



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**SECAGEM DE FATIAS DE CAJU (*Anacardium occidentale L.*)
EM SECADOR DE BANDEJAS**

Renato Fonseca Aragão

Campina Grande, PB
Dezembro 2007



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciências e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Processos

Área de concentração: Desenvolvimento de processos

**SECAGEM DE FATIAS DE CAJU (*Anacardium occidentale L.*)
EM SECADOR DE BANDEJAS**

Tese apresentada a coordenação do curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Autor: Renato Fonseca Aragão

Orientadores: Prof^ª Dr^ª Odelsia Leonor Sanchez de Alsina
Dr^ª. Josilene de Assis Cavalcante

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A659s

2007 Aragão, Renato Fonseca.

Secagem de fatias de caju (*Anacardium occidentale L.*) em secador de bandejas / Renato Fonseca Aragão. — Campina Grande, 2007.

126 f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientadores: Prof^ª. Dr^ª. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina, Dr^ª. Josilene de Assis Cavalcante.

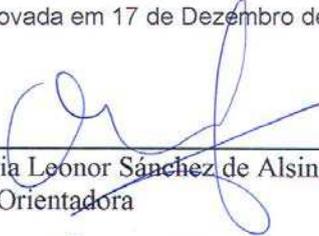
1. Secagem. 2. Secador de Bandeja. 3. Caju. I. Título.

CDU 631.365(043)

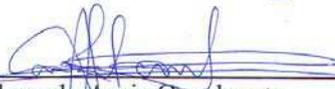
SECAGEM DE FATIAS DE CAJU (*Anacardium occidentale L.*) EM
SECADOR DE BANDEJAS.

BANCA EXAMINADORA

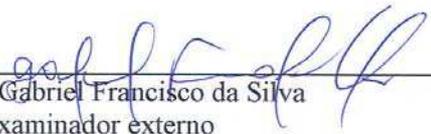
Tese de Doutorado aprovada em 17 de Dezembro de 2007



Profa. Dra. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina
Orientadora



Dra. Josilene de Assis Cavalcante
Orientadora



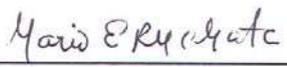
Prof. Dr. Gabriel Francisco da Silva
Examinador externo



Profa. Dra. Maria de Fátima Dantas de Medeiros
Examinador externo



Prof. Dr. João Evangelista Franco do Carmo
Examinador externo



Prof. Dr. Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata
Examinador interno

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido a vida e me dar forças para enfrentá-la.

A minha esposa Suelena pela força e compreensão, não só no decorrer deste curso, mas durante todos os nossos dias.

A minhas filhas Thayse, Renata e Amanda, pelo carinho, compreensão e pela força que sempre me transmitem em todos os momentos da vida, sejam eles alegres ou não.

A professora Dra. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina pelos ensinamentos tão valiosos, pela compreensão e amizade, professora meu muito obrigado.

Ao casal professores Dr. Nagel Alves e Dra. Josilene Cavalcante pela valiosa orientação, não só na parte de simulação matemática, mas no decorrer de todo o trabalho.

Ao professor Dr. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata, pelos ensinamentos e incentivo durante todo tempo em que trabalhamos juntos.

A professora Dra. Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia, e a secretária da UEAg Aldaniza Moraes. Obrigado por tudo.

Ao professor Dr. João Evangelista do Carmo pelos ensinamentos e amizade.

Ao pesquisador e amigo Dr. Osvaldo Soares, meu muito obrigado.

Ao físico Manoel Adalberto Guedes pela montagem do sistema de aquisição de dados e pela amizade.

Ao estagiário e amigo Leandro Costa pela valiosa contribuição na coleta dos dados experimentais.

Ao amigo Danilo Castro Lima pela confecção de várias peças usadas na parte experimental deste trabalho.

As colegas do curso de doutorado Ana Paula Trindade e Clésia Pachú pela amizade e incentivo.

Aos Funcionários do Laboratório de Meios Porosos José Lopes, José Nogueira e Ivanildo.

Ao programa de pós-graduação da UFCG pela concessão de bolsa institucional, durante o último ano do curso.

A todos que contribuíram para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
NOMENCLATURA	ix
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1	Introdução	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Referências bibliográficas.	4

CAPÍTULO 2 - PROPRIEDADES TERMOFISICAS

2.1	Introdução	5
2.2	Revisão bibliográfica	6
2.2.1	Propriedades físicas	6
2.2.1.1	Teor de umidade	6
2.2.1.2	Características físico-químicas	7
2.2.1.3	Encolhimento	8
2.2.1.4	Porosidade	10
2.2.2	Propriedades térmicas	10
2.2.2.1	Calor específico	12
2.2.2.2	Condutividade térmica	13
2.2.2.3	Difusividade térmica	13
2.3	Metodologia	14
2.3.1	Matéria prima	14
2.3.2	Propriedades físicas	14
2.3.2.1	Teor de umidade	14
2.3.2.2	Encolhimento	15
2.3.2.3	Porosidade do leito	15
2.3.2.4	Massa específica	15
2.3.3	Propriedades térmicas	16
2.4	Resultados e discussão	17
2.4.1	Propriedades físicas	17
2.4.1.1	Teor de umidade inicial	17
2.4.1.2	Encolhimento	18
2.4.1.3	Porosidade	19
2.4.1.4	Massa específica	20
2.4.3	Propriedades térmicas	21

2.5	Conclusões	24
2.6	Referências bibliográficas	25

CAPÍTULO 3- EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO DO PEDÚNCULO DO CAJU

3.1	Introdução	29
3.2	Revisão bibliográfica	31
3.2.1	Atividade de água	31
3.2.2	Modelos de isotermas	33
3.3	Metodologia	37
3.3.1	Modelo matemático	38
3.4	Resultados e discussão	40
3.5	Conclusões	44
3.6	Referências bibliográficas	45

CAPÍTULO 4 - CINÉTICA DE SECAGEM

4.1	Introdução	48
4.2	Revisão bibliográfica	49
4.2.1	Teoria de secagem	49
4.2.1.1	Difusão líquida	50
4.3	Metodologia	53
4.3.1	Cinética de secagem	53
4.4	Resultados e discussão	55
4.5	Conclusões	59
4.6	Referências bibliográficas	60

CAPÍTULO 5 – SECAGEM DE FATIAS DE CAJU EM SECADOR DE BANDEJAS

5.1	Introdução	63
5.2	Revisão bibliográficas	64
5.2.1	Secadores	64
5.2.1.1	Secador de bandejas	65
5.2.2	Simulação de secagem	65
5.2.3	Qualidade do produto	67
5.3	Metodologia	67
5.3.1	Secagem convectiva no secador de bandejas	67
5.3.2	Planejamento experimental	69
5.3.3	Eficiência energética	70
5.3.4	Índice de saturação do ar de secagem	71
5.3.5	Teor de umidade médio após 300 minutos	72
5.3.6	Simulação de secagem em sacador de bandejas	73

5.4	Resultados e discussão	77
5.4.1	Secagem convectiva	77
5.4.2	Desempenho do secador	82
5.4.2.1	Eficiência energética instantânea	82
5.4.2.2	Índice de saturação instantâneo	84
5.4.3	Análise estatística	86
5.4.3.1	Eficiência energética	87
5.4.3.2	Índice de saturação	91
5.4.3.3	Teor de umidade a 300 minutos	95
5.4.4	Testes preliminares sobre a qualidade do produto	100
5.4.4.1	Vitamina C	100
5.4.4.2	Análise sensorial	101
5.4.5	Simulação	102
5.5	Conclusões	107
5.6	Referências bibliográficas	108
6	CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	
6.1	Resultados principais	110
6.1.1	Propriedades termofísicas	110
6.1.2	Equilíbrio higroscópico	110
6.1.3	Cinética de secagem	111
6.1.4	Secador convectivo	111
6.2	Sugestões para futuros trabalhos	112
6.3	Conclusão	113
	Apêndice A	114
	Apêndice B	122
	Apêndice C	124
	Apêndice D	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Efeito do teor de umidade do caju sobre o encolhimento volumétrico.	19
Figura 2.2	Efeito do teor de umidade do caju sobre a massa específica	20
Figura 2.3	Efeito do teor de umidade do caju sobre o calor específico	22
Figura 2.4	Efeito do teor de umidade do caju sobre a condutividade térmica.	22
Figura 2.5	Efeito do teor de umidade do caju sobre a difusividade térmica.	23
Figura 3.1	Velocidade de reações e crescimento microbiano em função da atividade de água.	31
Figura 3.2	Ajuste das isotermas de dessorção do caju a diferentes temperaturas pelo modelo de GAB.	40
Figura 3.3	Ajuste das isotermas de dessorção do caju a diferentes temperaturas pelo modelo de BET.	41
Figura 3.4	Ajuste das isotermas de dessorção do caju a diferentes temperaturas pelo modelo de Oswin.	41
Figura 4.1	Diagrama do equipamento utilizado na realização da secagem convectiva.	53
Figura 4.2	Curvas de secagem ajustadas pelo modelo difusional.	55
Figura 4.3	Efeito da velocidade do ar na secagem de fatias de caju para $T=75\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $L=0,7\text{ cm}$	56
Figura 4.4	Evolução da temperatura no interior fatia de caju, $T=75\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v=1,6\text{ ms}^{-1}$ $L=0,7\text{ cm}$.	58
Figura 4.5	Evolução da temperatura no interior da fatia de caju $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $v=1,0\text{ m.s}^{-1}$, $L=0,7\text{ cm}$.	59
Figura 5.1	(a) Detalhe do conjunto de bandejas. (b) Esquema do secador mostrando a distribuição dos sensores de temperatura e umidade relativa.	69
Figura 5.2	Detalhe do sensor de umidade e temperatura, modelo SHT75.	69

Figura 5.2.a	Fluxograma do programa secador	77
Figura 5.3	Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar, no secador de bandejas. $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 1,4\text{ m s}^{-1}$; $L = 2\text{ cm}$	79
Figura 5.4	Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar, no secador de bandejas. $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 1,8\text{ ms}^{-1}$; $L = 1\text{ cm}$	80
Figura 5.5	Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 1\text{ m s}^{-1}$; $L = 3\text{ cm}$	81
Figura 5.6	Eficiência energética instantânea para os ensaios referente ao ponto central. $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 1,4\text{ ms}^{-1}$; $L = 2\text{ cm}$	82
Figura 5.7	Eficiência energética global do secador, para $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V=1,8\text{ ms}^{-1}$; $L=1\text{ cm}$.	83
Figura 5.8	Eficiência energética global do secador, para $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V=1,0\text{ m.s}^{-1}$ $L=3\text{ cm}$.	84
Figura 5.9	Índice de saturação para os ensaios referente ao ponto central. $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 1,4\text{ ms}^{-1}$; $L = 2\text{ cm}$	84
Figura 5.10	Índice de saturação global do secador, para $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $v=1,8\text{ ms}^{-1}$; $L = 1\text{ cm}$	85
Figura 5.11	Índice de saturação global do secador, para $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $v=1,0\text{ ms}^{-1}$; $L = 3\text{ cm}$	86
Figura 5.12	Diagrama de Pareto. Efeito da altura da camada e da velocidade do ar de secagem sobre a eficiência energética.	88
Figura 5.13	Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo para a eficiência energética.	89
Figura 5.14	Distribuição dos resíduos para a eficiência energética	90
Figura 5.15	Superfície de resposta da eficiência energética em função da velocidade (v) e da altura da camada (L). Para a temperatura no ponto central.	91

Figura 5.16	Diagrama de Pareto. Efeito da altura da camada e da velocidade do ar de secagem sobre o Índice de saturação.	92
Figura 5.17	Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo para o Índice de saturação.	94
Figura 5.18	Distribuição dos resíduos para o índice de saturação.	94
Figura 5.19	Superfície de resposta do Índice de saturação em função da velocidade (v) e da altura da camada (L), para a temperatura no ponto central	95
Figura 5.20	Diagrama de Pareto. Efeito da temperatura e da altura da camada sobre a umidade.	96
Figura 5.21	Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo para o teor de umidade	98
Figura 5.22	Distribuição dos resíduos para o teor de umidade.	98
Figura 5.23	Superfície de resposta do teor de umidade em função da temperatura e da altura da camada, para velocidade no ponto central.	99
Figura 5.23 a	Representação da análise sensorial das fatias de caju.	102
Figura 5.24	Curvas experimentais e simuladas de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar, no secador de bandejas. $T = 70^{\circ}\text{C}$, $v = 1,4 \text{ ms}^{-1}$, $L = 2\text{cm}$.	103
Figura 5.25	Curvas experimentais e simuladas de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar, no secador de bandejas. $T = 80^{\circ}\text{C}$, $v = 1,8 \text{ ms}^{-1}$, $L = 1\text{cm}$.	104
Figura 5.26	Curvas experimentais e simuladas de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 60^{\circ}\text{C}$, $v = 1 \text{ ms}^{-1}$, $L = 3\text{cm}$.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Valores médios das características químicas e físico-químicas do pedúnculo do caju de diferentes clones de cajueiro anão.	8
Tabela 2.2	Valores dos teores de umidade iniciais do pedúnculo do caju em diversos experimentos.	17
Tabela 2.3	Porosidade das fatias de caju <i>in natura</i>	20
Tabela 3.1	Estimativa de X_m para o modelo de GAB, realizada através da derivada da curva de equilíbrio.	42
Tabela 3.2	Parâmetros de ajuste das isotermas de dessorção do caju, coeficiente de determinação e erro relativo médio a diferentes temperaturas, para equação de GAB, BET e Oswin.	42
Tabela 3.3	Parâmetro C da equação de GAB ajustado pelo modelo e calculado em função da temperatura.	44
Tabela 3.4	Parâmetro K da equação de GAB ajustado pelo modelo e calculado em função da temperatura.	44
Tabela 4.1	Valores do coeficiente de difusão do caju para diferentes temperaturas.	57
Tabela 5.1	Secadores mais adequados para desidratação de alimentos na forma líquida pastosa e sólida.	64
Tabela 5.2	Matriz planejamento, com valores das variáveis de entrada codificadas e reais.	70
Tabela 5.3	Matriz planejamento com os valores reais e codificados das variáveis de entrada, e variáveis respostas.	87
Tabela 5.4	Estimativa dos coeficientes de regressão para a eficiência energética do processo.	87
Tabela 5.5	Análise de variância para a eficiência energética. Efeito da altura da camada e velocidade do ar.	88
Tabela 5.6	Estimativa dos coeficientes de regressão para índice de saturação do processo.	92

Tabela 5.7	Análise de variância para índice de saturação. Efeito da altura camada e velocidade do ar.	93
Tabela 5.8	Estimativa dos coeficientes de regressão para a umidade	96
Tabela 5.9	Análise de variância para a umidade. Efeito da altura da camada e velocidade do ar.	97
Tabela 5.10	Resumo da análise de variância a 95 % de confiança, para as respostas eficiência do processo, índice de saturação e teor de umidade.	100
Tabela 5.11	Valores de vitamina C para o caju <i>in natura</i> e seco.	101

NOMENCLATURA

a	Área específica	$m^2.m^{-3}$
A	Área	m^2
a_w	Atividade de água	adm
A_1, A_2, A_3	Constantes das equações de umidade de equilíbrio	-
B_1, B_2, B_3	Constantes das equações de umidade de equilíbrio.	-
bs	Base seca	-
bu	Base úmida	-
B_i	Número de Biot	-
C	Capacidade calorífica	$J kg^{-1}$
C_p	Calor específico	$J kg^{-1}. ^\circ C^{-1}$
C_v	Calor específico do vapor	$J kg^{-1}. ^\circ C^{-1}$
C_l	Calor específico da água	$J kg^{-1}. ^\circ C^{-1}$
C_a	Calor específico do ar	$J kg^{-1}. ^\circ C^{-1}$
C_0	Constantes ajustadas com efeito da temperatura na equação de GAB.	-
C_1	Constante da equação de Langmuir	-
C_{bet}	Constante da equação de BET	-
C_{gab}	Constante da equação de GAB	-
D_{ef}	Coefficiente de difusão efetivo	$cm^2 min^{-1}$
D_0	Fator de Arrhenius	$cm^2.min^{-1}$
E	Erro relativo médio	%
E_a	Energia de Ativação	$kJ mol^{-1} K$
g_a	Fluxo de ar	$kg min^{-1} m^{-2}$
g_{ss}	Gramas de sólido seco	-
h	Coefficiente de transferência de calor	$W m^{-2} ^\circ C^{-1}$

h_{lv}	Calor latente de vaporização da água	$J K^{-1}$
H	Umidade absoluta do ar	$kg kg^{-1}$
H_c, H_k	Colar de sorção de água	$kJ mol^{-1}$
H_m, H_n	Calor de sorção de monocamada e multicamada da água, respectivamente.	$kJ mol^{-1}$
k	Condutividade térmica	$W m^{-1} ^\circ C^{-1}$
K_{gab}	Constante da equação de GAB	-
K_0	Constantes ajustadas com efeito da temperatura na equação de GAB.	-
K_1, K_2, K_3	Constantes das equações de umidade de equilíbrio	-
L	Espessura da fatia	cm
m	Massa do corpo	kg
m_w	Massa de água	kg
m_s	Massa de sólido seco	kg
m_t	Massa total	kg
$m_{p(t)}$	Massa do produto no tempo t	kg
N_u	Número de Nusselt	-
n	Número de termos da série	-
ne	Número de dados experimentais	-
P_r	Número de Prandtl	-
p	Pressão de vapor de água no alimento	atm
p_0	Pressão de vapor da água	atm
q	Fluxo de calor	W
r_1	Distância entre a fonte e o sensor	mm
r	Coordenada espacial para corpos cilíndricos e esféricos.	
R	Constante universal dos gases	$kJ mol^{-1} K^{-1}$
R_e	Número de Reynolds	-
R_m	Taxa de secagem	$kg min^{-1} m^{-3}$

T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Temperatura do ar na saída do secador	$^{\circ}\text{C}$
T_0	Temperatura do ar na entrada do secador	$^{\circ}\text{C}$
t	Tempo	min
UR	Umidade relativa	%
UR_e	Umidade relativa na entrada do secador	%
v	Velocidade do ar de secagem	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
V	Volume da amostra	cm^3
V_0	Volume inicial da amostra	cm^3
V_P	Valor predito pelo modelo	-
V_E	Valor experimental	-
W_s	Taxa de evaporação real	$\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$
W_{sat}	Taxa de evaporação do ar saturado	$\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$
X^*	Razão de umidade	adm
X	Teor de umidade em base seca	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
X_{bu}	Teor de umidade em base úmida	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
\bar{X}	Teor de umidade médio no tempo	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
X_e	Teor de umidade de equilíbrio	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
X_m	Teor de umidade na monocamada	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
X_0	Teor de umidade inicial	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
X_t	Teor de umidade em um determinado tempo	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
X_{300}	Teor de umidade no tempo igual a 300 minutos	%
x	Distancia	m
α	Difusividade térmica	$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$
ε	Porosidade	%
θ	Temperatura da fruta	$^{\circ}\text{C}$
ρ	Massa específica	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_p	Massa específica do produto	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
η	Eficiência energética instantânea	%

$\bar{\eta}$	Eficiência energética global média do secador	%
Φ	Índice de saturação	%
$\bar{\Phi}$	Índice de saturação médio	%
λ	Calor de condensação da água	kJ mol^{-1}

RESUMO

A secagem de fatias de caju em secadores convencionais de bandejas e em secadores solares é alternativa para atender aos pequenos produtores, que com a utilização desta técnica, possam agregar valor aos seus produtos e minimizar as perdas. No desenvolvimento de secadores é necessário conhecer as propriedades termofísicas do material a secar, as relações de equilíbrio higroscópico bem como dispor de informações acerca da cinética de secagem. De acordo com isto, este trabalho teve como objetivo poder oferecer uma alternativa tecnológica viável de modo a poder otimizar o desempenho do equipamento e a qualidade do produto. Foram determinadas as propriedades térmicas e físicas do pedúnculo do caju em função do teor de umidade. Foi verificado que entre três modelos matemáticos analisados para o equilíbrio higroscópico das fatias de caju o modelo de GAB é o que melhor representa a curva de umidade de equilíbrio. Foi estudada a cinética de secagem, em diferentes condições operacionais com temperaturas variando de 60 a 80 °C, velocidade do ar de secagem na faixa de 1 a 1,8 ms⁻¹ e altura do leito variando de 1 a 3 cm. Para a modelagem matemática foi utilizado o modelo difusional baseado na 2ª lei de Fick, que se mostrou adequado para prever a cinética de secagem do caju. Para analisar o desempenho do secador de bandejas foi estudado a eficiência energética global média, o índice de saturação do ar e o teor de umidade final do produto após 300 minutos de operação. Foi elaborado um planejamento fatorial 2³ com três experimentos no ponto central, tendo como variáveis independentes a temperatura, velocidade do ar de secagem e espessura do leito, e como variáveis resposta a eficiência energética global o índice de saturação e o teor de umidade final. Os resultados obtidos para a eficiência energética variaram de 5,12 a 18,86%. Para o índice de saturação do ar a variação foi de 5,35 a 38,38%. As superfícies de respostas geradas mostraram que estes resultados podem ser melhorados com o aumento da carga nas bandejas do secador e a diminuição da velocidade do ar de secagem. Foram implementadas modificações no programa “Secador” desenvolvido em linguagem FORTRAN para simular a secagem de fatias de

caju nas bandejas do secador. Foram acrescentadas sub-rotinas para implementar no modelo as variações das propriedades físicas e térmicas do caju em função do teor de umidade, coeficiente de difusão variável, umidade de equilíbrio em função da temperatura e da umidade relativa do ar. Observou-se que com relação a predição da temperatura e umidade do ar o modelo apresenta bons resultados, enquanto que com relação a temperatura e umidade da fruta, é necessário fazer alguns ajustes. Os resultados aqui apresentados mostram a viabilidade do uso de secadores de bandejas e permite o dimensionamento e otimização destes em escala industrial, adequados para atender pequenos produtores na obtenção de fatias de caju secas.

Palavras-chave: secagem, secador de bandeja, propriedades termofísicas, caju

ABSTRACT

The drying of cashew slices in common tray or solar dryers are alternatives to serve small farmers, who can aggregate value to their product and minimize losses, using this technique. During the development of dryers, it's necessary to know the thermal-physical properties of the material to be dried, the hygroscopic equilibrium relation, as well as to be aware about drying kinetics. According to that, this work had the objective to offer a viable technological alternative in order to optimize the development of the equipment and product quality. The thermal and physics properties of cashew apple were determined in function of moisture content, regarding the hygroscopic equilibrium, it was verified that, among three mathematic models, the GAB best represents the cashew moisture equilibrium. It was studied the cashew drying kinetic, in different operational conditions, with temperature of 60 to 80°C, air drying velocity of 1 to 1.8m s⁻¹ and bed height varying between 1 to 3cm. For the mathematic modeling it was used the diffusional model based on Fick's 2nd law, which is suitable to predict the cashew drying kinetics. In order to analyze the development of tray dryer it was studied the mean global energetic efficiency, the air saturation index, and the final moisture content of the product after operating during 300 minutes. It was prepared a factorial planning 2³ with three experiments in central point, involving temperature, air drying velocity and bed thickness as independent variables, and global energetic efficiency, air saturation index, and final content moisture as response variables. The obtained results showed that the energetic efficiency varied from 5.12 to 18.86%, whereas the variation for the air saturation index was from 5.35 to 38.38%. The generated response surface show that these results can be improved by increasing the loading into the dryer trays and by decreasing the drying air velocity. It was implemented some changes in the "Secador" program developed in FORTRAN language to simulate the cashew slices drying in the dryer trays. Sub-routines were added in order to implement, in the model, cashew physics and thermal properties variations as a function of moisture content, variable diffusion coefficient, equilibrium moisture content in function of

temperature and air relative humidity. It was observed that concerning the temperature and the air moisture prediction, the model well represents the experimental data, whereas concerning the fruit temperature and moisture, some adjustments would be necessary. The presented results show the viability of using tray dryers to obtain dried cashew slices. These results are important tools for large scale units, suitable to attend small farmers.

Key-words: drying, tray dryers, thermal and physics properties, cashew.

CAPÍTULO 1

1.1 Introdução

Os maiores produtores mundiais de castanha de caju referentes ao ano de 2006 são: Vietnam com uma produção de 827.000t seguido da China com 460.000 t e Brasil 251.268 t. (IBGE, 2007).

O Ceará é o maior produtor brasileiro de castanha de caju contribuindo com aproximadamente 50% da produção nacional, seguido pelos estados do Rio Grande do Norte e Piauí (IBGE, 2007).

O pseudofruto do cajueiro, chamado de pedúnculo do caju possui amplo potencial de aproveitamento industrial, gerando diversos produtos tais como: suco integral clarificado, concentrados, néctares, refrigerantes, doces, compotas e produtos desidratados. Grande parte destes produtos possui um processo de produção industrial bem definido, porém alguns são obtidos de forma artesanal, tem um grande potencial de industrialização, mas com processos tecnológicos ainda em desenvolvimento.

O pseudofruto do cajueiro é bastante perecível, possui uma casca muito frágil, o que dificulta o manuseio e transporte do produto *in natura*, das áreas de produção aos mercados consumidores, ou as indústrias situadas a longas distâncias.

As possibilidades de transformação do pedúnculo em produtos alimentícios são amplas, entretanto, estima-se que o seu aproveitamento industrial esteja em torno de 12% (AZOUBEL, 2002).

Com a indiscutível necessidade de se aumentar a produção de frutas e ampliar as exportações, torna-se imprescindível reduzir as perdas que ocorrem em toda a cadeia produtiva. Nos países emergentes as perdas são estimadas

em 50% para alguns produtos. Nossa realidade não é diferente, desde o produtor até o consumidor, a magnitude das perdas é considerável. Este fato evidencia a urgente necessidade de processos simples e baratos, que possam oferecer caminhos para conservar estes alimentos extremamente perecíveis (MELONI, 2003). Em virtude disto existe uma grande preocupação dos pesquisadores no que diz respeito ao desenvolvimento de novas tecnologias para conservação dos produtos agrícolas.

A secagem de fatias de caju em secadores convencionais de bandejas e em secadores solares é uma alternativa para atender aos pequenos produtores, que com a utilização desta técnica, possam agregar valor aos seus produtos, minimizar as perdas, e conseqüentemente aumentar a renda familiar e desta forma permanecer no campo, diminuindo o êxodo rural.

Inicialmente, a remoção de água de alimentos sólidos surgiu como uma forma de reduzir a atividade de água, para inibir o crescimento microbiano, mas posteriormente passou a ter grande importância na redução dos custos energéticos de transporte, embalagem e armazenamento destes alimentos, que possuem grande quantidade de água em sua composição.

A desidratação de alimentos não se limita apenas à seleção de um secador, os conceitos de física e química associados à desidratação de alimentos precisam ser entendidos para uma análise apropriada do fenômeno de secagem em qualquer produto alimentício. A atividade de água, mecanismos e teorias de secagem, mudanças físicas e químicas devem ser reconhecidas como elementos chave para qualquer operação de desidratação (BARBOSA-CÁNOVAS & VEJA-MERCADO, 1996).

Mediante o exposto sentimos a necessidade de desenvolver um secador simples e de baixo custo, voltado para atender aos produtores de baixa renda, tendo em vista que 85% da produção de caju no nosso país têm origem na agricultura familiar.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é estudar experimentalmente, a secagem de fatias de caju no secador de bandeja, realizar a modelagem e a simulação do processo visando otimizar a eficiência energética e a capacidade de produção.

Em função da importância e da necessidade do conhecimento do processo de secagem de fatias de caju no secador de bandejas foi proposto ainda para este trabalho desenvolver as seguintes etapas:

- Caracterizar as propriedades termofísicas do caju

- Estudar o equilíbrio higroscópico

- Determinar experimentalmente as curvas de secagem de fatias de caju em camada delgada e estudar o modelo que melhor representa a cinética de secagem.

- Avaliar o efeito das variáveis, temperatura, velocidade do ar de secagem e espessura da camada de caju, no processo de secagem no secador de bandejas em escala piloto.

- Otimizar as condições operacionais do secador, visando o desempenho energético

- Adequar e implementar as rotinas específicas no programa simulador secador de modo a dispor de uma ferramenta adequada para projeto e otimização de secadores de bandeja em escala industrial.

1.3 - Referências bibliográficas

AZOUBEL, P.M. **Influência de pré-tratamentos na obtenção de produtos secos do caju (*Anacardium occidentale* L.)**. 2002. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; VEJA-MERCADO, H. **Dehydration of foods**. New York: Chapman & Hall 1996, 330p.

Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 31 de maio de 2007.

MELONI, P.L.S. **Desidratação de frutas e hortaliças**. Fortaleza: Instituto Frutal,. 87p. 2003.

CAPÍTULO 2

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

2.1 Introdução

O conhecimento das propriedades termofísicas dos produtos agrícolas é importante para um adequado dimensionamento e otimização de equipamentos. Muitos problemas inerentes às operações unitárias de secagem e de armazenamento podem ser analisados com base nos princípios dos fenômenos de transporte. A utilização das equações envolvidas para descrever processos físicos depende do conhecimento de suas propriedades térmicas (MUIR e VIRAVANICHAJ, 1972; STOLF, 1972; DROUZAS e SARAVACOS, 1988; FANG *et al.*, 1997).

As propriedades físicas de produtos alimentícios participam significativamente na modelagem de transferência de calor e massa em operações unitárias de processamento de alimentos assim como secagem, processamento térmico e congelamento. Alimentos são sistemas altamente complexos e a determinação de suas propriedades físicas demanda muita habilidade o que pode ser a causa da escassez de dados na literatura científica. (ABHAYAWICK *et al.*, 2002).

De acordo com LUIKOV (1966), devido à heterogeneidade dos meios porosos capilares, vários são os fatores que influenciam o fluxo e a quantidade de calor que atravessa o produto, podendo os valores de condutividade e difusividade térmica variar devido às propriedades estruturais do meio, especialmente a sua massa específica, porosidade e teor de umidade.

Equações para predição do calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica são reportadas na literatura. Os valores previstos usando estas equações não são suficientemente exatos para certos tipos de alimentos

onde a porosidade influencia todas as outras propriedades. RAPUSAS e DRISCOLL (1995) desenvolveram alguns modelos matemáticos para descrever as mudanças nas propriedades termofísicas de fatias de cebola branca, como função do teor de umidade.

Há poucos dados na literatura referentes as propriedades térmicas do pedúnculo do caju, isto restringe o uso de equações e modelos matemáticos para o cálculo das propriedades termodinâmicas.

O presente capítulo tem como objetivo determinar as propriedades térmicas: calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica, e as propriedades físicas: massa específica, encolhimento e porosidade do pedúnculo do caju em função do teor de umidade.

2.2 Revisão bibliográfica

2.2.1 Propriedades físicas

2.2.1.1 Teor de umidade

Um dos mais importantes parâmetros do material que será seco é o teor de umidade, que é a razão direta entre a massa de água presente no material e a massa de matéria seca. A umidade é a quantidade de água que pode ser removida do material sem alteração da estrutura molecular e pode ser expressa de duas maneiras.

Base seca (bs) – Em relação à massa de matéria seca do produto

$$X = \frac{m_w}{m_s} \quad (2.1)$$

X - teor de umidade em base seca, kg kg^{-1} .

m_w - massa de água, kg

m_s - massa de sólido seco, kg

Base úmida (bu) – Em relação à massa total do produto

$$X_{bu} = \frac{m_w}{m_t} \quad (2.2)$$

X_{bu} – teor de umidade em base úmida, kg kg^{-1}

m_t – massa total, (massa de sólido seco + massa de água),kg

Segundo WEBER (1995), os métodos de determinação do teor de umidade podem ser classificados em diretos e indiretos. Nos métodos diretos, a água da amostra é removida e a determinação é feita pela diferença de massa de água evaporada. Nos métodos indiretos, as determinações são feitas mensurando uma característica física do material e correlacionando-a com a variação do teor de umidade.

Segundo ABHAYAWICK *et al.* (2002), as propriedades físicas de diferentes variedades de cebola variam com a sua composição, sendo que a influência do teor de umidade sobre outras propriedades físicas é a mais significativa.

2.2.1.2 Características físico-químicas

Segundo SOUZA FILHO *et al.* (2002) o pedúnculo do caju apresenta uma grande variabilidade com relação as suas características químicas e físico químicas; sendo o tipo de solo, clima, tipo de cajueiro, o estágio de maturação, condições de plantio (sequeiro ou irrigado) os fatores que mais influenciam.

Na Tabela 2.1 encontram-se as características químicas e físico-químicas do pedúnculo do caju, de diferentes clones do cajueiro anão.

Tabela 2.1 – Valores médios das características químicas e físico-químicas do pedúnculo do caju de diferentes clones de cajueiro anão

Determinações	Valores médios		
	CP - 76	CP - 1001	CP -06
Açúcares redutores (%)	8,30	8,08	8,24
Vitamina C (mg/100 ml)	158,26	157,64	153,20
Acidez Total (em ácido cítrico %)	0,49	0,47	0,47
Sólidos solúveis (° Brix)	10,76	10,04	9,74
Tanino (%)	0,27	0,31	0,30
pH	4,25	4,21	4,34
Teor de umidade (% bu)	85,98	86,23	87,20
Cinzas	0,32	0,33	0,32
Fibra (%)	0,06	0,14	0,20
Cálcio (mg/100g)	16,75	13,65	16,00
Ferro (mg Fe/100g)	0,31	0,28	0,34
Fósforo (P ₂ O ₅) (mg/100g)	30,55	25,85	26,80
Proteína (%)	0,92	0,75	0,64

Fonte: Souza Filho *et al.* (2002)

2.2.1.3 Encolhimento

A secagem de produtos agrícolas com alto teor de umidade inicial, como é o caso das frutas e vegetais, é acompanhada de um encolhimento bastante significativo do material que sofre alterações nas dimensões da sua forma original. Este fenômeno, pelas características marcantes, deve estar previsto na modelagem matemática, com vistas a se obter melhor representação física do processo de secagem (QUEIROZ, 1994).

A quantificação do fenômeno de encolhimento é importante pelo fato de tornar mais realística a análise da cinética de secagem e conseqüentemente a totalidade do fenômeno de secagem. Do ponto de vista matemático, o efeito causa mudanças nas condições de contorno para a resolução da segunda Lei de Fick (PARK, 1987).

Segundo MIRSA e YOUNG (1980) o encolhimento de produtos agrícolas durante a secagem é um fenômeno físico que ocorre simultaneamente com a difusão de umidade, e pode ter um efeito significativo na difusividade mássica

e, portanto, na taxa de remoção de água. Porém, considerar o encolhimento nos modelos de secagem é difícil devido à falta de informações sobre o coeficiente de encolhimento e da relação funcional entre encolhimento e difusividade mássica.

A base teórica para o conhecimento do processo de contração volumétrica envolve complexas leis mecânicas e de deformação de materiais, no entanto, muitos pesquisadores têm utilizado aproximações e modelos empíricos na tentativa de melhor representar esse complicado fenômeno em produtos de natureza biológica (AFONSO JÚNIOR *et al.*, 2002)

RATTI (1994) e ZOGZAS *et al.* (1994) observaram que a contração volumétrica de produtos vegetais durante a secagem não é função exclusiva do teor de umidade, mas também dependente das condições do processo e da geometria do produto.

SUZUKI *et al.* (1976) estudaram o encolhimento de cenoura, batata, batata doce e rabanete, utilizando a equação de Kilpatrick e mostraram que, durante os primeiros estágios de secagem, o encolhimento de vegetais é igual ao volume de água eliminada por evaporação, mas para estágios finais o volume de encolhimento é menor que o volume de água removida.

ALSINA *et al.* (1997) desenvolveram um modelo para representar o encolhimento da acerola. Os autores propuseram que o encolhimento da acerola era linear com a diminuição do teor de umidade. A variação do raio como uma função do teor de umidade (bs.) foi normalizada com as condições iniciais.

RATTI (1994) estudando a secagem de pedaços de maçã, batata e cenoura, de geometria diferente a temperaturas de 40, 50 e 60 °C e velocidade do ar de secagem variando de 1 a 5 ms⁻¹ e umidade relativa de 5 a 50% verificou que o encolhimento volumétrico é afetado principalmente pela velocidade do ar de secagem.

GOUVEIA (1999) estudando a cinética de secagem de gengibre em secador de leito fixo, analisou o encolhimento volumétrico do mesmo utilizando os modelos uniforme 1, uniforme 2 e o modelo central, propostos por SUZUKI *et al.* (1976).

ALSINA *et al* (1999) secando fatias de goiaba em secador convectivo nas temperaturas compreendidas entre 40 e 70 °C e velocidades do ar de secagem na faixa de 0,8 a 1,2 ms⁻¹, observaram que as amostras secas a 70 °C apresentaram coloração mais escura que as submetidas a temperaturas mais baixas. Observaram também que o encolhimento nas dimensões das fatias era da ordem de 50% na espessura e 25% no diâmetro.

2.2.1.4 Porosidade

A porosidade é uma propriedade definida como a razão entre o volume de vazios e o volume total de partículas, é uma grandeza adimensional, influencia a queda de pressão no escoamento, e na realidade influencia qualquer propriedade inerente ao leito. A porosidade de um leito estático depende do tamanho das partículas, da forma, da rugosidade superficial e do método de empilhamento (RIBEIRO, 2002).

2.2.2 Propriedades térmicas

As propriedades de transferência de calor e massa de alimentos têm recebido maior atenção devido a sua importância fundamental na modelagem, na otimização e nos projetos de equipamentos para processos. A mudança da temperatura de um produto alimentício pode causar variação significativa em suas propriedades físicas e químicas (SWEAT, 1986).

O conhecimento das propriedades térmicas dos produtos agrícolas é de grande importância para um adequado dimensionamento e otimização de equipamentos e operações unitárias necessárias, em particular a secagem. Segundo MOHSENIN (1980), torna-se necessário a determinação do calor

específico, condutividade e difusividade térmica para prever as mudanças térmicas internas de um produto agrícola sujeito à secagem.

SOUSA e PEREIRA (1996) relataram que a condutividade térmica de materiais termosensíveis varia com a umidade, e a obtenção da curva que descreve o fenômeno tem grande utilidade em aplicações de secagem.

CHAU (2001) considera importante a determinação experimental dos valores da condutividade e da difusividade térmica para o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor.

AFONSO JÚNIOR *et al.* (2002) estudaram as propriedades térmicas da massa granular do café: calor específico, condutividade e difusividade térmica, para diferentes tipos de preparo a diferentes teores de umidade. Os autores concluíram que as propriedades térmicas comportam-se de forma similar às daquelas da maioria dos produtos agrícolas, ou seja, o calor específico e a condutividade térmica aumentam com a elevação do teor de umidade, enquanto a difusividade térmica diminui com o aumento do teor de umidade do produto.

CHANDRASEKAR e VISWANATAN (1999) estudaram as propriedades térmicas do café na faixa de teor de umidade variando de 9,9 a 30,6 (% bu.) e observaram que a condutividade térmica e o calor específico aumentam com o aumento do teor de umidade, enquanto que a difusividade térmica apresenta um efeito contrário.

DINCER (1995) relata que o significado físico da difusividade térmica está associado à difusão de calor dentro do produto durante as mudanças de temperatura com o tempo. Um elevado valor da difusividade térmica significa uma rápida transferência de calor no interior do produto.

MEDEIROS *et al.* (2000) determinaram as propriedades físicas e termodinâmicas de polpas de frutas tropicais avaliando o efeito da composição química. Observaram que as frutas mais ácidas tendem a apresentar elevados

valores da capacidade calorífica e difusividade térmica mais baixa em relação à condutividade térmica, não verificaram qualquer tendência no comportamento frente às variações do teor de umidade de sólidos solúveis ou da acidez, contudo observaram que polpas com elevadas concentrações de fibras apresentam baixas condutividades térmicas.

SOUSA e PEREIRA (1996) estudaram a condutividade térmica efetiva da gelatina em função do teor de umidade em um processo de secagem industrial e observaram uma forte dependência linear da condutividade térmica da gelatina com o teor de umidade, variando entre 0,128 e 0,467 kcal h⁻¹ m⁻¹ °C⁻¹, para teores de umidade de 10 a 75 % bu., respectivamente.

2.2.2.1 Calor específico

O calor específico é uma propriedade definida como a quantidade de energia necessária para elevar de um grau de temperatura uma massa específica de uma substância.

A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um corpo de 1 °C é denominada capacidade calorífica do corpo, que é proporcional à sua massa. A capacidade calorífica por unidade de massa é denominada de calor específico, e é dado pela seguinte equação.

$$C_p = \frac{C}{m} \quad (2.3)$$

C_p – calor específico, J kg⁻¹ °C⁻¹

C – capacidade calorífica, J °C⁻¹

m – massa do corpo, kg

2.2.2.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma propriedade do material que descreve a taxa com que o fluxo de calor escoar sob a influência de um gradiente de temperatura e pode ser predita pela Lei de Fourier da condução de calor.

$$q = k A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.4)$$

q - fluxo de calor, W

k - condutividade térmica, $W m^{-1} ^\circ C^{-1}$

A - área de transferência de calor, m^2

T - temperatura, $^\circ C$

A condutividade térmica de alimentos e sua relação com o teor de umidade é uma das mais importantes propriedades de transporte para modelar processos onde existe transferência de calor e massa. Típicos exemplos são os processos de secagem, de reidratação e a predição da umidade limite em embalagens de alimentos desidratados durante o armazenamento. A condutividade térmica depende da fração volumétrica dos sólidos, da água e do ar contido no produto. (WANG e BRENNAN, 1992).

2.2.2.3 Difusividade térmica

A relação entre a habilidade de conduzir e armazenar energia de um material é conhecida como difusividade térmica. Materiais com alto valor de difusividade térmica respondem rapidamente a mudanças térmicas em seu ambiente, enquanto materiais de pequenos valores respondem mais lentamente, demorando para alcançar um novo estado de equilíbrio.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.5)$$

α - difusividade térmica, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

C_p - calor específico, $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

k - condutividade térmica, $\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

ρ - massa específica, kg m^{-3}

A difusividade térmica é uma importante propriedade de transporte, necessária na modelagem e nos cálculos de transferência de calor transiente em operações básicas de processamento de alimentos, como secagem, processamento térmico, resfriamento e congelamento.

2.3 Metodologia

2.3.1 Matéria prima

Para realização deste trabalho foi utilizado pseudofrutos do cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) adquiridos no comércio local, com boa aparência, consistência e ausência de danos físicos. Foram lavados em água corrente e enxutos com papel toalha para em seguida serem realizados os testes.

2.3.2 Propriedades físicas

A caracterização física do pedúnculo do caju foi realizada para o caju *in natura* e após o processo de secagem, constando das seguintes determinações: teor de umidade, encolhimento volumétrico e porosidade.

2.3.2.1 Teor de umidade

O teor de umidade inicial do caju foi determinado em estufa com circulação de ar, a 70°C , em presença de sílica gel. As amostras em triplicatas com a massa pré-determinadas, foram mantidas na estufa até peso constante.

2.3.2.2 Encolhimento

O encolhimento volumétrico foi estudado tanto em fatias de caju, como no caju inteiro. No caso das fatias foi determinado o volume das mesmas para os diversos teores de umidade pelo procedimento citado quando da determinação da massa específica.

Para o caju inteiro foi determinado a altura do mesmo e o diâmetro foi medido a três alturas diferentes, na base a meia altura e no topo e determinando assim o diâmetro médio. Os cajus foram colocados em estufa com circulação de ar a 70⁰C, e em intervalos regulares de tempo, eram retirados e realizadas as determinações da altura e do diâmetro médio e desta maneira era acompanhada a variação de volume.

2.3.2.3 Porosidade do leito

A determinação da porosidade foi realizada com fatias de caju *in natura*. As fatias foram colocadas em um recipiente de volume conhecido, distribuídas em camadas variando a altura do leito em 1, 2 e 3 cm, de maneira idêntica como são colocadas nas bandejas do secador, em seguida completava-se o volume do recipiente com líquido. Foram feitos vários ensaios com repetições preenchendo-se o volume de vazios do leito com água e com óleo comestível.

A relação entre o volume de vazios ocupado pelo líquido e o volume total fornece a porosidade do leito.

2.3.2.4 Massa específica

A massa específica do caju foi obtida para diferentes teores de umidade em fatias de diferentes espessuras 1,0; 1,5 e 2,5 cm. Inicialmente, considerando as fatias como um cilindro de pequena altura, foi determinado a

altura média e o diâmetro médio com o auxílio de um paquímetro. A massa das fatias também foi determinada e em seguida as amostras foram levadas ao secador. Em intervalos de tempo regulares eram retiradas e novamente realizadas as medidas. Conhecidos o diâmetro e altura média das fatias, determinava-se o volume e a massa específica das fatias de caju para cada teor de umidade.

2.3.3 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas do caju foram determinadas, com o auxílio do aparelho Thermolink, que consiste de uma sonda linear dupla composta de duas agulhas de aço inoxidável espaçadas de 6,0 mm uma da outra e com 30,0 mm de comprimento, uma delas emite um pulso de calor e a outra é usada como sensor. Deste modo a condutividade térmica (k) e a difusividade térmica (α) são determinadas com base na Equação 2.6.

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi kt} \exp\left(-\frac{r_1^2}{4\alpha t}\right) \quad (2.6)$$

ΔT – variação de temperatura, °C

q – fluxo de calor, W

k – condutividade térmica, W m⁻¹ °C⁻¹

r_1 – distância entre a fonte e o sensor, mm

α - difusividade térmica, mm² s⁻¹

t - tempo, s

As agulhas da sonda são introduzidas no caju, o aparelho equilibra termicamente as agulhas e uma emite um pulso de calor por 8 segundos. A outra, que funciona como sensor, monitora a variação de temperatura por 60 segundos. A potência total dissipada no aquecimento é o produto da voltagem aplicada na agulha aquecedora com a corrente que a atravessa. Dividindo este produto pelo comprimento e multiplicando-se pela duração do pulso tem-se o valor de q .

A Equação 2.6 é usada para encontrar a condutividade térmica K e a difusividade térmica α de uma série de medidas de ΔT versus t para uma amostra. Uma vez conhecida a difusividade e a condutividade térmica, o calor específico volumétrico é determinado através da equação 2.7

$$C_p = \frac{k}{\alpha} \quad (2.7)$$

C_p - calor específico volumétrico, $J\ cm^{-3}\ ^{\circ}C^{-1}$

k - condutividade térmica, $W\ m^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$

α - difusividade térmica, $mm^2\ s^{-1}$

2.4 Resultados e discussão

2.4.1 Propriedades físicas

2.4.1.1 Teor de umidade inicial

O pedúnculo do caju apresenta um teor de umidade inicial em torno de 87% em base úmida com desvios em torno de $\pm 1,2\%$ (Tabela 2.2).

Tabela 2.2- Valores dos teores de umidade iniciais do pedúnculo do caju em diversos experimentos.

Experimento	Teor de umidade inicial (% bu.)
1	86,5
2	85,8
3	86,6
4	85,4
5	88,0
6	87,9
7	88,2
8	87,8
Média	87,0

2.4.1.2 Encolhimento

Na Figura 2.1 encontra-se a variação do encolhimento volumétrico com o teor de umidade do caju, normalizados em relação aos valores iniciais. Verifica-se que o encolhimento volumétrico do pedúnculo do caju apresenta um comportamento não linear, provavelmente devido à maneira como a água está ligada, o que afeta estruturalmente a matriz sólida, tendo como resultado uma maior contração de volume nos níveis de elevado teor de umidade, e tornando-se mais rígida na medida em que diminui o teor de umidade.

O encolhimento volumétrico observado explica as variações de massa específica mostrados na Figura 2.2. Na região de baixo teor de umidade, a perda de água não é acompanhada pela redução de volume. Devido à rigidez e porosidade gerados durante a secagem na região de baixos teores de umidade, a massa específica tende a diminuir bruscamente na medida em que o produto é seco, como observado na Figura 2.2. Na região de teores de umidade elevado o encolhimento foi muito acentuado superando o efeito da perda de água. Em níveis de elevado teor de umidade com elevadas taxas de secagem a tendência é o colapso da estrutura do material provocando um elevado encolhimento.

Na região intermediária, com teores de umidades variando entre 1 e 6 (bs.), o encolhimento volumétrico corresponde ao volume perdido de água, mantendo desse modo a massa específica aproximadamente constante, como se observa na figura 2.2

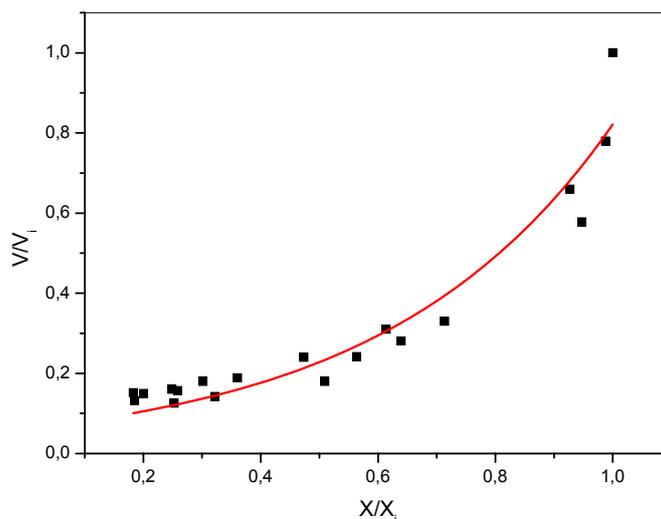


Figura 2.1 – Efeito do teor de umidade do caju sobre o encolhimento volumétrico.

Foi ajustado através de regressão não linear um modelo empírico aos dados experimentais do encolhimento, em função do teor de umidade.

$$\frac{V}{V_0} = 0,063 \exp \left(\frac{\frac{X}{X_0}}{0,39} \right) \quad (2.8)$$

V - Volume da amostra, cm^3

V_0 - Volume inicial da amostra, cm^3

X - Teor de umidade base seca, kg kg^{-1}

X_0 - Teor de umidade inicial base seca, kg kg^{-1}

2.4.1.3 Porosidade

Foi determinada a porosidade (ϵ) apenas para fatias de caju *in natura* cujos resultados estão apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Porosidade das fatias de caju *in natura*

Ensaio	Líquido utilizado	ϵ (%)
1	água	25,07
2	água	25,24
3	óleo	24,48
4	óleo	23,71
		média=24,64

2.4.1.4 Massa específica

Na Figura 2.2 verifica-se a variação da massa específica com o teor de umidade. Observa-se que na faixa de baixo teor de umidade, entre 0 e 1 (b.s.), ocorreu uma variação acentuada da massa específica, aumentando até atingir um máximo em torno de 4 (b.s.). A partir deste valor, a massa específica varia pouco, mantendo-se entre 750 a 850 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ até apresentar um pequeno decréscimo na faixa de alto teor de umidade.

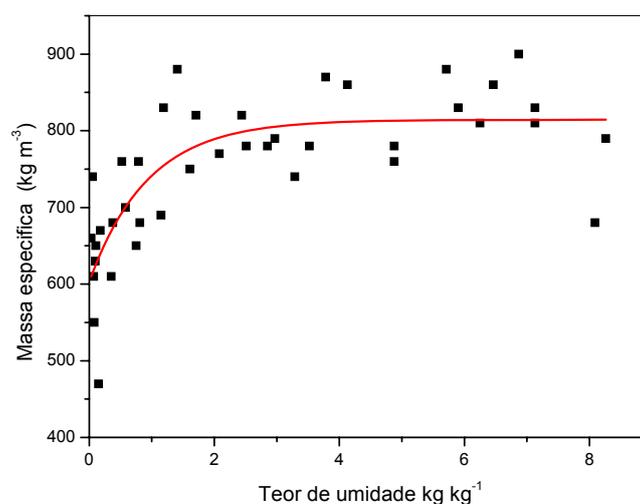


Figura 2.2 – Efeito do teor de umidade do caju sobre a massa específica

Foi realizado um ajuste através de uma regressão não linear aos dados experimentais obtendo-se a seguinte equação:

$$\rho = 814,303 - 210,961 \exp\left(-\frac{X}{0,943}\right) \quad (2.9)$$

ρ - massa específica do caju, kg m^{-3}

X - Teor de umidade base seca, kg kg^{-1}

2.4.3 Propriedades térmicas

Os resultados obtidos do calor específico volumétrico, condutividade térmica e difusividade térmica em função do teor de umidade para o caju, encontram-se nas Figuras de 2.3 a 2.5. Verifica-se que de forma geral as curvas apresentam uma mesma tendência de comportamento: na região de baixo teor de umidade, as propriedades térmicas variam de maneira acentuada, aumentando com o incremento do teor de umidade e passando por um valor máximo que se encontra entre um teor de umidade de 2 e 4 em base seca. A tendência se inverte com uma diminuição do valor das propriedades térmicas para altos teores de umidade. É interessante notar que o intervalo de teores de umidade correspondentes ao máximo nas propriedades térmicas praticamente coincide com o observado na variação da massa específica com o teor de umidade (Figura 2.2), fato que confirma a influência dos efeitos estruturais sobre as propriedades térmicas.

O efeito do aumento da condutividade térmica e calor específico com o teor de umidade, na região de baixo teor de umidade, foi também observado por AFONSO JUNIOR. *et al.* (2002), e CHANDRASEKAR e VISWANATAN (1999) estudando grãos de café, com teor de umidade de até 40% (b.u).

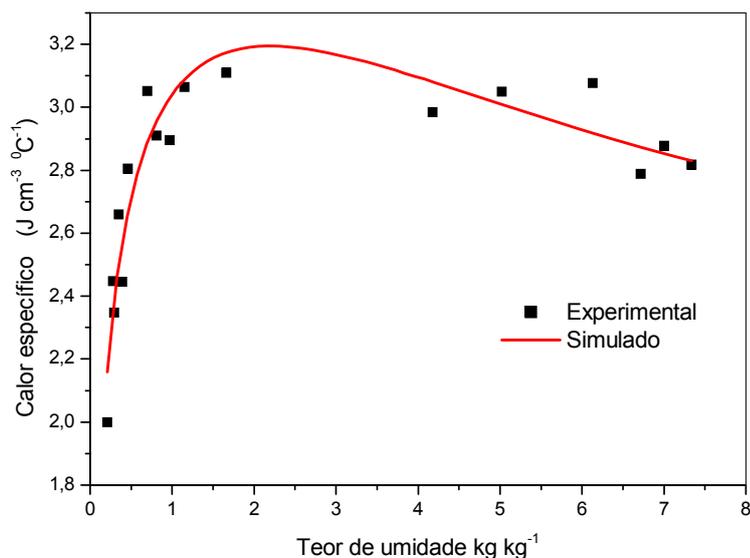


Figura 2.3 – Efeito do teor de umidade do caju sobre o calor específico.

Foram ajustados através de regressão não linear modelos empíricos aos dados experimentais do calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica em função do teor de umidade das amostras, equações 2.10, 2.11 e 2.12, respectivamente.

$$C_p = 0,6 \log(X) + 3,329 \exp(-0,097) \quad (2.10)$$

C_p – Calor específico do caju, $J \text{ cm}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

X – Teor de umidade base seca, kg kg^{-1}

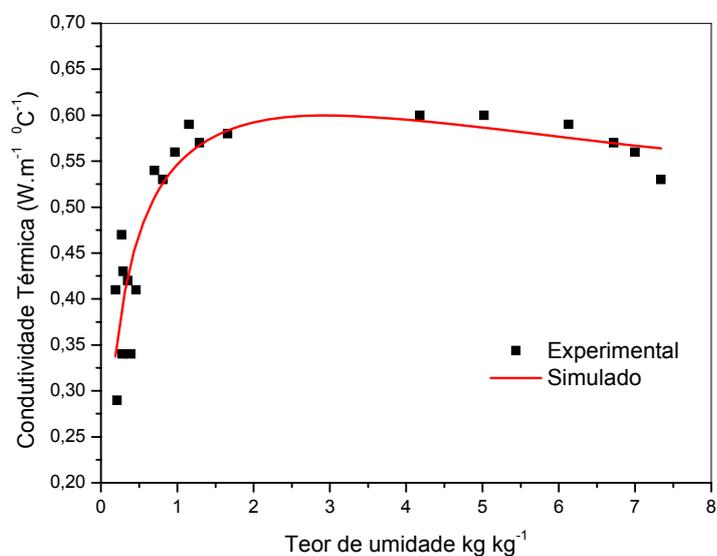


Figura 2.4 - Efeito do teor de umidade do caju sobre a condutividade térmica.

$$k = 0,372 \log(X) + 0,621 \exp(-0,128X) \quad (2.11)$$

k – condutividade térmica $W.m^{-1} ^\circ C^{-1}$

X - teor de umidade base seca, $kg kg^{-1}$

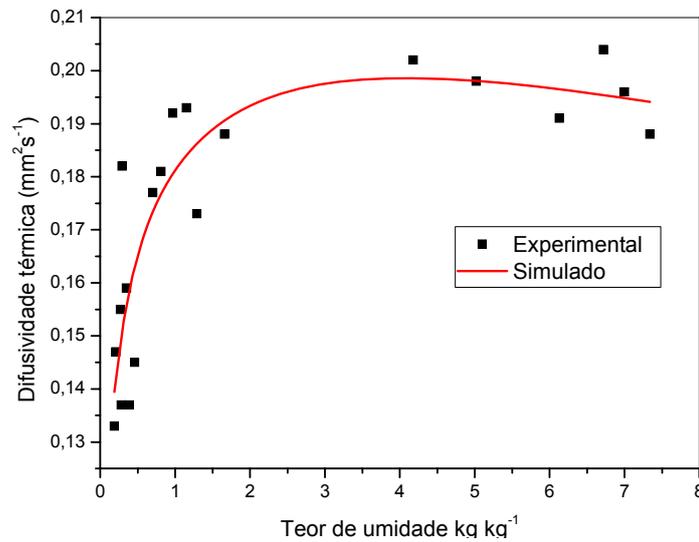


Figura 2.5 - Efeito do teor de umidade do caju sobre a difusividade térmica

$$\alpha = 0,067 \log(X) + 0,189 \exp(-0,045X) \quad (2.12)$$

α – difusividade térmica $mm^2 s^{-1}$

X - teor de umidade base seca, $kg kg^{-1}$

SARRIA e HONÓRIO (2004) estudando as propriedades térmicas do Figo Roxo de Valinhos (*Ficus carica L.*) determinaram a condutividade térmica de $0,52 W m^{-1} ^\circ C^{-1}$, a difusividade térmica na ordem de $1,56 \times 10^{-7} m^2 s^{-1}$, conseqüentemente o calor específico $4,07 kJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$ e a massa específica de $815,6 kg m^{-3}$. Estes valores são bastante próximos dos valores encontrados para o caju, levando-se em consideração que são frutas com altos teores de umidade e massa específica bastante semelhante.

2.5 Conclusões

- Nas condições em que foram conduzidos os experimentos, as curvas apresentam uma mesma tendência no comportamento: na região de baixo teor de umidade, as propriedades térmicas variam de maneira acentuada, aumentando com o incremento do teor de umidade e passando por um valor máximo que se encontra entre 2 e 4 de umidade em base seca. A tendência se inverte com uma diminuição do valor da propriedade térmica com o aumento do teor de umidade.

- O intervalo de umidade correspondente ao máximo nas propriedades térmicas praticamente coincide com o observado na variação da massa específica, confirmando assim a influência dos efeitos estruturais sobre as propriedades térmicas.

2.6 Referências bibliográficas

ABHAYAWICK, L.; LAGUERRE, J.C.; TAUZIN, V.; DUQUENOY A. Physical properties of three onion varieties as affected by the moisture content. **Journal of Food Engineering**, v.55, p.253-262, 2002

AFONSO JUNIOR, P.C.; CORRÊA, P. C.; PINTO, F. de A. C.; NARDELLI, M.P. Propriedades térmicas dos frutos e sementes de café: determinação e modelagem . **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, v. Especial, n.4, p.9-15, 2002

ALSINA, O. L. S.; SILVA, O. S.; BRASILEIRO, I. M. N. Drying Kinetics of West Indian Cherry. Proceeding of the Inter American Drying Conference (IADC), 1, 434-440, 1997

ALSINA, O. L. S.; ALMEIDA, M.M.; SILVA, Y.C.; SÁ, R.M., **Estudo do efeitos das variáveis de operação na secagem de fatias de goiaba: Aplicação de um modelo difusional**. CONGRESSO DE ENGENHARIA DE PROCESSOS DO MERCOSUL, 2, 1999, Florianópolis. CDROM.

CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of coffe. **Journal Agric Eng. Res**, v.73, p.227-234, 1999.

CHAU, K. V. **Mathematical modeling of post harvest processes**. Campina: Grupo de Tecnologia Pós-Colheita. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2001.

DINCER , I.; Thermal diffusivities of geometrical objects subjects to cooling. **Applied Energy**, London, v.51, p.111-118, 1995.

DROUZAS, A. E.; SARAVACOS, G.D. Effective thermal conductivity of granular starche materials. **Journal of Food Science**. Chicago, v.53, n.6, p. 1795-1799, 1988.

FANG, Q. ; LAN, Y.; KOCHER, M. F.; HANNA, M. A. Thermal conductivity of granular starch materials. **ASAE**, St. Joseph, 1997, 18p. ‘

GOUVEIA, J. P. G. de **Avaliação da cinética de secagem de gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) em secador de leito fixo**. 1999. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

LUIKOV, A. V. **Heat and mass transfer in capillary porous bodies**. Pergamon Press, Oxford. 523p. 1966.

MEDEIROS, M. F. D.; SOUSA, E. B. D.; SOUZA, J. S.; JERÔNIMO, C. E. de M. Determinação de propriedades físicas e termodinâmicas de polpas de frutas tropicais: Influência da composição química. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 60. p .213-214, 2000.

MISRA, R.N.; YOUNG, J. H. Numerical solution of simultaneous diffusion and shrinkage during soybean druing. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, e.23, n.5, p.1277-1282. 1980.

MOHSENIN, N.N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers Inc., 407 p. 1980.

MUIR, E.W.; VIRAVANICHAI, S. Specific heat of whet. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v.17, n.2, p.338-342, 1972.

PARK, K. J. **Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem**. 1987. 54f Tese (Livre Docência). Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

QUEIROZ, M. R. **Estudo teórico-experimental da cinética de secagem de bananas**. 1994. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos)

Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RAPUSAS, R. S.; DRISCOLL, R. H. Thermophysical properties of fresh and dried white onion slices. **Journal of Food Engineering**. v.24, p.149-164, 1995.

RATTI, C. Shrinkage drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, v.23, n.1, p. 91-105, 1994.

RIBEIRO, V. S.; SOBRAL, M.C.; ALMEIDA, M.M.; SILVA, G.F. Propriedades físicas de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande: v.4, n.1, p. 1-6, 2002.

SARRIA, D. S.; HONÓRIO, S. L. Condutividade e difusividade térmica do figo (*Ficus carica* L.) “roxo de Valinhos” **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.1, p. 185-194, 2004.

SOUSA, L. H. C. D.; PEREIRA, N. C. Determinação da condutividade térmica efetiva da gelatina em função da umidade em um processo de secagem industrial. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS**,24, v.1, p. 369-374, 1996.

SOUZA FILHO, M. S. M.; ARAGÃO, A. O.; ALVES, R. E.; FILGUEIRAS, H. A. C. **Aspectos de colheita e transformação industrial do pedúnculo de caju (*Anacardium occidentale* L.)** Fortaleza: EMBRAPA-CNPAT, 2002.

STOLF, S. R. Medição de condutividade térmica dos alimentos. **Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos**. Campinas, v.29, n.1, p.67-79, 1972

SUZUKI, K.; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T. e HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root vegetables. **Journal of Food Science**. v.41, p.1189-1194, 1976.

SWEAT, V. E. Thermal properties of foods. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering Properties of Foods**. New York, p. 49- 87. 1986.

WANG, N.; BRENNAN, J.G. Thermal conductivity of potato as a function of moisture content. **Journal of Food Engineering**, v. 17, p. 153-160, 1992.

WEBER, E.A. **Armazenagem agrícola**. Porto Alegre: Kleper Weber Industrial, 1995. 395p.

ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; KOURIS, D.M. Density and porosity of some vegetables during air drying. **Drying Technology**, v.12, n.7, p.1653-1666, 1994.

CAPÍTULO 3

EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO DO PEDÚNCULO DO CAJU

3.1 Introdução

O entendimento do equilíbrio higroscópico por adsorção e dessorção é necessário para definir as condições operacionais no processo de secagem e no armazenamento de alimentos.

A higroscopicidade de produtos sólidos porosos é estudada por meio de equações que descrevem as isotermas de sorção de água, que são representações matemáticas da relação entre o teor de umidade do material em equilíbrio com diferentes valores de atividade de água (a_w) em uma determinada temperatura.

A água é uma substância abundante na natureza e essencial para os seres vivos devido às diversas funções que desempenha. É comumente majoritária na maioria dos alimentos, onde contribui de forma definitiva nas características como textura, aparência e sabor. É um fator importante na deterioração dos alimentos pelo papel que desempenha em diferentes reações químicas e enzimáticas, assim como no desenvolvimento microbiano. A atividade de água (a_w) está relacionada com o teor de umidade do alimento a temperatura constante, por meio de uma isoterma de sorção (WELTI e VERGARA 1997).

O estudo da curva de sorção, que relaciona a atividade de água com o teor de umidade de equilíbrio do produto, fornece informações relevantes para adequação dos parâmetros de secagem. A determinação da atividade de água é uma das medidas mais importantes no processamento e na análise dos materiais biológicos, devido a sua importância no que diz respeito à qualidade e estabilidade do produto. A afinidade existente entre a água e os outros componentes de um determinado produto, define a sua higroscopicidade que é

muito marcante e torna-se uma característica fundamental a influenciar os processos de manuseio, secagem, armazenamento e consumo de materiais biológicos. (TEIXEIRA NETO e QUAST, 1993).

Portanto este capítulo tem como objetivo estudar as isotermas de dessorção de água do caju para temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, e ajustar os dados experimentais aos modelos matemáticos de GAB, BET e Oswin com o propósito de prever o comportamento das isotermas.

3.2 Revisão bibliográfica

3.2.1 Atividade de água

A atividade de água é um parâmetro que determina a quantidade de água disponível para o crescimento microbiano (deteriorantes e/ou não deteriorantes) para o aparecimento de reações indesejáveis como: escurecimento, oxidação e hidrólise (VITTALI, 1987).

O valor máximo da atividade de água é 1 para a água pura. Nos alimentos ricos em água, com a_w acima de 0,90 a formação de soluções diluídas com os alimentos serve de substrato para reações químicas e desenvolvimento microbiano. Quando a a_w está entre 0,40 e 0,80 há aceleração das reações químicas pelo aumento da concentração dos substratos, próximo a 0,60 cessa a atividade microbiana e para a_w inferior a 0,30 atinge-se a zona de adsorção primária. A Figura 3.1 apresenta as velocidades de reação e crescimento microbiano em função da atividade de água.

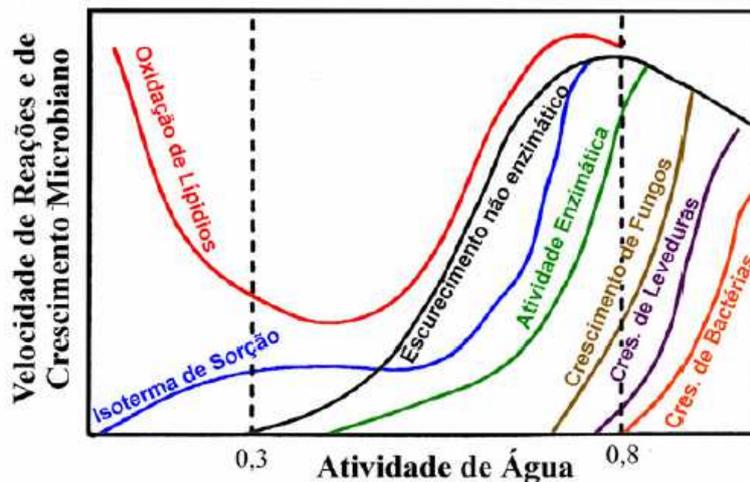


Figura 3.1 – Velocidade de reações e crescimento microbiano em função da atividade de água. Fonte: Bobbio (1992).

Segundo FIOREZE (2004), um dos principais fatores que governam a conservação ou deterioração dos alimentos é a atividade de água, que é definida como a razão entre a pressão de vapor da água na superfície do alimento em

equilíbrio com o ambiente em que se encontra, e a pressão de vapor do ar em contato com uma superfície de água líquida, e é numericamente igual à umidade relativa do ar em equilíbrio com a umidade do produto.

De acordo com SPIESS e WOLF (1983) a atividade de água pode ser obtida pela relação entre a pressão parcial da água em uma camada de ar em equilíbrio com uma solução ou alimento (p) e a pressão de vapor de água (p_o) na mesma temperatura, ou seja:

$$a_w = \frac{p}{p_0} 100 \quad (3.1)$$

a_w - atividade de água

p – pressão de vapor da água no alimento, atm

p_0 - pressão de vapor da água, atm

Deste modo seu valor pode ser determinado a partir da umidade relativa do ar em equilíbrio com o alimento pela seguinte equação.

$$a_w = \frac{UR}{100} \quad (3.2)$$

UR - umidade relativa (%)

As isotermas de sorção são as curvas de equilíbrio, obtidas a partir dos dados de umidade de equilíbrio do material correspondente às umidades relativas ou à atividade de água para uma determinada temperatura.

O conhecimento das curvas de sorção é indispensável para determinar o teor de água final necessário para estabilizar o produto (ALONSO, 2001).

Segundo EIROA (1997) a isoterma de sorção permite o conhecimento do teor de umidade de equilíbrio de um alimento que se encontra exposto a um ambiente de umidade relativa e temperatura conhecidas. Vista de outra maneira a isoterma indica o valor da atividade de água de um alimento que contém uma determinada quantidade de água e é mantido a uma temperatura constante.

3.2.2 Modelos de Isotermas

Com o intuito de prever o comportamento das isotermas, diversos autores propuseram modelos de ajuste de isotermas de sorção. Estes modelos são úteis no conhecimento das características do produto. Em sua maioria são modelos empíricos.

Um grande número de modelos que descrevem as isotermas de sorção são encontrados na literatura, e recomendados por vários autores para predição do teor de umidade de equilíbrio higroscópico de alimentos, dentre eles (KIRANOUDIS 1997; KAYMAK-ERTEKIN e SULTANOGLU, 2000; PARK *et al.*, 1992).

Os modelos matemáticos que descrevem isotermas de sorção são de fundamental importância, pois com certo número de pontos experimentais é importante ajustar uma isoterma teórica e desta forma fazer a correspondência entre teor de umidade do alimento e a atividade de água, e extrapolar valores de difícil determinação experimental (SANTIN, 1996)

Apesar das dificuldades apresentadas pelas equações teóricas, algumas considerações termodinâmicas são indispensáveis. Uma das importantes implicações das equações de isotermas são as energias de ligação de água traduzidas nas energias de adsorção. A outra importante consideração é acerca dos valores de monocamada molecular de água, indicativas da relação com as reações químicas determinantes da deterioração dos materiais biológicos, (BROD, 2003).

Modelo de LANGMUIR

Termodinamicamente falando, a posição simplista da consideração de condição de equilíbrio aplicada a água livre fornece a taxa de evaporação idêntica à taxa de condensação. Baseada nesta premissa, Langmuir propôs a seguinte equação (KEEY 1972).

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C_1 a_w}{1 + C_1 a_w} \quad (3.3)$$

X_e – teor de umidade de equilíbrio, kg.kg^{-1}

X_m – teor de umidade na monocamada, kg.kg^{-1}

a_w – atividade de água

C_1 – constante da equação de Langmuir

Modelo de BET

Ampliando o conceito de Langmuir e tecendo considerações da natureza química da água, BRUNAUER, EMMET e TELLER (1938) propuseram para camadas multimoleculares:

$$X_e = \frac{(X_m C_{bet} a_w)(1 - (n+1)a_w^n + n a_w^{n+1})}{(1 - a_w)(1 + (C_{bet} - 1)a_w - C_{bet} a_w^{n+1})} \quad (3.4)$$

C_{bet} - Constante da equação de BET

Casos especiais da equação 3.4

Quando n é igual a 1, a equação fica reduzida a equação de Langmuir

Quando n tende a infinito, ela se reduz a equação de BET.

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C_{bet} a_w}{(1-a_w)(1+a_w(C_{bet}-1))} \quad (3.5)$$

Modelo de GAB

GUGGHENHEIM (1966), ANDERSON (1946) e de BOER (1953) estenderam as teorias de adsorção física de BET, resultando em uma equação tri paramétrica, que permite um melhor ajuste aos dados de sorção dos alimentos até a atividade de água de 0,9, a equação de GAB (PARK e NOGUEIRA, 1992).

$$X_e = \frac{X_m C_{gab} K_{gab} a_w}{(1-K_{gab} a_w)(1-K_{gab} a_w + C_{gab} K_{gab} a_w)} \quad (3.6)$$

X_e - teor de umidade de equilíbrio, kg kg⁻¹

X_m - teor de umidade na monocamada, kg kg⁻¹

C_{gab} - constante relacionada com o calor de sorção da monocamada

K_{gab} - constante relacionada com o calor total de sorção.

Modelo de HALSEY

HALSEY (1948) desenvolveu um modelo para a condensação das camadas a uma distância relativamente grande da superfície.

$$a_w = \exp\left(\frac{-A_1}{X_e B_1}\right) \quad (3.7)$$

A_1 e B_1 – constantes da equação de Halsey

Modelo de OSWIN

Segundo CHINNAN e BEAUCHAT (1985), o modelo de Oswin se baseia na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal.

$$X_e = A_2 \left(\frac{a_w}{1-a_w} \right)^{B_2} \quad (3.8)$$

A_2 e B_2 – Constantes da equação de Oswin

Modelo de HENDERSON

O modelo de Henderson é uma das equações empírica mais usadas para a predição de isotermas. (ASAE, 1991).

$$1 - a_w = \exp \left[- \left(k_3 X_e^n \right) \right] \quad (3.9)$$

K_3 e n – Constantes da equação de Handerson

Modelo de PELEG

O modelo empírico de quatro parâmetros, tenta conjugar duas tendências em uma equação. (PELEG 1993).

$$X_e = k_1 a_w^{n_1} + k_2 a_w^{n_2} \quad (3.10)$$

K_1 , K_2 , n_1 e n_2 - Constantes da equação de Peleg

Modelo de CHUNG e PFOST

Este modelo é baseado na premissa que a variação na energia livre para a adsorção está relacionada com a umidade, CHUNG e PFOST (1967).

$$\ln a_w = -\frac{A_3}{RT} \exp(-B_3 X_e) \quad (3.11)$$

A_3, B_3 – constantes da equação de Chung e Pfofost

R – constante universal dos gases, $\text{J mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T – Temperatura, K

3.3 Metodologia

As amostras de caju inteiro com teor de umidade inicial de aproximadamente 86 % (base úmida) foram divididas em pequenos pedaços e submetidos a um processo de secagem a 70⁰C em estufa com circulação de ar, para obter amostras com menores teores de umidade. Em intervalos de aproximadamente 30 minutos, amostras individuais foram retiradas da estufa para analisar o teor de umidade e a atividade de água (a_w). O equipamento Novacina foi usado para medição direta da a_w , enquanto que o teor de umidade foi determinado por gravimetria. A amostra foi colocada na célula de medição do equipamento previamente ajustado na temperatura desejada, 20, 30, 40 ou 50 ⁰C. Uma vez que o equilíbrio termodinâmico foi alcançado, a a_w e a temperatura foram obtidos por leitura direta no equipamento.

3.3.1 Modelo matemático

Os modelos de BET (Brunauer, Emmet and Teller) GAB (Guggenheim, Anderson and De Bôer) e Oswin, equações (3.5), (3.6) e (3.8), respectivamente foram ajustados aos dados experimentais do caju através do software Microcal Origin 6.0, para verificar qual deles melhor representava os referidos dados.

Para o modelo de GAB a umidade de monocamada (X_m) foi obtida numericamente, no ponto de inflexão da curva umidade de equilíbrio versus atividade de água, correspondente ao ponto onde a curva derivada dx_e / da_w versus X_e é igual a zero e passa de decrescente a crescente. Fixado este valor para X_m , foi feito o ajuste e determinado os parâmetros C_{gab} e K_{gab} da equação de GAB.

Os parâmetros C_{gab} e K_{gab} foram ajustados em função da temperatura através de equações do tipo Arrhenius.

$$C_{gab} = C_0 \exp\left(\frac{\Delta H_c}{RT}\right) \quad (3.12)$$

$$K_{gab} = K_0 \exp\left(\frac{\Delta H_k}{RT}\right) \quad (3.13)$$

C_{gab}, K_{gab} – constantes da equação de GAB

C_0, K_0 - constantes ajustadas com o efeito da temperatura

H_c, H_k - calor de sorção da água, kJ mol^{-1}

R – constante universal dos gases, $\text{kJ mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

T - temperatura, K

$$\Delta H_c = H_m - H_n \quad (3.14)$$

$$\Delta H_k = \lambda - H_n \quad (3.15)$$

H_m, H_n - calor de sorção de monocamada e multicamada de água, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$

λ - calor de condensação da água pura. kJ mol^{-1} .

A escolha do melhor modelo para o cálculo da umidade de equilíbrio foi baseado no coeficiente de determinação (R^2) e no erro relativo médio (E), que foi obtido pela expressão:

$$E = \frac{100}{ne} \sum_{i=1}^{ne} \frac{|V_E - V_P|}{V_E} \quad (3.16)$$

E – Erro relativo médio

ne – número de dados experimentais

V_E – valor experimental

V_P - valor predito pelo modelo

3.4 Resultados e discussão

Os dados experimentais foram representados na forma X_e (base seca) versus a_w , onde X_e é o teor de umidade de equilíbrio na base seca e a_w representa a atividade de água da amostra em equilíbrio com o ar para uma correspondente temperatura e umidade relativa UR, com $a_w=UR/100$. As Isotermas obtidas encontram-se nas Figuras 3.2 3.3 e 3.4; foi observado que as mesmas apresentam uma forma sigmoide, tipo II da classificação de BET, curvas típicas dos materiais biológicos.

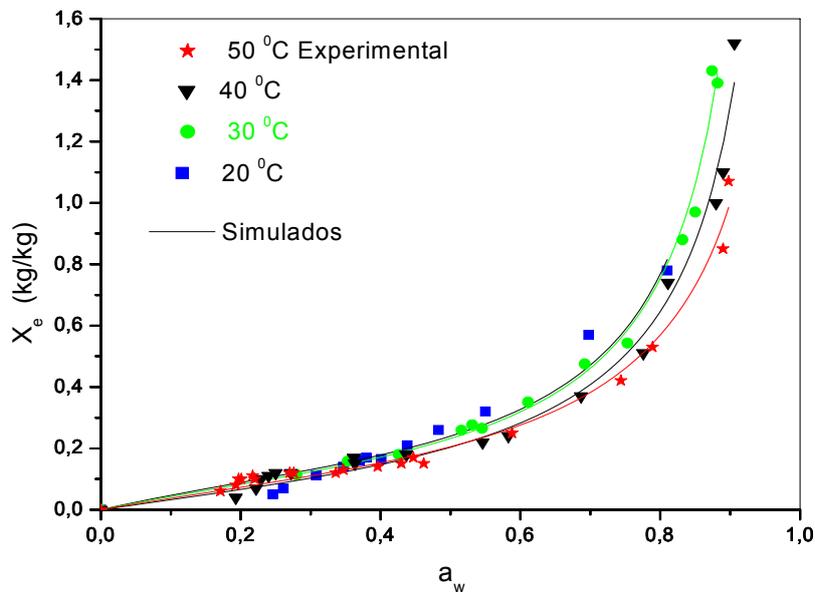


Figura 3.2 – Ajuste das isotermas de dessecção do caju a diferentes temperaturas pelo modelo de GAB.

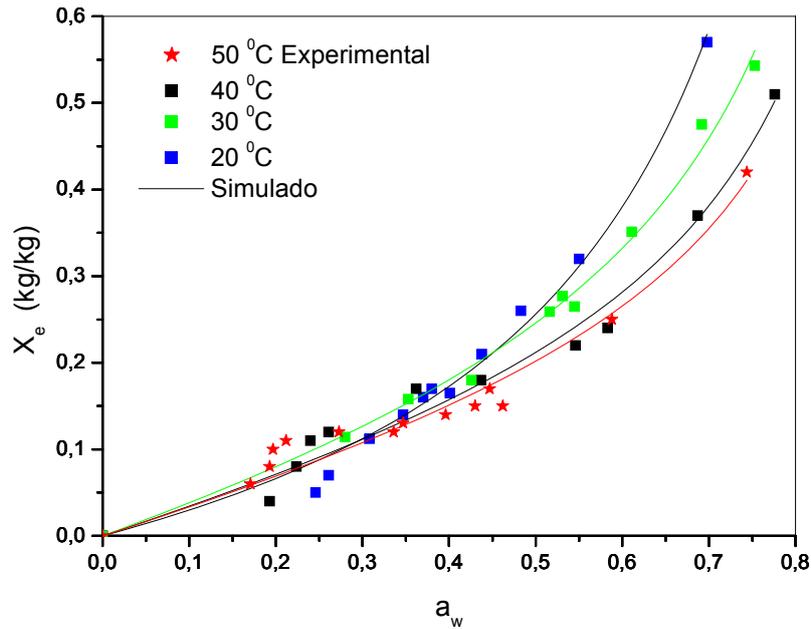


Figura 3.3 – Ajuste das isotermas de desorção do caju a diferentes temperaturas pelo modelo de BET.

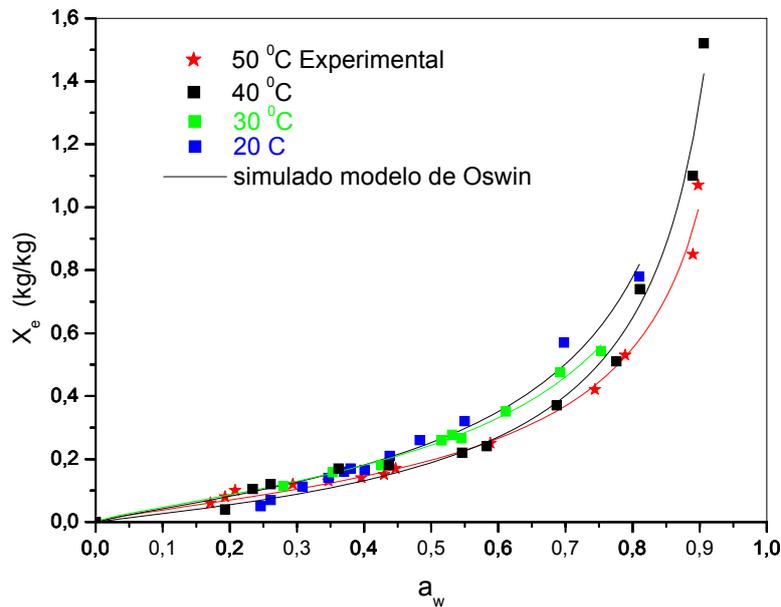


Figura 3.4 – Ajuste das isotermas de desorção do caju a diferentes temperaturas pelo modelo de Oswin.

Na Tabela 3.1 está os valores do teor de umidade da monocamada obtidos numericamente para diferentes temperaturas, conforme procedimento relatado na metodologia. Verifica-se que os valores do teor de umidade da monocamada para

toda faixa de temperatura estudada são bastante próximos, em torno de 0,15. Em virtude disto, para a equação de GAB foi fixado este valor para o teor de umidade da monocamada e feito o ajuste para os outros parâmetros.

Tabela 3.1- Estimativa de X_m para o modelo de GAB realizada através da derivada da curva de equilíbrio.

Temperatura (°C)	Umidade de monocamada (kg.kg ⁻¹)
20	0,16
30	0,15
40	0,15
50	0,15
Média	0,15 ± 0,01

Os resultados dos ajustes para os três modelos são mostrados na Tabela 3.2 conforme pode ser observado na referida tabela e nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4, em geral os três modelos ajustaram bem os dados experimentais, com coeficiente de determinação R^2 acima de 0,96 e erro relativo médio menor que 21%.

Tabela 3.2- Parâmetros de ajuste das isotermas de desorção do caju, coeficiente de determinação e erro relativo médio a diferentes temperaturas, para as equações de GAB, BET e Oswin.

Modelos	Parâmetros	Temperaturas (°C)			
		20	30	40	50
GAB	X_m (*)	0,15	0,15	0,15	0,15
	C_{gab}	3,458	3,048	2,213	2,756
	K_{gab}	1,020	1,018	0,991	0,954
	R^2	0,964	0,989	0,985	0,986
	E(%)	20,76	4,93	16,75	11,75
BET	X_m	0,302	1,102	1,219	1,358
	C_{bet}	0,894	0,334	0,273	0,240
	R^2	0,989	0,992	0,981	0,963
	E(%)	12,58	6,30	14,32	10,93
OSWIN	A	0,252	0,244	0,188	0,196
	B	0,811	0,748	0,893	0,744
	R^2	0,978	0,992	0,985	0,989
	E(%)	17,73	3,78	15,50	6,70

(*) obtido através da derivação da curva de umidade de equilíbrio

Deve ser observado que a isoterma a 30°C apresentou o melhor ajuste, para todos os modelos enquanto que a isoterma a 20°C teve o pior ajuste. Como esperado, a constante C no modelo de GAB e BET e o parâmetro K da equação de GAB decresce com o aumento da temperatura. Todavia para o modelo de BET foram obtidos valores altos de teor de umidade para a monocamada (X_m), não condizentes com a realidade. Por outro lado o modelo de BET está restrito a um intervalo menor de atividade de água (a_w).

Apesar da equação empírica de Oswin ter apresentado menor erro relativo médio e maior coeficiente de determinação, os modelos de GAB e BET têm a vantagem de serem baseados em princípios teóricos. Então suas constantes têm significado físico e são mais úteis para interpretações termodinâmicas. Logo, o modelo de GAB parece ser uma boa opção para previsão do equilíbrio higroscópico do pedúnculo do caju.

A influência da temperatura é observada nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4, que apresentam a mesma tendência, ou seja, para uma mesma atividade de água há uma diminuição do teor de umidade de equilíbrio com o aumento da temperatura.

Nas Tabelas 3.3 e 3.4, encontram-se os valores dos parâmetros C_{gab} e K_{gab} da equação de GAB, estimadas pelo modelo e os calculados em função da temperatura através das Equações 3.17 e 3.18. Estes valores são bastante próximos o que permite usa-los com segurança no programa de simulação matemática.

$$C_{gab} = 0,1232 \exp\left(\frac{964,103}{T}\right) \quad (3.17)$$

C_{gab} – constante da equação de GAB

T – temperatura, °K

$$K_{gab} = 0,4770 \exp\left(\frac{225,683}{T}\right) \quad (3.18)$$

K_{gab} – constante da equação de GAB

T – temperatura, $^{\circ}\text{K}$

Tabela 3.3 – Parâmetro C da equação de GAB ajustado pelo modelo e calculado em função da temperatura.

$T(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{K})$	C_{gab} (ajustado por GAB)	C_{gab} (Calculado)	Desvio
20	293,15	3,458	3,308	0,15
30	303,15	3,048	2,968	0,08
40	313,15	2,213	2,681	0,47
50	323,15	2,756	2,437	0,32

Tabela 3.4 – Parâmetro K da equação de GAB ajustado pelo modelo e calculado em função da temperatura

$T(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{K})$	K_{gab} (ajustado por GAB)	K_{gab} (Calculado)	Desvio
20	293,15	1,020	1,030	0,010
30	303,15	1,018	1,005	0,013
40	313,15	0,991	0,981	0,010
50	323,15	0,954	0,959	0,005

3.5 Conclusões

- De um modo geral o três modelos GAB, BET e Oswin se ajustaram bem aos dados experimentais com coeficiente de determinação maior que 0,96 e erro relativo médio menor que 21%.
- A constante C_{gab} e C_{bet} nos modelos de GAB e BET e o parâmetro K_{gab} no modelo de GAB, diminuem com o aumento da temperatura.
- O melhor ajuste para os três modelos ocorreu à temperatura de 30°C e o pior ajuste a temperatura de 20°C.
- O modelo GAB é uma boa opção para a previsão de equilíbrio higroscópico do caju.

3.6 Referências bibliográficas.

ALONSO, L.F.T. **Algoritmos de seleção e dimensionamento de secadores.** 2001. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Em Engenharia Agrícola. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ANDERSON, R. B. Modifications of the BET equation. **J. Am. Chem. Soc.**, Easton, PA: Mack Printing Company, n.68, 1946.

ASAE / American Society of Agricultural Engineers. Moisture relationship of grains. St. Joseph, p.363, 1991.

BRUNAUER, S. ; EMMETT, P.H. ; TELLER, F. Adsorption of gases in multi-molecular layers. **J. Am. Chem. Soc.**, Easton, v.2, n.60 p.309-319, 1938.

BOBBIO, P.A. **Química do processamento de alimentos.** 2aEd. São Paulo: Varela, 1992. 223p.

BROD, F.P.R. **Avaliação de um secador vibro-fluidizado.** 2003. 335f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CHINNAN, M.S. ; BEAUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, London, n.18, p.83-88, 1985.

CHUNG, D.S.; PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapour by cereal grains and their products. **Transactions of the ASAE.** St Joseph, v.10, n.4, p.149-157, 1967.

De BOER, J.H. **The dynamical character of adsorption.** Oxford: Clarendon Press, 1953.

EIROA M. N. U. Microbiologia de frutas e hortaliças desidratadas. In: **Desidratação de frutas e hortaliças- Manual técnico**. Campinas: ITAL. p. 6.1–6.26, 1997.

FIOREZE, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**, João Pessoa. Editora Universitária- UFPB, 2004. 229p.

GUGGHENHEIM, E.A. **Applications of statistical mechanics**. Oxford: Clarendon Press, 1966. 86p.

HALSEY, G. Physical adsorption on uniform surfaces. **Journal of Chemical Physics**, Woodbury: Amer. Inst. Physics, v.16, n.10, p.931-937, 1948.

KAYMAK-ERTEKIN, F.; SULTANOGLU, M. Moisture sorption isotherm characteristics of peppers, **Journal of Food Engineering**, v.47, p.225-231, 2000.

KEEY, R.B. **Drying principles and practices**. 1ª Ed. Oxford: Pergamon Press, 1972. 358p.

KIRANOUDIS,C.T.; TSAMI,E; MAROULIS,Z.B.; MARINOS-KOURIS,D. Drying kinetics of some fruits, **Drying Technology**, v.15, n.5,p.1399-1418, 1997.

PARK, K.J. ; NOGUEIRA, R.I. Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos. **Engenharia Rural**. Piracicaba: ESALQ/USP, v.3(1), p.81-86, 1992.

PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid Moisture sorption isotherms. **Journal of Food Processing Engineering**, v. 16, n. 1, p.21-37, 1993.

SANTIN, A. P. **Estudo da secagem e da inativação de leveduras**. 1996. 135 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina,. Florianópolis.

SPIESS, W. E. L.; WOLF, W. F. The results of the Cost 90 project on water activity. In: JOWITT, R. **Physical properties of foods**. London and New York: Applied Science Publishers, p.65-91, 1983.

TEXEIRA NETO, R. O.; QUAST, D. G. Isotermas de adsorção de umidade em alimentos. Campinas: ITAL, v. 8, p. 141-197, 1993.

WELTI, J. C.; VERGARA, F.B. Actividad de água concepto y aplicación em alimentos com alto contenid de humedad. In: AGUILERA, J. M. **Temas en tecnologia de alimentos**, cap.1, p. 11-59, 1997.

VITTALI , A. A. **Importância da atividade de água em alimentos**, In: SEMINÁRIO SOBRE ATIVIDADE DE ÁGUA EM ALIMENTOS, Campinas: v.1, ITAL, 1987.

CAPÍTULO 4

CINÉTICA DE SECAGEM

4.1 – Introdução

No processo de secagem o transporte de massa em um meio sólido é bem explicado através da lei 2ª lei de Fick, expressa em termos do gradiente de umidade. Um dos primeiros autores a interpretar o processo de secagem como um fenômeno difusivo com o controle interno foi LEWIS (1921). SHERWOOD (1939), também assumiu que a difusão interna de líquido predomina nos mecanismos internos de transferência de umidade.

Diferentes teorias tentam explicar a cinética de secagem de materiais porosos. O objetivo principal é descrever como a água é transferida do interior do sólido para evaporar na superfície e qual mecanismo de transferência controla o processo de secagem. Os modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para representar a cinética de secagem são os modelos puramente convectivos e os modelos difusivos. A formulação desses modelos, desenvolvida a partir do comportamento de secagem de uma única partícula, geralmente considera todos os parâmetros de transporte constantes, possibilitando uma descrição similar da taxa de secagem. MAYTA *et al* (1996).

Diversos modelos matemáticos podem ser usados para descrever o processo de secagem e ajudar na otimização e construção de secadores. A maioria destes modelos deriva do modelo difusional da 2ª lei de Fick para diferentes geometrias.

Com o objetivo de modelar a cinética de secagem foi utilizado o modelo difusional, solução analítica da 2ª lei de Fick para placa plana, Equação 4.2, tendo em vista a forma geométrica da fatia de caju.

4.2 Revisão bibliográfica

Diversos parâmetros afetam a cinética de secagem de produtos biológicos, tais como: mecanismo de transporte de calor e de água dentro do sólido, coeficiente de difusão variável, transferência simultânea de calor e massa, condições ambientais externas na vizinhança do sólido, encolhimento, entre outros. Assim inserindo todos esses efeitos na construção dos modelos matemáticos, torna-se possível descrever com grande realismo o fenômeno físico e aumentar consideravelmente a confiabilidade dos resultados, (LIMA 1999).

Existem várias maneiras de preservação de alimentos, porém a desidratação e secagem são métodos bastante utilizados desde tempos pré-históricos por nossos antepassados. Estas práticas permitem obter produtos com tempo de vida superior, pois com a redução do teor de umidade se inibe o crescimento microbiano e se retarda as reações químicas deteriorativas. (IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 1999).

O processo de secagem visa à redução do teor de água fazendo com que a atividade de água dos produtos *in natura* diminua drasticamente, aumentando o tempo de conservação e a vida útil do produto, facilitando o seu transporte, manuseio e armazenamento, (PARK *et al.*, 2001).

Segundo OKADA *et al* (1997), secagem é a remoção de água ou qualquer outro líquido, de um material sólido, na forma de vapor, para uma fase gasosa insaturada, através do mecanismo de vaporização térmica, numa temperatura inferior à de ebulição.

4.2.1 Teoria de secagem

Vários mecanismos físicos têm sido propostos para descrever a transferência de água em produtos biológicos. Segundo vários autores entre eles BROOKER *et al* (1974), FORTES e OKOS (1980), FELLOWS (1994),

BARBOSA-CÁNOVAS e VEJA-MERCADO (1996), os mecanismos mais importantes são:

- Movimento de líquidos devido às forças superficiais (difusão capilar);
- Movimento de líquido devido a diferenças na concentração de umidade (difusão líquida);
- Movimento de líquidos devido à difusão de umidade na superfície dos poros (difusão de superfície);
- Movimento de vapor devido a diferenças de concentração de vapor (difusão de vapor);
- Movimento de vapor devido a diferenças de temperatura (difusão térmica);
- Movimento de água e de vapor devido a diferenças de pressão total (fluxo hidrodinâmico).

Cada mecanismo pode predominar em um dado período do processo de secagem. Os mecanismos mais comuns ou que predominam sobre os demais são segundo OKADA (1997), os mecanismos de difusão, para os materiais amorfos, e de capilaridade para os materiais porosos.

4.2.1.1 Difusão líquida

Os modelos de secagem baseados na teoria de difusão líquida têm sido preferidos por muitos pesquisadores na área de secagem de alimentos e grãos (MULET *et al.*, 1989; SERANO e MEDEIROS, 1990; QUEIROZ e NEBRA, 1997).

Normalmente algumas suposições são consideradas para aplicação desses modelos, como:

- (a) A difusividade de água é considerada constante
- (b) O produto é considerado homogêneo
- (c) As dimensões do produto permanecem constantes ao longo do tempo

- (d) O movimento da água resulta de um gradiente de água na partícula
- (e) A superfície do produto entra em equilíbrio imediatamente com o ar de secagem

De acordo com BROOKER *et al.* (1992) a variação de umidade com o tempo de secagem para materiais homogêneos com o coeficiente de difusão constante é representado pela seguinte equação.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \left[\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right] \quad (4.1)$$

X – teor de umidade base seca, kg kg^{-1}

D_{ef} – coeficiente de difusão efetivo, $\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$

t – tempo, min

$c = 0$ para corpos planos, 1 para corpos cilíndricos e 2 para corpos esféricos.

r – coordenada espacial, para corpos cilíndricos e esféricos.

CRANK (1992) mostra a solução analítica para produtos com forma geométrica plana, difusividade constante e com condições iniciais e de contorno apresentadas abaixo.

$X(r, 0) = X_0$, Teor de umidade inicial uniforme

$X\left(\frac{L}{2}, t\right) = X_e$, Condição de equilíbrio na superfície

$\frac{\partial X}{\partial r} = 0$, Condição de simetria

$$X^* = \frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-D_{ef}(2n+1)^2 \frac{\pi^2 t}{L^2}\right) \right] \quad (4.2)$$

X^* - razão de umidade, adimensional

\bar{X} - teor de umidade médio no tempo

X_0 - teor de umidade inicial kg.kg^{-1}

X_e - teor de umidade de equilíbrio, kg.kg^{-1}

D_{ef} - coeficiente de difusão de líquido, $\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$

n - número de termos da série

t - tempo, min

L - espessura da fatia, cm

Observa-se que a solução analítica da Equação 4.1 apresenta-se na forma de uma série infinita e, portanto, o número finito de termos (n) no truncamento poderá determinar a precisão dos resultados.

AZOUBEL (2002) estudando a secagem de caju em fatias de 0,5 cm de espessura a altas temperaturas por curtos tempos (HTST), com pré-tratamento osmótico e sem pré-tratamento osmótico, verificou que o modelo difusional e a equação de Page apresentaram um bom ajuste aos dados experimentais da secagem convectiva do pedúnculo para ambos os tratamentos, e que as amostras tratadas osmoticamente apresentaram maiores perdas de vitamina C, menor atividade de água e densidade mais alta que o produto sem pré-tratamento.

ALSINA *et al* (1997) estudaram a cinética de secagem da banana e verificaram que esta pode ser representada satisfatoriamente por um modelo exponencial simples e que nas condições estudadas a velocidade do ar não afeta significativamente a cinética de secagem e que a constante de secagem, aumenta com o aumento da temperatura.

Estudando a secagem de acerola em monocamada, BRASILEIRO (1999), analisou o efeito da velocidade do ar de secagem que variou de 0,7 a $1,5\text{m.s}^{-1}$ e da temperatura do ar na faixa de 60 a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Verificou uma pequena influência da velocidade do ar, e uma forte influência da temperatura sobre a cinética de secagem, observando também uma considerável mudança nas dimensões da fruta durante a secagem. Propôs equações empíricas para representar a cinética de secagem com encolhimento e sem encolhimento.

KIRANOUDIS *et al.* (1997) estudaram a cinética de secagem de quatro tipos de frutas: maçã, pêra, kiwi e banana, e apresentaram resultados de teor de umidade de equilíbrio para várias condições de secagem, bem como parâmetros da equação de GAB, que foram ajustados a partir dos dados experimentais. Um modelo para descrever a transferência de água dentro do sólido durante a secagem também é reportado.

4.3 Metodologia

4.3.1 Cinética de secagem

O equipamento utilizado foi um secador de leito fixo, cujo esquema é apresentado na Figura 4.1. A câmara de secagem, formada por uma coluna cilíndrica de 17,8cm de diâmetro e 60 cm de altura, possui uma seção inferior tronco-cônica que funciona como um distribuidor de ar onde foram colocadas aleatoriamente esferas de vidro de tamanho uniforme, para uma melhor distribuição do ar de secagem em todo o leito. A câmara foi isolada nas laterais com lã de vidro, e recoberta com chapa flexível de alumínio. O aquecimento do ar de secagem é realizado através de um conjunto de resistências elétricas.

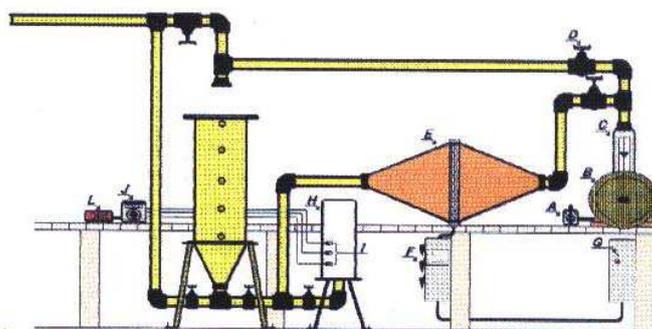


Figura 4.1-Diagrama do equipamento utilizado na realização da secagem convectiva.

legenda

- A- Chave do compressor
- B- Compressor radial
- C- Medidor de vazão
- D- Válvula reguladora
- E- Aquecedor elétrico
- F- Chave das resistências
- G- Chave do sistema de controle
- H- Câmara de secagem
- I- Termopares
- J- Controlador de temperatura
- L- Milivoltímetro digital

Inicialmente os cajus foram cortados em fatias de espessura preestabelecida, de 0,7 e 1 cm. Destas fatias foram retiradas amostras para determinação do teor de umidade inicial.

Preestabelecidas as condições operacionais de temperatura e velocidade do ar de secagem, o equipamento era ligado e se esperava atingir a temperatura de operação, para em seguida se iniciar o processo de secagem.

O suporte da bandeja contendo as fatias de caju distribuídas em uma única camada era colocado no secador com fluxo de ar passando perpendicular às fatias. Em intervalos regulares de tempo a bandeja era retirada e pesada, e retornava rapidamente ao secador, dando continuidade ao processo de secagem. A perda de peso da amostra foi acompanhada, conseqüentemente o seu teor de umidade. Este procedimento ocorreu até a obtenção de níveis bem baixos de teores de umidade, próximos ao equilíbrio.

Os dados da cinética de secagem foram ajustados através do modelo difusional baseado na 2ª Lei de Fick, conforme Equação 4.2 para placa plana, com condições de equilíbrio na superfície, coeficiente de difusão constante e sem levar em consideração o encolhimento do material. Foram utilizados 4 termos da série. O número de termos foi escolhido de modo a assegurar a convergência no valor estimado do coeficiente de difusão

Na entrada e na saída do secador foi colocado termopares inseridos nas fatias de caju, para acompanhar a evolução da temperatura no interior da fatia ao longo do processo de secagem.

4.4 Resultados e discussão

O comportamento cinético da secagem do pedúnculo de caju em camada delgada está representado na Figura 4.2 que ilustra curvas de secagem sob diversas condições operacionais de temperatura, velocidade do ar e espessura da camada. Verifica-se que conforme o esperado a taxa de secagem aumenta com o aumento da temperatura, apesar de praticamente não haver diferença entre as curvas de 50 e 60°C. Isto pode ter ocorrido em virtude da espessura das fatias serem diferentes, o que compensou o efeito da temperatura.

A curva de 75°C apresenta uma taxa de secagem maior que a de 80°C. Este fato pode ser atribuído ao efeito da espessura das fatias já que na secagem a 80°C, a fatia é mais espessa do que a 75°C. Entretanto, se compararmos as curvas a 50 e a 75°C com a mesma espessura, verifica-se o importante efeito da temperatura no aumento da taxa de secagem.

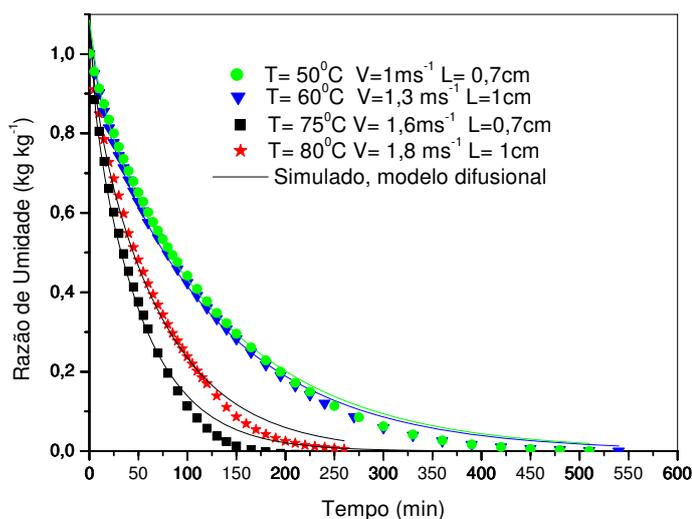


Figura 4.2 –Curvas de secagem ajustadas pelo modelo difusional.

Na Figura 4.3 foi observado que para velocidades variando entre 1 e 1,9 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, não há efeito significativo da variável velocidade, o que permite admitir a hipótese de que o processo é controlado pela difusão de água no interior das fatias de caju. Para velocidades do ar muito baixas, 0,3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, pode-se afirmar que a resistência externa deve ser considerada. Por esse motivo, o modelo difusional, cujos resultados se mostra na Tabela 4.1, foi aplicado a experimentos realizados com velocidades maiores ou igual a 1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, onde esta variável já não influencia na cinética de secagem.

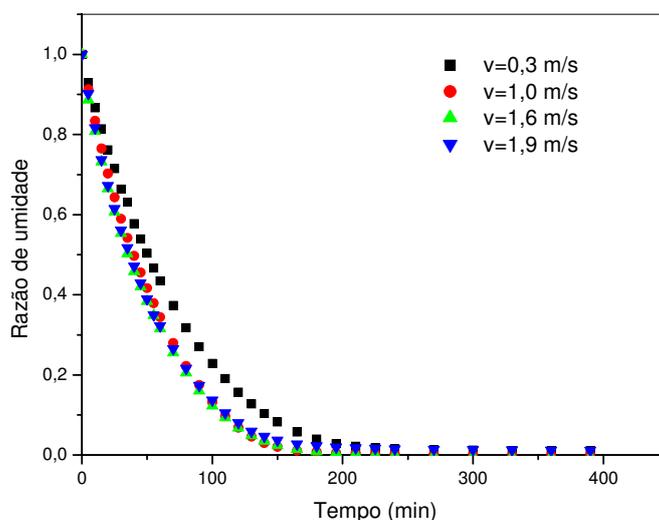


Figura 4.3 – Efeito da velocidade do ar na secagem de fatias de caju para $T=75^{\circ}\text{C}$ e $L=0,7$ cm.

O modelo difusional apresentado na Equação 4.2, foi aplicado às curvas com velocidades elevadas onde a hipótese de concentração de equilíbrio na superfície pode ser aceita.

Na Figura 4.2 verifica-se que o modelo ajusta com boa precisão as curvas experimentais. Na Tabela 4.1 observa-se que os coeficientes de correlação foram maiores que 0,989, confirmando a validade do modelo. O critério de convergência utilizado foi a repetibilidade até a terceira casa decimal no valor ajustado do coeficiente de difusão encontrado, que apresentou valores variando entre $3,8 \times 10^{-4}$ a $13,9 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$, aumentando com o aumento da temperatura. Com relação ao efeito da temperatura foi testada a aplicabilidade da equação de Arrhenius:

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4.3)$$

D_{ef} - Coeficiente de difusão, $\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$

D_0 - Fator de Arrhenius, $\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$

E_a - Energia de Ativação, $\text{kJ mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

R - constante universal dos gases, $\text{kJ mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

T - Temperatura, K

A Equação 4.3 foi aplicada aos valores dos coeficientes de difusão efetiva de água na fatia de caju (Tabela 4.1) encontrando-se uma energia de ativação de 8,44 kcal mol^{-1} , e um D_0 igual a 223,27 $\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$. Este valor está dentro da ordem de magnitude encontrado na literatura para outros produtos agrícolas.

GOUVEIA (1999) estudando o gengibre encontrou valores para a energia de ativação que variaram entre 5,14 e 9,55 kcal mol^{-1} , MAZZA e LEMAGEUR (1980) encontraram uma energia de ativação de 5,18 kcal mol^{-1} para fatias de cebola. DAUDIN (1983) apresentou uma série de resultados de energia de ativação para diversos produtos: abacate 9,55 kcal mol^{-1} , beterraba 6,93 kcal mol^{-1} .

Tabela 4.1 – Valores do coeficiente de difusão do caju para diferentes temperaturas.

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Def $\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$	R^2
50	$3,8 \times 10^{-4}$	0,995
60	$8,0 \times 10^{-4}$	0,997
75	$9,4 \times 10^{-4}$	0,991
80	$13,9 \times 10^{-4}$	0,992

Nas Figuras 4.4 e 4.5 encontra-se a evolução da temperatura no interior da fruta para diferentes condições de operação, temperatura do ar 75 $^{\circ}\text{C}$, velocidade do ar 1,6 m.s^{-1} e espessura da fatia 0,7cm na Figura 4.4. E temperatura do ar 50 $^{\circ}\text{C}$, velocidade do ar 1,0 m.s^{-1} e espessura da fatia 0,7cm

na Figura 4.5. Como se observa nas duas figuras, o tempo necessário para atingir o equilíbrio térmico com o ar de entrada é praticamente o mesmo para alcançar o equilíbrio de transferência de massa (Figura 4.3), aproximadamente 150 minutos, enquanto que na Figura 4.5 é de 350 minutos em virtude da temperatura de secagem ser menor. Quanto à mudança de comportamento na evolução da temperatura verificado aos 50 min na Figura 4.4 e aos 80 min na Figura 4.5, pode ser explicado pelas variações da condutividade e difusividade térmicas com o teor de umidade. Em trabalho anterior (ALSINA *et al.*, 2004), verificaram que as propriedades térmicas do caju dependem fortemente do teor de umidade. Os autores encontraram que para teores de umidade em base seca menores que 2 a difusividade térmica aumenta acentuadamente com a elevação do teor de umidade, enquanto que para teores de umidade maiores que 4 observa-se um ligeiro decréscimo com o aumento do teor de umidade; entre 2 e 4 as propriedades térmicas atingem um valor máximo.

De acordo com estas observações, a mudança de comportamento térmico aos 50 min para 75°C e 80 min para 50°C, corresponde à região de transição, teor de umidade na base seca entre 2 e 4 nas respectivas curvas de secagem, como se observa nas Figuras 4.4 e 4.5.

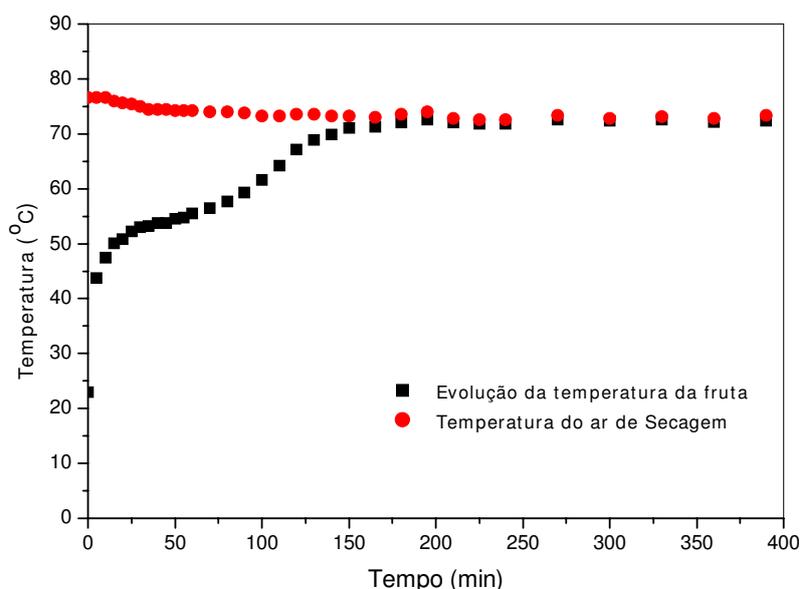


Figura 4.4 – Evolução da temperatura no interior da fatia de caju, $T=75^{\circ}\text{C}$ $V=1,6 \text{ m.s}^{-1}$; $L=0,7 \text{ cm}$.

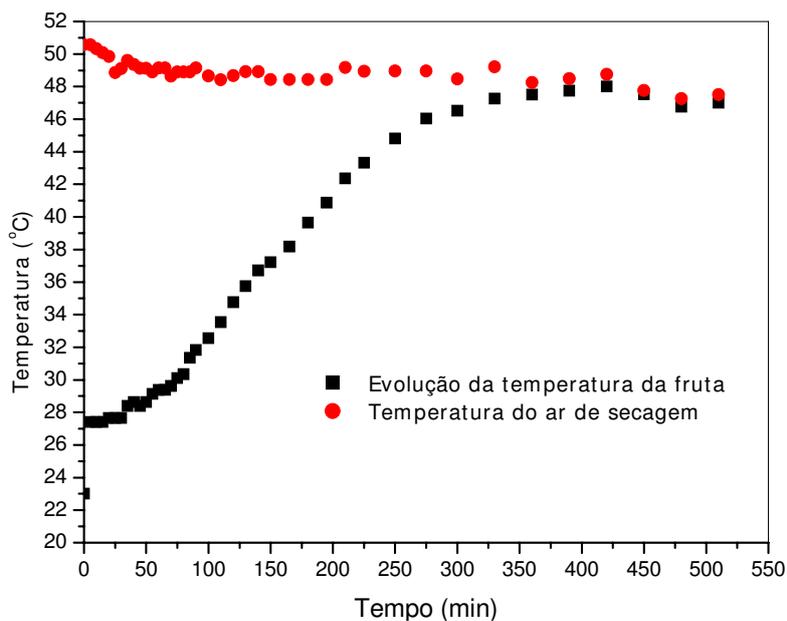


Figura 4.5 – Evolução da temperatura no interior da fatia de caju $T=50^{\circ}\text{C}$, $v=1,0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $L=0,7\text{ cm}$.

4.5 – Conclusões

- O modelo difusional, utilizado para descrever o comportamento cinético durante a secagem, apresentou bom ajuste sendo para tanto uma ferramenta adequada para o desempenho, simulação e otimização de secadores convectivos destinados ao processamento pós colheita do caju.
- O coeficiente de difusão efetivo da água nas fatias de caju se encontra entre $3,8 \times 10^{-4}$ e $13,9 \times 10^{-4}\text{ cm}^2\text{ min}^{-1}$ e apresenta uma energia de ativação $8,4\text{ kcal mol}^{-1}$ na faixa de temperatura de 50 e 80°C .

4.6 - Referências bibliográficas

ALSINA, O. L. S.; SILVA, O. S.; SANTOS J. M. A. **Efeito das condições operacionais na cinética de secagem de fatias de banana**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, 1997, Campina Grande . CDROM.

ALSINA, O. L. S.; ALMEIDA, M.M.; ARAGÃO, R. F., **Estudo das propriedades térmicas da goiaba (*Psidium guajava L.*) e do caju (*Anacardium occidentale L.*)**. in: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 15, 2004, Curitiba. CDROM.

AZOUBEL, P.M. **Influência de pré-tratamentos na obtenção de produtos secos do caju (*Anacardium occidentale L.*)**. 2002. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; VEJA-MERCADO, H. **Dehydration of foods**. New York: Chapman & Hall 1996, 330p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W. e HALL, C. W. **Drying cereal grains**. Connecticut, The AVI Publishing Company, Inc., 1974. 265p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W. e HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Connecticut, The AVI Van Nostrand Reinhold, 1992, 450p.

BRASILEIRO, I. M. N. **Cinética de secagem de acerola “in natura” em monocamada**. 1999. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2.ed. New York Oxford Science Publications, 1992, 414p.

DAUDIN, J. D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaudes. **Science Aliments**. , v.3, n.1, p. 1-36, 1983.

FELLOWS, P. **Tecnología del procesamiento de los alimentos**: Principios y prácticas. Zaragoza, Acribia. 1994. 549 p.

FORTES, M.; OKOS, M. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. In: **Advances in Drying**, Washington. v.1, p.119-154, 1980.

GOUVEIA, J. P. G. de **Avaliação da cinética de secagem de gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) em secador de leito fixo**. 1999. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

IBARZ, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. **Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos**. U.S.A., Tecnominc Publishing Company, 1999. 879p.

KIRANOUDIS, C.T.; TSAMI, E.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Drying kinetics of some fruits, **Drying Technology**, v.15, n.5, p.1399-1418, 1997.

LEWIS, W.K. The rate drying of solid material. **J. Ind. Eng. Chem.** v.13, n5. p. 427-432, 1921.

LIMA, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de banana**. 1999. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas.

MAYTA, S. M. A., MASSARANI, G., PINTO, J.C. Modeling of grain drying in continuous cross-flow sliding bed dryers. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v.74, p.797-805, 1996 .

MAZZA, G., LEMAGUER, M. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. **Journal of Food Technology**, Oxford, v.15, n.2, p.181-194, (1980).

MULET, A.; BERNA, A. ROSSELO, C. Drying of carrots: Drying models. **Drying Technology**, New York, v.7, n.3, p. 537-557, 1989.

OKADA, M.; VITALI, A.A.; TEIXEIRA NETO, R. O.; CARVALHO, R.; JARDIN, D.C.P. Fundamentos sobre secagem de sólidos In: **Desidratação de frutas e hortaliças- Manual técnico**. Campinas: ITAL, 1997.

PARK, K.J.; YADO, M.K.M.; BROD, F.P.R. Estudo da secagem de pêra bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v.21, n.3. p.288-292, 2001.

QUEIROZ, M. R.; NEBRA, S. A. Soluções analíticas e numéricas do modelo de difusão aplicadas a secagem de bananas, **Revista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.17, n.1, p. 74-83, 1997.

SERANO, A. M.; MEDEIROS, G. L. Simplified model for the prediction of drying rates for foods. **Journal of Food Engineering**, Barking, v.12, n.1, p. 1-11, 1990.

SHERWOOD, T.K. Application of theoretical diffusion equations to the drying of solids. **Trans. Am. Inst. Chem. Eng.**, 27, p.310-333, 1939.

CAPÍTULO 5

SECAGEM DE FATIAS DE CAJU EM SECADOR DE BANDEJAS

5.1 Introdução

Os secadores de bandeja constituem uma família importante de secadores convectivos, são caracterizados pela simplicidade de construção e operação e pelo baixo custo de manutenção, sendo constituídos basicamente de uma câmara com isolamento térmico, com sistemas de aquecimento e ventilação do ar através das bandejas. Este tipo de secador é adaptável à secagem de qualquer produto que possa ser posto nas bandejas, sendo muito utilizado para secagem de frutas e hortaliças.

Segundo KHATTAB (1996), uma das dificuldades no uso destes secadores é que a temperatura e a umidade do ar de secagem mudam continuamente quando o ar passa pelas bandejas conduzindo vapor de água do produto. Essas mudanças podem afetar as taxas de secagem do produto nas bandejas que estão em diferentes níveis. Como consequência, haverá uma diferença no teor de umidade final do produto em cada bandeja.

Neste capítulo serão analisados e discutidos os resultados obtidos no secador de bandejas para a secagem das fatias de caju, no que diz respeito às curvas de secagem em cada bandeja, à temperatura da fruta na entrada e saída do secador, à umidade relativa e à temperatura do ar após cada bandeja, estes resultados serão comparados com os valores obtidos por simulação matemática através do programa *Secador*.

O desempenho do secador será analisado através da eficiência energética global, do índice de saturação do ar de secagem, e do teor de umidade do produto após um determinado tempo de operação.

5.2 Revisão bibliográfica

5.2.1 Secadores

Segundo TRAVAGLINE *et al.* (1997) os secadores podem ser classificados de diversas maneiras: (i) de acordo com o fluxo de carga e descarga podem ser contínuos ou intermitentes, (ii) segundo o método de aquecimento podem ser direto ou indireto (iii) e de acordo com o sistema usado para fornecimento de calor: convecção e condução.

FIOREZE (2004) relata que os secadores variam em função da sua finalidade, tipo de produto a ser seco, capacidade de secagem e tipo de energia para aquecimento do ar.

Na Tabela 5.1, são apresentados os tipos de secadores mais adequados para desidratação de alimentos nas formas líquida, pastosas e sólida.

Tabela 5.1– Secadores mais adequados para desidratação de alimentos nas forma líquidas pastosa e sólida.

Tipo de Secador	Tipo de Alimento
Secadores por convecção	
Cabine	Pedaços
Esteira contínuo	Pedaços
Leito Fluidizado	Pedaços pequenos e granulados
Atomização ou pulverização	Líquidos, purês
Secadores de cilindro rotativo	
Atmosférico	Líquidos, purês
Vácuo	Líquidos, purês
Secadores a vácuo	
Vácuo	Pedaços, purês, líquidos
Vácuo contínuo	Líquidos, purês
Liofilização	Pedaços e líquidos

Fonte: MELONI (2003)

5.2.1.1 Secador de bandeja

Os secadores de bandejas consistem de uma câmara de secagem onde são colocadas as bandejas com os produtos a serem secos, que podem ser inteiros ou em pedaços distribuídos em camadas sobre as bandejas. Operam em batelada, ou seja, é preciso desidratar um lote de produto de cada vez (MELONI, 2003),

Nas pequenas e médias fazendas, os secadores de bandejas são largamente usados para secagem de frutas e outros vegetais são caracterizados pela simplicidade de sua construção e operação e pelo baixo custo de manutenção. (KHATTAB, 1996).

Existem dois tipos básicos de secadores de bandejas: (i) bandejas sobre uma base fixa que consiste basicamente de uma câmara de secagem com isolamento térmico apropriado e com sistemas de aquecimento e ventilação do ar circulante sobre as bandejas ou através delas, (ii) bandejas sobre uma base móvel que como o nome já diz, permite a movimentação das bandejas no interior da câmara enquanto se processa a secagem. As bandejas podem apresentar de 0,3 a 1m² de área e dependendo do material a ser desidratado é carregada a razão de 6 a 10 kg/m² de área de bandeja (TRAVAGLINE *et al.*,1997).

5.2.2 Simulação de secagem

O conceito de simulação está intimamente ligado à noção de modelo, o modelo pode ser considerado como sendo o bloco fundamental para se planejar qualquer sistema de simulação do mais simples ao mais complexo. Podemos conceituar modelo como sendo um artifício que permite reproduzir, por meio de equações matemáticas, o comportamento de um determinado sistema. A dimensão e a complexidade do modelo dependem do grau de detalhe com o qual se deseja realizar o estudo, podendo ir desde um simples

trocador de calor até todas as inter-relações existentes numa unidade de processo completo (SATYRO, 1986).

O estudo ou análise de um processo físico normalmente passa por uma modelagem matemática capaz de representar ou simular este processo. Vários parâmetros afetam a cinética de secagem de produtos higroscópicos, tais como: coeficiente de difusão, condições ambientais e encolhimento do produto. Evidentemente quanto maior for o número de parâmetros relevantes incluídos no modelo matemático de um processo, mais próximo estará da situação física real (CARMO, 2000).

O estudo de sistemas de secagem, seu dimensionamento, otimização e a 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 represente satisfatoriamente a perda de umidade do produto durante o período de secagem (AFONSO JR. e CORRÊA, 1999).

O desempenho deve ser analisado para uma larga faixa de condições operacionais. Sendo o trabalho experimental caro, algumas vezes não é possível sua realização, a simulação do processo de secagem através de um modelo matemático é uma valiosa ferramenta para ajudar a prever e otimizar o desempenho de um secador (KHATTAB 1996).

A simulação é uma ferramenta poderosa, pois muitos gastos podem ser poupados. Fazendo-se alguns testes experimentais para validação de um modelo é possível numa etapa posterior realizar simulações de modo a prever, na secagem em camada espessa quais as melhores condições de operação do secador (CAVALCANTI MATA, 1997).

5.2.3 Qualidade do produto

A secagem de frutas é um mercado com grande potencial de crescimento e muito pouco explorado empresarialmente no Brasil. Diversos fatores contribuem para esse tímido mercado e sem dúvida alguma, a oferta de frutas frescas durante o ano todo é a mais significativa, reduzindo com isso o hábito de se consumir frutas secas ou desidratadas. Além disso, a falta de *marketing* do produto, a pouca atratividade e a falta de padrão de qualidade não permitiram o desenvolvimento deste mercado (MELONI, 2003).

A secagem tem por objetivo assegurar a conservação da fruta por meio da redução do seu teor de água. Essa redução deve ser efetuada até um ponto, onde a concentração de açúcares, ácidos, sais e outros componentes seja suficientemente elevada para reduzir a atividade de água e inibir, portanto, o desenvolvimento de microorganismos. Deve, ainda, conferir ao produto final características organolépticas próprias e preservar ao máximo o seu valor nutricional (TRAVAGLINE *et al.*, 1993).

Os principais indicadores da qualidade de frutas desidratadas são: cor, sabor, aroma, textura, capacidade de reidratação, propriedades estruturais (porosidade, vitrificação, aderência, aparência) características nutricionais e estabilidade microbiológica (KARATHANOS *et al.*, 1995).

5.3 Metodologia

5.3.1 Secagem convectiva no secador de bandejas

O equipamento utilizado para a realização dos testes de secagem das fatias de caju foi o secador convectivo descrito no Capítulo 4.

Inicialmente o caju foi cortado em fatias com espessura igual a 1 cm e amostras foram retiradas para determinação do teor de umidade inicial; em seguida as fatias de caju foram colocadas nas bandejas do secador em camadas de diferentes espessuras: 1, 2 e 3 cm. Atingidas as condições operacionais de temperatura e velocidades do ar preestabelecidas, o suporte contendo as bandejas com as fatias de caju, (Figura 5.1a) foi colocado na câmara de secagem e em intervalos regulares de tempo, o suporte era retirado, e as bandejas pesadas individualmente e rapidamente recolocadas no secador. Por gravimetria a quantidade de água evaporada era quantificada e conseqüentemente o teor de umidade da amostra.

Nos furos laterais existentes na câmara de secagem após cada bandeja foram colocados sensores de umidade relativa e temperatura modelo SHT75, fabricado pela companhia *SENSIRION*, (Figura 5.2). Um sensor do mesmo tipo foi instalado no interior do laboratório para acompanhar a variação de temperatura e umidade relativa ambiente. A cada 5 minutos os sensores registravam as temperaturas e umidades relativas no interior do secador e no ambiente e estes valores eram enviados através de uma placa de aquisição de dados para um terminal de computador.

Na entrada de ar do secador e na saída deste, ou seja, antes da primeira bandeja e após a última, foram colocados termopares inseridos no centro das fatias de caju, para acompanhar a evolução da temperatura no interior da fatia nestas duas posições.

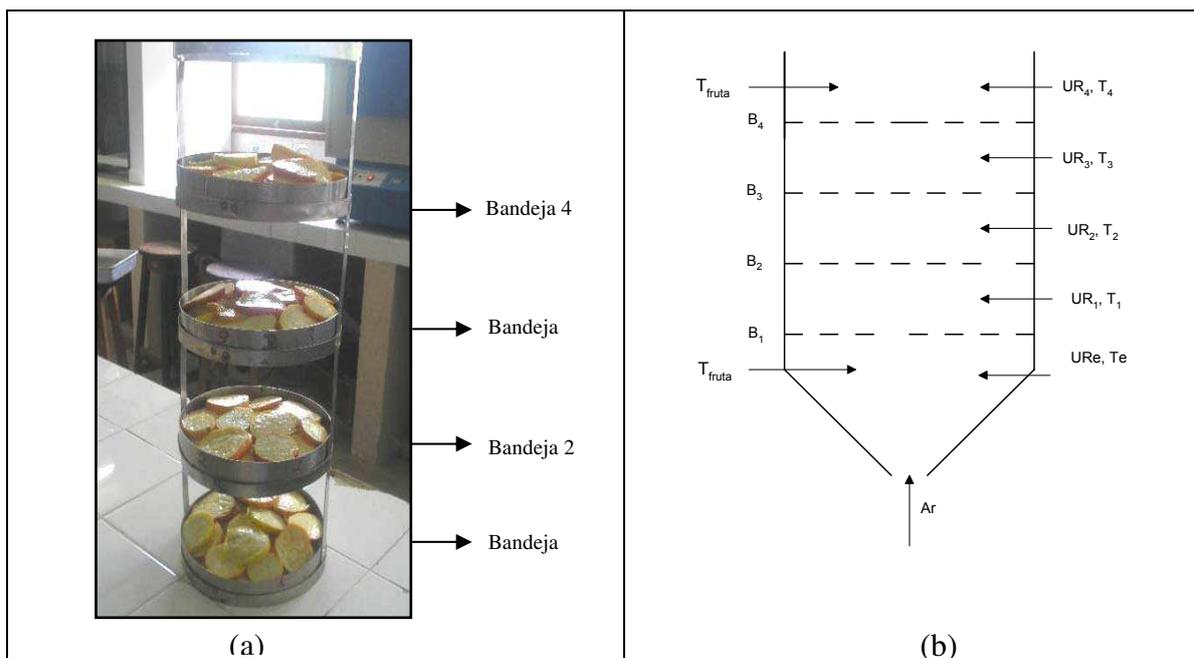


Figura 5.1 – (a) Detalhe do conjunto de bandejas. (b) Esquema do secador mostrando a distribuição dos sensores de temperatura e umidade relativa.

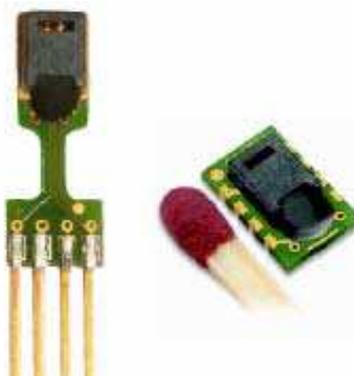


Figura 5.2 - Detalhe do sensor de umidade e temperatura, modelo SHT75

5.3.2 Planejamento experimental

Visando analisar a influência das variáveis de entrada, temperatura do ar de secagem, velocidade do ar de secagem e altura da camada de caju no secador experimental, foi estabelecido o planejamento fatorial 2^3 , mais três experimentos no ponto central, resultando desta forma em um planejamento com 11 experimentos como mostra a Tabela 5.2, nos níveis codificados e reais.

Tabela 5.2 - Matriz planejamento com os valores das variáveis de entrada codificados e reais.

Ensaio	Temperatura do ar (°C)		Velocidade do ar (m.min ⁻¹)		Altura da camada (cm)	
	codificado	real	codificado	real	codificado	real
1	(+1)	80	(+1)	1,8	(+1)	3
2	(-1)	60	(+1)	1,8	(+1)	3
3	(+1)	80	(-1)	1,0	(+1)	3
4	(-1)	60	(-1)	1,0	(+1)	3
5	(+1)	80	(+1)	1,8	(-1)	1
6	(-1)	60	(+1)	1,8	(-1)	1
7	(+1)	80	(-1)	1,0	(-1)	1
8	(-1)	60	(-1)	1,0	(-1)	1
9	0	70	0	1,4	0	2
10	0	70	0	1,4	0	2
11	0	70	0	1,4	0	2

A partir dos resultados obtidos nos estudos cinéticos, foram estabelecidos os níveis da temperatura e velocidade do ar de secagem e da espessura da camada. Como mostrado no Capítulo 4 a partir de velocidades superiores a 1 ms⁻¹ a resistência externa já não é importante, e o limite superior de 1,8 ms⁻¹ foi determinado pela capacidade do ventilador. O número máximo de camadas foi definido de tal forma a não causar compressão sobre o empilhamento.

5.3.3 Eficiência energética (η)

A eficiência energética expressa a relação entre o calor necessário para a evaporação da umidade contida no produto e o calor cedido pelo ar.

A eficiência energética instantânea do secador foi determinada segundo CALÇADA et al. (1996) através da Equação 5.1

$$\eta = 1 - \frac{T_s}{T_0} \quad (5.1)$$

η - Eficiência energética instantânea, %

T_s – Temperatura do ar na saída do secador, °C

T_0 – Temperatura do ar na entrada do secador, °C

Eficiência energética global média do secador é dada por:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^t \eta dt \quad (5.2)$$

$\bar{\eta}$ - Eficiência energética global média do secador, %

t – tempo necessário para o teor de umidade da fruta, atingir 10% do teor de umidade inicial em base seca.

Este critério foi adotado de modo a abranger todos os ensaios da matriz experimental.

5.3.4 Índice de saturação do ar de secagem (Φ)

O índice de saturação indica o grau de aproveitamento do ar de secagem, ou seja o quanto o ar de secagem se encontra longe da saturação. E é determinado pela equação (5.3)

$$\Phi = \frac{W_s}{W_{sat}} \quad (5.3)$$

Φ - Índice de Saturação, %

W_s – taxa de evaporação real, kg min^{-1}

W_{sat} – taxa de evaporação se o ar saísse saturado, kg min^{-1}

O índice de saturação médio foi determinado através da equação para um tempo de operação de 270 minutos, em todos os experimentos.

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^t \Phi dt \quad (5.4)$$

$\bar{\Phi}$ - Índice de saturação médio, %

t - tempo de operação igual a 270 min para todos os experimentos realizados.

5.3.5 Teor de umidade médio após 300 minutos (X_{300})

Para efeitos de avaliação do desempenho do secador foi utilizado como um dos critérios o teor de umidade médio do caju nas 4 bandejas aos 300 minutos de operação. Tempo escolhido de modo a incluir na análise todos os ensaios realizados.

Em qualquer tempo a umidade do produto é calculada através da Equação 5.5

$$X(t) = \frac{(m_p(t) - m_s)}{m_s} \quad (5.5)$$

$X_{(t)}$ - teor de umidade em um determinado tempo t , kg kg⁻¹

$m_{p(t)}$ - massa do produto no tempo t (kg)

m_s - massa de sólido seco (kg)

O valor médio do teor de umidade entre as bandejas foi calculado pela Equação 5.6

$$\bar{X}(t) = \frac{\sum m_s(i)X(i)}{\sum_{i=1}^4 m_s(i)} \quad (5.6)$$

$\bar{X}_{(t)}$ - teor de umidade médio para um tempo t (300 min) bs

m_s massa de sólido seco na bandeja i

5.3.6 Simulação de secagem em secador de bandejas

Foi estimada a variação do teor de umidade e a evolução da temperatura do caju no secador de bandejas, como também a umidade relativa e a temperatura do ar de secagem ao longo das bandejas do secador por modelagem e simulação.

O modelo de secagem utilizado foi proposto por SOKHANSANJ (1984), onde um conjunto de equações diferenciais parciais representando os balanços de massa e energia em leito fixo, tomando como referência gás e sólidos secos em um elemento de volume de fase, na qual as variáveis dependentes são as umidades e as temperaturas das fases gás e sólida; as equações foram obtidas a partir do modelo geral de secagem.

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = \frac{R_m}{\rho_p(1-\varepsilon)} \quad (5.7)$$

\bar{X} - teor de umidade médio da fruta, no tempo t , kg kg^{-1}

t - tempo, min

R_m - taxa de secagem, $\text{kg min}^{-1} \text{m}^{-3}$

ρ_p - massa específica do produto, kg m^{-3}

ε - porosidade, adimensional

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{-R_m}{g_a} \quad (5.8)$$

H - umidade absoluta do ar, kg/kg

x - distância, m

g_a - fluxo de ar, $\text{kg min}^{-1} \text{m}^{-2}$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{ha(1-\varepsilon)(T-\theta) + C_l R_m \theta}{\rho_p(1-\varepsilon)C_p} \quad (5.9)$$

θ - temperatura da fruta, $^{\circ}\text{C}$

h - coeficiente de transferência de calor, $\text{W m}^{-2} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

a - área específica, m^{-1}

T - temperatura, $^{\circ}\text{C}$

C_l - calor específico da água, $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

C_p - calor específico do produto, $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

X - teor de umidade da fruta kg kg^{-1}

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-R_m[C_v T + h_l v] - ha(1-\varepsilon)(T-\theta)}{g_a C_a + g_a H C_v} \quad (5.10)$$

T - temperatura do ar, $^{\circ}\text{C}$

C_v - calor específico do vapor, $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

h_l - calor latente de vaporização da água, J kg^{-1}

C_a - calor específico do ar, $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

H - umidade absoluta do ar, kg/kg

O coeficiente de transferência de calor foi calculado através da Equação 5.11 segundo WHITAKER (1972).

$$h = \frac{N_u k (1 - \varepsilon)}{6L\varepsilon} \quad (5.11)$$

h – coeficiente de transferência de calor, $W m^{-2} ^\circ C^{-1}$

k – condutividade térmica $W m^{-1} ^\circ C^{-1}$

L - espessura, m

ε - porosidade, %

$$N_u = \left(0,4R_e^{1/2} + 0,2R_e^{2/3} + P_r^{0,4} \right) \quad (5.12)$$

N_u - número adimensional de Nusselt

R_e – número de Reynolds

P_r – número de Prandtl

A taxa de secagem R_m foi calculada mediante derivação no tempo da Equação 4.2

$$X^* = \frac{\bar{X} - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-Def (2n+1)^2 \frac{\pi^2 t}{L^2} \right) \right] \quad (4.2)$$

A $\frac{\partial \bar{X}}{\partial t}$ obtida foi substituída na Equação 5.7, resultando a seguinte equação para R_m .

$$R_m = \frac{\partial \bar{X}}{\partial t} \rho_p (1 - \varepsilon) \quad (5.13)$$

R_m - taxa de secagem, $\text{kg min}^{-1}\text{m}^{-3}$

\bar{X} - teor de umidade médio no tempo

t - tempo, min

ρ_p - densidade do produto kg m^{-3}

ε - porosidade, %

O Sistema de equações diferenciais foi resolvido através da sub-rotina do IVPRK, esta sub-rotina é utilizada para resolver problemas de valores iniciais usando o método de Runge-Kutta de 5ª e 6ª ordem.

No programa *Secador*, desenvolvido em linguagem FORTRAN por CAVALCANTE (1999), foram realizadas algumas modificações e acrescentadas as seguintes sub-rotinas para implementar no modelo as variações das propriedades físicas e térmicas do caju em função do teor de umidade: (i) calor específico, Equação 2.10; (ii) coeficiente de difusão variável, Equação 4.3; (iii) umidade de equilíbrio, Equações 3.6, 3.12 e 3.13; (iv) cinética de secagem Equação 4.2.

O fluxograma do programa *Secador*, esta representado na Figura 5.2a

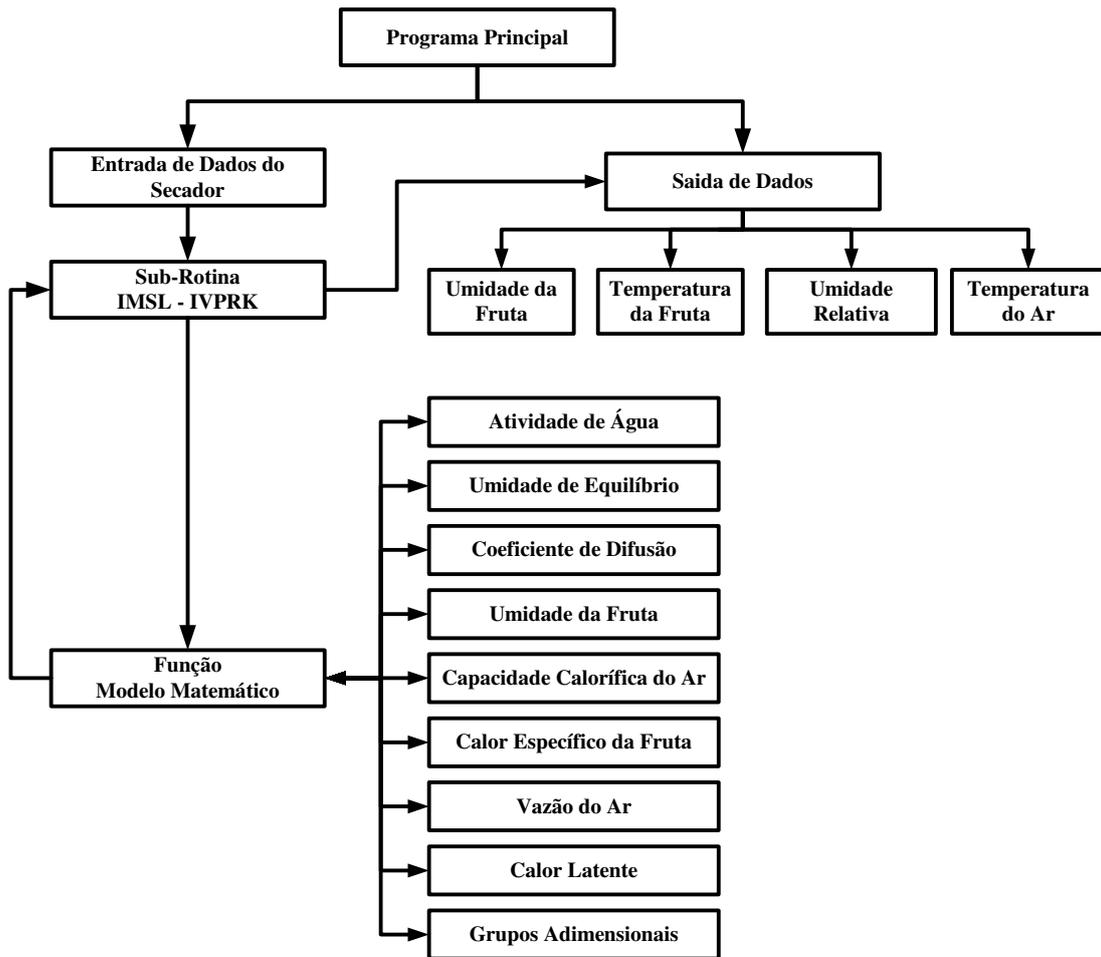


Figura 5.2a – Fluxograma do programa

5.4 Resultados e discussão

5.4.1 Secagem convectiva

Nas Figuras 5.3 a 5.5 são mostrados: (a) as curvas de secagem do caju nas quatro bandejas do secador, (b) a evolução da temperatura da fruta na entrada e na saída do secador, (c) a umidade relativa do ar de secagem após cada bandeja e (d) a temperatura do ar de secagem para as quatro bandejas. Os três ensaios representados nas figuras foram escolhidos por corresponder ao ponto central (Figura 5.3), ao ensaio com as condições mais favoráveis à secagem: maior temperatura, maior velocidade do ar de secagem e menor

altura da camada (Figura 5.4) e as condições menos favoráveis, menor temperatura, menor velocidade e maior altura da camada. (Figura 5.5).

Os ensaios restantes que constam na matriz experimental se encontram no Apêndice A.

Verifica-se de um modo geral o mesmo comportamento nas curvas das Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e em todas do (Apêndice A). A taxa de secagem na bandeja 1 é mais elevada que nas restantes. Por outro lado, a temperatura do ar e da fruta e a umidade relativa do ar apresenta um período de evolução rápida seguido de um outro período mais lento.

Comparando a Figura 5.3, que representa um ensaio referente ao ponto central do planeamento experimental, com as Figuras A7 e A8 (Apêndice A), correspondentes às repetições, pode-se observar uma boa reprodutibilidade. As pequenas diferenças observadas na Figura A7 podem ser atribuídas ao teor de umidade inicial do produto, em torno de 6 bs., que neste ensaio foi inferior aos outros dois de aproximadamente 7,5 bs.

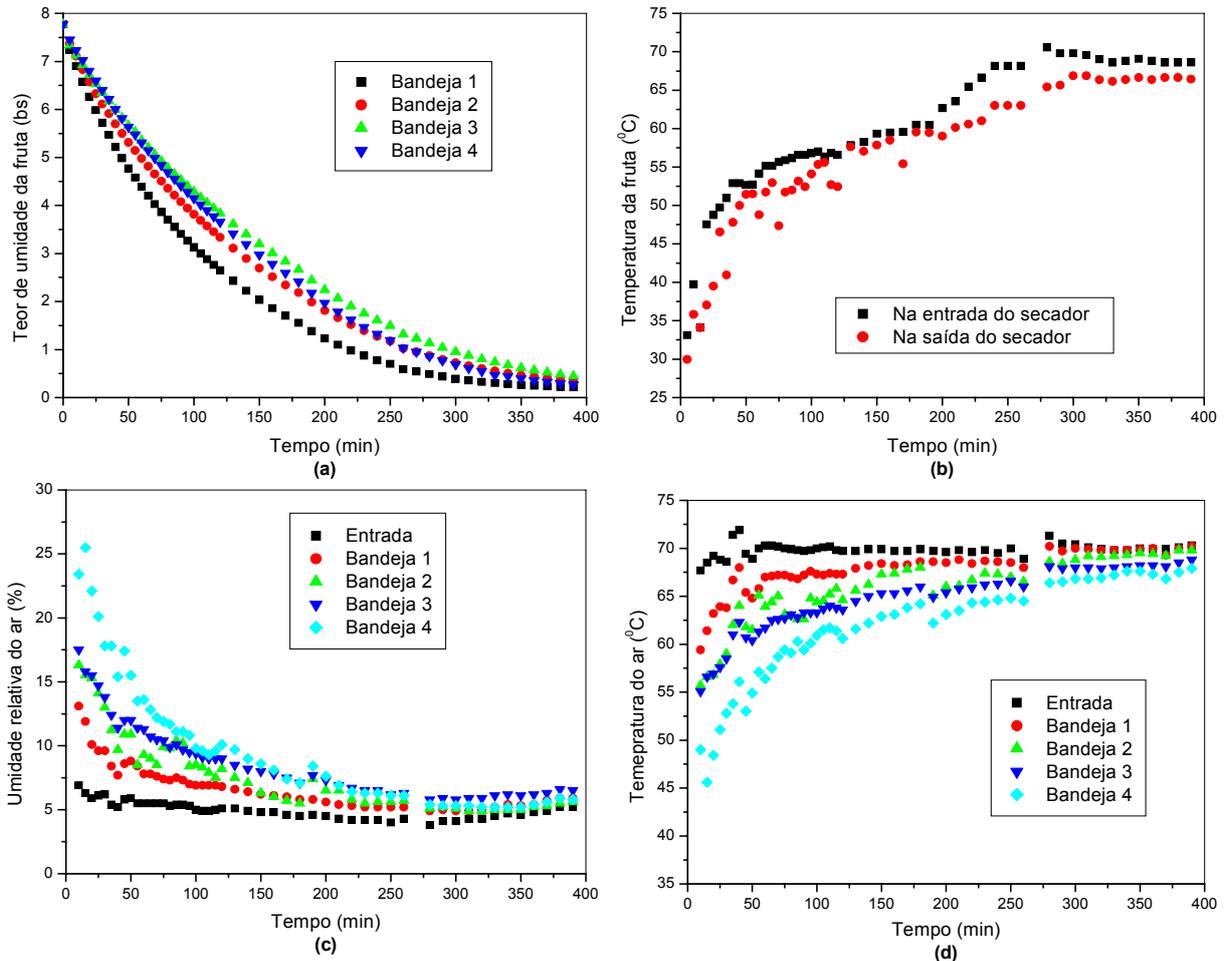


Figura 5.3 – Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 70^{\circ}\text{C}$; $V = 1,4 \text{ m s}^{-1}$; $L = 2\text{cm}$

Para a condição mais favorável à secagem ($T=80^{\circ}\text{C}$, $V=1,8 \text{ ms}^{-1}$ e $L=1\text{cm}$), representada na Figura 5.4, observa-se que a temperatura e umidade da fruta atingem condições próximas ao equilíbrio em torno de 200 minutos. Com relação às condições do ar, observa-se que após 100 minutos a umidade relativa é bastante baixa, em torno de 5%. Já a temperatura do ar nas quatro bandejas praticamente permanece estável a partir de 150 minutos, com valores próximos ao de entrada do ar. Nesta condição os valores da temperatura e umidade nas diferentes bandejas são bastante próximos.

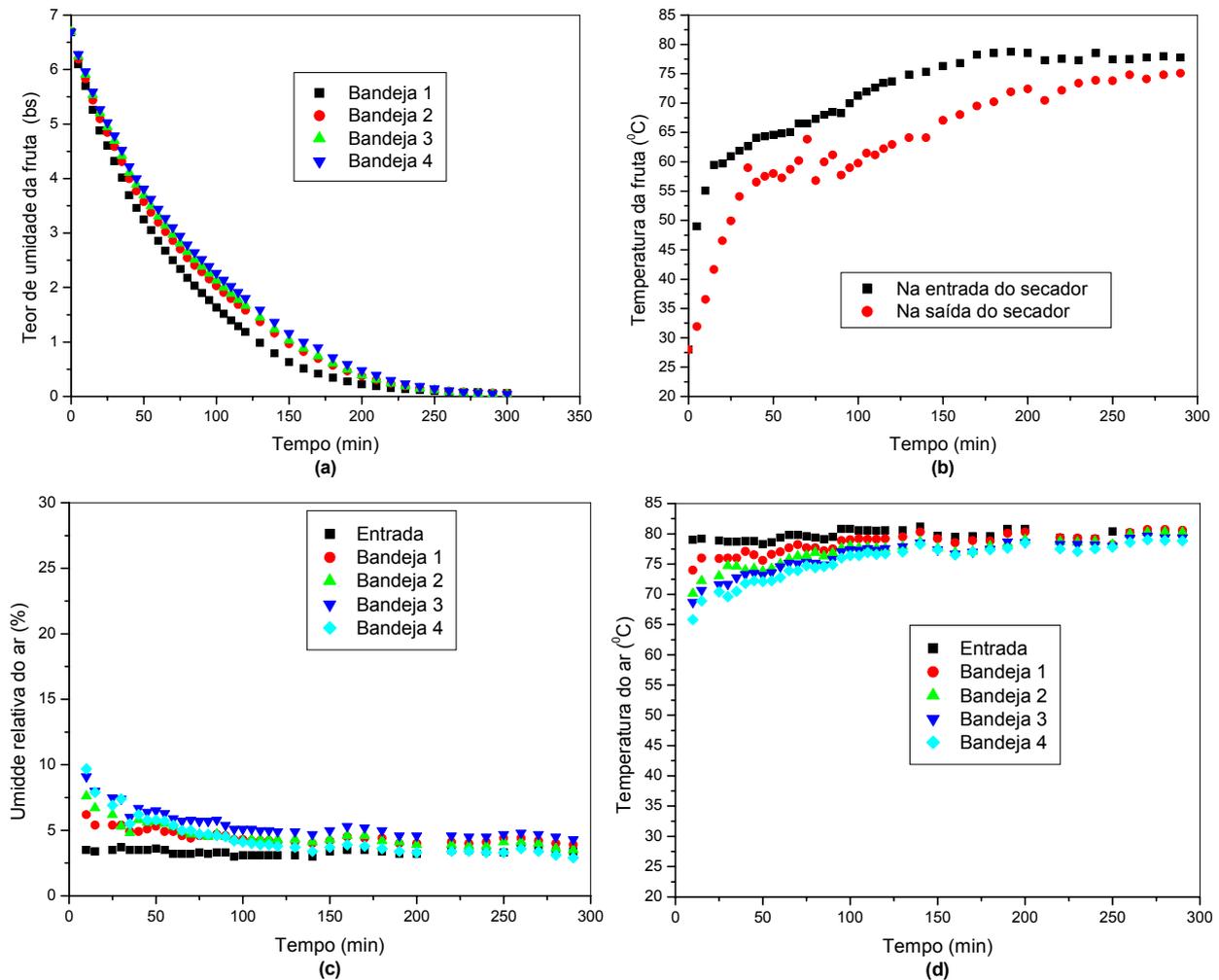


Figura 5.4 – Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 80^{\circ}\text{C}$; $V = 1,8 \text{ m s}^{-1}$; $L = 1 \text{ cm}$

Analisando os resultados obtidos na condição menos favorável ($T=60^{\circ}\text{C}$, $V=1 \text{ ms}^{-1}$ e $L=3\text{cm}$), Figura 5.5, observa-se uma evolução mais lenta que no caso discutido anteriormente. Há ainda um maior distanciamento entre os valores medidos nas diferentes bandejas com relação a situação mais favorável à secagem. Aos 350 minutos as taxas de secagem indicam que ainda encontra-se distante do equilíbrio. Verifica-se um comportamento análogo com relação a temperatura da fruta e as condições do ar.

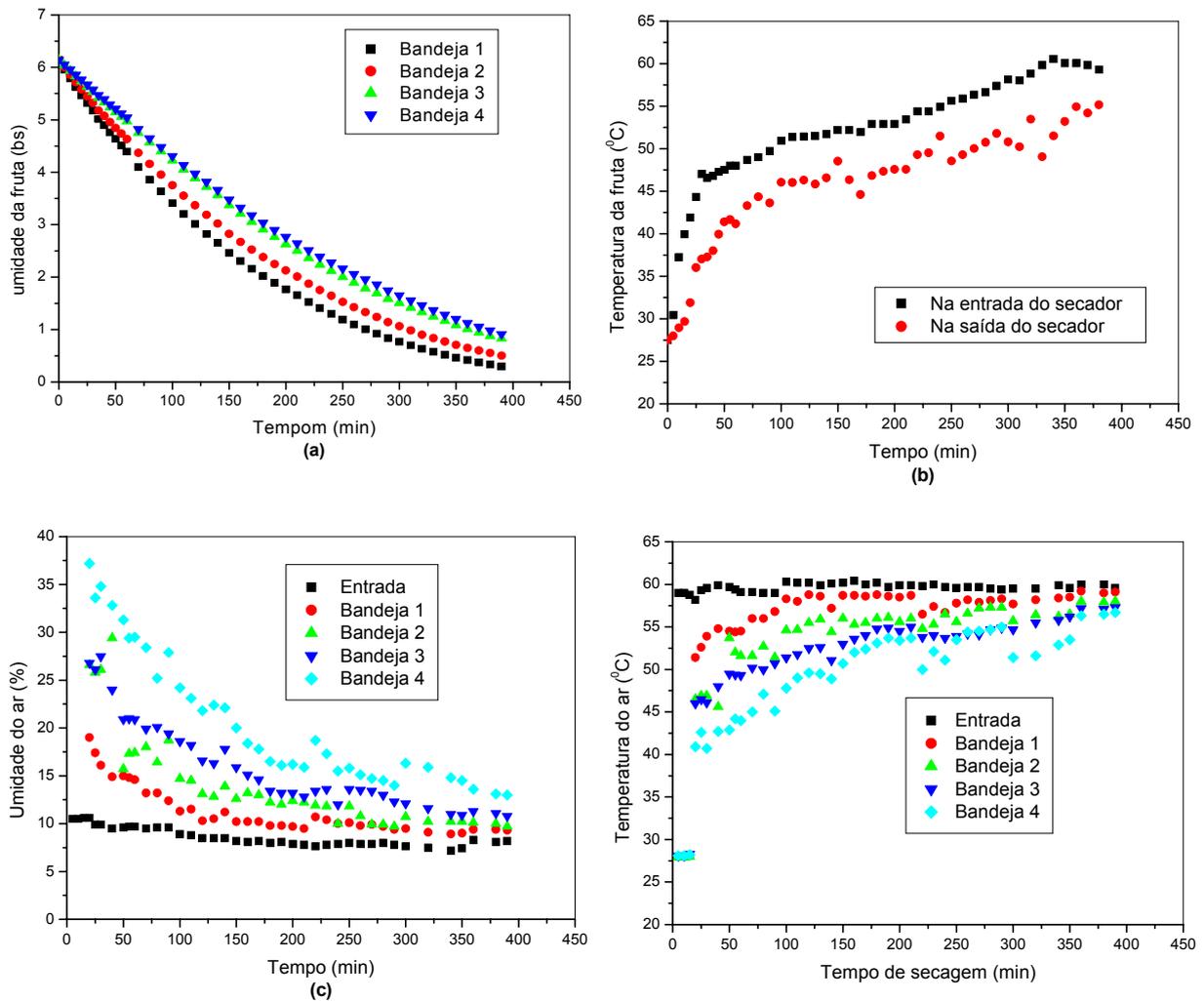


Figura 5.5 – Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 60^{\circ}\text{C}$; $V = 1 \text{ m s}^{-1}$; $L = 3 \text{ cm}$

Como esperado, o ponto central representado na Figura 5.3 apresenta um comportamento intermediário, atingindo condições próximas ao equilíbrio aos 300 minutos enquanto que as diferenças de valores medidos nas quatro bandejas se encontram entre aqueles observados nos casos anteriores.

As tendências assinaladas acima podem ser confirmadas através dos experimentos realizados com as outras condições especificadas na matriz experimental, que se encontram no apêndice A.

5.4.2 Desempenho do secador

Para analisar o desempenho do secador de bandejas na secagem de fatias de caju foram utilizados três critérios:

1. A eficiência energética global instantânea e média.
2. O índice de saturação do ar de secagem instantâneo e médio.
3. Teor de umidade do produto, após um determinado tempo de operação.

5.4.2.1 Eficiência energética instantânea(η)

Na Figura 5.6 é apresentada eficiência energética instantânea para os ensaios referente ao ponto central. Pode-se observar que a eficiência instantânea em geral apresenta uma boa reprodutibilidade na maior parte do processo. O valor da eficiência instantânea variou entre 35% no início da secagem até aproximadamente 7% nas ultimas etapas.

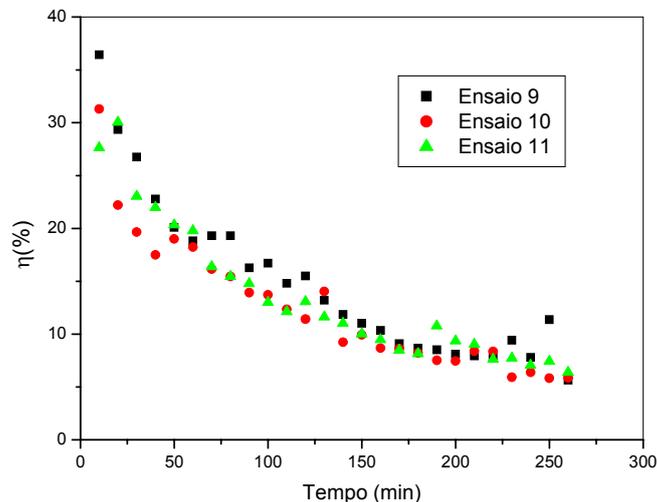


Figura 5.6 – Eficiência energética instantânea para os ensaios referente ao ponto central. $T= 70^{\circ}\text{C}$; $v=1,4\text{ ms}^{-1}$; $L= 2\text{cm}$.

Os ensaios apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8 foram escolhidos por representar a evolução temporal da eficiência energética global instantânea

para as condições mais favorável à secagem ($T=80^{\circ}\text{C}$, $V=1,8\text{ ms}^{-1}$ e $L=1\text{cm}$), e a menos favorável ($T=60^{\circ}\text{C}$, $V=1\text{ ms}^{-1}$ e $L=3\text{cm}$) respectivamente, previamente selecionados da matriz planejamento. Os outros ensaios encontram-se no Apêndice B.

Para a condição mais favorável à secagem Figura 5.7 observa-se uma eficiência térmica global bastante baixa, pois o ar sai do secador ainda com elevado poder de secagem, muito distante da saturação, desta forma grande quantidade de energia disponível é desperdiçada.

Observa-se que a eficiência energética cai rapidamente e que aos 150 minutos praticamente o processo torna-se ineficiente do ponto de vista energético. A eficiência é neste caso menor que no ponto central variando entre 20% nos instantes iniciais caindo até valores inferiores a 2% no final.

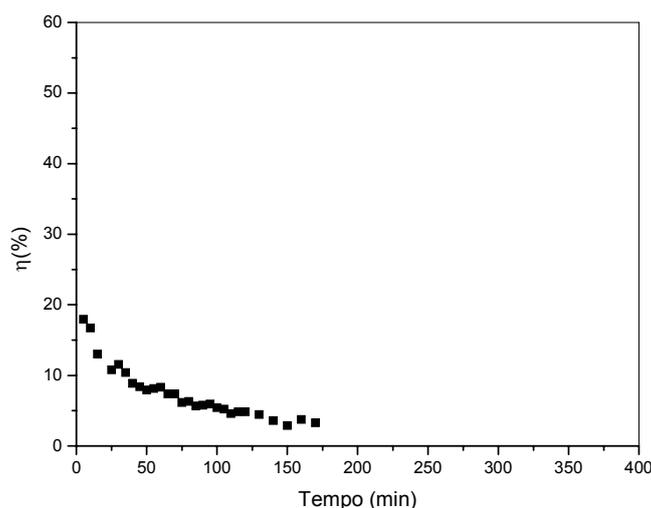


Figura 5.7 - Eficiência energética global do secador, para $T= 80^{\circ}\text{C}$; $V= 1,8\text{m.s}^{-1}$ $L=1\text{cm}$.

Para a condição menos favorável à secagem, Figura 5.8, percebe-se uma melhor eficiência energética, devido a diminuição da velocidade do ar de secagem e o aumento da altura da camada nas bandejas do secador, que favorece um melhor aproveitamento energético, variando entre 52% no início e 5% no final.

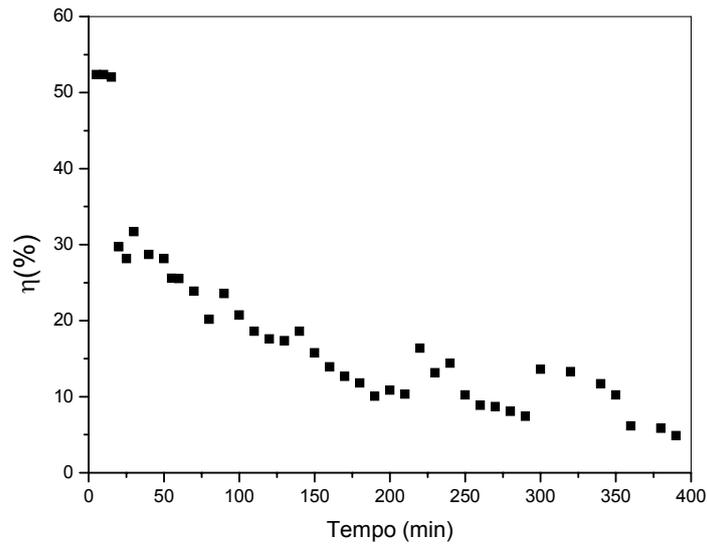


Figura 5.8 - Eficiência energética global do secador para $T=60^{\circ}\text{C}$; $V=1\text{m.s}^{-1}$ $L=3\text{cm}$.

5.4.2.2 Índice de saturação instantâneo (ϕ)

O índice de saturação indica o grau de aproveitamento do ar de secagem, ou seja o quanto o ar se encontra longe da saturação.

A Figura 5.9 indica o índice de saturação instantâneo para os ensaios referente ao ponto central. Analogamente ao caso da eficiência energética podemos observar uma boa reprodutibilidade dos dados. O comportamento dos dados é em geral semelhante ao da eficiência energética.

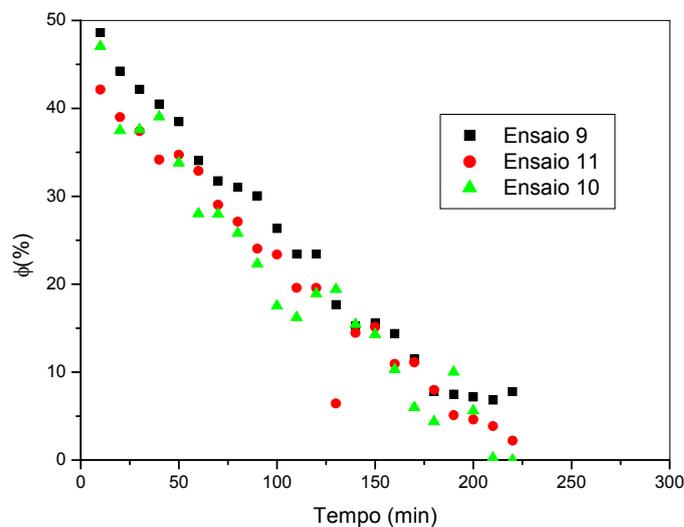


Figura 5.9 – Índice de saturação para os ensaios referente ao ponto central.

Os ensaios representados nas Figuras 5.10 e 5.11 foram escolhidos por representar o índice de saturação global para as condições mais favorável à secagem ($T=80^{\circ}\text{C}$, $V=1,8\text{ ms}^{-1}$ e $L=1\text{cm}$), e a menos favorável ($T=60^{\circ}\text{C}$, $V=1\text{ ms}^{-1}$ e $L=3\text{cm}$) respectivamente. Os outros experimentos que constam da matriz experimental encontram-se no Apêndice C.

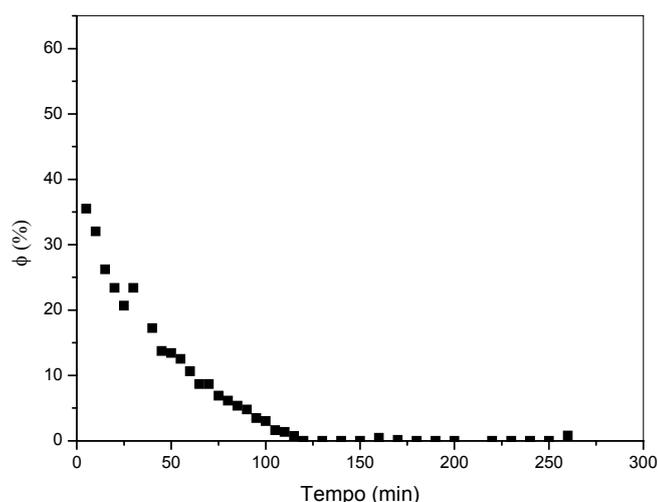


Figura 5.10 - Índice de saturação global do secador, para $T=80^{\circ}\text{C}$, $V=1,8\text{ ms}^{-1}$ e $L=1\text{cm}$.

Comparando as Figuras 5.10 e 5.11 observa-se que para a condição mais favorável à secagem, o índice de saturação é muito baixo, ou seja, o ar sai do secador após atravessar as fatias de caju com um potencial de secagem muito grande, longe do ponto de saturação. Já para a outra situação Figura 5.11 que representa as condições menos favorável a secagem, o ar atinge um grau de aproveitamento melhor. Portanto, aumentando a altura da camada de frutas nas bandejas do secador e diminuindo a velocidade do ar de secagem podem-se obter melhores resultados com relação ao índice de saturação.

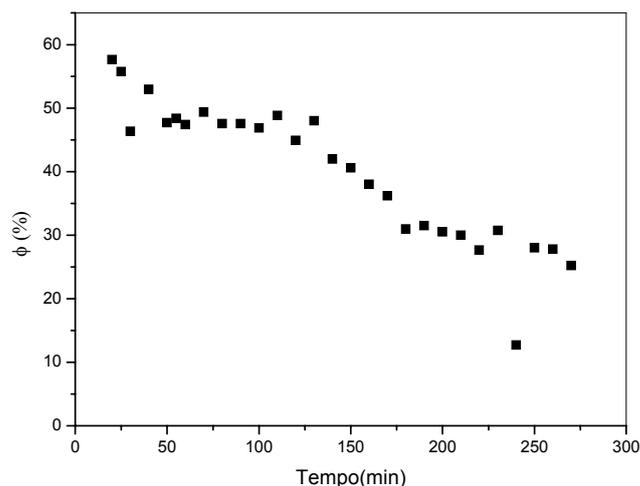


Figura 5.11 - Índice de saturação global do secador, para $T=60^{\circ}\text{C}$; $V=1\text{ms}^{-1}$
 $L=3\text{cm}$

5.4.3 Análise estatística

Para uma melhor análise dos resultados obtidos para a eficiência energética global média, índice de saturação global médio e teor de umidade médio após 300 minutos de operação, os resultados foram analisados através de métodos estatísticos, utilizando-se o software Statistica 5.0, de acordo com o planejamento fatorial 2^3 mais três experimentos no ponto central, cuja matriz com as variáveis de entrada e as respostas é apresentada na Tabela 5.3.

As respostas foram analisadas de forma separada. O modelo e as superfícies de resposta foram gerados considerando apenas os efeitos principais e que foram estatisticamente significativos, como observado no diagrama de pareto.

Contrariamente ao esperado a temperatura não se mostrou significativa sobre a eficiência energética e índice de saturação. Provavelmente devido a faixa limitada de T em que foram conduzidos os ensaios de secagem, apesar disto a temperatura foi o efeito mais importante sobre a resposta umidade final como será discutido mais adiante.

Tabela 5.3 – Matriz planejamento, com os valores reais e codificados das variáveis de entrada, e variáveis resposta.

Ensaio	T (°C)	V (m/s)	L (cm)	$\bar{\eta}$ (%)	\bar{X}_{300} (bs)	$\bar{\Phi}$ (%)
8	60 (-1)	1 (-1)	1 (-1)	8,18	0,87	14,90
7	80 (+1)	1 (-1)	1 (-1)	9,99	0,08	14,72
6	60 (-1)	1,8 (+1)	1 (-1)	5,12	0,50	10,96
5	80 (+1)	1,8 (+1)	1 (-1)	6,60	0,05	5,35
4	60 (-1)	1,0 (-1)	3 (+1)	16,31	1,25	38,38
3	80 (+1)	1,0 (-1)	3 (+1)	18,86	0,62	33,90
2	60 (-1)	1,8 (+1)	3 (+1)	18,06	0,98	20,30
1	80 (+1)	1,8 (+1)	3 (+1)	16,38	0,33	21,24
9	70 (0)	1,4 (0)	2 (0)	14,33	0,52	20,40
10	70 (0)	1,4 (0)	2 (0)	12,54	0,54	17,92
11	70 (0)	1,4 (0)	2 (0)	13,02	0,69	16,67

5.4.3.1 Eficiência energética (η)

A Tabela 5.4 mostra os coeficientes de regressão que foram obtidos a partir dos resultados do planejamento. A altura da camada e a velocidade do ar de secagem apresentaram significância estatística sobre a eficiência energética.

Tabela 5.4 – Estimativa dos coeficientes de regressão para a eficiência energética do processo.

	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão.	t(2)	p	Lim Conf. -95,%	Lim. Conf. +95,%
Média	12,19	0,28	43,65	0,000	10,99	13,40
L	4,31	0,33	13,15	0,006	2,90	5,72
V	-1,55	0,33	-4,74	0,042	-2,96	-0,14

Através do diagrama de pareto, mostrado na Figura 5.12, podemos ver que a altura da camada e a velocidade do ar de secagem exercem uma influência significativa sobre a eficiência energética ao nível de 95% de confiança. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 89,8%. A altura da

camada teve maior efeito sobre a eficiência quando comparado com a velocidade, onde pode ser observado que o efeito da velocidade é negativo, ou seja com o aumento da velocidade diminui a eficiência energética. Já para a altura da camada observa-se um efeito positivo.

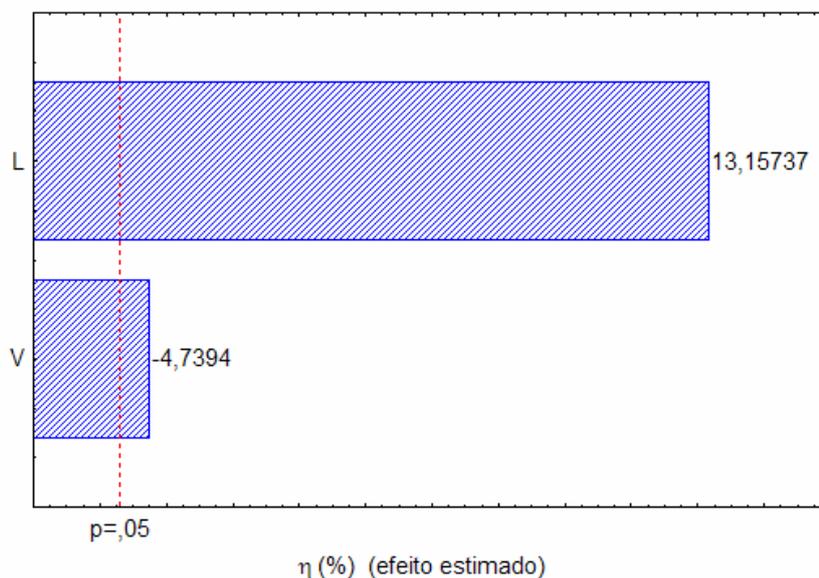


Figura 5.12 - Diagrama de Pareto. Efeito da altura da camada e da velocidade do ar de secagem sobre a eficiência energética (η)

Na Tabela 5.5 é apresentada a análise de variância para a eficiência energética do processo. O resultado do coeficiente de correlação determina a significância estatística do modelo.

Tabela 5.5 – Análise de variância para a eficiência energética. Efeito da altura da camada e velocidade do ar.

Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Média Quadrática (MQ)	F _{calculado} F _{cal}	F _{tabelado} F _{tab}
Regressão	167,89	2	83,94	35,22	4,46
Resíduos	19,07	8	2,38		
Falta de ajuste	17,35	6	2,89	3,37	19,33
Erro puro	1,72	2	0,85		
Total	186,96	10	-		

% variação explicada (R^2) = 89,8

Analisando os resultados obtidos, o modelo a ser ajustado aos dados experimentais de eficiência energética apresenta uma boa qualidade de ajuste. A regressão explica 89,80% da variação em torno da média em relação ao valor máximo explicável de 99,08%. A qualidade do ajuste é de 87,25%, o que explica que há um bom ajuste entre os valores observados e os preditos.

Com relação ao teste F observa-se que o valor de F calculado ($F_{cal.}$) é 7,9 vezes maior que o F tabelado ($F_{tab.}$) a um nível de confiança de 95%, mostrando que o modelo ajustado é significativo.

A comparação entre os valores experimentais e os calculados através do modelo de primeira ordem para a eficiência energética, observados na Figura 5.13, mostra que existe um ajuste satisfatório entre os valores observados e os preditos pelo modelo linear ajustado.

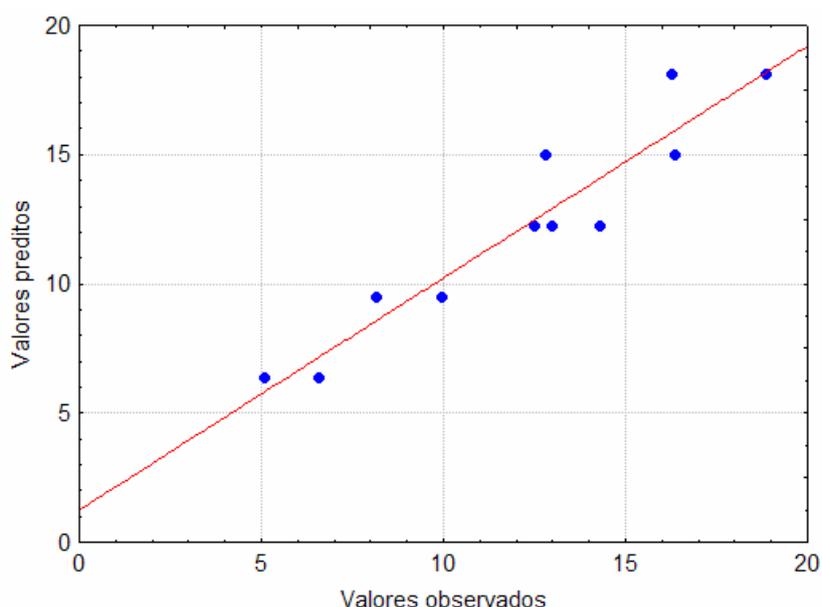


Figura 5.13 – Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo para a eficiência energética (17)

A Figura 5.14, apresenta uma distribuição aleatória dos resíduos, mostrando que o modelo representa adequadamente as variações da eficiência energética. Os resultados apresentados na Tabela 5.5 indicam que a partir dos valores do teste F da falta de ajuste, $F_{cal} = 3,37$ e $F_{tab} = 19,33$ ao nível de 95% de

confiança, mostra que o modelo além de significativo é válido para fins preditivos.

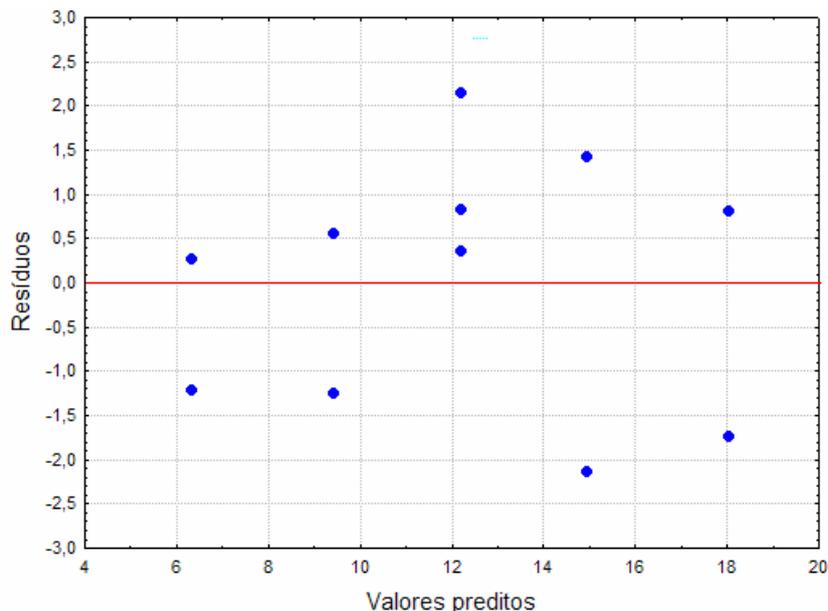


Figura 5.14 – Distribuição dos resíduos para a eficiência energética (η)

A partir da análise feita foi gerado um modelo para a resposta eficiência energético do processo, conforme mostra a Equação 5.14.

$$\eta = 12,19 - 1,55V^* + 4,31L^* \quad (5.14)$$

As variáveis codificadas: T^* , V^* e L^* são definidas nas Equações 5.15 a 5.17

$$T^* = \frac{T - 70}{10} \quad (5.15)$$

$$V^* = \frac{V - 1,4}{0,4} \quad (5.16)$$

$$L^* = \frac{L - 2}{1} \quad (5.17)$$

A comparação do F_{tab} com o F_{cal} obtido pelo modelo para a eficiência energética, garante que os valores experimentais são bem representados pelo

modelo ajustado. Desta forma verifica-se que este modelo pode ser utilizado para gerar a superfície de resposta.

Na Figura 5.15 é apresentada a superfície de resposta para a eficiência energética em relação as variáveis significativas velocidade do ar e altura da camada. Pode-se observar que a eficiência energética aumenta com o aumento da altura da camada e com a diminuição da velocidade.

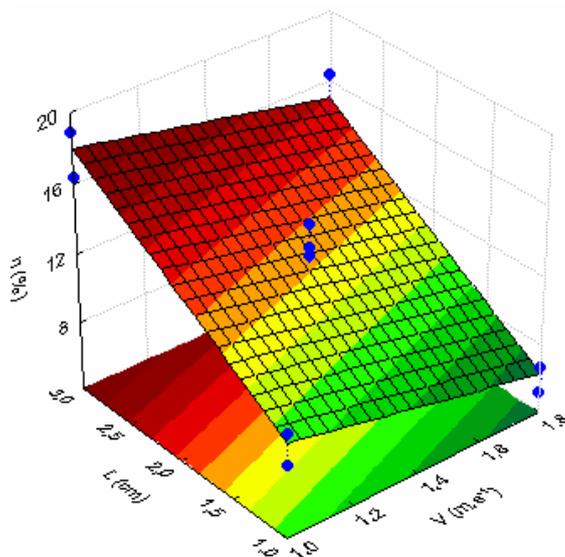


Figura 5.15 – Superfície de resposta da eficiência energética em função da velocidade (V) e da altura da camada (L), para a temperatura no ponto central.

5.4.3.2 Índice de saturação (Φ)

Na Tabela 5.6 são mostrados os coeficientes de regressão que foram obtidos a partir dos resultados do planejamento. A altura da camada e a velocidade do ar de secagem apresentaram significância estatística sobre o Índice de saturação (Φ).

Tabela 5.6 – Estimativa dos coeficientes de regressão para índice de saturação do processo.

	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão.	t(2)	p	Lim. Conf. -95, %	Lim. Conf. +95, %
Média	19,52	0,57	34,10	0,000	17,06	21,95
L	8,49	0,67	12,64	0,006	5,60	11,37
V	-5,50	0,67	-8,20	0,014	-8,39	-2,61

Através do diagrama de Pareto, mostrado na Figura 5.16, pode-se ver que a altura da camada e a velocidade do ar de secagem exercem uma influência significativa sobre o índice de saturação ao nível de 95% de confiança. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 91,37%. A altura da camada teve maior efeito sobre o índice de saturação quando comparado com a velocidade, onde pode ser observado que o efeito da velocidade é negativo, ou seja com o aumento da velocidade diminui o índice de saturação, enquanto que para a altura da camada observa-se um efeito positivo.

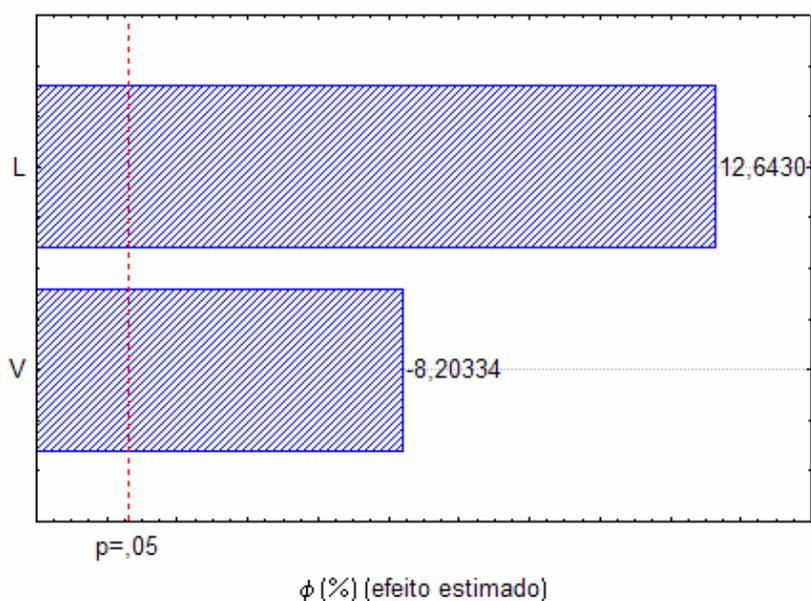


Figura 5. 16 - Diagrama de Pareto. Efeito da altura da camada e da velocidade do ar de secagem sobre o Índice de saturação (Φ)

Na Tabela 5.7 é apresentada a análise de variância para o índice de saturação do processo. O resultado do coeficiente de correlação determina a significância estatística do modelo.

Analisando os resultados obtidos, o modelo a ser ajustado aos dados experimentais de índice de saturação apresenta uma boa qualidade de ajuste. A regressão explica 91,38% da variação em torno da média em relação ao valor máximo explicável de 99,20%. A qualidade do ajuste é de 89,22%, o que explica que há um bom ajuste entre os valores observados e os preditos.

Com relação ao teste F observa-se que o valor de $F_{cal.}$ é 9,5 vezes maior que o F_{tab} a um nível de confiança de 95%, mostrando que o modelo ajustado é significativo.

Tabela 5.7 – Análise de variância para índice de saturação. Efeito da altura da camada e velocidade do ar.

Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Média Quadrática (MQ)	F _{calculado} F _{cal}	F _{tabelado} F _{tab}
Regressão	818,68	2	409,34	42,38	4,46
Resíduos	77,27	8	9,66		
Falta de ajuste	70,06	6	11,68	3,24	19,33
Erro puro	7,21	2	3,60		
Total	895,95	10	-		

% variação explicada (R^2)=91,37

A comparação entre os valores experimentais e os calculados através do modelo de primeira ordem para o índice de saturação, ilustrado na Figura 5.17, mostra que existe um ajuste satisfatório entre os valores observados e os preditos pelo modelo linear ajustado.

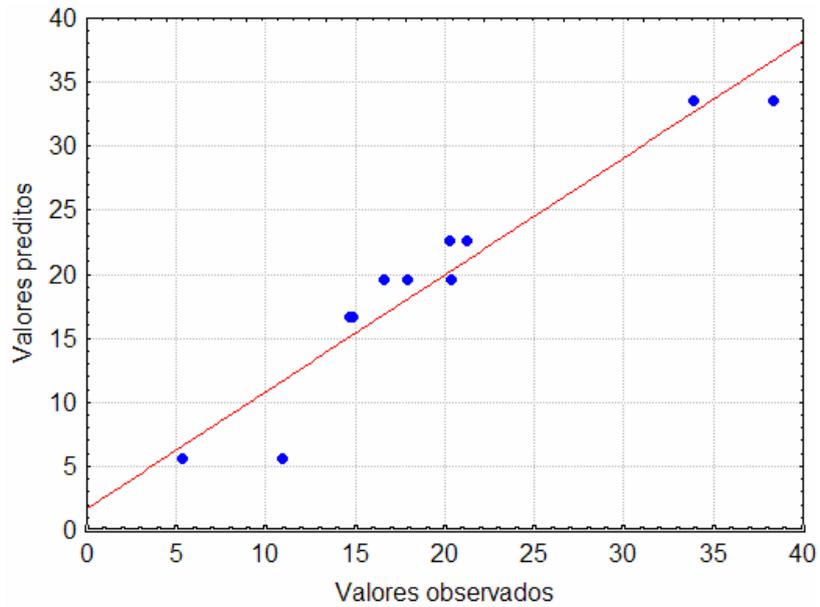


Figura 5.17 – Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo para o Índice de saturação (Φ)

A Figura 5.18, apresenta uma distribuição não aleatória dos resíduos, mostrando que um modelo quadrático representaria melhor os efeitos das variáveis sobre o índice de saturação, apesar disso os resultados indicam a partir dos valores do teste F da falta de ajuste, a relação entre o $F_{cal.}$ e o $F_{tab.}$ foi de 0,17, que o modelo além de significativo é preditivo.

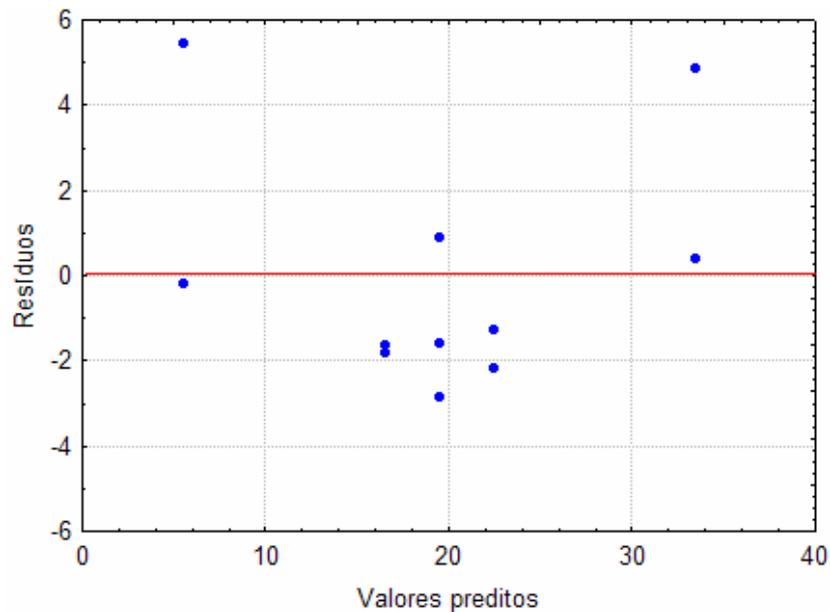


Figura 5.18 – Distribuição dos resíduos para o índice de saturação.

A partir da análise feita foi possível extrair um modelo para resposta índice de saturação do processo, conforme mostra a Equação 5.18

$$\Phi = 19,52 - 5,51V^* + 8,49L^* \quad (5.18)$$

A comparação do F_{tab} com F_{cal} obtido pelo modelo para o índice de saturação, garante que os valores experimentais são bem representados pelo modelo ajustado.

Na Figura 5.19 é apresentada a superfície de resposta para o índice de saturação em relação as variáveis significativas velocidade do ar e altura da camada.

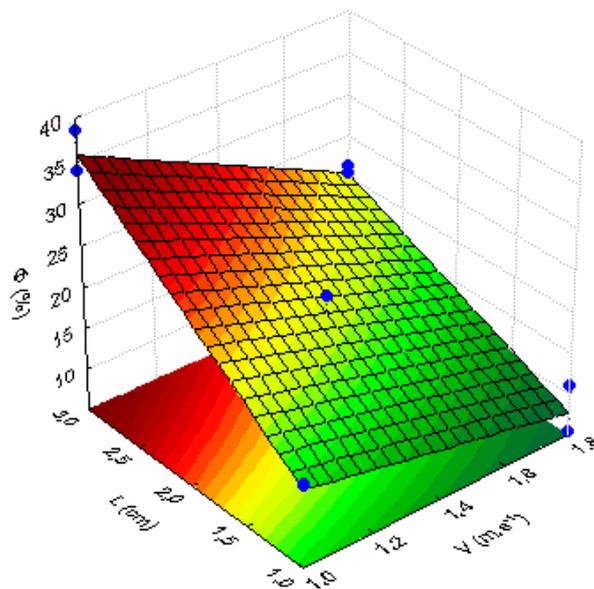


Figura 5.19 – Superfície de resposta do índice de saturação (Φ) em função da velocidade (V) e da altura da camada (L) para a temperatura no ponto central.

5.4.3.3 Teor de umidade médio após 300 minutos (X_{300})

Na Tabela 5.8 são mostrados os coeficientes de regressão que foram obtidos a partir dos resultados do planejamento. A temperatura e altura da camada apresentaram significância estatística sobre o teor de umidade.

Tabela 5.8 – Estimativa dos coeficientes de regressão para a umidade

	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	t(2)	p	Lim Conf. -95, %	Lim. Conf. +95, %
Média	0,58	0,028	20,86	0,0023	0,464	0,705
T	-031	0,033	-9,59	0,011	-0,456	-0,174
L	0,21	0,033	6,39	0,024	0,069	0,351

Através do diagrama de Pareto, mostrado na Figura 5.20, pode-se observar que a temperatura e a altura da camada exercem uma influência significativa ao nível de 95% de confiança. O coeficiente de determinação (R^2) foi de 89,8%. A temperatura teve maior efeito sobre o teor de umidade quando comparado com a altura da camada, onde pode ser observado que o efeito da temperatura é negativo, ou seja com o aumento da temperatura diminui o teor de umidade. Já para a altura da camada observa-se um efeito positivo. Estes dois efeitos estão de acordo com o observado nos ensaios cinéticos e o modelo difusional proposto.

O efeito não significativo da velocidade do ar condiz com o modelo difusional proposto, com resistência externa desprezível

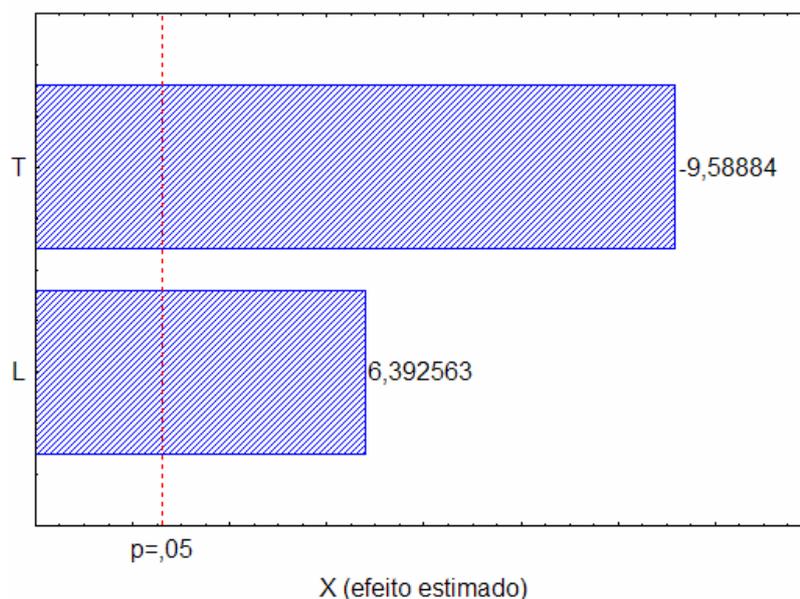


Figura 5.20 - Diagrama de Pareto. Efeito da temperatura e da altura da camada sobre a umidade.

Na Tabela 5.9 é apresentada a análise de variância para a variável resposta teor de umidade. Analisando os resultados obtidos, pode-se observar que o modelo a ser ajustado aos dados experimentais de umidade apresenta uma boa qualidade de ajuste. A regressão explica 87,43% da variação em torno da média em relação ao valor máximo explicável de 98,68%. A qualidade do ajuste é de 84,29%, o que explica que há um bom ajuste entre os valores observados e os preditos.

Tabela 5.9 – Análise de variância para a umidade. Efeito da altura da camada e velocidade do ar.

Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Média Quadrática (MQ)	F _{cal}	F _{tab}
Regressão	1,147	2	0,57	27,82	4,46
Resíduos	0,165	8	0,02		
Falta de ajuste	0,148	6	0,025	2,85	19,33
Erro puro	0,017	2	0,009		
Total	1,312	10	-		

% variação explicada (R^2)=87,43

Com relação ao teste F observa-se que o valor de F_{cal} é 6,24 vezes maior que o F_{tab} a um nível de confiança de 95%, mostrando que o modelo ajustado é significativo. O teste F da falta de ajuste para a umidade apresentou valor de $F_{cal} = 2,85$ e $F_{tab} = 19,33$ a nível de 95% de confiança a relação entre ambos é de 0,15, isto mostra que além de significativo o modelo é também preditivo.

A comparação entre os valores experimentais e os calculados através do modelo de primeira ordem para a umidade do produto, ilustrado na Figura 5.21, mostra que existe um ajuste satisfatório entre os valores observados e os preditos pelo modelo linear ajustado.

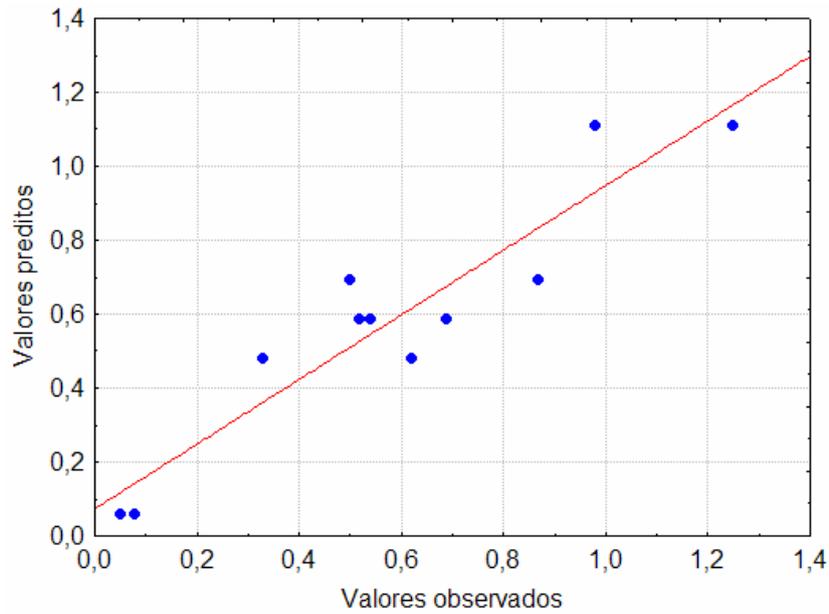


Figura 5.21 – Valores experimentais versus valores preditos pelo modelo para o teor de umidade

A Figura 5.22, apresenta uma distribuição aleatória dos resíduos, mostrando que o modelo representa adequadamente as variações do teor de umidade. Os resultados indicam que a partir dos valores do teste F da falta de ajuste, a relação entre o F_{cal} e o F_{tab} foi de 0,17 mostrando que o modelo além de significativo é preditivo.

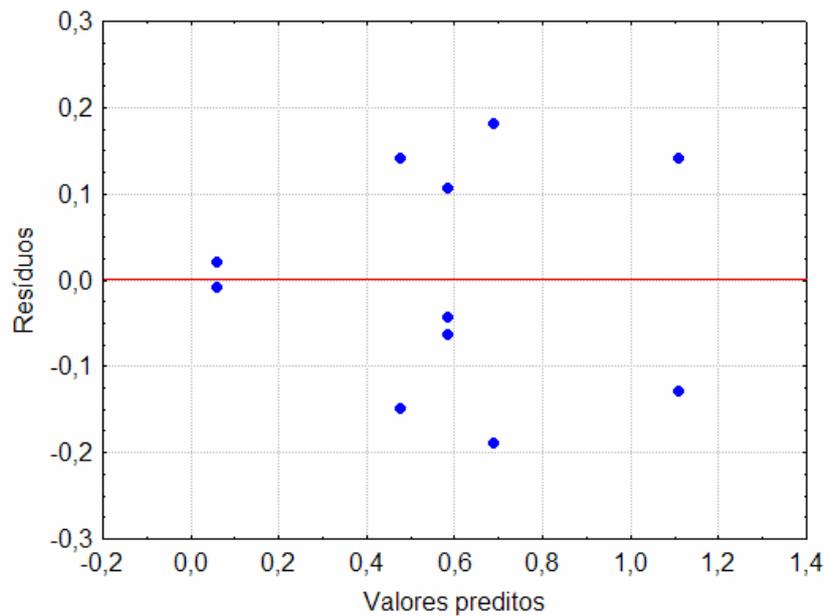


Figura 5.22 – Distribuição dos resíduos para o teor de umidade

A partir da análise feita foi possível extrair um modelo para resposta do teor de umidade, conforme mostra a Equação 5.19.

$$X = 0,584 - 0,315T^* + 0,21L^* \quad (5.19)$$

A comparação do $F_{\text{tab.}}$ com o F_{cal} obtido pelo modelo para o teor de umidade, garante que os valores experimentais são bem representados pelo modelo ajustado.

Na Figura 5.23 é apresentada a superfície de resposta para o teor de umidade, em relação as variáveis estatisticamente significativas temperatura e altura da camada.

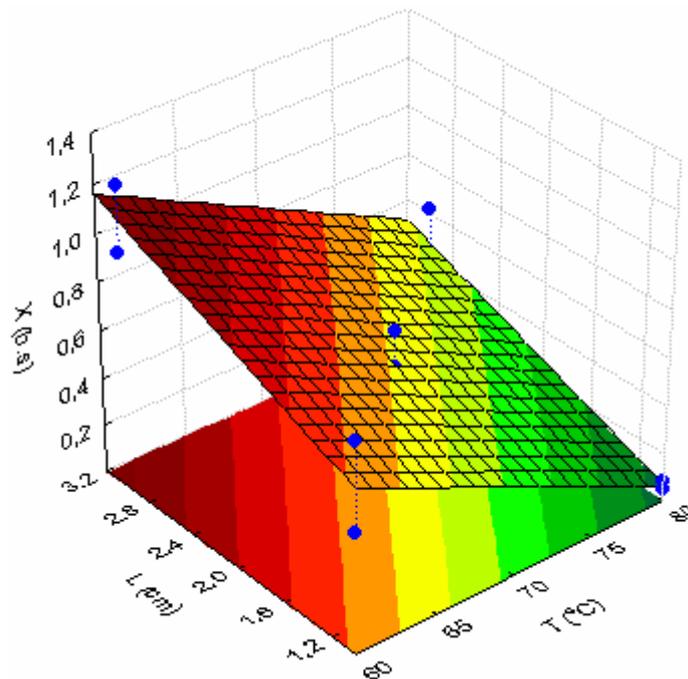


Figura 5.23 – Superfície de resposta do teor de umidade em função da temperatura e da altura da camada, para velocidade no ponto central.

Um modelo é estatisticamente significativo quando a razão $F_{\text{cal}}/F_{\text{tab}}$ da regressão é maior que 2, e a razão $F_{\text{cal}}/F_{\text{tab}}$ da falta de ajuste é menor que 1 (BARROS NETO *et al.*, 1995).

Dessa forma, observa-se na Tabela 5.10 que as respostas eficiência energética global de processo (η), Índice de saturação (Φ) e o teor de umidade após 300 minutos de operação (X_{300}), forneceram modelos estatisticamente significativos e preditivos.

Tabela 5.10 – Resumo da análise de variância a 95 % de confiança, para as respostas eficiência do processo, índice de saturação e teor de umidade.

Variável Resposta	Qualidade do ajuste	R^2	Teste F (regressão)			Teste F (falta de ajuste)		
			F_{cal} MQ _R /MQ _{fa}	F_{tab} (95%)	$\frac{F_{cal}}{F_{tab}}$	F_{cal} MQ _R /MQ _{fa}	F_{tab} (95%)	$\frac{F_{cal}}{F_{tab}}$
η	87,2	89,8	35,22	4,46	7,90	3,37	19,33	0,17
Φ	89,2	91,4	42,38	4,46	9,50	3,24	19,33	0,17
X	84,3	87,4	27,82	4,46	6,24	2,85	19,33	0,15

5.4.4 Testes preliminares sobre a qualidade do produto

5.4.4.1 Vitamina C

A fim de ter uma idéia no que diz respeito a qualidade do produto e que pudesse orientar futuros estudos foi avaliado o teor de vitamina C para o produto *in natura* e para o produto seco na temperatura de 80⁰C.

Segundo CABRAL (1983) no processo de secagem a destruição de vitaminas contribui para a perda do valor nutricional dos alimentos desidratados, a vitamina C é provavelmente a mais sensível de todas as vitaminas, pois o ácido ascórbico é hidrossolúvel e rapidamente destruído pela ação do calor e por oxidação.

Na Tabela 5.11 é apresentada a degradação de vitamina C após o caju ter sido submetido ao processo de secagem convectiva. Analisando os resultados na base seca observa-se que houve uma redução no teor de Vitamina C de aproximadamente 45%. No entanto devido à retirada de água, o

produto seco apresenta uma concentração aproximadamente três vezes maior de vitamina C que o produto *in natura*.

Tabela 5.11 – Valores de vitamina C para o caju *in natura* e seco.

	Teor de umidade % (bu)	Vitamina C mg/100g	Vitamina C mg/g _{ss}
Caju <i>In natura</i>	87,2	190,03	14,85
Caju seco	22,1	634,35	8,14

5.4.4.2 Análise sensorial

Foi realizada uma análise sensorial com 15 pessoas não treinadas, para avaliar a aceitação das fatias de caju secas nas seguintes condições: Temperatura de 80 °C, velocidade do ar de secagem 1,8 ms⁻¹ e espessura da camada igual a 1cm, tendo em vista ser as condições que propiciam um menor tempo de secagem.

Foi aplicada a escala hedônica estruturada que varia de (1=desgostei muitíssimo a 9=gostei muitíssimo), e foram obtidos os seguintes resultados: 13% dos indivíduos disseram gostei muitíssimo, 53% gostei muito, 20% gostei moderadamente, 7% gostei ligeiramente e 7% desgostei muito, estes resultados estão representados no diagrama da figura 5.23a. Dos resultados coletados mediante formulário apropriado mostrado no apêndice D percebe-se que o índice de aceitabilidade do produto foi superior a 70%. Este resultado preliminar indica a viabilidade do produto obtido ser colocado diretamente no mercado consumidor, necessitando apenas de uma embalagem adequada.

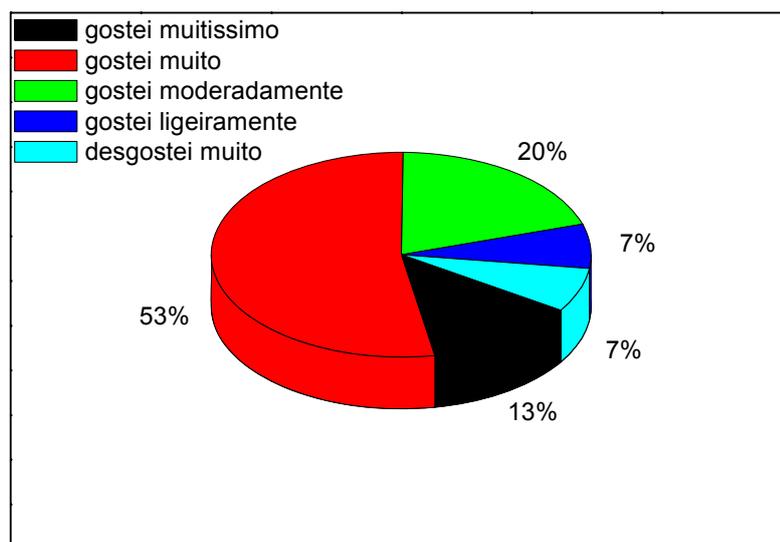


Figura 23a – representação da análise sensorial das fatias de caju.

5.4.5 Simulação

Também foi realizada uma série de testes no simulador, para colocar em funcionamento as rotinas implementadas relativas à cinética de secagem e as propriedades variáveis da fruta com a umidade e a temperatura.

A validação do modelo foi realizada mediante comparação com os experimentos 4, 5 e 11 da matriz planejamento. (Tabela 5.2).

Na Figura 5.24 são apresentados os resultados obtidos no simulador em comparação com as condições experimentais para um dos ensaios do ponto central ($T=70^{\circ}\text{C}$, $V=1,4\text{ ms}^{-1}$ e $L=2\text{cm}$).

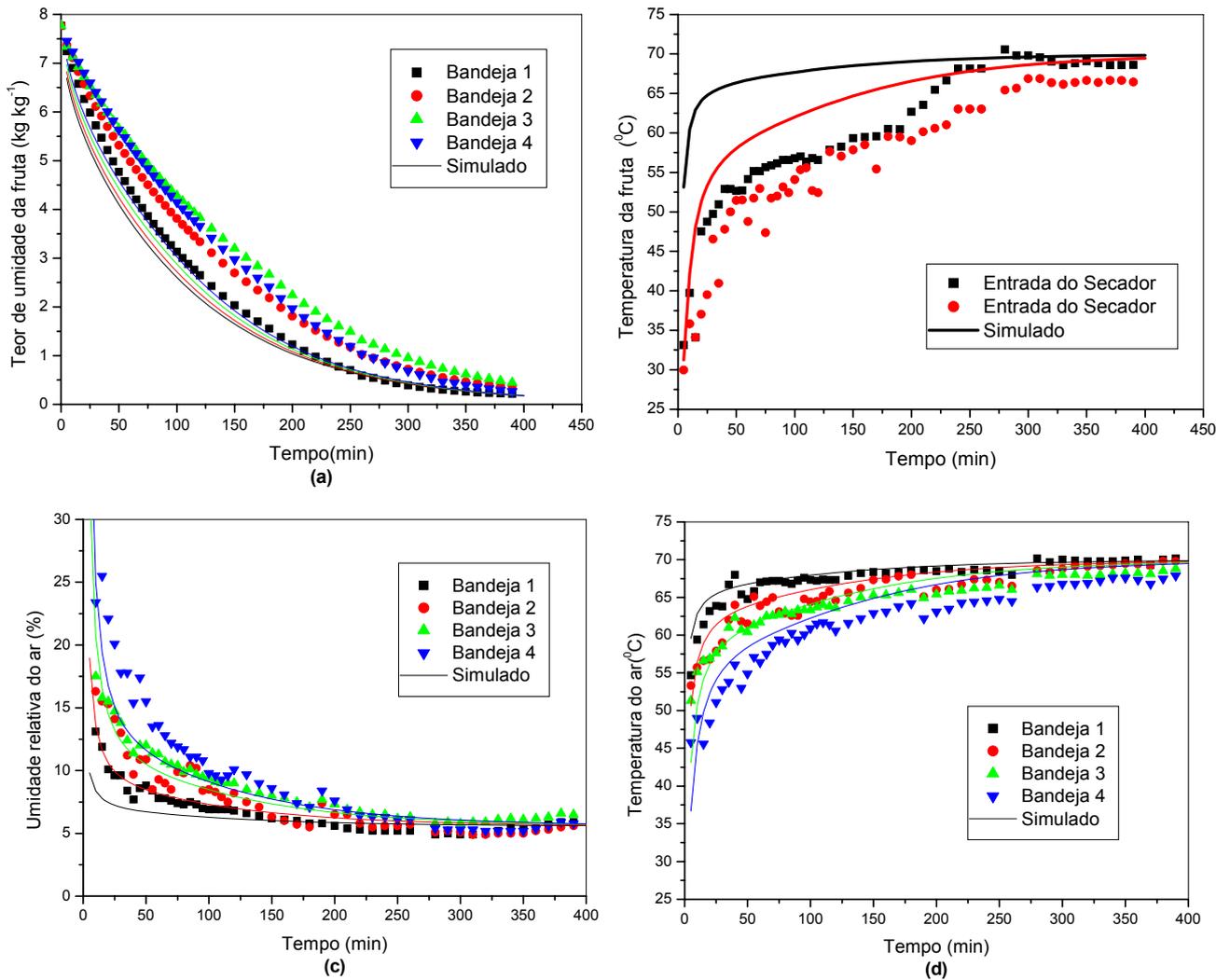


Figura 5.24 Curvas experimentais e simuladas de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 70^{\circ}\text{C}$, $V = 1,4\text{m s}^{-1}$, $L = 2\text{cm}$.

Foi analisada a condição mais favorável à secagem, $T = 80^{\circ}\text{C}$, $V = 1,8\text{ ms}^{-1}$ e $L = 1\text{cm}$ (Figura 5.25) e a menos favorável $T = 60^{\circ}\text{C}$, $V = 1\text{ ms}^{-1}$ $L = 3\text{cm}$ (Figura 5.26). Nos casos estudados pode-se observar que o modelo acompanha as tendências observadas experimentalmente da evolução temporal das variáveis ao longo do secador.

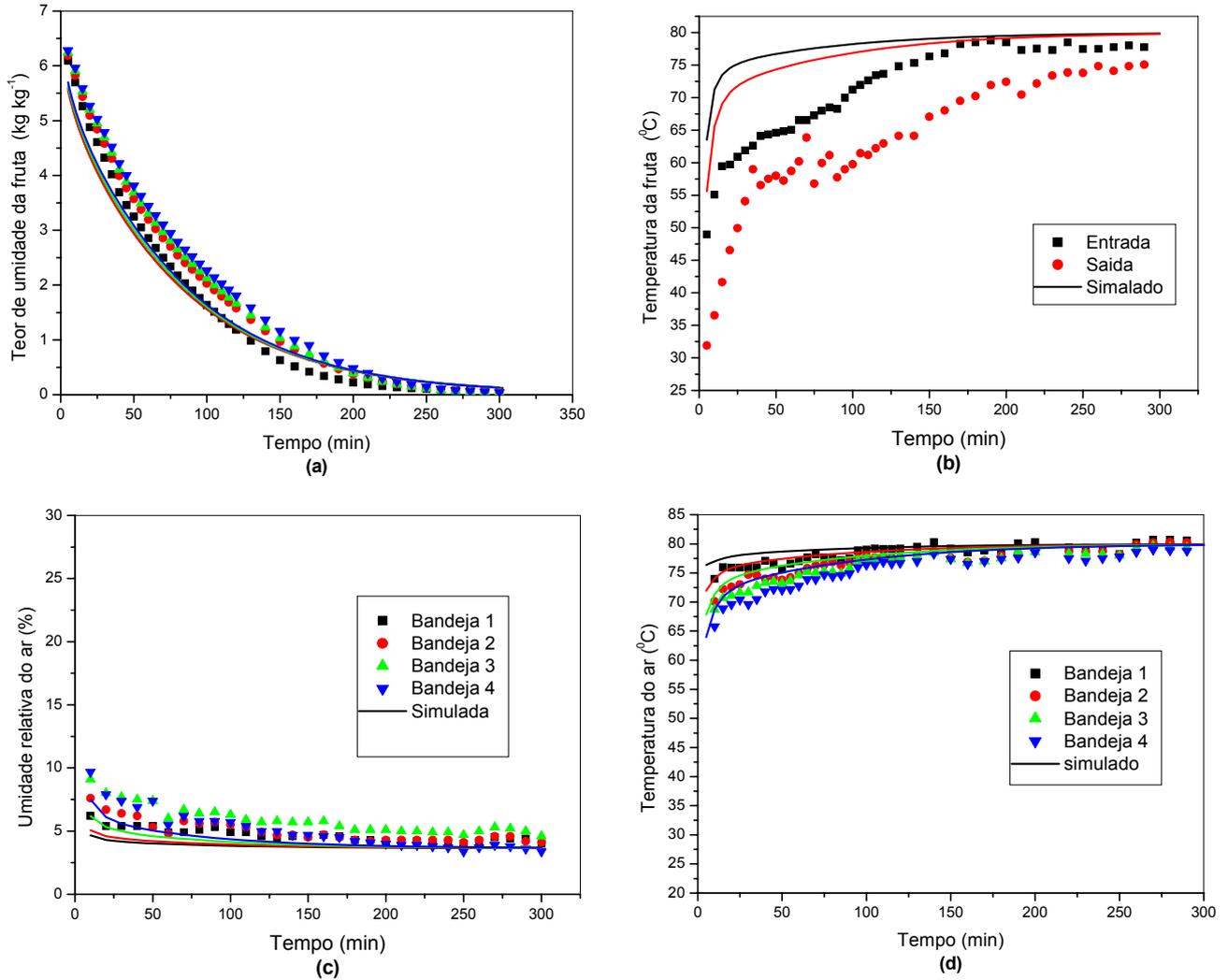


Figura 5.25 Curvas experimentais e simuladas de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 80^{\circ}\text{C}$, $V = 1,8\text{m, min}^{-1}$, $L = 1\text{cm}$.

As umidades relativas e temperaturas do ar de secagem foram previstas com boa precisão como se observa nas Figuras 5.24 (c) e (d), 5.25 (c) e (d) e 5.26 (c) e (d).

Nas Figuras 5.24 (a), 5.25 (a) e 5.26 (a), pode-se observar que a umidade da fruta está superestimada, ou seja, no processo simulado a fruta seca a uma taxa mais alta que a observada no processo experimental. A superestimação da temperatura da fruta nas Figuras 5.24 (b), 5.25 (b) e 5.26 (b) pode ser um dos motivos. Outra fonte de erro podem ser os desvios entre a umidade de equilíbrio dinâmica no secador e a calculada por extrapolação das equações das isotermas.

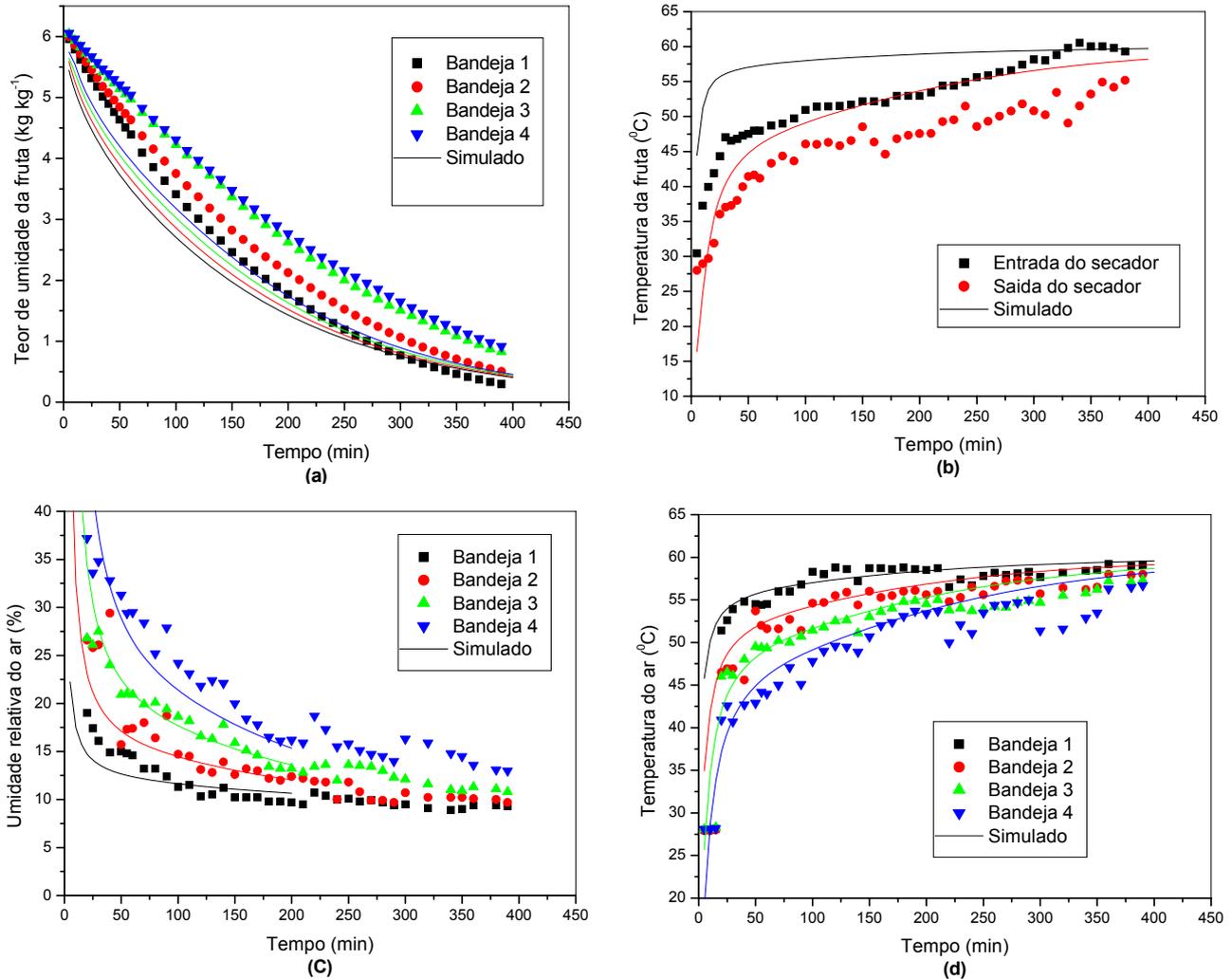


Figura 5.26 Curvas experimentais e simuladas de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 60^{\circ}\text{C}$, $V=1\text{m, min}^{-1}$, $L= 3\text{cm}$.

Com relação à temperatura da fruta Figuras 5.24 (b), 5.25 (b) e 5.26 (b) os resultados simulados, apesar de apresentarem uma tendência coerente com os dados experimentais estão superestimados. Isto pode ser explicado em função de: O modelo é de parâmetros concentrados e não leva em consideração os gradientes internos de temperatura. Como discutido no Capítulo 2 a condutividade térmica não é elevada o suficiente de modo que a suposição de resistência interna desprezível pode levar a erros na predição da temperatura da fruta. Para verificar a validade da suposição de parâmetros concentrados, foi calculado o número de Biot, através da Equação 5.20, para as condições de $T=353^{\circ}\text{K}$, $V=1,8\text{ms}^{-1}$ e $L=0,01\text{m}$. $\epsilon= 0,24$ $k=1,81\text{kw m}^{-1}\text{K}^{-1}$

$$Bi = \frac{hL}{2k} \quad (5.20)$$

B_i - número de Biot, adm

h - coeficiente de transferência de calor, $W m^{-2} ^\circ C$

L - espessura, m

k - condutividade térmica, $W m^{-1} ^\circ C^{-1}$

Os valores de h e do número de Nusselt, foram calculados pelas equações abaixo, já citadas anteriormente.

$$h = \frac{Nu k (1-\varepsilon)}{6 L \varepsilon} \quad (5.11)$$

$$N_u = \left(0,4 Re^{1/2} + 0,2 Re^{2/3} + Pr^{0,4} \right) \quad (5.12)$$

Foi obtido um $Bi = 3,57$ que é um valor intermediário entre as condições limites, que são $Bi \rightarrow \infty$ no caso de resistência externa desprezível e $Bi = 0$ para gradientes de temperatura nulos no interior da partícula. Os valores obtidos nas outras condições estudadas encontram-se na mesma ordem de magnitude, o que confirma o fato de que a hipótese de parâmetros concentrados não seria uma boa aproximação nas condições estudadas no presente trabalho. Além disso, erros experimentais como: interferência das condições externas e perdas por condução no termopar podem ter contribuído para os desvios entre os valores observados e simulados da temperatura da fruta.

O método numérico se comportou de maneira estável para todas as condições estudadas. O modelo precisa ser ajustado de modo a melhorar as previsões, especialmente de temperatura da fruta.

5.5 Conclusões

- As curvas experimentais de secagem, a evolução da temperatura da fruta, a umidade relativa e a temperatura do ar, apresentam o mesmo comportamento em todas as bandejas nas condições estudadas.

A eficiência energética e o índice de saturação são influenciados pela altura da camada e pela velocidade do ar de secagem porém a altura da camada exerce uma maior influência sobre ambos

O ar sai do secador com poder de secagem bastante elevado, aumentando-se a carga nas bandejas e diminuindo a velocidade do ar, aumenta-se a eficiência energética

- A temperatura e umidade do ar de secagem após cada bandeja foram preditos pelo simulador com boa precisão, o teor de umidade da fruta foi estimado acima do observado experimentalmente, enquanto que a temperatura da fruta foi superestimada.

- O simulador em geral se comportou como esperado, é amigável e os ajustes necessários para o modelo, bem como adequações para outros produtos e outras configurações poderão ser implementados de maneira simples, pelo seu caráter modular.

5.6 Referências bibliográficas

AFONSO JR. 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**. v3,n.3 p.349-353, Campina Grande, 1999.

BARROS NETO, B. SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas, Editora da UNICAMP, 1995. 299p.

CABRAL, A.C.D. Embalagens para alimentos desidratados. In: **Embalagens de Produtos alimentícios**. Brasília: Secretaria da Indústria e Comércio, Ciência e Tecnologia, p. 44-77. 1983.

CALÇADA, L.A.; MOTTA LIMA, O.C.; SOUZA, M.B.; BISCAIA E.C. Otimização energética de secadores de leito fixo e leito deslizante. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA**, 11, 1996, Rio de Janeiro.

CARMO, J.E.F. **Difusão em sólidos esferoidais oblato: modelagem e simulação**. 2000, 80 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande,

CAVALCANTE, J. A. **Simulação de um secador convectivo de bandejas para frutas tropicais**. 1999. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande.

CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. **Efeito da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada estacionária, sobre a armazenabilidade desementes de feijão, (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade carioca: Avaliação experimental, modelagem e simulação**. 1997. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FIGLIARO, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**, João Pessoa. Editora Universitária - UFPB, 2004. 229p.

KARATHANOS, V.T.; KOSTAROPOULOS, A.E.; SARAVACOS, G.D. Air drying of osmotically dehydrated fruits. **Drying technology**, v.13, p.1503-1521, 1995.

KHATTAB, N.M. Toward a homogeneous and efficient batch tray dryer **Energy Sources**, n.18, p.447-459, 1996.

MELONI, P.L.S. **Desidratação de frutas e hortaliças**. Fortaleza: Instituto Frutal, 87p. 2003

SATYRO, M.A.; ALVES, P.M.; PICOLLI FILHO, D. E. **Modelagem e simulação de processos – Conceituação geral**. **REBEQ** p.3-7, 1986.

SOKHANSANJ, S. Drying simulation with respect to energy conservation and grain quality. **Advances in Drying** v.3; p. 121-180, 1984.

TRAVAGLINE, D.A.; NETO, M.P.; BLEINROTH, E.W.; LEITÃO, M.F.F. **Banana-passa: princípios de secagem, conservação e produção industrial**. Campinas: ITAL 73p. 1993.

TRAVAGLINE, D.A.; GASPARINO FILHO, J.; AGUIRRE, J. M. Equipamentos de secagem. In: **Desidratação de frutas e hortaliças- Manual técnico**. Campinas: ITAL, p. 3.1– 3.40. 1997.

WHITAKER, S. **Advances in drying** New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980, VI Chapter two: Heat and transfer in granular porous media, p23-61.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Resultados principais

A seguir são resumidos os principais resultados obtidos nas diferentes etapas deste trabalho.

6.1.1 Propriedades termofísicas

- Nas condições em que foram conduzidos os experimentos, as curvas apresentam uma mesma tendência no comportamento: na região de baixo teor de umidade, as propriedades térmicas variam de maneira acentuada, aumentando com o incremento do teor de umidade e passando por um valor máximo que se encontra entre 2 e 4 de umidade em base seca. A tendência se inverte com uma leve diminuição do valor das propriedades térmicas com o aumento do teor de umidade.

6.1.2 Equilíbrio higroscópico

- De um modo geral os três modelos GAB, BET e Oswin ajustaram bem os dados experimentais com coeficiente de determinação maior que 0,96 e erro relativo médio menor que 21%.

- A constante C nos modelos de GAB e BET e o parâmetro K de GAB diminuem com o aumento da temperatura.

- O modelo de GAB é uma boa opção para a previsão de equilíbrio higroscópico do caju.

6.1.3 Cinética de secagem

- O modelo difusional, utilizado para descrever o comportamento cinético durante a secagem, apresentou bom ajuste sendo para tanto uma ferramenta adequada para a análise do desempenho, simulação e otimização de secadores convectivos destinados ao processamento pós colheita do caju.
- O coeficiente de difusão efetivo da água nas fatias de caju se encontra entre $3,8 \times 10^{-4}$ e $13,9 \times 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$ e apresenta uma energia de ativação $8,4 \text{ kcal mol}^{-1}$ na faixa de temperatura entre 50 e 80 °C.

6.1.4 Secador convectivo

- As curvas experimentais de secagem, a evolução da temperatura da fruta, a umidade relativa e a temperatura do ar, apresentam o mesmo comportamento em todas as bandejas nas condições estudadas.
- A temperatura e umidade do ar de secagem após cada bandeja foram preditos pelo simulador com boa precisão. O teor de umidade da fruta foi estimado abaixo do observado experimentalmente, enquanto que a temperatura da fruta foi superestimada.
- O simulador em geral se comportou como esperado, é amigável e os ajustes necessários para o modelo, bem como adequações para outros produtos e outras configurações poderão ser implementados de maneira simples, pelo seu caráter modular.

6.2 Sugestões para futuros trabalhos

- Estudar o equilíbrio higroscópico em faixas mais amplas de temperatura de modo a realizar estudos termodinâmicos mais abrangentes e relacionar com outras propriedades físicas.
- Estudar a porosidade do leito de fatias de caju em função do teor de umidade.
- Estudar a aplicação de modelos mais realísticos para a cinética de secagem convectiva levando em consideração o encolhimento .
- Melhorar o programa simulador, substituindo o modelo de parâmetros concentrados e incluindo os efeitos de gradientes internos de temperatura na fase sólida.
- Estudar o reciclo do ar de secagem para obter um maior rendimento do secador e melhorar a eficiência energética.
- Avaliar a alternância das bandejas no interior do secador com o intuito de minimizar o efeito da desuniformidade do fluxo de ar.
- Com relação ao produto final avaliar melhor a aceitabilidade do mesmo, estudar qual o teor de umidade final ideal para o armazenamento, tipo de embalagem, tempo de prateleira e realizar análise microbiológica para monitorar a qualidade do produto.

6.3 Conclusões

Os resultados aqui obtidos mostram a viabilidade do uso de secadores de bandejas, e permite o dimensionamento e otimização destes em escala industrial, adequados para atender pequenos produtores na obtenção de fatias de caju secas.

Pelas características do produto aqui apresentadas e com a escolha de condições ótimas de operação, este produto pode ser destinado tanto ao consumidor final, como poderá ser utilizado na indústria alimentícia como matéria prima a ser adicionado em diferentes proporções na obtenção de pães, bolos, bolachas, farinhas, laticínios e outros.

De um modo geral o simulador funciona corretamente, não apresentando problemas de convergência ou instabilidade. Quanto ao modelo, precisa de alguns ajustes de modo a poder representar com melhor precisão o comportamento experimental. Apresenta interface amigável baseada em objetos gráficos, sendo portanto de fácil utilização por usuários de cooperativas de produtores. Outra característica importante é que pode ser utilizado como ferramenta de controle em tempo real.

ANEXOS

Apêndice A

Curvas dos ensaios de secagem convectiva

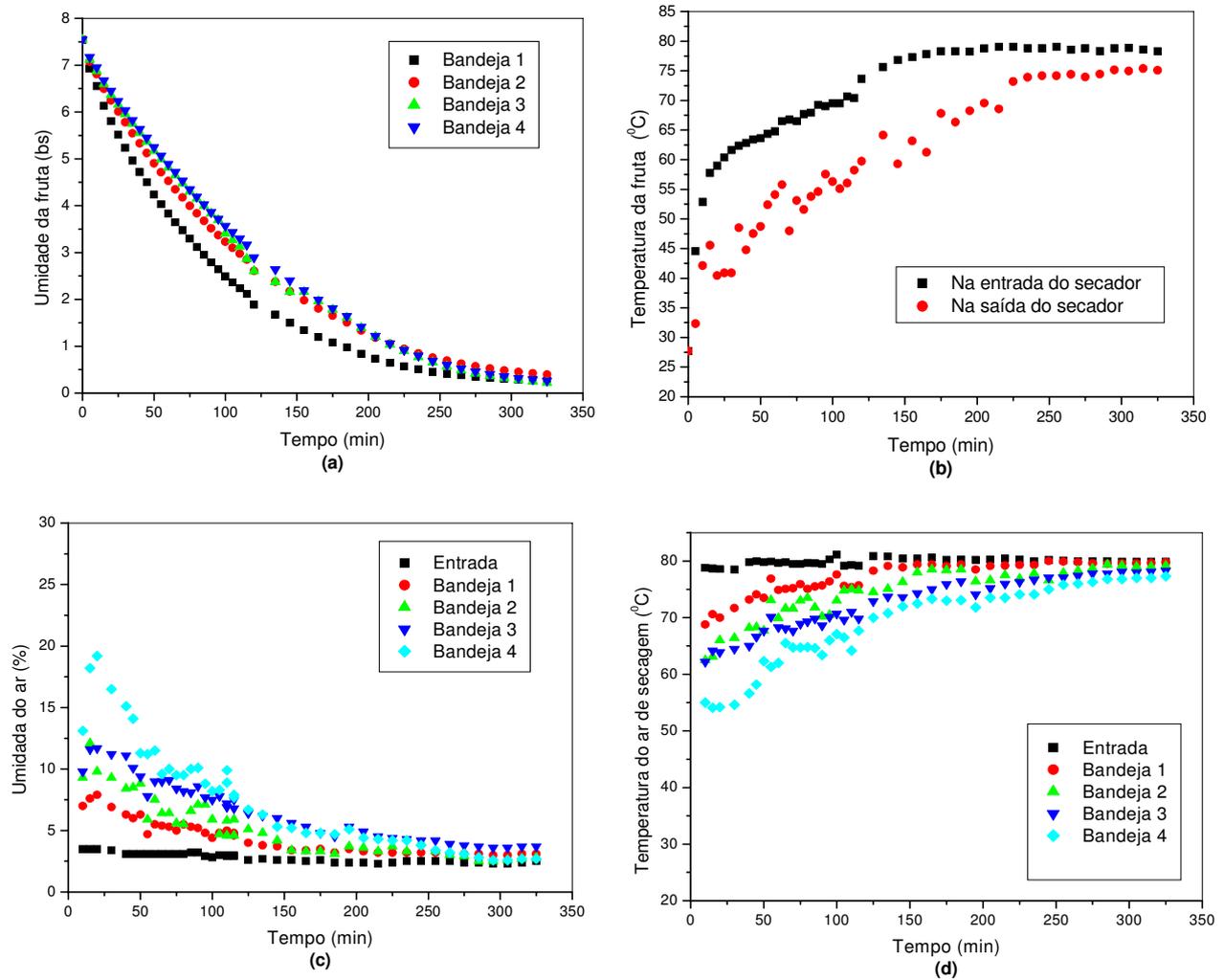


Figura A1 – Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 80^{\circ}\text{C}$; $V = 1,8\text{m s}^{-1}$; $L = 3\text{cm}$

Curvas dos ensaios de secagem convectiva

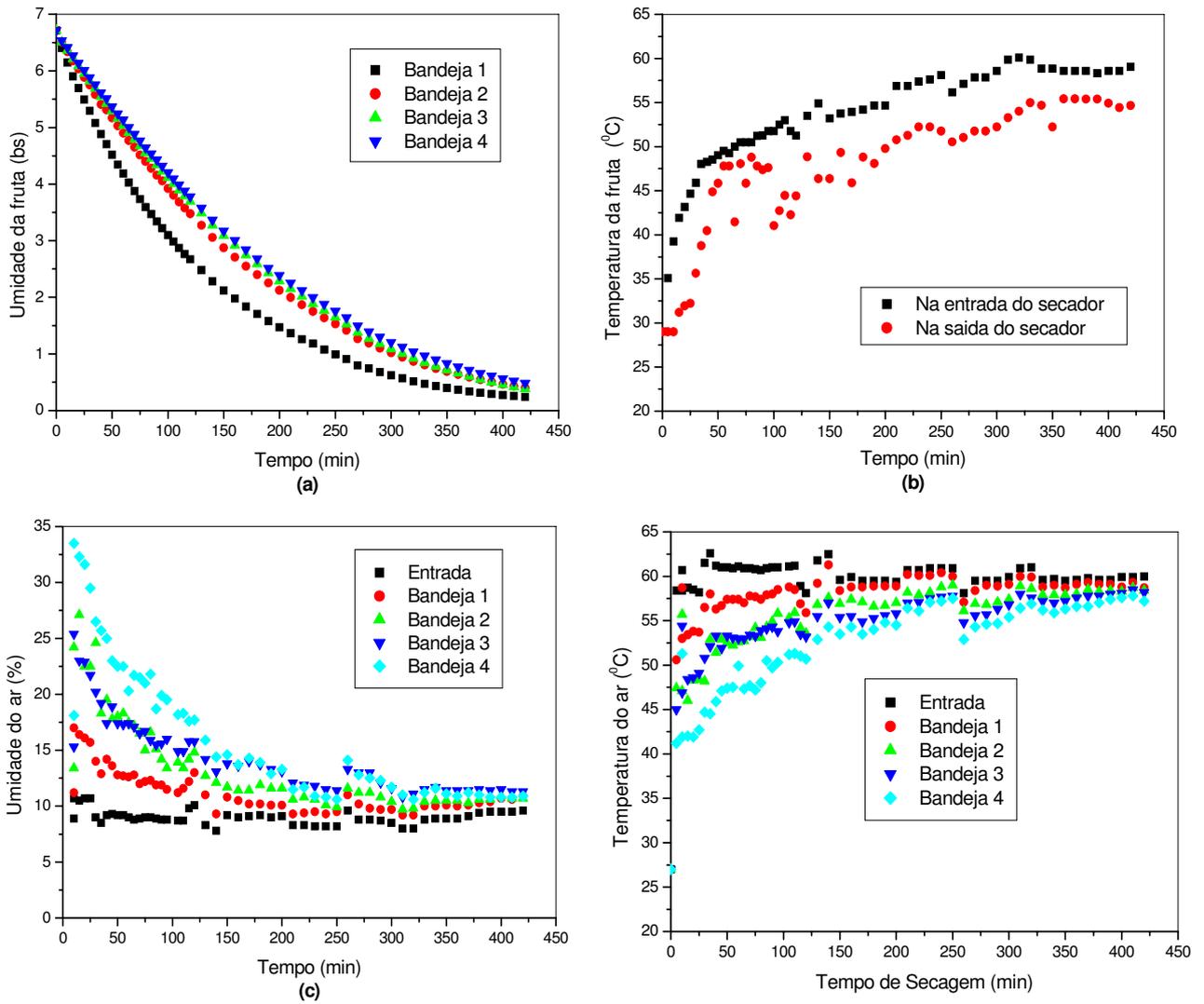


Figura A2 – Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas.. $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 1,8\text{ m s}^{-1}$; $L = 3\text{ cm}$

Curvas dos ensaios de secagem convectiva

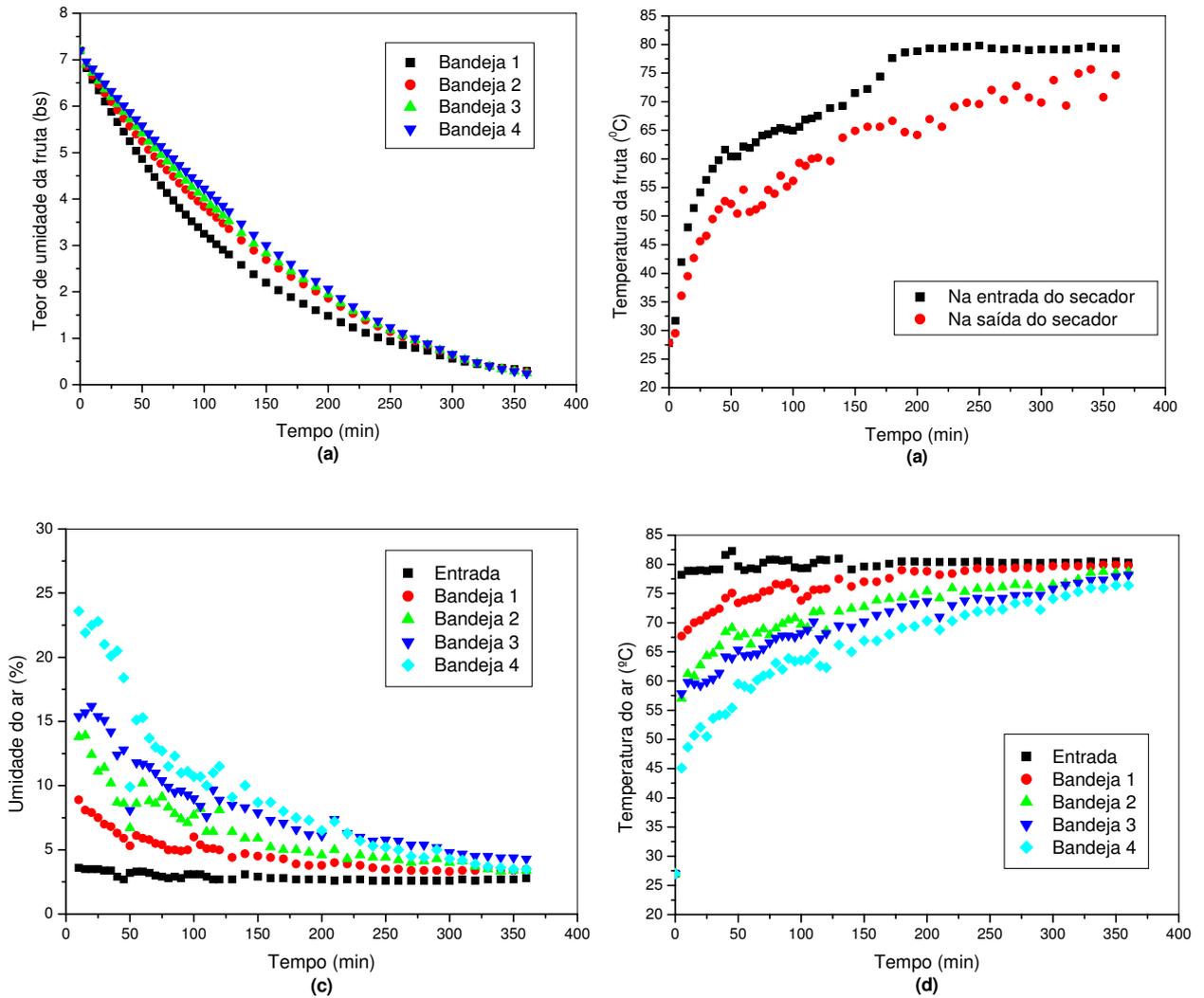


Figura A3 – Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 1\text{ m s}^{-1}$, $L = 3\text{ cm}$.

Curvas dos ensaios de secagem convectiva

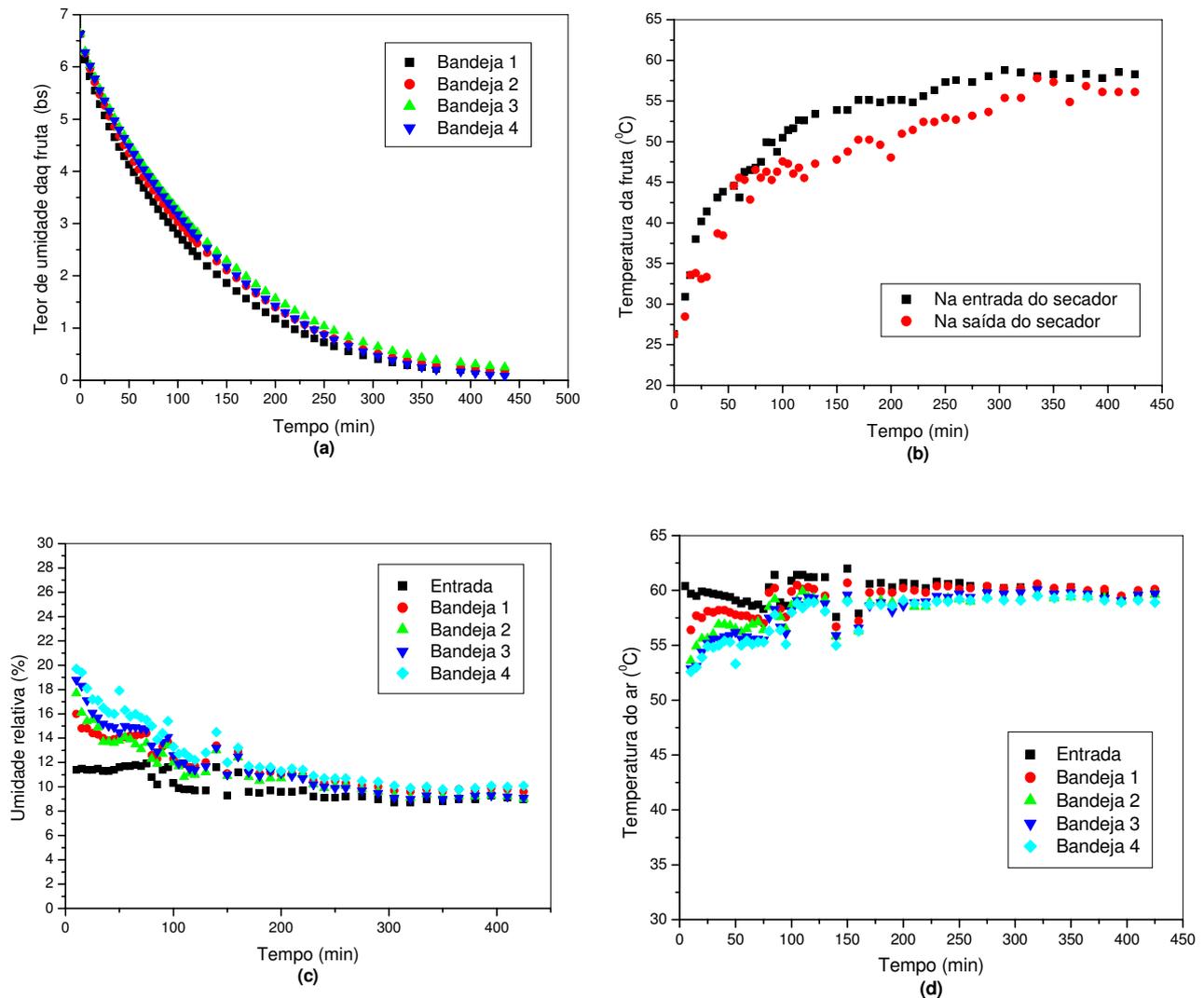


Figura A4 – Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 1,8\text{ m s}^{-1}$; $L = 1\text{ cm}$

Curvas dos ensaios de secagem convectiva

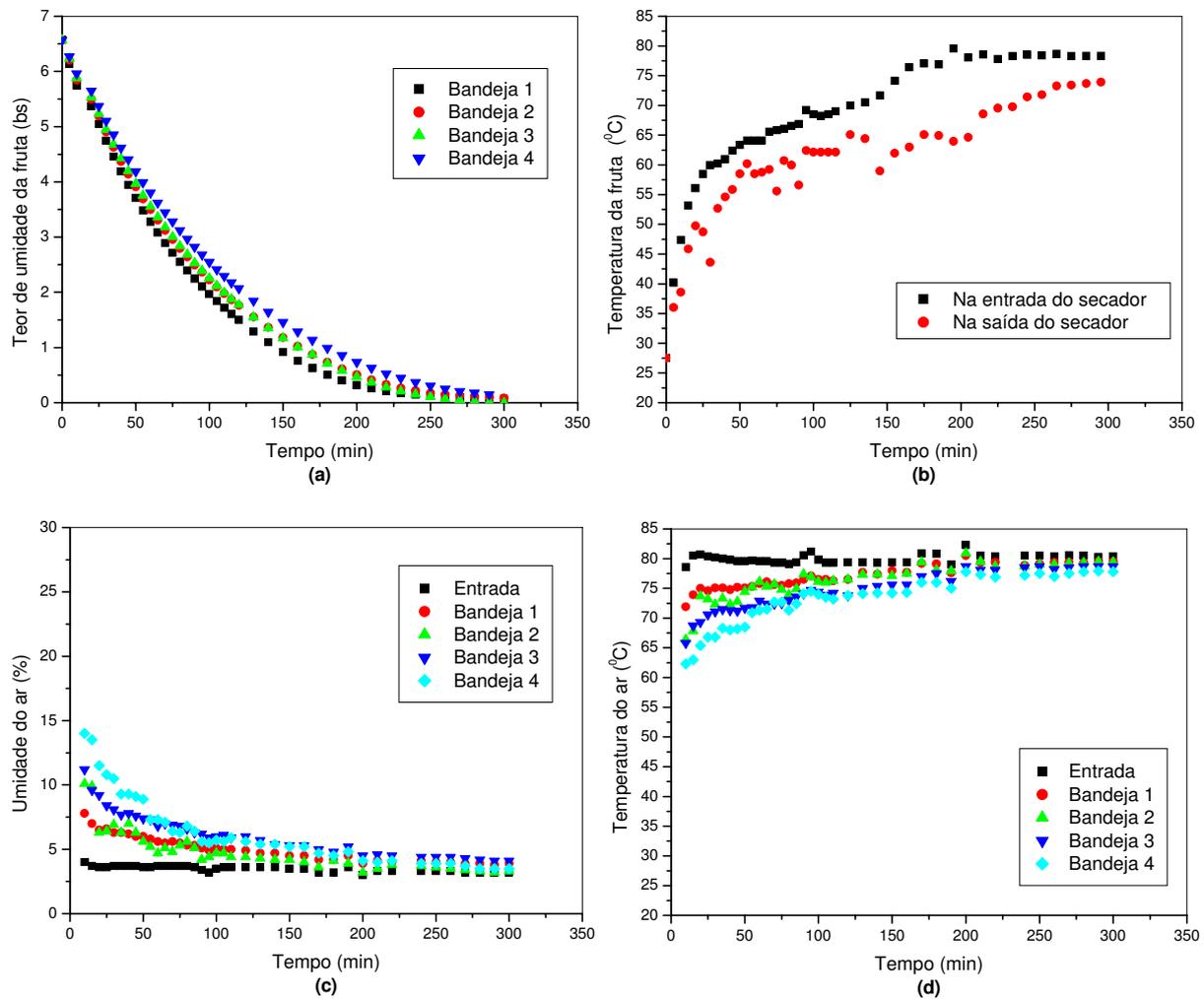


Figura A5 –Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 80^{\circ}\text{C}$; $V = 1 \text{ m s}^{-1}$; $L = 1 \text{ cm}$

Curvas dos ensaios de secagem convectiva

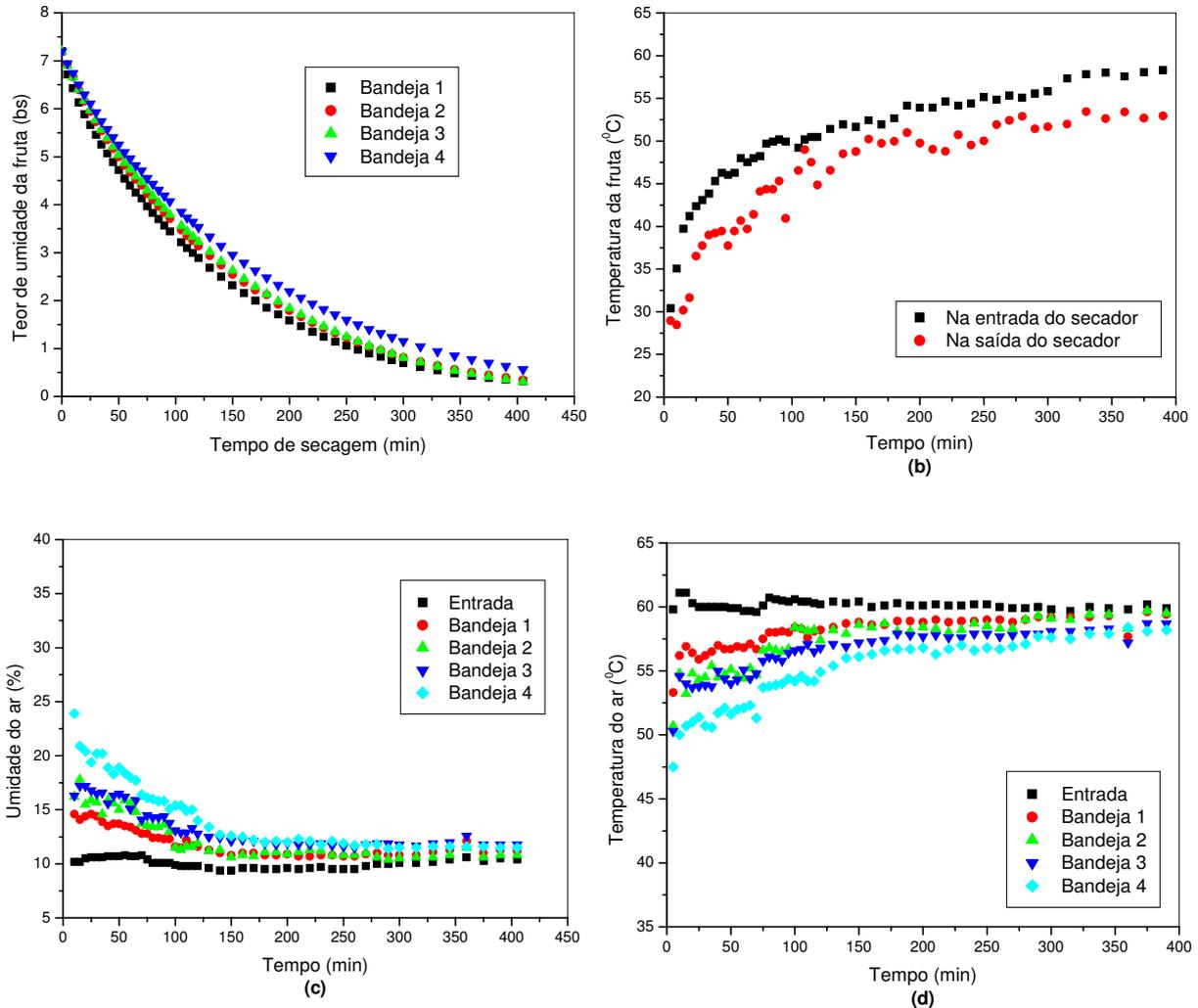


Figura A6 – Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 1\text{ m s}^{-1}$; $L = 1\text{ cm}$

Curvas dos ensaios de secagem convectiva

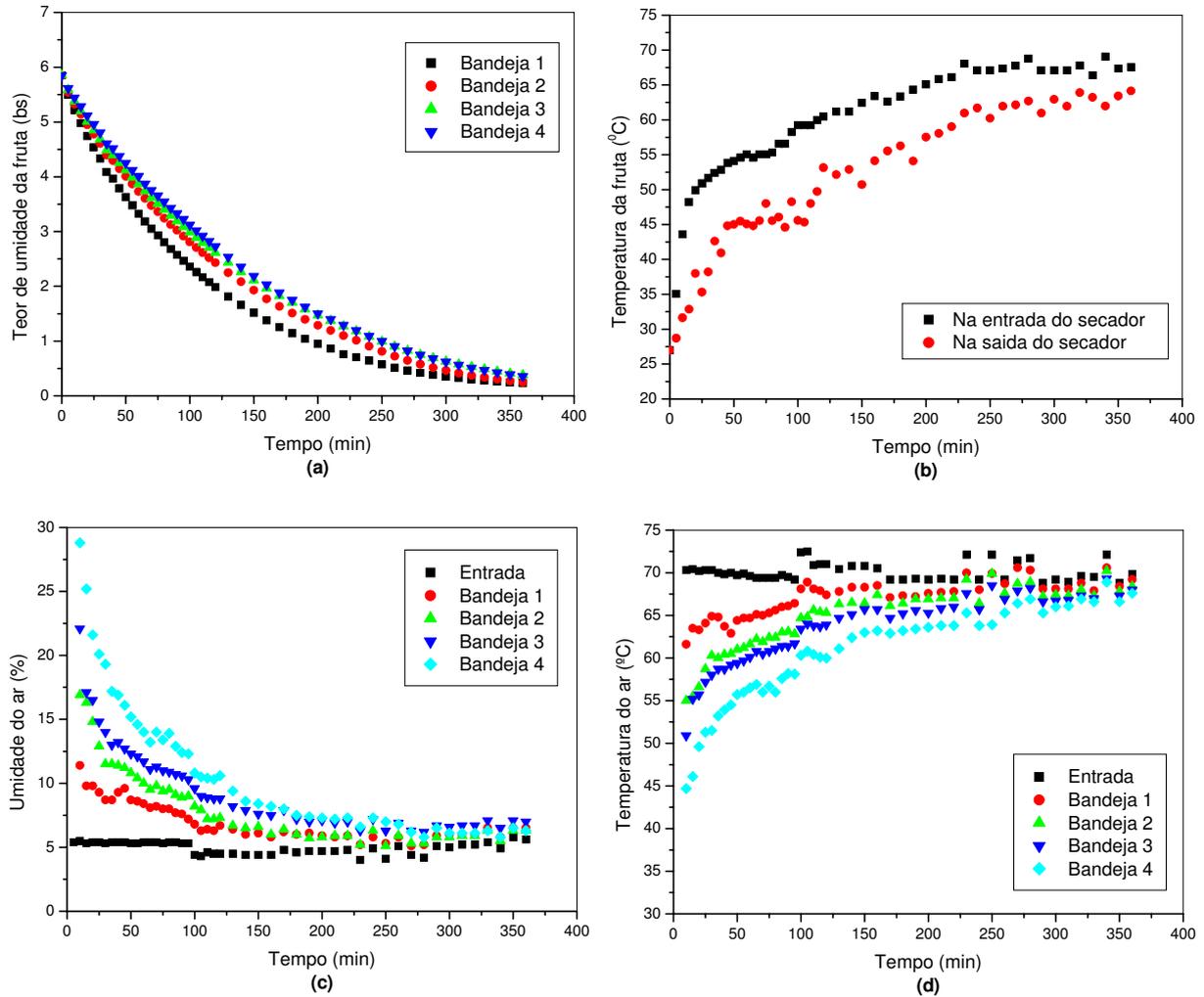


Figura A7 – Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 1,4\text{ m s}^{-1}$, $L = 2\text{ cm}$

Curvas dos ensaios de secagem convectiva

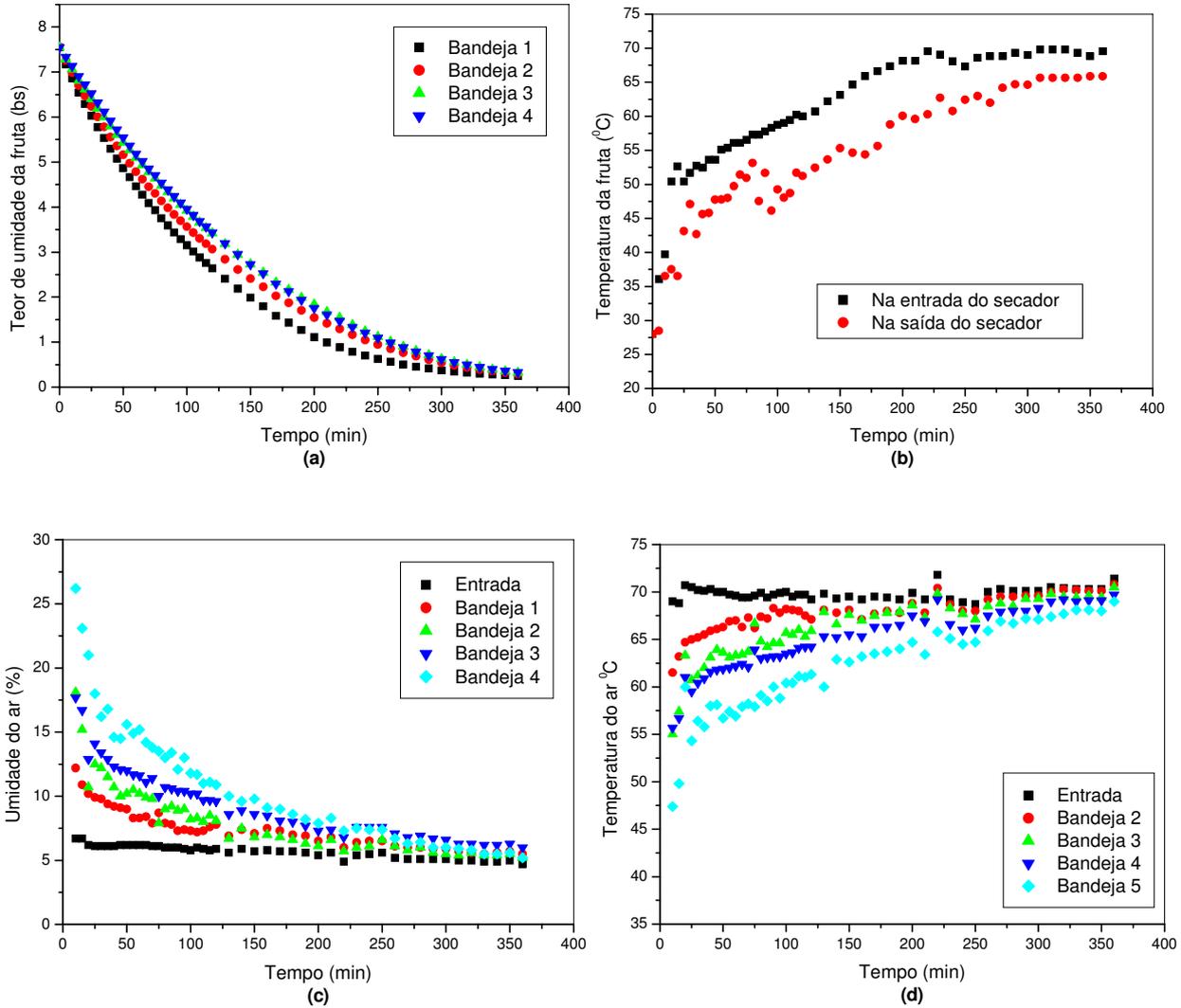


Figura A8 – Curvas experimentais de secagem do caju: (a) teor de umidade da fruta, (b) temperatura da fruta, (c) umidade relativa do ar e (d) temperatura do ar no secador de bandejas. $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 1,4\text{ m s}^{-1}$; $L = 2\text{ cm}$

Apêndice B

Curvas de eficiência energética

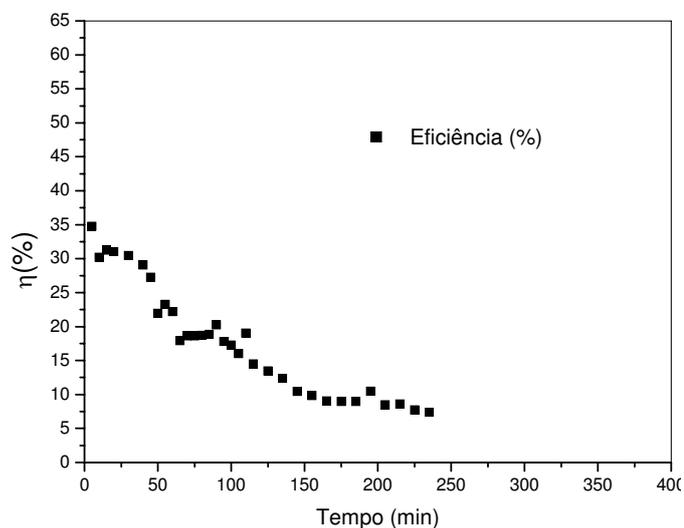


Figura B1 – Eficiência energética
 $T=80^{\circ}\text{C}$; $V=1,8\text{ m s}^{-1}$; $L=3\text{ cm}$

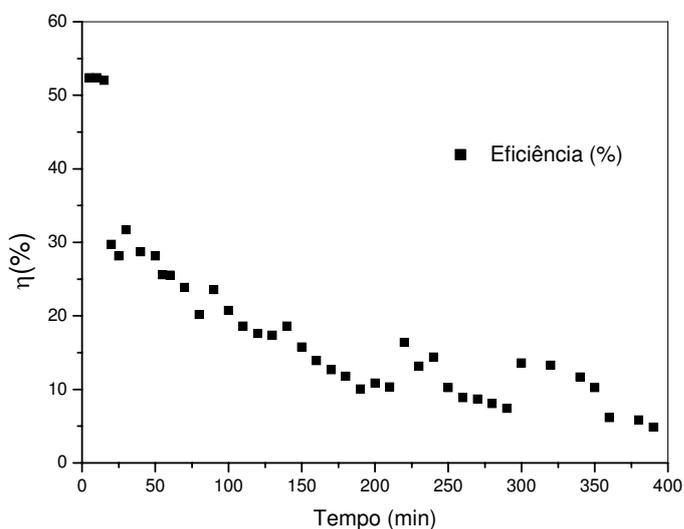


Figura B3 – Eficiência energética
 $T=60^{\circ}\text{C}$; $V=1\text{ m s}^{-1}$; $L=3\text{ cm}$

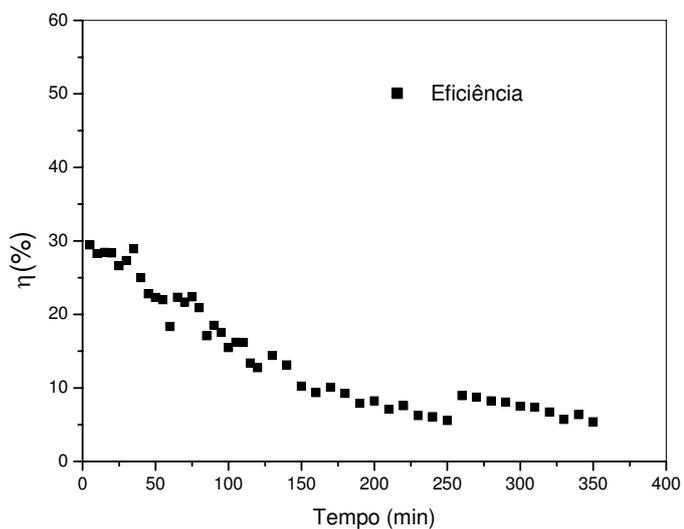


Figura B2 – Eficiência energética
 $T=60^{\circ}\text{C}$; $V=1,8\text{ m s}^{-1}$; $L=3\text{ cm}$

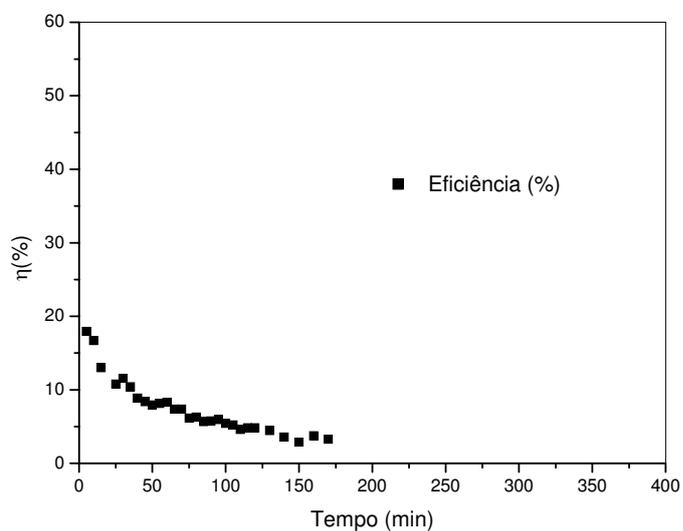


Figura B4 – Eficiência energética
 $T=80^{\circ}\text{C}$; $V=1,8\text{ m s}^{-1}$; $L=1\text{ cm}$

Curvas de eficiência energética

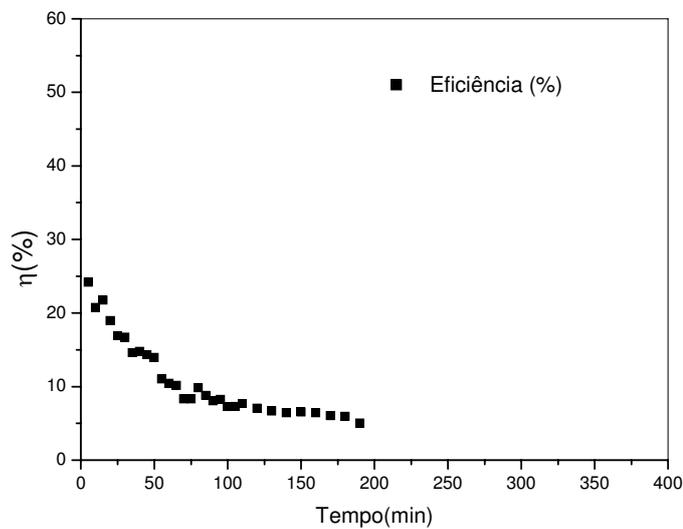


Figura B5 – Eficiência energética
 $T=80^{\circ}\text{C}$; $V=1\text{ m s}^{-1}$; $L=1\text{ cm}$

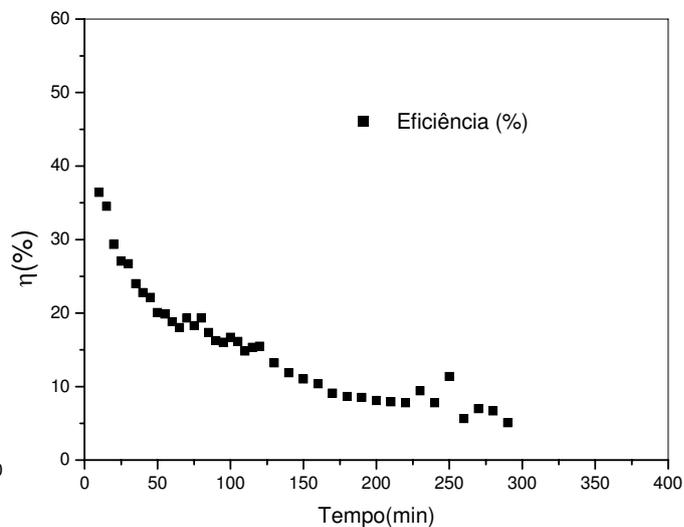


Figura B7 – Eficiência energética
 $T=70^{\circ}\text{C}$; $V=1,4\text{ m s}^{-1}$; $L=2\text{ cm}$

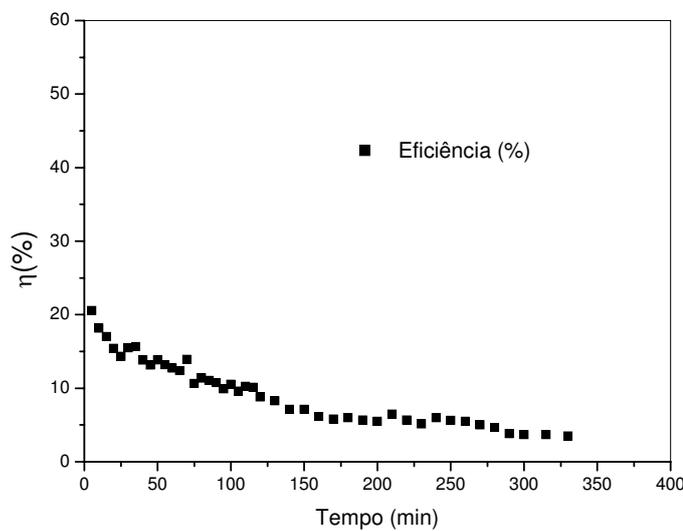


Figura B6 – Eficiência energética
 $T=60^{\circ}\text{C}$; $V=1\text{ m s}^{-1}$; $L=1\text{ cm}$

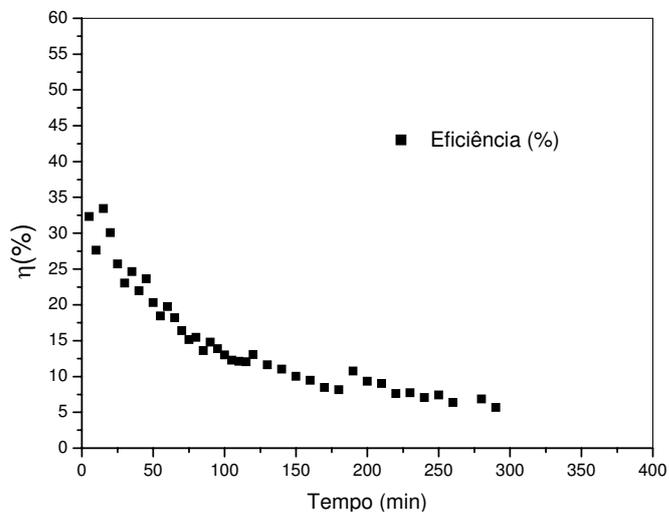


Figura 08 – Eficiência energética
 $T=70^{\circ}\text{C}$; $V=1,4\text{ m s}^{-1}$; $L=2\text{ cm}$

Apêndice C

Curvas do índice de saturação

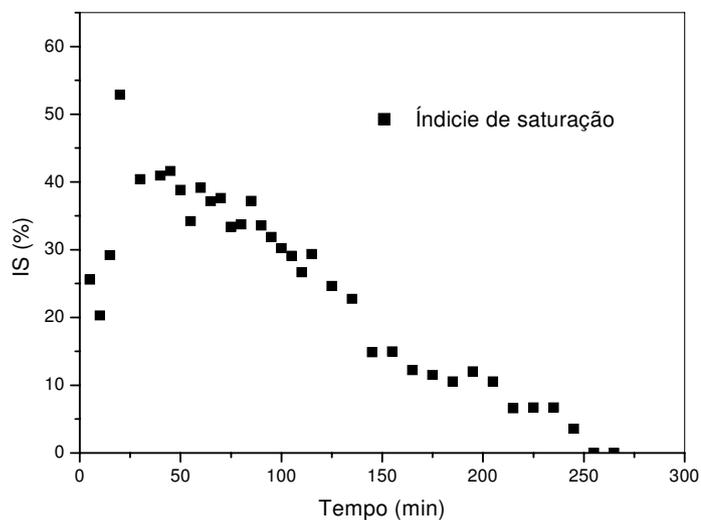


Figura C1—Índice de saturação $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V=1,8\text{ m s}^{-1}$; $L=3\text{ cm}$

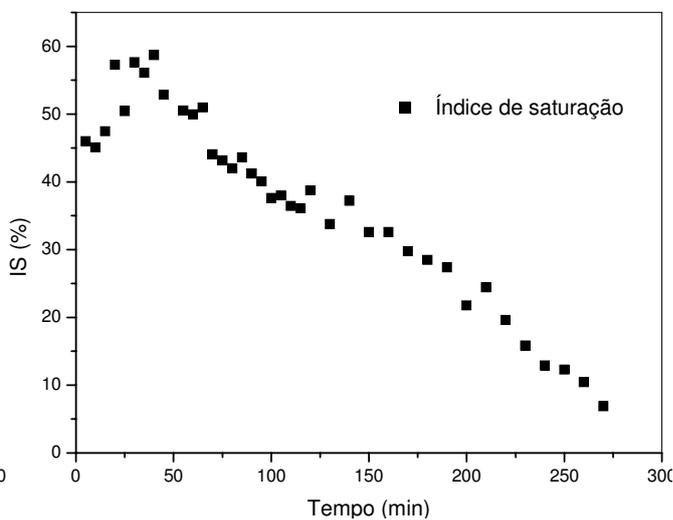


Figura C3—Índice de saturação $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V=1\text{ m s}^{-1}$; $L=3\text{ cm}$

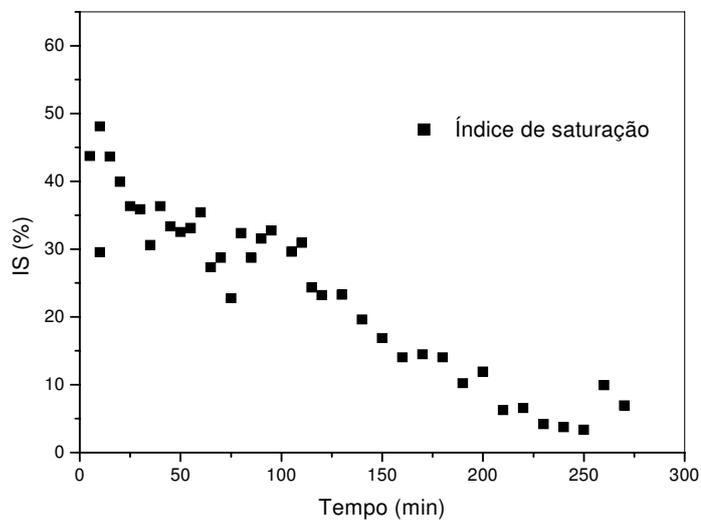


Figura C2—Índice de saturação $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V=1,8\text{ m s}^{-1}$; $L=3\text{ cm}$

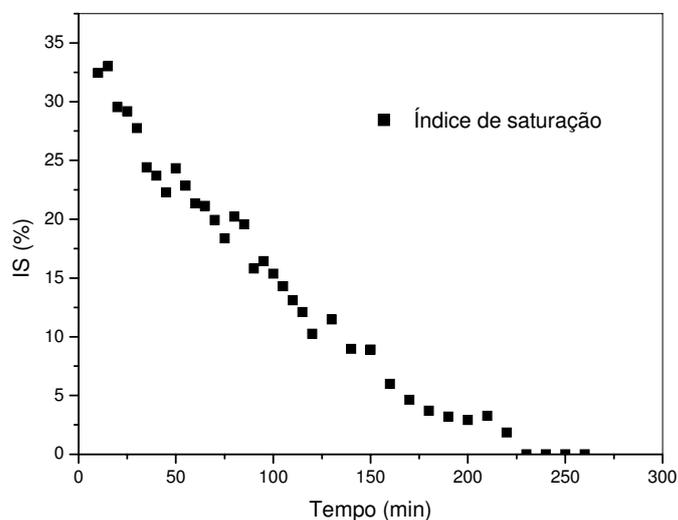


Figura C4—Índice de saturação $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V=1,8\text{ m s}^{-1}$; $L=1\text{ cm}$

Curvas do índice de saturação

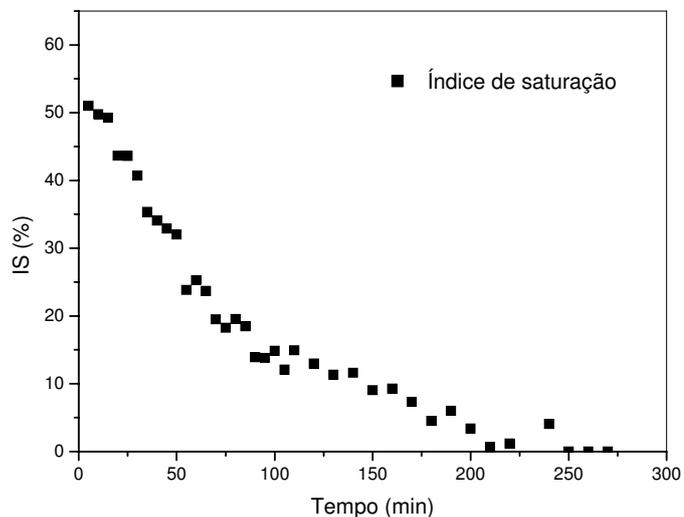


Figura C5—Índice de saturação $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V=1\text{ m s}^{-1}$; $L=1\text{ cm}$

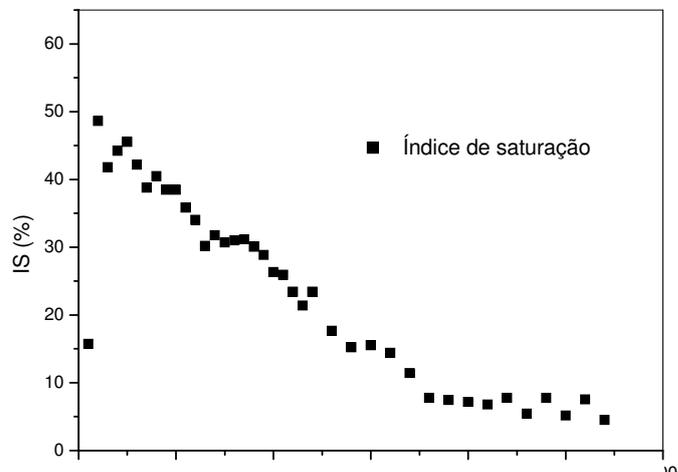


Figura C7—Índice de saturação $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V=1,4\text{ ms}^{-1}$; $L=2\text{ cm}$

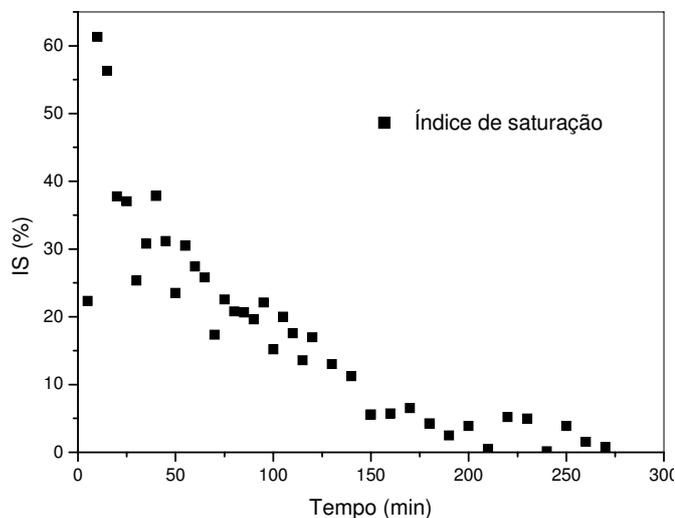


Figura C6—Índice de saturação $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V=1\text{ m s}^{-1}$; $L=1\text{ cm}$

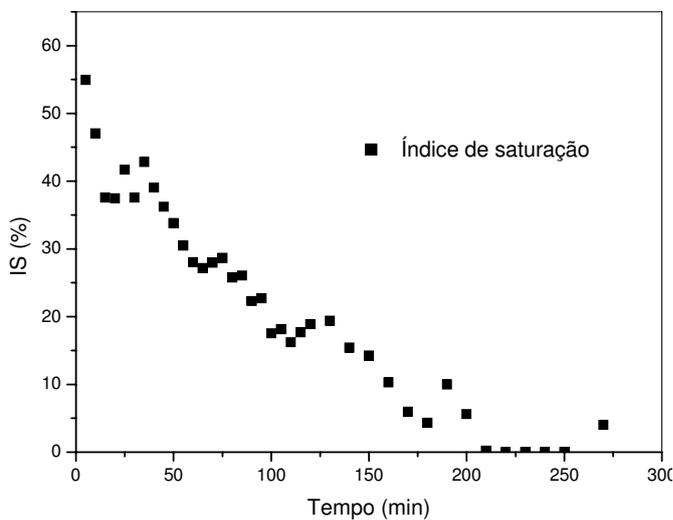


Figura C8—Índice de saturação $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $V=1,4\text{ ms}^{-1}$; $L=2\text{ cm}$

Apêndice D

Formulário de avaliação da aceitabilidade das amostras de fatias de caju seco.

Amostra _____

1- Você está recebendo uma amostra codificada de caju seco. Por favor, prove e avalie o quanto você gostou ou desgostou da mesma utilizando a escala abaixo.

- gostei muitíssimo
- gostei muito
- gostei moderadamente
- gostei ligeiramente
- não gostei nem desgostei
- desgostei ligeiramente
- desgostei moderadamente
- desgostei muito
- desgostei muitíssimo