



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
ÁREA: PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO  
DE PRODUTOS AGRÍCOLAS



**DISSERTAÇÃO**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PROCESSAMENTO**  
**E ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**CINÉTICA DE SECAGEM DA ACEROLA (*Malpighia*  
*emarginata* D. C.)**

**CLEANDRO ALVES DE ALMEIDA**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**MAIO – 2006**

**CINÉTICA DE SECAGEM DA ACEROLA (*Malpighia  
emarginata* D. C.)**

**Dissertação apresentada ao Curso de  
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
da Universidade Federal de Campina  
Grande, como parte dos requisitos  
necessários para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Agrícola.**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:  
Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas**

**ALUNO:** Cleandro Alves de Almeida

**ORIENTADORES:** Profa. Dra. Josivanda Palmeira Gomes – UAEAg/UFCG

Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida – UAEAg/UFCG

**CAMPINA GRANDE - PARAÍBA**



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCCG

A447c

2006 Almeida, Cleandro Alves de.

Cinética de secagem da acerola / Cleandro Alves de Almeida. —  
Campina Grande, 2006.  
80f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal  
de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadores: Josivanda Palmeira Gomes, Francisco de Assis Cardoso  
Almeida

1— Acerola 2— Isotermas de Sorção 3— Modelos Matemáticos. I.  
Título.

CDU-634.674 (043)



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



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

**CLEANDRO ALVES DE ALMEIDA**

CINÉTICA DE SECAGEM DA ACEROLA (*Malphigia emarginata* D.C.)

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Josivanda P. Gomes  
Dra. Josivanda Palmeira Gomes - Orientadora

APROVADO

Francisco de Assis Cardoso Almeida  
Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida - Orientador

APROVADO

Vimário Simões Silva  
Dr. Vimário Simões Silva - Examinador

APROVADO

Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo  
Dra. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo - Examinadora

Aprovado

MAIO - 2006

## DEDICO

A meus Pais, José e Francisca, por todo amor e dedicação.

A meu irmão Carlos pelos incentivos dados.

A meus Avós, Severina de Almeida e Severino José de Almeida (in memorian), pelo carinho e dedicação.

A minhas Tias, Betânia, Elidimar, Maria do Socorro, Maria José, Maria Aparecida e Maria de Lourdes pelo carinho e prazer da convivência.

A minha noiva Ana Paula, pelo amor, incentivos, apoio e paciência.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, inteligência suprema, causa primeira de todas as coisas, por estar sempre guiando o meu caminho.

A meus pais, José Alves e Francisca de Almeida, pelo apoio e incentivos.

A minha noiva Ana Paula, pelo amor, apoio e paciência.

Ao meu irmão Carlos e minha cunhada Syduane, pelos estímulos dados.

A minha Avó Severina, minhas Tias e toda a minha Família, pela confiança e apoio.

À Universidade Federal de Campina Grande, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao CNPq, pela bolsa concedida.

Aos meus Orientadores Profa. Dra. Josivanda Palmeira Gomes e Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso de Almeida, pela paciência, apoio e ensinamentos na realização desta dissertação.

À coordenação e aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em especial a Profa. Dra. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo, por ter aceitado participar da banca examinadora.

Aos Professores Dr. Vimário Simões Silva e Dra. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina, a Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ) e seus funcionários, que possibilitaram a utilização das dependências do Laboratório de Sistemas Particulados, para os experimentos de secagem e isotermas de sorção.

Às Secretárias Rivanilda e Aparecida da Pós-Graduação do Curso de Engenharia Agrícola, pela atenção e ajuda sempre que precisei durante o curso.

A Francisca Marta, Adriano, Manassés e Luciana pela valiosa ajuda na realização deste trabalho.

A minha amiga e irmã Daniela Batista, pelo companheirismo, incentivos e pela grande amizade.

Aos amigos: Márcia Araújo, M<sup>a</sup> do Socorro Barbosa, Ticiane, Robson, Taciana, Jardel, Rosângela Meirelles, Daniely, Jeane, Cira, Sckaymenn, Ezenildo, Ozênia, Virgínea, Rosângela Costa, Anny Kelly, João Carlos, Wolia, Regilane, Jozan, Karla, Jean, Niédja, Ivonete, Marinalva e Yvison pela amizade e convivência.

Em fim, aos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	iii
LISTA DE FIGURAS .....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivos específicos .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1. Acerola .....	4
2.2. Ácido ascórbico (Vitamina C).....	5
2.3. Atividade de água .....	6
2.3.1. Isotermas de sorção.....	8
2.3.1.1. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas .....	9
2.4. Secagem .....	11
2.4.1. Efeito da temperatura e velocidade do ar de secagem .....	14
2.4.2. Secadores de leito fixo .....	15
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
3.1. Matéria-prima .....	17
3.2. Isotermas de sorção.....	17
3.2.1. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas .....	19
3.3. Secagem no equipamento de leito fixo .....	22
3.3.1. Modelos matemáticos para ajuste das curvas de secagem.....	24
3.4. Determinação do ácido ascórbico .....	25
3.4.1. Análise estatística.....	25
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>26</b>
4.1. Isotermas de sorção .....	26
4.1.1. Adsorção.....	26
4.1.2. Dessorção .....	30
4.1.3. Histerese .....	34
4.2. Cinética de secagem.....	38
4.3. Determinação do ácido ascórbico .....	47
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>50</b>

---

<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>
<b>7. APÊNDICE A .....</b>	<b>61</b>
<b>8. APÊNDICE B .....</b>	<b>68</b>
<b>9. APÊNDICE C .....</b>	<b>78</b>



---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Dados de atividade de água ( $a_w$ ) e umidade de equilíbrio (b.s.) para a adsorção da polpa de acerola em diferentes temperaturas.....	26
Tabela 2 -	Parâmetros dos modelos de GAB, BET, Oswin, Smith, Halsey e Peleg ajustados as isothermas de adsorção da polpa de acerola .....	27
Tabela 3 -	Dados de atividade de água ( $a_w$ ) e umidade de equilíbrio (b.s.) para a dessorção da polpa de acerola nas diferentes temperaturas.....	30
Tabela 4 -	Parâmetros dos modelos de GAB, BET, Oswin, Smith, Halsey e Peleg ajustados as isothermas de dessorção da polpa de acerola.....	31
Tabela 5 -	Equações das curvas de isothermas de adsorção da polpa de acerola .....	37
Tabela 6 -	Equações das curvas de isothermas de dessorção da polpa de dessorção.....	37
Tabela 7 -	Equações da cinética de secagem da acerola para a velocidade do ar de secagem a $1,0 \text{ m s}^{-1}$ .....	42
Tabela 8 -	Equações da cinética de secagem da acerola para a velocidade do ar de secagem a $1,5 \text{ m s}^{-1}$ .....	42
Tabela 9 -	Equações da cinética de secagem da acerola para a velocidade do ar de secagem a $2,0 \text{ m s}^{-1}$ .....	42
Tabela 10 -	Parâmetros do modelo de Page, para a secagem da acerola nas temperaturas e velocidades do ar de secagem estudadas.....	43
Tabela 11 -	Parâmetros do modelo de Thompson, para a secagem da acerola nas temperaturas e velocidades do ar de secagem estudadas. ....	46
Tabela 12 -	Análise de variância (Experimento Fatorial) em relação ao teor de ácido ascórbico da acerola antes e após a secagem nas temperaturas ( $50, 60$ e $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e velocidades do ar de secagem ( $1,0, 1,5$ e $2,0 \text{ m s}^{-1}$ ) estudadas.....	47
Tabela 13 -	Valores médios do teor de ácido ascórbico ( $\text{mg}/100\text{g}$ ) da acerola nas diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem estudadas.....	47

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Frutos de acerola .....	4
Figura 2 -	Isotermas de adsorção e dessorção, mostrando o fenômeno da histerese. ....	11
Figura 3 -	Curvas características da cinética de secagem.....	13
Figura 4 -	Esquema do emprego do equipamento Novasina na obtenção das isotermas de sorção. ....	18
Figura 5 -	Secador de leito fixo.....	23
Figura 6 -	Isotermas de adsorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de GAB.....	29
Figura 7 -	Isotermas de dessorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de BET .....	33
Figura 8 -	Histerese da polpa de acerola na temperatura de 30 °C ajustada para o modelo de Oswin. ....	35
Figura 9 -	Histerese da polpa de acerola na temperatura de 40 °C ajustada para o modelo de Oswin. ....	35
Figura 10 -	Histerese da polpa de acerola na temperatura de 50 °C ajustada para o modelo de Oswin. ....	36
Figura 11 -	Histerese da polpa de acerola para as temperaturas de 30 (A), 40 (B) e 50 °C (C). ....	38
Figura 12 -	Cinética de secagem de frutos de acerola com velocidade do ar de secagem a 1,0 (A), 1,5 (B) e 2,0 m s <sup>-1</sup> (C).....	40
Figura 13 -	Cinética de secagem da acerola e curvas ajustadas com o modelo de Page para as diferentes velocidades do ar de secagem e temperaturas estudadas. ....	45



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
ÁREA DE PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE  
PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**Dissertação de Mestrado:** Cinética de secagem da acerola (*Malpighia emarginata* D. C.)

**Autor:** Cleandro Alves de Almeida

**Orientadores:** Profa. Dra. Josivanda Palmeira Gomes

Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida

---

**RESUMO**

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de secar a acerola em um secador de leito fixo e estudar o efeito da temperatura e velocidade do ar de secagem durante o processo. Os frutos da acerola foram secos nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, nas velocidades do ar de secagem a 1,0, 1,5 e 2,0 m s<sup>-1</sup>, sendo os dados aplicados aos modelos de Page e Thompson. Os frutos da acerola *in natura* foram triturados até a forma de polpa para a determinação das isotermas de sorção (adsorção e dessorção) nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C, e os dados experimentais foram aplicados aos modelos de GAB, BET, Smith, Oswin, Halsey e Peleg. Após a secagem os frutos foram processados até a forma de pó, o qual foi utilizado para a determinação de ácido ascórbico. A cinética de secagem da acerola ocorreu dentro do período de taxa decrescente, sendo pouco influenciada pela velocidade do ar de secagem e fortemente pela temperatura. Os frutos da acerola foram desidratados em tempo aproximadamente de 16 h e 20 min, 9 h e 7 h e 36 min quando submetidos às temperaturas de 50, 60 e 70 °C respectivamente. Os modelos de Page e de Thompson se ajustaram bem aos dados experimentais das secagens, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 98,80%. Os modelos matemáticos de GAB e Peleg foram os que melhor representaram os dados experimentais as curvas de adsorção da polpa de acerola, e os de GAB e BET para as curvas de dessorção. O aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem influenciou na degradação do ácido ascórbico durante a secagem.

**Palavras-chave:** acerola, isotermas de sorção, modelos matemáticos



---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
ÁREA DE PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE  
PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**M. Sc. Thesis:** Drying Kinetics of the acerola (*Malpighia emarginata* D. C.)

**Author:** Cleandro Alves de Almeida

**supervisors:** Profa. Dra. Josivanda Palmeira Gomes

Prof. Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida

---

**ABSTRACT**

The present work was developed with the objective to dry acerola in a drier of fixed stream bed and to study the effect of the temperature and air speed of drying during the process. The fruits of acerola had been dry in the temperatures of 50, 60 and 70 °C, in the air speeds of drying the 1,0, 1,5 and 2,0 m s<sup>-1</sup>, being the data applied to the models of Page and Thompson. The fruits of acerola *in natura* had been triturated until the pulp form for the determination of the isotherms of sorption (adsorption and desorption) in the temperatures of 30, 40 and 50 °C, and the experimental data had been applied to the models of GAB, BET, Smith, Oswin, Halsey and Peleg. After the drying the fruits had been processed until the dust form, which was used for the determination of ascorbic acid. The kinetic of drying of acerola occurred inside of the period of decreasing tax, being little influenced for the air speed of drying and strong for the temperature. The fruits of acerola had been dehydrated in time approximately of 16 h and 20 min, 9 h and 7 h and 36 min when submitted to the temperatures of 50, 60 and 70 °C respectively. The models of Page and Thompson if had adjusted to the experimental data of the dryings well, with coefficients of determination ( $R^2$ ) superior 98,80%. The mathematical models of GAB and Peleg had been the ones that better had represented the experimental data the curves of adsorption of the pulp of acerola, and of GAB and BET for the desorption curves. The increase of the temperature and the air speed of drying influenced in the degradation of the ascorbic acid during the drying.

**Key words:** acerola, sorption of isotherms, mathematical models

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o principal produtor mundial de frutas in natura (Brito, 2000). No entanto, apresenta altos índices de perdas pós-colheita, incluindo o não aproveitamento de excedentes de safra, particularmente de frutos sazonais. O tema exige ampla discussão e decisões urgentes em se otimizar o processo, diminuindo perdas, viabilizando o transporte e a distribuição durante todo o ano, visto que a agricultura moderna exige maior produtividade e qualidade dos frutos, minimização dos custos e ganhos de competitividade, principalmente, em se tratando de um produto de exportação (Alves, 1996).

Coutinho (1995) descreve a acerola como sendo um arbusto frutífero, cujo cultivo para fins comerciais vem se expandindo em nosso país. Na região Nordeste foi introduzida em 1955 no Estado de Pernambuco a partir de sementes trazidas de Porto Rico. Destacando-se também como produtores o Rio Grande do Norte, Bahia e Paraíba. No Estado da Paraíba o maior plantio de acerola encontra-se no município de Alhandra, seguido de Cabedelo, Santa Rita, Sapé e Guarabira.

A acerola é um fruto delicado, com tecido protetor muito fino que amadurece rapidamente. A temperatura de melhor conservação é de 7 °C, sendo conhecida como “Cereja-das-Antilhas” por ser originária das Antilhas, Norte da América do Sul e América Central, que adquiriu importância mundial devido ao alto teor de vitamina C (Gonzaga Neto & Soares, 1994).

Por vários anos consecutivos o agronegócio brasileiro é um dos setores superavitário da economia, e está no centro das atenções do mundo, uma vez que o Brasil se coloca como um dos principais produtores/exportadores de alimentos. Mas,

com a abertura das economias no mundo, os ganhos vão depender de se responder às exigências do mercado internacional quanto à qualidade dos produtos, regularidade do fornecimento e pontualidade da entrega, conquistando uma imagem confiável para os consumidores nacionais e internacionais (Brito, 2000). Neste contexto os produtores precisam contar com os meios e os ensinamentos da tecnologia para a conservação e a industrialização das frutas, garantindo-os lucros maiores e, a certeza de não perder a sua produção por deterioração.

A busca de um método em que o produto seja aproveitado ao máximo em cada colheita, vem motivando diversos pesquisadores para estudarem a melhor forma e modo de conservar as propriedades sensoriais e vitaminas das frutas. Um desses métodos é a secagem, que é um processo combinado de transferência de calor e massa, na qual reduz a disponibilidade de água, inibindo o crescimento microbiano e reações químicas e bioquímicas. O aumento da temperatura do material a ser desidratado promove a evaporação da água, enquanto a circulação do ar remove a umidade evaporada.

Muitos aspectos de qualidade dos alimentos podem ser influenciados pela quantidade de água. O conhecimento da atividade de água permite formar uma idéia sobre quais os alimentos com maior tendência a conservar-se e quais, ao contrário, correm o risco de se estragar. Isto devido ao fato de que os microrganismos, como células vivas que são, precisam de água para seu crescimento e essa necessidade se vincula mais com a atividade de água do que com o conteúdo de umidade.

## **1.1. Objetivo geral**

Estudar a cinética de secagem da acerola utilizando um secador de leito fixo.

### **1.1.1. Objetivos específicos**

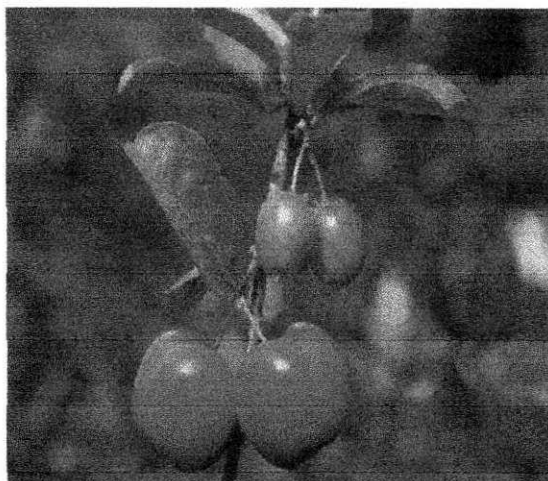
- Analisar o efeito das variáveis operacionais, como temperatura (50, 60 e 70 °C) e velocidade do ar de secagem (1,0, 1,5 e 2,0 m s<sup>-1</sup>)
- Determinar as isotermas de sorção para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C e relacioná-las com modelos matemáticos usuais
- Determinar o teor de ácido ascórbico da acerola antes e após a sua secagem.

## 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Acerola

A acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) ou cereja-das-antilhas pertence à família Malpighiaceae (Figura 1), é uma planta de clima tropical, porém adapta-se bem em regiões de clima subtropical. Para que a mesma cresça e produza bem, é fundamental uma adequada disponibilidade de água no solo. Além disso, a planta é exigente quanto à insolação, que influencia bastante a produção de vitamina C (Ritzinger & Ritzinger, 2004).

Para Gomes (2002) os frutos de acerola são uma drupa de superfície lisa ou dividida em três gomos, com tamanho variando de 3 a 6 cm de diâmetro. A coloração externa varia do laranja ao vermelho intenso quando maduro e possui polpa carnosa, suculenta e de cor alaranjada.



**Figura 1.** Frutos de acerola

Segundo Junqueira et al. (2002) o cultivo da aceroleira teve um grande impulso nos últimos anos, devido à elevada taxa de ácido ascórbico (vitamina C) presente nos frutos.

De acordo com Silva et al. (1998) as variedades de acerola são classificadas em doce e ácida. Deste modo, selecionaram clones, levando em consideração o teor vitamínico. Nesta classificação, os frutos que produzem mais que 1000 mg de ácido ascórbico por 100 g de suco é que são considerados satisfatórios. Scholz & Stenzel (1996) observaram que o teor de vitamina C nos frutos variou em torno de 705,52 a



3726,56 mg 100 g<sup>-1</sup> de suco, mostrando haver grande variabilidade no teor de vitamina C nos frutos de acerola.

Para Ritzinger & Ritzinger (2004) a acerola apresenta elevado potencial para produtos processados (suco integral e polpa congelada) e indústria farmacêutica. Para uso doméstico, é geralmente consumida ao natural e na forma de sucos, geléias e doces em massa, podendo ser misturada a outros sucos de frutas como laranja, manga e mamão. Os frutos para consumo ao natural são acondicionados em embalagens plásticas e conservados sob refrigeração à temperatura de 7 a 8 °C, por um período de até 10 dias. Frutos destinados à exportação são armazenados sob congelamento à temperatura de -20 °C, que permite a conservação por mais tempo.

De acordo com Marino Neto (1996) a acerola é consumida principalmente na forma de sucos e polpas, mas pode ser encontrada também em sorvetes, balas, compotas, iogurtes e outros, podendo ser largamente ampliadas as maneiras de consumo da acerola, uma vez que todos esses produtos conservam altas doses de vitamina C. No mercado, encontram-se vários produtos alimentícios de acerola, sendo as formas mais comuns de comercialização a acerola *in natura*, polpa congelada e suco engarrafado. Os prazos de validade desses produtos, de acordo com os fabricantes, variam de 4 a 12 meses (Yamashita et al., 2003).

De acordo com Nogueira et al. (2002) o teor de vitamina C e outras características atribuídas à qualidade da acerola, tais como coloração, peso e tamanho dos frutos, teor de sólidos solúveis totais e pH do suco, além de serem afetadas pela desuniformidade genética dos pomares, sofrem influência de vários outros fatores, como precipitações pluviiais, temperatura, altitude, adubação, irrigação e a ocorrência de pragas e doenças.

## **2.2. Ácido ascórbico (Vitamina C)**

A vitamina C é encontrada em concentrações razoáveis em todas as plantas superiores. Fontes extremamente ricas nessa vitamina são vegetais verdes frescos e frutas cítricas (Bobbio & Bobbio, 1985).

Segundo Brasil (1998) o índice diário recomendado (IDR) para a ingestão de ácido ascórbico para um adulto é de 60 mg.

De acordo com Chitarra & Chitarra (1990), cerca de 90% das necessidades de vitamina C (ácido ascórbico) do homem, advém de frutas e hortaliças. Ela é o

componente nutricional mais importante, embora na maioria dos frutos seu teor não exceda a 0,3%.

De acordo com Mustard (1946) o máximo de conteúdo de ácido ascórbico dá-se entre 16 e 18 dias depois da frutificação (fruto verde), atingindo 4676 mg/100g de polpa.

Entre as frutas ricas em ácido ascórbico, destaca-se a cereja do pará com teor de 1790 mg/100 g de ácido ascórbico, seguida do caju, com suas variedades vermelha e amarela, a goiaba, a manga, as frutas cítricas e um grande número de outras frutas (Franco, 1998).

Segundo Sgarbiere (1987) a vitamina C é a mais facilmente degradável de todas as vitaminas. É estável apenas em meio ácido e na ausência de luz, de oxigênio e de calor. Os principais fatores capazes de degradar o ácido ascórbico são: meio alcalino, oxigênio, calor, ação da luz e metais (Fe, Cu, Zn).

Em tecidos vegetais, a degradação do ácido ascórbico também pode ser resultado da ação da enzima ácido ascórbico oxidase e da fenolase. Existem pelo menos quatro enzimas que ocorrem em frutas e vegetais responsáveis pela destruição oxidativa da vitamina C: ácido ascórbico oxidase, fenolase, citocromo oxidase e a peroxidase (Coulate, 2004).

### **2.3. Atividade de água**

De acordo com Castro et al. (1998) a água contida nos alimentos é excelente meio de transmissão de calor, sendo eficiente tanto para resfriar quanto para aquecer. Existe pelo menos dois tipos de água contida nos alimentos: a água livre, fracamente ligada ao substrato e que funciona como solvente, permitindo o crescimento de microrganismos e as reações químicas, e a água combinada, fortemente ligada ao substrato, mais difícil de ser eliminada, e não é utilizada como solvente nem para o crescimento de microrganismos e nem para reações químicas.

O teor de água é a quantidade de água não combinada na amostra, pois a existência de uma porcentagem mínima de água, caracteriza-o como um produto de melhor qualidade com maior durabilidade (Vieira, 1994).

Segundo Oliveira (1981) o teor de água presente em qualquer alimento é de suma importância para a determinação de procedimentos necessários para o processamento e armazenamento. A umidade corresponde à perda em peso sofrida pelo

produto quando aquecido em condições nas quais a água é removida. Na realidade, não é só a água removida, mas também outras substâncias se volatilizam nessas condições.

Um dos principais fatores que governam a conservação ou deterioração de um alimento é a atividade de água ( $a_w$ ), que é definida como sendo a pressão de vapor da água do ar ambiente em equilíbrio com a umidade do produto ( $P_v$ ), dividida pela pressão de vapor do ar em contato com a superfície do produto, que contém água líquida ( $P_{vs}$ ):

$$\text{Atividade de água} \rightarrow a_w = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (1)$$

Nos alimentos desidratados, a inibição da atividade enzimática e do crescimento microbiano, ocorre pelo decréscimo da atividade de água, pois um processo de tratamento térmico sem que ocorra a secagem é suficiente para essa inibição. Secar o produto, é portanto, reduzir sua atividade de água (Fioreze, 2004).

Segundo Bobbio & Bobbio (1985) o valor da atividade de água é 1, na água pura. Nos alimentos ricos em água corresponde a valores acima de 0,90, os quais nestas condições sofrem facilmente contaminação microbiológica, enquanto que com a atividade de água próxima de 0,6, tem-se pequeno ou nenhum crescimento de microrganismos. Os efeitos da variação da atividade de água num alimento não só estão ligados ao crescimento de microrganismos ou à sua deterioração química, mas também a deterioração da sua consistência, tornando tais alimentos impróprios para o consumo ou, pelo menos diminuindo sua aceitação.

De acordo com Lewis (1990) quase toda atividade microbiana é inibida, para valores de  $a_w$  inferiores a 0,6, contudo, reações de oxidação, escurecimento e atividade enzimática podem ocorrer em conteúdo de umidade baixos.

A atividade de água de um produto não é somente função do conteúdo de água, mas também de substâncias as quais exercem o efeito de ligação da água na estrutura do alimento. Produto com o mesmo conteúdo de umidade podem desta forma, ter diferentes atividades de água, dependendo, sobretudo, do seu conteúdo de água ligando substâncias a sua estrutura (Gouveia, 1999).

### 2.3.1. Isotermas de sorção

Quando um material biológico é exposto a uma determinada umidade, ele reage no sentido de ajustar sua própria umidade a uma condição de equilíbrio com o ambiente. Este ajuste ocorre quando a pressão de vapor de água na superfície do material se iguala à pressão de vapor de água do ar que o envolve (Treybal, 1963).

As isotermas de sorção podem ser descritas como a relação entre a atividade de água em função do seu teor de umidade a uma dada temperatura; é uma predição da capacidade do produto adsorver ou dessorver água (Araújo et al., 2001). Estes dados são indispensáveis para produtos alimentícios, no desenvolvimento de processos e no controle de qualidade das indústrias de alimentos, isto porque, as isotermas têm ampla aplicação no campo da secagem, embalagem e armazenamento.

A curva de adsorção é determinada, partindo do produto com baixo teor de umidade e colocando amostras em ambientes de diferentes umidades relativas e temperatura constante. Após obtido o equilíbrio higroscópico da amostra com o ambiente, determina-se o teor de umidade do produto. Os resultados são representados graficamente. Uma outra curva pode ser obtida, desta vez por perda de água das amostras. Este processo, representado em um gráfico, nos dá a curva de dessorção (Puzzi, 2000).

O conhecimento das isotermas de sorção de água é muito importante na concentração, desidratação e secagem, predição de estabilidade química, enzimática e microbiológica, seleção de material para embalagens bem como na determinação da qualidade e vida de prateleira de alimentos (Dural & Hines, 1993).

O procedimento mais habitual para a preservação da qualidade dos alimentos é a redução da atividade de água a níveis suficientemente baixos, para a inibição do crescimento microbiano, daí a obtenção das isotermas de sorção é essencial para se estabelecer os limites de umidade a partir dos quais se inibi o crescimento microbiano e a produção de toxinas durante o armazenamento (Castillo et al., 2003).

A curva de isoterma pode se apresentar de duas formas: isotermas de adsorção, obtida quando um alimento totalmente seco é colocado em atmosferas com diversos incrementos de umidade relativa, sendo medidos o aumento de peso desse alimento devido ao ganho de água; isoterma de dessorção, obtida quando o alimento inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições atmosféricas criadas para adsorção sendo

medidos neste caso a diminuição de peso do alimento, provocada pela perda de água (Kapsalis, 1987).

Uma isoterma de sorção pode apresentar três regiões, dependendo do estado de água presente no alimento: a primeira região representa a adsorção na monocamada molecular de um filme de água, e está entre 0 e 35% de umidade relativa; a segunda região, que representa a adsorção nas camadas adicionais acima da monocamada, localiza-se entre 35 e 60% de umidade relativa; a terceira região, localizada acima de 60% de umidade relativa, representa a água condensada nos poros do material, seguida pela dissolução de materiais solúveis presentes (Prado et al., 1999).

### **2.3.1.1. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas**

Com o intuito de prever o comportamento das isotermas de sorção, diversos autores propuseram modelos de ajuste de isotermas de sorção. Dentre estes o de GAB e BET, são referenciados como sendo os mais empregados para expressar a atividade de água de frutos (Gouveia et al., 1997; Pena et al., 1997).

Rockland (1957) afirmou que a maior vantagem da utilização de modelos matemáticos na predição de isotermas de adsorção de umidade, reside no fato de que com poucos pontos experimentais, pode-se construir uma isoterma, a qual, por outro lado pode ser facilmente interpolada ou extrapolada para a obtenção de pontos nas regiões de baixas e altas de atividade de água, pontos esses de difícil determinação experimental.

Park & Nogueira (1992) apresentaram uma conceituação do modelo de BET, chegando até a sua extensão, o modelo de GAB. Concluíram que por apresentar três parâmetros a serem estimados ( $X_m$ ,  $CBET$ ,  $n$ ) e sendo uma equação polinomial de grau maior que 2, dependendo do valor numérico de  $n$  estimado, o modelo de BET na sua forma original possivelmente apresentará um melhor ajuste dos dados experimentais.

De acordo com Bizot (1983) o modelo de GAB (Guggenheim – Anderson – De Boer) é um modelo triparmétrico, podendo ser considerado como uma extensão do modelo de BET. Na maioria dos casos, consegue-se ajustar muito bem o modelo até atividade de água de 0,9.

Lomauro et al. (1985) verificaram que a equação de GAB pode representar com grande precisão mais que 50% das isotermas de frutas, vegetais e carnes, quando comparada com equações de dois parâmetros.

De acordo com Chirife & Iglesias (1978) o modelo de Oswin é a expansão de uma série matemática para curvas sigmoidais. Segundo os mesmos autores o modelo de Smith representa bem a porção final das isotermas de sorção de vários biopolímeros.

Halsey, citado por Chirife & Iglesias (1978) desenvolveu uma equação que considera a condensação da multicamada a uma distância relativamente grande da superfície. Ele assumiu que a magnitude do parâmetro  $b$  caracteriza o tipo de interação entre o vapor e o sólido. Se  $b$  é grande, a atração entre o sólido e o vapor é muito específica e não se estende para muito longe da superfície. Se  $b$  é pequeno, as forças de atração predominantes são de van der Waals e são capazes de agir a grandes distâncias da superfície.

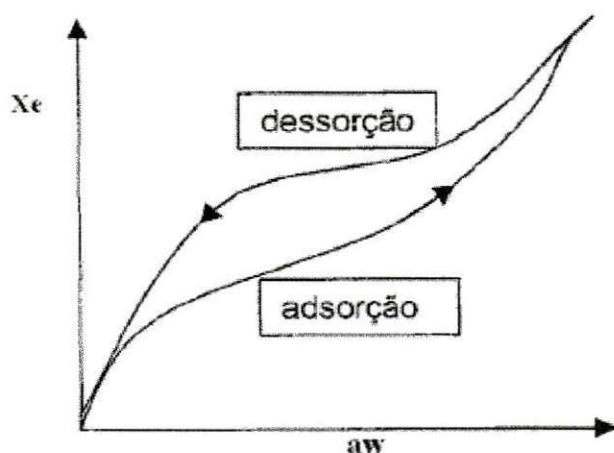
Peleg (1993) propôs um modelo com quatro parâmetros para ajustar os dados de isotermas de sorção da literatura. Apresentou resultados em que o modelo proposto apresentou um ajuste comparável ou levemente melhor que o modelo de GAB, para valores de atividade de água abaixo de 0,9. Este modelo pode representar isotermas de sorção sigmoidais e não sigmoidais.

### **2.3.2.. Histerese**

Christensen (1974) relata que as isotermas de sorção de umidade para polímeros carboidratados, tais como amido e celulose, são suaves curvas sigmóides sem apresentar nenhuma descontinuidade, entretanto, segundo o mesmo autor, as isotermas de sorção e dessorção para tais substâncias não são necessariamente as mesmas. Para muitas substâncias, inclusive grãos e cereais, curvas de isotermas de dessorção são marcadamente deslocadas para a esquerda das curvas de isotermas de adsorção, isto é, o teor de umidade do produto a determinada temperatura, corresponde a dois valores de umidade relativa, dependendo se o material está sorvendo ou dessorvendo umidade.

Segundo Labuza (1968) essas curvas, que teoricamente são idênticas, não se sobrepõem na prática. É comum haver diferenças entre as isotermas de dessorção e adsorção com os valores obtidos por determinações experimentais, esse fenômeno é denominado de histerese (Figura 2). As razões para que este fenômeno ocorra não são muito claras. Segundo o mesmo autor, algumas teorias tentam explicar o fenômeno da histerese, todas elas baseiam-se no efeito da água condensando em capilares.





**Figura 2.** Isotermas de adsorção e dessorção, mostrando o fenômeno de histerese (Fonte: Puzzi, 2000)

A forma das isotermas de sorção para a maioria dos alimentos é sigmoidal. Como o comportamento da sorção de água do material é determinado por sua composição química e pelo estado físico químico de seus constituintes, as isotermas dos produtos alimentícios diferem consideravelmente: produtos com amido, incluindo os cereais, absorvem mais água a baixas atividades de água, comparando com produtos ricos em proteína, como a carne. Açúcares, em geral, representam um grupo de materiais que exibem dois comportamentos na sorção. No estado amorfo são mais higroscópicos que no estado cristalino (Wolf et al., 1985).

De acordo com Fioreze (2004), nos métodos estáticos, se o produto atinge o equilíbrio cedendo água ao ambiente (dessorção), ou ganhando água do ambiente (adsorção), os valores finais de umidade de equilíbrio obtidos pelos processos são diferentes, quando o esperado seria que fossem iguais, pois o produto é o mesmo, e o ambiente está nas mesmas condições de temperatura e umidade. O fenômeno conhecido como “histerese” está relacionado com o rearranjo das moléculas do produto durante e após a secagem, diminuindo pontos de cargas elétricas moleculares na matéria seca, que poderiam reter moléculas de água entre pólos de carga elétrica opostas.

#### 2.4. Secagem

A secagem é o processo utilizado para reduzir o teor de umidade de um determinado produto agrícola com o objetivo de preservar suas qualidades nutricionais e

sensoriais desenvolvidas durante a fase de campo. Preserva características físicas e propriedades tecnológicas aumentando o potencial de conservação pós-colheita (Brooker et al., 1989).

Segundo Puzzi (2000) a maioria dos produtos agrícolas é colhida no ponto de maturação fisiológica, apresentam teores máximo de amido, proteínas, óleos e outros materiais de reserva e elevado teor de umidade. Sua atividade metabólica continua além da possibilidade de deterioração por fungos e insetos, por isso a remoção da água é necessária para a conservação durante o armazenamento. Outra vantagem da secagem é a redução do peso e volume do produto para seu armazenamento.

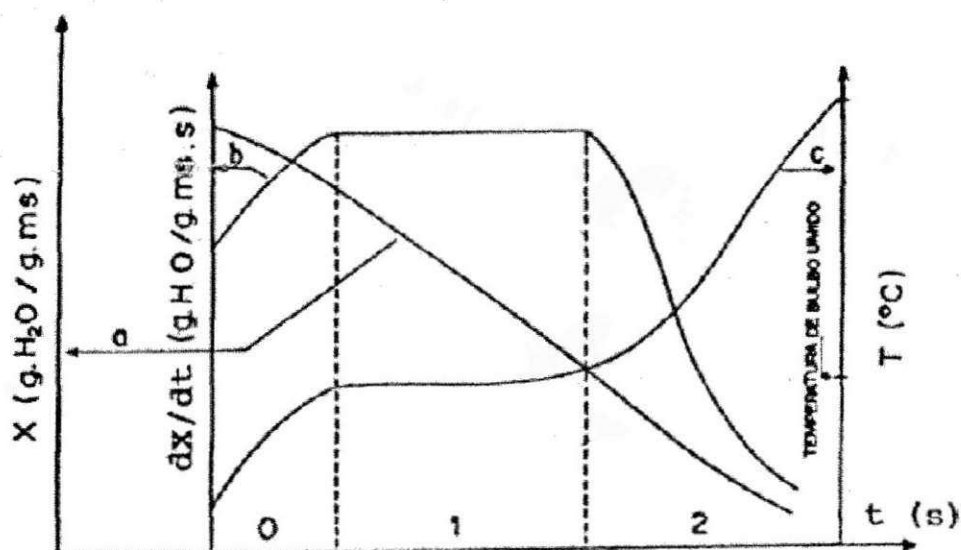
De acordo com Garcia et al. (2004) a operação de secagem é fundamental no sistema de produção, pois além de reduzir a umidade, para permitir a conservação de sua qualidade fisiológica no armazenamento, possibilita a antecipação da colheita evitando perdas de natureza diversa. Consiste na remoção de grande parte do líquido de um produto por evaporação mediante a ação do calor, podendo realizar-se por meio natural expondo o produto ao sol e artificial por meio de secadores mecânicos.

Um alimento desidratado, total ou parcialmente, pode ser conservado por períodos mais longos que um similar *in natura*, uma vez que os microrganismos que causam a deterioração do produto biológico, não podem crescer e nem multiplicar-se em ambientes com baixa umidade. Por outro lado, o baixo nível de umidade, dificulta a ação das enzimas, que necessitam desse meio para agirem na estrutura do alimento (Fioreze, 2004).

Conforme Prado et al. (2000) a evolução das transferências simultâneas de calor e de massa, no curso da operação de secagem, faz com que esta seja dividida, esquematicamente, em três períodos de secagem: período 0 ou período de se entrar em regime operacional; período 1 ou período de secagem à taxa constante; e período 2 ou de secagem à taxa decrescente. Quando um produto sólido é submetido à secagem ocorrerá simultaneamente transferência de calor e massa. Na figura 3 temos a evolução do tempo( $t$ ), o teor de água do produto ( $X$ ), a temperatura do produto ( $T$ ), a velocidade de secagem ( $dX/dt$ ), para o ar com propriedades constantes. Observa-se na curva ( $c$ ), que no início da secagem como em geral o produto está a uma temperatura mais baixa que o ar de secagem, ocorre aumento da temperatura, fase zero. A temperatura eleva-se até que a transferência de calor seja igual à energia necessária para evaporar a água (transferência de massa), fase 1, quando a quantidade de água livre é grande com pressão de vapor de água na superfície do produto constante e a temperatura igual a



temperatura de bulbo úmido. Este período permanece enquanto a migração de água do interior do produto for suficiente para compensar a perda por evaporação na superfície. No início da fase 2 o produto atinge o conteúdo de umidade crítica, como a transferência de calor não é mais compensada pela transferência de massa, ocorre elevação da temperatura do produto que tende para a temperatura do ar. Neste período o fator limitante é a migração interna de água. A curva de cinética de secagem (*b*), que nas fases zero e um acompanhou a curva (*c*) sofre uma redução na fase 2. A umidade do material tende para a umidade de equilíbrio com o ar. A curva (*a*) descreve uma redução contínua do teor de água do produto nas fases zero, um e dois (Cornejo, 1987).



**Figura 3.** Curvas características de cinética de secagem (Fonte: Cornejo, 1987)

De acordo com Almeida et al. (2002) o período de secagem a taxa decrescente pode ser dividido em duas fases: na primeira fase a água livre presente no interior do produto é contínua, sem a presença de ar, e ocupa todos os poros do produto. O movimento de água do interior para a superfície ocorre por capilaridade e este mecanismo controla a velocidade de secagem. Na segunda fase a remoção de água da superfície de evaporação provoca a entrada de ar no interior do produto, o que dá origem a bolsas de ar que ficam dispersas na fase líquida dentro dos poros. Nesta fase ocorre o escoamento capilar em alguns pontos localizados.

Segundo Villar (1999) as curvas de secagem à taxa decrescente podem ser côncavas, convexas ou aproximar-se de uma linha reta; podem apresentar um ponto de

inflexão quando ocorre uma mudança na forma física do material, como por exemplo, quando se produz contração e ruptura, e quando se forma uma película na superfície do material parcialmente seco.

Conforme Fioreze (2004) a secagem de frutas como uma alternativa para a obtenção de produtos mais nobres, através da desidratação, como frutas cristalizadas ou então passas, é um processo muito antigo, porém pouco conhecido. A secagem é um processo que pode ser realizado tanto em função das condições atmosféricas, como da concentração osmótica do meio (salga), ou ambas. Na obtenção de produtos a partir dessas matérias primas, levando-se em conta a variedade de processos, pode-se generalizar como uma desidratação parcial, através de um processo osmótico (salga) e a complementação da secagem com ar aquecido (natural ou artificialmente), ou defumação, que é um processo que consiste em produzir fumaça, através de queima de madeira, o que também aquece o ar que passa pelo produto, secando-o parcialmente.

O processo de secagem é analisado através da obtenção das curvas de secagem, apresentadas na forma de umidade adimensional ( $X/X_0$ ) em função do tempo, a taxa de secagem ( $N$ ) em função da umidade absoluta ( $X$ ) e o adimensional de água livre, ( $X-X_e/X_0-X_e$ ) em função do tempo, em que  $X_e$  são valores de umidade de equilíbrio.

#### **2.4.1. Efeito da temperatura e velocidade do ar de secagem**

De acordo com Fioreze (2004) os sistemas de secagem variam conforme diversos fatores, tais como: o tamanho do sistema, tipo de combustível, modo de operação (contínuo, batelada, etc.), produto a ser seco, entre outros, porém há dois deles que estão sob constante pesquisa de otimização: a qualidade do produto no final do processo e o custo da operação. Para pesquisar estes dois fatores, um grande número de variáveis têm sido levada em consideração para o ar de secagem e o produto seco.

Conforme Almeida et al. (2002) os produtos são muito diferenciados entre si, devido a sua forma, estrutura e suas dimensões, além das condições de secagem serem muito diversas, conforme as propriedades do ar de secagem e a forma como se faz o contato ar–produto. Uma vez que o produto é colocado em contato com o ar quente ocorre uma transferência de calor do ar ao produto sob o efeito da diferença de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de

massa para o ar. Esta última se faz na forma de vapor de água, uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água.

A taxa de secagem pode ser acelerada com o aumento da temperatura do ar de secagem e, ou, com o aumento do fluxo de ar que passa pelo produto por unidade de tempo. A quantidade de ar utilizada para a secagem depende de vários fatores. Entre eles: a umidade inicial do produto e a espessura da camada.

Diversos autores analisando a cinética de secagem de frutas consideram a temperatura do ar como o parâmetro de maior influência na taxa de secagem. Alsina et al. (1997) quando estudaram o efeito da temperatura do ar de secagem entre 60 e 80 °C e velocidade do ar de secagem, variando entre 0,7 e 1,5 m s<sup>-1</sup>, sobre a cinética de secagem da acerola em monocamada, comprovaram que a velocidade do ar exerce pouca influência na taxa de secagem, mas o aumento da temperatura tem grande influência. Prado et al. (2000) secando tâmara verificaram que a temperatura exerce maior influência que a velocidade do ar, resultado semelhante foi observado por Gouveia et al (1999) e Moura et al. (2001) secando gengibre e caju, respectivamente e também, por Krokida et al. (2000), quando afirmaram que a cinética de secagem de maçã é fortemente afetada pela temperatura do ar de secagem.

#### **2.4.2. Secadores de leito fixo**

Diversos tipos de secadores têm sido avaliados com a finalidade de melhor viabilizar a obtenção de um produto de alta qualidade pós-secagem segundo a variedade de materiais existentes (Villar, 1999).

Os secadores de leito fixo são secadores caracterizados por apresentar baixo custo e possuir fácil operação. Nesses secadores, o produto permanece estático durante a secagem e o ar aquecido é forçado a passar pela massa do produto. Eles possuem diversas vantagens por serem de configuração bastante simples, resultando num baixo custo de implantação e são muito versáteis uma vez que podem ser utilizados para a secagem de diferentes produtos alimentícios. Este tipo de secador é insuflado por um ventilador. Nos secadores de leito fixo, o ar de secagem movimenta-se da camada inferior para a superfície da massa do produto. A troca de umidade que acontece entre o produto e o ar ocorre em uma região denominada zona de secagem, a qual se move da camada inferior para a superfície da massa conforme a secagem, dando origem a um

gradiente de umidade, o qual não pode ser elevado por comprometer a qualidade do produto final. (Nucci & Murr, 1994; Lima, 1995).

Os fatores que determinam o gradiente de umidade nos secadores de leito fixo são: o fluxo de ar, a espessura da camada e a temperatura de secagem. Segundo Lacerda Filho (1987) o gradiente será mais elevado quanto menor for o fluxo de ar e quanto maior for a temperatura de secagem e a espessura da camada do produto. Esses fatores também influenciam o consumo de energia e o tempo de secagem do produto.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

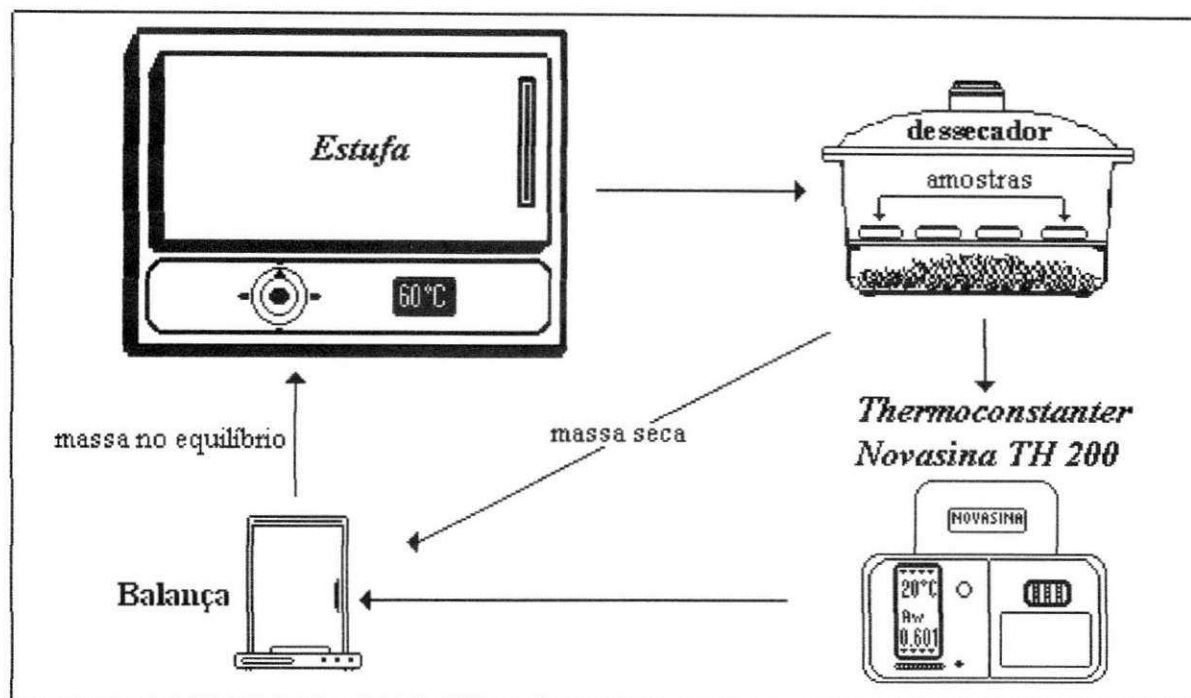
O presente trabalho foi conduzido no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEAg), em conjunto com o Laboratório de Sistemas Particulados da Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ), ambos da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

#### **3.1. Matéria-prima**

Foram utilizados frutos de acerola provenientes do comércio local de Campina Grande, PB. Os frutos foram lavados e selecionados de acordo com o grau de homogeneidade de maturação. Selecionaram-se acerolas com cor mais vermelha e consistência mais firme.

#### **3.2. Isotermas de sorção**

As isotermas de sorção (adsorção e dessorção) foram determinadas através do método estático indireto, baseado no estudo efetuado por Capriste & Rotstein (1982), utilizando o equipamento *Thermoconstanter Novasina* TH-200 (Figura 4). Para a preparação das amostras, os frutos de acerola *in natura* foram processados em um liquidificador doméstico.



**Figura 4.** Esquema do emprego do equipamento Novasina na obtenção das isotermas de sorção

A polpa de acerola foi colocada em células plásticas que acompanham o equipamento. Pesou-se aproximadamente 2,0 g da amostra em balança analítica, com precisão de 0,0001 g. Para a determinação de adsorção levou-se a polpa de acerola a uma secagem por um período de 24 h, a 50 °C, em estufa com circulação forçada de ar, para se obter a perda de umidade das amostras. Após esse período, a amostra foi retirada da estufa e colocada em um dessecador, com água destilada no lugar de sílica gel, para se obter o ganho de umidade das amostras. Em seguida, as células plásticas, contendo as amostras, foram levadas ao equipamento *Thermoconstanter Novasina TH-200*, para a leitura da atividade de água ( $a_w$ ) nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C.

Para a determinação de dessecamento fez-se uma secagem da polpa de acerola por um período de 1 h, a 70 °C, em estufa com circulação forçada de ar, a fim de se obter a perda de umidade das amostras. Após esse período a amostra era retirada da estufa e colocada em um dessecador contendo sílica gel. Posteriormente ao tempo de exposição de 15 min, as amostras eram levadas ao equipamento Novasina para as leituras nas temperaturas empregadas na adsorção, onde permaneciam até a estabilização das leituras, para então, assim como se fez na adsorção, serem retiradas e pesadas, sendo retornadas novamente ao dessecador, e em seguida levadas a estufa.

Posteriormente à determinação da atividade de água, as amostras foram levadas à estufa sem circulação de ar, a 100 °C por 3 h para a determinação da massa seca e posteriormente da umidade de equilíbrio (Eq. 2).

$$U_e = \frac{m_e - m_s}{m_s} \quad (2)$$

em que:

$U_e$  – umidade de equilíbrio em base seca

$m_e$  – massa da amostra quando atingido o equilíbrio (g)

$m_s$  – massa seca da amostra (g)

### 3.2.1. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas

Para prever o comportamento das isotermas de sorção da acerola foram testados seis modelos matemáticos. Utilizou-se o programa Statistica versão 7.0, o método Quasi-Newton de análise não linear foi usado para estimar as constantes dos modelos (Statsoft, 2004).

Os modelos matemáticos a que os dados experimentais foram submetidos para descrever as isotermas de sorção da polpa de acerola são descritos a continuação:

### BET

$$\frac{Ue}{x_m} = \frac{C.a_w}{1-a_w} \left[ \frac{1-(n+1).(a_w)^n + n.(a_w)^{n+1}}{1-(1-C).a_w - C.(a_w)^{n+1}} \right] \quad (3)$$

### GAB

$$Ue = \frac{x_m.C.k.a_w}{(1-k.a_w).(1-k.a_w + C.k.a_w)} \quad (4)$$

### Oswin

$$Ue = a \left( \frac{a_w}{(1-a_w)} \right)^b \quad (5)$$

### Smith

$$Ue = Ma - Mb.\ln(1-a_w) \quad (6)$$

### Halsey

$$Ue = \left( \frac{-a}{\ln(a_w)} \right)^{1/b} \quad (7)$$

### Peleg

$$Ue = K1aw^{n1} + K2aw^{n2} \quad (8)$$

em que:

$a_w$  – atividade de água

$Ue$  – umidade de equilíbrio expressa em base seca



$x_m$  – umidade na monocamada molecular

$C$  – constante dependente da temperatura

$k$  – fator de correção das propriedades da monocamada

$n$  – número de camadas moleculares

$a, b, Ma$  e  $Mb$  – parâmetros de ajuste

$K_1, K_2, n_1$  e  $n_2$  - parâmetros da equação de Peleg

Os critérios empregados para a determinação do melhor ajuste dos modelos aos dados experimentais foram o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o desvio relativo médio ( $DRM$ ), calculado pela equação (9) descrita por Lomauro et al. (1985) que consideram erro de até 10% razoável para as práticas propostas.

$$DRM = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|(M_{exp} - M_{teor})|}{M_{exp}} \quad (9)$$

em que:

$DRM$  – desvio relativo médio (%)

$M_{exp}$  – valores obtidos experimentalmente

$M_{teor}$  – valores preditos pelo modelo

$n$  – número de observados realizados

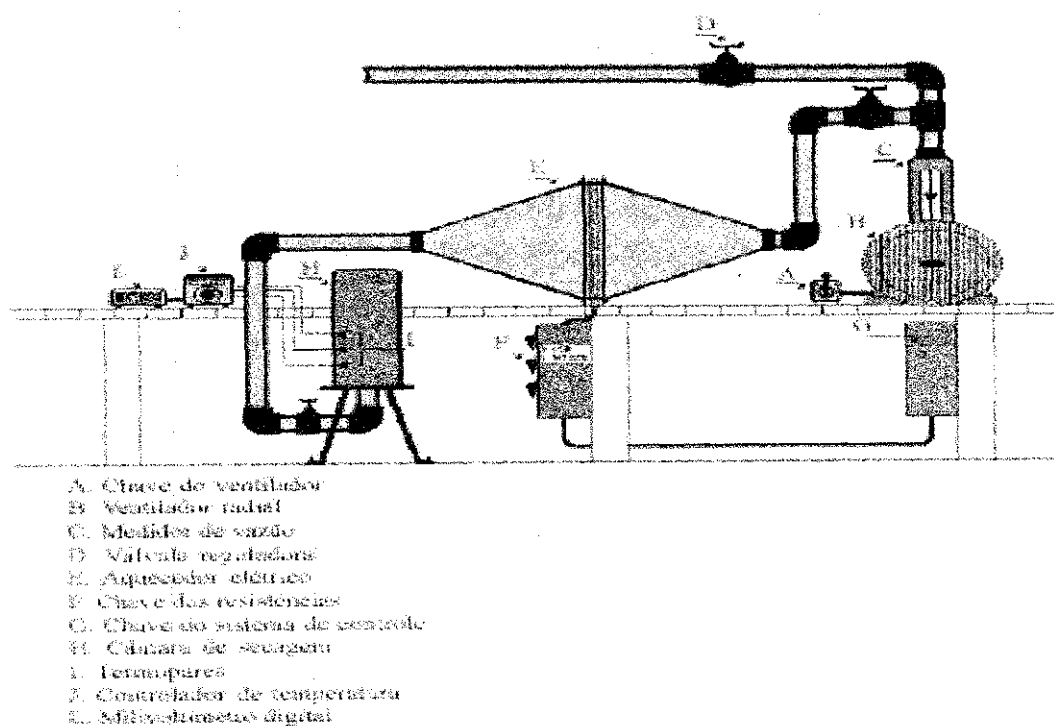
### 3.3. Secagem no equipamento de leito fixo

O secador empregado nos experimentos encontra-se no Laboratório de Meios Porosos da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da UFCG e consiste de um compressor radial que impulsiona o ar no interior da linha de alimentação do leito, rotâmetro, que mede a vazão do ar de secagem, resistências elétricas que aquecem o ar de secagem, válvulas para especificar a vazão na linha de alimentação, dois termopares do tipo Chromel-alumel, controlador de temperatura, chaves seletoras, milivoltímetro digital e câmara de secagem. A câmara de secagem é composta por uma coluna cilíndrica de 17,80 cm de diâmetro e 60 cm de altura. Possui uma seção inferior tronco-cônica que funciona como um distribuidor de ar, onde são colocadas esferas de vidro, empilhadas aleatoriamente, permitindo a uniformidade do ar de secagem em todo o leito. A câmara é isolada termicamente nas laterais com uma camada de amianto de 1,5 cm de espessura. Nas suas laterais existem furos, onde são colocados termopares para a medição da temperatura do ar de secagem. Existe, também um outro termopar que é inserido no fundo da seção cônica, que serve para enviar sinal ao controlador de temperatura.

A secagem dos frutos de acerola foi realizada em um secador de leito fixo (Figura 5), nas temperaturas de 50, 60, 70 °C e velocidades do ar de secagem 1,0, 1,5, e 2,0 m s<sup>-1</sup>.

Inicialmente determinou-se a umidade da acerola, em triplicata, obedecendo às recomendações prescritas pela AOAC (1992). Retirou-se alguns frutos de acerola a serem submetidos à secagem, e colocou-se em estufa com circulação de ar a 100 °C, durante 3 h. Tal determinação apresentou umidade inicial em torno de 80%.

As amostras em um número de 6 frutos de acerola, foram pesadas e colocadas em uma cesta de material metálico, com massa previamente conhecida. Após o equipamento ser ligado, foi medida a velocidade do ar através de válvula reguladora e anemômetro de hélice colocado na parte superior da câmara de secagem, bem como o ajuste da temperatura. O conjunto (cesta + amostra) foi colocado na câmara de secagem para iniciar o processo. A perda de água em função do tempo, obtida por pesagens descontínuas do conjunto em intervalos regulares de 10, 30 e 60 min, em balança digital com precisão de 0,0001 g até peso constante. Em seguida as amostras foram colocadas em recipientes de alumínio e levadas a estufa com temperatura a 100 °C por 3 h para posterior determinação de umidade final.



**Figura 5.** Secador de leito fixo (Fonte: Gouveia et al., 2002)

### 3.3.1. Modelos matemáticos para ajuste das curvas de secagem

A análise do processo de secagem e os ajustes das curvas experimentais foram realizados utilizando-se as equações de Page (10) e Thompson (11), ajustadas por regressão não linear mediante o software Statistica, versão 7.0 (Statsoft, 2004).

$$\frac{U - U_e}{U_o - U_e} = RU = \exp(-k.t^n) \quad (10)$$

em que:

$RU$  – razão de umidade do produto, adimensional

$U_o$  – umidade inicial, decimal base seca

$U_e$  – umidade de equilíbrio, decimal base seca

$t$  – tempo, s

$k$  – constante

$n$  – parâmetro adimensional de secagem

$$t = A.\ln(RU) + B.[\ln(RU)]^2 \quad (11)$$

em que:

$A$  e  $B$  – constantes que são funções da temperatura do ar

$RU$  – razão de umidade do produto, adimensional

$t$  – tempo, s

### **3.4. Determinação do ácido ascórbico**

A acerola foi analisada antes e após a secagem, com relação ao seu teor de vitamina C de acordo com a metodologia titulométrica da AOAC (1992) modificada por Benassi & Antunes (1988) onde se substituiu a solução extratora de ácido metafosfórico por ácido oxálico.

Após a secagem as acerolas foram processadas em um liquidificador, onde o material foi triturado e transformado em pó. Após este procedimento analisou-se o ácido ascórbico do pó de acerola, proveniente da secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e velocidade de ar de secagem a 1,0, 1,5 e 2,0 m s<sup>-1</sup>.

#### **3.4.1. Análise estatística**

A análise estatística dos dados experimentais do ácido ascórbico foram feitas através de um fatorial, com 2 fatores (temperatura e velocidade do ar de secagem) em triplicata, com o auxílio do software Assistat versão 7.3. A comparação entre médias foi feita pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Isotermas de sorção

#### 4.1.1. Adsorção

Os resultados da Tabela 1, obtidos experimentalmente, representam a umidade de equilíbrio em função da atividade de água a uma dada temperatura, referem-se à adsorção da polpa de acerola. Analisando-se o comportamento das amostras isoladamente em cada temperatura verifica-se que os valores de umidade de equilíbrio ( $U_{eq}$ ) aumentam com o incremento da atividade de água ( $a_w$ ). Para uma atividade de água fixa, com o aumento da temperatura contata-se uma diminuição da umidade de equilíbrio. Este comportamento torna evidente a similaridade da adsorção de água pela polpa de acerola com a maioria dos produtos biológicos e especialmente com o de Telis-Romero et al. (2005) para a polpa de manga.

**Tabela 1.** Dados de atividade de água ( $a_w$ ) e umidade de equilíbrio (b.s.) para a adsorção da polpa de acerola em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)						
30		40		50		
$a_w$	$U_{eq}$	$a_w$	$U_{eq}$	$a_w$	$U_{eq}$	
0,380	0,219	0,312	0,219	0,270	0,219	
0,482	0,263	0,432	0,249	0,382	0,238	
0,548	0,303	0,480	0,281	0,436	0,263	
0,598	0,337	0,527	0,311	0,473	0,289	
0,634	0,364	0,566	0,333	0,524	0,329	
0,682	0,414	0,650	0,381	0,548	0,347	
0,725	0,463	0,694	0,420	0,643	0,387	
0,788	0,574	0,716	0,449	0,711	0,435	
-	-	0,763	0,514	0,760	0,490	

$U_{eq}$  - umidade de equilíbrio

Modelos matemáticos foram ajustados a esses valores com o intuito de se escolher a melhor representação dessas isotermas. Os parâmetros ajustados as isotermas de adsorção de umidade da acerola estão apresentados na Tabela 2, dos modelos de GAB, BET, Oswin, Smith, Halsey e Peleg.

**Tabela 2.** Parâmetros dos modelos de GAB, BET, Oswin, Smith, Halsey e Peleg ajustados as isotermas de adsorção da polpa de acerola

Modelos e Parâmetros	Temperatura (°C)			
	30	40	50	
GAB	$x_m$	0,154	0,163	0,202
	$C$	20,539	65,168	16,008
	$k$	0,933	0,895	0,793
	$R^2$ (%)	99,99	99,83	99,42
	$P$ (%)	0,34	1,51	3,08
BET	$x_m$	0,403	0,275	0,245
	$n$	4	4	4
	$C$	0,652	1,858	3,224
	$R^2$ (%)	97,51	97,66	98,08
	$P$ (%)	6,70	5,98	5,02
Oswin	$a$	0,272	0,293	0,307
	$b$	0,555	0,460	0,402
	$R^2$ (%)	99,86	99,67	99,41
	$P$ (%)	1,39	2,20	3,20
Smith	$Ma$	0,350	0,323	0,308
	$Mb$	0,020	0,053	0,076
	$R^2$ (%)	99,08	96,70	93,41
	$P$ (%)	3,77	6,16	6,97
Halsey	$a$	0,106	0,087	0,072
	$b$	1,448	1,679	1,897
	$R^2$ (%)	99,98	99,60	98,33
	$P$ (%)	0,35	1,60	2,94
Peleg	$K1$	0,444	0,419	0,173
	$n1$	0,743	0,579	0,000071
	$K2$	0,960	0,828	0,551
	$n2$	6,553	6,213	2,069
	$R^2$ (%)	99,98	99,82	99,52
	$DRM$ (%)	0,43	1,63	2,81

Verifica-se mediante os valores dos parâmetros estimados por regressão não linear que o modelo de GAB, representou com precisão o comportamento das isotermas de adsorção da polpa de acerola com maior valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e menor desvio relativo médio ( $DRM$ ) para as temperaturas de 30 e 40 °C e o modelo de Peleg para a temperatura de 50 °C, em que  $R^2$  foi igual a 99,52% e o valor de  $DRM$  foi de 2,81%. Constata-se, ainda, que tanto o modelo de GAB quanto o de Peleg podem ser empregados para descrever as isotermas de adsorção da polpa de acerola nas temperaturas estudadas, uma vez que os coeficientes de determinação ficaram acima de 99% e os desvios relativos médios ( $DRM$ ) inferiores a 4%, o que atendem aos critérios estabelecidos por Lomauro et al. (1985), que consideram o ajuste excelente para valores de  $DRM$  inferiores a 10%.

Verifica-se que os valores do parâmetro  $C$  do modelo de GAB, que representa a energia livre parcial molar, apresentaram flutuações aleatórias dentro da faixa de temperatura estudada, para a polpa de acerola. Observa-se ainda que os valores do parâmetro  $k$  diminuíram com o aumento da temperatura. De acordo com Maroulis et al. (1988) os parâmetros  $C$  e  $k$  do modelo de GAB, estão relacionados ao efeito da temperatura e que o parâmetro  $X_m$ , que representa a umidade na monocamada do material adsorvente, aumentou com o aumento da temperatura para o modelo de GAB.

Em análise ao parâmetro  $\alpha$  do modelo de Oswin, tem-se que o mesmo aumenta com o aumento da temperatura para a faixa estudada (30 e 50 °C). Gomes et al. (2002) verificaram este comportamento, estudando isotermas de adsorção para a polpa de acerola em pó na faixa de temperatura entre 20 e 30 °C. Já o parâmetro  $\alpha$  do modelo de Halsey é de comportamento contrário ao de Oswin.

Os dados de adsorção da polpa de acerola representados na Figura 6 para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C para o modelo de GAB, indicam que as umidades de



equilíbrio aumentam com o aumento da temperatura, descrevendo comportamento típico de isoterma do tipo sigmoidal, descrito por Puzzi (2000) como representativas de alimentos ricos em componentes solúveis. Prado et al. (1999) estudando isotermas de tâmaras, também encontraram forma sigmoidal para suas isotermas. A adsorção da polpa de acerola ajustada ao modelo de Peleg encontra-se no Apêndice A (Figura A.5).

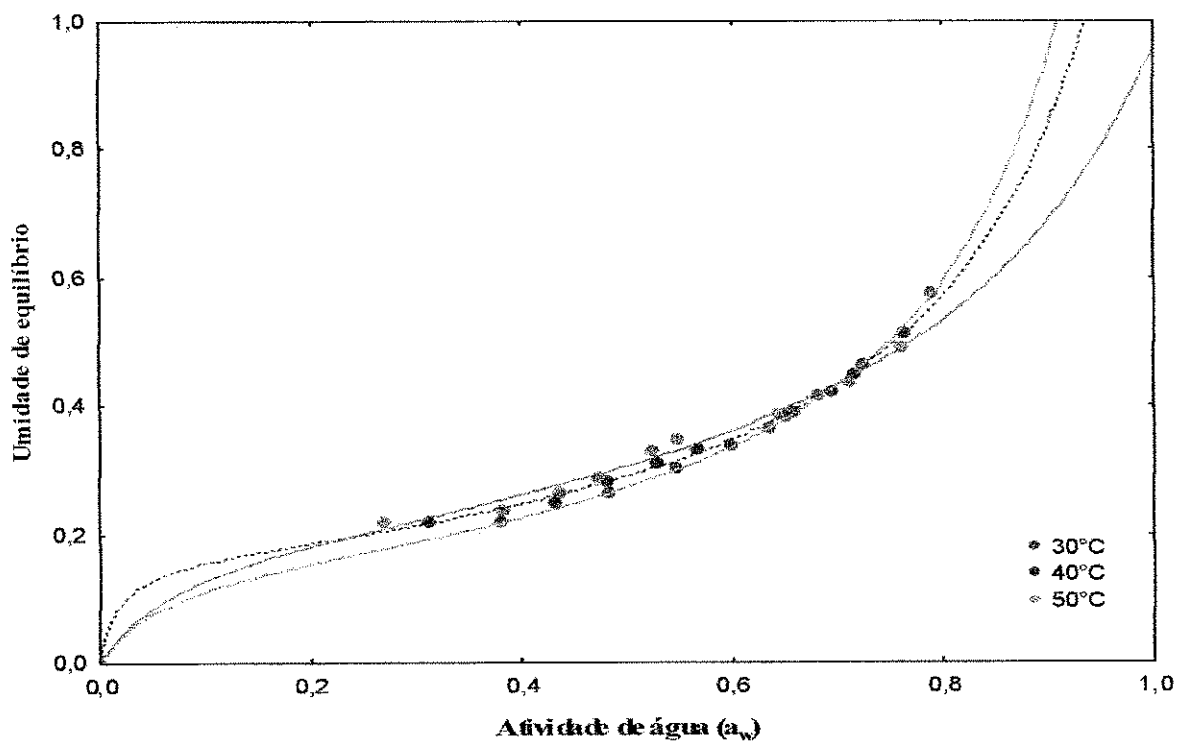


Figura 6. Isotermas de adsorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de GAB

#### 4.1.2. Dessorção

Os dados experimentais da atividade de água e umidade de equilíbrio para as isotermas de dessorção, obtidos nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C para a acerola, estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Dados de atividade de água ( $a_w$ ) e umidade de equilíbrio (b.s.) para a dessorção da polpa de acerola nas diferentes temperaturas

Temperatura (°C)					
30		40		50	
$a_w$	Ueq	$a_w$	Ueq	$a_w$	Ueq
0,673	0,822	0,750	0,743	0,780	0,669
0,635	0,788	0,723	0,723	0,732	0,644
0,590	0,745	0,646	0,653	0,677	0,628
0,560	0,723	0,508	0,544	0,570	0,572
0,458	0,607	0,432	0,430	0,495	0,472
0,375	0,443	0,375	0,348	0,385	0,371
0,241	0,229	0,343	0,315	0,232	0,229

Ue - umidade de equilíbrio

Verifica-se que o conteúdo de umidade de equilíbrio variou com as mudanças de temperatura, e observa-se que a umidade de equilíbrio diminui com a diminuição da atividade de água para uma temperatura fixa. Estes resultados encontram apoio no trabalho de Silva et al. (2002), quando estudaram a dessorção em polpa de manga e Kechaou & Maalej (1999) ao estudarem as características de dessorção da polpa de banana.

Na Tabela 4 encontram-se os parâmetros de ajuste das isotermas de dessorção da polpa de acerola, para os modelos de GAB, BET, Oswin, Smith, Halsey e Peleg, assim como os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e os desvios médios relativos ( $P$ ).

**Tabela 4.** Parâmetros dos modelos de GAB, BET, Oswin, Smith, Halsey e Peleg ajustados as isotermas de dessorção da polpa de acerola

Modelos e Parâmetros	Temperatura (°C)			
	30	40	50	
GAB	$x_m$	1,722	1,862	1,264
	$C$	1,999	2,052	4,701
	$k$	0,345	0,256	0,197
	$R^2$ (%)	98,88	99,35	99,31
	$P$ (%)	5,41	3,52	3,36
BET	$x_m$	0,748	0,599	0,460
	$n$	3	3	3
	$C$	1,276	1,299	2,286
	$R^2$ (%)	99,29	99,59	99,54
	$P$ (%)	4,11	2,58	2,61
Oswin	$a$	0,591	0,476	0,454
	$b$	0,539	0,440	0,361
	$R^2$ (%)	97,29	98,04	96,57
	$P$ (%)	8,24	6,34	8,94
Smith	$Ma$	0,748	0,516	0,426
	$Mb$	0,055	0,090	0,115
	$R^2$ (%)	96,53	94,52	89,76
	$P$ (%)	7,32	7,82	9,70
Halsey	$a$	0,334	0,185	0,124
	$b$	1,344	1,748	2,131
	$R^2$ (%)	91,37	93,80	87,88
	$P$ (%)	9,96	7,52	10,95
Peleg	$K1$	0,042	0,114	0,640
	$n1$	1,093	1,043	0,846
	$K2$	1,267	0,906	0,213
	$n2$	1,093	1,043	0,846
	$R^2$ (%)	99,06	99,40	99,22
	$DRM$ (%)	4,67	3,32	3,65

De acordo com os resultados, os modelos de BET e Peleg descreveram satisfatoriamente o comportamento das isotermas de dessorção da polpa de acerola, uma vez que os valores dos coeficientes de determinação foram superiores a 99%. No entanto o modelo de BET apresentou o melhor ajuste, com valores do coeficiente de determinação acima de 99,29% e desvio relativo médio de 4,11; 2,58 e 2,61% para as temperaturas de 30, 40 e 50 °C, respectivamente.

Observa-se que o parâmetro  $X_m$  do modelo de BET diminui com o aumento da temperatura para a polpa de acerola. Verifica-se que o valor do parâmetro  $C$  do modelo de BET aumenta com o aumento da temperatura.

Verificou-se que o conteúdo de umidade da camada monomolecular  $X_m$  do modelo de GAB, apresentou flutuações aleatórias dentro da faixa de temperatura estudada, enquanto o parâmetro  $C$  aumentou com o incremento da temperatura.

O modelo de Oswin pode ser utilizado para prever as isotermas de dessorção da polpa de acerola na faixa de temperatura de 30 a 50 °C, uma vez que o modelo apresentou valores de  $R^2$  superiores a 96,57% e de  $DRM$  entre 6,34 e 8,94%. De acordo com Aguerre et al. (1988) ajustes com desvios relativos médios inferiores a 10% indicam um ajuste razoável aos dados experimentais para os modelos estudados.

Observa-se que o modelo de Halsey foi o único que apresentou um desvio relativo médio elevado (10,95%), que ocorreu na temperatura de 50 °C. Moura et al. (2004) utilizaram o modelo de Halsey para a mesma temperatura, e também encontraram um desvio relativo médio elevado (11,71%) para a isoterma de dessorção do caju.

Dos modelos matemáticos estudados o de Halsey foi o que se ajustou com menor precisão as isotermas de dessorção da polpa de acerola, onde se verifica

valores de coeficiente de determinação inferiores a 94% e desvio relativo médio variando entre de 7,52 a 10,95% para a faixa de temperatura estudada.

As isotermas de dessorção da polpa de acerola representadas na Figura 7, para o modelo de BET nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C, evidenciaram que o aumento da atividade de água ( $a_w$ ) resulta em aumento da umidade de equilíbrio, sob todas as temperaturas estudadas, e que esta diminui para a mesma  $a_w$  a medida que aumenta a temperatura. A dessorção da polpa de acerola ajustada ao modelo de Peleg encontra-se no Apêndice A (Figura A.11.)

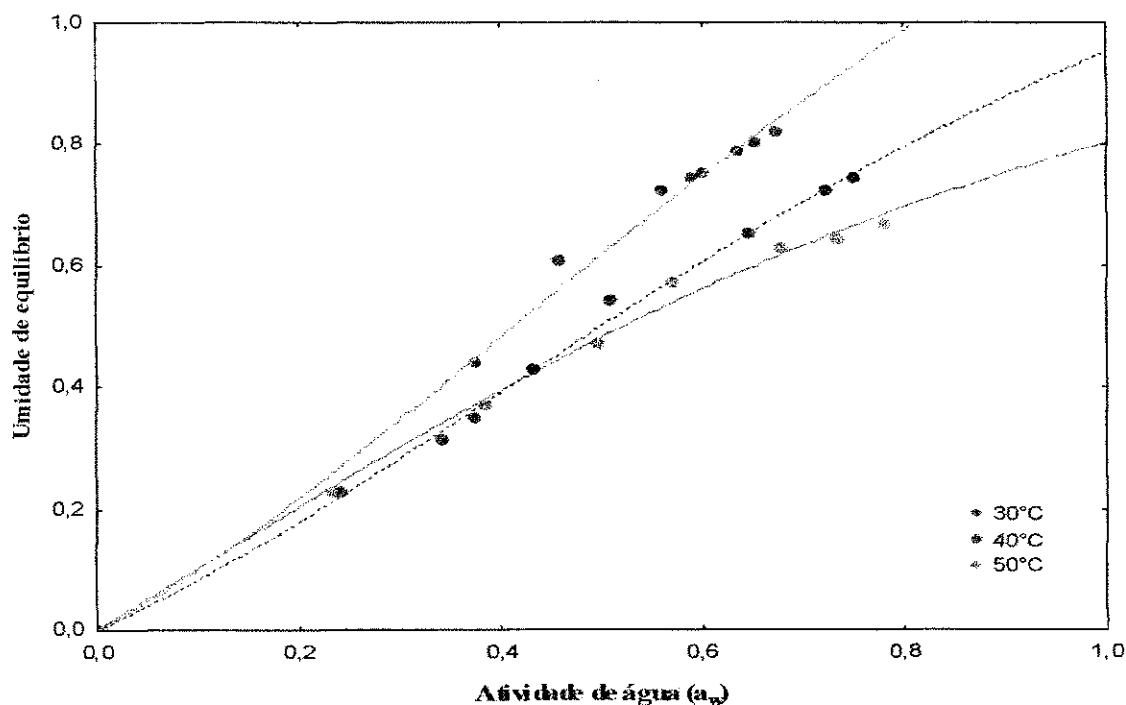


Figura 7. Isotermas de dessorção da polpa de acerola ajustadas pelo modelo de BET

#### 4.1.3. Histerese

Na perda de água (dessorção), os teores de umidade da polpa de acerola em equilíbrio higroscópico com diferentes umidades relativas, apresentam índices mais elevados. Este fenômeno indica que existem dois teores de umidade da polpa em equilíbrio com uma mesma umidade relativa. O fenômeno é conhecido por histerese e ainda não há um suporte científico para explicá-lo (Puzzi, 2000), no entanto observa que a velocidade de adsorção da água pela polpa é muito mais lenta do que a dessorção, ocorrendo o fenômeno de histerese entre a curva de secagem e o umedecimento do produto.

Os modelos matemáticos que melhor representaram a histerese da polpa de acerola foram os de Oswin, Halsey e Smith, respectivamente. A histerese da polpa de acerola está representada nas Figuras 8, 9 e 10, para o modelo de Oswin. Verifica-se que para uma mesma umidade relativa, existem duas isotermas (adsorção e dessorção). Observa-se ainda que com o aumento da temperatura houve uma tendência de aproximação das isotermas de sorção. No Apêndice B encontram-se a histerese da polpa de acerola ajustada aos modelos de Halsey (Figuras B.3.; B.9. e B.15.) e Smith (Figuras B.6.; B.12. e B.18.) para a faixa de temperatura estudada.

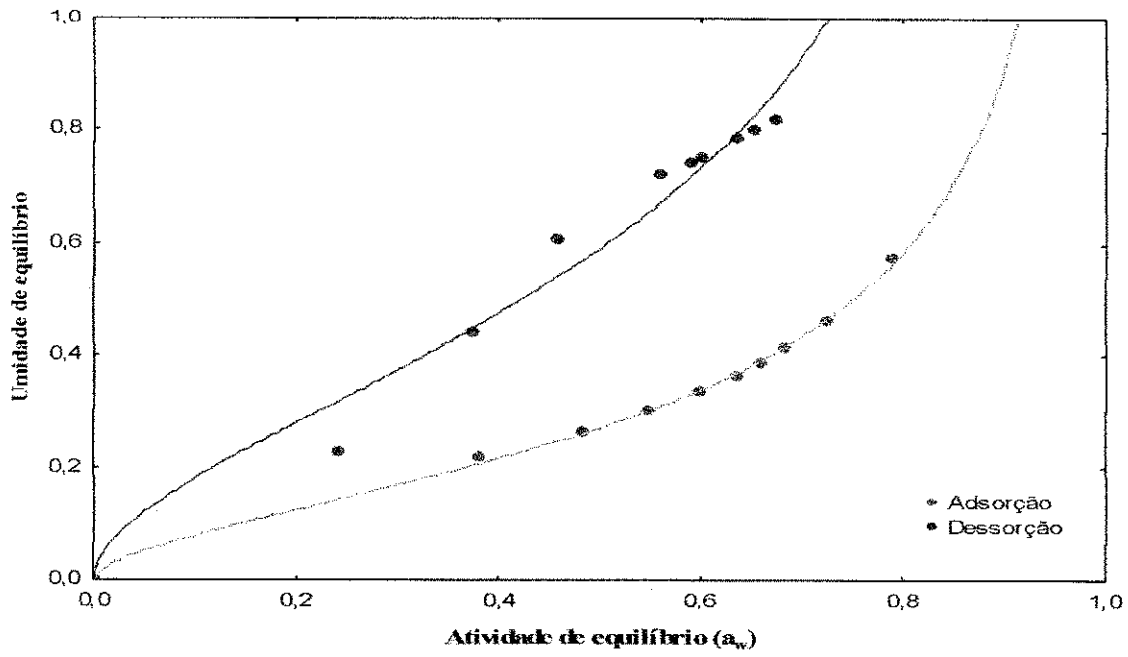


Figura 8. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 30 °C ajustada para o modelo de Oswin

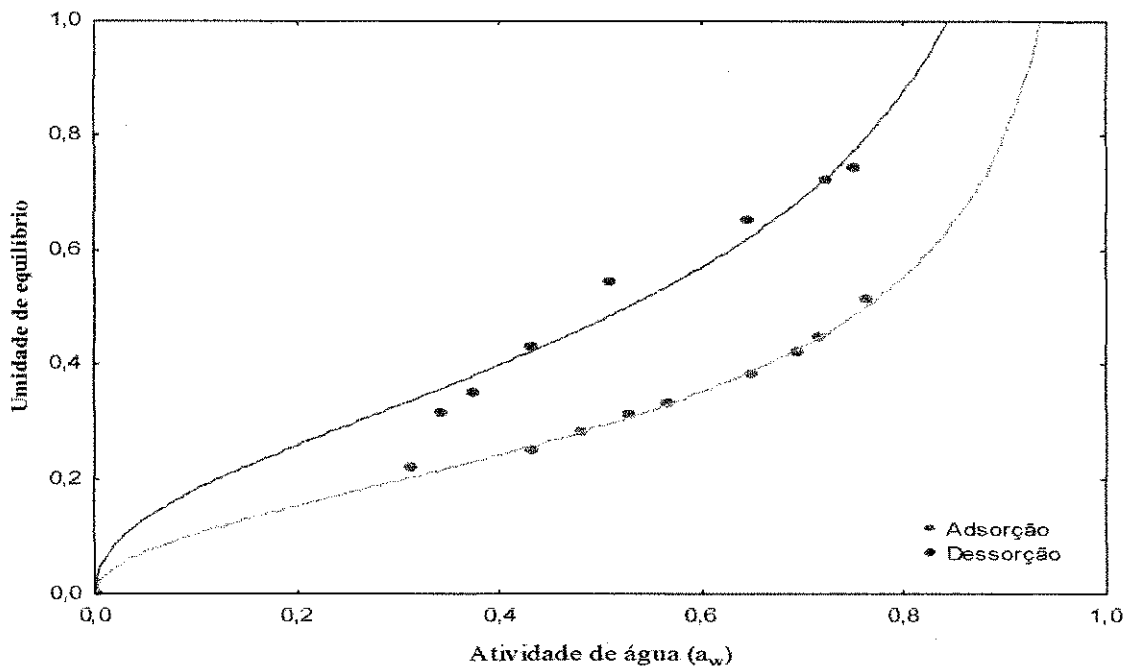
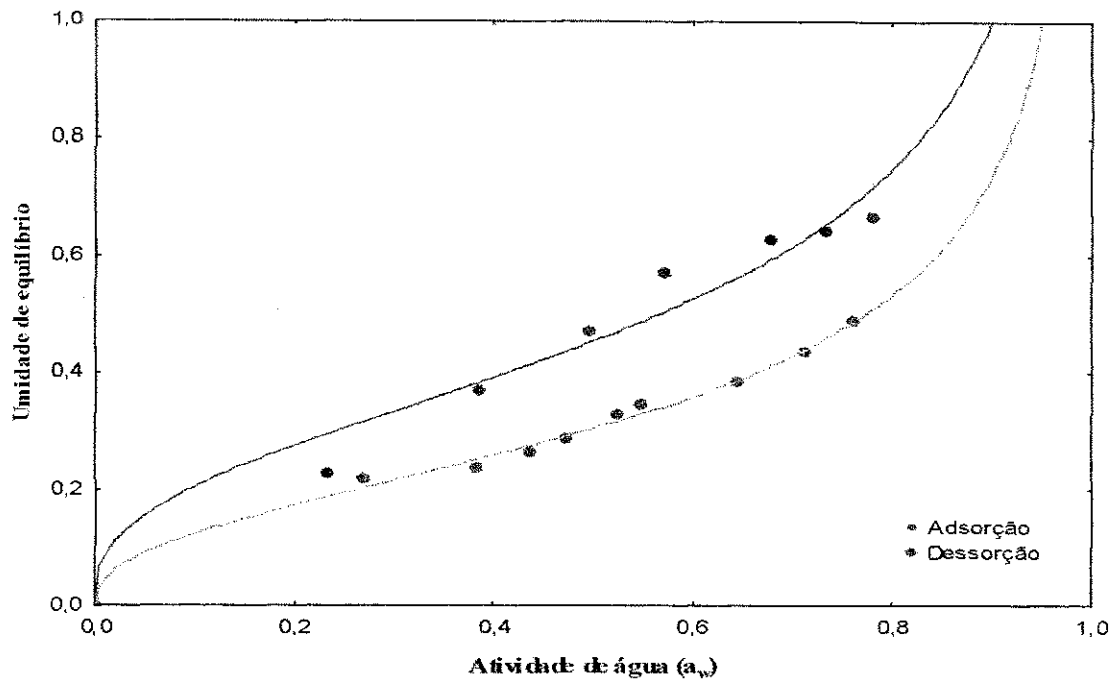


Figura 9. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 40 °C ajustada para o modelo de Oswin



**Figura 10.** Histerese da polpa de acerola na temperatura de 50 °C ajustada para o modelo de Oswin

De acordo com Puzzi (2000) estas isotermas possuem um formato sigmoidal. Comportamento similar foi encontrado por Prado (1998) estudando a histerese de tâmaras.

Para estimar as curvas de adsorção e dessorção dos diferentes pontos obtidos experimentalmente dentro de cada temperatura, equações de regressão quadráticas e logarítmicas foram ajustadas às curvas experimentais de adsorção e dessorção, respectivamente. Elegeu-se o que melhor representou cada situação, considerando o coeficiente de determinação (Tabelas 5 e 6), em que se observa às isotermas de adsorção representadas com  $R^2$  superior a 98,84% por equações quadráticas e as isotermas de dessorção por equações logarítmicas com  $R^2$  superior a 98,42%.



**Tabela 5.** Equações das curvas de isotermas de adsorção da polpa de acerola

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>
30	$y = 1,7161x^2 - 1,1744x + 0,4238$	99,51
40	$y = 1,0355x^2 - 0,4898x + 0,273$	99,24
50	$y = 0,5997x^2 - 0,0625x + 0,1861$	98,84

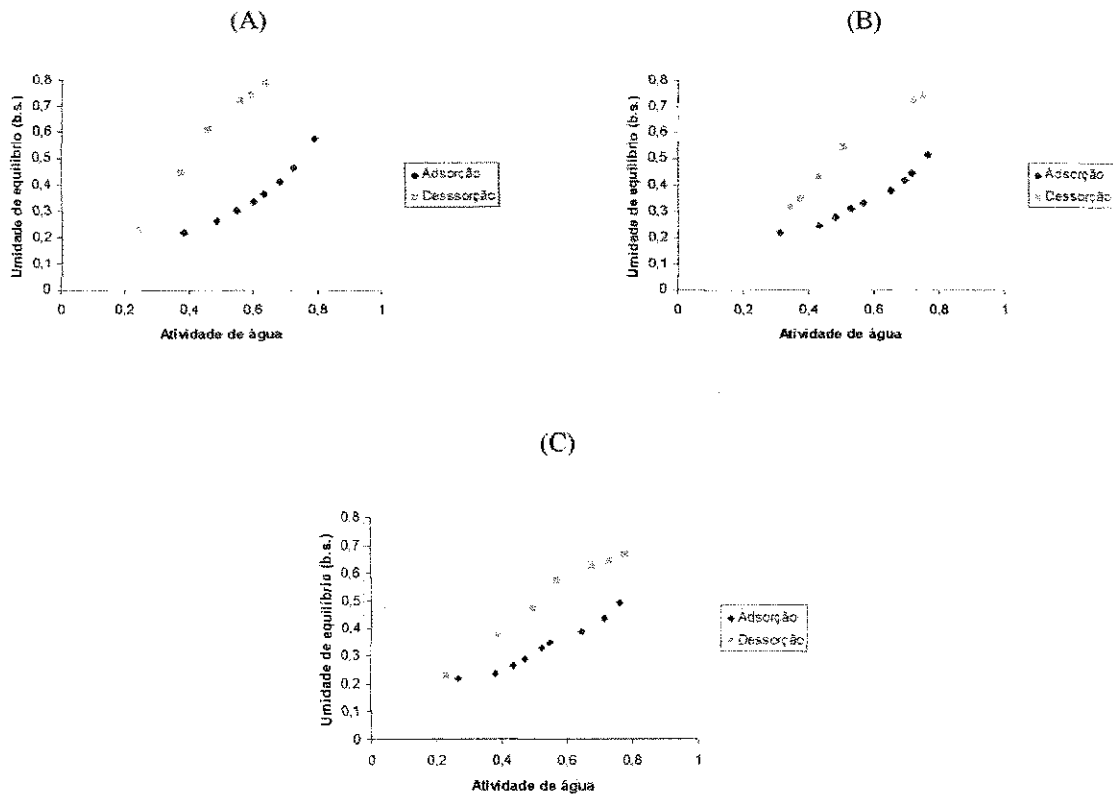
x – atividade de água; y – umidade de equilíbrio (b.s.)

**Tabela 6.** Equações das curvas de isotermas de dessorção da polpa de acerola

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>
30	$y = 0,591\text{Ln}(x) + 1,057$	99,44
40	$y = 0,5552\text{Ln}(x) + 0,9032$	99,72
50	$y = 0,3786\text{Ln}(x) + 0,7631$	98,42

x – atividade de água; y – umidade de equilíbrio (b.s.)

Na figura 11 estão representados graficamente os dados experimentais da histerese (adsorção e dessorção) da polpa de acerola na faixa de temperatura estudada.



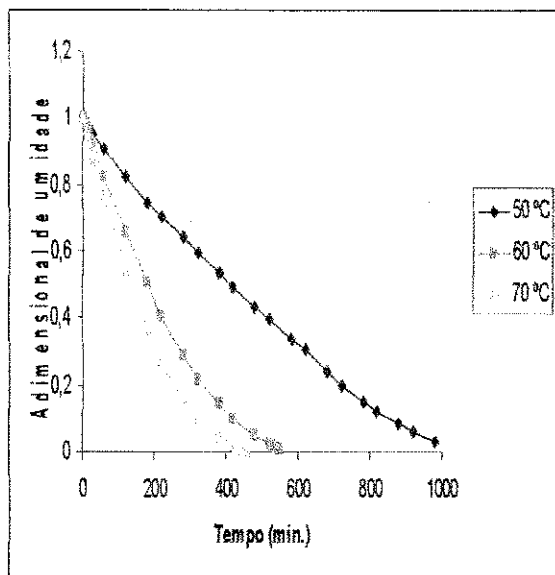
**Figura 11.** Histerese da polpa de acerola para as temperaturas de 30 (A), 40 (B) e 50 °C (C).

#### 4.2. Cinética de secagem

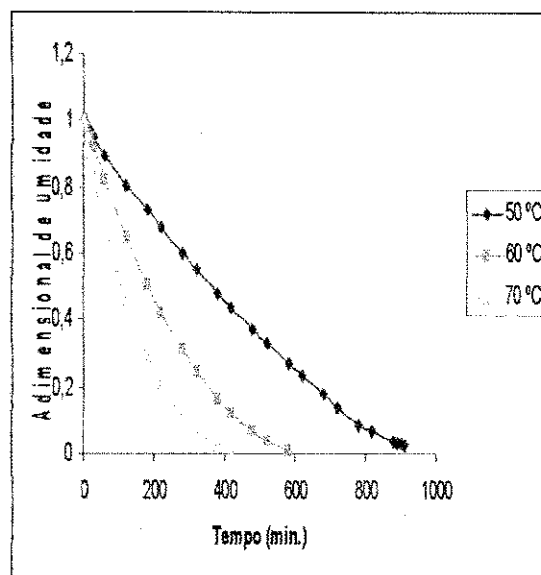
Estudou-se a cinética de secagem da acerola em camada fina, analisando-se a influência das variáveis operacionais nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C, e velocidades do ar de secagem de 1,0, 1,5 e 2,0 m s<sup>-1</sup>. As curvas da cinética de secagem estão apresentadas na forma de adimensional do conteúdo de umidade,  $(X-X_e)/(X_0-X_e)$  em função do tempo.

A representação gráfica dos dados experimentais encontram-se na Figura 12, onde observa-se comportamento similar, isto é, o processo de secagem ocorre no período de taxa decrescente para todas as condições estudadas, não apresentando período à taxa constante. A ausência do período à taxa constante também foi observada em caju por Moura et al. (2001) e em goiaba por Araújo et al. (2001). Além disso, o aumento da temperatura conduz a diminuição do tempo do processo e ao aumento da taxa de secagem. Comportamento semelhante é descrito por Gouveia et al. (2002) ao estudar a cinética de secagem do caju.

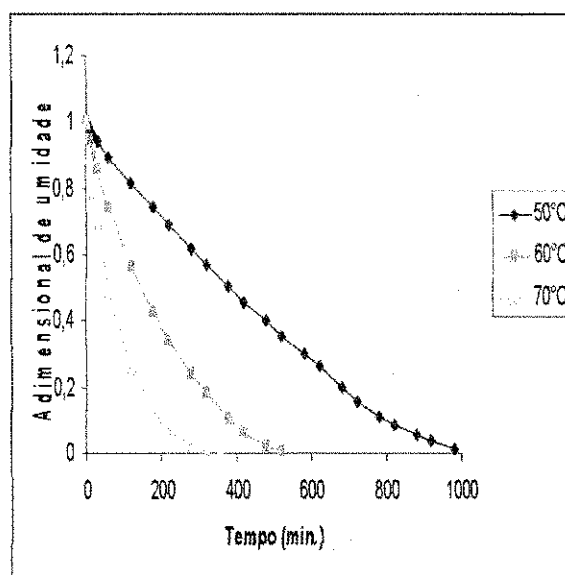
De acordo com as curvas da Figura 12, verifica-se que a perda do conteúdo de umidade é bem rápida no início do processo de secagem, cuja estabilização para a temperatura de 50 °C ocorre num período de tempo de aproximadamente 16 h e 20 min, 9 h para a secagem a 60 °C e 7 h e 36 min. para a temperatura de 70 °C, indicando influência da temperatura no processo de secagem.



(A)



(B)



(C)

**Figura 12.** Cinética de secagem de frutos de acerola com velocidade do ar de secagem a 1,0 (A), 1,5 (B) e 2,0  $\text{m s}^{-1}$  (C).

Mediante esses resultados, verifica-se que a temperatura foi o principal fator atuante no processo de secagem empregado na retirada de água contida nos frutos da acerola, cujos resultados encontram-se respaldados por vários pesquisadores que consideram a temperatura do ar de secagem como o parâmetro que exerce maior influência na secagem de alimentos, entre eles Prado et al. (2000) e Gouveia et al. (2003), quando secaram tâmaras e cajá, respectivamente.

Todas as curvas obtidas representaram curvas características de adimensional de umidade variando amplamente com os valores de temperatura. Verifica-se ainda na Figura 12 que a variação da velocidade do ar de secagem teve pouca influência na cinética de secagem. Este efeito sugere que a resistência externa não influencia nas condições de operações utilizadas e que o controle de secagem depende da difusão interna da acerola. Constatação que está de acordo com o fato de não ter sido observado período de secagem a taxa constante. Comportamento similar foi observado por Villar (1999), estudando secagem de banana. Embora, tendo pouca influência desta variável na cinética de secagem, nota-se que quando se trabalhou com a temperatura de 50 °C e velocidade de 1,0 m s<sup>-1</sup> (Figura 12 A), a secagem ocorreu de forma mais lenta nesta condição. Deste modo, pode-se considerar como uma variável de menor influência no processo.

Os dados da cinética de secagem da acerola foram submetidos a equações lineares e exponenciais para uma representação matemática (Tabela 7, 8 e 9), onde se observa que as referidas equações ajustaram-se aos dados com coeficientes de determinação R<sup>2</sup> acima de 89,86%, indicando que as mesmas podem ser empregadas para estimar a cinética de secagem para as temperaturas de qualquer intervalo dentro da faixa do estudo.

**Tabela 7.** Equações da cinética de secagem da acerola para a velocidade do ar de 1,0 m s<sup>-1</sup>

Temperatura (°C)	Var = 1,0 m s <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup> (%)
50	$y = -0,001x + 0,9509$	99,03
60	$y = 1,5097e^{-0,0079x}$	92,46
70	$y = 1,4879e^{-0,0103x}$	94,14

y – adimensional de umidade; x – tempo (min.)

**Tabela 8.** Equações da cinética de secagem da acerola para a velocidade do ar de 1,5 m s<sup>-1</sup>

Temperatura (°C)	Var = 1,5 m s <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup> (%)
50	$y = -0,0011x + 0,9394$	98,49
60	$y = 1,3778e^{-0,0068x}$	89,86
70	$y = 1,3178e^{-0,0105x}$	94,03

y – adimensional de umidade; x – tempo (min.)

**Tabela 9.** Equações da cinética de secagem da acerola para a velocidade do ar de 2,0 m s<sup>-1</sup>

Temperatura (°C)	Var = 2,0 m s <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup> (%)
50	$y = -0,0011x + 0,9425$	98,55
60	$y = 1,3657e^{-0,0082x}$	90,27
70	$y = 1,3113e^{-0,0162x}$	95,23

y – adimensional de umidade; x – tempo (min.)

Na Tabela 10 estão apresentados os parâmetros da equação de Page nas diferentes temperaturas e velocidades do ar estudadas.

**Tabela 10.** Parâmetros do modelo de Page, para a secagem da acerola nas temperaturas e velocidades do ar estudadas

Parâmetros e Velocidade do ar de Secagem ( $\text{m s}^{-1}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	50	60	70	
1,0	$k$	0,000222	0,000536	0,001204
	$n$	1,349	1,386	1,307
	$R^2$ (%)	99,08	99,78	99,82
1,5	$k$	0,000183	0,000918	0,003180
	$n$	1,408	1,279	1,307
	$R^2$ (%)	99,20	99,77	99,86
2,0	$k$	0,000200	0,002592	0,011516
	$n$	1,382	1,131	1,006
	$R^2$ (%)	99,14	99,51	99,93

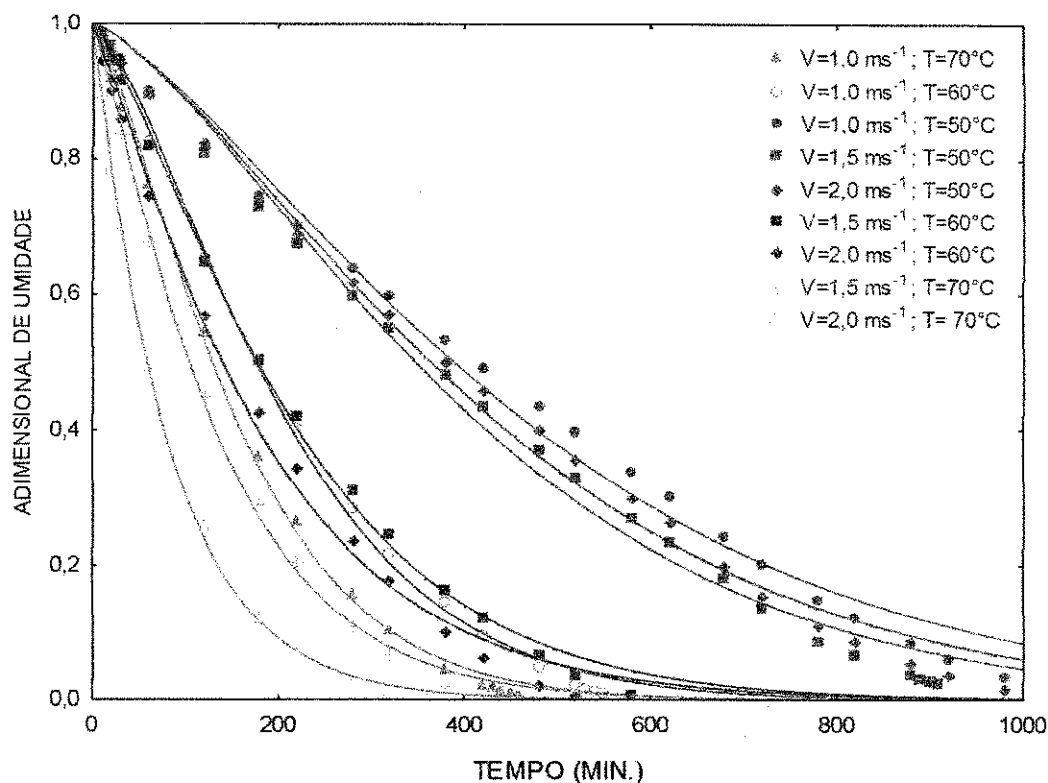
Para a secagem com velocidade do ar a  $1,0 \text{ m s}^{-1}$  verifica-se que o parâmetro  $n$  do modelo de Page aumentou com o aumento da temperatura para as temperaturas entre 50 e 60  $^{\circ}\text{C}$ , e diminuiu com a temperatura de 70  $^{\circ}\text{C}$ . Observou-se que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) apresentam valores acima de 99% para as temperaturas estudadas neste processo. Sousa et al. (2000) ao ajustar o modelo de Page as curvas de secagem de frutos de umbu com pré-secagem osmótica encontraram valores de  $R^2$  acima de 99%.

Para a velocidade de ar de secagem a  $1,5 \text{ m s}^{-1}$  o parâmetro  $n$  diminuiu da temperatura de  $50$  para  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  e aumentou a  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  em relação a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Na secagem com velocidade do ar a  $2,0 \text{ m s}^{-1}$  nas diferentes temperaturas estudadas, observa-se que o parâmetro  $n$  diminuiu com o aumento da temperatura. Segundo Azzouz et al. (1998) o parâmetro  $n$  tem função de moderação do tempo, corrigindo possíveis erros negligenciais da resistência interna na transferência de umidade.

Verificou-se que o parâmetro  $k$  aumentou com o aumento da temperatura em todas as velocidades do ar de secagem estudadas. Sousa et al. (2000) também verificaram que o parâmetro  $k$  é uma função da temperatura.

Analisando as curvas de secagem na Figura 13, observa-se que a cinética de secagem foi fortemente influenciada pela temperatura e que a utilização de temperaturas mais elevadas reduz significativamente o tempo necessário para secar a acerola, ou seja, para um mesmo tempo de processo, quanto maior for a temperatura do ar, maior é a taxa de secagem. Houve pouca influência da velocidade do ar de secagem, exceto para a velocidade do ar a  $2,0 \text{ m s}^{-1}$  para a temperatura de  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Brasileiro (1999) observou pequena influência da velocidade do ar, mas um aumento considerável da velocidade de secagem foi obtido com o aumento da temperatura. A representação gráfica do modelo de Thompson encontra-se no Apêndice C (Figuras C.1. a C.3.)





**Figura 13.** Cinética de secagem da acerola e curvas ajustadas com o modelo de Page para as diferentes velocidades do ar de secagem e temperaturas estudadas

Verifica-se na Tabela 11 os parâmetros encontrados pela equação de Thompson nas diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem estudadas. Observa-se que os parâmetros *A* e *B*, em valores absolutos, diminuíram com o aumento da temperatura em todas as velocidades do ar de secagem estudadas. Cavalcanti Mata & Braga (1999) estudando a cinética de secagem do cacau, verificaram que os parâmetros *A* e *B* do modelo de Thompson são funções da temperatura de secagem e do teor de umidade inicial.

Observa-se que o modelo utilizado se ajustou bem aos dados experimentais das curvas de secagem, apresentando coeficientes de determinação ( $R^2$ ) com valores maiores que 99,0%, exceto para a secagem com temperatura de 50 °C e velocidade do ar de secagem a 2,0 m s<sup>-1</sup>, que apresenta coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 98,8%.

**Tabela 11.** Parâmetros do modelo de Thompson, para a secagem da acerola nas temperaturas e velocidades do ar estudadas

Parâmetros e Velocidade do ar de Secagem ( $m s^{-1}$ )	Temperatura ( $^{\circ}C$ )			
	50	60	70	
1,0	A	-628,932	-252,632	-184,284
	B	-104,801	-29,5900	-18,8847
	$R^2$ (%)	99,43	99,64	99,77
1,5	A	-543,282	-263,729	-161,204
	B	-82,9299	-30,1865	-15,6236
	$R^2$ (%)	99,49	99,66	99,94
2,0	A	-549,062	-220,572	-98,3458
	B	-78,9899	-23,6495	-6,63958
	$R^2$ (%)	98,80	99,74	99,94

Os modelos de Page e de Thompson se ajustaram bem aos dados experimentais das secagens, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) apresentando valores superiores a 98,80%, podendo ser usados na predição da cinética de secagem da acerola. Verificou-se que o modelo de Page apresentou valores de  $R^2$  acima de 99%.

### 4.3. Determinação do ácido ascórbico

Na Tabela 12 encontra-se a análise de variância dos valores médios do teor de ácido ascórbico da polpa de acerola e do pó da acerola (proveniente da secagem), referente ao efeito da temperatura e velocidade do ar de secagem estudados.

**Tabela 12.** Análise de variância em relação ao teor de ácido ascórbico da acerola antes e após a secagem nas temperaturas (50, 60 e 70 °C) e velocidades do ar de secagem (1,0; 1,5 e 2,0 m s<sup>-1</sup>) estudadas

Fonte de variação	F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Temperatura	3	6675516.00069	2225172.00023	49578.7415	**
Velocidade	2	31782.96834	15891.48417	354.0759	**
Temperatura x Velocidade	6	21799.08972	3633.18162	80.9504	**
Resíduo	24	1077.15780	44.88157		
Total	35	6730175.21656			

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade

Na Tabela 13 encontram-se os valores médios de ácido ascórbico da polpa de acerola *in natura* e após a secagem.

**Tabela 13.** Valores médios do teor de ácido ascórbico (mg/100 g) da acerola após a secagem nas diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem estudadas.

Temperatura (°C)	Velocidade do ar de secagem (m s <sup>-1</sup> )		
	1,0	1,5	2,0
<i>in natura</i>	1201,5110 aA	1201,5110 aA	1201,5110 aA
50	322,3110 bA	239,6373 bB	224,9317 bC
60	192,4290 cA	183,2160 cAB	176,4080 cB
70	177,5180 dA	169,1540 dAB	161,5497 dB

Desvio mínimo significativo (DMS) para colunas = 13,71; DMS para linhas = 12,41; Média Geral (MG) = 454,30 (mg/100 g) e Coeficiente de variação (CV%) = 1,34.

Obs.: As médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Mediante os dados contidos nessa tabela, verifica-se que os valores médios de ácido ascórbico da polpa *in natura* e do pó da acerola diferiram significativamente entre as temperaturas e as velocidades do ar de secagem estudadas, sendo que para cada velocidade do ar estudada à medida que se eleva a temperatura, diminui o teor de ácido ascórbico (AA), e que entre as velocidades do ar de secagem para a temperatura de 50 °C, o teor de AA diminui estatisticamente com o aumento da mesma, enquanto nas temperaturas de 60 e 70 °C os valores do teor de AA foram estatisticamente iguais a velocidade do ar de 1,5 e 2,0 m s<sup>-1</sup>. Maharaj & Sankat (1996), verificaram decréscimo similar do teor de ácido ascórbico na temperatura mais baixa, ao estudarem os efeitos das temperaturas de secagem de 40 a 70 °C nas folhas de inhame, e concluíram que tal comportamento se deve à ação de enzimas oxidativas e a oxidação do ácido ascórbico catalisada pelo oxigênio, devido ao prolongado tempo de secagem nessa temperatura. De acordo com Gabas et al. (2003) no processo de desidratação, a perda de ácido ascórbico é afetada principalmente pela aplicação de altas temperaturas.

De acordo com Coultate (2004), na presença do ar, a principal forma de degradação da vitamina C, ocorre devido à formação de AHDA (ácido dehidro-*L*-ascórbico) menos estável.

Observa-se ainda, na Tabela 13, que o valor médio de ácido ascórbico encontrado na polpa de acerola é de 1201,51 mg/100g. Os valores estão próximos aos encontrados por Yamashita et al. (2003) que referenciam valores médios de 1511 mg/100g na polpa de acerola congelada. Oliveira et al. (1999), estudaram o teor de vitamina C de 28 marcas de polpas de acerola congeladas produzidas nos estados de Pernambuco e Paraíba e obtiveram um valor médio de 1.025 ± 270 mg/100g.

Oliveira et al. (1998) em trabalho anterior, ao avaliar a qualidade das polpas produzidas e comercializadas nos Estados do Ceará e Rio Grande do Norte, detectaram

teores de vitamina C na polpa congelada de acerola variando de 545,16 a 1244,7 mg/100g, com média de 831,72 mg/100g.

Observa-se que os valores médios de ácido ascórbico para a faixa de temperatura de 60 a 70 °C foram de 161,5497 a 192,4290 mg/100g. Gomes et al. (2002) encontraram valores médios de 81,91 mg/100g de ácido ascórbico da polpa de acerola em pó, proveniente da secagem em um secador do tipo leito de jorro, com temperatura do ar de secagem de 70 °C.

## 5. CONCLUSÕES

- Os modelos matemáticos de GAB e Peleg foram os que melhor representaram os dados experimentais das curvas de adsorção da polpa de acerola, e os de BET e Peleg para as curvas de dessorção.
- As amostras da polpa de acerola entram em equilíbrio higroscópico com valores distintos, dependendo da temperatura a que foram submetidas.
- Os frutos da acerola foram desidratados em tempos aproximados de 16 h e 20 min, 9 h e 7 h e 36 min quando submetidos às temperaturas de 50, 60 e 70 °C, respectivamente.
- A cinética de secagem da acerola ocorre dentro do período de taxa decrescente, sendo pouco influenciada pela velocidade do ar de secagem e fortemente pela temperatura.
- Os modelos de Page e de Thompson se ajustaram bem aos dados experimentais das secagens, com coeficientes de determinação superiores a 98,80%.
- O aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem influenciaram na degradação do ácido ascórbico durante a secagem.
- A acerola em pó é menos concentrada em: 21,82; 15,31 e 14,09%, respectivamente que a polpa in natura para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUERRE, R.J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P.E. The temperature dependent of isosteric heat of sorption of some cereal grains. **International Journal of Food Science and Technology**, v.23, p.141-145, 1988.

ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA, J.P.G. de, J. E.; VILLAMIL, J.M.P.; SILVA, M.M. Secagem natural e artificial de vagens de algaroba. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.27, n.1, p.48-57, 2002.

ALSINA, O.L.S.; SILVA, O.S. e; SANTOS, J.M. Efeitos das condições operacionais na cinética de secagem de fatias de bananas, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997. CD Rom.

ALVES, R.E. Características das frutas para exportação. In: NETTO, A.G.; ARDITO, E.F.G.; GARCIA, E.E.C.G.; BLEINROTH, E.W.; FREIRE, F.C.O.; MENEZES, J.B.; BORDINI, MR.; SOBRINHO, R.B.; ALVES, R.E. **Acerola para exportação: procedimentos de colheita e pós-colheita**. Brasília: EMBRAPA – SPI, 1996, 30p. (EMBRAPA – SP, Publicações Técnicas Frupex, 21).

AOAC - Association of Official Analytical Chemists. **Official methods of analysis**, 14 ed. Arlington, Virgínia, 1992. várias paginações.

ARAÚJO, M.E.R.; ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA J.P.G. de; SILVA, M.M. Atividade de água em goiaba (*Psidium guajava* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, Foz do Iguaçu. **Anais...** Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. CD.

AZZOUZ S.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Drying kinect equation of single layer of grapes. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 11, 1998, Halkidiki, Greece. **Proceedings...** Greece: A. S. Mujumdar, 1998. v.B., p.988-997.

BENASSI, M.T.; ANTUNES, A.J. A comparison of meta-phosphoric and oxalic acids as extractant solutions for the determination of vitamin C in selected vegetables. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v. 31, n.4, p.507-513, 1988.

BIZOT, H. Using the 'G.A.B.' model to construct sorption isotherms. In: JOWITT, R.; ESCHER, F.; HALLSTROM, B.; MEFFERT, H.F. TH.; SPIESS, W.E. – L.; Vos, G. **Physical properties of food**. London: Applied Science Publishers, 1983. p. 43-54.

BOBBIO, F.O.; BOBBIO, F.O. **Química do processamento de alimentos**. Campinas: Fundação Cargil, 1985. 306p.

BRASIL. **Agência nacional de vigilância sanitária**. Portaria n° 33, de 13 de janeiro de 1998. Disponível em: <[http://www.anvisa.gov.br/legis/portarias/33\\_98.htm](http://www.anvisa.gov.br/legis/portarias/33_98.htm)>. Acessado em 25 Mar. de 2006.

BRASILEIRO, I.M. do N., Cinética de secagem de acerola “in natura” em monocamada. Campina Grande: UFPB, 75p., 1999. (Dissertação de Mestrado)

BRITO, F.C.S. **A fruticultura tropical frente ao mercado globalizado (algumas questões sobre o abacaxi paraibano)**. C. Grande: UFCG, 2000, 117p. (Dissertação de Mestrado).

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying cereal grains**. The AVI Publishing Company, 1989, 265p.

CAPRISTE, G.H.; ROTSTEIN, E. Prediction of sorptional equilibrium data for starch-containing foodstuffs. **Journal of Food Science**, v.47, p.1501-1507, 1982.

CASTILLO, M.D.; MARTÍNEZ, E.J.; GONZÁLEZ, H.H.L.; RESNIK, S.L. Study of mathematical models applied to sorption isotherms of Argentina black beans varieties. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v.27, p.45-61, 2003.

CASTRO, F.A.F.; AZEVEDO, R.M.C.; SILVEIRA, I.L. **Estudo experimental dos alimentos**. Viçosa, Ed. UFV, 1998, p. 7-17.



CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; BRAGA, M.E.D. Taxas de secagem de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao* L.) em camadas finas em função da temperatura e teor de umidade inicial do produto. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, V.24, n.2. p.10-19, 1999.

CORNEJO, F.E.P. **Estudos dos parâmetros de secagem e construção de um secador de baixo custo para filés salgados de pescado**. Campinas, 86 p. Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 1987. ((Dissertação de Mestrado).

CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H.A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1 - a review. **Journal of Food Technology**, v.13, p.159-174, 1978.

CHRISTENSEN, C.M. **Storage of cereal grains and their products**. St. Paul American Association of Cereal Chemist, 1974. 549p.

CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A.B. **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio**. Lavras, ESAL / FAEPE, 1990.

COULTATE, T.P. **Alimentos: a química de seus componentes**, Trad. FRAZZON, J.; SOARES, L.H. de B.; MEDINA, L.F. da COSTA; HECK, J.X., 3ª ed., Porto Alegre: Artmed, 2004.

COUTINHO, E.P. Características físico-químicas da fruta de acerola In: IX Encontro Nacional de Analistas de Alimentos, João Pessoa, **Resumos...**, João Pessoa, 1995

DURAL, N.H.; HINES, A.L. A new theoretical isotherm equation for water vapor-food systems: multilayer adsorption on heterogeneous surfaces. **Journal Food Engineering**, v. 20, n. 1, p. 75-96, 1993.

FARIAS, E.S.; NASCIMENTO, J.; ALMEIDA, R.C.; GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.C.; PEREIRA, E. A obtenção das isoterms do cajá. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: SBEA, 2002. CD.

FIGUEIREDO, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa. Ed. Universitária/UFPB, 2004. 229p.

FRANCO, G. **Tabela de composição química dos alimentos**. 9 ed., São Paulo: Atheneu, 1998. 307 p.

GABAS, A.L.; TELIS-ROMERO, J.; MENEGALLI, F.C. Cinética de degradação do ácido ascórbico em ameixas liofilizadas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, p.66-70, 2003.

GARCIA, D.C.; BARROS, A.C.S.A.; PESKE, S.T.; MENEZES, N.L. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n.2, p.603-608, 2004.

GOMES, P.M. de A., FIGUEIRÊDO, R.M.F., QUEIROZ, A.J. de M. Caracterização e isotermas de adsorção de umidade da polpa de acerola em pó. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n.2, p.157-165, 2002.

GOMES, P.M. de A., **Estudo da polpa de acerola (*Malpighia emarginata*, D.C.) desidratada em leito de jorro**. Campina Grande: UFPB, 82p., 2002. (Dissertação de Mestrado)

GONZAGA NETO, L.; SOARES, J.M. **Acerola para exportação: aspecto técnico da produção**. Brasil: EMBRAPA-PI, 1994. 43p. (Série Publicação Técnica FRUPEX, 10).

GOUVEIA, J.P.G. de; ALMEIDA, F. de A.C.; FARIAS, E. da S.; SILVA, M. M. da; CHAVES, M. da C. V.; REIS, L. S. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.Especial, n.1, p.65-68, 2003.

GOUVEIA, J.P.G.; MOURA, R.S.F. de.; ALMEIDA, F.A.C. OLIVEIRA, A.M. de V.; SILVA, M.M. Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento

---

experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.3, p. 471-474, 2002.

GOUVEIA, J.P.G.; SILVA, M.M.; ALMEIDA, F.A.C. Estudo do equilíbrio higroscópico de polpa de manga. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, 2000, **Anais...** Fortaleza, 2000. Cd Rom.

GOUVEIA, J.P.G. de; ALMEIDA, F.A.C.; SILVA, F.H. da.; MURR, F.E.X. Estudo da cinética de secagem de gengibre em um secador de leito fixo. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa, v.24, n.2, p.20-27, 1999.

GOUVEIA, J.P.G. de . **Avaliação da cinética de secagem de gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) em um secador de leito fixo**. Campinas: UNICAMP, 161p, 1999. (Tese de Doutorado)

GOUVEIA, J.P.G. de; FERNADEZ, F.R.; MURR, F.E.X.; PRADO, M.E.T. Ginger desorption rate. **Proceedings...** In: INTER-AMERICAN DRYNG CONFERENCE, São Paulo, 1997. p.26.

IGLESIAS, H.A.; CHIRIFE, J. BET monolayer in dehydrated foods and food components. **Lebensmittel Wissenschaft and Technologies**, n.9, p.107-113 , 1976

JUNQUEIRA, K.P.; PIO, R.; VALE, M.R. do; RAMOS, J.D. **Cultura da aceroleira**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2002. 31p. (Boletim Técnico, 96).

KAPSALIS, J.G. Influences of histereses and temperature on moisture sorption isotherms. In: ROCKLAND, L.B. **Water activity: theore and applications to food**. New York: Marcel Dekker, 1987, v.9, p.173–213.

KECHAOU, N.; MAALEJ, M. Desorption isotherms of imported banan. **Drying Technology**, New York, v.17, n.6, p.1201-1213, 1999.

KROKIDA, M.K.; KIRANOUDIS, C.T.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Drying related properties of apple. **Drying Technology**, New York, v.18, n.6, p.1251–1267, 2000.

LABUZA, T.P. Sorption phenomena in foods. **Food Technology**, Chicago, v.22, n.3, p.263-272, 1968.

LACERDA FILHO, A.F. Avaliação de diferentes sistemas de secagem e seus efeitos na qualidade do café (*Coffea arabica* L.) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PÓS-COLHEITA, 1, **Anais...** Rio de Janeiro, 1987.

LEWIS, M.J. **Physical properties of food and food processing systems**. Bodmin, Cornwall: Ellis Horwood Limited, 1990. 465 p.

LIMA, F.M de. **Desidratação de polpa de umbu em leite de jorro – Estudos fluidodinâmicos e térmicos**. Campina grande: Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal da Paraíba. 1992. 118p. (Dissertação de Mestrado)

LOMAURO, C.J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Par I: Fruit, vegetable and meat products. **Lebensmittel Wissenschaft and Technologies**, v.18, p.112-22, 1985.

MAHARAJ, V.; SANKAT, C.K. Quality changes in dehydrated dasheen leaves: effects of blanching pre-treatment and drying conditions. **Food Research International**, Barking, v.29, n.5-6, p.563-568, 1996.

MARINO NETO, L. **Acerola, a cereja tropical**. São Paulo: Nobel, 1996.

MAROULIS, Z.B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D. Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. **Journal of Food Engineering**, Essex, v.7, n.1, p.63-78, 1988.

MENEGALLI, F.C.; YOSHIDA, C.M. Estudo da cinética de secagem de milho superdoce em leito fixo. In: ENCONTRO NACIONAL EM MEIOS POROSOS (ENEMP). *Anais...* Uberlândia, MG, v.24, n.1, p.307-317, 1996.

MOURA, R.S.F.; GOUVEIA, J.P.G. de; ALMEIDA, F.A.C.; SOUSA, A.G. de; SILVA, M.M. da; OLIVEIRA, A.M. de V. Modelagem matemática para isotermas em polpa de caju. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, Campina Grande, v.4, n.2, 2004.

MOURA, R.S.F.; ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA, J.P.G. de; SILVA, M.M. da; FIGUEIRÊDO NETO, A. Efeito da temperatura e da velocidade do ar na secagem de caju. *Anais...* In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, 2001, Pelotas, 2001, CD Roms.

MUSTARD, M.J. The ascorbic acid content of some Malpighia fruit and jellys. *Science*, Washington, v.104, p.230-235, 1946.

NOGUEIRA, R.J.M.C.; MORAES, J.A.P.V. de; BURITY, H.A.; SILVA JUNIOR, J.F. da. Efeito do estágio de maturação dos frutos nas características físico-químicas de acerola. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.37, n.4, p.463-470, 2002.

NUCCI, M. C. C.; MURR, F. E. X. **Influência da temperatura e da velocidade do ar de sacagem na qualidade do gengibre seco.** Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos. Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1994. 45p. (Trabalho de Iniciação Científica).

OLIVEIRA, M.E.B.; BASTOS, M.S.R.; FEITOSA, T.; BRANCO, M.A.A.C.; SILVA, M.G.G. Avaliação de parâmetros de qualidade físico-químicos de polpas congeladas de acerola, cajá e caju. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.19, n.3, p.326-332, 1999.

OLIVEIRA, M.E.B. de; OLIVEIRA, D. de; FEITOSA, T; BASTOS, M. do S.R.; FREITAS, M.L. de. Qualidade de polpas congeladas de frutas, fabricadas e

comercializadas nos estados do Ceará e Rio Grande do Norte. **Boletim do CEPPA**, Curitiba, v.16, n.1, p.13-22, 1998.

OLIVEIRA, R.P.S. **Determinação das propriedades físicas e de transporte de suco da acerola**. 1981. 148p. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. (Dissertação de Mestrado).

PARK, K.J.; NOGUEIRA, R.I. Modelos para ajuste de isotermas de sorção de alimentos. **Engenharia Rural**, n.3, v.1, p.180-186, 1992.

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

PENA, R.S; RIBEIRO, C.C.; GRANDI, J.G., Influencia da temperatura nos parâmetros de modelos bi-parametricos que predizem isotermas de adsorção de umidade do guaraná (*Paullinia cupana*) em pó. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.17, n.3, p.229-232. 1997.

PRADO, M.E.T.; PARK, K.J.; ALONSO, L.F.T. Srinkage of dates (*Phoenix dactilyfera*). **Drying Technology**. Estados Unidos, v.18, n.1 e 2, p.295-310, 2000.

PRADO, M.E.T.; ALONSO, L.F.T. ; PARK, K.J. Isotermas de sorção de tâmaras: determinação experimental e avaliação de modelos matemáticos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.19, n.1, p.143-146, 1999.

PRADO, M.E.T. Secagem de tâmaras (*Phoenix dactilyfera*, L.) para obtenção de tâmara passa. Campinas: UNICAMP, 151p., 1998. (Tese de Doutorado)

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas/SP, 2000. 603p.

ROCKLAND, L.B. A new treatment of hygroscopic equilibria: application to Walnuts (*Juglans regia*) and other foods. **Food Research**, v.22, p.604-628, 1957.

RITZINGER, R.; RITZINGER, C.H.S.P. **Acerola – Aspectos gerais da cultura**. Cruz das Armas: EMBRAPA, 2004. n.9 (EMBRAPA Mandioca e Fruticultura – Comunicado Técnico)

SCHOLZ, M.B.S.; STENZEL, N.M.C. Características físico-químicas de frutos de acerola (*Malpighia spp*) cultivados no Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 14, 1996, Curitiba. Fruticultura sem fronteiras. 42ª Reunião Internacional de horticultura tropical. Simpósio Internacional de Mirtaceas. Curitiba-PR **Resumos...** p.43.

SGARBIERE, V.C. **Alimentação e Nutrição**. Campinas: UNICAMP, 1987, 387p.

SHARMA, A.D.; KUNZER, O.R.; TOLLEY, H.D. Rough rice drying as a two-compartment model. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.25, n.1, p.221-224, 1982.

SILVA, M.M.; GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.C. Dessorção e calor isostérico em polpa de manga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.123-127, 2002.

SILVA, V.A., ALSINA, O.L.S., MOURA, C.S. Efeito de pré-tratamentos químicos na taxa de secagem de acerola em monocamada. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 1998, Rio de Janeiro. **Anais...**, 1998. v.3, p.1768-1771

SOUSA, S. de; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; BRAGA, M.E.D.; MONTEIRO FILHO, A.F. Drying curves of umbu fruits with osmotic pré-drying. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.2, n.2, p.33-38, 2000.

STATSOFT, Inc. (2004) **Statistica (data qualysis software system)**, Version 7. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com). 2004.

TELIS-ROMERO, J.; KOHAYAKAWA, M.N.; SILVEIRA JR., V.; PEDRO, M.A.M.; GABAS, A.L. Compensação entalpia-entropia baseada nas isotermas de mango. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.25, n.2, p.297-303, 2005.

THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying – A new model. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.11, n.4, p.582-586, 1968.

TREYBAL, R.B. Drying. In: **Mass transfer operations**. New York: McGraw-Hill, 1963. p.569-575.

VIEIRA, J.A.G. **Propriedades termofísicas e convecção no escoamento laminar de suco de laranja em tubos**. 1994. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas.

VILLAR, G.C. **Estudo do desempenho de um secador convectivo de bandejas para a secagem de bananas: análise da influencia das variáveis operacionais**. Campina Grande: UFPB, 1999. 75p (Dissertação de Mestrado)

WOLF, W.; SPIESS, W.; JUNG, G. **Sorption isotherms and water activity of food material**. 1. ed. London: Elsevier Science Publishing Co., 1985. 239p.

YAMASHITA, F.; BENASSI, M. de T.; TONZARI, A.C.; MORIYA, S.; FERNANDES, J.G. Produtos de acerola: estudo da estabilidade de vitamina C. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.23, n.1, p.92-94, 2003.



## **7. APÊNDICE A**

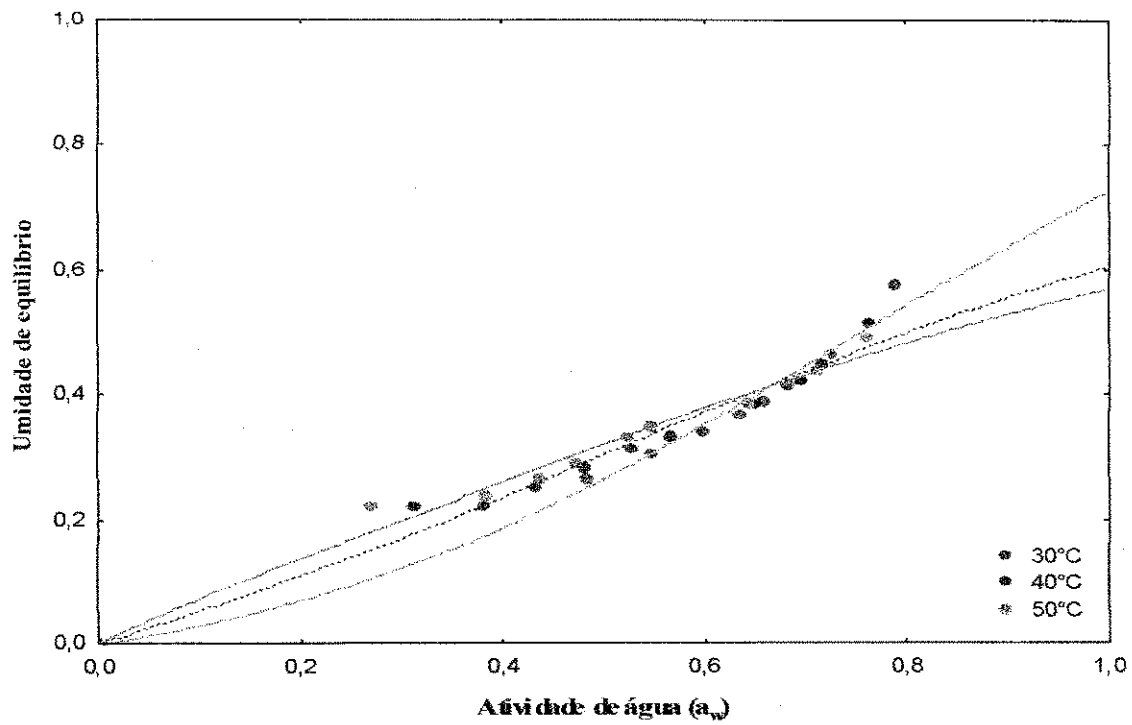


Figura A.1. Isotermas de adsorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de BET

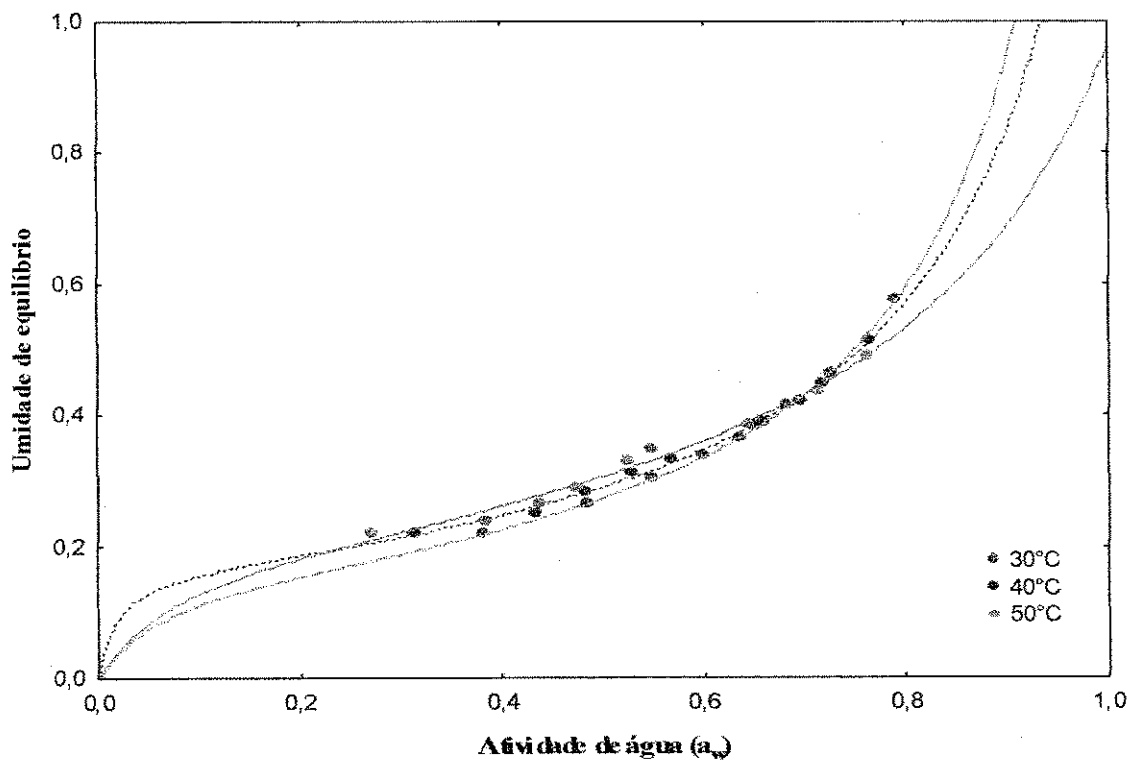


Figura A.2. Isotermas de adsorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de GAB

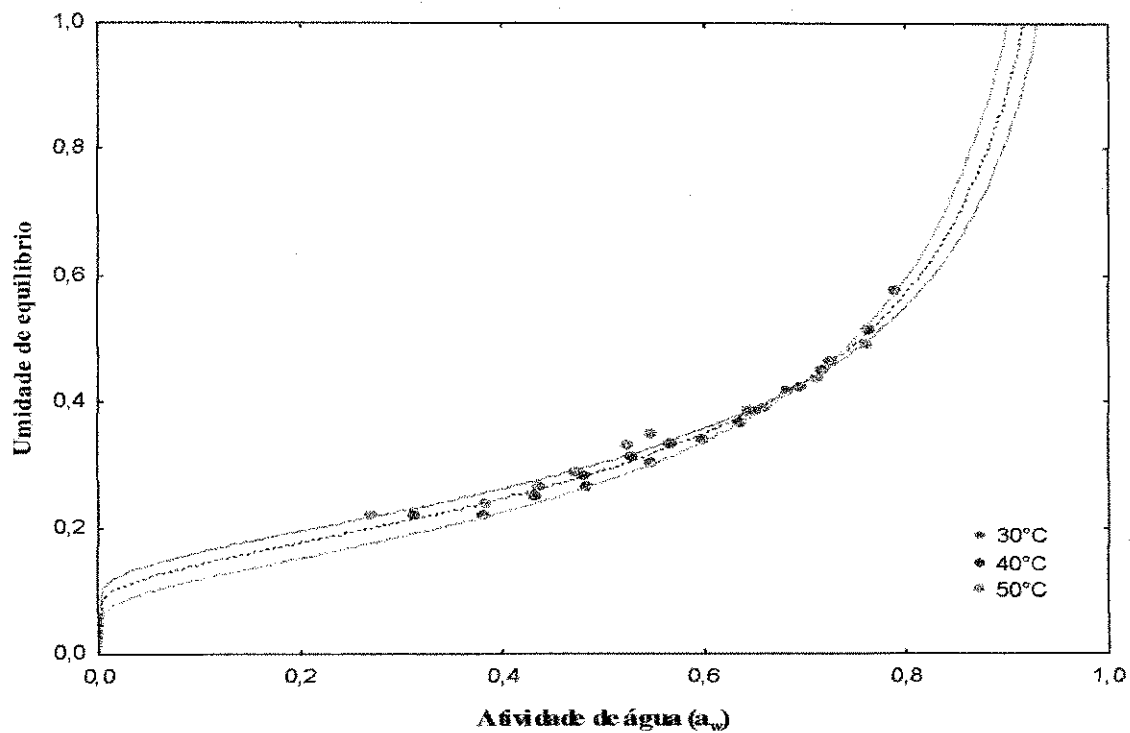


Figura A.3. Isotermas de adsorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de Halsey

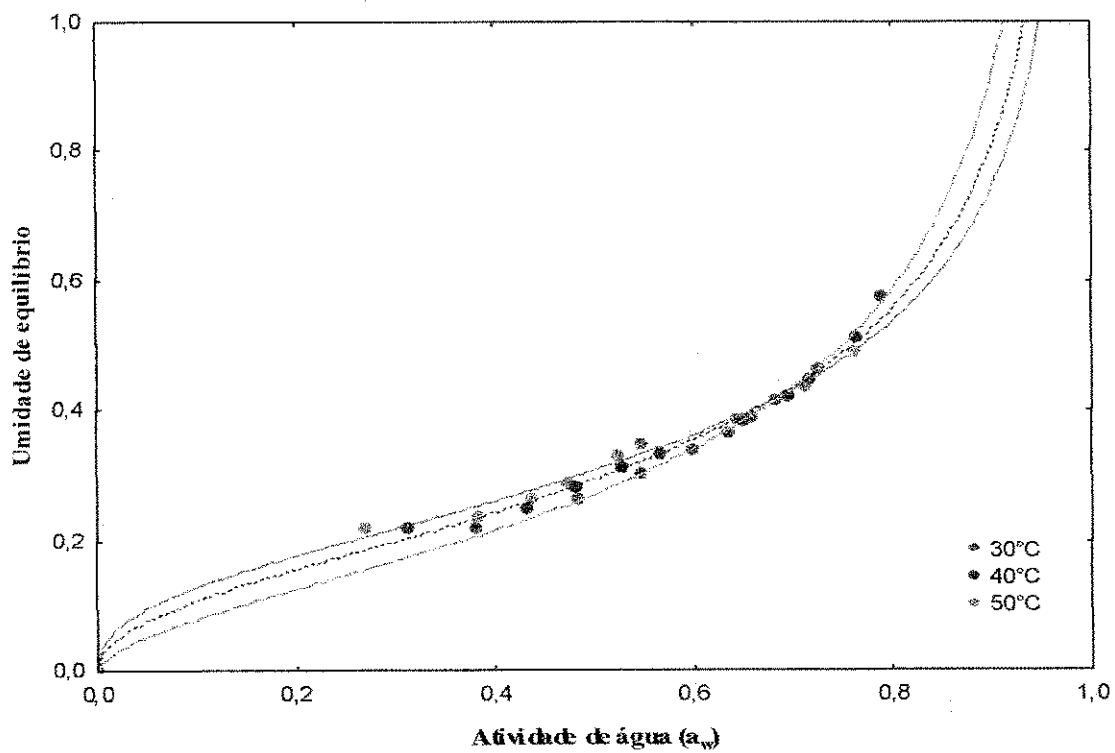


Figura A.4. Isotermas de adsorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de Oswin

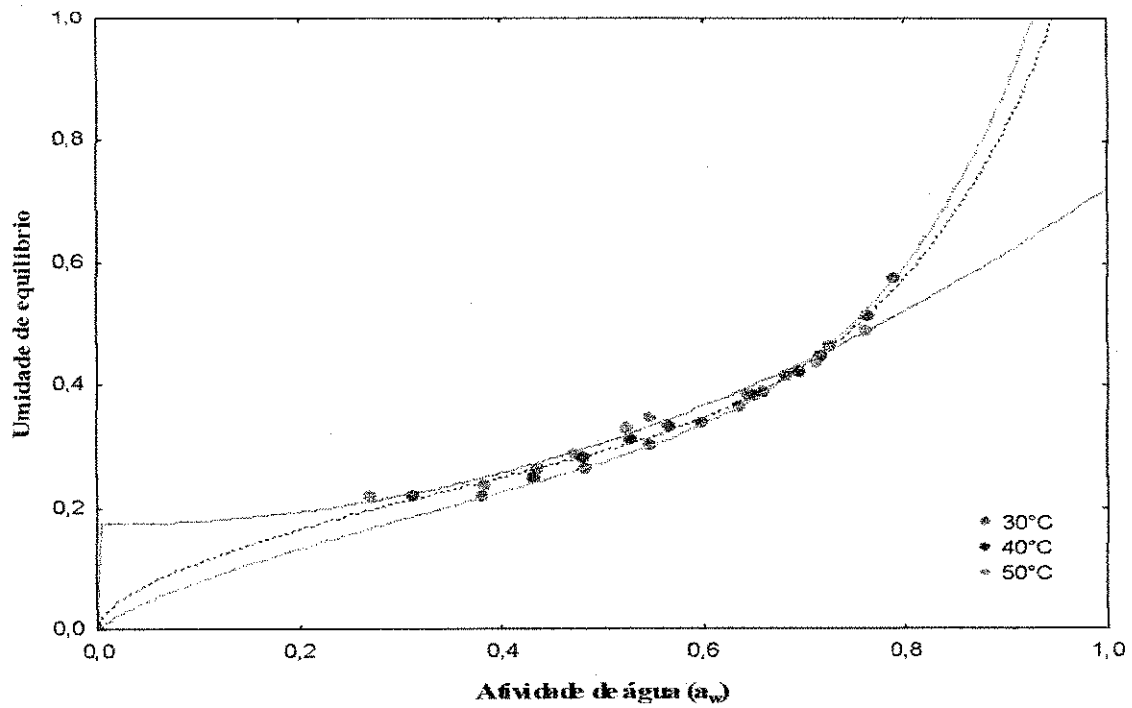


Figura A.5. Isotermas de adsorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de Peleg

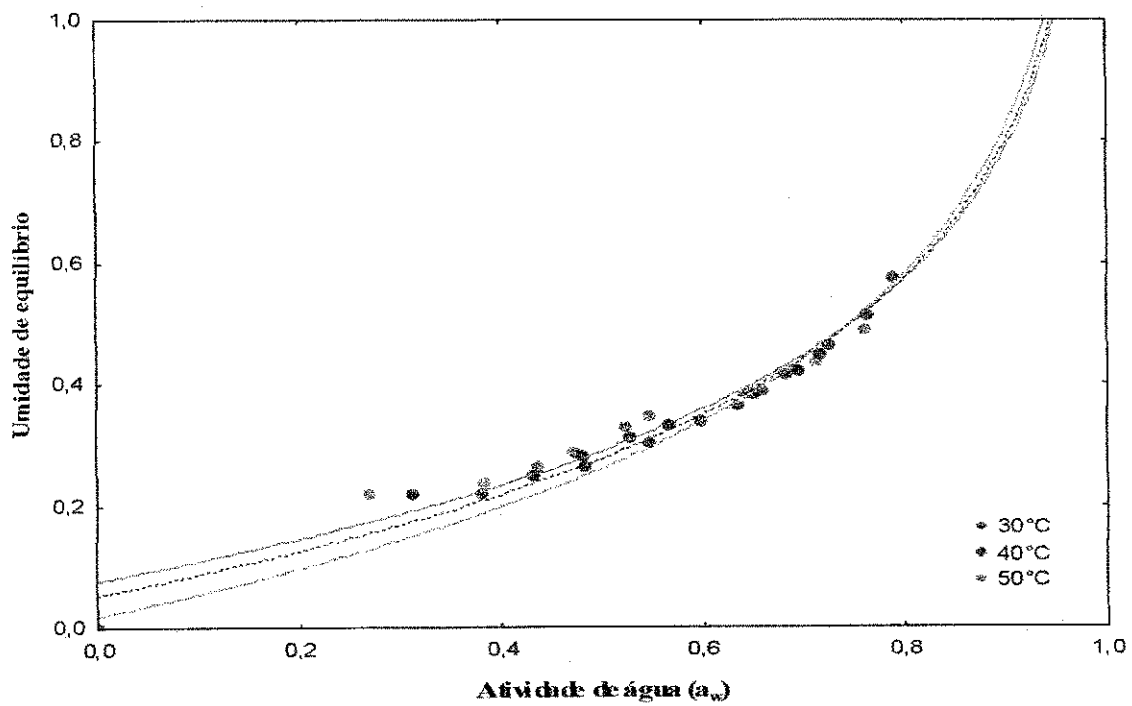


Figura A.6. Isotermas de adsorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de Smith

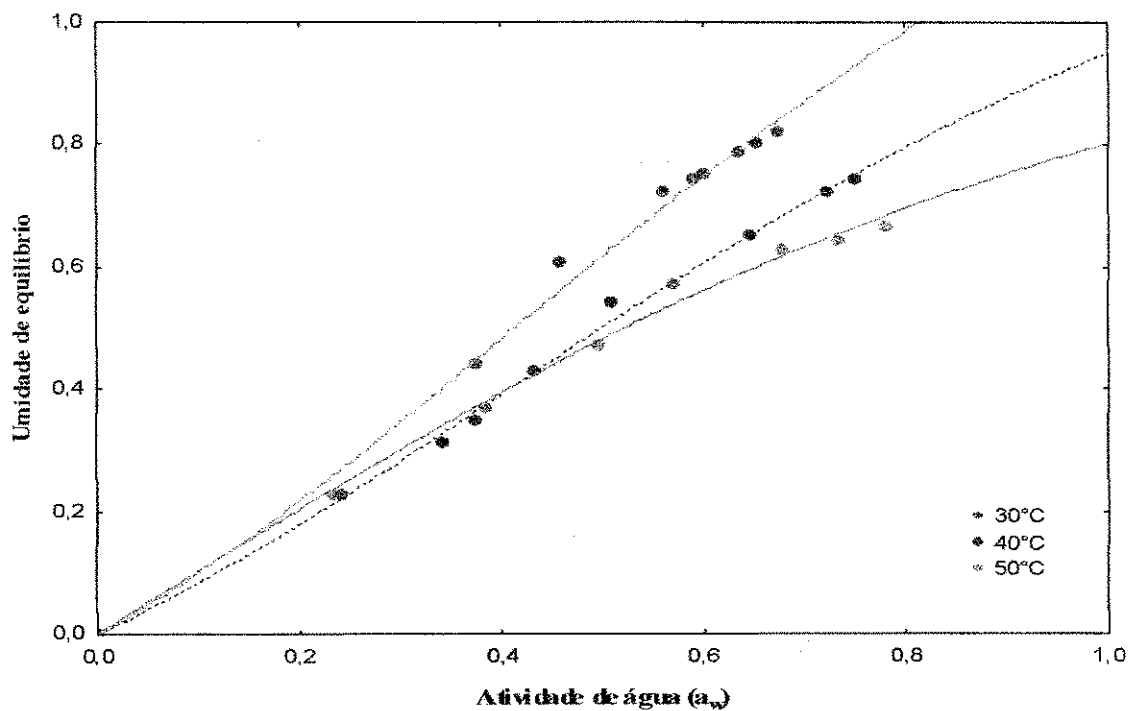


Figura A.7. Isotermas de dessorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de BET

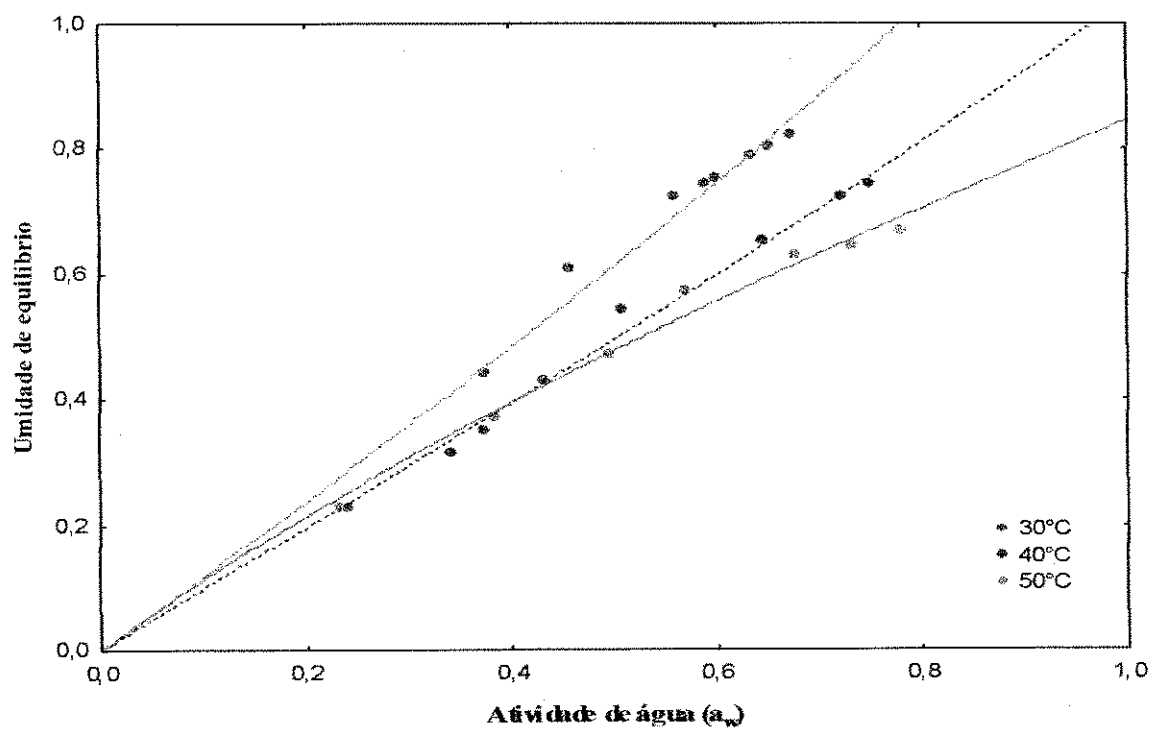


Figura A.8. Isotermas de dessorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de GAB

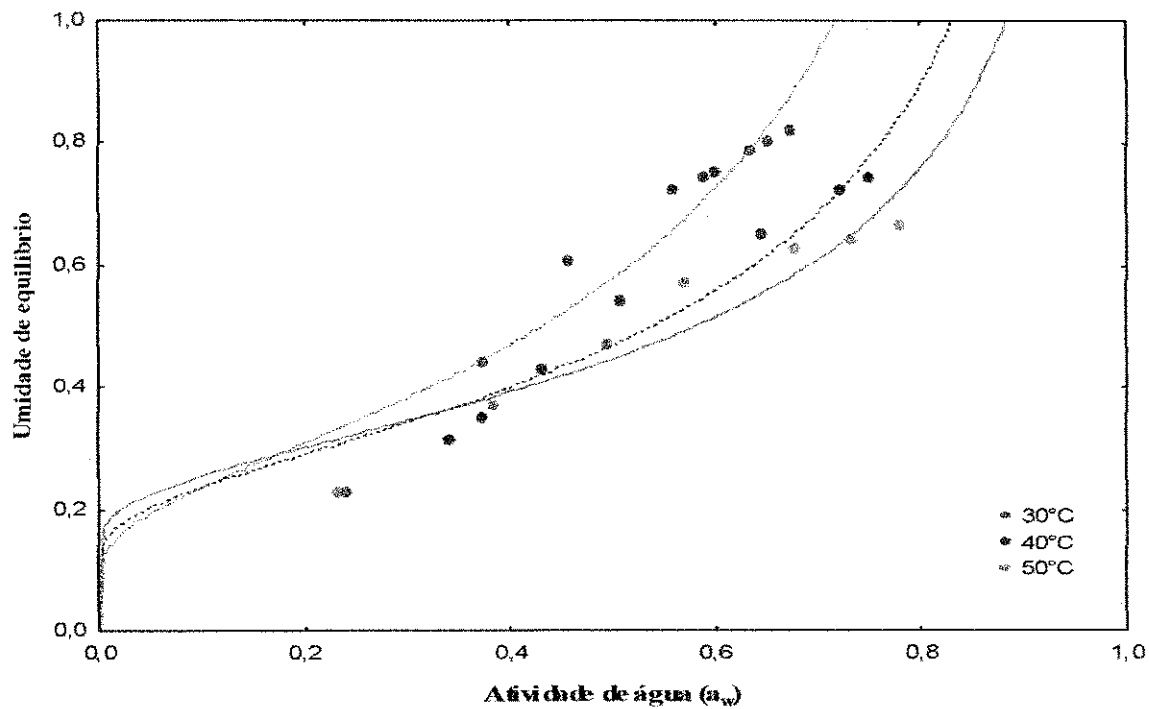


Figura A.9. Isotermas de dessorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de Halsey

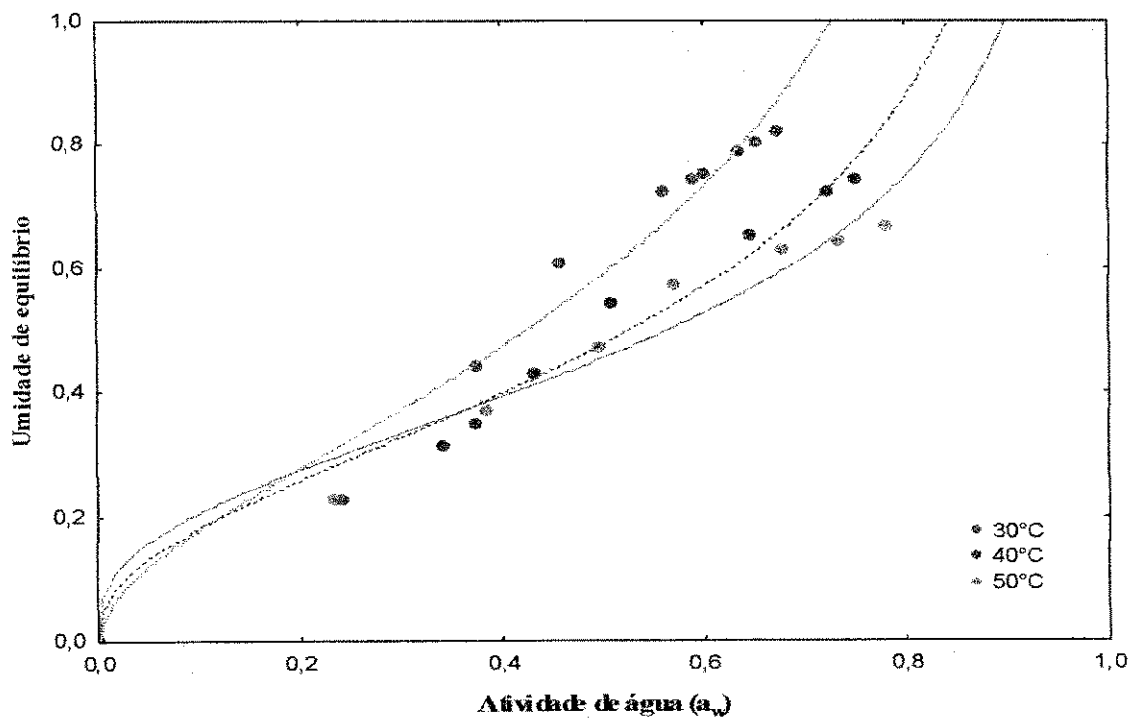


Figura A.10. Isotermas de dessorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de Oswin

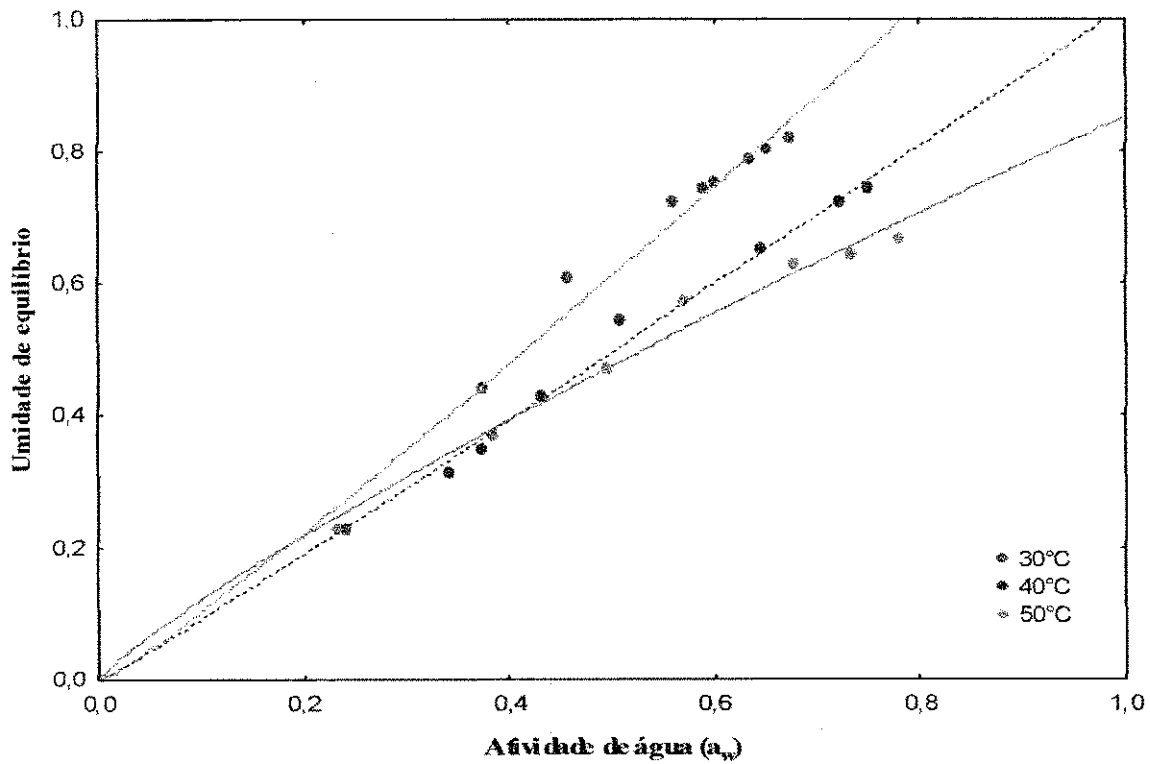


Figura A.11. Isotermas de dessorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de Peleg

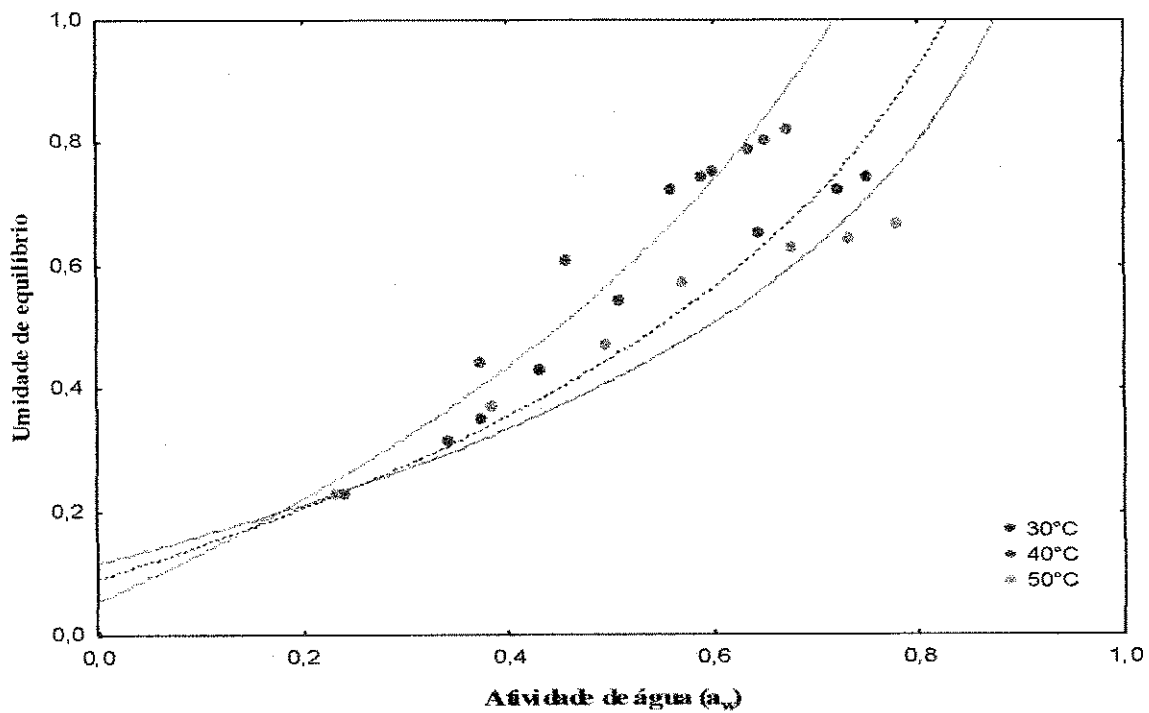
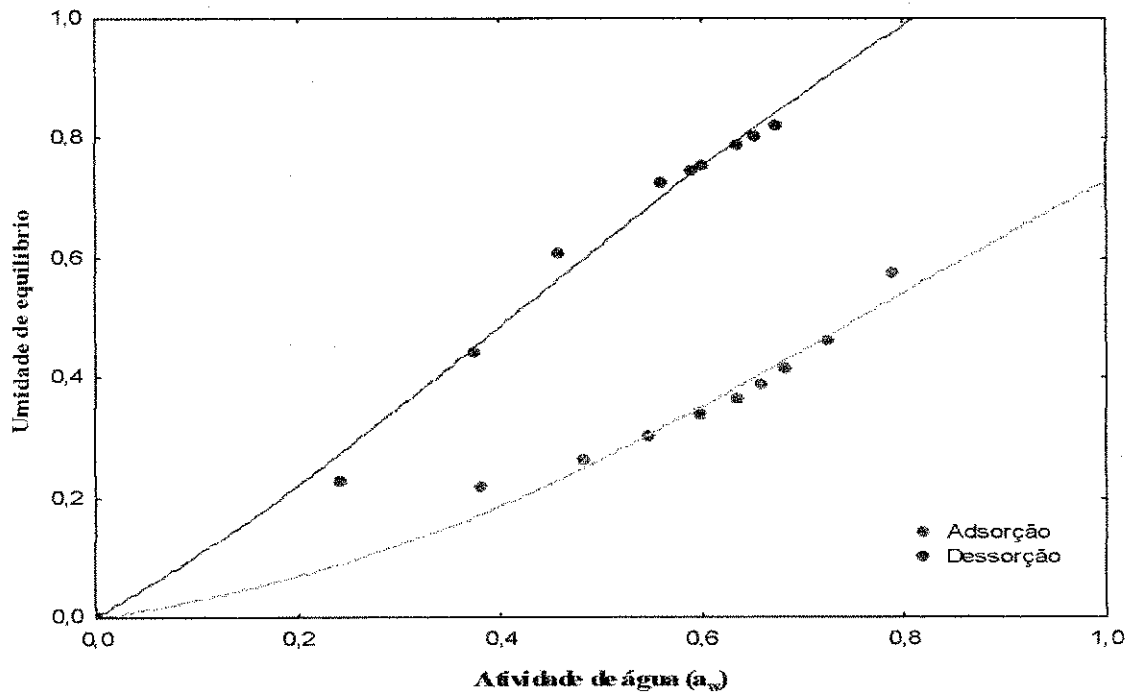


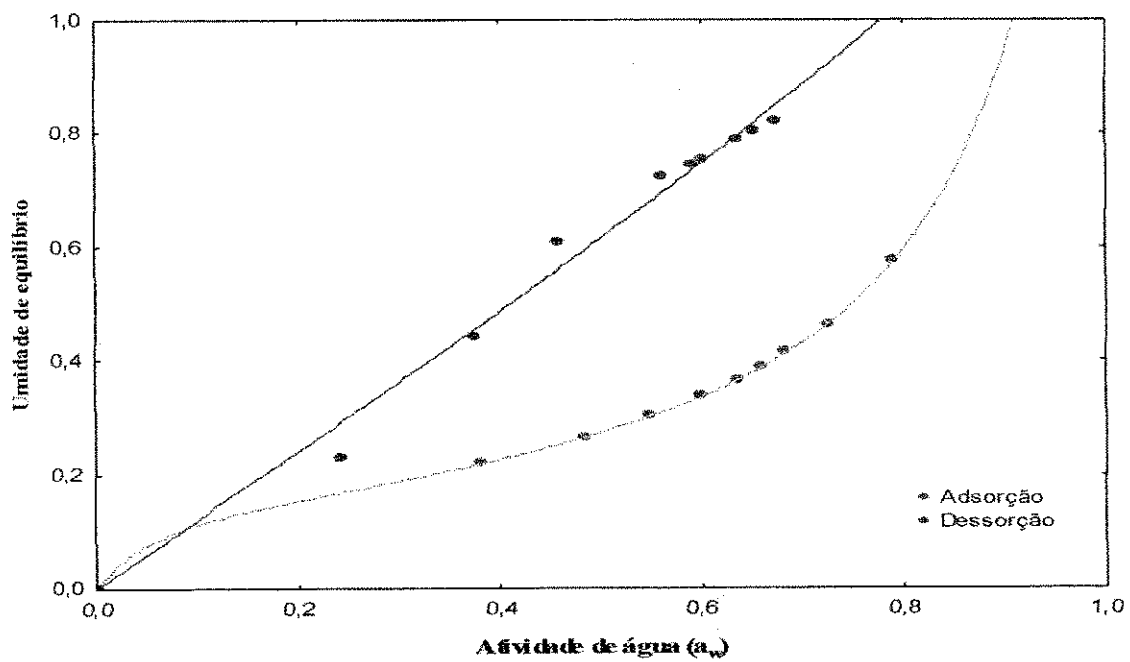
Figura A.12. Isotermas de dessorção da polpa de acerola ajustadas ao modelo de Smith

## **8. APÊNDICE B**





**Figura B.1.** Histerese da polpa de acerola na temperatura de 30 °C ajustada pelo modelo de BET



**Figura B.2.** Histerese da polpa de acerola na temperatura de 30 °C ajustada pelo modelo de GAB

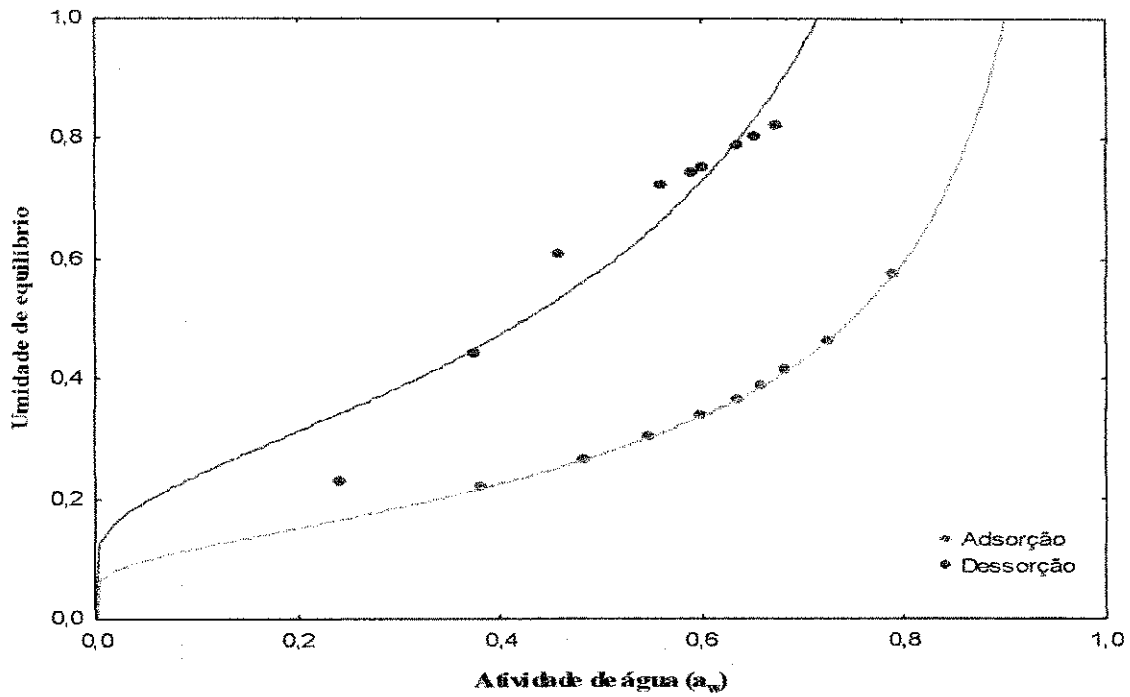


Figura B.3. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 30 °C ajustada pelo modelo de Halsey

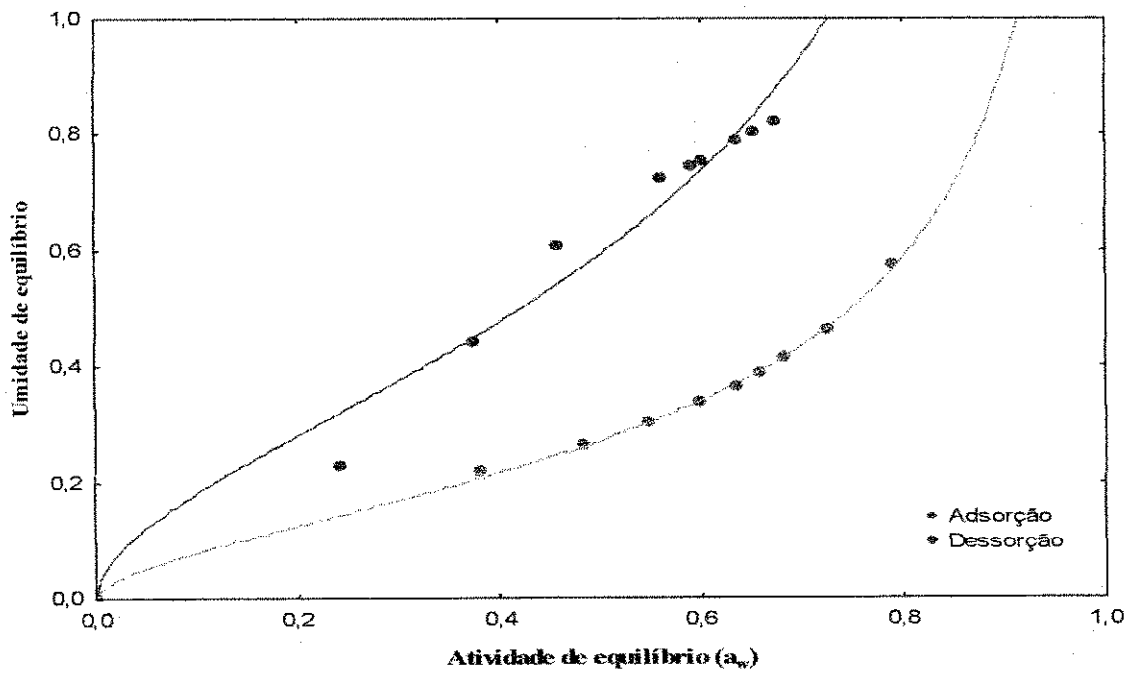


Figura B.4. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 30 °C ajustada pelo modelo de Oswin.

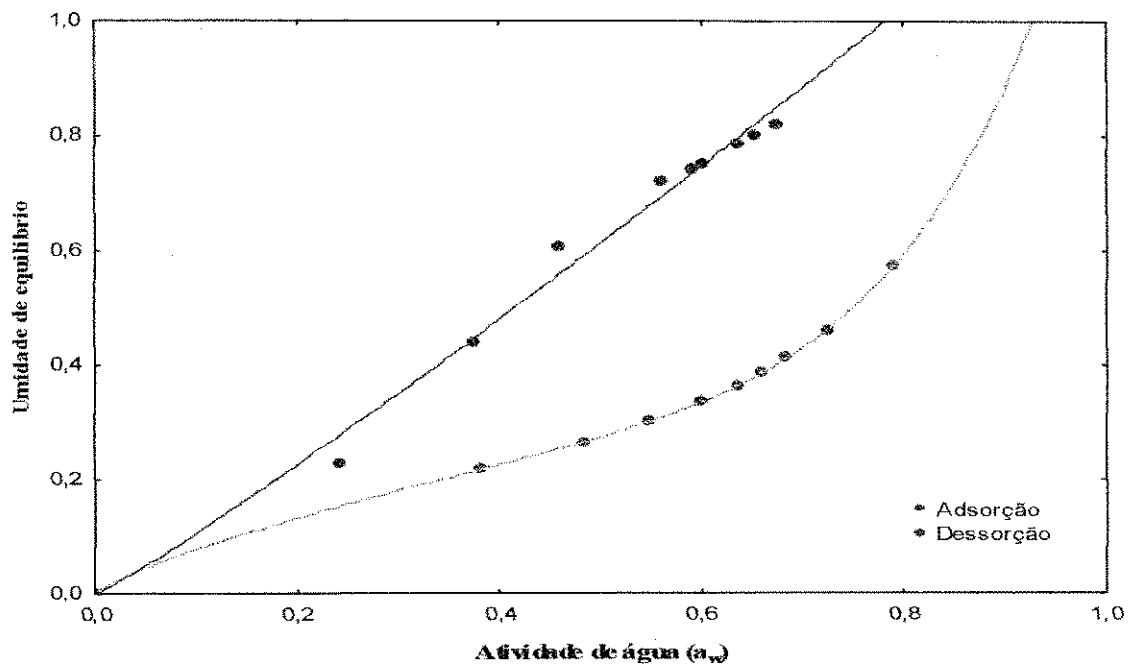


Figura B.5. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 30 °C ajustada pelo modelo de Peleg

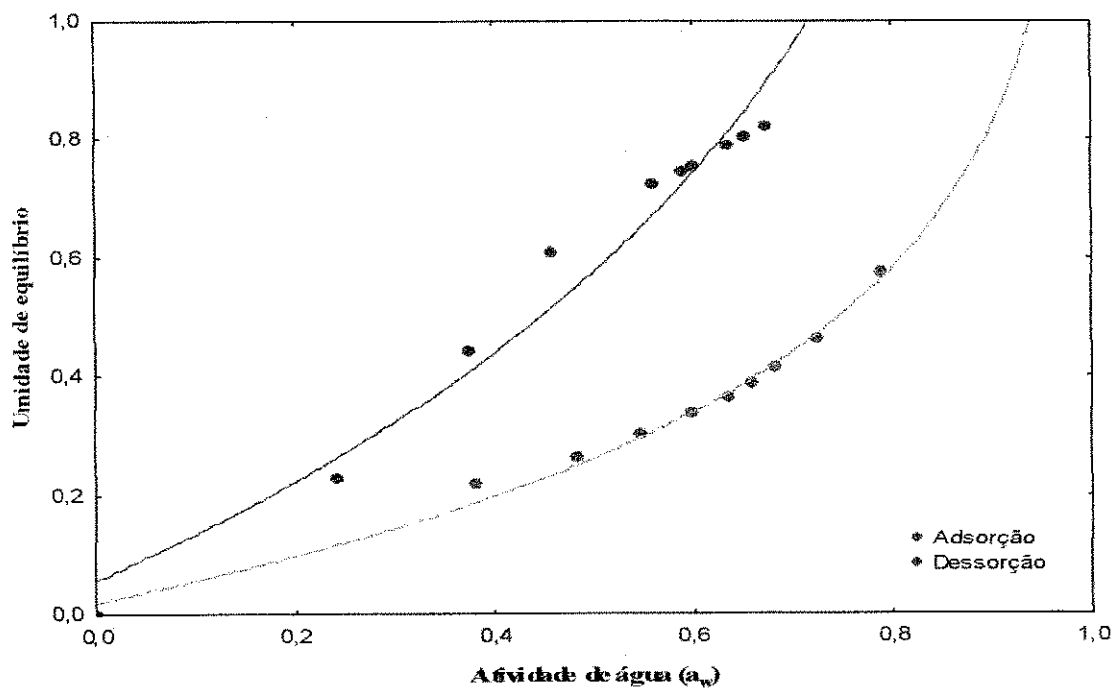
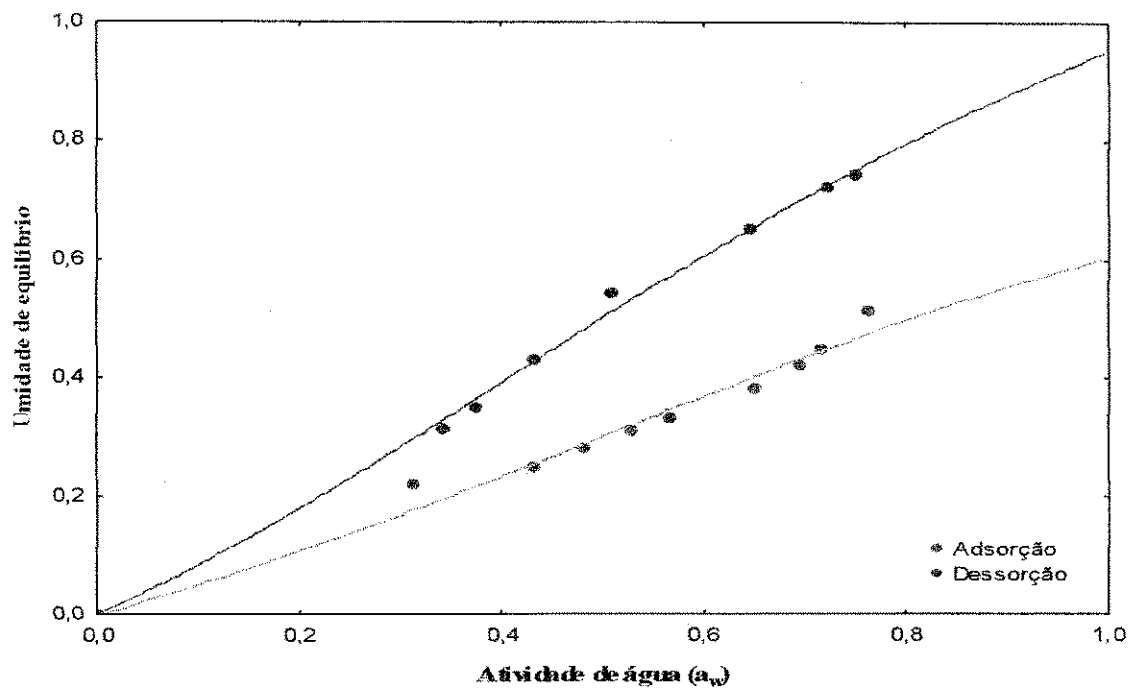
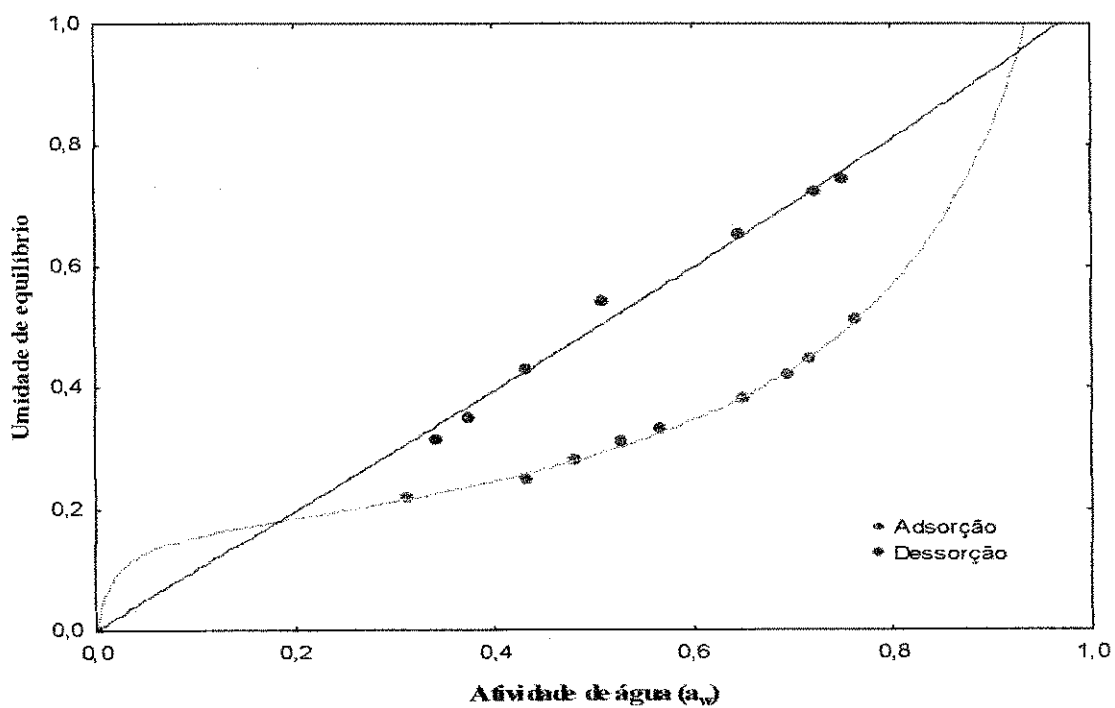


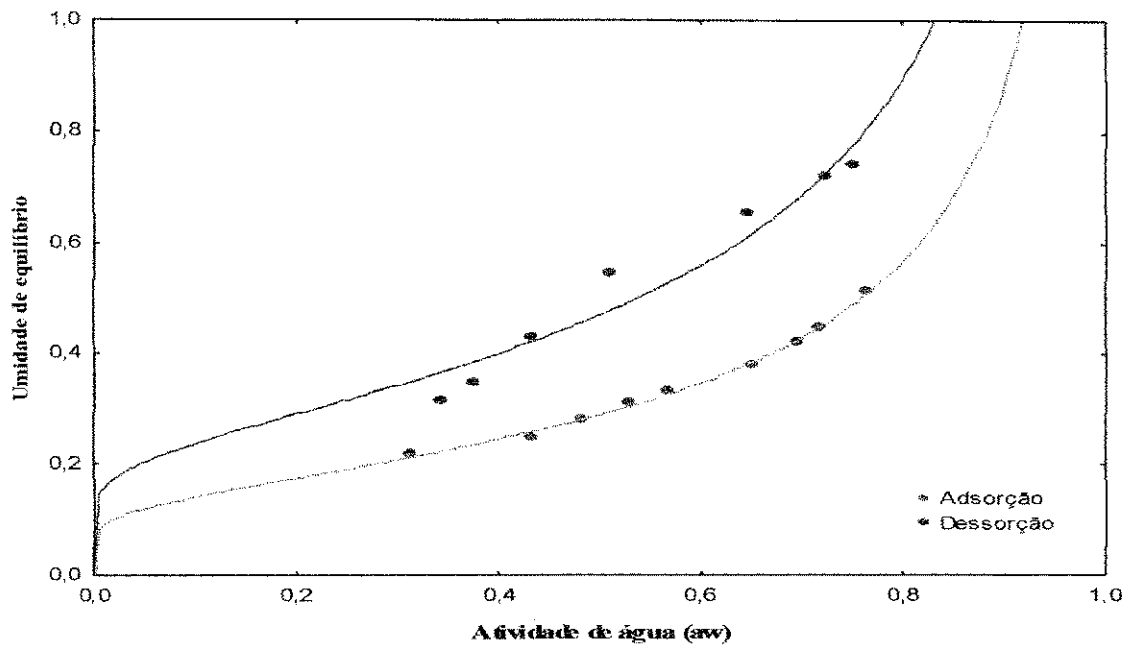
Figura B.6. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 30 °C ajustada pelo modelo de Smith



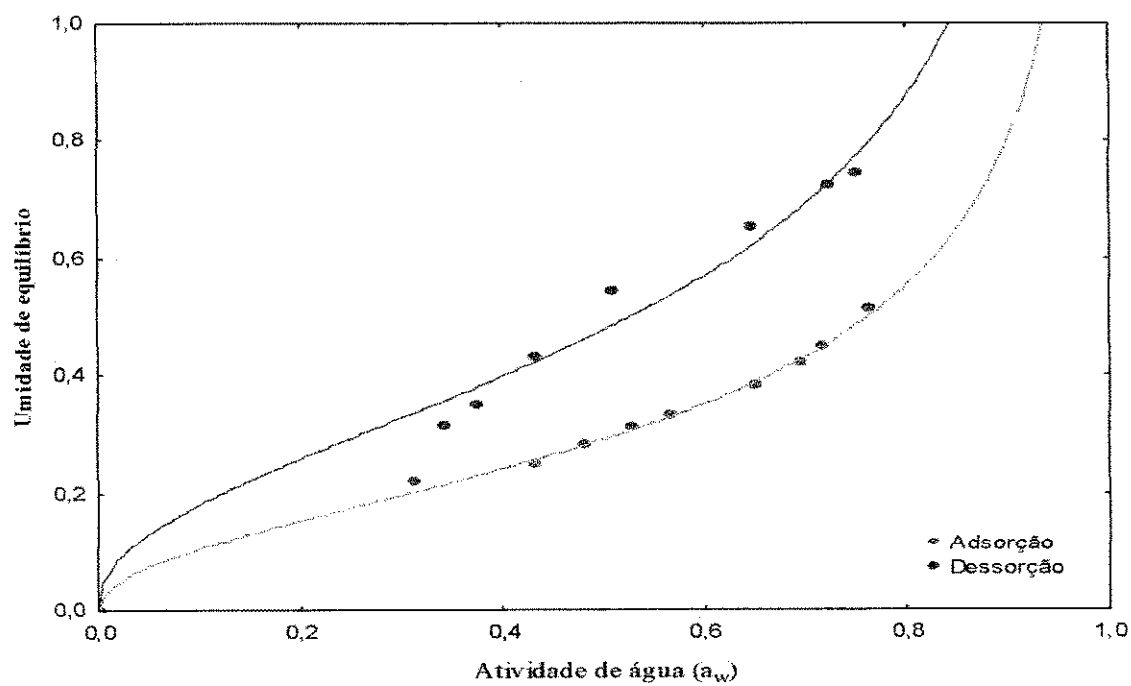
**Figura B.7.** Histerese da polpa de acerola na temperatura de 40 °C ajustada pelo modelo de BET



**Figura B.8.** Histerese da polpa de acerola na temperatura de 40 °C ajustada pelo modelo de GAB



**Figura B.9.** Histerese da polpa de acerola na temperatura de 40 °C ajustada pelo modelo de Halsey



**Figura B.10.** Histerese da polpa de acerola na temperatura de 40 °C ajustada pelo modelo de Oswin

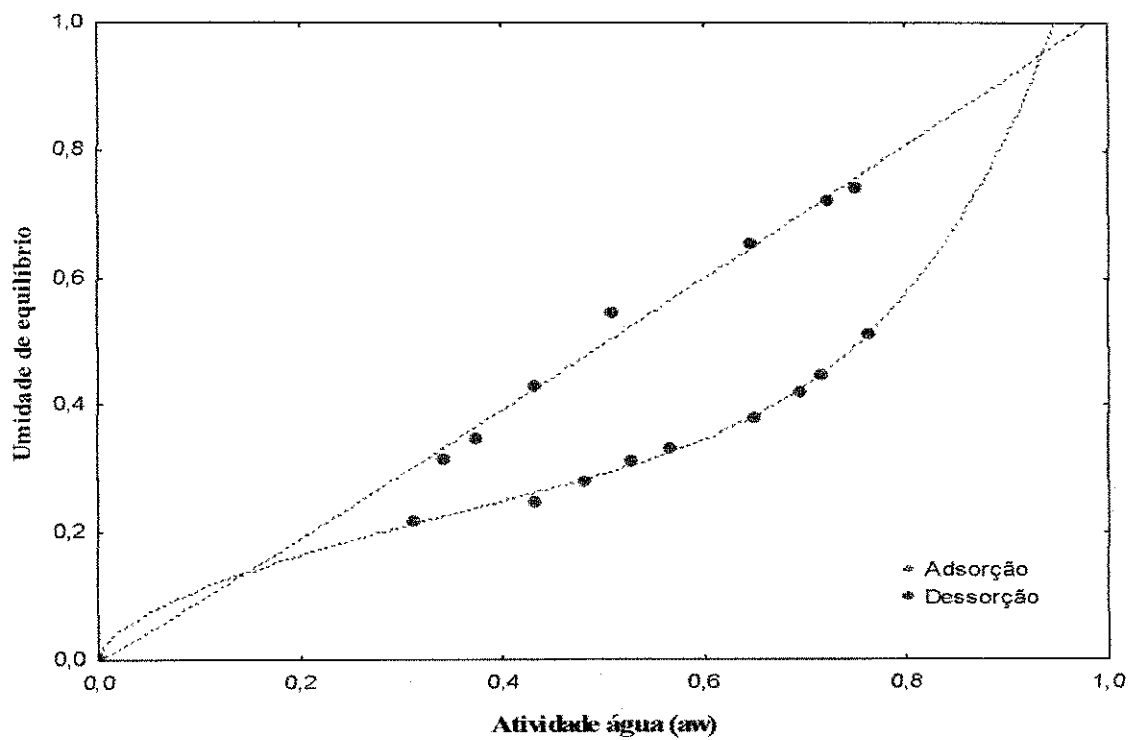


Figura B.11. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 40 °C ajustada pelo modelo de Peleg

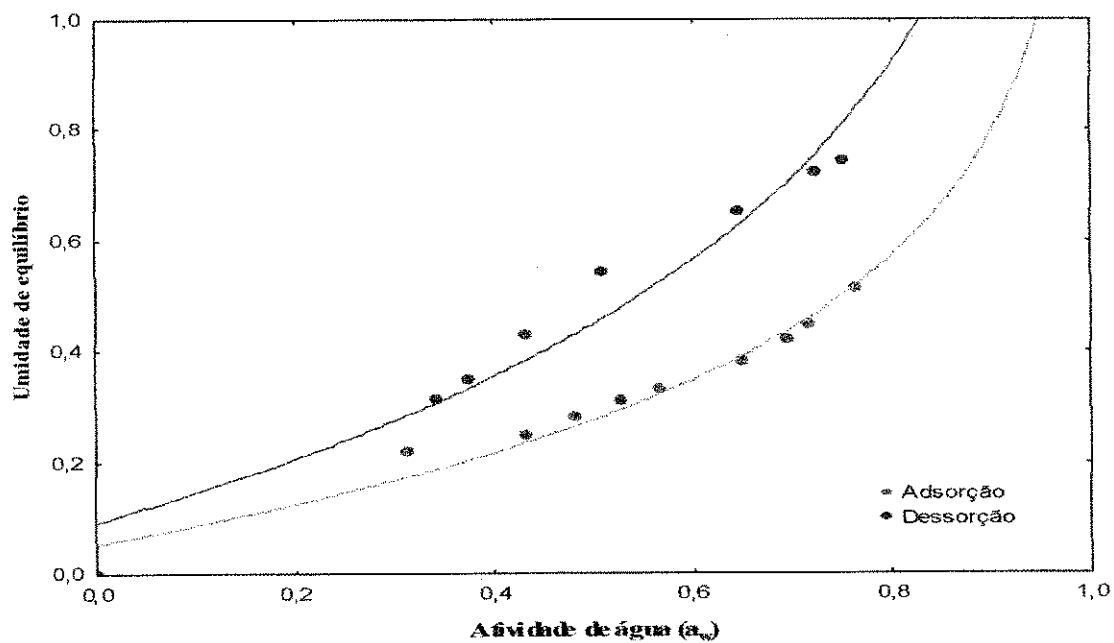


Figura B.12. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 40 °C ajustada pelo modelo de Smith

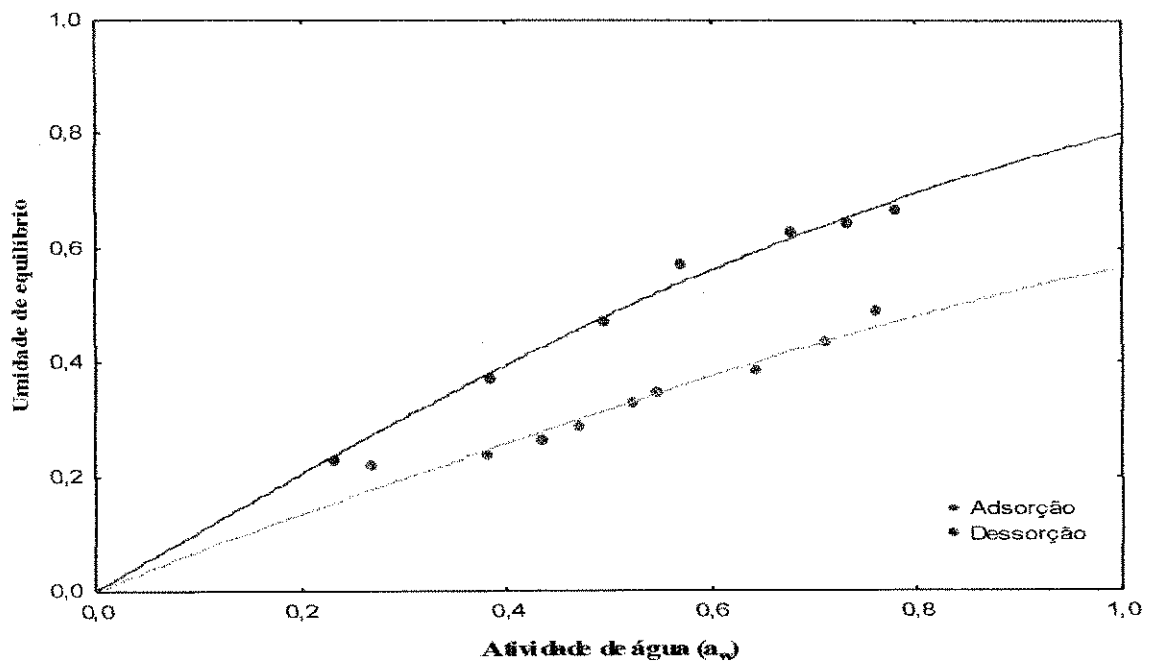


Figura B.13. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 50 °C ajustada pelo modelo de BET

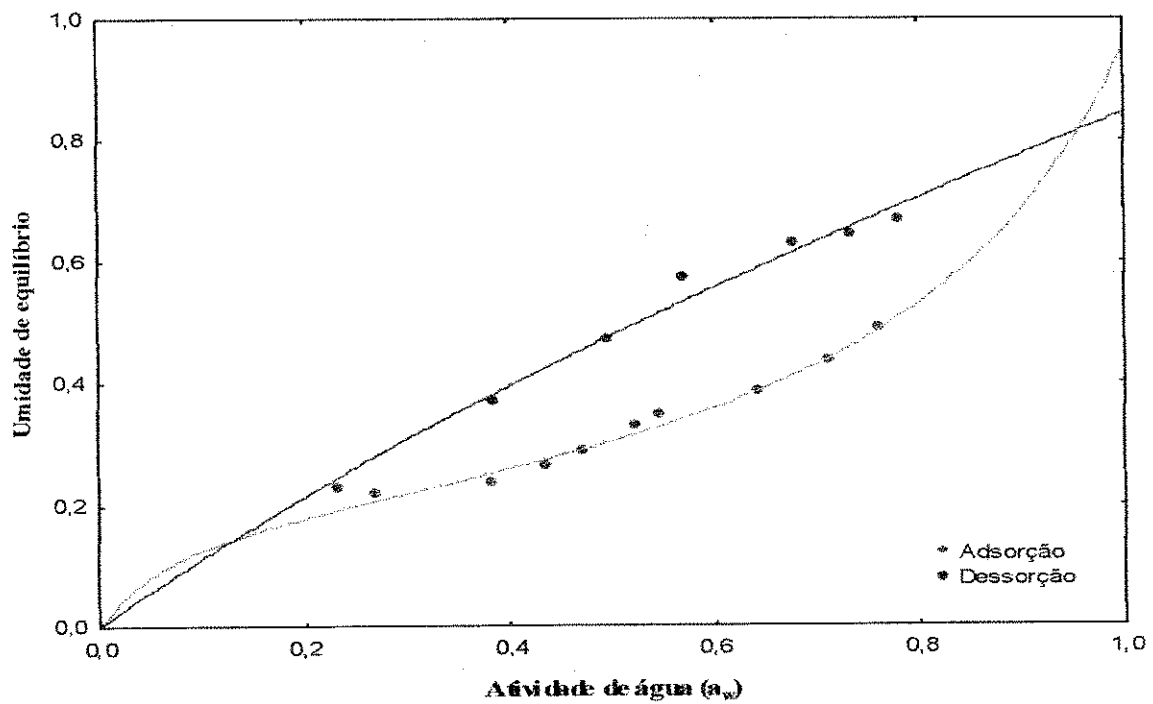


Figura B.14. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 50 °C ajustada pelo modelo de GAB

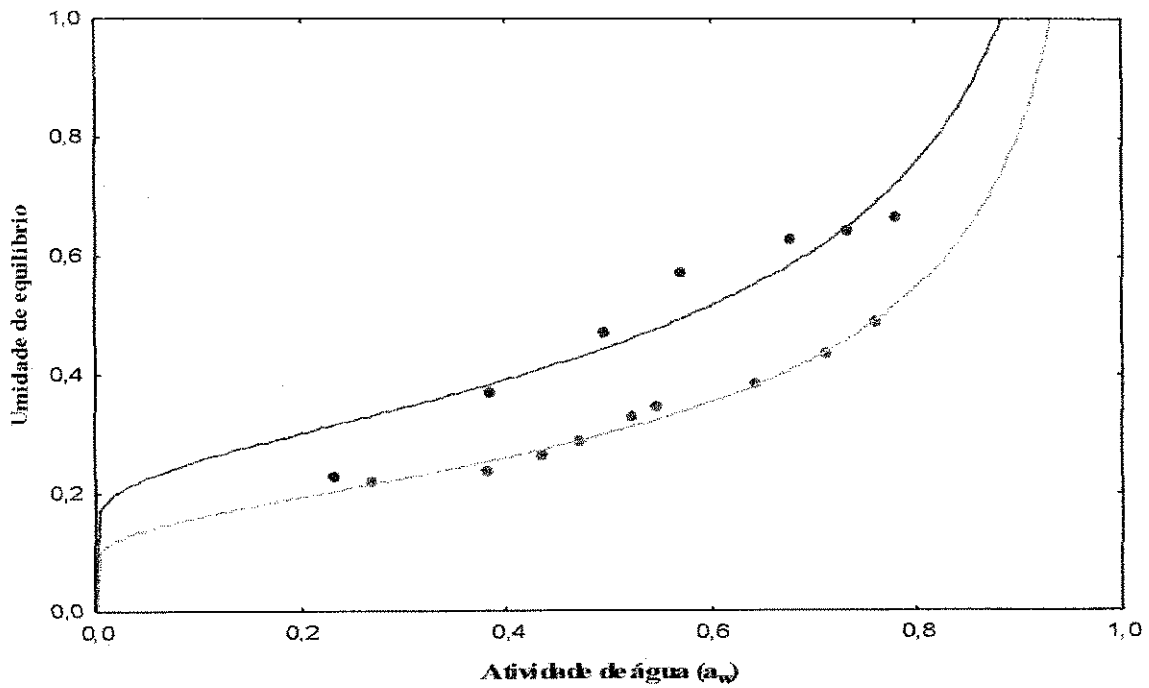


Figura B.15. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 50 °C ajustada pelo modelo de Halsey

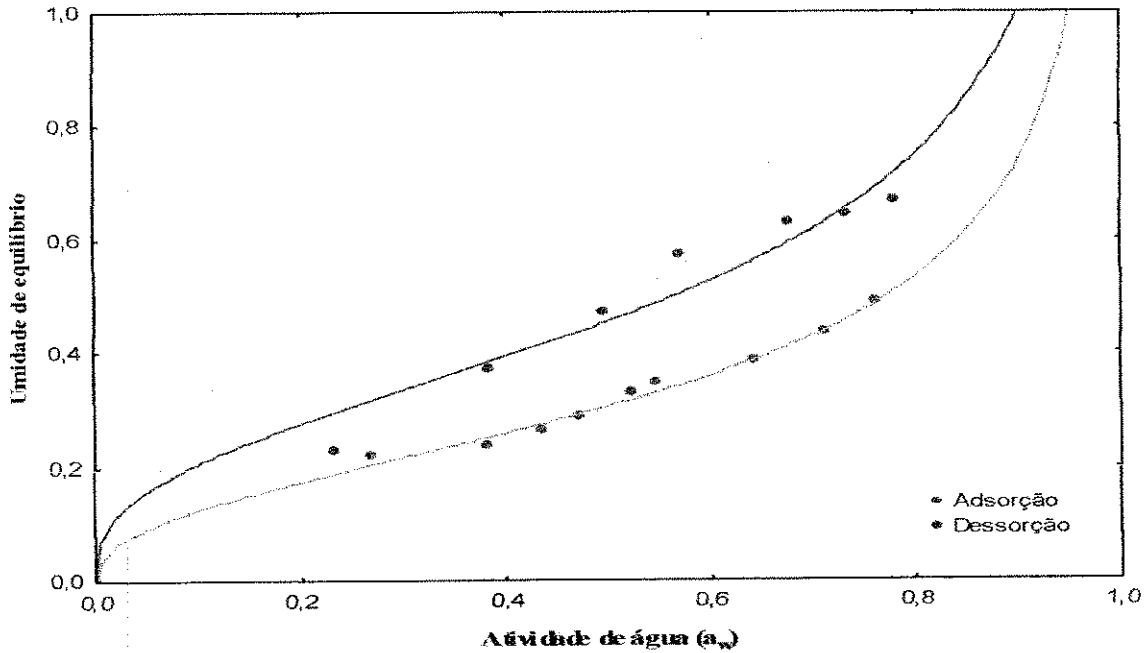


Figura B.16. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 50 °C ajustada pelo modelo de Oswin



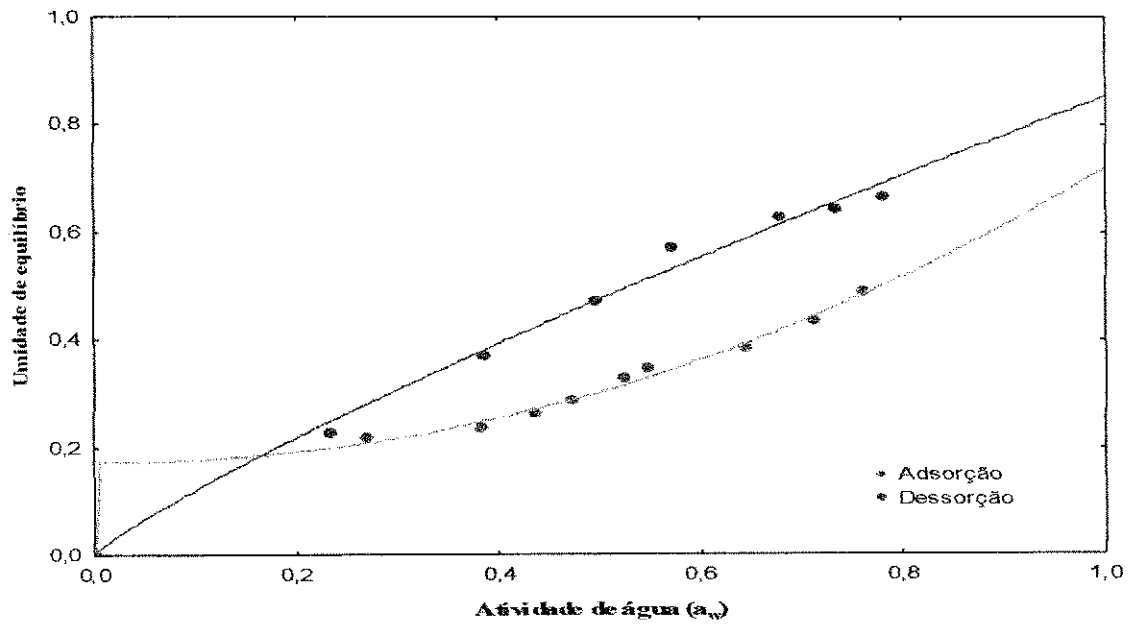


Figura B.17. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 50 °C ajustada pelo modelo de Peleg

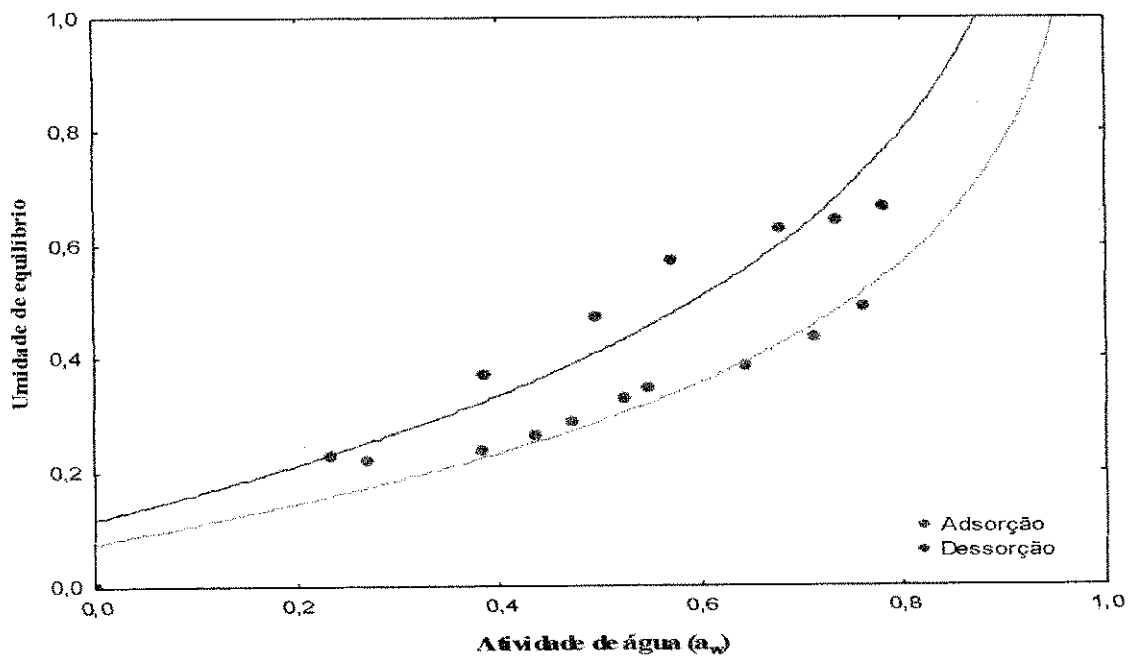
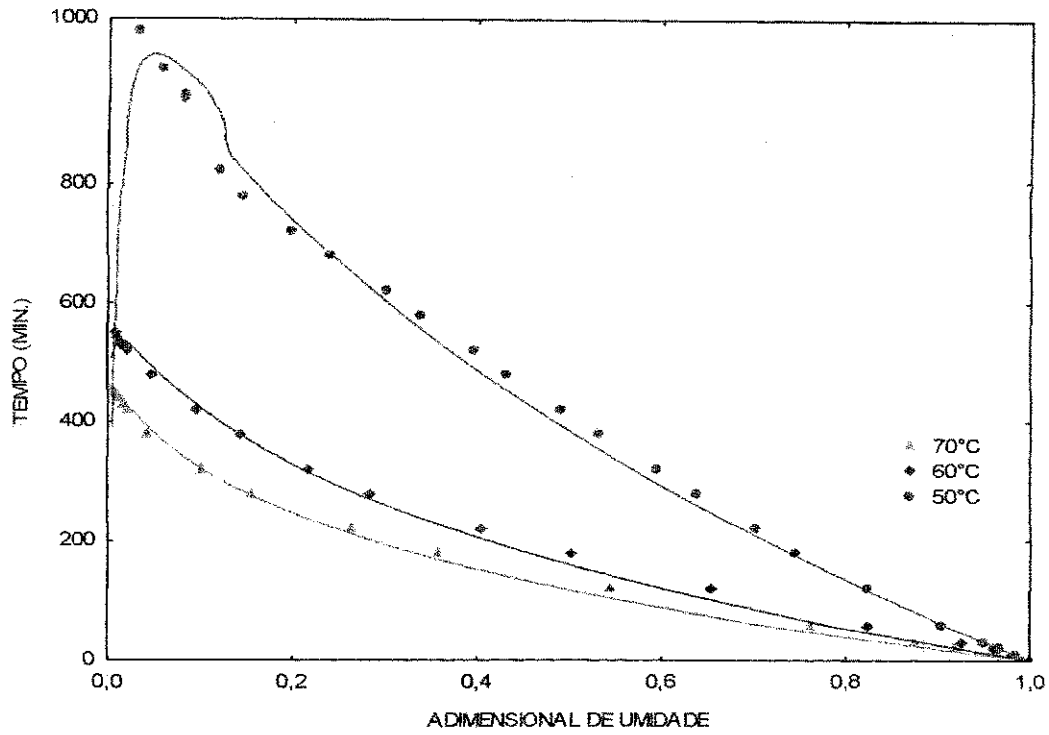
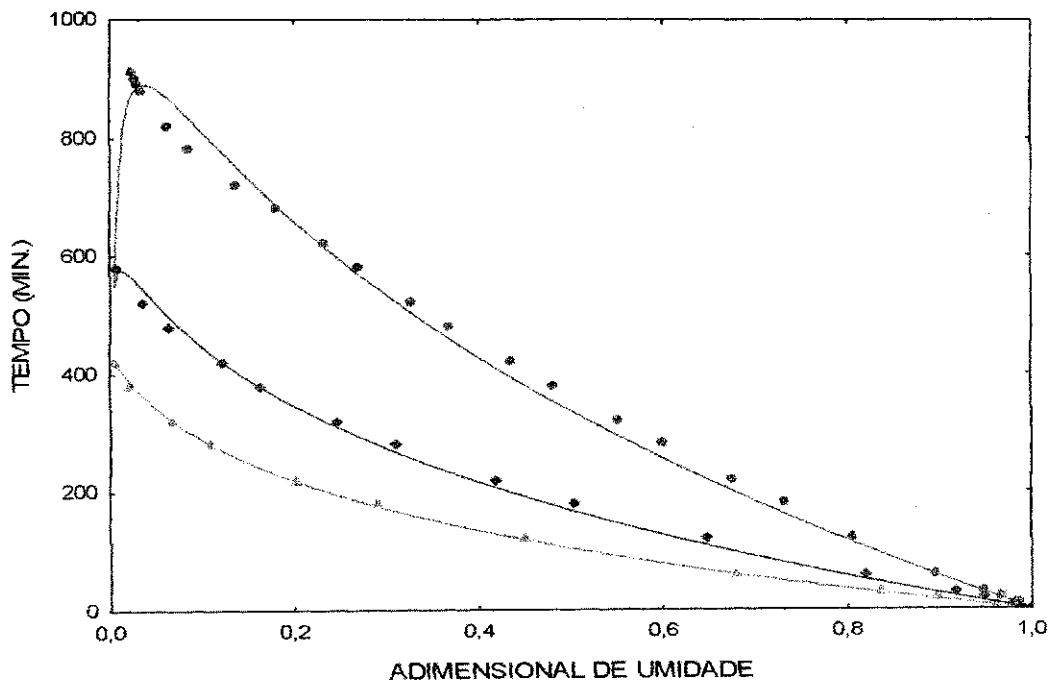


Figura B.18. Histerese da polpa de acerola na temperatura de 50 °C ajustada pelo modelo de Smith

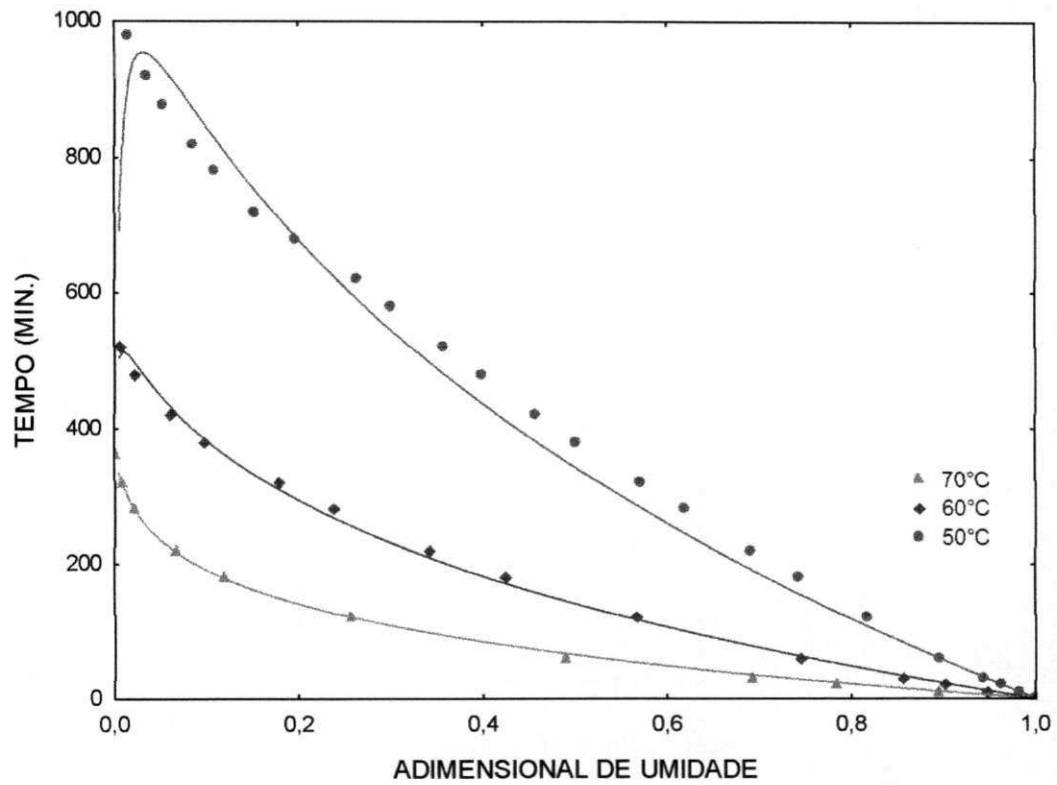
## **9. APÊNDICE C**



**Figura C.1.** Cinética de secagem dos frutos de acerola com velocidade do ar de 1,0 m s<sup>-1</sup> para o modelo de Thompson nas temperaturas estudadas



**Figura C.2.** Cinética de secagem dos frutos de acerola com velocidade do ar de 1,5 m s<sup>-1</sup> para o modelo de Thompson nas temperaturas estudadas



**Figura C.3.** Cinética de secagem dos frutos de acerola com velocidade do ar de  $2,0 \text{ m s}^{-1}$  para o modelo de Thompson nas temperaturas estudadas