



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS



**DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA E SECAGEM DE  
ABACAXI (*ANANÁS COMOSUS* (L.) MERRIL), VARIEDADE  
PÉROLA.**

Autor: Pedro Paulo Sanches da Silva Valente

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Miriam Dupas Hubinger

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos, da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção de título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

CAMPINAS

2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

V234d	Valente, Pedro Paulo Sanches da Silva Desidratação osmótica e secagem de abacaxi ( <i>Ananás Comosus</i> (L.) Merril), variedade pérola / Pedro Paulo Sanches da Silva Valente. -- Campinas, SP: [s.n.], 2007.
	Orientador: Miriam Dupas Hubinger Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos
	1. Abacaxi. 2. Cinética. 3. Secagem. 4. Desidratação osmótica. 5. Textura. 6. Cor. I. Hubinger, Miriam Dupas. II. Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

Título em inglês: Osmotic dehydration and air-drying of pineapple (*Anana Comosus* (L.)Merril),  
perola variety

Palavras-chave em inglês (Keywords): Pineapple, Kinetics, Drying, Osmotic dehydration,  
Textura, Color

Titulação: Mestre em Engenharia de Alimentos

Banca examinadora: Miriam Dupas Hubinger

Celso Costa Lopes

Flávio Luís Schmidt

Kil Jin Park

Data da defesa: 06/12/2007

Programa de Pós Graduação: Programa em Engenharia de Alimentos

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Miriam Dupas Hubinger  
**(Orientadora – DEA/ FEA/ UNICAMP)**

---

Prof. Dr. Celso Costa Lopes  
**(Membro – DEA/ FEA/ UNICAMP)**

---

Prof. Dr. Flávio Luís Schmidt  
**(Membro – DTA/ FEA/ UNICAMP)**

---

Prof. Dr. Kil Jin Park  
**(Membro – FEAGRI/ UNICAMP)**

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus  
pais, Murilo e Maria José, sempre tão presentes;  
também à minha tia Maria e  
à minha irmã, Bárbara;  
e por fim,  
à minha menina, Liz,  
minha alegria.*

*Em memória do meu amigo Lelê  
André Leadro De Battisti (1983-2006)  
Quero seguir o conselho do sábio que disse:  
há mais sabedoria em dia de luto  
do que em dia de festa de casamento (Eclesiastes 7.2)*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, Àquele que nos inunda de misericórdia, graça e dignidade.

À minha família pelo apoio e ânimo.

À Liz, sempre tão longe e sempre tão perto, pelo apoio e pelas ilustrações.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Miriam Dupas Hubinger pela orientação e à Christiane Ferrari pela tutoria.

Aos membros da banca, composta pelos professores Dr. Celso Lopes, Dr. Flávio Schimdt, Dr. Kil Park, que contribuíram com o enriquecimento do trabalho.

À Joyce e à Ana Maria que tanto me ajudaram no laboratório durante o desenvolvimento dos experimentos.

À Unicamp e à Faculdade de Engenharia de Alimentos que contribuíram para a minha formação profissional.

À Capes por ter fornecido o subsídio necessário para a realização deste trabalho.

Aos colegas de laboratório que de alguma forma contribuíram com este trabalho. Gustavo, Louise, Renata, Ana Paula Ito, Aninha, Leila, Michelle, Kelly, Lizi.

Aos colegas de turma pelo convívio e colaboração nos estudos. Michelle, Elizama, Marina, Letícia, Vanessa, Oswaldo, Diogo, Geraldo, Fábio.

Ao Márcio e à Maria que sempre me incentivaram.

À família Oliveira.

Aos meus amigos Luiz Gustavo e Matheus.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABELAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
NOMENCLATURA	xv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
1.1 Objetivos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Abacaxi	3
2.1.1 Aspectos Gerais	3
2.1.2 Composição química	4
2.2 Desidratação osmótica	7
2.2.1 Tipos de agente desidratante	9
2.2.2 Temperatura do processo	12
2.2.3 Tempo de processo	14
2.2.4 Concentração da solução	14
2.2.5 Agitação	15
2.3 Secagem	16
2.3.1 Temperatura	20
2.3.2 Velocidade do ar	21
2.3.3 Umidade relativa	22
2.4 Cinética de secagem	22
2.5 Atributos de qualidade do produto	26
2.5.1 Cor	27
2.5.2 Propriedades mecânicas	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Material	31
3.1.1 Matéria-prima	31
3.1.2 Sanitizante	32
3.1.3 Agente desidratante	32

3.1.4 Secador	33
3.2 Métodos	34
3.2.1 Caracterização da matéria-prima	34
3.2.2 Preparos da amostra	34
3.2.3 Desidratação osmótica	34
3.2.4 Secagem	37
3.3 Métodos analíticos	37
3.3.1 Determinação do peso da amostra	37
3.3.2 Determinação do teor de sólidos solúveis (°Brix)	38
3.3.3 Determinação do conteúdo de umidade	38
3.3.4 Determinação de atividade de água	39
3.3.5 Determinação de açúcares totais	39
3.3.6 Determinação de acidez	39
3.3.7 Determinação do potencial hidrogeniônico (pH)	39
3.3.8 Determinação de proteínas	39
3.3.9 Determinação de lipídeos	39
3.3.10 Determinação de cinzas	40
3.3.11 Determinação de fibras	40
3.3.12 Determinação de cor	40
3.3.13 Determinação das propriedades mecânicas	40
3.4 Experimentos	42
3.4.1 Planejamento experimental para determinação das melhores condições de tratamento osmótico	42
3.4.2 Experimento de secagem	43
3.5 Modelagem matemática	44
3.6 Análises estatísticas	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Caracterização da matéria-prima	45
4.2 Estudo da desidratação osmótica do abacaxi	46
4.2.1 Desidratação osmótica do abacaxi com solução de sacarose	46
4.2.2 Desidratação osmótica do abacaxi com solução de maltose	54

4.2.3 Comparação do efeito das diferentes soluções desidratantes no abacaxi	62
4.2.4 Melhores condições de tratamento osmótico do abacaxi para uma posterior secagem	64
4.3 Estudo da secagem do abacaxi	68
4.3.1 Taxa de secagem	68
4.3.2 Modelagem matemática	71
4.3.2.1 Modelo de Fick (difusão)	71
4.3.2.2 Modelos empíricos	76
4.3.3 Caracterização do produto seco	85
4.4 Avaliação da retenção de cor e das propriedades mecânicas do produto	89
4.4.1 Avaliação da variação de cor	89
4.4.2 Avaliação das propriedades mecânicas	94
5. CONCLUSÕES	97
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
APÊNDICE I	108
APÊNDICE II	110
APÊNDICE III	112
APÊNDICE IV	115

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Principais componentes do abacaxi	5
Tabela 2.2	Composição mineral e vitamínico do abacaxi	6
Tabela 3.1	Planejamento experimental	43
Tabela 3.2	Variáveis independentes codificadas	43
Tabela 3.3	Ensaio de secagem	44
Tabela 4.1	Caracterização física do abacaxi fresco	45
Tabela 4.2	Composição química centesimal do abacaxi fresco	45
Tabela 4.3	Características iniciais do abacaxi para o tratamento osmótico com solução de sacarose	46
Tabela 4.4	Respostas do planejamento fatorial completo na desidratação osmótica do abacaxi com solução de sacarose	47
Tabela 4.5	Análise dos efeitos de cada fator no modelo codificado para a perda de água da amostra numa solução de sacarose, calculado pelo SS Residual	48
Tabela 4.6	Análise de variância do modelo ajustado para a perda de água da amostra na solução de sacarose	48
Tabela 4.7	Análise dos efeitos de cada fator no modelo codificado para o ganho de sólidos da amostra numa solução de sacarose, calculado pelo SS Residual	51
Tabela 4.8	Análise de variância do modelo ajustado para o ganho de sólidos da amostra na solução de sacarose	52
Tabela 4.9	Características iniciais do abacaxi para o tratamento osmótico com solução de maltose	55
Tabela 4.10	Respostas do planejamento fatorial completo na desidratação osmótica do abacaxi com solução de maltose	55
Tabela 4.11	Análise dos efeitos de cada fator no modelo codificado para a perda de água da amostra numa solução de maltose, calculado pelo SS Residual	56

Tabela 4.12	Análise dos efeitos de cada fator no modelo codificado para a perda de água da amostra numa solução de maltose, calculado pelo Erro Puro	56
Tabela 4.13	Análise de variância do modelo ajustado para a perda de água da amostra em soluções com maltose	57
Tabela 4.14	Análise dos efeitos de cada fator no modelo codificado para o ganho de sólidos da amostra numa solução de maltose, calculado pelo SS Residual	59
Tabela 4.15	Análise de variância do modelo ajustado para o ganho de sólidos da amostra na solução de maltose	60
Tabela 4.16	Características iniciais da fruta no processo de secagem, quanto ao conteúdo de umidade (em base úmida e seca) e atividade de água.	68
Tabela 4.17	Difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) estimada pelo modelo de Fick, seu coeficiente de determinação e erro relativo médio, para a secagem de abacaxi <i>in natura</i> e pré-tratado	72
Tabela 4.18	Valores estimados da constante K do modelo Exponencial, coeficiente de determinação e erro relativo médio, para os ensaios de secagem de abacaxi <i>in natura</i> e pré-tratado	76
Tabela 4.19	Valores estimados das constantes K e “a” do modelo de Henderson e Pabis, coeficiente de determinação e erro relativo médio, para os ensaios de secagem de abacaxi <i>in natura</i> e pré-tratado	79
Tabela 4.20	Valores estimados da constante K do modelo de Page, e coeficiente de determinação e erro relativo médio, para os ensaios de secagem de abacaxi <i>in natura</i> e pré-tratado	82
Tabela 4.21	Características do produto desidratado, quanto ao conteúdo de umidade (em base úmida e seca) e atividade de água, para cada ensaio realizado	86
Tabela 4.22	Parâmetros de cor ( $L^*$ , $a^*$ e $b^*$ ) das amostras <i>in natura</i> e pré-tratada utilizadas nos ensaios de secagem	89

Tabela 4.23	Valores do croma C* e do tom H* para os diferentes ensaios de secagem realizados	93
Tabela 4.24	Valores médios da tensão na ruptura para os diferentes ensaios de secagem, normalizada em relação à fruta fresca.	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Abacaxi variedade Pérola	4
Figura 2.2	Transferência de massa durante a desidratação osmótica	8
Figura 2.3	Estrutura molecular da sacarose	11
Figura 2.4	Estrutura molecular da maltose	12
Figura 2.5	Curva de secagem: evolução do tempo (t), do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T) e da taxa de secagem (dX/dt)	18
Figura 3.1	Abacaxi ( <i>Ananás comosus</i> (L.) Merrill) variedade Pérola	31
Figura 3.2	Geometria do abacaxi utilizado no processamento	32
Figura 3.3	Secador convectivo tipo bandeja - escala piloto, utilizado no experimento	33
Figura 3.4	Foto do equipamento utilizado no processo de desidratação osmótica	35
Figura 4.1	Desvio relativo para a perda de água na desidratação osmótica com soluções de sacarose	49
Figura 4.2	Superfície de resposta para a perda de água em função da temperatura e concentração, para a desidratação com soluções de sacarose	50
Figura 4.3	Desvio relativo para o ganho de sólidos na desidratação osmótica com soluções de sacarose	53
Figura 4.4	Superfície de resposta para o ganho de sólidos em função da temperatura e concentração, para a desidratação com soluções de sacarose	54
Figura 4.5	Desvio relativo para a perda de água na desidratação osmótica com soluções de maltose	58
Figura 4.6	Superfície de resposta para a perda de água em função da temperatura e concentração, para a desidratação com soluções de maltose	59
Figura 4.7	Desvio relativo para o ganho de sólidos na desidratação osmótica com soluções de maltose	61

Figura 4.8	Superfície de resposta para o ganho de sólidos em função da temperatura e concentração, para a desidratação com soluções de maltose	62
Figura 4.9	Relação GS/PA para as amostras de abacaxi desidratadas osmoticamente em soluções de sacarose, de acordo com os modelos matemáticos propostos (equação 4.1 e 4.2)	66
Figura 4.10	Relação GS/PA para as amostras de abacaxi desidratadas osmoticamente em soluções de maltose, de acordo com os modelos matemáticos propostos (equação 4.3 e 4.4)	67
Figura 4.11	Efeito da temperatura na taxa de secagem do abacaxi <i>in natura</i> com velocidade do ar de 1,5 m/s	69
Figura 4.12	Efeito da temperatura na taxa de secagem do abacaxi desidratado osmoticamente em soluções de sacarose com velocidade do ar de 1,5 m/s	70
Figura 4.13	Efeito da temperatura na taxa de secagem do abacaxi desidratado osmoticamente em soluções de maltose com velocidade do ar de 1,5 m/s	70
Figura 4.14	Ajuste ao modelo de Fick dos dados experimentais de secagem de abacaxi <i>in natura</i> , para as diferentes temperaturas de secagem	73
Figura 4.15	Ajuste ao modelo de Fick dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose, para as diferentes temperaturas de secagem	74
Figura 4.16	Ajuste ao modelo de Fick dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de maltose, para as diferentes temperaturas de secagem	74
Figura 4.17	Ajuste ao modelo Exponencial dos dados experimentais de secagem de abacaxi <i>in natura</i> , para as diferentes temperaturas de secagem	77
Figura 4.18	Ajuste ao modelo Exponencial dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose, para as diferentes temperaturas de secagem	78

Figura 4.19	Ajuste ao modelo Exponencial dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de maltose, para as diferentes temperaturas de secagem	78
Figura 4.20	Ajuste ao modelo de Henderson e Pabis dos dados experimentais de secagem de abacaxi <i>in natura</i> , para as diferentes temperaturas de secagem	80
Figura 4.21	Ajuste ao modelo de Henderson e Pabis dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose, para as diferentes temperaturas de secagem	81
Figura 4.22	Ajuste ao modelo de Henderson e Pabis dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de maltose, para as diferentes temperaturas de secagem	81
Figura 4.23	Ajuste ao modelo de Page dos dados experimentais de secagem de abacaxi <i>in natura</i> , para as diferentes temperaturas de secagem	83
Figura 4.24	Ajuste ao modelo de Page dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose, para as diferentes temperaturas de secagem	84
Figura 4.25	Ajuste ao modelo de Page dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de maltose, para as diferentes temperaturas de secagem	84
Figura 4.26	Amostras de abacaxi <i>in natura</i> e secas, submetidas a diferentes condições de secagem	88
Figura 4.27	Representação gráfica dos valores de luminosidade das amostras <i>in naturas</i> e pré-tratadas secas em diferentes condições de temperatura	90
Figura 4.28	Representação gráfica dos valores dos parâmetros $a^*$ e $b^*$ das amostras <i>in naturas</i> e pré-tratadas secas em diferentes condições de temperatura	91

## NOMENCLATURA

a*	parâmetro de cromaticidade (+a* = vermelho e -a*=verde)
A	área (m <sup>2</sup> )
ANOVA	análise de variância
Aw	atividade de água
AT	teor de açúcares totais do produto (%)
b*	parâmetro de cromaticidade (+b*=amarelo e -b*=azul)
C*	croma (adimensional)
C	variável de concentração da solução nos modelos 4.1-4.4
dx/dt	taxa de secagem
D	coeficiente de difusividade (m <sup>2</sup> /s)
D <sub>ef</sub>	difusividade efetiva (m <sup>2</sup> /s)
DOS	desidratação osmótica com soluções de sacarose
DOM	desidratação osmótica com soluções de maltose
F	força (N)
H	altura (m)
H*	tom (adimensional)
K	constante de secagem dos modelos 2.4-2.7 (s <sup>-1</sup> )
L	espessura do produto (m)
L	linear
L*	luminosidade (L*=0 preto e L*=100 branco)
m	massa do produto (g)
MQ	média quadrática
n	número de termos da série (adimensional)
GL	grau de liberdade
GS	ganho de sólidos do produto desidratado (%)
GS/PA	relação de ganho de sólidos por perda de água (adimensional)
p	significância estatística
P	peso da amostra (g)
PA	perda de água do produto desidratado (%)

PP	perda de peso do produto desidratado (%)
Q	quadrático
R <sup>2</sup>	coeficiente de determinação
SQ	soma quadrática
t	tempo (s)
T	temperatura (°C), variável de temperatura da solução nos modelos 4.1-4.4
UR	umidade relativa do ar(%)
VSS	variação do teor de sólidos solúveis (%)
X	teor de umidade do produto (%)
Y	adimensional de umidade
$\sigma_H$	tensão de Hencky (Pa)
$\varepsilon_H$	deformação (%)

*Sub-índices*

bu	base umida
bs	base seca
f	final
o	inicial
t	referente ao tempo
$\infty$	equilíbrio

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estudar a secagem de pedaços de abacaxi (*Ananás comosus* (L.) Merrill) variedade Pérola, com e sem pré-tratamento osmótico, utilizando um secador de bandejas convectivo. Para a definição das melhores condições de desidratação osmótica para o abacaxi foram realizados dois planejamentos fatoriais completos  $2^2$  com 4 pontos axiais e 3 repetições do ponto central, um para a sacarose como agente osmótico e outro similar para a maltose, tendo como variáveis independentes a concentração de soluto na solução osmótica (40 a 60°Brix) e a temperatura (30 a 50°C), enquanto o tempo de processo foi estabelecido em 2 horas e a agitação em 100 rpm. Os pedaços de abacaxi na dimensão de 20 x 30 x 10 mm foram tratados osmoticamente segundo o planejamento experimental acima, no qual foram avaliadas as perdas de água e de massa, incorporação de sólidos na fruta e a atividade de água. Para o tratamento osmótico do abacaxi, a solução hipertônica de sacarose a 40°Brix e temperatura de 35°C durante o processo foi escolhida como a mais adequada; já para o tratamento osmótico com maltose a concentração de solução de 50°Brix e temperatura de 30°C mostraram-se mais eficientes na relação ganho de sólidos por perda de água da fruta. Definida as condições de pré-tratamento do abacaxi, a secagem foi realizada para a fruta com e sem pré-tratamento osmótico nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, com velocidade do ar constante a 1,5 m/s para todos os ensaios. Os valores de difusividade efetiva foram calculados de acordo com o modelo de Fick e variaram entre  $5,82 \times 10^{-10}$  e  $1,44 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, enquanto o modelo de Page foi o que melhor predisse a cinética de secagem do abacaxi. Em relação à qualidade do produto final, as frutas secas pré-tratadas osmoticamente apresentaram uma menor alteração da cor e uma dureza final menos acentuada, destacando-se as amostras tratadas com soluções de maltose.

*Palavras-chave: Abacaxi, Cinética, Secagem, Desidratação Osmótica, Textura, Cor.*

## ABSTRACT

The purpose of this work was to study the drying process of pineapple peaces (*Ananás comosus* (L.) Merrill) Pearl (Pérola) variety, with and without pre-osmotic treatment, using a tray dryer with convective. To define the best conditions for pineapple osmotic dehydration two complete factorial 2<sup>2</sup> planning methods were used with four axial points and three repetitions of the central point, one for sucrose as the osmotic agent and a similar one for maltose, with the solute concentration in the osmotic solution (40 to 60° Brix) and the temperature variation (30 to 50°C) as independent variables, while the process time was established as 2 hours and the shaking speed as 100 rpm. The peaces of pineapple, dimensioned 20x30x10 mm, were treated osmotically following the experimental arrangement quoted above, in which were analyzed the water and weight lost, the fruit's solid incorporation and the water activity. For the pineapple osmotic treatment, the hypertonic sucrose solution of 40°Brix and temperature at 35°C was chosen as the most adequate, however for the maltose osmotic treatment the solution concentration of 50°Brix and temperature at 30°C showed better efficiency in the fruit graph of solid retention by water loss. Once defined the pineapple's best pretreatment conditions, the dehydration process was applied with and without the pre-osmotic treatment with temperatures at 50, 60 and 70°C, but with constant air speed of 1,5m/s through every test. The effective diffusivity values were calculated according to the Fick's model and the results varied between  $5,82 \times 10^{-10}$  and  $1,44 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s, while the Page model was the one that better described the drying kinetics of pineapples. The dry pineapple with pre-osmotic treatment showed less overall color change and a less pronounced final hardness, and the best results were observed for the samples treated with maltose solution.

Key-words: Pineapple, Kinetics, Drying, Osmotic Dehydration, Texture, Color.

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de frutas tropicais. Entretanto, devido à alta perecibilidade das frutas, o país sofre com as perdas pós-colheita, decorrentes da abundância de colheita, da sazonalidade da produção e da distância dos mercados consumidores, adicionados ainda à ausência de tratamentos e manuseio pós-colheita eficientes, dificultando o escoamento da produção e seu consumo a tempo. Estima-se que a perda pós-colheita de frutas e hortaliças no Brasil esteja entre 30 e 40% da produção total (LOMBADI, 2003), onerando assim o preço dos produtos agrícolas e diminuindo a quantidade de exportação e industrialização de tais alimentos.

As frutas tropicais são ricas em vitaminas e minerais, e juntamente com suas características sensoriais (sabor, aroma, cor, textura), são altamente apreciadas.

Segundo estimativas da FAO, o Brasil encontra-se entre os maiores produtores de abacaxi do mundo, atrás apenas da Tailândia e Filipinas (FAO, 2004). O abacaxi por longo tempo tem sido a fruta não cítrica mais popular nos países tropicais e subtropicais, principalmente pelo seu atrativo sabor e aroma, contendo uma grande diversidade de vitaminas e sais minerais, com destaque para a vitamina A e C, e para o potássio.

Nas últimas décadas, muitos estudos foram realizados em relação à secagem de frutas como um método eficiente de conservação. Um pouco mais recente têm sido o estudo da desidratação osmótica, porém não menos intenso, mostrando-se um processo eficiente na remoção de água e preservação das propriedades nutricionais e sensoriais do alimento devido às baixas temperaturas utilizadas, podendo também ser empregada como uma etapa preliminar para a secagem.

O processo de secagem, pelo fato de envolver temperaturas consideravelmente altas para as frutas por um longo período, causa alterações na composição dos alimentos, perda de nutrientes e modificações bastante significativas na estrutura e cor destes. Muitos autores têm sugerido a utilização da desidratação osmótica como um pré-tratamento para a

secagem, por se mostrar um processo eficiente para a melhora da qualidade do produto final (CHIRALT *et. al.*, 2001; TORREGGIANI e BERTOLO, 2001; MASTRANTONIO *et. al.*, 2006), diminuindo a perda de nutrientes voláteis e sensíveis a altas temperaturas durante a secagem, resultando também na obtenção de uma textura mais próxima do produto fresco.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho foi estudar a desidratação osmótica e secagem de abacaxi, avaliando a cinética de secagem e a qualidade do produto final; enquanto os objetivos específicos foram:

- Estudar o comportamento de dois diferentes agentes osmóticos, sacarose e maltose, na desidratação osmótica e a influência de duas variáveis no processo: concentração do soluto na solução osmótica e temperatura.
- Definir a melhor condição para a desidratação osmótica como pré-tratamento, para a sacarose e maltose como agentes osmóticos.
- Avaliar a cinética de secagem do abacaxi pré-desidratado osmoticamente, comparando-a à secagem do mesmo sem pré-tratamento.
- Testar modelos da literatura com os dados de cinética de secagem.
- Avaliar a qualidade final do abacaxi seco, com ou sem pré-tratamento, através da avaliação da cor e das propriedades mecânicas do mesmo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Abacaxi

#### 2.1.1 Aspectos Gerais

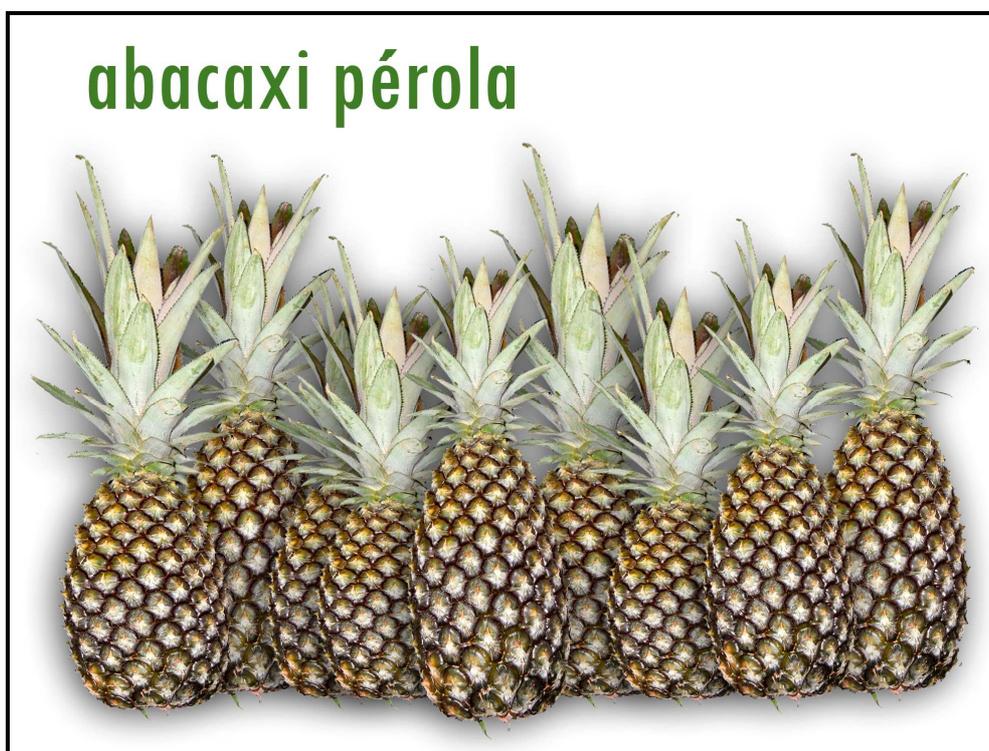
O abacaxizeiro (*Ananás comosus* (L.) Merrill) é uma planta originária da América tropical e subtropical, e provavelmente do Brasil, a partir de onde se disseminou para a América Central e Caribe muito antes da chegada dos europeus. O abacaxi foi levado pelos espanhóis para a Europa com o nome de *pinã* (analogia com os estróbilos de pinheiro), como prova da exuberância exótica das terras descobertas a oeste do Atlântico, e logo o abacaxi cruzou os mares do mundo pelas caravelas, passando a ser cultivado na África e Ásia, onde se propagou por ser um fruto de fácil dispersão e cultivo (MEDINA, 1987).

A palavra abacaxi em português é oriunda do tupi-guarani *ibacaxi*, composta de *ibá* (fruta) e *caxicati* (cheirosa), já a palavra ananás (outra designação para abacaxi) é oriunda também do tupi-guarani *nanã* (fruta saborosa).

O ananás ou abacaxi, nomes pelos quais se conhecem tanto a planta como o fruto, é uma planta perene, monocotiledônea, pertencente à família *Bromeliaceae*, que contém aproximadamente 1900 espécies de plantas herbáceas. O fruto é composto, constituído de 100 a 200 frutos simples (frutinhos) que evoluem individualmente, inseridos sobre uma haste central em disposição espiralada e intimamente soldados entre si, e no ápice há um tufo de folhas, ou coroa (MEDINA, 1987). A forma do fruto é cilíndrica ou cônica, e sua massa varia entre 1 a 3 Kg.

O Brasil está entre os maiores produtores de abacaxi do mundo, atrás apenas da Tailândia e Filipinas, com uma produção de 1,4 milhões de toneladas ou 10 % da produção mundial em 2004 (FAO, 2007). As duas principais variedades de abacaxi produzidas no país são: Smooth Cayenne e Pérola, sendo que a primeira variedade é encontrada apenas nos estados de São Paulo e Minas Gerais, enquanto o abacaxi Pérola é cultivado em todo o

país e responsável por 74% da produção nacional, sendo destinado ao consumo *in natura*, por ser mais doce e menos ácido. A variedade Smooth Cayenne, é mais resistente a choques mecânicos, e por isso destinada à exportação e à indústria, para o processamento de suco e compotas. Destaca-se o estado de Minas Gerais como o maior produtor de abacaxi variedade Smooth Cayenne, e os estados da Paraíba e Pará, como grandes produtores da variedade Pérola (Figura 2.1)(ALMEIDA *et. al.*, 2004).



**Figura 2.1 – Abacaxi variedade Pérola.**

### **2.1.2 Composição Química**

A composição química das frutas varia de acordo com a época do ano em que são produzidas. A colheita de abacaxi é realizada ao longo do ano inteiro, porém a melhor safra ocorre no verão, de novembro a fevereiro, apresentando um fruto com maior teor de açúcares e menos ácido (BLEINROTH, 1987).

O abacaxi é uma fruta não climatérica, ou seja, durante a colheita, a fruta deve estar no estado ótimo de amadurecimento para consumo, pois após sua colheita o abacaxi perde a capacidade de amadurecer e começa a apresentar uma diminuição na taxa respiratória. Ainda segundo BLEINROTH (1987), a variedade Pérola apresenta as seguintes características químicas, variando segundo o estado de maturação: pH variando entre 3,6 a 4,15; teor de sólidos solúveis entre 11,6 e 16,2 °Brix; acidez total entre 0,35 e 0,81% (expressa em ácido cítrico); açúcares totais variando entre 9,73 a 15,01% e o teor de açúcares redutores entre 2,82 e 5,06%. Dos açúcares existentes, 66% são de sacarose e 34% de açúcares redutores (glicose e frutose). A tabela 2.1 apresenta os principais componentes do abacaxi.

**Tabela 2.1 – Principais componentes do abacaxi.**

<b>Composição centesimal</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor por 100g</b>
Umidade	g	87,39
Energia	kcal	45
Proteínas	g	0,65
Carboidratos	g	11,38
Lipídeos	g	0,23
Cinzas	g	0,35
Fibra	g	1,23

Fonte: Tabela Brasileira de Composição de Alimentos, USP, 2004.

A bromelina, uma enzima proteolítica, é encontrada abundantemente no abacaxi. Sua grande aplicação industrial e medicinal, por suas propriedades digestivas e antiinflamatórias, conferem à enzima alto valor comercial.

Apesar do abacaxi “in natura” apresentar baixo valor energético, a fruta é bastante nutritiva, como uma boa fonte de vitaminas A e B1, contendo também, quantidades moderadas de vitamina C e um pouco de vitamina B2. O conteúdo de sais

minerais do abacaxi está em torno de 0,35%, sendo o teor de potássio especialmente alto, quando comparado com os outros minerais, conforme mostra a tabela 2.2 (SILVA, 1980).

**Tabela 2.2 – Composição mineral e vitamínica do abacaxi.**

<b>Substância</b>	<b>Quantidade (mg/100g)</b>
Cálcio	22
Magnésio	18
Manganês	1,6
Fósforo	13
Ferro	0,3
Sódio	<0,4
Potássio	131
Vitamina A	*
Vitamina B1	0,17
Vitamina B2	0,02
Vitamina C	*

Fonte: TACO, UNICAMP, 2006.

\* Análises sendo reavaliadas.

De acordo com os valores registrados em literatura, por diferentes autores (BLEINROTH, 1987; VINCI *et al.*, 1995 e HERNADEZ *et al.*, 2006), a quantidade de vitamina C (ácido ascórbico) no abacaxi, variedades Smooth Cayenne e Pérola, varia entre 25 a 40 mg/100g de fruta.

A coloração amarela da polpa do abacaxi é resultado da presença de carotenos e xantofilas, enquanto a coloração verde e amarelo-alaranjado da casca do fruto é resultado da presença de clorofilas, carotenos e flavonas (RIBEIRO, 1973).

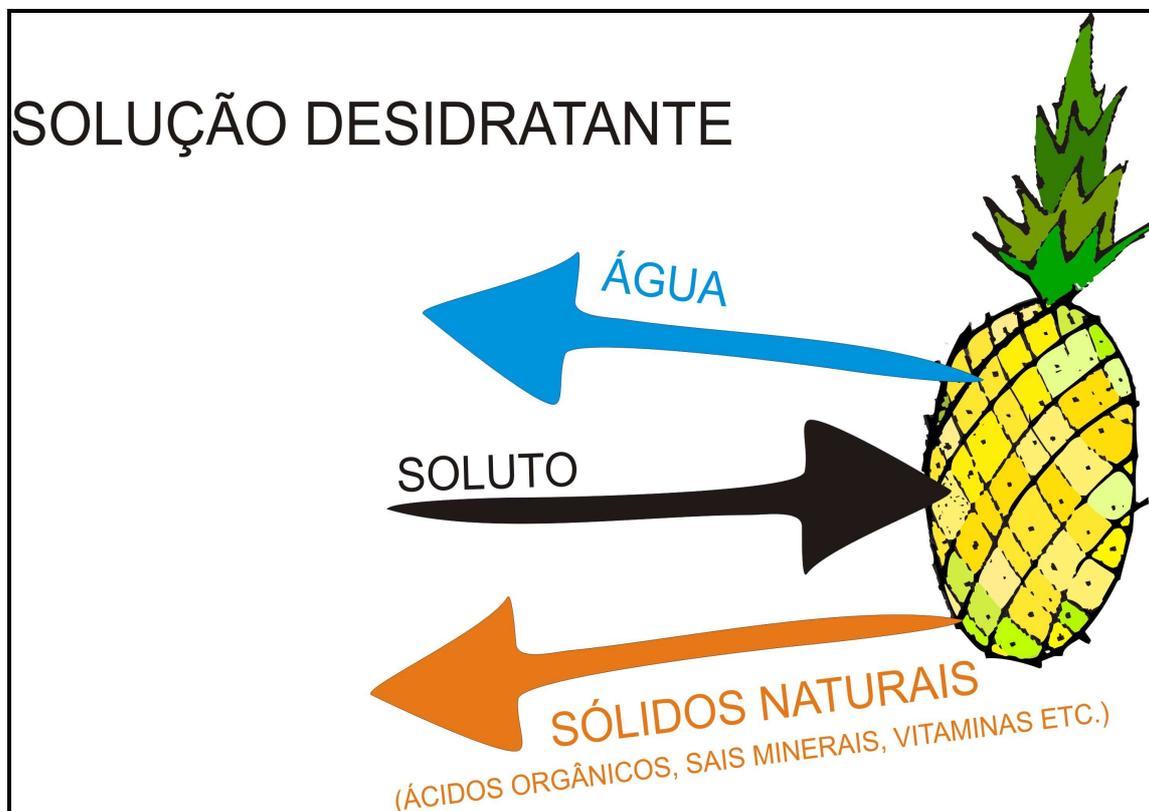
## 2.2 Desidratação osmótica

A água, como um dos principais componentes dos alimentos, tem uma relação direta com características e durabilidade dos produtos alimentícios, resultado de mudanças físico-químicas e biológicas sofridas pelos mesmos. A retirada de água do alimento consiste numa das maneiras mais clássicas de conservação dos alimentos, uma vez que reduz o crescimento de microorganismo e impede as reações bioquímicas que dependem da umidade. Porém a atividade de água indica melhor que o conteúdo de umidade a estabilidade do alimento. Bactérias patogênicas não crescem em atividade de água inferior a 0,85, enquanto que abaixo da atividade de água crítica nenhum microorganismo cresce. Para a maioria dos alimentos esse valor crítico está entre 0,6 e 0,7 (RAHMAN, 2005).

Um dos métodos de conservação dos alimentos é a desidratação osmótica, que consiste na remoção da água do alimento (inteiro ou em pedaços), por imersão numa solução hipertônica de um ou mais solutos (agente desidratante), por um certo tempo e temperatura. Visto que a solução terá uma alta pressão osmótica e conseqüentemente baixa atividade de água, ocorrerá remoção de água do alimento para a solução. A parede celular se comporta como uma membrana semipermeável permitindo o fluxo de água, porém a membrana é parcialmente seletiva, havendo sempre alguma difusão do soluto da solução para o alimento e vice-versa (JAYARAMAN e GUPTA, 1995).

Durante o processo de desidratação, alguns solutos presentes no xarope podem não migrar efetivamente para as células das frutas e vegetais, mas tão somente penetrar nos espaços intracelulares e ali se alojar, em razão das alterações na permeabilidade e seletividade da estrutura do tecido celular devido à maturação, condições de estocagem e pré-tratamentos químicos sofridos pela fruta. Essa impregnação do soluto no alimento, de certo modo, possibilita a formulação de produtos funcionais e favorece a preservação sensorial e nutricional dos mesmos, sendo um diferencial dentre os demais processos de desidratação.

A figura 2.2 ilustra a transferência de massa durante o processo de desidratação osmótica.



**Figura 2.2 – Transferência de massa durante a desidratação osmótica.**

A desidratação osmótica é bastante eficiente na remoção de umidade de frutas e hortaliças, podendo ter seu peso reduzido em até 50% e perda de água de até 70% ao término do processo, sendo este geralmente limitado e controlado pelo ganho simultâneo de solutos da solução desidratante (RAOULT-WACK, 1994).

Uma das vantagens deste processo é a utilização de baixa temperatura, minimizando a injúria térmica para a cor e o *flavor* do produto. Há também preservação da textura e retenção de vitaminas (TORREGGIANI, 1993). Em contrapartida, no processo de desidratação osmótica ocorre a perda de alguns sólidos naturais do alimento, como açúcares, minerais, entre outros nutrientes, e ganho de sólidos elevado, afetando o perfil nutricional do alimento (RAOULT-WACK, 1994).

A conservação de frutas pelo método de desidratação osmótica seguida de secagem convectiva pode significar numa redução do consumo de energia de até 30% em relação à secagem exclusivamente convectiva (LENART, 1996). Isso se deve ao uso de temperaturas mais baixas ao longo do processo de desidratação osmótica, uma vez que a água pode ser removida sem mudança de fase, reduzindo assim o custo do processo.

Há uma tendência do uso da desidratação osmótica como tratamento preliminar para a secagem, objetivando a melhora do alimento desidratado, uma vez que o produto não pode ser desidratado completamente por meio desse processo e nem sempre ele irá resultar num produto com estabilidade microbiológica (TORREGGINI, 1993; RAOULT-WACK, 1994 e LENART, 1996). Tem-se observado uma diminuição da taxa de secagem após o tratamento osmótico, entretanto o efeito do soluto impregnado no produto durante a secagem ainda não é completamente entendido.

De acordo com TORREGGIANI (1993) e RAOULT-WACK (1994), a transferência de massa ocorre principalmente durante as duas primeiras horas da desidratação osmótica, e após esse período, a perda de água diminui progressivamente e apenas o ganho de solutos continua aumentando.

A quantidade e a razão de água removida dependem de muitas variáveis e parâmetros do processo. Em geral, tem sido mostrado que a perda de massa da fruta imersa na solução aumenta com o aumento da concentração do soluto da solução osmótica, do tempo de imersão, da temperatura, da razão entre as massas de solução e alimento, da superfície de contato do alimento, entre outros (JAYARAMAN e GUPTA, 1995).

### **2.2.1 Tipos de agente desidratante**

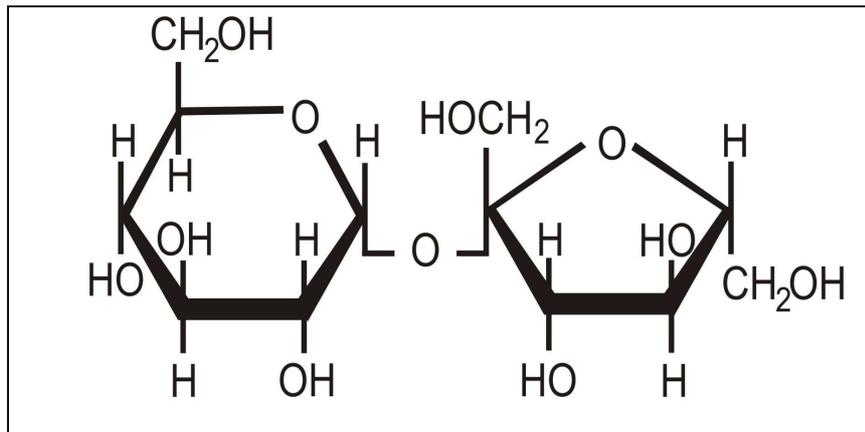
Para a escolha do tipo de agente desidratante é necessário levar em conta alguns fatores importantes, tais como alterações nos valores nutritivos e sensoriais do produto final, bem como o custo do agente.

A escolha do soluto desidratante deve se dar pela sua capacidade de remoção de água e/ou sua impregnação do produto, requisitos esses que geralmente são conflitantes. Enquanto a impregnação é favorecida pela baixa massa molecular do soluto, a remoção de água é favorecida pelo aumento da massa molecular do soluto. Os açúcares monossacarídeos apresentam uma redução no tempo de processo em relação aos açúcares dissacarídeos, entretanto, pela sua baixa massa molecular, têm sua incorporação no alimento favorecida; enquanto os açúcares dissacarídeos apresentam uma menor redução de sua incorporação pelo alimento devido a sua maior massa molecular, além de apresentar boa resposta sensorial (LENART, 1996).

Em se tratando de frutas, os açúcares são os agentes mais adequados, especialmente a sacarose (dissacarídeo), pela sua eficiência no processo, conferindo um sabor agradável, e também pelo baixo custo. Quando a desidratação osmótica é um tratamento preliminar para a secagem, a sacarose é considerada um ótimo agente desidratante, pois sua presença na superfície da fruta desidratada osmoticamente é um inibidor bastante efetivo de polifenol oxidase, a enzima que em contato com o oxigênio é responsável pelo escurecimento enzimático de frutas. Além disso, a presença de sacarose reduz a perda de componentes voláteis que constituem o *flavor* do produto (PONTING, 1973).

A sacarose ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ), representada na figura 2.3, é um dissacarídeo, composto por uma molécula de  $\alpha$ -glicose e uma de frutose, unidos por uma ligação glicosídica entre o primeiro átomo de carbono da glicose e o segundo átomo de carbono da frutose, sendo um açúcar não redutor.

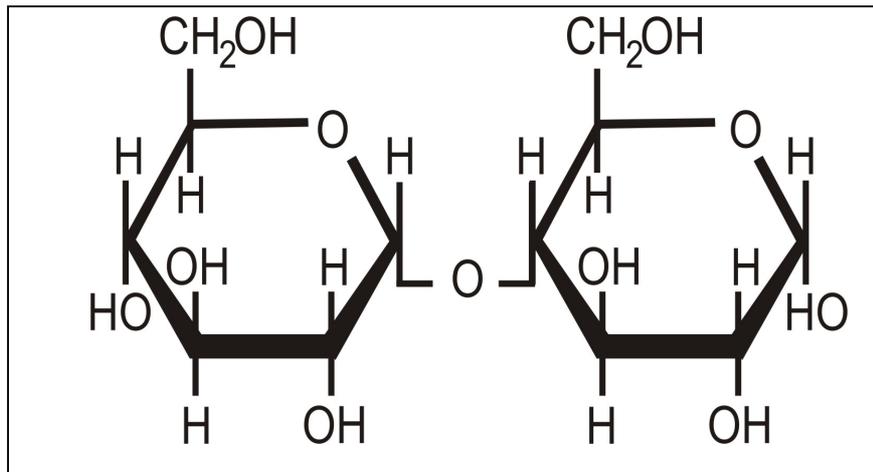
SAPUTRA (2001) estudou a desidratação osmótica do abacaxi utilizando dois diferentes agentes osmóticos, a glicose e sacarose. A sacarose se mostrou um agente desidratante mais eficiente que a glicose, apresentando uma maior capacidade de transferência de massa, com maior perda de água e menor ganho de soluto.



**Figura 2.3 – Estrutura molecular da sacarose.**

Diversos autores têm sugerido a sacarose como agente desidratante para o abacaxi, entretanto há escassez de trabalhos que mostre o comportamento de outros dissacarídeos. A maltose (dissacarídeo) foi utilizada como agente osmótico para outros produtos com sucesso, como é o caso de FORNI *et al.* (1997) que estudando a influência do tipo de açúcar na estabilidade da cor dos abricós osmoticamente desidratados, concluíram que a maltose se mostrou mais eficiente que a sacarose na retenção de ácido ascórbico e na estabilidade da cor, durante a secagem e o armazenamento à  $-20^{\circ}\text{C}$ .

A maltose (figura 2.4) apresenta uma massa molecular superior ao da sacarose e estudos têm provado que sua incorporação nas frutas é menor que a da sacarose, além de reduzir o colapso estrutural do alimento durante a secagem e ser menos doce que a sacarose (ARGAIZ *et al.*, 1994; LAZARIDES *et al.*, 1996; FERRANDO e SPIESS, 2001; DEL VALLE *et al.*, 1998). Formada por duas moléculas de glicose unidas numa ligação glicosídica  $\alpha$  1-4, a maltose é um açúcar redutor e o dissacarídeo menos encontrado na natureza, podendo ser obtido a partir da hidrólise do amido.



**Figura 2.4 – Estrutura molecular da maltose.**

FERRARI *et al.* (2005) estudaram a cinética da desidratação osmótica do melão, utilizando dois agentes desidratantes diferentes, sacarose e maltose. Verificaram que a perda de água aumentou significativamente com a elevação da temperatura e da concentração de solutos da solução desidratante. Observou-se também que os ensaios realizados com maltose apresentaram uma taxa maior de saída de água do melão e uma menor impregnação do soluto na fruta.

Estudos têm revelado ainda que a difusão de dissacarídeos durante o pré-tratamento osmótico de secagem ajuda a minimizar o colapso estrutural da fruta, preservando a membrana celular. DEL VALLE *et al.* (1998) observaram que a adição de maltose e sacarose à maçã, durante o tratamento osmótico, ajudou a diminuir o colapso estrutural durante a secagem, resultando no aumento de 20-65% do volume final das amostras tratadas com os açúcares, em relação à amostra controle (sem pré-tratamento).

### **2.2.2 Temperatura do processo**

O tempo de desidratação osmótica está intrinsecamente ligado à temperatura do processo, ou seja, o aumento da temperatura resultará num menor tempo de processo. Entretanto, altas temperaturas são danosas para as frutas, causando injúrias ao alimento.

Logo, a escolha da temperatura para o processo é determinada em função do produto que se deseja obter.

Apesar da temperatura afetar a cinética do processo, valores acima de 45°C já podem afetar a qualidade do produto, como por exemplo, o escurecimento enzimático e a deterioração do *flavor* através da perda de componentes voláteis. Para valores acima de 60°C durante o tratamento, as características estruturais passam a ser modificadas, aumentando a permeabilidade da membrana celular, o que favorece a impregnação de sólidos no tecido vegetal (TORREGGIANI, 1993).

Para LENART (1996) os dois parâmetros mais importantes da desidratação osmótica são a temperatura e o tempo de processo. A temperatura, quando elevada diminui a viscosidade da solução osmótica, aumentando o coeficiente de difusão da água. Durante a desidratação osmótica de maçã, KHIN *et al.* (2007) verificaram que a razão entre perda de água e ganho de sólidos não variou significativamente entre o processo realizado a temperaturas de 40 e 55°C, entretanto, para a temperatura de 25°C a razão de transferência de massa foi bem menor.

SAPUTRA (2001), desidratou osmoticamente o abacaxi em solução de sacarose, variando a concentração de soluto, a temperatura e o tempo do processo. As temperaturas empregadas foram 30, 50 e 70°C, e a melhor temperatura para a desidratação de abacaxi foi 50°C, uma vez que, à temperatura superior, o aumento da incorporação de soluto na fruta é muito significativo, enquanto que para a temperatura mais baixa, a perda de água é muito menor. SILVEIRA *et al.* (1996) identificaram que temperaturas acima de 50°C causavam modificação na cor do abacaxi osmoticamente desidratado.

Embora o coeficiente de difusão da água aumente com a elevação de temperatura do processo, o mesmo ocorre com o coeficiente de difusão do soluto, sendo importante que se considere a razão entre a perda de água e ganho de sólidos, para a escolha da melhor temperatura a ser utilizada ao longo do processo.

### **2.2.3 Tempo de processo**

O tempo é um parâmetro importante na desidratação osmótica. A razão entre a taxa de perda de água e a taxa de impregnação de soluto no alimento será maior no início do processo, uma vez que há uma redução da velocidade de osmose com o tempo, pois a diferença de concentração entre a solução e o alimento tende a reduzir. Logo, a desidratação osmótica deve envolver um curto espaço de tempo, pelo fato de se objetivar a maior remoção de água possível com o menor ganho de sólidos provenientes da solução desidratante (LENART, 1996).

A exposição de frutas a tratamentos osmóticos longos acarreta num produto final com qualidade comprometida, uma vez que a estrutura celular é danificada, perdendo a seletividade e comprometendo o processo osmótico, o que favorece a incorporação excessiva de sólidos, alterando o fenômeno de transferência de massa (POINTING, 1973; MAURO *et al.*, 2003).

Segundo TORREGGIANI (1993) as mais altas taxas de transferência de massa ocorrem principalmente durante as primeiras duas horas, ocorrendo após isso uma redução da taxa osmótica com o tempo. A autora sugere também não ser conveniente o uso da técnica de desidratação osmótica para a redução acima de 50% da massa da fruta.

PARJOKO *et al* (1996) estudaram a cinética da desidratação osmótica de abacaxi usando como agente osmótico o *palm sugar*, e verificaram que o aumento do tempo de tratamento acarretou numa maior transferência de massa, porém foram nas primeiras 5 horas que ocorreu a maior taxa de transferência de massa.

### **2.2.4 Concentração da solução**

Durante o processo de desidratação osmótica, a concentração da solução desidratante será de vital importância para o sucesso desta operação.

Embora a transferência de massa (perda de água e ganho de soluto) seja favorecida pelo aumento da concentração da solução desidratante (TORRIGGIANI, 1993), a perda de solutos hidrossolúveis (vitaminas e sais minerais) pelo produto decresce durante o processo. Isso ocorre devido à formação de uma camada de soluto ao redor da fruta, o que dificulta a transferência de solutos hidrossolúveis do alimento, juntamente com a transferência da água, para a solução.

Alguns autores (RAOULT-WACK *et al.*, 1994; LENART, 1996) verificaram que com a diferença de concentração, entre a solução e a fruta, superior a 40% há predomínio da saída de água do alimento, porém quando essa diferença é menor que 40% ocorre o processo inverso, ou seja, predomina o ganho de solutos.

SAPUTRA (2001) e RASTOGI e RAGHAVARAO (2004), ao estudarem o processo de desidratação osmótica do abacaxi, concluíram que o aumento da concentração de sacarose favorecia a perda de água da fruta, devido ao aumento do gradiente de pressão osmótica gerado pela solução. SAPUTRA também concluiu que havia concomitantemente o aumento na incorporação de sacarose no abacaxi. Entretanto, RAHMAN e LAMB (1991) verificaram que a desidratação osmótica em soluções próximas da saturação dificultava a secagem, com baixas taxas de perda de água, resultado esse da alta quantidade de solutos (sacarose) impregnados no abacaxi.

### **2.2.5 Agitação**

O processo de desidratação osmótica é favorecido quando conduzido sob agitação, uma vez que aumenta a velocidade de perda de água do alimento. Isso se deve à manutenção da homogeneidade da solução e conseqüentemente, à manutenção do gradiente de pressão osmótica, assegurando a minimização dos efeitos de resistência à transferência de massa na superfície do sólido. Faz-se necessária atenção especial aos efeitos da agitação na estrutura do alimento, a fim de que não haja danos à estrutura do material, controlando a velocidade da agitação no processo.

A maioria dos estudos sobre a influência da agitação no processo osmótico se baseia na comparação do sistema em agitação, com outro estático. MAVROUDIS *et al.* (1998) avaliaram a influência de diferentes níveis de agitação na desidratação osmótica de maçã, com solução de sacarose a 50°Brix e a 20°C, variando a agitação entre 10 e 1400 rpm. A remoção de água foi afetada pelo aumento da agitação, enquanto o ganho de sólidos não apresentou diferença significativa em relação ao aumento da turbulência do sistema.

Os estudos reportados sobre a desidratação osmótica de abacaxi têm utilizado uma agitação constante ao longo do processo a fim de evitar uma região de baixa concentração da solução osmótica ao redor da fruta, o que resultaria numa diminuição da taxa de transferência de massa. O valor assumido para manter o sistema em agitação mais utilizado é de 100 rpm (PINO *et al.*, 1995; CASTRO *et al.*; 1997).

Além da preocupação com a integridade estrutural da fruta num processo de desidratação osmótica, é importante analisar se os custos envolvidos com equipamento e energia justificam o uso da agitação no processo.

### **2.3 Secagem**

A preservação do alimento através da técnica de secagem é antiga, o método compreendia o uso do sol e vento, para a evaporação de água dos alimentos. A partir do século passado, durante a Primeira Guerra Mundial, a demanda por produtos desidratados para o suprimento das Forças Armadas americana, na Europa, estimulou a transição da antiga técnica em ciência, a partir da qual passou a ser estudada e interpretada como tecnologia (GREENSMITH, 1998).

A secagem é uma operação unitária bastante utilizada nos processos industriais, e embora seja grande o interesse em sua compreensão, ela ainda é uma das operações menos entendidas em função da complexidade dos fenômenos envolvidos na transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento no sólido durante o processo (KINGSLEY *et al.*, 2007).

Em relação às frutas, a secagem visa a conservação através da redução do teor de água do alimento até um certo ponto, no qual a concentração dos sólidos naturais (açúcares, ácidos, sais minerais, vitaminas e outros componentes) seja elevada o suficiente para diminuir a atividade de água e inibir o desenvolvimento de microrganismos responsáveis pela deterioração dos alimentos (TRAVAGLINI *et al.*, 1993).

O processo de secagem pode ser definido como a operação unitária que remove água (ou uma substância volátil qualquer) de um produto sólido por evaporação, com transferência de energia (calor) e massa (umidade), acarretando na redução de massa do produto (BARBOSA-CÁNOVAS *et al.*, 1997).

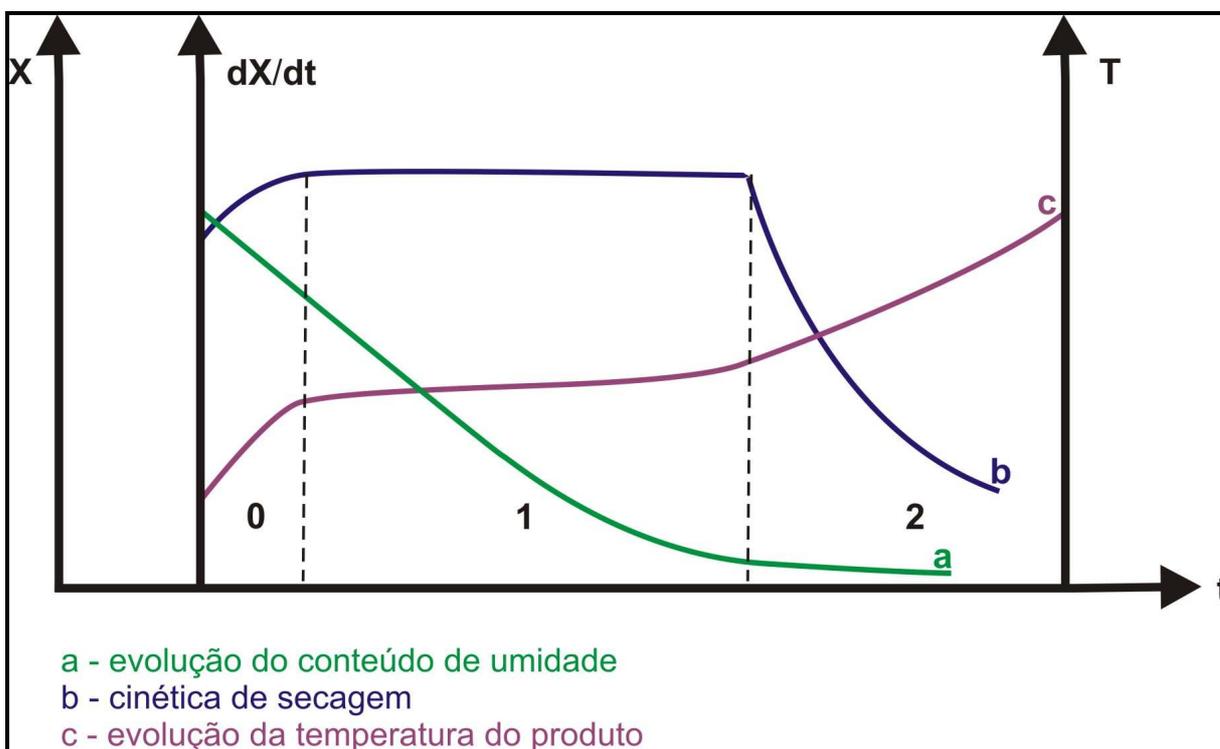
Para evaporar a umidade do sólido é necessário fornecimento de calor, bem como um meio de transporte para remover o vapor de água formado na superfície do material a ser seco. O processo de secagem pode envolver três meios de transferência de calor: convecção, condução e radiação. A transferência de calor por convecção é o meio mais utilizado na secagem comercial, nela um fluxo de ar aquecido passa através da camada do material. Durante o processo, a umidade migra do interior para a superfície do produto, de onde se evapora para o ambiente.

Nos processos de secagem, a água se movimenta de zonas de alta umidade para zonas de baixa umidade, o que significa que a parte externa do material está mais seca que seu interior.

A taxa de remoção de água como vapor da superfície do alimento depende de condições externas tais como: temperatura, umidade e fluxo do ar, área de superfície do produto e pressão. Já a taxa de migração de umidade no interior do alimento para a superfície é função de condições internas, tais como: a natureza estrutural do material, temperatura e quantidade de umidade do produto (MUJUNDAR e MENON, 1995).

Durante o processo de secagem, quando o sólido é colocado em contato com o ar quente, ocorre o fenômeno da transferência de energia sob a forma de calor do ar ao

material, devido à diferença de temperatura entre eles. Em consequência da diferença de pressão parcial de vapor d'água entre a superfície do sólido e o ar, ocorre simultaneamente o fenômeno de transferência de massa sob a forma de vapor de água do sólido para o ar. De acordo com o comportamento da transferência de calor e massa ao longo da operação, a secagem pode ser dividida em três períodos: período de indução, período em taxa constante e período em taxa decrescente de secagem, como mostra a figura (2.5) a seguir.



**Figura 2.5 – Curva de secagem: evolução do tempo (t), do teor de água do produto (X), de sua temperatura (T) e da taxa de secagem (dX/dt).**

De acordo com a figura 2.5, a curva (a) indica a diminuição do conteúdo de umidade (X) do produto em relação ao tempo (t) durante a secagem, enquanto a curva (b) representa a cinética de secagem do produto (dX/dt) em relação ao tempo (t), e a curva (c) refere-se a variação da temperatura (T) da amostra ao longo do tempo (t) de secagem.

O período de indução (0) representa o início da secagem, no qual ocorre a elevação gradual da temperatura do sólido e da pressão de vapor da água contida no

mesmo, e conseqüentemente da velocidade de secagem, até que o fenômeno de transferência de calor seja equivalente à transferência de massa, alcançando o equilíbrio. Durante o período de taxa constante de secagem (1), o equilíbrio das transferências de massa e calor se manterá enquanto houver água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação. Já no período em taxa decrescente de secagem (2), a quantidade de água na superfície do produto diminui, afetando a transferência de massa, uma vez que a migração de umidade do interior do produto para a sua superfície decresce. A temperatura do sólido aumenta até alcançar a do ar de secagem, e ao produto atingir a umidade de equilíbrio com o ar de secagem, a taxa de secagem passa a ser nula e o processo é encerrado (PARK *et al.*, 2001).

O período de indução é insignificante em relação ao período total de secagem, enquanto que o primeiro período, taxa constante de secagem, é dificilmente observado na secagem dos materiais biológicos, dentre os quais estão os produtos alimentícios.

Esta operação unitária consome até 10% da energia total usada no setor industrial de alimentos, porém a escolha de um secador é mais direcionada pelas características desejadas no produto do que pelo consumo de energia. Mais de duzentos tipos diferentes de secadores têm uma aplicação na indústria, porém cerca de vinte tipos básicos são comumente usados. Esta grande variedade de tipos ocorre devido à variedade de formas físicas dos materiais a serem desidratados, à taxa de produção desejada e a característica dos produtos finais. Os principais tipos são: bandeja, túnel (podendo ser duplo ou triplo), vácuo, tambor rotativo, liofilização e spray dryer. (MUJUMDAR, 1997; GREENSMITH, 1998).

O processo de secagem normalmente afeta prejudicialmente a estrutura do alimento, bem como causa alteração na cor por perda de componentes e reações de escurecimento enzimático e não enzimáticos (reações químicas), além da perda de nutrientes voláteis, tudo isso em decorrência da exposição do produto a altas temperaturas por um tempo longo. A fim de melhorar a qualidade sensorial e nutricional do produto desidratado, muitos autores (TORREGGIANI, 1993; RAOULT-WACK, 1994; LENART,

1996) sugeriram a desidratação osmótica como um pré-tratamento para a secagem. Entretanto, após a desidratação osmótica, a taxa de remoção de água do sólido ao longo da secagem diminui em comparação com o produto sem pré-tratamento, por dois motivos principais: a incorporação de sólidos na superfície do material dificultando a evaporação da água, e pela redução do teor de água livre do alimento durante a desidratação osmótica (TORREGGIANI, 1993; LENART, 1996).

TAN *et al.* (2001) verificaram que batata e abacaxi, em secagem convectiva com pré-tratamento (desidratação osmótica), apresentavam uma melhor retenção da cor. NICOLETI *et al.* (2001) observaram que a taxa de difusividade da água, durante a secagem das amostras desidratadas osmoticamente de abacaxi foi menor do que daquelas *in natura*, o que pôde ser explicado pelo menor teor de água nas amostras pré-tratadas, dificultando a migração da água para a superfície da fruta, uma vez que a água remanescente está presente nas regiões de forte interação com a matriz sólida.

Algumas variáveis são importantes na taxa de remoção de água do alimento por secagem. A perda de água do produto por secagem está diretamente relacionada com a superfície exposta do material, a temperatura, a velocidade do ar, a umidade do ar, o tempo do processo, a pressão e as características do produto.

### **2.3.1 Temperatura**

A aplicação de temperaturas elevadas aumenta a velocidade de secagem pelo ar, pois aumenta sua capacidade de transportar umidade e com o aquecimento do ar, o produto também é aquecido, aumentando sua pressão de vapor e facilitando a saída de umidade do interior do produto para a superfície (POTTER e HOTCHKISS, 1995).

Apesar do aumento da temperatura responder positivamente ao aumento da taxa de secagem, a temperatura elevada pode causar injúrias nas frutas. Ao escolher a temperatura do processo é preciso ter o conhecimento prévio do comportamento do material na essa temperatura escolhida, de acordo com os objetivos pretendidos para o

produto. As temperaturas elevadas podem causar alterações na estrutura do alimento, perda de nutrientes voláteis, reações de escurecimento e mudanças sensoriais.

NICOLETI *et al.* (2001) ao estudarem a secagem de fatias de abacaxi de 1 centímetro de espessura e sem haste central (talo), observaram que durante a secagem, ao manterem a temperatura dos pedaços de abacaxi fixas, em 35°C e 50°C eles se comportaram semelhantemente, a temperaturas de ar fixadas em 50°C e 70°C, respectivamente. Este controle permitiu que o começo da secagem se desse com temperaturas mais elevadas, uma vez que a umidade inicial do produto é alta, sendo gradativamente reduzida com a diminuição do teor de umidade do abacaxi. A grande vantagem deste método de controle da temperatura de secagem está na prevenção de injúria da fruta pelo calor.

### **2.3.2 Velocidade do ar**

Embora a temperatura tenha maior influência sobre a cinética de secagem, a taxa de evaporação também é influenciada pela velocidade do ar de secagem, principalmente na fase inicial. A velocidade do ar de secagem é importante para a remoção do vapor de água no ambiente ao redor do produto, evitando a saturação do ar e resultando num diferencial de pressão de vapor de água entre a superfície do material e o ambiente, o que favorece a transferência de massa do sólido para o ar.

Como esperado, o potencial de secagem é função também da velocidade do ar de secagem, como foi comprovado por NICOLETI *et al.* (2001), uma vez que o aumento da velocidade de ar de 1,5m/s para 2,5m/s resultou no aumento da difusividade da água, reduzindo o tempo de secagem. Porém, para uma variação pequena na velocidade do ar (1,5ms e 1,8 m/s) praticamente não houve diferença na difusividade da água.

Segundo o mesmo autor (NICOLETI *et al.*, 2001), a altas velocidades (2,5 m/s), o encolhimento do abacaxi foi praticamente independente da temperatura e, quando a velocidade do ar foi reduzida para 1,5 m/s, o encolhimento foi menos acentuado com o

aumento da temperatura do ar. A explicação oferecida foi que em temperaturas e velocidades maiores, devido ao aumento das taxas de secagem, a superfície do material era rapidamente desidratada e conduzida ao estado vítreo, reduzindo assim o encolhimento.

### **2.3.3 Umidade relativa**

A umidade relativa é a relação entre a pressão de vapor da água presente no ar e a pressão de vapor da água quando o ar está saturado à mesma temperatura (POTTER e HOTCHKISS, 1995). Um ar úmido saturado de vapor d'água não pode mais conter umidade e, portanto, não tem mais capacidade de evaporar a água do sólido.

Durante o processo de secagem, o ar nas proximidades do material fica saturado de vapor d'água, e isso prejudica a taxa de secagem. Para a continuidade da operação é necessário que se forneça calor ao produto, que ocorre através da circulação e aquecimento do ar que envolve o sólido durante a secagem. A umidade relativa mostra a capacidade que o ar possui de absorver umidade, logo, um valor de umidade relativa baixo implica numa capacidade elevada do ar de absorver umidade.

RAHMAN e LAMB (1991), ao realizarem a secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente definiram o percentual de umidade relativa em 10%, enquanto TAN et al. (2001) mantiveram o percentual de umidade relativa constante a 21%. Já NICOLETI *et al.* (2001) não determinaram (ou omitiram) a umidade relativa do ar utilizada para a secagem do abacaxi.

## **2.4 Cinética de secagem**

O estudo da cinética de secagem visa o conhecimento do comportamento do material ao longo do processo e a predição do tempo de secagem, uma vez que a modelagem do processo é de grande importância para o desenvolvimento e a otimização dos secadores, além de possibilitar padronização do processo.

A secagem de materiais biológicos é bastante complexa, em função das interações na matriz sólida que afetam diretamente a transferência de massa e calor no decorrer do processo. A fim de explicar o mecanismo de migração de umidade no interior dos alimentos, vários modelos matemáticos foram propostos para descrever a influência de cada variável no processo e estimar a difusividade da água (TORGRUL e PEHLIVAN, 2004).

Durante os períodos de taxa constante e decrescente, os métodos de cálculo da secagem diferem. No primeiro caso, as transferências de calor e massa são analisadas na superfície do material em contato com o ar de secagem, já para o segundo caso, as análises são baseadas nas transferências internas que governam a secagem (PARK, 2001).

O período de taxa decrescente é quase sempre o único observado na secagem de frutas. De acordo com STRUMILLO e KUDRA (1986), o comportamento da secagem no período decrescente ocorre por migração capilar da água líquida, sob ação da tensão superficial e este mecanismo controla a velocidade da secagem.

A maioria dos modelos utilizados para o estudo da cinética de secagem estão baseados na segunda Lei de Fick e nas soluções analíticas da equação de difusão, apresentada por CRANK (1975).

Assim, a lei de Fick na equação de balanço de massa de água do interior do produto:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_{ef} \nabla X) \quad (2.1)$$

A solução analítica (CRANK, 1975) para a equação de difusão se aplica aos sólidos de formas geométricas simples (corpos semi-infinitos; placas planas, cilindros e esferas) e com difusividade efetiva constante ou variando com a umidade. Para a geometria

do produto de placa plana infinita, com a transferência de massa unidirecional durante a secagem e considerando a difusividade efetiva constante:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (2.2)$$

Estabelecendo-se as seguintes condições inicial e de contorno para a umidade X;

- Umidade inicial uniforme:  $X = X_0$  , em  $t = 0$  e  $0 < z < L$
- Umidade máxima no centro:  $\frac{\partial X}{\partial z} = 0$  , em  $z = 0$  e  $t > 0$
- Umidade constante na superfície:  $X = X_{eq}$  , em  $z = L$  e  $t > 0$

E considerando a resistência externa à transferência de massa desprezível, bem como o encolhimento do material durante a secagem, tem-se:

$$Y = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ - (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2} t \right] \quad (2.3)$$

Onde;

$X_t$  = umidade média no tempo (g água/ g matéria seca);

$X_{eq}$  = umidade de equilíbrio (g água/ g matéria seca);

$X_0$  = umidade inicial da amostra (g água/ g matéria seca);

Y = número adimensional de umidade;

$D_{ef}$  = difusividade efetiva ( $m^2/s$ );

t = tempo (s);

L = meia espessura da amostra (m);

n = número de termos da série;

z = direção da transferência.

O coeficiente de difusão efetiva ( $D_{ef}$ ) contempla o efeito de todos os fenômenos que podem interferir na taxa de transferência de massa, e dificultar a migração de água do interior do sólido para a superfície. A difusividade efetiva não é intrínseca ao material, uma vez que ela varia conforme as condições de secagem (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Nicoletti *et al.* (2001) utilizaram a equação 2.3 proposta por CRANK (1975) para ajustar seus dados experimentais e calcular a difusividade da água para a secagem de fatias de 10 mm de espessura de abacaxi *in natura* e pré-tratado osmoticamente. Os resultados obtidos revelaram que a taxa de transferência de água do abacaxi pré-tratado foi menor do que a da fruta *in natura*, porém ambas foram da ordem de  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s.

Modelos empíricos também têm sido utilizados para o estudo da cinética de secagem das frutas, apesar de sua restrição às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos ser muito mais severa.

Geralmente, os modelos empíricos são uma expressão da lei de resfriamento de Newton, aplicada à transferência de massa durante a secagem, e assumindo que as condições sejam isotérmicas e que a transferência de umidade se restrinja à superfície do produto.

Durante o processo de secagem de materiais higroscópicos porosos no período de taxa de secagem decrescente, a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre no material. O modelo exponencial proposto por Lewis pode ser observado a seguir:

$$\frac{dX}{dt} = -K(X_t - X_e) \quad (2.4)$$

Onde;

K = constante de secagem (s<sup>-1</sup>).

Desconsiderando-se os efeitos no interior do material, a equação de Lewis presume que toda a resistência ao transporte de umidade encontra-se na camada limite (KUROZAWA, 2005). A equação 2.4 é normalmente utilizada na forma integrada e expressa da seguinte forma:

$$\text{Modelo exponencial:} \quad Y = \exp(-kt) \quad (2.5)$$

Dentre os modelos empíricos se destacam os modelos exponenciais. Todos os modelos da curva de secagem utilizam o número adimensional de secagem (Y) como variável dependente, que está em função do tempo de secagem. Segundo VEGA *et al.* (2007), os modelos para o estudo de cinética de alimentos mais utilizados, além da equação exponencial (2.5), são:

$$\text{Modelo proposto por HENDERSON e PABIS:} \quad Y = a.\exp(-kt) \quad (2.6)$$

$$\text{Modelo proposto por PAGE:} \quad Y = \exp(-kt^n) \quad (2.7)$$

## **2.5 Atributos de qualidade do produto**

A qualidade do alimento engloba o aspecto de segurança, suas propriedades nutricionais e sensoriais. A aceitação do produto pelo consumidor está diretamente relacionada com a qualidade do mesmo.

Em decorrência do aumento de exigência do consumidor por qualidade dos alimentos processados, o desenvolvimento da tecnologia industrial, a forte concorrência do mercado consumidor e o apelo das agências reguladoras de certificação de qualidade, desenvolver processos que visam um produto final com a preservação das características desejadas por um longo período é essencial para os cientistas, engenheiros e outros profissionais da área.

RAHMAN (2005) afirma que dentro do conceito de qualidade de alimento, a primeira preocupação é sempre o aspecto de segurança, entretanto não se devem deixar de lado os outros parâmetros de qualidade do produto. O autor mostra o desafio de se trabalhar com o desenvolvimento de processamentos que aperfeiçoem todos os aspectos da qualidade, a fim de olhar o produto final não apenas do ponto de vista de um atributo de qualidade, mas sim do conjunto de fatores que envolvem o conceito.

A secagem como método de preservação de alimento tem implicação direta na qualidade do produto. A desidratação é responsável pela redução do conteúdo de água do alimento, reduzindo a atividade de água a patamares que garantam a segurança alimentar, impedindo o crescimento de microrganismos e garantindo a estabilidade do produto por um longo período. Todavia, o tempo e a temperatura de secagem podem interferir negativamente na qualidade nutricional e sensorial do produto, como por exemplo, a perda de componentes voláteis (vitaminas), a alteração da cor e *flavor* (RAGHAVAN e ORSAT, 2006; AGUILERA *et al.*, 2003; LENART, 1996).

### **2.5.1 Cor**

Um dos principais fatores de atração dos alimentos é a cor, capaz de influir até na percepção do aroma, sendo um fator importante na aceitação do produto pelo consumidor.

A cor nos alimentos é resultado da presença de pigmentos, tais como carotenos, antocianinas, clorofila, entre outros. Os pigmentos são instáveis e susceptíveis às reações químicas e bioquímicas, que ocorrem durante o processamento ou armazenamento do produto, podendo ser indicadores das transformações ocorridas no alimento.

Além da descoloração, outros mecanismos podem ser responsáveis pela alteração da cor do alimento, tais como as reações de escurecimento enzimático e não-enzimático do tipo Maillard.

SILVEIRA *et al.* (1996) concluíram que para a desidratação osmótica a temperaturas elevadas, acima de 50°C, ocorrem modificações na coloração do abacaxi, podendo aparecer o escurecimento do alimento através de reações enzimáticas ou não enzimáticas, além da descoloração pela perda de pigmentos. O mesmo fenômeno foi observado por VIAL *et al.* (1991), no processo da desidratação osmótica de kiwi.

Uma pesquisa realizada sobre a desidratação osmótica de damasco, utilizando maltose como agente desidratante, à baixa temperatura (25°C) e sob pressão atmosférica, verificou que não houve alteração da cor, em relação à fruta *in natura*, ao longo do processo com duração de 45 ou 120 minutos (FORNI *et al.*, 1997).

TAN *et al.* (2001) estudaram a alteração da cor em batata e abacaxi que foram desidratados através de secagem, com um pré-tratamento osmótico e infravermelho. A medida da mudança de cor se deu pelos parâmetros de escala de cor CIELAB (L\*, a\* e b\*). Os autores puderam constatar que, apesar da desidratação osmótica afetar a coloração do alimento, assim como o processo de secagem, as amostras tratadas osmoticamente previamente à secagem, apresentaram uma menor redução da coloração durante a secagem.

### **2.5.2 Propriedades mecânicas**

Para Bourne (2002), as propriedades estruturais do alimento estão relacionadas ao grupo de características físicas que se originam na estrutura dos componentes do próprio alimento, sendo notadas primeiramente pela percepção do contato, as quais estão diretamente relacionadas com a deformação e a desintegração gradual do alimento sobre uma força, capaz de ser mensurada em função da massa, tempo e distância.

Nas frutas, as propriedades mecânicas estão intimamente ligadas à estrutura celular. A firmeza da parede celular está relacionada com a composição de pectina na sua estrutura mais externa, conhecida como lamela média. A sua importância está no efeito “ligante” que promove na parede celular, provocando a adesão das células entre si. Além de variar de acordo com o grau de maturação da fruta, a pectina é bastante sensível ao calor,

podendo alterar sua composição na lamela média, conforme a intensidade do processo de desidratação osmótica ou secagem (SATO *et al.*, 2004).

Além da importância da integridade da parede celular e da lamela média, a pressão de turgor gerada dentro das células por osmose também é de extrema importância para a textura dos vegetais, e influi incisivamente na constituição desta (JACKMAN e STANLEY, 1995).

Vários fatores contribuem para a alteração das propriedades mecânicas do tecido vegetal durante o processamento dos alimentos, entre eles: a perda de turgor da célula, alterações na lamela média e conseqüentemente na resistência da parede celular, mudanças nas frações de ar e líquido na amostra, variações de tamanho e forma do alimento, temperatura e tensão sofrida ao longo do tratamento (CHIRALT *et al.*, 2001).

A transferência de massa (água) do tecido vegetal durante a secagem, ou qualquer outra operação unitária que envolva transferência de massa, é um processo complexo, que depende da difusividade, que por sua vez é limitada pela permeabilidade da parede celular. A difusividade da água através da parede celular pode ser elevada através do aumento de temperatura, do aumento da superfície de contato do alimento e também através de tratamentos enzimáticos, entretanto, todos esses mecanismos afetam a textura final do produto. (JACKMAN e STANLEY, 1995).

No tratamento osmótico, a transferência de massa não é caracterizada apenas pela remoção de água do material, mas também pela perda de sólidos naturais (vitaminas, sais minerais, ácidos orgânicos) e o ganho de sólidos oriundos da solução desidratante pelo alimento. As modificações físicas e químicas durante o processo provocam alterações nas propriedades macroscópicas do produto, como, por exemplo, as alterações na estrutura viscoelástica do tecido, como se observa na plasticidade da estrutura da amostra após o tratamento (TORREGGIANI, 1995; TORRES *et. al.*, 2006).

Não há estudos na literatura sobre as propriedades mecânicas do abacaxi desidratado osmoticamente e por secagem. SITKIEWIEZ et al. (1996) desidrataram osmoticamente a maçã, que em seguida foi submetida à secagem convencional. Eles verificaram que havia um aumento da plasticidade da fruta na secagem sem o pré-tratamento osmótico. Para a desidratação osmótica, também foi verificado que as maiores mudanças na textura da maçã ocorreram com valores mais elevados de temperatura e massa molecular do soluto.

BRAMBILLA et al. (2000) estudaram o efeito do tempo de desidratação osmótica na estrutura dos tecidos do morango. Os autores verificaram que após 4 horas de processo a junção das células começa a se desfazer, alterando a estrutura da parede celular e conseqüentemente ocasionando mudanças nas propriedades mecânicas da fruta.

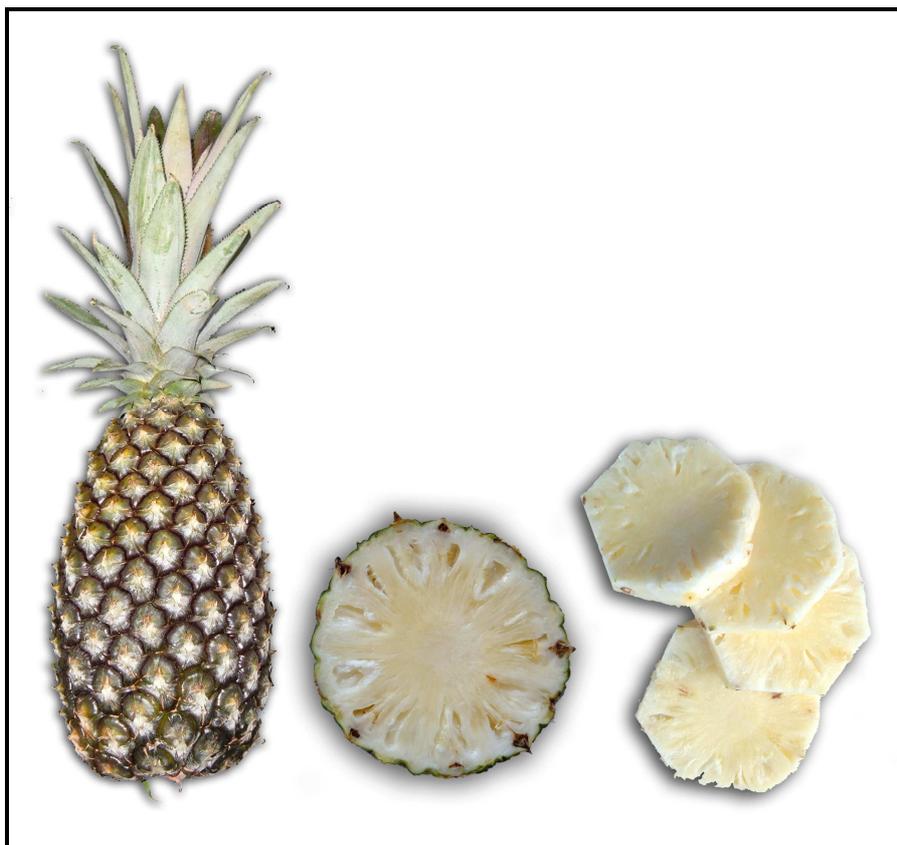
### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento experimental do projeto foi realizado no Laboratório de Engenharia de Processos do Departamento de Engenharia de Alimentos – DEA/ FEA.

#### 3.1 Material

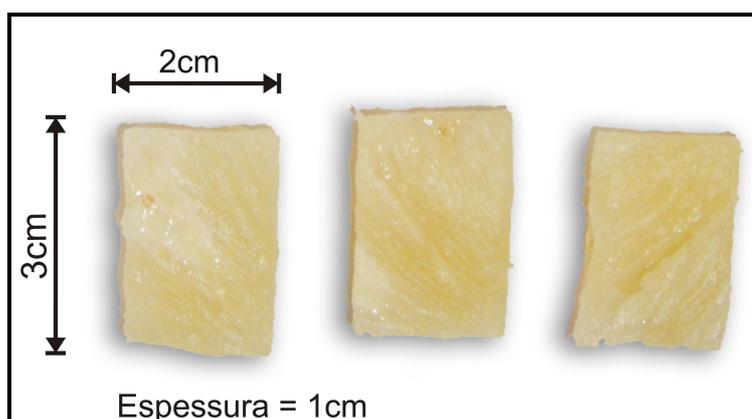
##### 3.1.1 Matéria-prima

Utilizou-se abacaxi (*Ananás comosus* (L.) Merrill) da variedade Pérola (figura 3.1) fornecido pelo CEASA Campinas/ SP, oriundo de Frutal/ MG. A seleção da fruta foi feita conforme a intensidade da cor (verde, levemente amarelado), teor de Brix (12-16°Brix), mesmo tamanho e forma, para se obter amostras homogêneas.



**FIGURA 3.1 – Abacaxi (*Ananás comosus* (L.) Merrill) variedade Pérola.**

A geometria do fruto utilizada ao longo do experimento foi a de um paralelepípedo retângulo, nas seguintes dimensões: área de 20 mm x 30 mm e espessura de 10 mm, conforme mostra a figura 3.2.



**FIGURA 3.2 – Geometria do abacaxi utilizado no processamento.**

### **3.1.2 Sanitizante**

Para a sanitização da matéria-prima foi utilizado o desinfetante Proxitane 1512 (ácido peracético, peróxido de hidrogênio e ácido acético; especificações no apêndice II), da empresa Peróxidos do Brasil, na concentração de 150 ppm e tempo de contato de 10 minutos, antes do descascamento da fruta.

### **3.1.3 Agente desidratante**

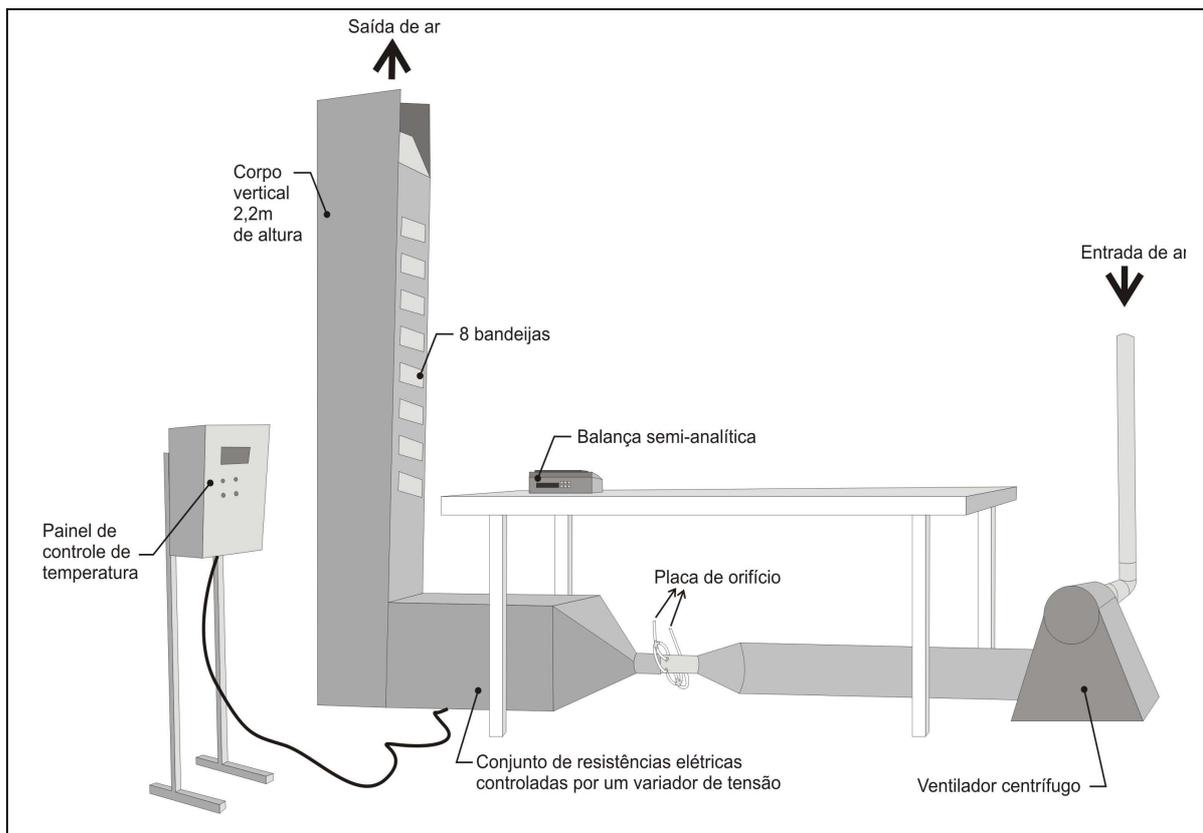
No preparo das soluções desidratantes, além da água destilada, foram utilizados como agente desidratante a sacarose e maltose, com as seguintes especificações:

- Sacarose comercial, marca União;

- Maltose, xarope de milho de alta maltose – Malteggill 63/82 (especificações no apêndice I), concedida pela empresa Cargill do Brasil.

### 3.1.4 Secador

Os ensaios de secagem das amostras *in natura* e tratadas osmoticamente foram realizados num secador convectivo tipo bandeja, vertical, de escala piloto. O secador possui controle automatizado de temperatura, enquanto o fornecimento de ar é dado por um ventilador centrífugo e a vazão de ar é controlada manualmente através de uma placa de orifício calibrada. O ar aquecido é movimentado perpendicularmente e com distribuição uniforme no sentido da bandeja, conforme é ilustrado na figura 3.3.



**Figura 3.3 – Secador convectivo tipo bandeja - escala piloto, utilizado no experimento.**

A umidade relativa do ar de secagem e a temperatura de bulbo seco foram medidas com o auxílio de termo higrômetro marca HOMIS, modelo 823.

## **3.2 Métodos**

### **3.2.1 Caracterização da matéria-prima**

O abacaxi foi caracterizado quanto à sua composição química centesimal, tendo sido determinados os teores de umidade, cinzas, fibras, proteínas, lipídeos, açúcares totais e redutores e acidez. As características físicas avaliadas foram: massa, comprimento, largura, diâmetro, sólidos solúveis, pH e atividade de água.

Após a desidratação osmótica, as amostras foram caracterizadas quanto ao teor de umidade, açúcares totais, acidez, sólidos solúveis, atividade de água e pH. Já após a secagem, as amostras foram caracterizadas quanto ao teor de umidade, sólidos solúveis, atividade de água e pH.

### **3.2.2 Preparo das amostras**

Os frutos foram higienizados numa solução com o sanitizante Proxitane 1512, conforme descrito no item 3.1.2. A seguir, foram descascados manualmente, e cortados de acordo com a geometria e dimensão pré-estabelecidas no item 3.1.1.

### **3.2.3 Desidratação osmótica**

No processo de desidratação osmótica, os pedaços de abacaxi previamente cortados foram pesados e introduzidos em becker(s) de 600 ml, contendo a solução desidratante nas concentrações desejadas e previamente aquecidas à temperatura especificada. A relação entre amostra e solução utilizada foi de 1:10 (p/p), a fim de que a concentração da solução pudesse ser considerada constante ao longo do processo. Os Becker(s) foram então colocados em um agitador orbital (shaker, modelo TE-420 - marca

TECNAL) com temperatura e agitação (100 rpm) da solução controlada, por um período de 2 horas.



**Figura 3.4 – Foto do equipamento utilizado no processo de desidratação osmótica.**

Ao serem retiradas das soluções, as amostras foram enxaguadas com água destilada para remoção do excesso de xarope e colocadas em papel absorvente para retirar o excesso de água. Em seguida, as amostras foram pesadas novamente para a quantificação da perda de massa em relação à massa inicial do produto, de acordo com as expressões a seguir.

Para a quantificação da perda de massa (PP) em percentagem, a equação é:

$$PP(\%) = 100 \times \left( 1 - \frac{m_f}{m_o} \right) \quad (3.1)$$

Onde,

PP(%) = perda de peso percentual do produto desidratado;

$m_o$  = massa inicial do produto;

$m_f$  = massa final do produto.

A equação para a quantificação da perda de água (PA) em percentagem, é:

$$PA(\%) = 100 \times \left[ 1 - \left( \frac{m_f \times X_{buf}}{m_o \times X_{buo}} \right) \right] \quad (3.2)$$

Onde,

PA(%) = perda de água percentual do produto desidratado;

$X_{buo}$  = teor de umidade em base úmida inicial do produto;

$X_{buf}$  = teor de umidade em base úmida final do produto.

A equação para a quantificação do ganho de sólidos (GS) em percentagem, é:

$$GS(\%) = 100 \times \left( \frac{m_f \times AT_f - m_o \times AT_o}{m_o} \right) \quad (3.3)$$

Onde,

GS(%) = incorporação de sólidos do produto desidratado

$AT_o$  = teor de açúcares totais inicial do produto

$AT_f$  = teor de açúcares totais final do produto

### **3.2.4 Secagem**

As amostras, antes de serem introduzidas no secador convectivo, foram pesadas, identificadas e em seguida dispostas uniformemente na bandeja. Ao se colocar as bandejas no secador, o mesmo já estava com a temperatura previamente estabilizada àquela requerida pelo ensaio. Durante a secagem, na primeira hora de processo as amostras foram pesadas de 15 em 15 minutos, depois a cada 30 minutos nas próximas duas horas, e após a terceira hora de secagem a pesagem se deu a cada 60 minutos de processo, até que a variação de massa das amostras fosse desprezível, menor que 0,25% em relação a massa inicial.

As temperaturas de secagem utilizadas foram 50, 60 e 70°C, de acordo com o ensaio. A velocidade de ar utilizada para os ensaios foi fixada em 1,5 m/s, e a umidade relativa do ar variou entre 40 e 50%.

As curvas de secagem foram obtidas com os dados de massa, realizada numa balança semi-analítica da marca Marte, modelo AM5500.

## **3.3 Métodos Analíticos**

As análises foram realizadas em triplicata e à temperatura ambiente (25°C), de acordo com o procedimento descrito a seguir. O resultado foi expresso pela média da triplicata e seu desvio padrão.

### **3.3.1 Determinação da massa da amostra**

Para a verificação de perda de peso decorrente do processo de desidratação osmótica e secagem foi utilizada uma balança semi-analítica marca Marte, modelo AM5500, com precisão de  $\pm 0,01$ g, fabricada em São Paulo, Brasil.

### 3.3.2 Determinação do teor de sólidos solúveis (°Brix)

O teor de sólidos solúveis da matéria-prima e das amostras foi determinado através de um refratômetro de bancada marca Zeiss West (Zeiss West, Berlim, Alemanha).

### 3.3.3 Determinação do conteúdo de umidade

A determinação da umidade das amostras se deu pela secagem das amostras em estufa a vácuo (marca MARCONI) a 70°C, a uma pressão menor que 100 mmHg, até atingir peso constante (A.O.A.C, 2002).

A fórmula utilizada para o cálculo da umidade em base úmida foi:

$$X_{bu} = \frac{P_I - P_F}{P_I} \times 100 \quad (3.4)$$

Onde:

$X_{bu}$  – Umidade em base úmida

$P_I$  – Peso\* inicial da amostra

$P_F$  – Peso\* final da amostra

\*A medida de peso se deu pelo uso de uma balança analítica.

A fórmula para a conversão da umidade em base úmida para umidade em base seca é dada pela seguinte equação:

$$X_{bs} = \frac{X_{bu} (\%)}{100 - X_{bu} (\%)} \times 100 \quad (3.5)$$

Onde:

$X_{bs}$  – Umidade em base seca

### **3.3.4 Determinação de atividade de água**

A determinação de atividade de água da matéria-prima e das amostras foi realizada mediante o uso do equipamento Aqualab, modelo 3TE (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, EUA), à temperatura de 25°C.

### **3.3.5 Determinação de açúcares totais**

A determinação do teor de açúcares, na matéria-prima e nas amostras oriundas do processo de desidratação osmótica, foi realizada segundo a metodologia de Munson-Walker General Method (A.O.A.C, 2002).

### **3.3.6 Determinação de acidez**

A acidez das amostras foi determinada pelo método titulométrico (A.O.A.C., 2002).

### **3.3.7 Determinação do potencial hidrogeniônico (pH)**

A determinação do pH das amostras foi realizada por medida direta em pHmetro Sentron, modelo 2001.

### **3.3.8 Determinação de proteínas**

A determinação de proteínas na caracterização da matéria-prima foi realizada através do método Kjeldahl (A.O.A.C., 2002).

### **3.3.9 Determinação de lipídeos**

A determinação de lipídeos na caracterização da matéria-prima foi realizada de acordo com o método de BLIGH & DYER (A.O.A.C., 2002).

### 3.3.10 Determinação de cinzas

A determinação de cinzas na caracterização da matéria-prima foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Helrich (A.O.A.C.,2002).

### 3.3.11 Determinação de fibras

A determinação de fibras na caracterização da matéria-prima foi realizada de acordo com a metodologia proposta pela A.O.A.C. (2002).

### 3.3.12 Determinação de cor

A determinação da cor das amostras frescas e desidratadas foi realizada através da leitura de três parâmetros definidos pelo sistema CIELAB. Os parâmetros  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ , foram fornecidos pelo espectrofotômetro de bancada Color Quest II, marca Hunter Lab, no qual  $L^*$  define a luminosidade ( $L^* = 0$  preto e  $L^* = 100$  branco) e  $a^*$  e  $b^*$  definem a cromaticidade ( $+a^*$  vermelho e  $-a^*$  verde,  $+b^*$  amarelo e  $-b^*$  azul).

A partir dos parâmetros do sistema CIELAB foram definidos o croma ( $C^*$ ) e o tom ( $H^*$ ) das amostras, a partir das equações 3.6 e 3.7:

$$C^* = \left( a^{*2} + b^{*2} \right)^{1/2} \quad (3.6)$$

$$H^* = \arctan \left( \frac{b^*}{a^*} \right) \quad (3.7)$$

### 3.3.13 Determinação das propriedades mecânicas

A análise das propriedades mecânicas do abacaxi *in natura* e desidratado foi realizada através da determinação dos parâmetros reológicos de tensão e deformação na

ruptura, por meio do texturômetro Universal Testing Machine, modelo TAXT2i, marca Stable Micro Systems.

A determinação da tensão e deformação na ruptura ocorreu através de ensaio de compressão uniaxial a altas taxas de deformação das amostras, utilizando um corpo de prova de geometria semelhante a um dente (Probe HDP/VB Volodkevich Bite Jaws) de área  $20\text{mm}^2$ , com velocidade de compressão constante de  $1\text{mm/s}$  e  $80\%$  de deformação da amostra. A compressão do corpo de prova exercida na amostra causa deformação e ruptura, gerando um gráfico de força versus tempo, além de o equipamento fornecer a altura de deformação da amostra.

Os dados de força e altura obtidos no ensaio foram convertidos em tensão de Hencky ( $\sigma_H$ ) e deformação ( $\varepsilon_H$ ), de acordo com as equações 3.8 e 3.9:

$$\sigma_H = \frac{F(t)}{A(t)} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_H = -\ln\left(\frac{H(t)}{H_0}\right) \quad (3.9)$$

Onde;

$\sigma_H$  = tensão de Hencky (Pa);

$\varepsilon_H$  = deformação;

$F(t)$  = força (N) em função do tempo (s);

$A(t)$  = área ( $\text{m}^2$ ) em função do tempo (s);

$H(t)$  = altura (m) em função do tempo (s);

$H_0$  = altura (m) inicial da amostra.

A tensão máxima na ruptura foi dada pelo valor do pico da curva tensão-deformação para as amostras *in natura* e desidratadas (STEFFE, 1996).

### **3.4 Experimentos**

#### **3.4.1 Planejamento experimental para determinação das melhores condições de tratamento osmótico**

Para a determinação das condições do processo de desidratação osmótica como uma etapa preliminar para a secagem do abacaxi, foram realizados dois planejamentos fatoriais completos  $2^2$  com 4 pontos axiais e 3 pontos centrais, totalizando 11 ensaios (tabela 3.1) para cada planejamento, um para a sacarose e outro para a maltose como agentes desidratantes. As variáveis independentes envolvidas no processo foram: concentração do soluto e temperatura de desidratação osmótica, de acordo com a tabela 3.2, enquanto o tempo e a agitação do processo para os ensaios foram estabelecidos em 2 horas e 100 rpm respectivamente. De acordo com o efeito das variáveis independentes sobre as respostas (perda de água, ganho de sólidos, perda de peso e atividade de água) foi possível determinar as melhores condições do processo, para a sacarose e maltose, como agentes desidratantes.

A importância dos pontos centrais se deve à possibilidade de estimar o erro experimental, enquanto os pontos axiais têm sua importância na ampliação do modelo linear para o quadrático (RODRIGUES e IEMMA, 2005). Para a elaboração dos modelos utilizou-se o software Statística<sup>®</sup> 5.0.

**Tabela 3.1 - Planejamento experimental**

Ensaio	Concentração de soluto* (%)	Temperatura (°C)
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	-1,41	0
6	+1,41	0
7	0	-1,41
8	0	+1,41
9	0	0
10	0	0
11	0	0

\* Sacarose ou maltose

**Tabela 3.2 - Variáveis independentes codificadas**

Variável	-1,41	-1	0	+1	+1,41
Concentração de soluto * (%)	40	42,9	50	57,1	60
Temperatura (°C)	30	32,9	40	47,1	50

\* Sacarose ou maltose

### 3.4.2 Experimentos de secagem

Após a identificação das melhores condições para o pré-tratamento osmótico, foram realizados 9 ensaios de secagem das amostras *in natura* e pré-tratada osmoticamente em soluções de sacarose e maltose, sendo que para cada amostra a temperatura de secagem utilizada foi de 50, 60 e 70°C, e a velocidade do ar de secagem utilizada foi de 1,5 m/s. A tabela 3.3 mostra os ensaios realizados para a secagem.

As amostras *in natura*, pré-tratadas osmoticamente e desidratadas foram caracterizadas para cada ensaio quanto ao conteúdo de umidade, atividade de água, propriedades mecânicas e retenção de cor. Para cada um dos ensaios foi estudada a cinética de secagem.

**Tabela 3.3 – Ensaios de secagem**

<b>Ensaio</b>	<b>Amostra</b>	<b>Temperatura de secagem (°C)</b>
1	<i>In natura</i>	50
2	<i>In natura</i>	60
3	<i>In natura</i>	70
4	Pré-tratada osmoticamente (sacarose)	50
5	Pré-tratada osmoticamente (sacarose)	60
6	Pré-tratada osmoticamente (sacarose)	70
7	Pré-tratada osmoticamente (maltose)	50
8	Pré-tratada osmoticamente (maltose)	60
9	Pré-tratada osmoticamente (maltose)	70

### **3.5 Modelagem matemática**

A análise do processo de secagem do abacaxi, bem como o cálculo da difusividade efetiva foi realizado segundo a Lei de Fick para geometria de placa plana infinita (equação 2.3). Também os modelos empíricos (Newton, Henderson e Pabis, Page) foram utilizados para o ajuste das curvas experimentais e o entendimento da cinética de secagem.

### **3.6 Análises estatísticas**

Os resultados obtidos nos experimentos foram analisados estatisticamente através da análise de variância, aplicando o teste de Duncan ao nível de 5% de significância, com o auxílio do software Statistica® 5.0.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização da matéria-prima

A caracterização física e a composição química do abacaxi (*Ananás comosus* (L.) Merrill) variedade Pérola, oriundo de Frutal/ Minas Gerais, encontram-se nas tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente. As análises para a caracterização da matéria-prima foram realizadas em triplicata, de acordo com a metodologia descrita no item 3.3.

**Tabela 4.1 – Caracterização física do abacaxi fresco.**

<b>Características</b>	<b>Especificação</b>
Peso Médio (g)	2063,83 ± 86,48
Comprimento Médio (cm)	18,83 ± 0,24
Largura Média (cm)	40,67 ± 0,58
Diâmetro Médio (cm)	12,70 ± 0,22
Sólidos Solúveis (°Brix)	13,43 ± 0,41
pH	4,14 ± 0,06
Atividade de Água (25°C)	0,984 ± 0,001

**Tabela 4.2 – Composição química centesimal do abacaxi fresco.**

<b>Análise</b>	<b>Valor Médio</b>
Umidade (base úmida) (%)	86,07 ± 0,62
Cinzas (%)	0,24 ± 0,02
Fibras (%)	0,48 ± 0,09
Proteínas (%)	0,59 ± 0,02
Lipídeos (%)	0,16 ± 0,01
Açúcares totais (g/100mL)	13,86 ± 1,19
Açúcares redutores (g/100mL)	3,98 ± 0,59
Acidez (g ác cítrico anidro/100mL)	0,33 ± 0,03

Os resultados obtidos estão bastante próximos dos valores registrados pela literatura, e as variações devem-se ao grau de maturação das frutas analisadas e a diferenças na composição centesimal da fruta em relação à época do ano e a região de cultivo.

## 4.2 Estudo da desidratação osmótica do abacaxi

A influência dos diferentes agentes desidratantes, sacarose e maltose, bem como a variação da concentração da solução osmótica e a temperatura de processo foram avaliadas, mantendo-se constante a agitação das amostras na solução ao longo do processamento (100 rpm) e a duração de 2 horas de processo para todos os ensaios. Os resultados são analisados a seguir.

### 4.2.1 Desidratação osmótica do abacaxi com solução de sacarose

O estudo do comportamento do abacaxi durante a desidratação osmótica com solução de sacarose foi realizado de acordo com o planejamento fatorial completo, com 11 ensaios, tendo como variáveis independentes a concentração da solução (40 a 60%) e a temperatura do processo (30 a 50°C), conforme mostra as tabelas 3.1 e 3.2.

As condições iniciais da matéria-prima para os ensaios de desidratação osmótica com a solução de sacarose são mostrados na tabela 4.3 a seguir:

**Tabela 4.3 – Características iniciais do abacaxi para o tratamento osmótico com solução de sacarose.**

<b>Análise</b>	<b>Valor Médio</b>
Umidade (base úmida) (%)	85,74 ± 1,14
Atividade de Água (25°C)	0,989 ± 0,003
Açúcares totais (g/100mL)	12,24 ± 1,25
Sólidos Solúveis (°Brix)	11,54 ± 0,52

O planejamento experimental obteve as seguintes respostas, após 2 horas de processo: perda de peso (PP), perda de água (PA), ganho de sólidos (GS), variação do teor de sólidos solúveis (VSS) e atividade de água (Aw). Os resultados são mostrados na tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Respostas do planejamento fatorial completo na desidratação osmótica do abacaxi com solução de sacarose.**

<b>Ensaio</b>	<b>Conc (%)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>PP (%)</b>	<b>PA (%)</b>	<b>GS (%)</b>	<b>VSS (%)</b>	<b>Aw</b>
<b>1</b>	42,9	32,9	12,91	17,07	3,45	48,33	0,983
<b>2</b>	57,1	32,9	14,51	21,40	7,21	75,14	0,982
<b>3</b>	42,9	47,1	12,34	19,84	2,48	60,87	0,980
<b>4</b>	57,1	47,1	16,80	24,94	6,41	89,21	0,978
<b>5</b>	40	40	15,59	19,64	3,72	41,08	0,983
<b>6</b>	60	40	14,85	23,37	7,11	89,63	0,978
<b>7</b>	50	30	13,63	18,99	2,31	70,17	0,981
<b>8</b>	50	50	16,88	25,03	7,03	95,06	0,979
<b>9</b>	50	40	14,76	21,67	4,78	87,39	0,982
<b>10</b>	50	40	15,85	21,54	5,00	80,50	0,980
<b>11</b>	50	40	13,23	20,22	5,63	91,11	0,979

A perda de água da amostra na desidratação osmótica esteve diretamente relacionada com a temperatura e a concentração da solução, assim como o ganho de sólidos e conseqüentemente a atividade de água.

Para a análise estatística do planejamento, foram analisados os efeitos dos fatores (temperatura e concentração) lineares, quadráticos e de interação sobre as respostas. Também foram estimados os erros experimentais, o coeficiente t e a significância estatística (p). O valor do coeficiente t indica o quanto o efeito da variável é maior que o desvio padrão, logo, quanto maior o valor de t, menor será o de p e conseqüentemente aumenta a possibilidade da variável ser estaticamente significativa.

O resultado da análise estatística para os dados experimentais de perda de água (PA) está relatado na tabela 4.5. Os efeitos significativos a 95% de confiança ( $p \leq 0,05$ ) estão em itálico para uma melhor visualização.

**Tabela 4.5 – Análise dos efeitos de cada fator no modelo codificado para a perda de água da amostra numa solução de sacarose, calculado pelo SS Residual.**

Fatores	Efeito	Desvio Padrão	t(5)	p
<i>Média</i>	21,14	0,62	33,93	4,18E-07
CONC (L)	3,67	0,76	4,81	0,0048
CONC (Q)	-0,11	0,91	-0,12	0,9074
TEMP (L)	3,71	0,76	4,86	0,0046
TEMP (Q)	0,40	0,91	0,43	0,6818
CONC x TEMP	0,38	1,08	0,36	0,7360

Obs: (L) linear e (Q) quadrático.

Apenas a média dos ensaios e os fatores lineares apresentaram significância a 95% de confiança e, com exceção da concentração quadrática, todos os parâmetros apresentaram efeito positivo sobre a perda de água da fruta ao longo do processo.

Através da análise de variância (ANOVA) avaliou-se numericamente a significância e a falta de ajuste da regressão sem os fatores não significativos, através do teste F e com 95% de confiança ( $p \leq 0,05$ ).

**Tabela 4.6 – Análise de variância do modelo ajustado para a perda de água da amostra na solução de sacarose.**

ANOVA						R <sup>2</sup>	0,8969
FONTE DE VARIAÇÃO	SQ	GL	MQ	Fcalc	Ftab*	p	
REGRESSÃO	54,55	2	27,27	34,78	4,46	0,0001	
RESÍDUOS	6,27	8	0,78				
FALTA DE AJUSTE	4,99	6	0,83	1,30	19,33		
ERRO PURO	1,28	2	0,64				
TOTAL	60,82	10					

\*Valores tabelados de F a  $p \leq 0,05$ .

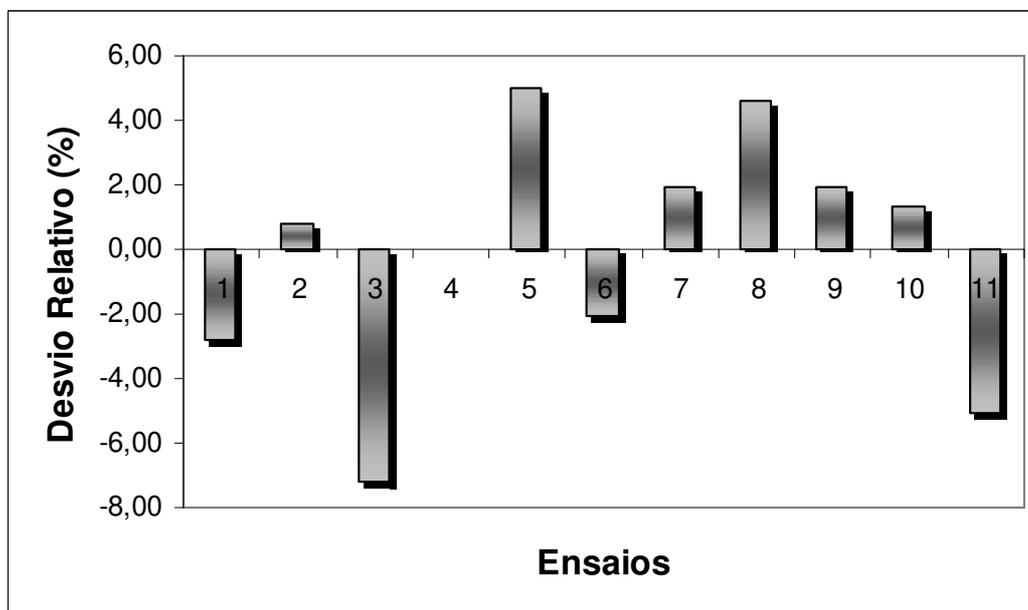
OBS: SQ – soma quadrática; GL – grau de liberdade; MQ – média quadrática.

O modelo matemático codificado para a perda de água do abacaxi na desidratação osmótica com solução de sacarose, com o tempo de processo de 2 horas e agitação constante de 100rpm é representado pela equação 4.1.

$$PA = 21,25 + 1,84C + 1,86T \quad (4.1)$$

A equação que prediz a perda de água (equação 4.1) mostra que apenas os efeitos lineares foram significativos. O modelo apresentou regressão significativa ao nível de 95% de confiança, apresentando F calculado oito vezes superior ao F tabelado. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para o modelo matemático foi elevado (0,8969), a falta de ajuste foi baixa (F calculado bastante inferior ao F tabelado) e a repetição no ponto central foi boa.

A figura 4.1 apresenta os desvios relativos entre os valores experimentais e os valores previstos pelo modelo matemático codificado para a perda de água (equação 4.1).



**Figura 4.1 – Desvio relativo para a perda de água na desidratação osmótica com soluções de sacarose.**

Os desvios relativos entre os dados observados e os preditos pelo modelo foram pequenos, confirmando a eficiência do modelo.

A figura 4.2 apresenta a superfície de resposta para a perda de água através do modelo proposto (equação 4.1), variando os valores de concentração da solução e da temperatura.

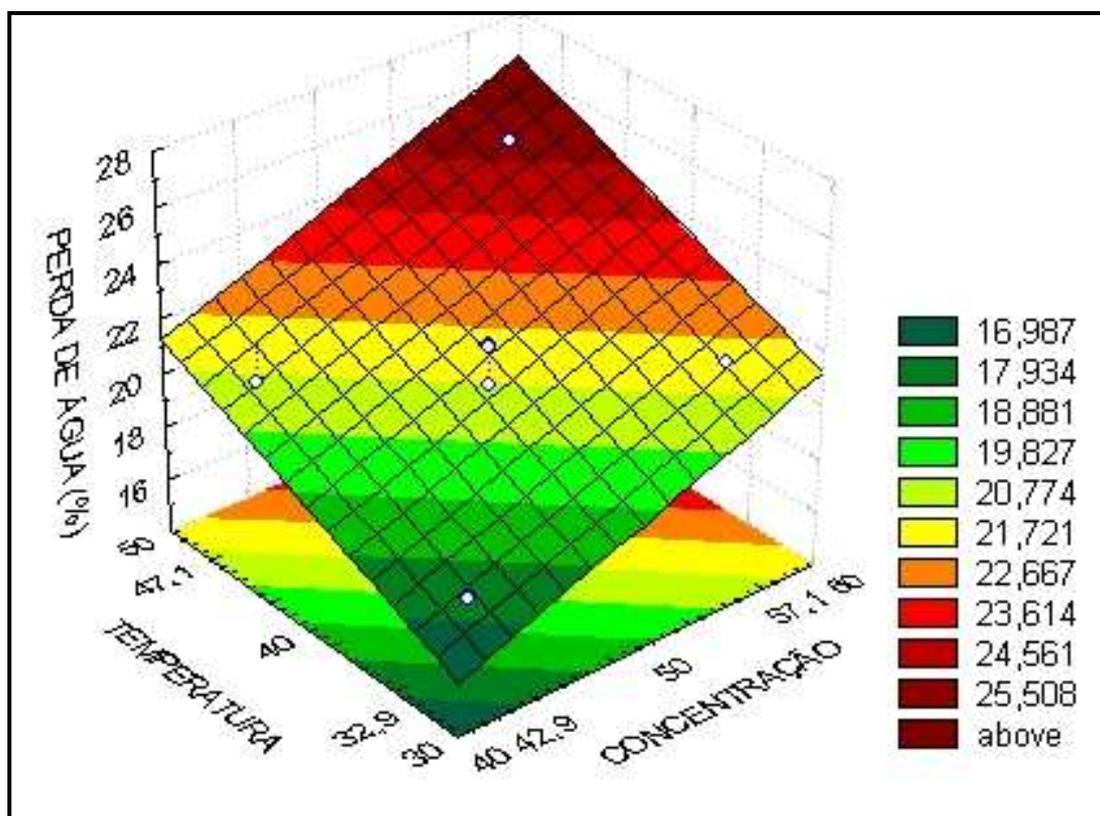


Figura 4.2 – Superfície de resposta para a perda de água em função da temperatura e concentração, para a desidratação com soluções de sacarose.

Pode se observar que as interferências da temperatura e da concentração da solução são semelhantes, ou seja, a perda máxima de água no processo ocorre com altas temperaturas (50°C) e concentrações da solução igualmente elevadas. No entanto, o uso de temperaturas altas durante o processo deve ser evitado, por causar alterações na estrutura da membrana celular e resultar na perda da seletividade, com conseqüente aumento da permeabilidade da parede celular, o que acarreta na perda considerável de sólidos naturais e

numa maior incorporação de soluto pela fruta. Além de mudanças significativas na textura e composição centesimal do abacaxi, com perda dos valores nutritivos decorrentes da transferência de sais minerais e vitaminas à solução desidratante, temperaturas excessivas também causam alteração na cor, depreciando o valor sensorial da fruta.

A tabela 4.7 apresenta o resultado da análise estatística dos efeitos significativos de cada fator no ganho de sólidos (GS) do produto na desidratação osmótica, no período de duas horas de processamento. Os efeitos significativos a 95% de confiança ( $p \leq 0,05$ ) estão em itálico para uma melhor visualização.

**Tabela 4.7 – Análise dos efeitos de cada fator no modelo codificado para o ganho de sólidos da amostra numa solução de sacarose, calculado pelo SS Residual.**

<b>Fatores</b>	<b>Efeito</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>t(5)</b>	<b>p</b>
<i>Média</i>	6,53	0,78	16,85	1,35E-05
<i>CONC (L)</i>	2,42	0,48	5,10	0,0038
CONC (Q)	-0,16	0,56	-0,30	0,7766
<i>TEMP (L)</i>	2,14	0,48	4,49	0,0065
TEMP (Q)	0,30	0,56	0,54	0,6122
CONC x TEMP	-1,06	0,68	-1,57	0,1778

Obs: (L) linear e (Q) quadrático.

Apenas a média dos ensaios e os fatores lineares apresentaram significância a 95% de confiança, e com exceção da temperatura quadrática, todos os demais parâmetros apresentaram efeito positivo sobre o ganho de sólidos do abacaxi ao longo do processo.

Através da análise de variância (ANOVA) avaliaram-se numericamente a significância e a falta de ajuste da regressão sem os fatores não significativos, através do teste F e com 95% de confiança ( $p \leq 0,05$ ).

**Tabela 4.8 – Análise de variância do modelo ajustado para o ganho de sólidos da amostra na solução de sacarose.**

ANOVA	$R^2$ 0,8528					
FONTE DE VARIÇÃO	SQ	GL	MQ	Fcalc	Ftab*	p
REGRESSÃO	20,82	2	10,41	23,18	4,46	0,0005
RESÍDUOS	3,59	8	0,45			
FALTA DE AJUSTE	2,53	6	0,42	0,80	19,33	
ERRO PURO	1,06	2	0,53			
<b>TOTAL</b>	<b>24,42</b>	<b>10</b>				

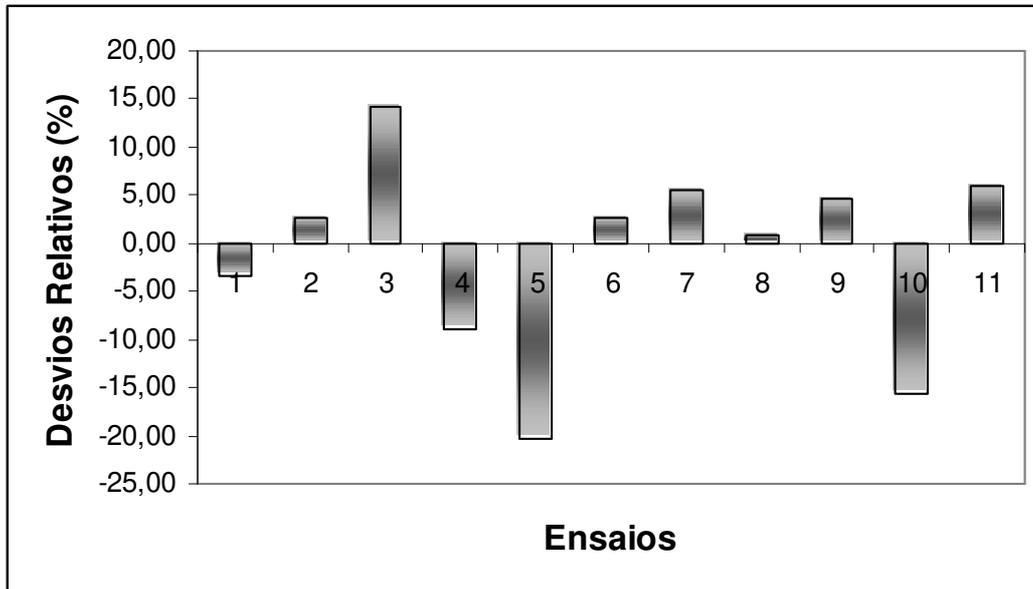
\*Valores tabelados de F a  $p \leq 0,05$ .

O modelo matemático codificado para o ganho de sólidos do abacaxi na desidratação osmótica com solução de sacarose, com o tempo de processo de 2 horas e agitação constante de 100rpm é representado pela equação 4.2.

$$GS = 6,58 + 1,21C + 1,07T \quad (4.2)$$

Nessa equação, que prediz o ganho de sólidos, observa-se que apenas os efeitos lineares foram significativos. O modelo apresentou regressão significativa ao nível de 95% de confiança, apresentando F calculado quase seis vezes superior ao F tabelado. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para o modelo matemático foi elevado (0,8528), a falta de ajuste foi baixa (F calculado bastante inferior ao F tabelado) e a repetibilidade no ponto central foi boa.

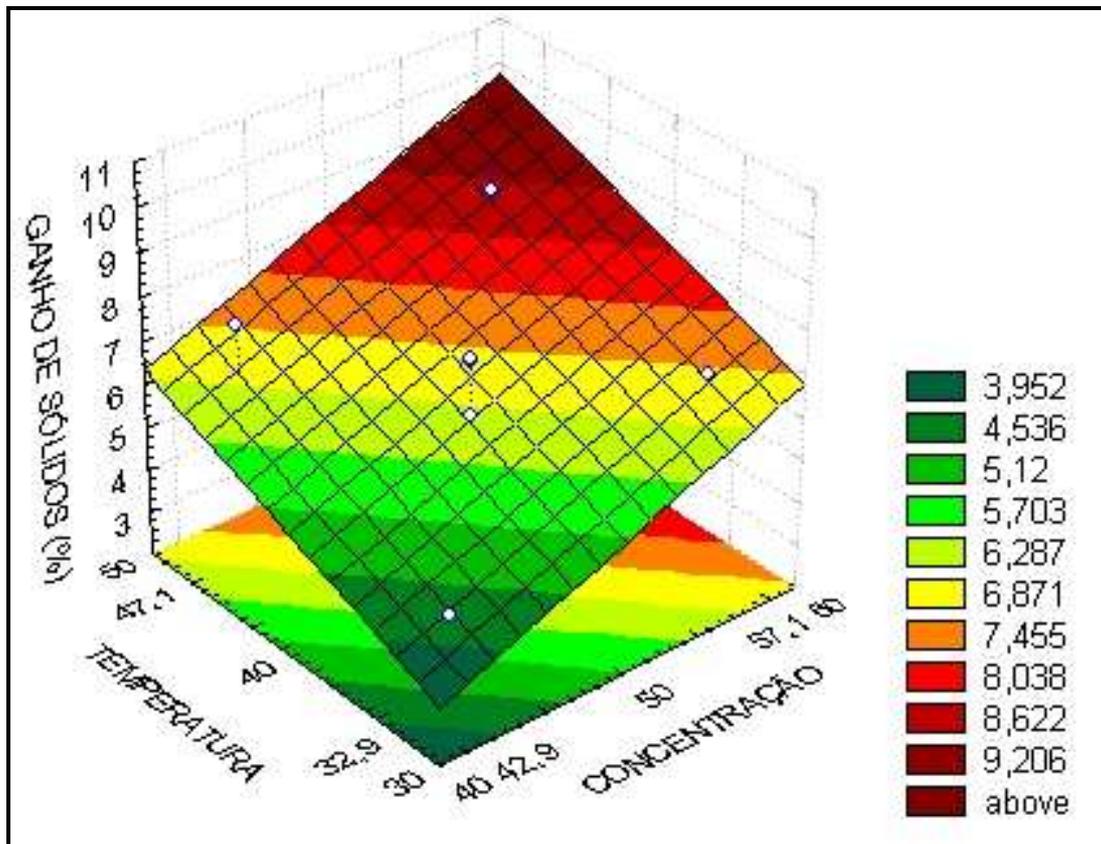
A figura 4.3 apresenta os desvios relativos entre os valores experimentais e os valores previstos pelo modelo codificado para o ganho de sólidos (equação 4.2).



**Figura 4.3 – Desvio relativo para o ganho de sólidos na desidratação osmótica com soluções de sacarose.**

Os desvios relativos entre os dados observados e os preditos pelo modelo apresentaram em geral valores baixos, confirmando a eficiência do modelo. O desvio relativo para o ensaio 5 foi elevado, entretanto é apenas um valor pontual e situado em um ponto axial.

A figura 4.4 apresenta a superfície de resposta para o ganho de sólidos através do modelo proposto (equação 4.2), variando os valores de concentração da solução e temperatura.



**Figura 4.4 – Superfície de resposta para o ganho de sólidos em função da temperatura e concentração, para a desidratação com soluções de sacarose.**

Através da superfície de resposta (figura 4.4) observa-se que a interferência da concentração da solução é levemente superior à da temperatura, na incorporação de sólidos, ao longo da desidratação osmótica.

#### **4.2.2 Desidratação osmótica do abacaxi com solução de maltose**

O estudo do comportamento do abacaxi durante a desidratação osmótica com solução de maltose foi realizado semelhantemente ao planejamento experimental utilizado para o tratamento com solução de sacarose, ou seja, um planejamento fatorial completo, com 11 ensaios, e tendo como variáveis independentes a concentração da solução (40 a 60%) e a temperatura do processo (30 a 50°C), conforme mostram as tabelas 3.1 e 3.2.

As condições iniciais da matéria-prima para os ensaios de desidratação osmótica com a solução de maltose são mostrados na tabela 4.9 a seguir:

**Tabela 4.9 – Características iniciais do abacaxi para o tratamento osmótico com solução de maltose.**

Análise	Valor Médio
Umidade (base úmida) (%)	85,50 ± 1,61
Atividade de Água (25°C)	0,987 ± 0,003
Açúcares totais (g/100mL)	12,55 ± 0,89
Sólidos Solúveis (°Brix)	12,54 ± 0,70

O planejamento experimental obteve as seguintes respostas, após 2 horas de processo e com agitação constante de 100 rpm: perda de peso (PP), perda de água (PA), ganho de sólidos (GS), variação do teor de sólidos solúveis (VSS) e atividade de água (Aw). Os resultados são mostrados na tabela 4.10.

**Tabela 4.10 – Respostas do planejamento fatorial completo na desidratação osmótica do abacaxi com solução de maltose.**

Ensaio	Conc (%)	T (°C)	PP (%)	PA (%)	GS (%)	VSS (%)	Aw
1	42,9	32,9	16,48	19,82	2,45	46,36	0,981
2	57,1	32,9	17,14	23,90	3,00	53,20	0,980
3	42,9	47,1	18,82	26,00	3,20	55,46	0,980
4	57,1	47,1	21,19	30,71	4,49	71,54	0,977
5	40	40	16,10	21,90	1,40	36,97	0,981
6	60	40	18,25	29,94	4,10	75,22	0,972
7	50	30	16,02	19,78	1,83	42,31	0,981
8	50	50	20,36	24,51	4,55	65,71	0,981
9	50	40	14,76	21,67	4,78	87,39	0,982
10	50	40	15,85	21,54	5,00	80,50	0,980
11	50	40	13,23	20,22	5,63	91,11	0,979

A análise estatística do planejamento ocorreu em conformidade com a descrição no item 4.2.1, mantendo os mesmos princípios utilizados para a verificação dos resultados experimentais obtidos nos ensaios com a solução de sacarose.

Os dados experimentais para a perda de água (PA) foram analisados para a observação de significância dos efeitos a 95% de confiança ( $p \leq 0,05$ ). O resultado da análise dos fatores do modelo pode ser conferido na tabela 4.11, e os efeitos significativos estão em itálico, para uma melhor visualização.

**Tabela 4.11 – Análise dos efeitos de cada fator no modelo codificado para a perda de água da amostra numa solução de maltose, calculado pelo SS Residual.**

<b>Fatores</b>	<b>Efeito</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>t(5)</b>	<b>p</b>
<i>Média</i>	24,42	0,74	32,99	4,81E-07
<i>CONC (L)</i>	5,04	0,91	5,56	0,0026
CONC (Q)	2,04	1,08	1,89	0,1172
<i>TEMP (L)</i>	4,92	0,91	5,42	0,0029
TEMP (Q)	-1,74	1,08	-1,61	0,1684
CONC x TEMP	0,32	1,28	0,25	0,8147

Obs: (L) linear e (Q) quadrático.

Apenas a média dos ensaios e os fatores lineares apresentaram significância a 95% de confiança, e com exceção da temperatura quadrática, todos os demais parâmetros apresentaram efeito positivo sobre a perda de água do abacaxi ao longo do processo.

**Tabela 4.12 – Análise dos efeitos de cada fator no modelo codificado para a perda de água da amostra numa solução de maltose, calculado pelo Erro Puro.**

<b>Fatores</b>	<b>Efeito</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>t(5)</b>	<b>p</b>
<i>Média</i>	24,42	0,14	171,25	3,41E-05
<i>(1) CONC (L)</i>	5,04	0,17	28,87	0,0012
<i>CONC (Q)</i>	2,04	0,21	9,82	0,0102
<i>(2) TEMP (L)</i>	4,92	0,17	28,16	0,0013
<i>TEMP (Q)</i>	-1,74	0,21	-8,36	0,0140
CONC x TEMP	0,32	0,25	1,28	0,3281

Obs: (L) linear e (Q) quadrático.

De acordo com a análise dos efeitos pelo Erro Puro, verifica-se que a concentração e a temperatura quadrática estão dentro do limite de confiança de 95%, podendo ser considerado fatores significativos para o modelo matemático de perda de água.

Através da análise de variância (ANOVA) verificou-se a significância e a falta de ajuste da regressão com a ausência dos fatores não significativos, através do teste F e com 95% de confiança ( $p \leq 0,05$ ).

**Tabela 4.13 – Análise de variância do modelo ajustado para a perda de água da amostra em soluções com maltose.**

ANOVA	$R^2$ 0,9317					
FONTE DE VARIÇÃO	SQ	GL	MQ	F <sub>calc</sub>	F <sub>tab</sub> *	p
REGRESSÃO	113,52	4	28,38	20,47	4,53	0,0012
RESÍDUOS	8,32	6	1,39			
FALTA DE AJUSTE	8,20	4	2,05	33,60	19,25	
ERRO PURO	0,12	2	0,06			
<b>TOTAL</b>	<b>121,84</b>	<b>10</b>				

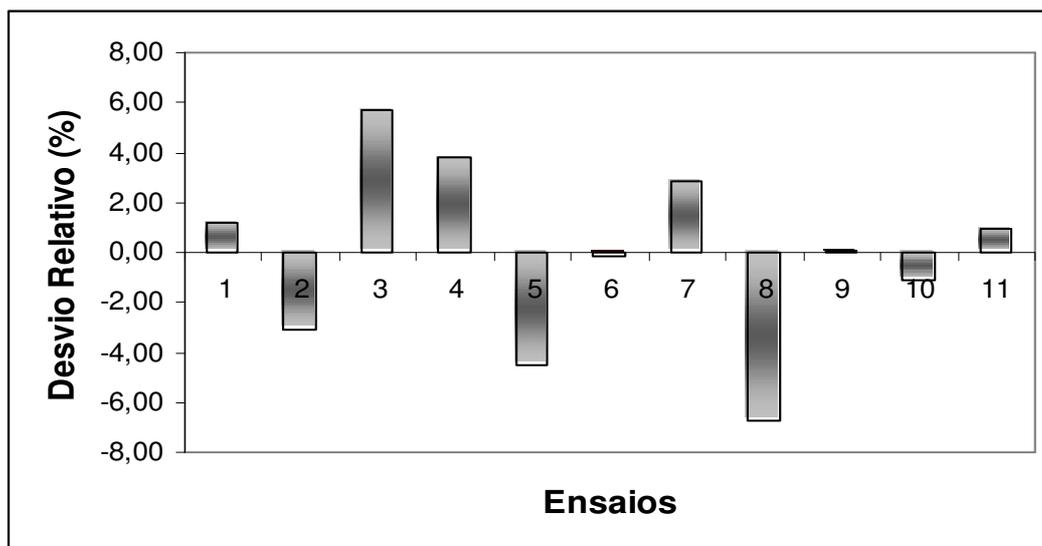
\*Valores tabelados de F a  $p \leq 0,05$ .

O modelo matemático codificado para a perda de água do abacaxi na desidratação osmótica com solução de maltose, por duas horas de processo e em agitação constante (100rpm) é representado pela equação 4.3.

$$PA = 24,52 + 2,52C + 1,02C^2 + 2,46T - 0,87T^2 \quad (4.3)$$

A equação 4.3 mostra que apenas o efeito de interação entre a concentração e a temperatura não foi significativo. O modelo apresentou regressão significativa ao nível de 95% de confiança, apresentando F calculado quase cinco vezes superior ao F tabelado. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para o modelo matemático foi elevado (0,9317). Por sua vez, a falta de ajuste foi alta (F calculado superior ao F tabelado) e a repetição no ponto central foi ótima.

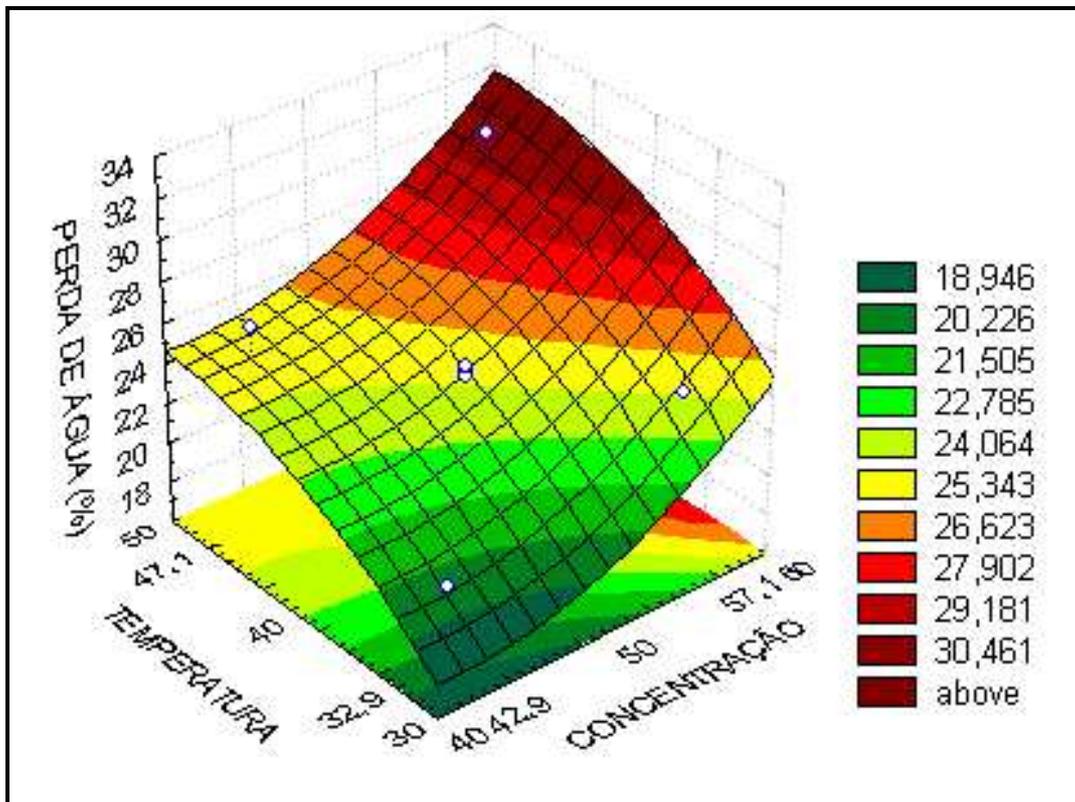
Os desvios relativos entre os valores experimentais e os valores previstos pelo modelo matemático codificado para a perda de água (equação 4.3) foram pequenos, inferiores a 7%, confirmando a eficiência do modelo. A figura (4.5) mostra a relação entre os dados observados e os dados preditos pelo modelo, na forma de desvio relativo.



**Figura 4.5 – Desvio relativo para a perda de água na desidratação osmótica com soluções de maltose.**

O ensaio 8 do planejamento experimental foi o que apresentou maior desvio relativo para a perda de água (6,73%), o que se justifica por estar num ponto axial e conseqüentemente mais susceptível a desvios elevados.

Na figura 4.6 observa-se a superfície de resposta para a perda de água através do modelo proposto (equação 4.3), variando os valores de concentração da solução e temperatura. A interferência da concentração da solução na perda de água da amostra é mais relevante do que a temperatura, ou seja, a perda máxima de água no processo ocorre com altas concentrações da solução, embora a temperatura não necessite ser tão elevada.



**Figura 4.6 – Superfície de resposta para a perda de água em função da temperatura e concentração, para a desidratação com soluções de maltose.**

Com relação ao ganho de sólidos, na tabela 4.14 são vistos os resultados da análise estatística dos efeitos significativos de cada fator nesta resposta, no período de duas horas de processamento. Os efeitos significativos a 95% de confiança ( $p \leq 0,05$ ) estão em itálico para uma melhor visualização.

**Tabela 4.14 – Análise dos efeitos de cada fator no modelo codificado para o ganho de sólidos da amostra numa solução de maltose, calculado pelo SS Residual.**

<b>Fatores</b>	<b>Efeito</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>t(5)</b>	<b>p</b>
<i>Média</i>	2,56	0,35	7,37	7,21E-04
<i>CONC (L)</i>	1,41	0,42	3,33	0,0207
CONC (Q)	0,35	0,51	0,70	0,5165
<i>TEMP (L)</i>	1,52	0,42	3,58	0,0159
TEMP (Q)	0,79	0,51	1,57	0,1769
CONC x TEMP	0,37	0,60	0,61	0,5672

Obs: (L) linear e (Q) quadrático.

Embora todos os fatores tenham apresentado efeito positivo no ganho de sólidos da fruta durante o processo, apenas a média dos ensaios e os parâmetros lineares apresentaram significância para o modelo codificado, no intervalo de 95% de confiança.

A significância e a falta de ajuste da regressão, excluindo-se os fatores não significativos, foi avaliada através da análise de variância (ANOVA), por meio do teste F e considerando o intervalo de 95% de confiança ( $p \leq 0,05$ ).

**Tabela 4.15 – Análise de variância do modelo ajustado para o ganho de sólidos da amostra na solução de maltose.**

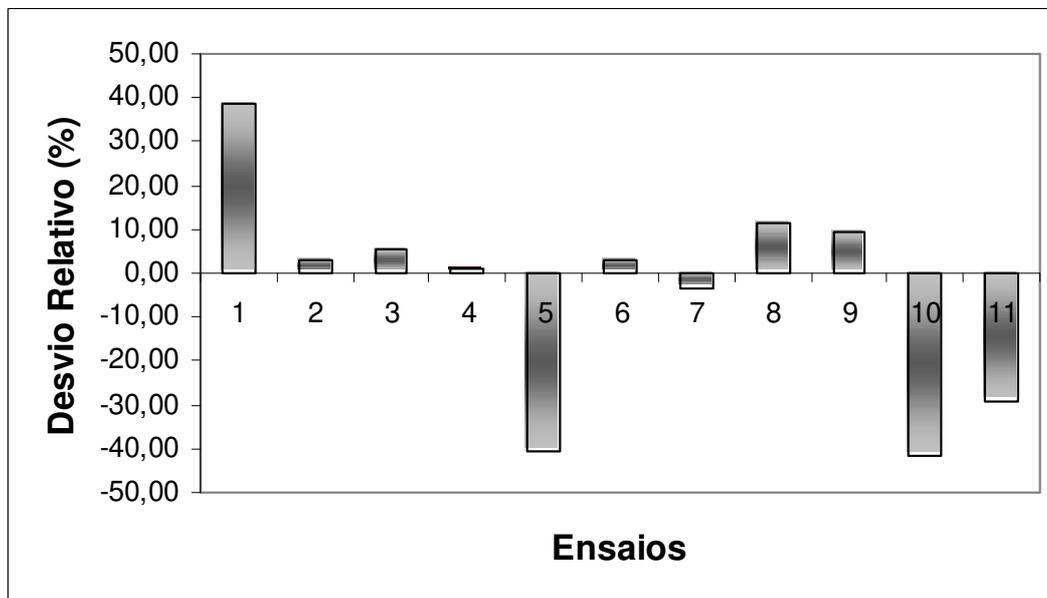
ANOVA						R <sup>2</sup>	0,7517
FONTE DE VARIAÇÃO	SQ	GL	MQ	F <sub>calc</sub>	F <sub>tab</sub> *	p	
REGRESSÃO	8,62	2	4,31	12,11	4,46	0,0038	
RESÍDUOS	2,85	8	0,36				
FALTA DE AJUSTE	2,06	6	0,34	0,87	19,33		
ERRO PURO	0,79	2	0,39				
TOTAL	11,47	10					

\*Valores tabelados de F a  $p \leq 0,05$ .

O modelo matemático codificado para o ganho de sólidos do abacaxi na desidratação osmótica com solução de maltose, com o tempo de processo de 2 horas e agitação constante de 100rpm é representado pela equação 4.4.

$$GS = 2,97 + 0,71C + 0,76T \quad (4.4)$$

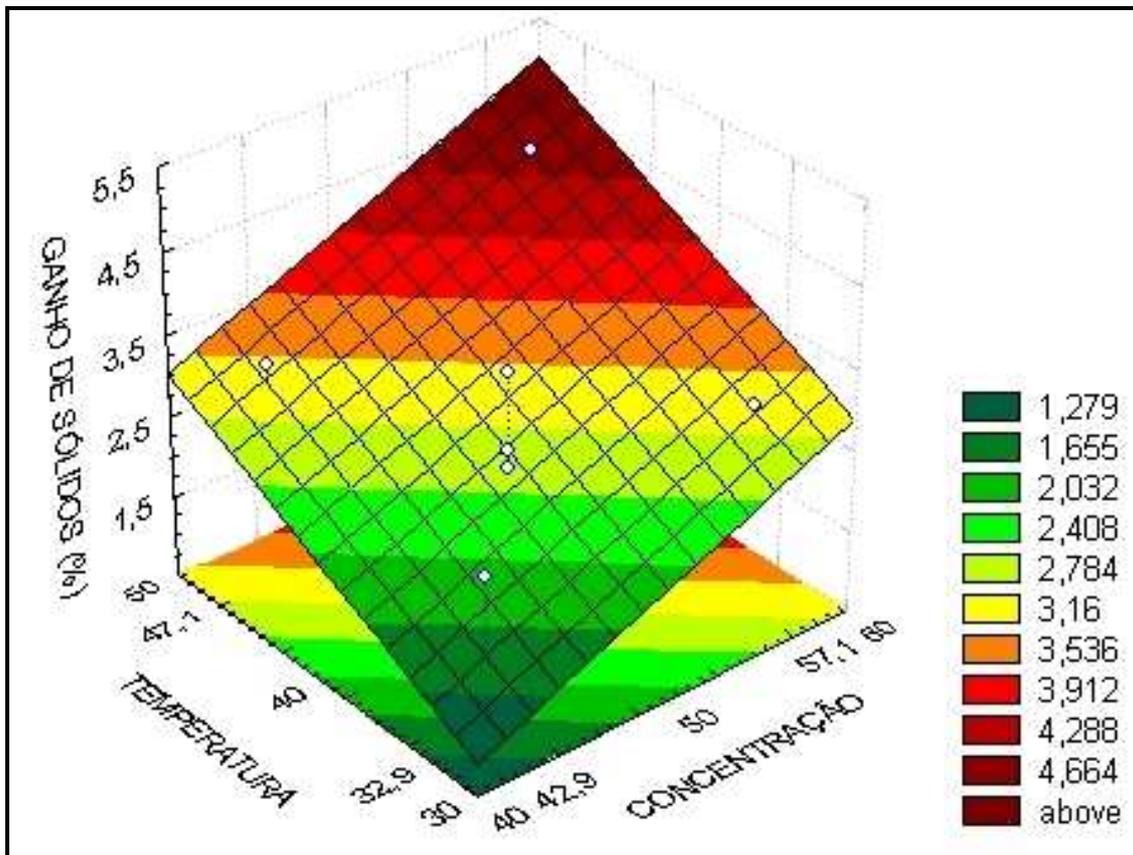
Diferentemente do modelo para a perda de água (equação 4.3), na equação 4.4, que prediz o ganho de sólidos, observa-se que apenas os efeitos lineares foram significativos, e ainda que a influência da temperatura é levemente superior àquela da concentração da solução, para o ganho de sólidos no decorrer do processo. O modelo apresentou regressão significativa ao nível de 95% de confiança, embora o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) para o modelo matemático tenha sido baixo (0,7517). Em relação ao teste F, o valor do F calculado foi quase três vezes superior ao F tabelado, enquanto a falta de ajuste foi elevada e a repetibilidade no ponto central não foi boa.



**Figura 4.7 – Desvio relativo para o ganho de sólidos na desidração osmótica com soluções de maltose.**

O modelo explica apenas 75,17% da variação dos dados observados. De acordo com a figura 4.7, podemos notar que as repetições no ponto central, o ensaio 5 do ponto axial e o desvio pontual elevado no ensaio 1 são os responsáveis pelo valor elevado da falta de ajuste do modelo (equação 4.4).

A figura 4.8 apresenta a superfície de resposta para o ganho de sólidos através do modelo proposto (equação 4.4), variando os valores de concentração da solução e temperatura. Observando a figura, nota-se que a interferência da concentração da solução é levemente superior à influência da temperatura na incorporação de sólidos ao longo da desidração osmótica, e que o incremento da concentração da solução para baixas temperaturas do processo não resultam em valores altos de incorporação de sólidos pelo abacaxi.



**Figura 4.8 – Superfície de resposta para o ganho de sólidos em função da temperatura e concentração, para a desidratação com soluções de maltose.**

#### **4.2.3 Comparação do efeito das diferentes soluções desidratantes no abacaxi**

Os modelos matemáticos propostos para a perda de água (equação 4.1 e 4.3) e ganho de sólidos (equação 4.2 e 4.4) mostraram que a temperatura e a concentração da solução têm efeito significativo na transferência de massa no abacaxi durante a desidratação osmótica.

Verificou-se que com o aumento da temperatura e da concentração de sacarose na solução, a perda de água e o ganho de sólidos foi maior; o mesmo fenômeno foi observado em relação ao processo utilizando maltose como agente desidratante. Nos modelos 4.1 e 4.4 nota-se que a interferência das variáveis é semelhante, entretanto, as equações 4.2 e 4.3 indicam que a variável T (temperatura) apresenta coeficientes menores,

ou seja, ao longo do processo a perda de água da amostra em soluções de sacarose é influenciada de maneira mais efetiva pela variação da concentração do que pela temperatura da solução, o mesmo ocorre para o ganho de sólidos nas soluções de maltose. WALISZEWSKI *et al.* (2002) e RAMALLO *et al.* (2004) concluíram em seus trabalhos que o efeito da temperatura na desidratação osmótica de abacaxi não é tão importante quanto o aumento da concentração da solução, para perda de água e ganho de sólidos.

RAHMAN E LAMB (1990), SILVEIRA *et al.* (1996) e SAPUTRA (2001) por sua vez, observaram que durante a desidratação osmótica do abacaxi com as mesmas soluções de sacarose, o uso de temperatura elevada resultou no aumento da solubilidade do açúcar e da pressão osmótica da solução, afetando a permeabilidade da membrana da fruta e, conseqüentemente, facilitando a transferência de massa durante o processo. Os autores observaram, entretanto, que temperaturas acima de 50°C não apresentaram diferença significativa na remoção de água do material, apenas ocasionaram aumento na incorporação de solutos.

Os resultados obtidos revelaram que a maltose mostrou-se um agente osmótico mais eficiente que a sacarose para maximizar a perda de água e minimizar o ganho de sólidos. De acordo com os ensaios, para os mesmos valores das variáveis independentes, a remoção de água da amostra durante a desidratação osmótica com solução de maltose foi 10 a 15% superior do que quando se usava sacarose como soluto. Para o ganho de sólidos ao longo do processo, a solução de sacarose apresentou uma incorporação de soluto entre 50 e 65% superior à solução de maltose.

Uma explicação plausível para uma menor incorporação de solutos no abacaxi pode ser o massa molecular superior da maltose em relação à sacarose. A eficiência da maltose como agente desidratante foi confirmada também pelos autores ARGAIZ *et al.* (1994) na desidratação osmótica de mamão papaia e DEL VALLE *et al.* (1998) na desidratação de maçã, que estudaram a influência do açúcar na transferência de massa das amostras no processo osmótico e na qualidade do produto final, bem como na preservação da textura.

Ao estudarem a cinética da desidratação osmótica do melão, utilizando dois agentes desidratantes diferentes, os dissacarídeos sacarose e maltose, FERRARI *et al.* (2005) verificaram que os ensaios realizados com maltose apresentaram uma taxa maior de saída de água e uma menor impregnação final de solutos na fruta.

#### **4.2.4 Melhores condições de tratamento osmótico do abacaxi para uma posterior secagem**

A maximização da perda de água não é suficiente para alcançar as melhores condições de processamento, uma vez que isso resultaria em produtos com alta incorporação de solutos. Em contra partida, uma minimização do ganho de sólidos resultaria num produto com baixa perda de água.

O critério adotado para a indicação das melhores condições de processamento foi a relação ganho de sólidos por perda de água (GS/PA), ou seja, quanto menor o valor dessa relação, menor será o ganho de sólidos e maior a perda de água do produto no processo para um mesmo ensaio. Além do adimensional GS/PA, foram excluídas da análise do tratamento osmótico as variáveis que envolviam temperaturas acima de 45°C, pois a temperaturas elevadas de processo ocorreu escurecimento enzimático e deterioração do *flavor* das amostras (TORREGIANI, 1993).

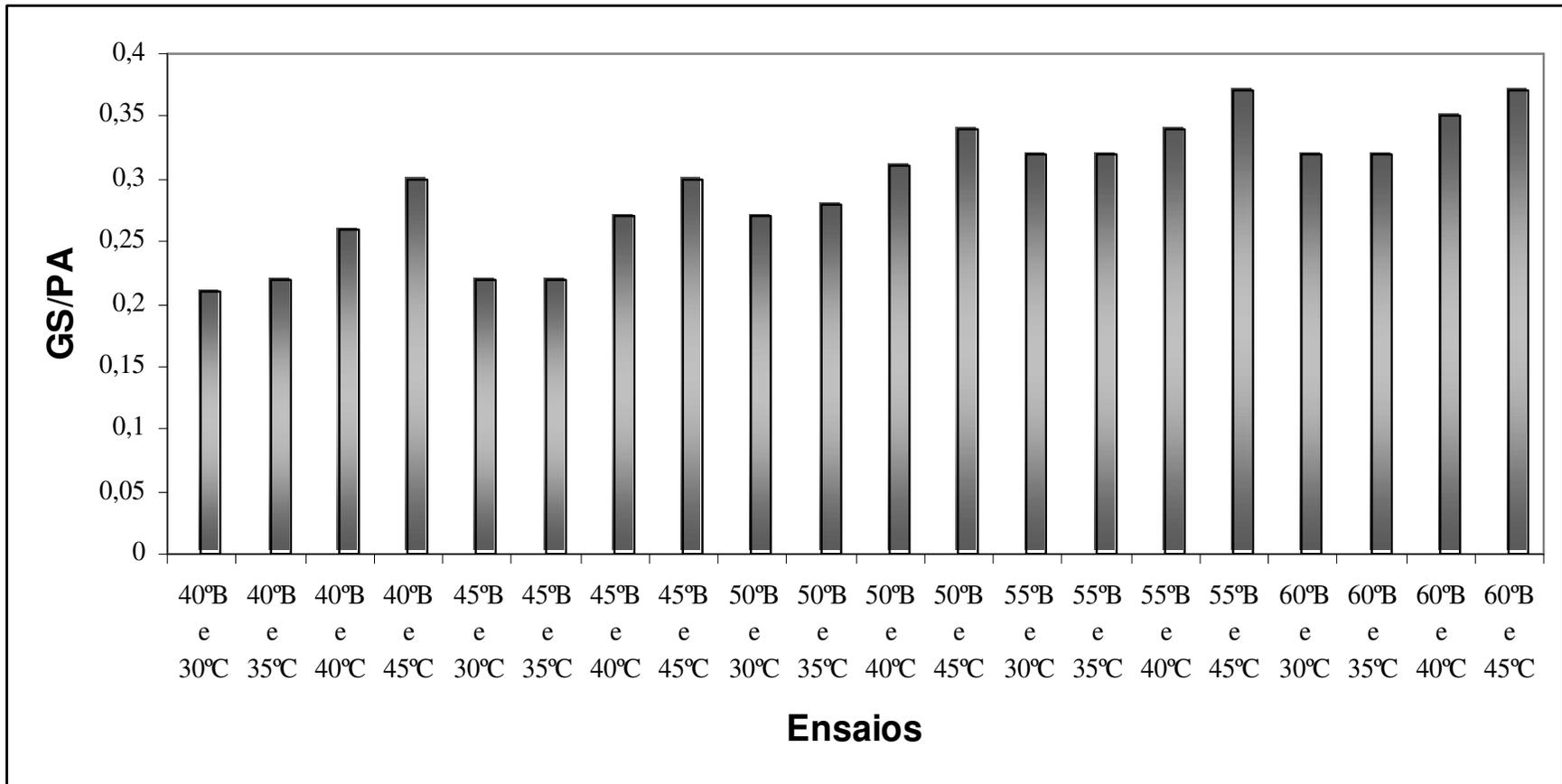
As figuras 4.9 e 4.10 mostram a relação GS/PA para as amostras desidratadas osmoticamente em conformidade com os modelos matemáticos (equações 4.1-4) pré-estabelecidos no item 4.2.1 para o tratamento com solução de sacarose e no item 4.2.2 para o tratamento com solução de maltose (Apêndice III).

Pela figura 4.9, nota-se que os valores mais baixos para a relação GS/PA encontram-se nas faixas de 40 e 45°Brix de concentração de sacarose e entre 30 e 35°C de temperatura da solução. Essa região delimitada apresenta resultados com menor impregnação de soluto na fruta, o que favorece a etapa posterior de secagem, uma vez que

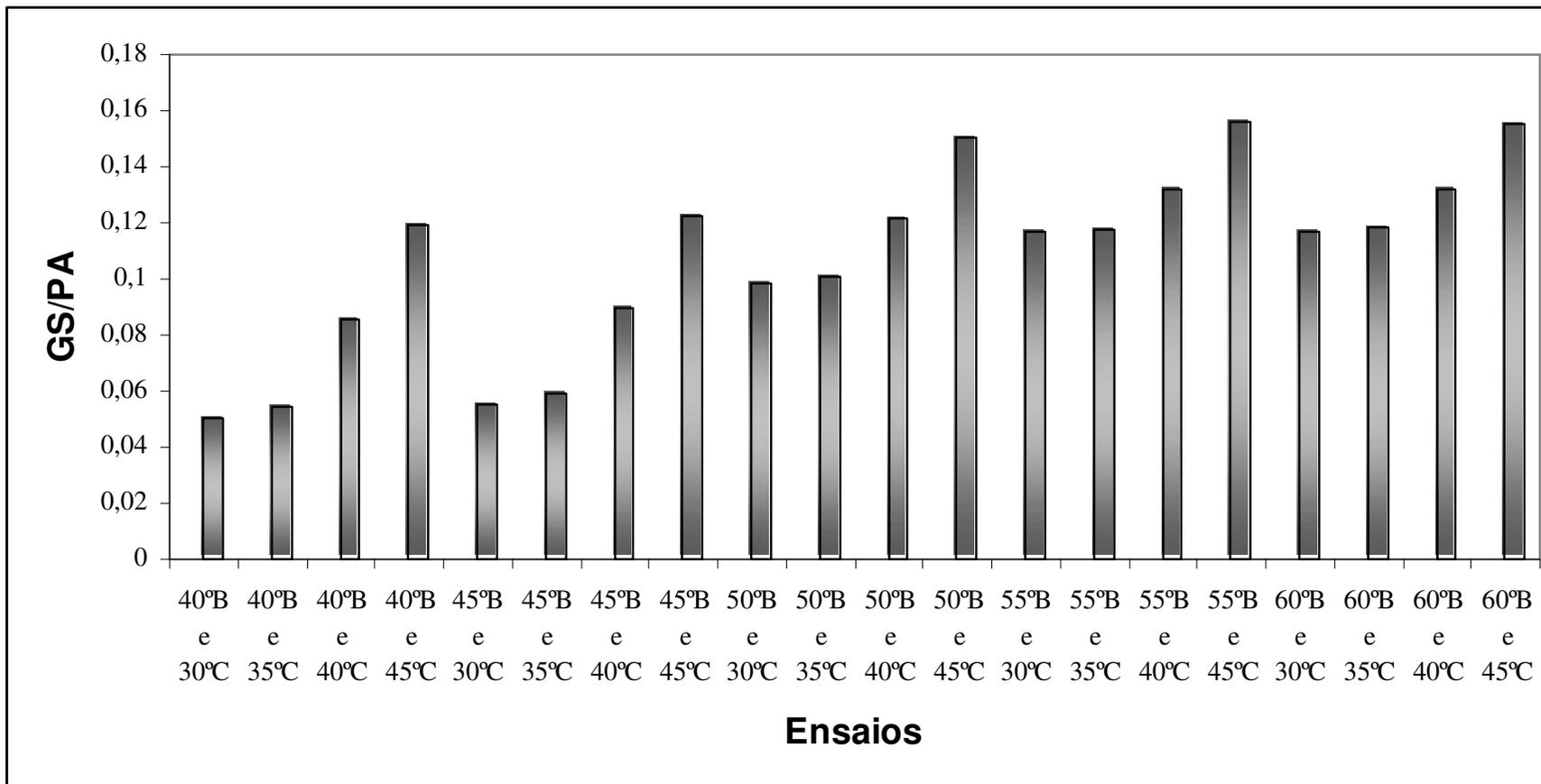
essa camada de sólidos que se forma na parede celular da amostra pode dificultar a difusão de água ao longo do processo de secagem, retardando o tempo de operação e apresentando um produto final com maior conteúdo de água. Além disso, obtém-se um produto final com menor incorporação de açúcares, algo cada vez mais procurado pelos consumidores.

Já em relação ao tratamento osmótico com soluções de maltose, de acordo com a figura 4.10 a seguir, observa-se que as melhores condições para o processo estão na faixa de 30 a 35°C, com concentração de 50°Brix. Apesar dessas condições escolhidas não apresentarem a menor relação GS/PA, elas ainda apresentam um ganho de sólido bastante inferior (46% menor) ao tratamento com sacarose e um valor de perda de água 15% superior ao mesmo tratamento em comparação.

Logo, para o processo com tempo de duas horas e velocidade de agitação constante de 100 rpm, definiu-se a variável independente da concentração em 40°Brix e em 35°C a temperatura da solução para o pré-tratamento da secagem, com soluções de sacarose, enquanto que para soluções de maltose a concentração e a temperatura da solução foram estabelecidas em 50°Brix e 30°C respectivamente.



**Figura 4.9 – Relação GS/PA para as amostras de abacaxi desidratadas osmoticamente em soluções de sacarose, de acordo com os modelos matemáticos propostos (equação 4.1 e 4.2).**



**Figura 4.10 – Relação GS/PA para as amostras de abacaxi desidratadas osmoticamente em soluções de maltose, de acordo com os modelos matemáticos propostos (equação 4.3 e 4.4).**

### 4.3 Estudo da secagem do abacaxi

As amostras de abacaxi pré-tratadas osmoticamente, nas condições de processo de 40°Brix e 35°C para soluções de sacarose e 50°Brix e 30°C para soluções de maltose, juntamente com amostras de abacaxi *in natura*, foram submetidas à secagem com ar quente. A secagem foi conduzido com temperaturas 50, 60 e 70°C para cada uma das condições das amostras, tendo sido realizado um total de 9 ensaios, como especificado na tabela 3.3. A velocidade do ar de secagem utilizada foi de 1,5 m/s para todos os ensaios.

O abacaxi *in natura*, pré-tratado osmoticamente e desidratado foi caracterizado ao final do processo quanto a: conteúdo de umidade, atividade de água, textura e retenção de cor. A perda de umidade foi determinada para cada um dos ensaios e aplicado ajustes de modelos de cinética de secagem.

As condições iniciais da fruta para os ensaios de secagem estão expostas na tabela 4.16 a seguir.

**Tabela 4.16 – Características iniciais da fruta no processo de secagem, quanto ao conteúdo de umidade (em base úmida e seca) e atividade de água.**

Amostra	Xbu (%)	Xbs (%)	Aw
<i>in natura</i>	82,63 ± 0,91	477,24 ± 29,20	0,988 ± 0,003
pré-tratada (sacarose)	76,20 ± 0,36	320,18 ± 6,30	0,983 ± 0,003
pré-tratada (maltose)	75,72 ± 0,73	312,27 ± 12,41	0,978 ± 0,003

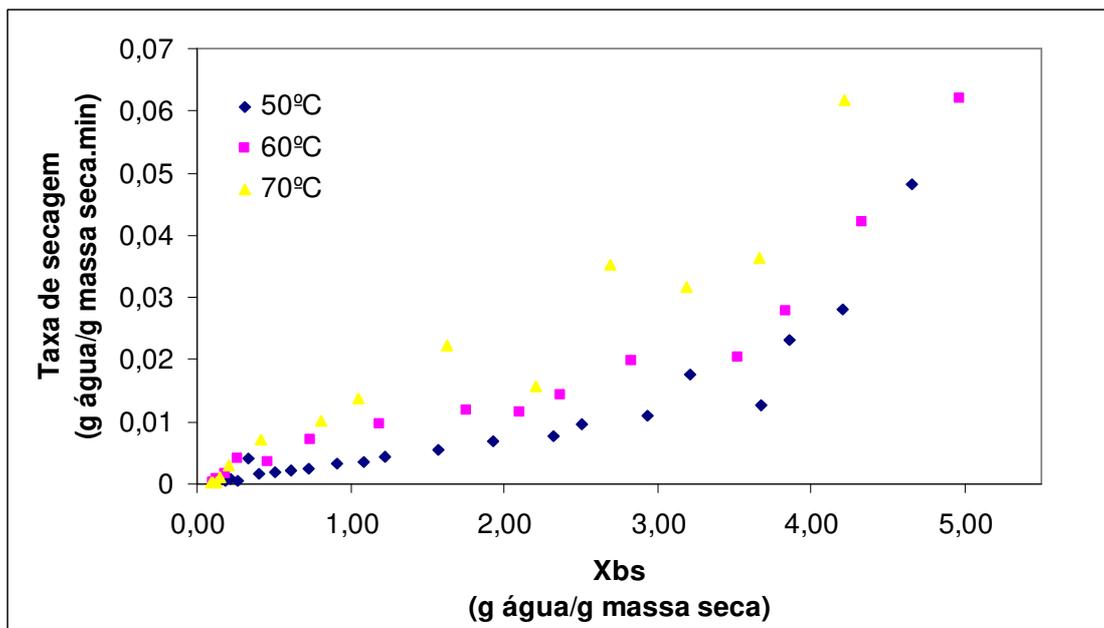
#### 4.3.1 Taxa de secagem

A taxa de secagem refere-se à velocidade com a qual o processo de remoção de água do produto ocorre, sendo quantificada como a variação da massa de água em relação à massa seca do produto por um período de tempo. A determinação da taxa de secagem

auxilia no estudo da cinética da mesma, permitindo a observação do período da secagem ao longo do processo.

Durante a secagem das amostras de abacaxi sejam elas *in natura* ou pré-tratadas, observou-se apenas o período decrescente de secagem. Como discutido anteriormente, na revisão de literatura, o período de velocidade constante é praticamente insignificante em relação ao período total de secagem.

As figuras a seguir (4.11 a 13) mostram o efeito da temperatura sobre a taxa de secagem em relação à umidade em base seca ( $X_{bs}$ ).



**Figura 4.11 – Efeito da temperatura na taxa de secagem do abacaxi *in natura* com velocidade do ar de 1,5 m/s.**

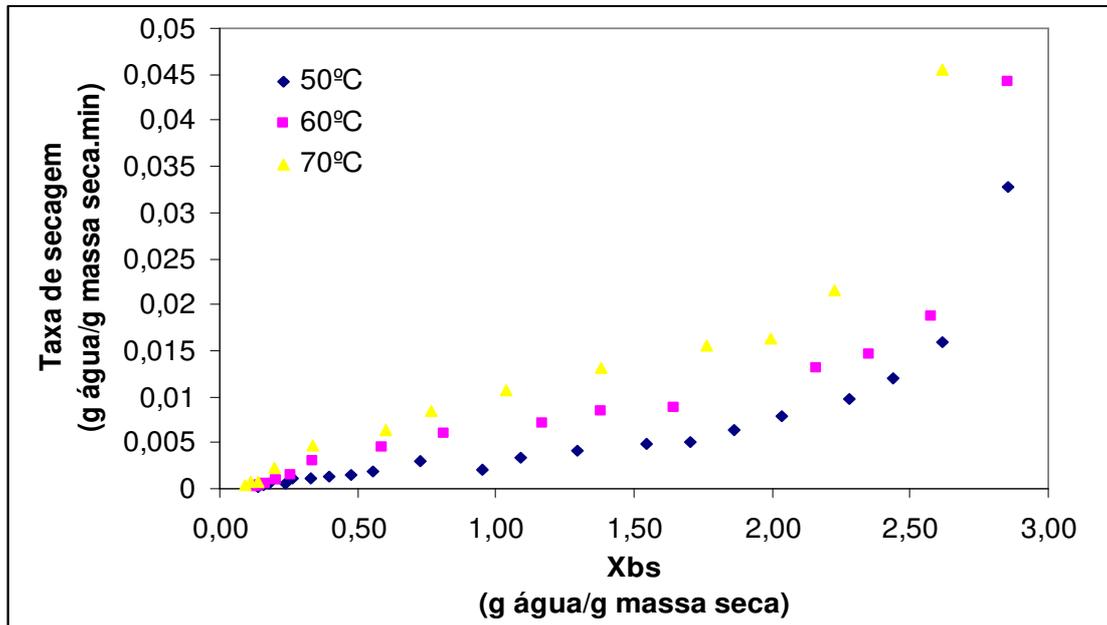


Figura 4.12 – Efeito da temperatura na taxa de secagem do abacaxi desidratado osmoticamente em soluções de sacarose com velocidade do ar de 1,5 m/s.

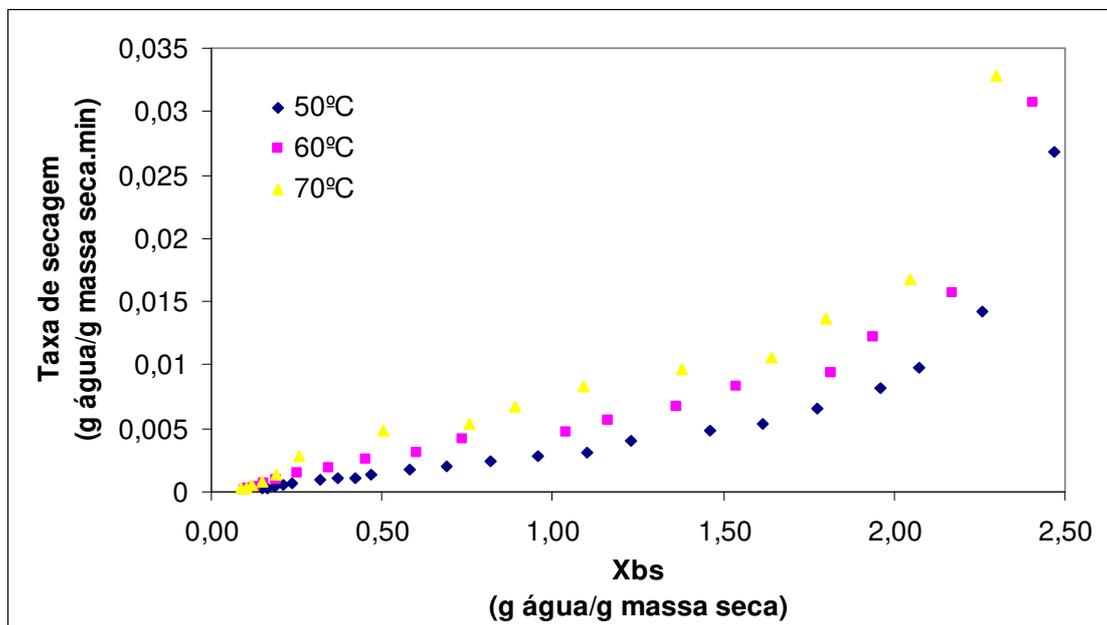


Figura 4.13 – Efeito da temperatura na taxa de secagem do abacaxi desidratado osmoticamente em soluções de maltose com velocidade do ar de 1,5 m/s.

Como era de se esperar, analisando-se as figuras 4.11 a 13 pode-se observar que a elevação da temperatura de secagem resultou num efeito positivo sobre a taxa de secagem, tanto para as amostras frescas como para as pré-tratadas osmoticamente. A cinética de secagem do abacaxi está diretamente relacionada com a temperatura de processo, o aumento na temperatura de secagem irá resultar numa maior transferência de umidade.

Os gráficos da taxa de secagem (figuras 4.11 a 13) também mostram que durante o processo ocorre apenas o período decrescente, indicando assim que o principal mecanismo de migração da água do interior do produto para sua superfície é a difusão. A difusividade pode ser definida como a facilidade com que a água é removida do material, sendo convencionalmente definida como difusividade efetiva, uma vez que ela não é intrínseca ao material, mas varia conforme a temperatura e a velocidade do ar de secagem.

#### **4.3.2 Modelagem matemática**

Os dados experimentais da curva de secagem foram ajustados aos modelo da segunda lei de Fick (equação 2.3) e aos modelos empíricos (equações 2.5 a 7).

##### **4.3.2.1 Modelo de Fick**

De acordo com a lei de Fick, a taxa de secagem está diretamente relacionada ao tempo e a difusividade, e para a caracterização do comportamento deste período faz-se necessário o estudo da difusividade efetiva que rege o comportamento da curva de taxa decrescente.

O modelo de Fick (equação 2.3) foi aplicado para estimar a difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) da amostra de abacaxi, considerando a geometria do produto como placa plana infinita, a transferência de massa unidirecional durante a secagem e a difusividade efetiva constante. O ajuste ao modelo de difusão para placa plana com 5 termos, dos dados

experimentais da curva de secagem ocorreu através da análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando o programa Statistica® 5.0.

Os valores encontrados, bem como os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e os erros relativos médios ( $E$ ) para cada um dos ensaios realizados são apresentados na tabela 4.17.

**Tabela 4.17 – Difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ) estimada pelo modelo de Fick, coeficiente de determinação e erro relativo médio, para a secagem de abacaxi *in natura* e pré-tratado.**

Amostra	T (°C)	$D_{ef}$ ( $10^{10} \text{ m}^2/\text{s}$ )	$R^2$	$E$ (%)
<i>in natura</i>	50	6,24aA	0,998	1,248
<i>in natura</i>	60	10,19bA	0,998	3,484
<i>in natura</i>	70	14,45cA	0,998	2,159
pré-tratada (sacarose)	50	5,82aAB	0,993	0,270
pré-tratada (sacarose)	60	9,57bAB	0,993	1,496
pré-tratada (sacarose)	70	14,11cAB	0,997	1,662
pré-tratada (maltose)	50	5,88aB	0,988	1,941
pré-tratada (maltose)	60	8,46bB	0,992	1,571
pré-tratada (maltose)	70	11,12cB	0,992	2,615

Obs: letras minúsculas iguais representam que não houve diferença significativa em relação à temperatura de secagem, enquanto letras maiúsculas iguais indicam ausência de diferença significativa entre os tipos de pré-tratamento para uma mesma temperatura.

Observa-se na tabela 4.17 que os dados experimentais se ajustaram bem ao modelo de Fick, uma vez que os valores de  $R^2$  foram superiores a 0,988 e valores de erro relativo médio inferiores a 3,5% para todos os ensaios.

De acordo com o teste de Duncan, encontrou-se diferença significativa ao nível de 5% entre a  $D_{ef}$  das amostras *in natura* e aquelas tratadas osmoticamente com maltose, enquanto aquela tratadas osmoticamente com sacarose não apresentaram diferença significativa em relação às amostras frescas ou tratadas com solução de maltose. Também

se observou que existe diferença significativa ao nível de 5% entre a  $D_{ef}$  das amostras secas a diferentes temperaturas, indiferente à presença de pré-tratamento.

As figuras 4.14 a 16 mostram o bom ajuste do modelo de difusão aos dados experimentais de secagem do abacaxi fresco e pré-tratado osmoticamente, confirmando os baixos valores do erro médio relativo (tabela 4.17) para a difusividade efetiva no processo.

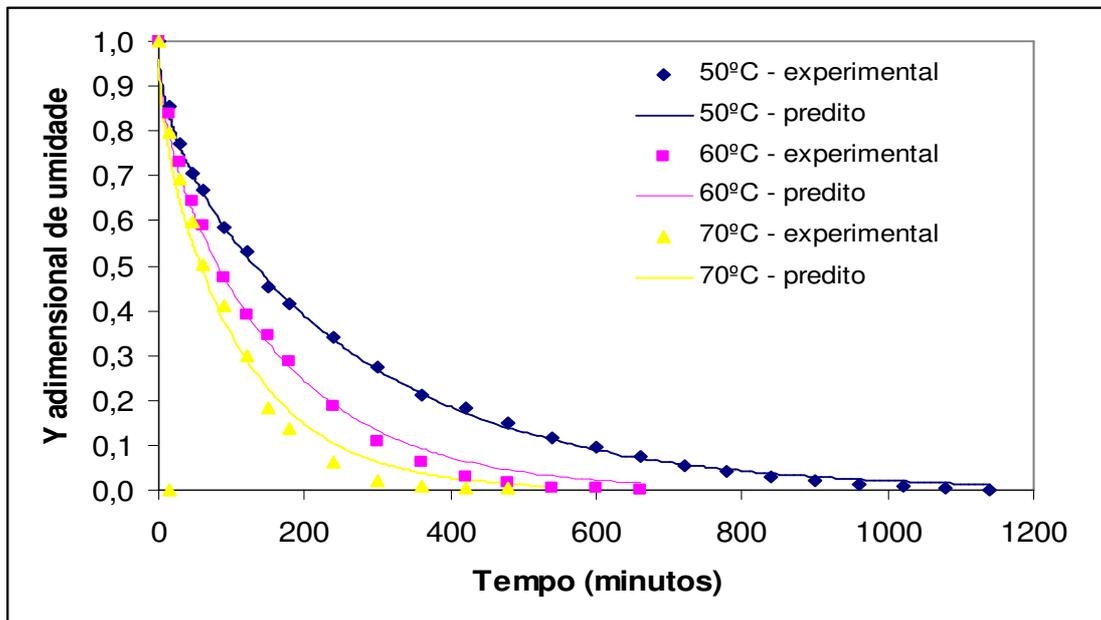


Figura 4.14 – Ajuste ao modelo de Fick dos dados experimentais de secagem de abacaxi *in natura*, para as diferentes temperaturas de secagem.

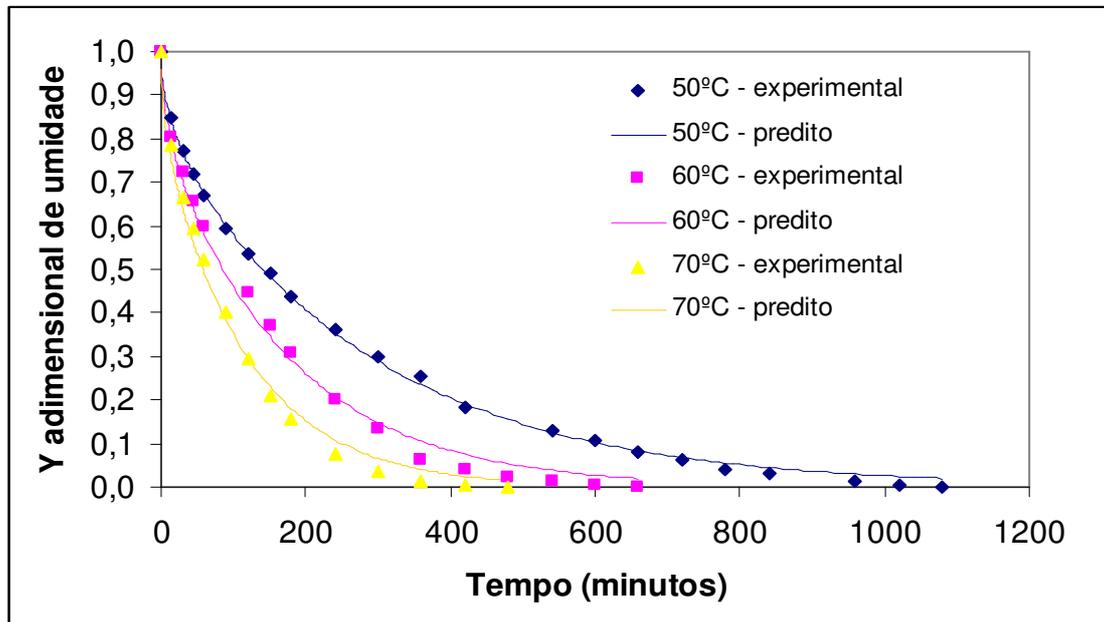


Figura 4.15 – Ajuste ao modelo de Fick dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose, para as diferentes temperaturas de secagem.

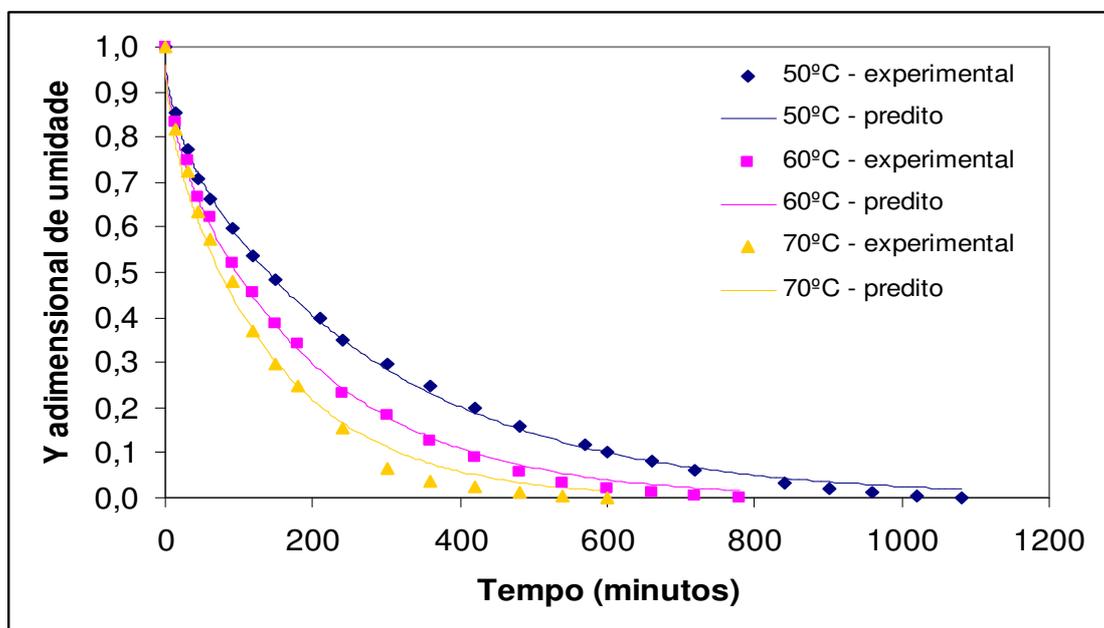


Figura 4.16 – Ajuste ao modelo de Fick dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de maltose, para as diferentes temperaturas de secagem.

Sabendo que a migração de umidade no interior do alimento para a superfície depende das condições internas, como a natureza estrutural do material e a quantidade de umidade do produto, a menor difusividade das amostras pré-tratadas osmoticamente em soluções de maltose em relação àsquelas *in natura*, pode ser explicada pela camada de açúcares impregnadas na parede celular e pelo menor conteúdo de água do abacaxi pré-tratado no início do processo, dificultando assim a remoção de água durante a secagem, uma vez que essa passa a ocorrer nas regiões de forte interação da água restante no alimento e sua matriz sólida. Embora as amostras pré-tratadas com soluções de sacarose também tenham apresentado um menor valor de  $D_{ef}$  em relação àsquelas *in natura*, durante a secagem, a diferença não foi significativa.

Os maiores valores de  $D_{ef}$  das amostras estão relacionados com as maiores temperaturas de processo, independentemente do pré-tratamento ou ausência do mesmo. A elevação da temperatura provoca o aumento da velocidade de secagem, pois ocorre aumento da pressão de vapor da água no sólido facilitando a saída de umidade do interior para a superfície.

Entretanto, a utilização de temperaturas elevadas durante o processo implica também na perda da cor e no favorecimento de reações de escurecimento enzimático, resulta na perda de nutrientes voláteis, além de provocar alterações na textura do produto.

POKHARHAR e PRASAD (2002) estudaram a secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente com soluções de sacarose a 40°Brix e temperatura a 40°C, por um período de 5 horas. Variando a temperatura de secagem (50 a 80°C) e a velocidade do ar (1,0 a 2,5 m/s) de secagem, a difusividade efetiva encontrada para cada um dos ensaios esteve na ordem de  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, semelhantemente ao encontrado no presente trabalho. Já RAHMAN e LAMB (1991) verificaram que quanto maior o ganho de sólidos ao longo do pré-tratamento, menor foi a difusividade efetiva de água na secagem, e assim como no trabalho de NICOLETI et al. (2001) observaram que as amostras frescas de abacaxi apresentaram maior valor  $D_{ef}$ , quando comparadas às amostras pré-tratadas osmoticamente.

#### 4.3.2.2 Modelos empíricos

Os dados experimentais também foram ajustados aos modelos empíricos (equações 2.5 a 7), através da regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, utilizando-se o programa Statistica 5.0. Para o ajuste aos modelos empíricos dos dados experimentais da curva de secagem foram estimados os parâmetros dos modelos, considerando a temperatura do ar de secagem e o teor de umidade inicial do produto como variáveis independentes. Os valores encontrados, assim como os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e os erros relativos médios ( $E$ ), para cada um dos ensaios realizados, são apresentados nas tabelas 4.18 a 20.

Observa-se na tabela 4.18, que o modelo Exponencial apresentou um bom ajuste aos dados experimentais, explicando no mínimo 97,1% das variações dos dados observados e com valores de erro relativo médio, inferiores a 2%.

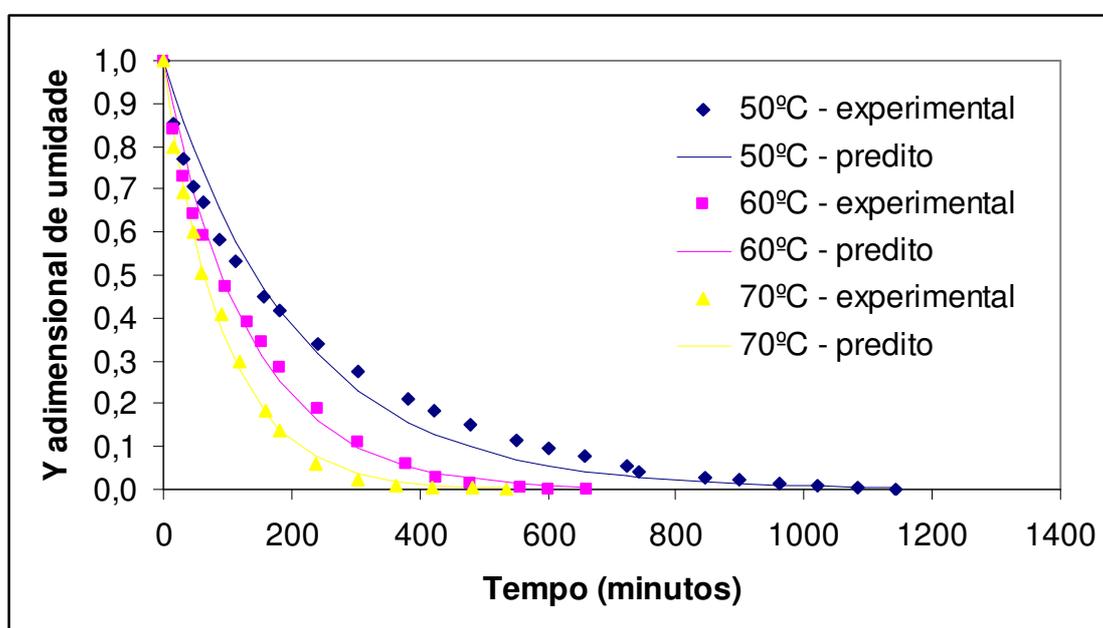
#### 4.18 – Valores estimados da constante K do modelo Exponencial, coeficiente de determinação e erro relativo médio, para os ensaios de secagem de abacaxi *in natura* e pré-tratado.

Amostra	T (°C)	K ( $\times 10^3 \cdot s^{-1}$ )	$R^2$	E (%)
<i>in natura</i>	50	4,82aA	0,978	0,829
<i>in natura</i>	60	7,60bA	0,992	1,779
<i>in natura</i>	70	10,80cA	0,997	0,785
pré-tratada (sacarose)	50	4,53aAB	0,971	0,772
pré-tratada (sacarose)	60	7,36bAB	0,984	0,594
pré-tratada (sacarose)	70	10,60cAB	0,994	0,571
pré-tratada (maltose)	50	4,51aB	0,974	0,849
pré-tratada (maltose)	60	6,42bB	0,987	0,605
pré-tratada (maltose)	70	8,42cB	0,994	0,963

Obs: letras minúsculas iguais representam que não houve diferença significativa em relação à temperatura de secagem, enquanto letras maiúsculas iguais indicam ausência de diferença significativa entre os tipos de pré-tratamento para uma mesma temperatura.

Através do teste de Duncan foi possível identificar diferença significativa ao nível de 5% entre a constante de secagem (K) das amostras *in natura* e aquelas tratadas osmoticamente com maltose, ainda observou-se que existe diferença significativa ao nível de 5% entre o K das amostras tratadas com diferentes temperaturas.

Nas figuras 4.17 a 19 são apresentados os gráficos que mostram o ajuste ao modelo Exponencial dos dados experimentais de secagem do abacaxi fresco e pré-tratado osmoticamente, para as diferentes temperaturas do processo.



**Figura 4.17 – Ajuste ao modelo Exponencial dos dados experimentais de secagem de abacaxi *in natura*, para as diferentes temperaturas de secagem.**

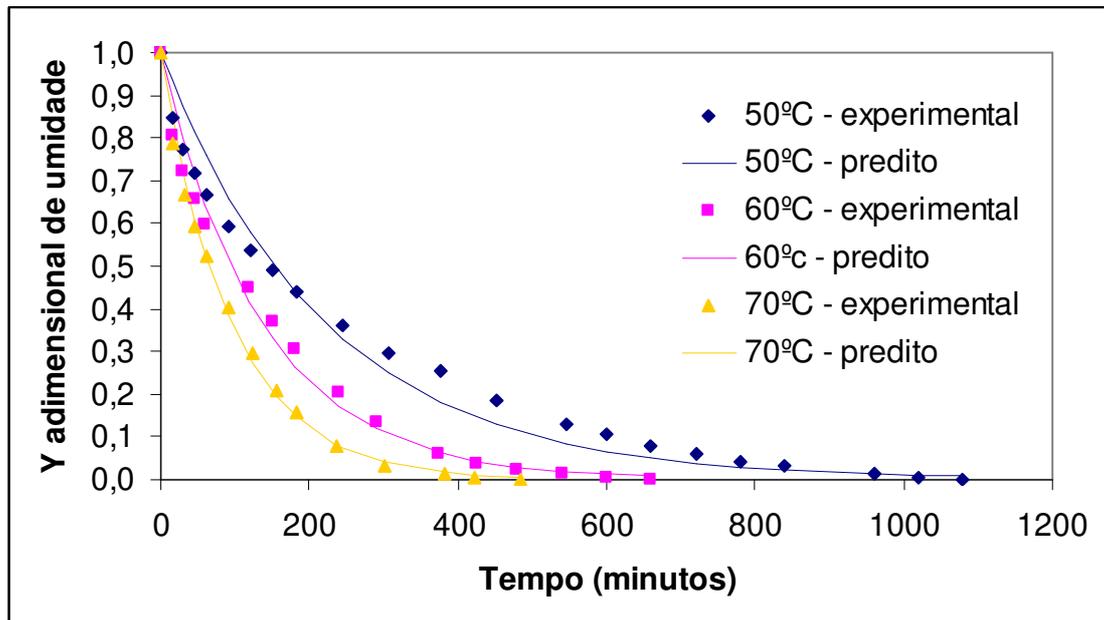


Figura 4.18 – Ajuste ao modelo Exponencial dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose, para as diferentes temperaturas de secagem.

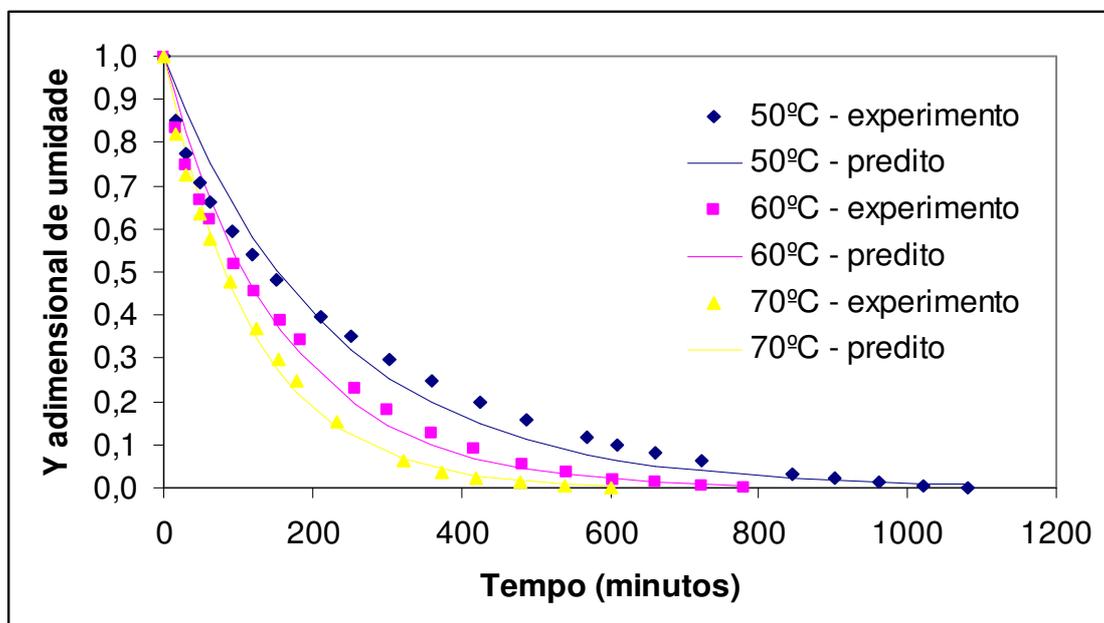


Figura 4.19 – Ajuste ao modelo Exponencial dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de maltose, para as diferentes temperaturas de secagem.

Verifica-se que, para o modelo Exponencial, houve tendência mais acentuada de dispersão dos valores calculados para a secagem realizada na temperatura a 50°C, para todas as condições estudadas.

Na tabela 4.19, o modelo de Henderson e Pabis apresentou um ajuste dos dados experimentais melhor que o Exponencial, explicando no mínimo 99% das variações dos dados observados, porém obteve valores de erro relativo médio levemente superiores, com o valor máximo de 2,41% para o ensaio de secagem da amostra *in natura* à temperatura de 60°C. Semelhantemente ao modelo Exponencial, esse foi o ensaio que apresentou o maior desvio entre os valores preditos e os observados, sendo quase o dobro do segundo valor mais alto.

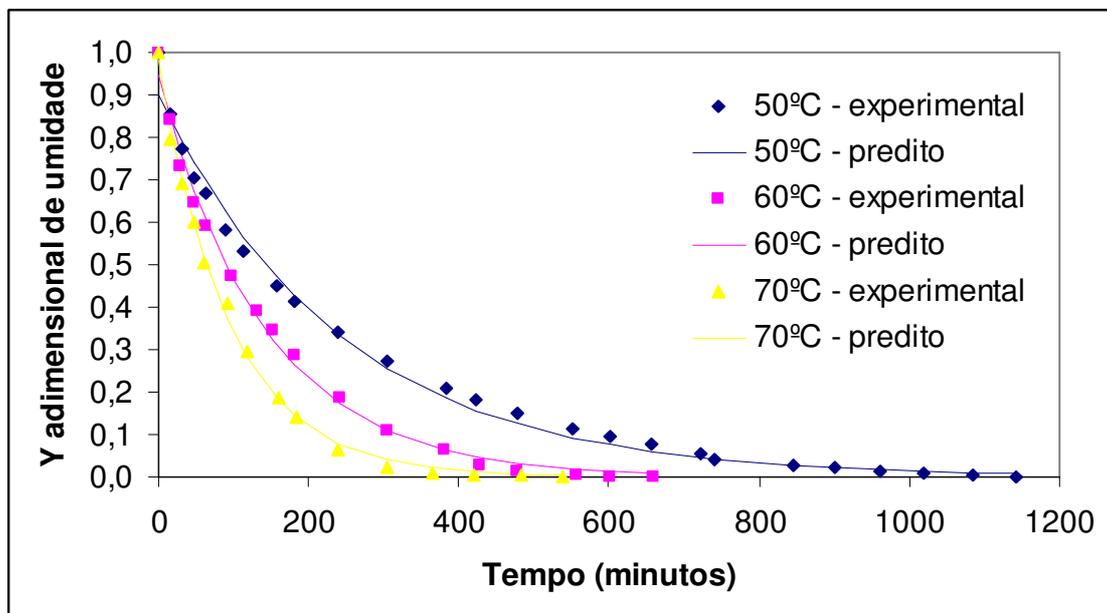
**4.19 – Valores estimados das constantes K e “a” do modelo de Henderson e Pabis, coeficiente de determinação e erro relativo médio, para os ensaios de secagem de abacaxi *in natura* e pré-tratado.**

Amostra	T (°C)	K ( $\times 10^3 \cdot s^{-1}$ )	a	R <sup>2</sup>	E (%)
<i>in natura</i>	50	4,13aA	0,9012	0,991	1,369
<i>in natura</i>	60	7,07bA	0,9475	0,995	2,414
<i>in natura</i>	70	10,50cA	0,9813	0,998	0,904
pré-tratada (sacarose)	50	3,81aAB	0,8934	0,990	1,354
pré-tratada (sacarose)	60	6,64bAB	0,9271	0,992	0,954
pré-tratada (sacarose)	70	10,00cAB	0,9605	0,997	0,748
pré-tratada (maltose)	50	3,85aB	0,8963	0,991	1,432
pré-tratada (maltose)	60	5,78bB	0,9274	0,994	0,929
pré-tratada (maltose)	70	7,91cB	0,9542	0,997	1,296

Obs: letras minúsculas iguais representam que não houve diferença significativa em relação à temperatura de secagem, enquanto letras maiúsculas iguais indicam ausência de diferença significativa entre os tipos de pré-tratamento para uma mesma temperatura.

Os resultados do teste de Duncan para a constante de secagem do modelo de Henderson e Pabis foram semelhantes aos obtidos para o modelo exponencial. Identificou-se diferença significativa ao nível de 5% entre a constante de secagem (K) das amostras *in natura* e aquelas tratadas osmoticamente com maltose, e observou-se também diferença significativa ao nível de 5% entre o K das amostras tratadas com diferentes temperaturas.

As figuras 4.20 a 22 mostram os gráficos que relacionam o ajuste ao modelo de Henderson e Pabis dos dados experimentais de secagem do abacaxi *in natura* e pré-tratado osmoticamente, para as diferentes temperaturas do processo.



**Figura 4.20 – Ajuste ao modelo de Henderson e Pabis dos dados experimentais de secagem de abacaxi *in natura*, para as diferentes temperaturas de secagem.**

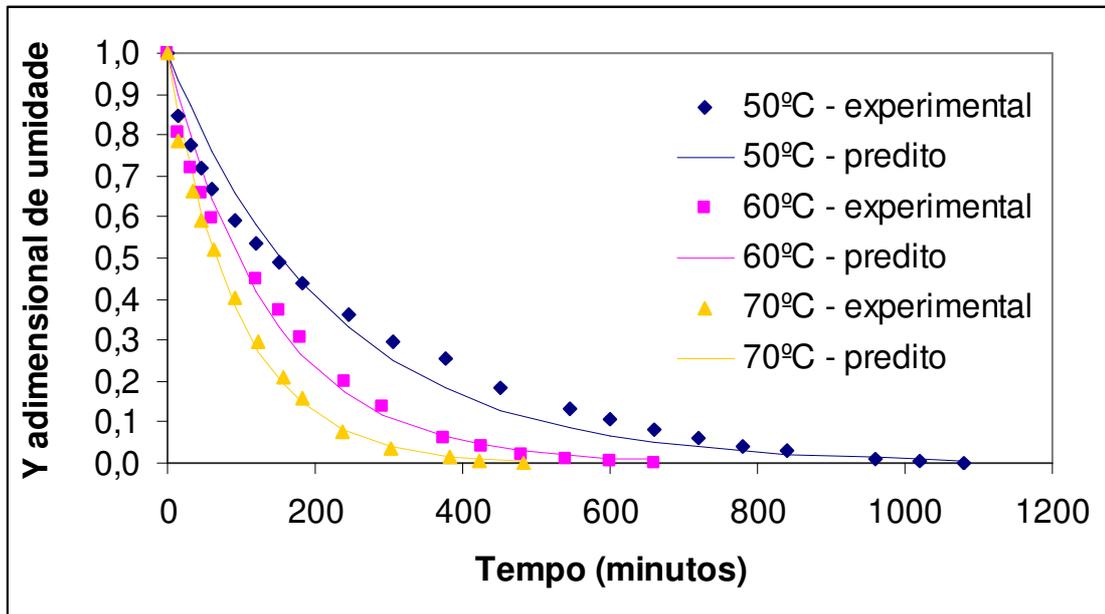


Figura 4.21 – Ajuste ao modelo de Henderson e Pabis dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose, para as diferentes temperaturas de secagem.

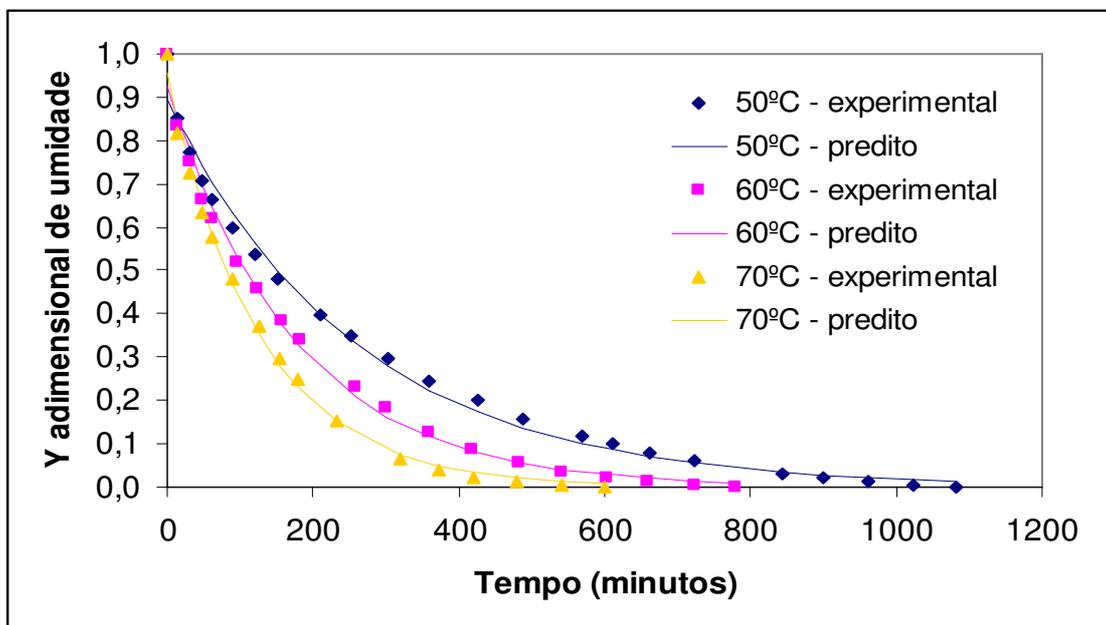


Figura 4.22 – Ajuste ao modelo de Henderson e Pabis dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de maltose, para as diferentes temperaturas de secagem.

De acordo com os gráficos (figuras 4.20-22), observa-se que para o modelo de Henderson e Pabis houve uma tendência mais acentuada de dispersão dos valores calculados para a secagem realizada na temperatura a 50°C, principalmente para aquela com as amostras pré-tratadas osmoticamente em soluções de sacarose, devido ao maior desvio relativo entre os valores ditos e aqueles observados para o Y (adimensional de umidade). Nota-se ainda que a dispersão dos valores calculados para a temperatura a 50°C foi menos acentuada, do que aquelas observadas no modelo Exponencial.

Na tabela 4.20, onde aparecem os resultados do ajuste feito utilizando-se o modelo de Page, verifica-se um ajuste dos dados experimentais melhor que os demais, explicando no mínimo 99,2% das variações dos dados observados, ainda que tenha obtido valores de erro relativo médio levemente superiores, com o valor máximo de 4,25% para o ensaio de secagem da amostra *in natura* à temperatura de 60°C.

**4.20 – Valores estimados da constante K do modelo de Page, e coeficiente de determinação e erro relativo médio, para os ensaios de secagem de abacaxi *in natura* e pré-tratado.**

Amostra	T (°C)	K (x10 <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	n	R <sup>2</sup>	E (%)
<i>in natura</i>	50	1,60aA	0,7783	0,997	3,923
<i>in natura</i>	60	1,37aA	0,8799	0,996	4,248
<i>in natura</i>	70	1,26aA	0,9661	0,998	1,133
pré-tratada (sacarose)	50	1,62aB	0,7661	0,994	3,245
pré-tratada (sacarose)	60	1,63aB	0,8416	0,992	1,832
pré-tratada (sacarose)	70	1,61aB	0,9080	0,997	1,281
pré-tratada (maltose)	50	1,59aAB	0,7704	0,995	3,309
pré-tratada (maltose)	60	1,49aAB	0,8350	0,996	1,993
pré-tratada (maltose)	70	1,37aAB	0,8990	0,997	2,186

Obs: letras minúsculas iguais representam que não houve diferença significativa em relação à temperatura de secagem, enquanto letras maiúsculas iguais indicam ausência de diferença significativa entre os tipos de pré-tratamento para uma mesma temperatura.

O teste de Duncan para a constante de secagem obtida por Page, revelou diferença significativa ao nível de 5% entre os valores de K das amostras *in natura* e aquelas tratadas osmoticamente com sacarose, porém não foram observadas diferenças significativas ao nível de 5% para a constante K em diferentes temperaturas de secagem. Esse comportamento diferenciado em relação aos demais modelos pode ser explicado pelo expoente “n” no termo do tempo, que tem a finalidade de ampliar a validade do modelo Exponencial.

Nas figuras 4.23 a 25 observam-se os gráficos que relacionam ao ajuste do modelo de Page dos dados experimentais de secagem do abacaxi *in natura* e pré-tratado osmoticamente, para as diferentes temperaturas do processo.

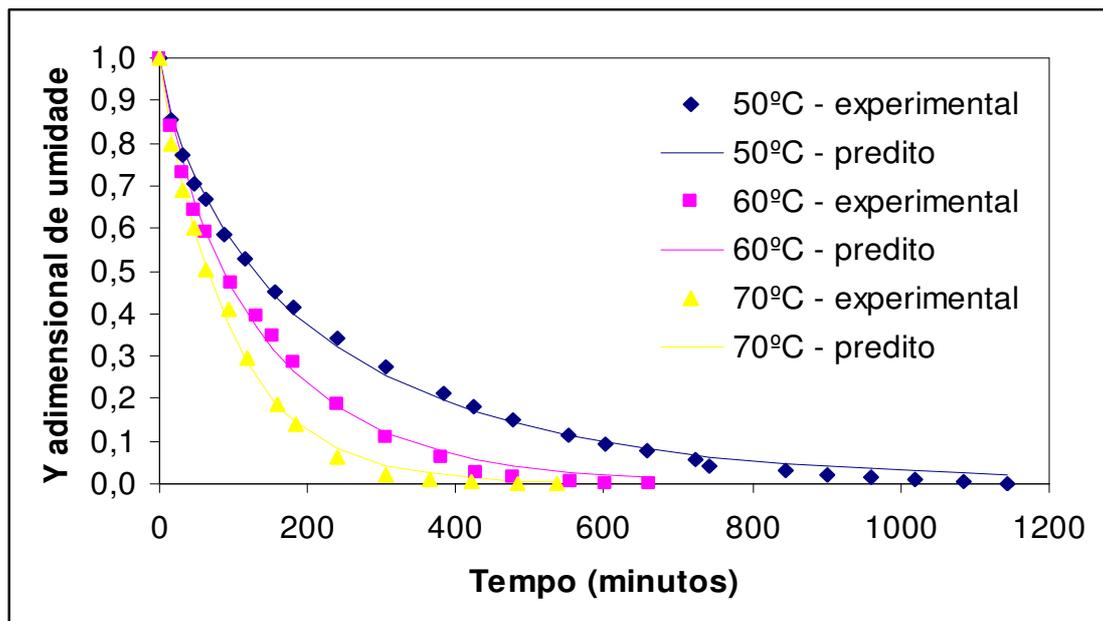


Figura 4.23 – Ajuste ao modelo de Page dos dados experimentais de secagem de abacaxi *in natura*, para as diferentes temperaturas de secagem.

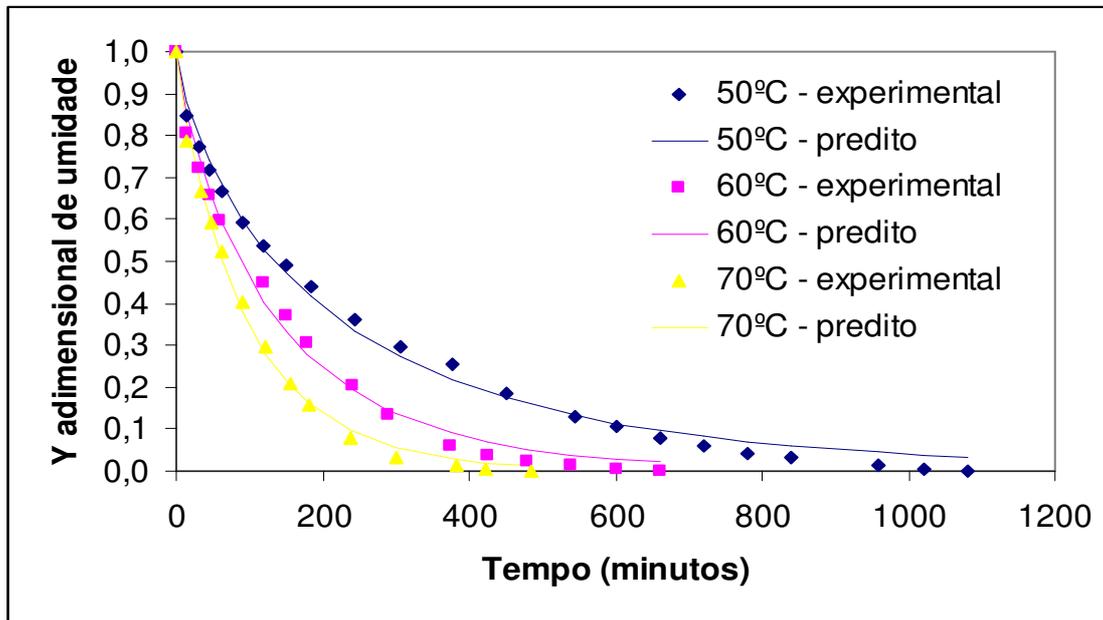


Figura 4.24 – Ajuste ao modelo de Page dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose, para as diferentes temperaturas de secagem.

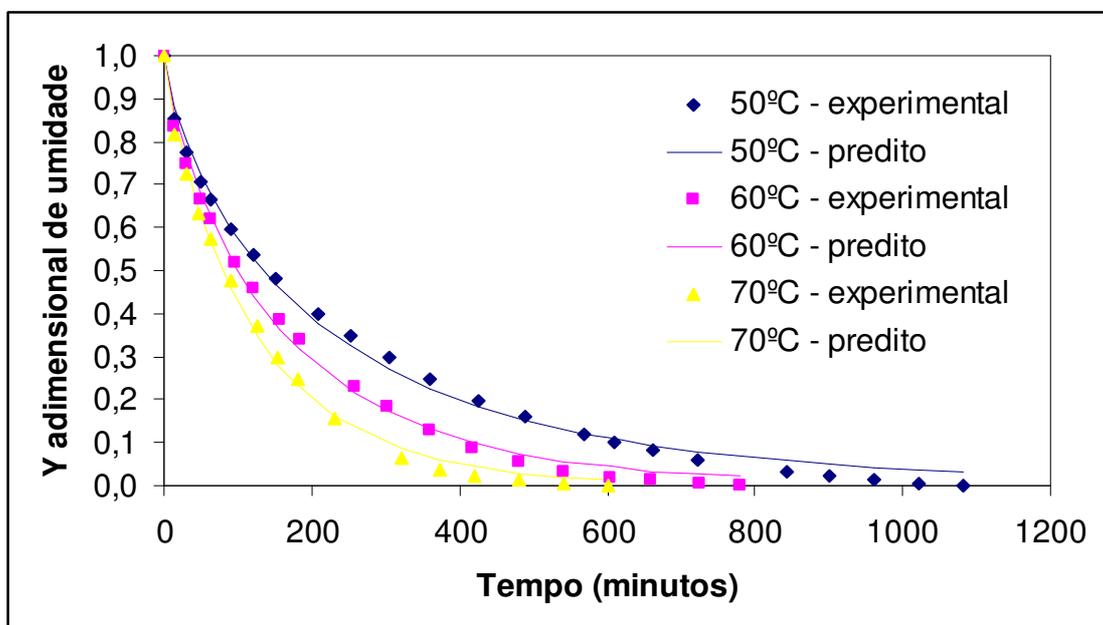


Figura 4.25 – Ajuste ao modelo de Page dos dados experimentais de secagem de abacaxi pré-tratado osmoticamente em soluções de maltose, para as diferentes temperaturas de secagem.

Analisando a figura 4.23 e as figuras 4.24 a 25 a seguir, observa-se o bom ajuste do modelo de Page, inclusive para a secagem realizada à temperatura de 50°C, onde o modelo apresentou uma baixa dispersão dos valores calculados em relação aos resultados experimentais.

Dentre os três modelos empíricos analisados, embora todos tenham apresentado ajustes satisfatórios, observou-se um melhor ajuste do modelo de Page, com valores de erro relativo médio inferiores a 5%, podendo ser escolhido neste caso para a predição da cinética de secagem.

KINGSLEY *et al.* (2006) estudaram o comportamento da secagem com ar quente de pedaços de pêssego pré-tratados com branqueamento, utilizando ácido ascórbico e metabissulfito de potássio no pré-tratamento. Os autores também se valeram dos modelos empíricos para o estudo da cinética de secagem em camada fina, e concluíram que o modelo de Page foi o que apresentou melhor ajuste dos dados experimentais da secagem, tendo testado também dos modelos Exponencial e de Henderson-Pabis.

Por sua vez, VEGA *et al.* (2006) também notaram em sua pesquisa, que se tratava da modelagem matemática da cinética de secagem de pimentão vermelho, que o modelo de Page apresentou melhor ajuste da cinética de secagem, do que os modelos Exponencial e de Henderson-Pabis.

### **4.3.3 Caracterização do produto seco**

O abacaxi seco foi avaliado quanto ao teor de umidade em base seca e úmida, e quantificado quanto à atividade de água. Os dados experimentais encontram-se na tabela 4.21.

**Tabela 4.21 – Características do produto desidratado, quanto ao conteúdo de umidade (em base úmida e seca) e atividade de água, para cada ensaio realizado.**

Amostra	T (°C)	t (min)	Xbu (%)	Xbs (%)	Aw
<i>in natura</i>	50	1140	10,58 ± 0,10aA	11,84 ± 0,13aA	0,473 ± 0,006aA
<i>in natura</i>	60	660	9,25 ± 0,46bA	10,19 ± 0,55bA	0,409 ± 0,005bA
<i>in natura</i>	70	540	8,65 ± 0,35bA	9,47 ± 0,42bA	0,351 ± 0,007cA
<b>pré-tratada (sacarose)</b>	50	1080	13,05 ± 0,08aA	15,01 ± 0,11aA	0,552 ± 0,010aB
<b>pré-tratada (sacarose)</b>	60	660	10,42 ± 0,27bA	11,64 ± 0,34bA	0,455 ± 0,008bB
<b>pré-tratada (sacarose)</b>	70	480	8,58 ± 0,27bA	9,39 ± 0,33bA	0,404 ± 0,015cB
<b>pré-tratada (maltose)</b>	50	1080	14,30 ± 0,21aA	16,69 ± 0,28aA	0,510 ± 0,035aC
<b>pré-tratada (maltose)</b>	60	780	10,40 ± 0,33bA	11,61 ± 0,41bA	0,425 ± 0,048bC
<b>pré-tratada (maltose)</b>	70	600	8,81 ± 0,16bA	9,66 ± 0,20bA	0,381 ± 0,017cC

Obs: letras minúsculas iguais representam que não houve diferença significativa em relação à temperatura de secagem, enquanto letras maiúsculas iguais indicam ausência de diferença significativa entre os tipos de pré-tratamento para uma mesma temperatura.

De acordo com a tabela 4.21, nota-se que quanto maior a temperatura do processo, menor será o tempo de secagem. As amostras pré-tratadas osmoticamente apresentaram maior conteúdo de umidade, seja em base seca ou úmida, às temperaturas de processo de 50 e 60°C; entretanto, à temperatura de 70°C, as amostras pré-tratadas osmoticamente com soluções de sacarose apresentaram menor tempo de secagem e menor conteúdo de umidade, ainda que o valor de atividade de água tenha sido mais elevado.

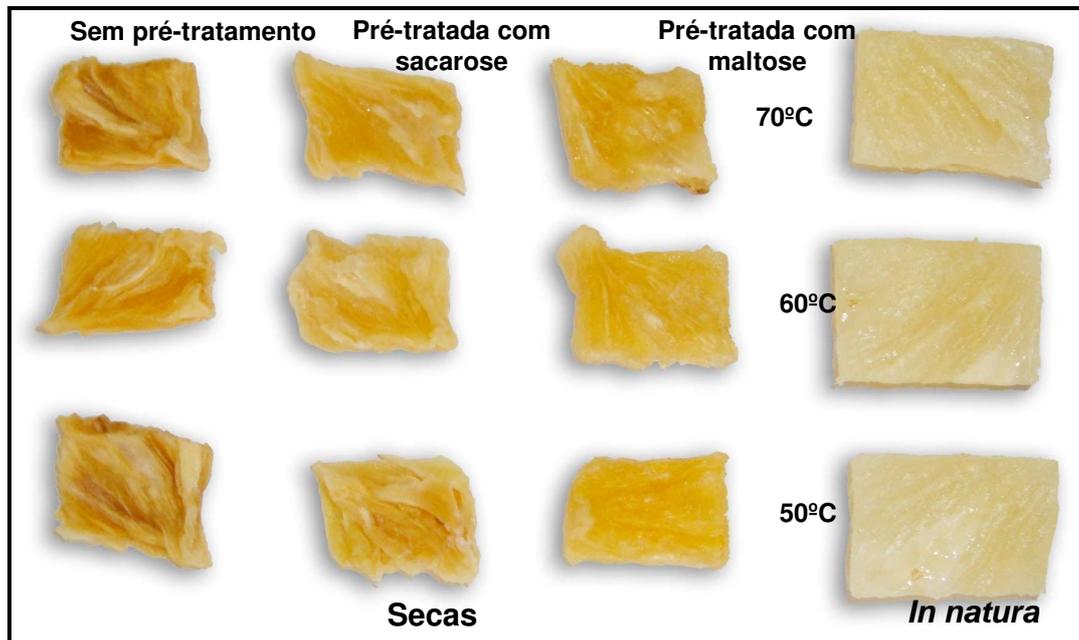
Apesar das diferenças de valores do conteúdo de umidade das amostras após o término do processo, não se observou através do teste de Duncan diferença significativa ao

nível de 95% de significância em relação ao tipo de tratamento ou ausência do mesmo. Já em relação à temperatura de secagem, houve diferença significativa entre aquelas processadas à 50°C e as demais.

A amostra pré-tratada com solução de maltose apresentou maior tempo de secagem em relação àquela tratada com solução de sacarose, o que se explica pela menor difusividade efetiva, que implica diretamente numa menor taxa de secagem. A tabela 4.21 mostra que o tempo de secagem para as amostras *in natura* foi maior que os demais, em relação ao processo estabilizado em 50°C, porém quando conduzido a temperaturas maiores observou-se que o tempo de secagem foi muito próximo daquele com as amostras pré-tratadas osmoticamente com soluções de sacarose.

Por fim, a atividade de água das amostras ao término da operação foi a que apresentou maior variação em relação aos diferentes tratamentos e temperaturas de processamento. Verificou-se que houve diferença significativa entre os valores de atividade de água, ao nível de 95% de significância, entre as amostras submetidas ao pré-tratamento ou não, e também entre as diferentes temperaturas de secagem utilizadas. O produto pré-tratado com soluções de maltose apresentou um valor de  $A_w$  menor que aquele tratado com soluções de sacarose, embora todos tenham se mostrado estáveis em relação ao valor de atividade de água alcançado ao final do processo.

A figura 4.26 mostra as amostras de abacaxi *in natura* e secas, submetidas ou não ao pré-tratamento osmótico e processadas em diferentes temperaturas.



**Figura 4.26 – Amostras de abacaxi in natura e secas, submetidas a diferentes condições de secagem.**

Na figura 4.26 observa-se o encolhimento das amostras secas em relação às amostras in naturas. A remoção de água do abacaxi durante a secagem interfere diretamente na redução do volume do produto, uma vez que a massa final dos produtos secos sem pré-tratamento varia entre 15 e 20% do valor inicial da amostra, enquanto os produtos secos pré-tratados representam entre 25 e 30% do valor da massa inicial das amostras.

Além do encolhimento, através da figura acima (4.26) pode-se observar a influência do processamento na cor do abacaxi seco. Nota-se um maior escurecimento dos produtos que não sofreram pré-tratamentos, bem como para aqueles que foram processados à temperatura mais elevada. A avaliação da cor das amostras de abacaxi processadas bem como sua relação com as amostras *in naturas* são discutidas no item 4.4.1.

#### 4.4 Avaliação da retenção de cor e das propriedades mecânicas do produto

As amostras de abacaxi *in natura*, pré-tratadas osmoticamente e secas foram avaliadas quanto às alterações na cor e nas propriedades viscoelásticas do produto, em decorrência do processamento.

##### 4.4.1 Avaliação da variação de cor

A avaliação de cor ocorreu através da leitura dos parâmetros L\*, a\* e b\* do sistema CIELAB, além do croma C\* e tom H\*. Para a análise das alterações na coloração das amostras durante a secagem, a amostra de abacaxi *in natura* foi considerada padrão.

Na tabela 4.22 podem ser observados os valores obtidos para os parâmetros de cor das condições iniciais do abacaxi para os ensaios de secagem.

**Tabela 4.22 – Parâmetros de cor (L\*, a\* e b\*) das amostras *in natura* e pré-tratada utilizadas nos ensaios de secagem.**

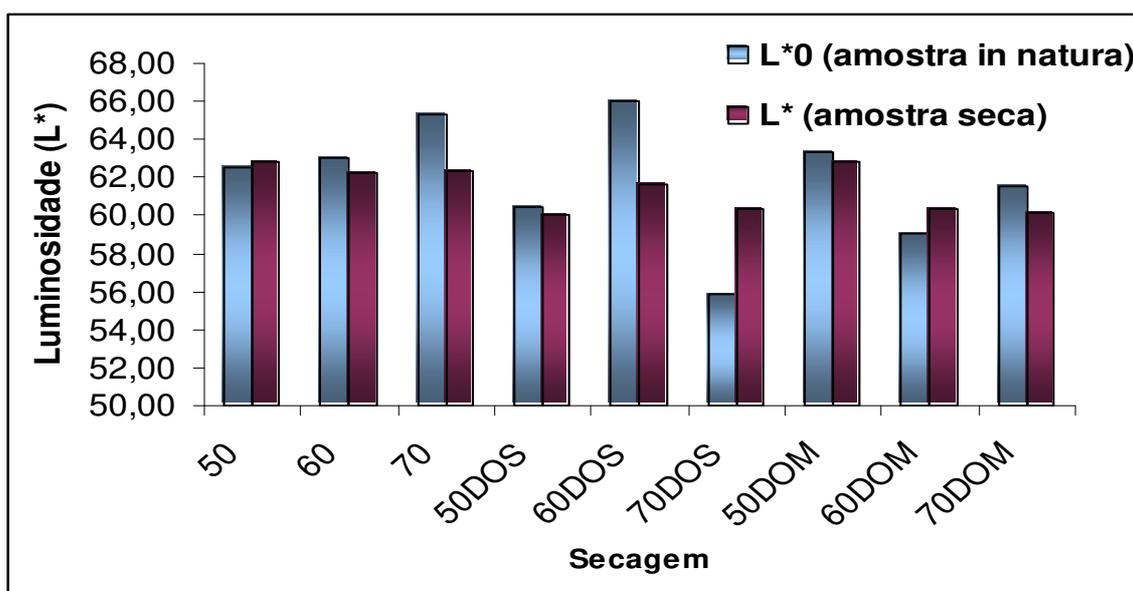
Amostra	L*	a*	b*
<i>in natura</i>	61,64 ± 1,50	-0,49 ± 0,07	26,19 ± 1,40
pré-tratada (sacarose)	56,75 ± 3,11	-0,64 ± 0,23	27,66 ± 0,95
pré-tratada (maltose)	57,81 ± 1,89	-0,42 ± 0,16	28,40 ± 0,26

O abacaxi *in natura* apresenta coloração definida pelos parâmetros de cromaticidade a\* negativo e b\* positivo, e luminosidade L\* positivo. Os valores do parâmetro a\* são bastante superiores ao b\*, mostrando um predomínio da cor amarela sobre a verde na fruta, enquanto a luminosidade é bastante alta indicando uma maior claridade da cor.

Pela tabela 4.22 nota-se que as amostras tratadas osmoticamente foram do amarelo pálido da fruta *in natura* para um amarelo mais rico e escuro. A variação da

luminosidade foi o fator que mais contribuiu para a mudança de cor do abacaxi, embora essa alteração de cor tenha sido pequena, devida ao curto tempo de processamento osmótico. Avaliando a cor de banana e abacaxi osmoticamente desidratada, os mesmos resultados foram encontrados por WALISZEWSKI *et al.* (1999) e TAN *et al.* (2001) respectivamente, ressaltando que quanto mais prolongado for o tratamento osmótico, maior será a alteração da cor.

As figuras 4.27 e 28 a seguir mostram o efeito do processamento de secagem sobre a cor da amostra fresca, podendo-se observar o efeito do pré-tratamento na preservação da coloração do abacaxi.

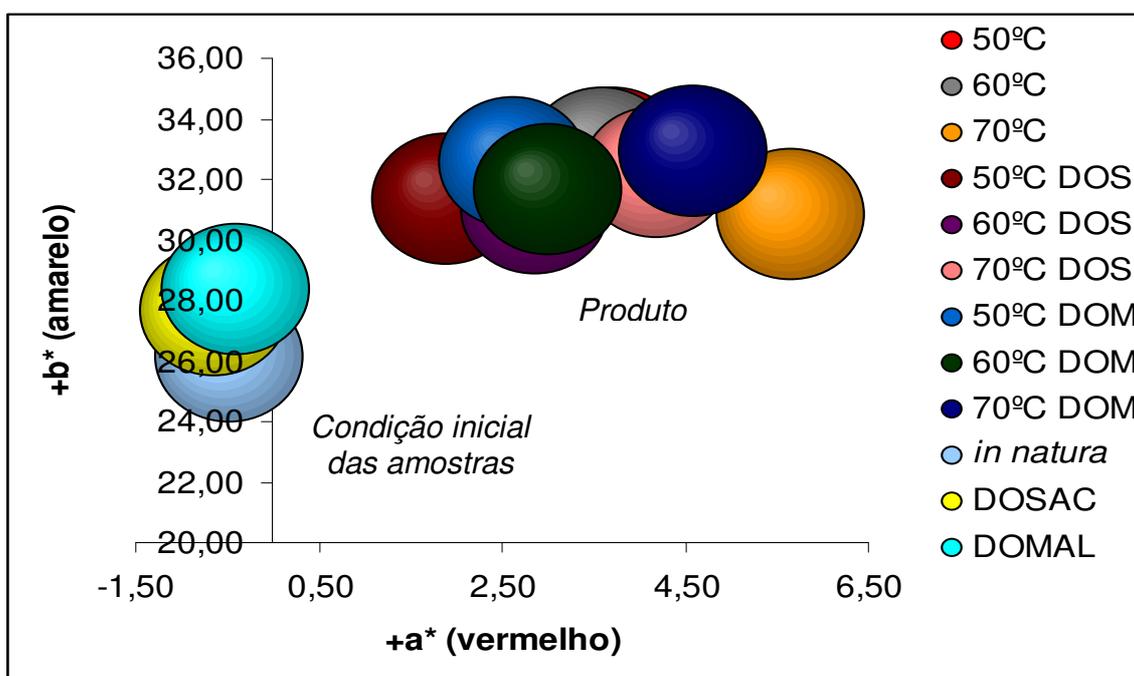


**Figura 4.27 – Representação gráfica dos valores de luminosidade das amostras *in naturas* e pré-tratadas secas, em diferentes condições de temperatura.**

Obs: DOS e DOM referem-se ao tratamento osmótico com sacarose e maltose respectivamente.

Analisando a figura 4.27, observa-se que os valores de luminosidade da fruta seca, para as amostras pré-tratadas foi levemente inferior em relação às amostras *in natura*. Entretanto, não há diferença significativa pelo teste de Duncan ao nível de 95% de significância entre os valores de luminosidade para as diferentes amostras desidratadas.

A representação gráfica da figura 4.28 mostra a condição inicial da amostra *in natura* e pré-tratada osmoticamente, bem como a cromaticidade final das amostras secas. Verifica-se que as amostras secas apresentam um valor do parâmetro  $a^*$  bastante superior ao apresentado nas condições iniciais, evidenciando uma maior saturação da cor amarela. Uma explicação seria a concentração de pigmentos provocada pela perda de água durante o processamento. Já o parâmetro  $b^*$  talvez tenha sido o que apresentou maior alteração na secagem, pois outrora negativo, agora apresenta valor positivo, que representa a cor vermelha. Uma possível explicação para esse fenômeno seria a exposição das amostras a temperaturas elevadas por um grande período de tempo, o que favorece reações de escurecimento na fruta.



**Figura 4.28 – Representação gráfica dos valores dos parâmetros  $a^*$  e  $b^*$  das amostras *in naturas* e pré-tratadas secas em diferentes condições de temperatura.**

A análise estatística dos valores de cromaticidade, apresentados pelas amostras secas não revelou diferença significativa para o parâmetro  $b^*$  nas diferentes condições de processamento. Em relação ao parâmetro  $a^*$ , foi identificada diferença significativa ao nível de 95% de significância pelo teste de Duncan, entre as amostras secas sem tratamento

e àquelas pré-tratadas osmoticamente com sacarose, e também se observou diferença significativa entre os produtos processados a 70°C e nas demais temperaturas. Observando a figura 4.28, nota-se que as amostras que sofreram tratamento a 70°C apresentaram maior valor de  $a^*$ , bem como as amostras secas sem pré-tratamento, evidenciado uma cor vermelha mais intensa, resultado das reações de escurecimento favorecidas pela exposição das frutas a alta temperatura de secagem. As amostras pré-tratadas com soluções de maltose apresentaram uma saturação da cor amarela levemente superior do que àquelas tratadas com sacarose, como também pode ser observado visualmente pela figura 4.26.

TAN *et al.* (2001) também observaram que pedaços de abacaxi secos pré-tratados osmoticamente sofreram menor alteração de cor, do que a fruta sem tratamento, apresentando cor com maior aceitação pelos provadores. Esse fenômeno pode ser explicado pelo açúcar que é impregnado na fruta durante a desidratação osmótica, que cristaliza na superfície da amostra, oferecendo resistência ao escurecimento das mesmas.

O croma  $C^*$  define a saturação ou a intensidade da cor. Através deste parâmetro pode-se distinguir uma cor fraca de uma forte, enquanto o ângulo de tom é associado à característica da cor, descrevendo a cor pelos nomes verde, vermelho, azul e amarelo.

De acordo com a tabela 4.23, o valor do croma das amostras de abacaxi apresentou um comportamento semelhante ao parâmetro  $b^*$ , uma vez que esse fator é o mais expressivo na definição da cor da fruta e pode ser verificado pelos valores muito mais elevados do parâmetro  $b^*$  em relação ao  $a^*$ , sendo que a cor amarela é predominante na fruta. Na tabela, verificou-se que as amostras secas que sofreram pré-tratamento apresentaram valores de  $C^*$  mais elevados do que as demais, indicando uma maior saturação da cor do abacaxi. A diferença de croma para as amostra secas pré-tratadas com solução de maltose apresentaram diferença significativa ao nível de 95% em relação à fruta sem sofrer tratamento, o mesmo se observou para as amostras submetidas ao processamento com temperatura de 70°C em relação às demais temperaturas de processo.

**Tabela 4.23 – Valores do croma C\* e do tom H\* para os diferentes ensaios de secagem realizados.**

<b>Amostra</b>	<b>T (°C)</b>	<b>C*</b>	<b>H*</b>
<i>in natura</i>	50	31,47 ± 2,14abA	1,47 ± 0,02aA
<i>in natura</i>	60	30,23 ± 1,91aA	1,45 ± 0,01aA
<i>in natura</i>	70	31,86 ± 1,02bA	1,39 ± 0,02bA
<b>pré-tratada (sacarose)</b>	50	32,05 ± 2,26abAB	1,50 ± 0,02aB
<b>pré-tratada (sacarose)</b>	60	31,41 ± 1,94aAB	1,47 ± 0,01aB
<b>pré-tratada (sacarose)</b>	70	33,05 ± 1,88bAB	1,45 ± 0,02bB
<b>pré-tratada (maltose)</b>	50	31,80 ± 1,73abB	1,49 ± 0,02aB
<b>pré-tratada (maltose)</b>	60	33,21 ± 2,35aB	1,48 ± 0,02aB
<b>pré-tratada (maltose)</b>	70	34,21 ± 2,14bB	1,44 ± 0,03bB

Obs: letras minúsculas iguais representam que não houve diferença significativa em relação à temperatura de secagem, enquanto letras maiúsculas iguais indicam ausência de diferença significativa entre os tipos de pré-tratamento para uma mesma temperatura.

Em relação ao tom, observou-se que a tonalidade da cor amarela foi intensificada com as amostras pré-tratadas osmoticamente apresentando diferença significativa ao nível de 95% de significância pelo teste de Duncan, resultado de uma menor degradação dos pigmentos e das reações de escurecimento enzimático durante a secagem, quando comparado com as amostras secas sem pré-tratamento. Entretanto, para temperaturas de processo elevadas (70°C) notou-se um maior valor do H\*, resultado do maior escurecimento da fruta na secagem, observado pelo maior valor do parâmetro a\*, que representa a cor vermelha, em comparação com as demais temperaturas de processo.

De acordo com a análise de cor, foi possível identificar um melhor comportamento das amostras pré-tratadas durante o processo de secagem, as quais apresentaram menores alterações na cor do produto final. Embora não se tenha observado diferenças significativas entre o resultado das amostras com diferentes tratamentos

osmóticos, aquelas tratadas com soluções de maltose apresentaram um resultado levemente superior que as demais. Pode-se dizer, que baseado na análise dos atributos de cor, as corridas realizadas à 70°C deveriam ser evitadas, por terem resultado num maior escurecimento da fruta, em qualquer condição avaliada.

#### 4.4.2 Avaliação das propriedades mecânicas

Devido à falta de homogeneidade das características físicas e químicas das frutas em geral, e visando minimizar a influência do grau de maturação das mesmas na textura, os resultados obtidos para os valores de tensão de ruptura foram normalizados, ou seja, relacionados com o valor desta mesma tensão para a fruta fresca.

A tabela 4.24 mostra os valores médios da tensão de ruptura normalizada encontrados para as amostras de abacaxi processadas em diferentes temperaturas de secagem, com ou sem pré-tratamento osmótico.

**Tabela 4.24 – Valores médios da tensão na ruptura para os diferentes ensaios de secagem, normalizada em relação à fruta fresca.**

<b>Amostra</b>	<b>T (°C)</b>	<b>Tensão de ruptura normalizada (Pa/Pa)</b>
<i>in natura</i>	50	5,03 ± 0,29bA
<i>in natura</i>	60	5,84 ± 0,89bA
<i>in natura</i>	70	6,93 ± 0,44cA
<b>pré-tratada (sacarose)</b>	50	4,38 ± 0,01aAB
<b>pré-tratada (sacarose)</b>	60	6,10 ± 0,66bAB
<b>pré-tratada (sacarose)</b>	70	6,67 ± 0,22cAB
<b>pré-tratada (maltose)</b>	50	4,14 ± 0,29aB
<b>pré-tratada (maltose)</b>	60	5,33 ± 0,70bB
<b>pré-tratada (maltose)</b>	70	6,41 ± 1,02cB

Nota-se que o valor da tensão de ruptura da amostra aumentou simultaneamente com a elevação da temperatura de secagem. De acordo com o teste de Duncan, observou-se diferença significativa ao nível de 5% entre as amostras processadas em diferentes temperaturas. As amostras secas a temperaturas elevadas apresentaram uma característica de dureza mais acentuada, devido a maior resistência à deformação.

O comportamento elástico da fruta decresce, juntamente com o seu teor de umidade durante a secagem. A perda da pressão de turgor na secagem provoca a perda parcial do componente elástico da estrutura do material e, conseqüentemente, resulta no aumento da contribuição viscosa do mesmo, acarretando no colapso da estrutura celular e provocando uma maior rigidez da fruta.

Além da diferença observada nos valores de tensão de ruptura pela variação da temperatura de secagem, outro fator importante foi a presença de pré-tratamento osmótico nas amostras de abacaxi secas, tendo sido encontrado diferença ao nível de 5% de significância nos valores de tensão na ruptura para as amostras tratadas com soluções de maltose, em relação àquelas que não sofreram pré-tratamento, ratificando o comportamento da maltose como agente preservador da estrutura.

Durante o tratamento osmótico, a transferência de massa é caracterizada pela remoção de água do material, pela perda de sólidos naturais e o ganho de sólidos oriundos da solução desidratante pelo alimento. As modificações físicas e químicas ao longo do processo, decorrentes da transferência de massa, provocam alterações nas propriedades macroscópicas do produto, como, por exemplo, as alterações no comportamento viscoelástico do tecido, devido ao ganho de sólido, que provoca um aumento na plasticidade da estrutura.

SITKIEWIEZ *et al.* (1996) também observaram esse efeito de plasticidade da estrutura celular de amostras de maçã seca, em decorrência da incorporação de solutos no produto durante o tratamento osmótico. Eles verificaram que houve aumento da

plasticidade da estrutura da fruta em ambos os processos, porém foi mais acentuado na secagem, em decorrência da maior remoção de água e concentração do açúcar.

Verificou-se que o processo osmótico com soluções de maltose e sacarose como pré-tratamento para a secagem causou uma diminuição nos valores da tensão na ruptura das amostras de abacaxi, resultando num produto com menor resistência à deformação, mais mole e com uma maior plasticidade da estrutura celular quando comparado com a amostra seca sem pré-tratamento; este comportamento observado foi mais intenso com a utilização de maltose como agente desidratante. A temperatura de 70°C de processo foi rejeitada, uma vez que apresentou uma rigidez muito acentuada na fruta.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho permite as seguintes conclusões:

- Durante a desidratação osmótica de abacaxi, o aumento da concentração da solução desidratante e da temperatura de processo favoreceram a transferência de massa entre a fruta e a solução, acarretando em maiores taxas de perda de água e maior impregnação de sólidos no produto.
- Nas mesmas condições de processo, o abacaxi desidratado osmoticamente com solução de maltose apresentou maior perda de água e uma quantidade menor de incorporação de sólidos, em relação àquele tratado com sacarose.
- Para a seleção das melhores condições da desidratação osmótica do abacaxi como um pré-tratamento para a secagem foi proposta a relação GS/PA, a fim de se obter amostras com incorporação mínima de sólidos e remoção considerável de água. A condição mais favorável para o tratamento com sacarose foi a solução à 40°Brix e temperatura de processo de 35°C, enquanto que, para a maltose, a concentração da solução de 50°Brix e a temperatura de 30°C foram mais adequadas.
- Os valores de difusividade efetiva foram calculados de acordo com o modelo de Fick e forneceram valores na ordem de  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , semelhantes aos encontrados na literatura para outros produtos. O modelo de Fick apresentou um ótimo ajuste dos dados experimentais com valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,988 e valores de erro relativo médio inferiores a 3,5%.
- Três modelos empíricos foram analisados: Exponencial, Henderson-Pabis e Page. Embora todos os modelos tenham apresentado ajustes satisfatórios, observou-se um melhor ajuste do modelo de Page, explicando no mínimo 99,2% das variações dos dados experimentais, com valores de erro relativo médio inferiores a 5%, podendo ser utilizado para a predição da cinética de secagem do abacaxi.

- As características da cor da fruta *in natura* sofreram variações significativas na secagem, apresentando uma intensificação da cor do abacaxi devido ao aumento dos parâmetros  $a^*$ ,  $b^*$  e do croma, decorrente das reações de escurecimento e da concentração de pigmentos pela perda de água durante o processo de secagem. As amostras de abacaxi secos pré-tratados osmoticamente apresentaram menor alteração de cor do que a fruta sem tratamento.
- A secagem das amostras de abacaxi alterou consideravelmente as propriedades mecânicas da fruta fresca, resultado da sua exposição a temperaturas elevadas por um período prolongado. O abacaxi seco pré-tratado apresentou características de maior resistência à deformação da estrutura celular quando comparado à amostra seca sem pré-tratamento; este comportamento de agente preservador da estrutura foi melhor observado com a maltose como agente desidratante.
- Embora a temperatura de 70°C tenha aumentado a taxa de secagem e apresentado os maiores valores para a difusividade efetiva, a qualidade do produto final foi negativamente afetada, resultando numa maior alteração da cor e numa maior rigidez do produto.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILERA, J. M.; CHIRALT, A.; FITO, P. Food dehydration and product structure. **Trends in Food Science & Technology**, v.14, p. 432-437, 2003.

ALMEIDA, C. O. de; VILAR, L. da C.; SOUSA, L. F. da S.; REINHARDT, D. H.; MACEDO, C. M. Peso médio do abacaxi no Brasil: um tema em discussão. **Bahia Agrícola**, v.6, n.3, nov. 2004.

A.O.A.C. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemistry**. 17th ed. Gaithersburg, USA, 2002.

ARGAIZ, A.; LÓPEZ-MALO, A.; PALOU, E.; WELTI, J. Osmotic dehydration of papaya with corn syrup solids. **Drying Technology**, v.12, n.7, p. 1709-1725, 1994.

BAKER, C. G. J. **Industrial drying of foods**. 1 ed. Chapman & Hall: London, 1997.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. and BARLETTA, B. **Food engineering laboratory manual**. 1 ed. Technomic Publication: Washington, 1997.

BLEINROTH, E. W. **Capítulo II: matéria-prima. Série frutas tropicais: abacaxi**. 2ed. ITAL – Campinas, p. 133-164, 1987.

BRAMBILLA, A.; MAFFI, D.; BERTOLO, G.; TORREGGINANI, D. Effect of osmotic dehydration time on strawberry tissue structure. **In 8<sup>th</sup> International Congress on Engineering and Food (ICEF)** – book abstracts, p. 211, México, 2000.

BOURNE, M. C. **Food texture and viscosity: concept and measurement**. 2ed. Academic Press: New York, 2002.

CASTRO, D.; TRETO, O.; FITO, P.; PANADES, G.; NÚNEZ, M.; FERNÁNDEZ, C.; BARAT, J. M. Deshidratación osmótica de piña a vacío pulsante. Estudio de las variables del proceso. **Alimentaria**, p. 27-31, maio, 1997.

CHIRALT, A.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J.; TALENS, P.; MORAGA, G.; AYALA, A.; FITO, P. Changes in mechanical properties throughout osmotic process: Cryoprotectant effect. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p.129-135, 2001.

CRANK, J. **Mathematics of diffusion**. 2ed., Clarendon Press Oxford, 1975, 414 p.

DEL VALLE, J. M.; CUADROS, T. R. M.; AGUILERA, J. M. Glass transition and shrinkage during drying and storage of osmotic apple pieces. **Food Research International**, v.31, n.3, p. 191-204, 1998.

FAO – **FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS**. Disponível:

<<http://www.fao.org/inpho/content/compend/text/ch33/AE614e01.htm>> [15 ago 2007].

FERRANDO, M. and SPIESS, W. E. L. Cellular response of plant tissue during the osmotic treatment with sucrose, maltose and trehalose solutions. **Journal of Food Engineering**, v.49, p. 115-127, 2001.

FERRARI, C. C.; RODRIGUES, L. K.; TONON, R. V.; HUBINGER, M. D. Cinética de transferência de massa de melão desidratado osmoticamente em soluções de sacarose e maltose. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, n.3, p. 285-290, 2005.

FORNI, E.; SORMANI, A.; SCALISE, S.; TORREGGIANI, D. The influence of sugar composition on the color stability of osmodehydrofrozen moisture apricots. **Food Research International**, v.30, p.87-94, 1997.

GREENSMITH, M. **Practical dehydration**. 2 ed. CRC Press: Flórida, 1998.

HAWKES, J. and FLINK, J. M. Osmotic concentration of fruit slices prior to freeze dehydration. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.2, p.265-284, 1978.

HERNÁNDEZ, Y.; LOBO, M. G.; GONZÁLEZ, M. Determination of vitamin C in tropical fruits: a comparative evaluation of methods. **Food Chemistry**, v.96, p.654-664, 2006.

JACKMAN, R. L. and STANLEY, D. W. Perspectives in the textural evaluation of plant foods. **Trends in Food Science & Technology**, v.6, p. 187-194, 1995.

JAYARAMAN, K.S. and GUPTA, D.K. Das. **Drying of fruits and vegetables. Handbook of Industrial Drying**. 2 ed. Marcel Dekker: New York, p. 643-690, 1995.

JÚNIOR, P. C. A. e CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.349-353, 1999.

KHIN, M. M.; ZHOU, W.; PEREZA, C. O. Impact of process conditions and coatings on the dehydration efficiency and cellular structure of apple tissue during osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, p.817-827, 2007.

KINGSLY, R. P.; GOYAL, R. K.; MANIKANTAN, M. R.; ILYAS, S. M. Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behaviour of peach slice. **International Journal of Food Science & Technology**, v.42 (1), p. 65-69, 2007.

KIRANOUDIS, C.T. and TSAMI, E. Drying kinetics of some fruits. **Drying Technology**, v.15, n.5, p.1399-1418, 1997.

- KUROZAWA, L. E. **Efeito das condições de processo na cinética de secagem de cogumelo (*Agaricus blazei*)**. Campinas, 2005. 121p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- LARANJEIRA, H. C. de A. **Otimização do processo de desidratação osmótica de abacaxi (*Ananás comosus* (L.) Merrill) para aplicação à tecnologia de métodos combinados**. Campinas, 1997. 100p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- LENART, A. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. **Drying Technology**, v.14, p.391-413, 1996.
- LENART, A. and LEWICKI, P. P. kinetics of osmotic dehydration of the plant tissue. **Drying`89 Ed A.S. Mujumdar**, Hemisphere Publishing Corporation, New York, p.501-508, 1990.
- LOMBADI, R. Brasil aprimora produção de frutas cítricas. **Revista Frutas & Legumes: Ciclo de Produção**, p. 8-14, 2003.
- MASTRANTONIO, S. D. S.; PEREIRA, L. M.; HUBINGER, M. D. Mass transfer and diffusion coefficient determination in osmotically dehydrated guavas. **15<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS 2006)**, Budapest, Hungary, 20-23 August, p.860-870, 2006.
- MAVROUDIS, N. E.; VASSILIS, G.; SJOHOLM, I. Osmotic dehydration of apples – effects of agitation and raw material characteristics. **Journal of Food Engineering**, v.35, p. 191-209, 1998.
- MEDINA, J. C. **Capítulo I: cultura. Série frutas tropicais: abacaxi**. 2 ed. ITAL – Campinas, pp. 1-132, 1987.

- MUJUMDAR, A. S. and MENON, A. S. **Drying of solids, principles, classification and selection of dryers.** Handbook of Industrial Drying. 2 ed. Marcel Dekker: New York, p. 1-39, 1995.
- MUJUMDAR, A. S. Drying Fundamentals. In: BAKER, C. G. J. **Industrial Drying of Foods.** 1 ed. Chapman & Hall: London, UK, 1997.
- NICOLETI, J. F.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N. Air-drying of fresh and osmotically pré-treated pineapple slices: fixed air temperature versus fixed slice temperature drying kinetics. **Drying Technology**, v.19, p.2175-2191, 2001.
- OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.26, n.1, p. 181-189, 2006.
- PARJOKO; RAHMAN, M. S.; BUCKLE, K. A.; PERERA, C. O. Osmotic dehydration kinetics of pineapple wedges using palm sugar. **Food Science and Technology**, v.29 (5/6), p.452-459, 1996.
- PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de secagem da pêra bartlett (*Pyrus* sp.) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.21, n.3, p.288-292, 2001.
- PINO, J. A.; CASTRO, D.; RONCAL, E.; ROSADO, A. Componentes volatiles de la pinã: método para su analisis em relacion com câmbios debidos a la deshidratacion osmotica. **Alimentaria**, p. 61-63, dez, 1995.
- POKHARKAR, S. M. and PRASAD, S. Air drying behaviour of somatically dehydrated pineapple. **Journal of Food Science and Technology**, v.39, n.4, p.384-387, 2002.
- PONTING, J. D.. Osmotic Dehydration of fruits – recent modifications and applications. **Process-Biochemistry**, v.8 (12), p.18-20, 1973.

- POTTER, N. and HOTCHKISS, J. H. **Food science**. 5 ed. Chapman Hall: New York, 1995.
- RAGHAVAN, G. S. V. and ORSAT, V. Recent advances in drying of bio-materials for superior quality bio-products. **15<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS 2006)**. MUJUMDAR, A. S. Editor, Szent István University Publisher, p.44-52, Budapest, Hungary.
- RAHMAN, M. S. and LAMB, J. Osmotic dehydration of pineapple. **Journal of Food Science and Technology**, v.27 (3), p. 150-152,1990.
- RAHMAN, M. S. and LAMB, J. Air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated pineapple. **Journal of Food Process Engineering**, v.14 (3), p.163-171, 1991.
- RAHMAN, M. S. **Dried food properties: challenges ahead. Drying Technology**, v.23, p. 695-715, 2005.
- RAMALLO, L. A.; SCHVEZOV, C.; MASCHERONI, R. H. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple. **Food Science Technology International**, v.10 (5), p.323-332, 2004.
- RAOULT-WACK, A. L. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. **Trends in Food Science & Technology**, v.5 (8), p.225-260, 1994.
- RAOULT-WACK, A. L.; RIOS, G.; SAUREL, R.; GIROUX, F.; GUILBERT, S. Modeling of dewatering and impregnation soaking process (osmotic dehydration). **Food Research International**, v.27 (2), p.207-209, 1994.
- RASTOGI, N. K. and RAGHAVARAO, K. S. M. S. Mass tranfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. **Lebensm-Wiss. u-Technology**, v.37, p.43-47, 2004.

- RIBEIRO, W. **Estudo sobre o abacaxi (bioquímica do amadurecimento e parâmetros de colheita)**. Campinas, 1973. 70p. Dissertação (Mestre em Ciências em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- SAPUTRA, D. Osmotic dehydration of pineapple. **Drying Technology**, v.19, p.415-425, 2001.
- SATO, A. C. K.; SANJINEZ-ARGANDONA, E. J.; CUNHA, R. L. Avaliação das propriedades físicas, químicas e sensorial de preferência de goiabas em calda industrializadas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.24 (4), p.550-555, 2004.
- SILVA, M. A. **Fisiologia pós-colheita de abacaxi cultivares Pérola e Smooth Cayenne**. Campinas, 1980. 203p. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
- SILVEIRA, E. T. F.; RAHMAN, M. S.; BUCKLE, K. A. Osmotic dehydration of pineapple: kinetics and product quality. **Food Research International**, v.29, p.227-233, 1996.
- SITKIEWIEZ, I.; LENART, A.; LEWICKI, P. P. Mechanical properties of osmotic-convection dried apples. **Polish Journal of Food & Nutrition Sciences**, v.46 (5), n. 4, p.105-112, 1996.
- STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering**. 2 ed. Freeman Press: East Lansing, USA, 1996.
- STRUMILLO, C.; KRUDA, T. **Drying: principles, applications and design**. Gordon and Beach Science Publishers: New York, 1986, 448p.

TABELA BRASILEIRA DE COMPOSIÇÃO DE ALIMENTOS / NEPA – UNICAMP.  
Versão II, Campinas: NEPA-UNICAMP, 2006. 31-32p.

TABELA BRASILEIRA DE COMPOSIÇÃO DE ALIMENTOS – USP, São Paulo:  
DEPARTAMENTO DE ALIMENTOS E NUTRIÇÃO EXPERIMENTAL FCF/USP,  
2005. Disponível em: < <http://www.fcf.usp.br/tabela/> > [14 fev 2007].

TAN, M.; CHUA, K. J.; MUJUNDAR, A. S.; CHOU, S. K. Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation on drying rate and color changes during drying of potato and pineapple. **Drying Technology**, v.19( 9), p.2193-2207, 2001.

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

TORREGGINNI, D. Osmotic dehydration in fruits and vegetables processing. **Food Research International**, v.26, p.59-68, 1993.

TORREGGIANI, D. and BERTOLO, G. Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. **Journal of Food Engineering**, v.49 (2/3), p. 247-253, 2001.

TORRES, J. D.; TALENS, P.; ESCRICHE, I.; CHIRALT, A. Influence of process conditions on mechanical properties of osmotically dehydrated mango. **Journal of Food Engineering**, v.74, n.2, p. 240-246, 2006.

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

- VIAL, C; GUILBERT, S.; CUQ, J. L. Osmotic dehydration of kiwi fruits: influence of process variables on the color and ascorbic acid content. **Sciences des Aliments. Paris**, v.11, p.63-84, 1991.
- VEGA, A.; FITO, P.; ANDRÈS, A.; LEMUS, R. Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo). **Journal of Food Engineering**, v.79 (4), p.1460-1466, 2007.
- VINCI, G.; BOTRÉ, F.; MELE, G. Ascorbic acid in exotic fruits: a liquid chromatographic investigation. **Food Chemistry**, v.53, p. 211-214, 1995.
- WALISZEWSKI, K. N.; CORTES, H. D.; PARDIO, V. T.; GARCIA, M. A. Color parameter changes in banana slices during osmotic dehydration. **Drying Technology**, v.17 (4-5), p.955-960, 1999.
- WALISZEWSKI, K. N.; DELGADO, J. N.; GARCÍA, M. A. Equilibrium concentration and water and sucrose diffusivity in osmotic dehydration of pineapple slabs. **Drying Technology**, v.20 (2), p.527-538, 2002.

## **APÊNDICE I**

**Especificações do xarope de milho de alta maltose.**

## Maltegil 63/82®

Maltegil 63/82® é obtido através da conversão ácido-enzimático, resultando em um maior teor de maltose. Este xarope proporciona melhor sabor, consistência e textura aos produtos.

Aplicação	Caramelos de leite Recheios de chocolate Biscoitos Coberturas para sorvetes
Dextrose Equivalente (%)	60 - 66
Sólidos Totais	81,5 - 84,5
pH	4,5 - 5,5
Proteína (%)	0,09 máx.
Cinzas (%)	0,25 máx.
SO <sub>2</sub> (ppm)	40 - 150
Perfil de açúcares (% base seca)	
Dextrose	40,0 máx.
Maltose	36,0 máx.
Maltotriose	36,0 máx.

**EMBALAGEM:**

Balde plástico de 25 Kg; Tambor metálico de 280 Kg; Bag in box de 1000 Kg e Granel.

**TRANSPORTE:**

Veículos fechados, livre de materiais e odores estranhos.

**ARMAZENAGEM:**

Baldes, tambores e bag in box: armazenar sobre pallets em local coberto, seco e ventilado.

Granel: manter na temperatura mais baixa possível, que permita o bombeamento. Altas temperaturas devem ser evitadas para prevenir o escurecimento do produto.

**PRAZO DE VALIDADE:**

Granel: 4 meses (desde que estocado sob condições adequadas)

Baldes, tambores e bag in box: 12 meses (desde que estocado sob condições adequadas).

Outras informações estão disponíveis para atender a requisitos específicos. Favor nos contactar para aplicações particulares.

Vendas: Av. Morumbi, 8234  
Tel: 11 5099 - 3662

São Paulo - São Paulo  
Fax: 11 5099 - 3668

Informações Técnicas: Av. Cargill, s/n.  
Tel: 11 4718 - 8257

Mairinque - São Paulo  
Fax: 11 4718 - 1519

[www.cargill.com.br](http://www.cargill.com.br)

Fev/05

As informações contidas neste documento foram compiladas de nossa experiência e de várias publicações técnicas tidas como verdadeiras. Não garantimos a exatidão dos dados. O único propósito deste documento é ser um guia para o manuseio apropriado do material. É de responsabilidade do usuário determinar a adequação destas informações para a adoção das precauções de segurança necessárias.

## **APÊNDICE II**

### **Especificações do Proxitane® 1512.**

## **Proxitane® 1512**

*Ácido Peracético-Fungicida, Viricida, Bactericida*

### **Descrição**

Solução equilibrada, de incolor a levemente amarelada, de odor forte e característico, constituída de ácido peracético, peróxido de hidrogênio, ácido acético e veículo estabilizante. Desinfetante de uso profissional para as indústrias alimentícia.

### **Composição**

<b>Proxitane® 1512</b>	<b>Teor (%)</b>
Ácido peracético	15
Peróxido de hidrogênio	23
Ácido acético	16
Veículo estabilizante q.s.p.	100

### **Dados Técnicos**

<b>Proxitane® 1512</b>	
Oxigênio disponível, %	14,00
Densidade a 20°C, g/mL	1,12
Ponto de fulgor, °C	não aplicável
Ponto de congelamento, °C	- 30
Inflamabilidade	não aplicável
Aspecto	Líquido límpido, isento de partículas de suspensão
Prazo de validade	9 meses a partir da data de fabricação

### **Solubilidade**

Solúvel em água em qualquer proporção, bem como em solventes orgânicos e polares. A solubilidade em hidrocarbonetos aromáticos e halogenados são limitadas.

**Peróxidos do Brasil** <<http://www.peroxidos.com.br/>>

Produto registrado no Ministério da Saúde (MS).

## **APÊNDICE III**

**Valores da relação GS/PA para as amostras de abacaxi desidratadas osmoticamente.**

**Tabela A1 – Valores da perda de água (PA), ganho de sólidos (GS) e do adimensional GS/PA para as amostras de abacaxi desidratadas osmoticamente em soluções de sacarose, de acordo com os modelos matemáticos propostos (equação 4.1 e 4.2).**

<b>Concentração (C)</b>	<b>Temperatura (T)</b>	<b>PA</b>	<b>GS</b>	<b>GS/PA</b>
40	30	16,03	3,37	0,21
40	35	16,30	3,52	0,22
40	40	18,66	4,87	0,26
40	45	21,02	6,23	0,30
45	30	16,24	3,50	0,22
45	35	16,51	3,66	0,22
45	40	18,87	5,01	0,27
45	45	21,23	6,37	0,30
50	30	18,63	5,07	0,27
50	35	18,89	5,22	0,28
50	40	21,25	6,58	0,31
50	45	23,61	7,94	0,34
55	30	21,01	6,64	0,32
55	35	21,27	6,79	0,32
55	40	23,63	8,14	0,34
55	45	25,99	9,50	0,37
60	30	21,22	6,78	0,32
60	35	21,48	6,93	0,32
60	40	23,84	8,29	0,35
60	45	26,20	9,64	0,37

**Tabela A2 – Valores da perda de água (PA), ganho de sólidos (GS) e do adimensional GS/PA para as amostras de abacaxi desidratadas osmoticamente em soluções de maltose, de acordo com os modelos matemáticos propostos (equação 4.3 e 4.4).**

<b>Concentração (C)</b>	<b>Temperatura (T)</b>	<b>PA</b>	<b>GS</b>	<b>GS/PA</b>
<b>40</b>	<b>30</b>	17,70	0,90	0,051
<b>40</b>	<b>35</b>	18,37	1,00	0,055
<b>40</b>	<b>40</b>	22,89	1,97	0,086
<b>40</b>	<b>45</b>	24,62	2,93	0,119
<b>45</b>	<b>30</b>	17,67	0,98	0,055
<b>45</b>	<b>35</b>	18,34	1,09	0,059
<b>45</b>	<b>40</b>	22,87	2,05	0,090
<b>45</b>	<b>45</b>	24,59	3,01	0,123
<b>50</b>	<b>30</b>	19,22	1,90	0,099
<b>50</b>	<b>35</b>	19,90	2,01	0,101
<b>50</b>	<b>40</b>	24,42	2,97	0,122
<b>50</b>	<b>45</b>	26,14	3,93	0,151
<b>55</b>	<b>30</b>	24,18	2,82	0,116
<b>55</b>	<b>35</b>	24,86	2,92	0,118
<b>55</b>	<b>40</b>	29,38	3,89	0,132
<b>55</b>	<b>45</b>	31,10	4,85	0,156
<b>60</b>	<b>30</b>	24,80	2,90	0,117
<b>60</b>	<b>35</b>	25,48	3,01	0,118
<b>60</b>	<b>40</b>	30,00	3,97	0,132
<b>60</b>	<b>45</b>	31,72	4,94	0,156

## **APÊNDICE IV**

**Tabelas dos dados da cinética de secagem.**

**Tabela 1 – Dados experimentais da cinética de secagem da amostra de abacaxi *in natura*, na temperatura de 50°C e velocidade do ar de 1,5 m/s.**

<b>Tempo (min)</b>	<b>Massa da amostra (g)</b>	<b>X<sub>bs</sub> (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>)</b>	<b>X<sub>bu</sub> (%)</b>	<b>Taxa de secagem (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>·min)</b>	<b>Y<sub>experimental</sub></b>
0	136,00	5,43	0,84		1,0000
16	119,67	4,66	0,82	0,0483	0,8549
32	110,20	4,21	0,81	0,0280	0,7707
47	102,85	3,86	0,79	0,0232	0,7054
62	98,85	3,67	0,79	0,0126	0,6699
88	89,10	3,21	0,76	0,0177	0,5833
114	83,10	2,93	0,75	0,0109	0,5300
157	74,22	2,51	0,72	0,0098	0,4510
182	70,18	2,32	0,70	0,0076	0,4152
240	61,86	1,92	0,66	0,0068	0,3412
305	54,27	1,57	0,61	0,0055	0,2738
383	47,10	1,23	0,55	0,0043	0,2100
424	44,06	1,08	0,52	0,0035	0,1831
478	40,44	0,91	0,48	0,0032	0,1509
551	36,48	0,72	0,42	0,0026	0,1157
602	34,09	0,61	0,38	0,0022	0,0945
657	31,98	0,51	0,34	0,0018	0,0757
723	29,73	0,41	0,29	0,0016	0,0557
741	28,17	0,33	0,25	0,0041	0,0419
845	26,76	0,27	0,21	0,0006	0,0294
900	25,81	0,22	0,18	0,0008	0,0209
960	25,00	0,18	0,15	0,0006	0,0137
1020	24,34	0,15	0,13	0,0005	0,0079
1085	23,86	0,13	0,11	0,0004	0,0036
1143	23,51	0,11	0,10	0,0003	0,0005

**Tabela 2 – Dados experimentais da cinética de secagem da amostra de abacaxi *in natura*, na temperatura de 60°C e velocidade do ar de 1,5 m/s.**

<b>Tempo (min)</b>	<b>Massa da amostra (g)</b>	<b>X<sub>bs</sub> (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>)</b>	<b>X<sub>bu</sub> (%)</b>	<b>Taxa de secagem (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>·min)</b>	<b>Y<sub>experimental</sub></b>
0	132,09	5,90	0,86		1,0000
15	114,30	4,97	0,83	0,0619	0,8397
30	102,15	4,33	0,81	0,0423	0,7303
48	92,56	3,83	0,79	0,0278	0,6439
63	86,72	3,53	0,78	0,0203	0,5913
98	73,44	2,83	0,74	0,0198	0,4716
130	64,58	2,37	0,70	0,0145	0,3918
153	59,45	2,10	0,68	0,0116	0,3456
182	52,84	1,76	0,64	0,0119	0,2860
241	41,88	1,19	0,54	0,0097	0,1873
305	33,25	0,74	0,42	0,0070	0,1095
380	27,96	0,46	0,32	0,0037	0,0619
427	24,22	0,26	0,21	0,0042	0,0282
478	22,72	0,19	0,16	0,0015	0,0147
556	21,67	0,13	0,12	0,0007	0,0052
600	21,33	0,11	0,10	0,0004	0,0022
660	21,13	0,10	0,09	0,0002	0,0004

**Tabela 3 – Dados experimentais da cinética de secagem da amostra de abacaxi *in natura*, na temperatura de 70°C e velocidade do ar de 1,5 m/s.**

<b>Tempo (min)</b>	<b>Massa da amostra (g)</b>	<b>X<sub>bs</sub> (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>)</b>	<b>X<sub>bu</sub> (%)</b>	<b>Taxa de secagem (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>·min)</b>	<b>Y<sub>experimental</sub></b>
0	130,29	5,26	0,84		1,0000
17	108,42	4,21	0,81	0,0618	0,7966
32	97,07	3,67	0,79	0,0364	0,6911
47	87,15	3,19	0,76	0,0318	0,5988
61	76,89	2,70	0,73	0,0352	0,5034
92	66,78	2,21	0,69	0,0157	0,4093
118	54,68	1,63	0,62	0,0224	0,2969
160	42,60	1,05	0,51	0,0138	0,1845
183	37,70	0,81	0,45	0,0103	0,1389
239	29,41	0,41	0,29	0,0071	0,0618
305	25,09	0,21	0,17	0,0031	0,0216
364	23,85	0,15	0,13	0,0010	0,0101
421	23,39	0,12	0,11	0,0004	0,0058
482	23,02	0,11	0,10	0,0003	0,0024
537	22,81	0,10	0,09	0,0002	0,0004

**Tabela 4 – Dados experimentais da cinética de secagem da amostra de abacaxi pré-tratado osmoticamente com soluções de sacarose, na temperatura de 50°C e velocidade do ar de 1,5 m/s.**

<b>Tempo (min)</b>	<b>Massa da amostra (g)</b>	<b>Xbs (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>)</b>	<b>Xbu (%)</b>	<b>Taxa de secagem (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>·min)</b>	<b>Y<sub>experimental</sub></b>
0	108,70	3,35	0,77		1,0000
15	96,43	2,86	0,74	0,0327	0,8471
30	90,48	2,62	0,72	0,0159	0,7730
45	85,99	2,44	0,71	0,0120	0,7171
61	82,10	2,28	0,70	0,0097	0,6686
92	75,98	2,04	0,67	0,0079	0,5924
120	71,55	1,86	0,65	0,0063	0,5372
150	67,73	1,71	0,63	0,0051	0,4896
183	63,67	1,55	0,61	0,0049	0,4390
245	57,40	1,30	0,56	0,0040	0,3610
307	52,28	1,09	0,52	0,0033	0,2972
376	48,87	0,95	0,49	0,0020	0,2547
451	43,24	0,73	0,42	0,0030	0,1846
545	38,88	0,55	0,36	0,0019	0,1302
600	36,88	0,47	0,32	0,0015	0,1053
660	34,88	0,39	0,28	0,0013	0,0805
720	33,31	0,33	0,25	0,0010	0,0610
780	31,69	0,27	0,21	0,0011	0,0407
840	30,93	0,24	0,19	0,0005	0,0313
960	29,44	0,18	0,15	0,0005	0,0127
1020	28,90	0,16	0,13	0,0004	0,0059
1080	28,49	0,14	0,12	0,0003	0,0009

**Tabela 5 – Dados experimentais da cinética de secagem da amostra de abacaxi pré-tratado osmoticamente com soluções de sacarose, na temperatura de 60°C e velocidade do ar de 1,5 m/s.**

<b>Tempo (min)</b>	<b>Massa da amostra (g)</b>	<b>Xbs (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>)</b>	<b>Xbu (%)</b>	<b>Taxa de secagem (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>·min)</b>	<b>Y<sub>experimental</sub></b>
0	105,97	3,52	0,78		1,0000
15	90,40	2,86	0,74	0,0443	0,8042
30	83,81	2,57	0,72	0,0187	0,7213
45	78,68	2,36	0,70	0,0146	0,6568
60	74,07	2,16	0,68	0,0131	0,5988
119	61,98	1,64	0,62	0,0087	0,4468
150	55,91	1,38	0,58	0,0084	0,3704
180	50,84	1,17	0,54	0,0072	0,3066
240	42,48	0,81	0,45	0,0059	0,2015
290	37,27	0,59	0,37	0,0044	0,1359
374	31,40	0,34	0,25	0,0030	0,0622
426	29,51	0,26	0,21	0,0015	0,0384
480	28,23	0,20	0,17	0,0010	0,0223
540	27,39	0,17	0,14	0,0006	0,0118
600	26,89	0,15	0,13	0,0004	0,0055
660	26,56	0,13	0,12	0,0002	0,0013

**Tabela 6 – Dados experimentais da cinética de secagem da amostra de abacaxi pré-tratado osmoticamente com soluções de sacarose, na temperatura de 70°C e velocidade do ar de 1,5 m/s.**

<b>Tempo (min)</b>	<b>Massa da amostra (g)</b>	<b>X<sub>bs</sub> (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>)</b>	<b>X<sub>bu</sub> (%)</b>	<b>Taxa de secagem (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>·min)</b>	<b>Y<sub>experimental</sub></b>
0	103,09	3,30	0,77		1,0000
15	86,70	2,61	0,72	0,0456	0,7868
33	77,39	2,23	0,69	0,0216	0,6658
47	71,89	2,00	0,67	0,0164	0,5943
62	66,26	1,76	0,64	0,0156	0,5211
91	57,12	1,38	0,58	0,0131	0,4023
123	48,93	1,04	0,51	0,0107	0,2957
156	42,30	0,76	0,43	0,0084	0,2096
182	38,36	0,60	0,37	0,0063	0,1584
238	32,14	0,34	0,25	0,0046	0,0775
302	28,78	0,20	0,17	0,0022	0,0338
383	27,34	0,14	0,12	0,0007	0,0151
423	26,66	0,11	0,10	0,0007	0,0062
484	26,24	0,09	0,09	0,0003	0,0008

**Tabela 7 – Dados experimentais da cinética de secagem da amostra de abacaxi pré-tratado osmoticamente com soluções de maltose, na temperatura de 50°C e velocidade do ar de 1,5 m/s.**

<b>Tempo (min)</b>	<b>Massa da amostra (g)</b>	<b>Xbs (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>)</b>	<b>Xbu (%)</b>	<b>Taxa de secagem (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>·min)</b>	<b>Y<sub>experimental</sub></b>
0	109,73	2,87	0,74		1,0000
15	98,32	2,47	0,71	0,0269	0,8520
30	92,29	2,26	0,69	0,0142	0,7739
49	87,05	2,07	0,67	0,0097	0,7059
63	83,79	1,96	0,66	0,0082	0,6637
91	78,58	1,77	0,64	0,0066	0,5962
120	74,13	1,62	0,62	0,0054	0,5385
152	69,76	1,46	0,59	0,0048	0,4818
210	63,22	1,23	0,55	0,0040	0,3971
252	59,55	1,10	0,52	0,0031	0,3495
304	55,42	0,96	0,49	0,0028	0,2960
360	51,56	0,82	0,45	0,0024	0,2460
425	47,91	0,69	0,41	0,0020	0,1987
488	44,84	0,58	0,37	0,0017	0,1588
569	41,65	0,47	0,32	0,0014	0,1176
610	40,34	0,42	0,30	0,0011	0,1006
662	38,81	0,37	0,27	0,0010	0,0807
722	37,32	0,32	0,24	0,0009	0,0614
844	35,04	0,24	0,19	0,0007	0,0319
901	34,25	0,21	0,17	0,0005	0,0216
962	33,57	0,18	0,16	0,0004	0,0127
1022	33,01	0,17	0,14	0,0003	0,0056
1082	32,62	0,15	0,13	0,0002	0,0005

**Tabela 8 – Dados experimentais da cinética de secagem da amostra de abacaxi pré-tratado osmoticamente com soluções de maltose, na temperatura de 60°C e velocidade do ar de 1,5 m/s.**

<b>Tempo (min)</b>	<b>Massa da amostra (g)</b>	<b>X<sub>bs</sub> (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>)</b>	<b>X<sub>bu</sub> (%)</b>	<b>Taxa de secagem (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>·min)</b>	<b>Y<sub>experimental</sub></b>
0	105,65	2,87	0,74		1,0000
15	93,09	2,41	0,71	0,0307	0,8339
30	86,66	2,17	0,68	0,0157	0,7490
49	80,34	1,94	0,66	0,0122	0,6654
62	77,00	1,82	0,65	0,0094	0,6213
96	69,33	1,54	0,61	0,0083	0,5199
122	64,55	1,36	0,58	0,0067	0,4567
157	59,15	1,16	0,54	0,0056	0,3853
183	55,77	1,04	0,51	0,0048	0,3406
257	47,46	0,74	0,42	0,0041	0,2308
301	43,74	0,60	0,38	0,0031	0,1817
360	39,67	0,45	0,31	0,0025	0,1278
417	36,70	0,34	0,26	0,0019	0,0886
481	34,22	0,25	0,20	0,0014	0,0558
542	32,59	0,19	0,16	0,0010	0,0343
603	31,51	0,15	0,13	0,0007	0,0200
660	30,87	0,13	0,11	0,0004	0,0115
724	30,34	0,11	0,10	0,0003	0,0046
780	30,05	0,10	0,09	0,0002	0,0007

**Tabela 9 – Dados experimentais da cinética de secagem da amostra de abacaxi pré-tratado osmoticamente com soluções de maltose, na temperatura de 70°C e velocidade do ar de 1,5 m/s.**

<b>Tempo (min)</b>	<b>Massa da amostra (g)</b>	<b>Xbs (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>)</b>	<b>Xbu (%)</b>	<b>Taxa de secagem (g<sub>água</sub>/g<sub>massa_seca</sub>·min)</b>	<b>Y<sub>experimental</sub></b>
0	114,10	2,79	73,62		1,0000
15	99,29	2,30	69,68	0,0328	0,8180
30	91,74	2,05	67,19	0,0167	0,7253
48	84,31	1,80	64,30	0,0137	0,6341
63	79,50	1,64	62,14	0,0107	0,5750
90	71,64	1,38	57,98	0,0097	0,4785
125	62,87	1,09	52,12	0,0083	0,3708
155	56,84	0,89	47,04	0,0067	0,2967
180	52,79	0,75	42,99	0,0054	0,2470
232	45,26	0,50	33,50	0,0048	0,1545
321	37,85	0,26	20,47	0,0028	0,0634
374	35,75	0,19	15,81	0,0013	0,0377
420	34,61	0,15	13,03	0,0008	0,0237
480	33,68	0,12	10,63	0,0005	0,0122
540	33,14	0,10	9,18	0,0003	0,0056
601	32,72	0,09	8,01	0,0002	0,0005