g 100g ⁻¹	28,85	20,62	49,37
Fibra alimentar total	g 100g ⁻¹	50,33	55,3	18,77
Fibra alimentar solúvel	g 100g ⁻¹	5,68	6,25	4,89
Fibra alimentar insolúvel	g 100g ⁻¹	44,65	49,05	13,88
Gordura	g 100g ⁻¹	5,61	3,31	1,26
Gorduras saturadas	g 100g ⁻¹	0	0	0
Proteína	g 100g ⁻¹	5,76	7,41	3,11
Sódio	mg kg ⁻¹	55,24	98,48	66
Valor calórico total	kcal 100g ⁻¹	180,93	141,91	221,26
Umidade	g 100g ⁻¹	6,74	8,35	18,36
Material Mineral (cinzas)	g 100g ⁻¹	4,71	5,01	9,13
Acidez normal	g 100g ⁻¹	17,89	17,58	6,3
Ácido ascórbico (Vitamina C)	mg g ⁻¹	171	117,43	25,7
Açúcar redutor (Glicose)	g 100g ⁻¹	0,07	0,11	0,1
Açúcar não redutor (Sacarose)	g 100g ⁻¹	0,01	0,01	0,01
Amido	g 100g ⁻¹	19,34	21,92	17,72
pH		5,28	5,24	5,47
Sólidos solúveis	g 100g ⁻¹	47,56	44,74	46,21

Nas farinhas, o pó de sementes de jaca tem um papel fundamental no conteúdo de sódio, amido e gordura. Este produto é muito usado na medicina oriental (JAPTAP e BAPAT, 2010) e atualmente foi foco de estudo como ingrediente estabilizador para molho de pimenta (RENGSUTTHI e CHAROENREIN, 2011).

Observando-se a composição centesimal estimada pelo formulador (Tabela 5.4) e a analisada nas farinhas (Tabela 5.6), notou-se similaridade nos dados de proteína porém os demais ficaram subestimados pelo Excel. Isto é explicado pelo fato do simulador ter se baseado na composição centesimal dos materiais in natura e não dos pós, ou por ter considerado perda elevada no processo (de 10%).

De acordo com as Tabelas 5.5 e 5.6, a polpa de jaca desidratada apresentou um alto conteúdo de carboidratos totais (49,37%) e proteína (3,11%). Oliveira et al. (2011) encontraram valores ainda maiores de carboidratos, em torno de 89,8 a 92,4% e valores similares de proteína de 3,2 a 6,6% ao secar polpas de jaca a 50, 60 e 70 °C. Tanto nas farinhas quanto na polpa desidratada foi encontrado valores consideráveis de sólidos solúveis, acima de 45%. O teor dos sólidos solúveis nos produtos é muito importante e segundo Costa et al. (2004), quanto maior a quantidade de sólidos solúveis existentes, menor será a quantidade de açúcar a ser adicionada aos frutos quando processados pela indústria de alimentos, diminuindo assim o custo de produção e aumentando a qualidade do produto. Com base nas informações anteriores, o desenho e formulação dos dois produtos de complemento e a polpa desidratada de jaca enquadraram-se nos parâmetros estabelecidos pelas normas. A polpa de jaca desidratada classificada como tal pela Resolução 272, de 22 de setembro de 2005, pode ser reformulada ou adicionada com aromatizantes, corantes e/o conservantes para melhorar suas propriedades sensoriais e de vida de prateleira. As farinhas formuladas com polpa e resíduos de jaca em pó apresentaram características nutricionais que justificaria uma

produção de forma semi-industrial, porém, o enriquecimento destes produtos com outras farinhas poderá ser uma alternativa para melhorar seus componentes químicos.

Com relação a estas análises é importante mencionar que não houve um desenho estatístico e os resultados comparativos entre os dados experimentais e as normas ocorreram como dados acertados de um processo realizado, neste caso a padronização dos produtos de forma determinística (SILVA et al., 2004).

Para a análise sensorial, a prova realizada foi a de consumidores treinados. Conforme mostrado na Tabela 5.7, a polpa de jaca desidratada foi o produto mais aceito pelos consumidores. Oliveira et al. (2011) mostraram que a avaliação sensorial do produto de maior aceitação (média de 5,95) foi aquele desidratado a 50 °C e com 20% de umidade final, podendo ser uma alternativa alimentar para as regiões produtoras de jaca.

Tabela 5.7 - Caracterização sensorial dos produtos alimentícios de jaca.

Determinação	Farinha de jaca		Polpa desidratada
	1	2	
Aspecto	Homogêneo, moído, pó, seco	Homogêneo, moído, pó, seco	Brilhoso, dessecado, ondulado, uniforme
Consistência	Solta	Solta	Sólida
Odor	Adocidado, agradável	Adocidado, agradável	Característico, suave
Sabor	Característico, remanescente, queimado	Característico, remanescente, queimado	Característico, doce
Textura	Granulada	Granulada	Firme, resistente
*Teste Afetivo	Menos preferida	Preferência intermediária	Mais preferida

A farinha 2, preparada sem adição de polpa em pó, mostrou ter maior preferência dos consumidores. Isto foi um resultado promissor pois sendo a polpa a parte nobre do fruto, o seu uso poderá ser reservado somente para a produção de passas e os resíduos para a produção de farinha.

As farinhas apresentaram sabor queimado devido ao tempo prolongado ou temperatura muito elevada durante a cocção. É necessário aprimorar este processo para melhoria do sabor.

Na Tabela 5.8 observou-se que o processo de elaboração dos produtos foi realizado em condições higienicamente aceitáveis.

Tabela 5.8 - Caracterização microbiológica dos produtos alimentícios de jaca.

Determinação	Farinha de jaca		Polpa desidratada
	1	2	
Contagem padrão	$4,5 \times 10^2$ UFC/g	$5,0 \times 10^2$ UFC/g	< 10 UFC/g
Coliformes totais	< 3 NMP/g	< 3 NMP/g	< 3 NMP/g
Bolores	Ausente/g	Ausente/g	Ausente/g
Leveduras	Ausente/g	Ausente/g g	Ausente/g

*Padrão conforme resolução RDC 12 de 02/01/2001 da ANVISA.

Atualmente o índice de desnutrição infantil diminuiu em quase 30% segundo IBGE (2009), porém, a educação das famílias sobre boas práticas de fabricação (BPF) e capacitações sobre elaboração de produtos com base nas matérias primas regionais continua sendo pontos críticos para o desenvolvimento dessas comunidades (CESAR; GONÇALVES, 2002; CESAR et al., 2009).

Nesse contexto, as avaliações dietéticas do consumo alimentar são valiosas para identificar a participação dos nutrientes na dieta e estimar a sua adequação frente aos valores de referência e, desse modo, permitir o diagnóstico e planejamento de intervenções, fundamentando a promoção de ações globais e específicas para a correção da insegurança alimentar (COSTA et al, 2001).

5.5. Conclusões

- ❑ Na caracterização físico-química e nutricional foi observado que a farinha 1 apresentou maior quantidade de carboidrato, vitamina C e valor calórico e a farinha 2 teve maior conteúdo de proteína, amido, fibra e sódio.
- ❑ Na avaliação sensorial, a maior preferência foi pela polpa desidratada de jaca. Já entre as farinhas, a tipo 2, que não utilizou polpa na formulação, foi mais aceita indicando que a polpa poderá ser reservada para produção de passas.
- ❑ Os produtos elaborados com polpa e resíduos de jaca, embora apresentem bom conteúdo nutricional e aceitação sensorial, devem ser alvos de novas pesquisas podendo ser empregados, como matéria-prima para indústrias afins ou como complemento alimentício.

5.6. Referências

AFISJ- Agriculture and Fisheries Information Service -**Jackfruit**, Department of Agriculture.

(2011). Disponível em: <<http://www.da.gov.ph/tips/jackfruit.pdf> Acesso em: 3/9/2011.

AOAC- Association of Official Analytical Chemists International, Moisture and volatile matter in oils and fats: vacuum oven method. **Official Methods of Analysis** 16th ed. Gaithersburg: AOAC., p. 1-5, 1997.

ANVISA. **Portaria nº 29, de 13 de janeiro de 1998: alimentos para fins específicos.** Brasília: Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 7 p., 1998.

ANVISA. **Resolução - RDC nº 12, de 2 de janeiro de 2001: regulamento técnico sobre padrões microbiológicos para alimentos.** Brasília: Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 15 p., 2001.

ANVISA. **Resolução - RDC nº 272, de 22 de setembro de 2005: frutas secas ou dessecadas.** Brasília: Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 5 p., 2005.

AWAD, M. **Fisiologia pós-colheita de frutas.** 1 ed. São Paulo: Nobel, p. 1-185, 1993.

BALIGA, M. S.; SHIVASHANKARA, A. R.; HANIADKA, R.; SOUZA, J.; BHAT, H. P. Phytochemistry, nutritional and pharmacological properties of *Artocarpus heterophyllus* Lam (jackfruit): A review. **Food Research International**, São Paulo, v. 44, p. 1800-1811, 2011.

BICAS, J. L.; MOLINA, G.; DIONÍSIO, A. P.; BARROS, F. F. C.; WAGNER, R.; MARÓSTICA, M. R.; PASTORE, G. M. Volatile constituents of exotic fruits from Brazil. **Food Research International**, São Paulo, v. 44, p. 1843-1855, 2011.

BUETLER, T. M.; RENARD, M.; OFFORD, E. A.; SCHNEIDER, H.; RUEGG, U. T. Green tea extract decreases muscle necrosis in mdx mice and protects against reactive oxygen species. **American Journal of Clinical Nutrition**, Houston, v. 75, p. 749-753, 2002.

CESAR, J. A.; GONÇALVES, T. S. A. **Saúde e nutrição infantil em áreas pobres do Norte e Nordeste do Brasil.** Curitiba: Acervo, 30 p., 2002.

CESAR, J. A.; CHRESTANI, M. A. D.; FANTINEL, E. J.; GONÇALVES, T. S.; NEUMANN, N. A. Saúde infantil em áreas pobres: resultados de um estudo de base populacional nos municípios de Caracol, Piauí, e Garrafão do Norte, Pará, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 25, p. 809-818, 2009.

CLERICI, M. T. P. S.; CARVALHO-SILVA, L. B. Nutritional bioactive compounds and technological aspects of minor fruits grown in Brazil. **Food Research International**, São Paulo, v. 44, p. 1658-1670, 2011.

- COSTA, W. S.; SUASSUNA FILHO J.; CAVALCANTE MATA, M. E. R. M.; QUEIROZ, A. J. M. Influência da concentração de sólidos solúveis totais no sinal fotoacústico de polpa de manga. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.6, n.2, p.141-147, 2004.
- COSTA, E. C.; SILVA, S. P. O.; LUCENA, J. R. M.; BATISTA FILHO, M.; LIRA, P. I. C.; RIBEIRO, M. A.; OSORIO, M. M. Food consumption of children from cities with a low human development index in the Brazilian Northeast. **Revista de Nutrição**, Campinas, v. 24, p. 395-405, 2001.
- GEANKOPLIS, C. J. **Procesos de transporte y operaciones unitarias**, 3 ed. Ciudad de Mexico: Compañia editorial continental, S.A. de C. V. México, 606 p., 1998.
- GOSWAMI, C. C. Physicochemical parameters of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) seeds in different growing areas. **Clinical Biochemistry**, Hamilton, v. 44, p. 234-239, 2011.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Procedimentos e determinações gerais. In PESCUET, N. S. e TIGLEA, P. (Eds.) **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4 ed. São Paulo: SES - CCD - IAL., cap. 4, p. 83-160, 2008.
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística **PNAD - Segurança Alimentar 2004/2009**. Brasília:, 2009. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1763&id_pagina=1 Acesso em: 01/12/2011.
- JAPTAP, U. B.; BAPAT, V. A. *Artocarpus*: a review of its traditional uses, phytochemistry and pharmacology. **Journal of Ethnopharmacology**, Leiden, v. 129, p. 142-166, 2010.

JAPTAP, U. B.; BAPAT, V. A.; PANASKAR, S. N. Evaluation of antioxidant capacity and phenol content in jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.). **Plant Foods for Human Nutrition**, Irapuato, v. 65, p. 99-104, 2010.

KARPINSKA, M.; BOROWSKI, J.; DANOWSKA-OZIEWICZ, M. Antioxidative activity of rosemary extract in lipid fraction of minced meat balls during storage in a freezer. **Nahrung**, Munich, v. 44, p. 38-41, 2000.

MAIA, J. G. S.; ANDRADE, E. H. A.; ZOGHBI, M. G. B. Aroma volatiles from two fruit varieties of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.). **Food Chemistry**, Reading, v. 85, p. 195-197, 2004.

NUNES, M. C.; BATISTA, P.; RAYMUNDO, A.; ALVES, M. M.; SOUSA, I. Vegetable proteins and milk puddings. **Colloid and Surface B**, Hamilton, v.31, p.21-29, 2003.

OLIVEIRA, L.F.; GODOY, R., L.; BORGES, S., V.; Qualidade de jaca (*Artocarpus heterophyllus*, Lam.) desidratada sob diferentes condições de processo. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 14, n. 3, p. 241-248, 2011.

OLIVEIRA, L. F. Efeito dos parâmetros do processo de desidratação de jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) sobre as propriedades químicas, físico-química e de aceitação sensorial. Rio de Janeiro: Seropédica, 121 p., 2009.

ONG, B. T.; NAZIMAH, S. A. H.; TAN, C.P.; MIRHOSSEINI, H.; OSWMAN, A.; HASHIM, D. M.; RUSUL, G. Analysis of volatile compounds in five jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) cultivars using solid-phase microextraction (SPME) and gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry (GC-TOFMS). **Journal of Food Composition and Analysis**, Grangues, v. 21, p. 416-422, 2008.

- OTERO, C. G. C.; VERSCHUUR, F. La problemática regulación comunitaria de los complementos alimenticios. **Revista ICE**, Madrid, n. 836, p. 163-183, 2007.
- PESCHEL, W.; SÁNCHEZ-RABANEDA, F.; DIEKMAN, W.; PLESCHER, A.; GARTZIA, I.; JIMÉNEZ, D.; LAMUELA-RAVENTOS, R.; BUXADERAS, S.; CODINA, C. An industrial approach in the search of natural antioxidants from vegetable and fruit wastes. **Food Chemistry**, Reading, v. 97, p. 137-150, 2006.
- PUA, C. K.; HAMID, N. S. A.; TAN, C. P.; MIRHOSSEINI, H.; RAHMAN, R. A.; RUSUL, G. Optimization of drum drying processing parameters for production of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) using response surface methodology. **LWT-Food Science and Technology**, Zurich, v. 43, p. 343-349, 2010.
- PUA, C. K.; HAMID, N. S. A.; RUSUL, G.; RAHMAN, R. A. Production of drum-dried jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder with different concentration of soy lecithin and gum arabic. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 78, p. 630-6, 2007.
- RENGSUTTHI, K.; CHAROENREIN, S. Physico-chemical properties of jackfruit seed starch (*Artocarpus heterophyllus*) and its application as a thickener and stabilizer in chillisauc. **LWT-Food Science and Technology**, Zurich, v. 44, p. 1309-1313, 2011.
- ROSADO, J. L.; RIVERA, J.; LÓPEZ, G.; SOLANO, L.; RODRIGUEZ, G.; CASSANUEVA, E.; GRACÍA-ARANDA, A.; TOUSSAINT, G.; MAULEN, I. Desarrollo y evaluación de suplementos alimenticios para el programa de educación salud y alimentación. **Salud Pública de México**, Ciudad de México, v. 41, p. 153-162, 1999.

SILVA, G.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Métodos probabilísticos e determinísticos para diagnóstico da necessidade de subsolagem de solos agrícolas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, p. 130-141, 2004.

ZUPKO, I.; HOHMANN, J.; REDEI, D.; FALKAY, G.; JANICSAK, G.; MATHE, I. Antioxidant activity of leaves of *Salvia* species in enzyme-dependent and enzyme-independent systems of lipid peroxidation and their phenolic constituents. **Planta Medica**, Antwerp, v. 67, p. 366-368, 2001.



Capítulo 6

Considerações finais

6.1. Considerações finais

Foram realizadas as isotermas de sorção para polpa e resíduos de jaca nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C encontrando um comportamento similar aos reportados por outros autores para produtos com composição similar. Também foram determinadas as propriedades termodinâmicas de sorção da água (Q_{st} , ΔS , ΔG) para todos os materiais, empregando o método direto explicado no capítulo 3. Com este método é possível determinar e observar o comportamento das moléculas da água e as reações que podem ocorrer com outros componentes do material, em cada nível energético, para toda a faixa de umidade de equilíbrio de estudo.

No capítulo 4, nas cinéticas de secagem da casca, polpa e sementes de jaca foram observados comportamentos similares aos publicados por outros autores para cada produto. Na modelagem e simulação os melhores modelos que representaram as cinéticas foram os de camada fina (Peleg e Page), sendo que o modelo difusivo apresentou parâmetros similares aos reportados por outros autores, porém, a avaliação estatística não foi satisfatória.

No capítulo 5 foram formulados produtos alimentícios baseados na polpa, sementes, mesocarpo e eixo central de jaca desidratados. Sugere-se que a otimização e aplicação da metodologia descrita neste capítulo seja disponibilizada às comunidades onde a produção de jaca é significativa e, através de treinamento em boas práticas de fabricação, obter-se como resultado a formação de associações ou cooperativas para o aproveitamento e processamento da jaca e seus resíduos. As farinhas e a polpa desidratada foram elaboradas sob condições de operação simples e de baixo custo podendo ser reproduzidas pelas famílias que cultivam esta fruta, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Recomenda-se que para futuros trabalhos o modelo difusivo seja descrito em função da temperatura (tipo Arrhenius) e/ou da umidade, a fim de obter uma melhor correlação e avaliação estatística.

Para o aproveitamento da polpa e resíduos de jaca em forma de farinha ou desidratada é necessário estudar o armazenamento e vida de prateleira, assim como a adição de outros componentes que aumentem a qualidade nutricional e as propriedades sensoriais.