



UNICAMP

---

Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia de Alimentos  
Departamento de Engenharia de Alimentos

---



---

---

**ESTUDO DO PROCESSO DE SECAGEM DE MAMÃO FORMOSA  
(*CARICA PAPAYA L.*) FRESCO E PRÉ-TRATADO  
OSMOTICAMENTE**

---

Por

**Ânoar Abbas El-Aouar**

(Engenheiro Químico)

(Mestre em Engenharia de Alimentos)

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Fernanda Elizabeth Xidieh Murr**

(Orientadora)

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Alimentos

Campinas – SP  
Junho 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA F.E.A. – UNICAMP

EL13e El-Aouar, Ânoar Abbas  
Estudo do processo de secagem de mamão formosa (*Carica papaya*  
L.) fresco e pré-tratado osmoticamente / Ânoar Abbas El-Aouar. –  
Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Fernanda Elizabeth Xidieh Murr  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas.Faculdade  
de Engenharia de Alimentos.

1. Mamão. 2. Desidratação osmótica. 3. Secagem. 4.  
Encolhimento. 5. Análise sensorial. I. Murr, Fernanda Elizabeth  
Xidieh. II. Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de  
Engenharia de Alimentos. III. Título.

(ckn/fea)

Titulo em ingles: Study of drying process of fresh and osmotically pre-treated papaya  
(*Carica papaya* L.)

Palavras-chave em inglês (Keywords): Papaya, Osmotic dehydration, Drying, Shrinkage,  
Sensory analysis

Titulação: Doutor em Engenharia de Alimentos

Banca examinadora: Fernanda Elizabeth Xidieh Murr

Antonio Carlos Luz Lisboa

Florência Cecília Menegalli

Helena Maria André Bolini

Kil Jin Park

Valdecir Luccas

## BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Elizabeth Xidieh Murr  
**(Orientadora)**

---

Prof. Dr. Antonio Carlos Luz Lisboa  
**(Membro)**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Florência Cecília Menegalli  
**(Membro)**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Helena Maria André Bolini  
**(Membro)**

---

Prof. Dr. Kil Jin Park  
**(Membro)**

---

Prof. Dr. Valdecir Luccas  
**(Membro)**



*“No meio do caminho tinha uma pedra*

*Tinha uma pedra no meio do caminho*

*Tinha uma pedra*

*No meio do caminho tinha uma pedra”*

*Carlos Drummond de Andrade*

*“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertence”*

*Albert Einstein*

*Nesta minha longa jornada acadêmica houve muitas “pedras em meu caminho”, mas pedras que me fortaleceram, fazendo com que eu amadurecesse moral e profissionalmente e, com o cimento da fé, concretizasse esta fase de minha vida com êxito.*

*Ânoar Abbas El-Aouar*

*Dedico este trabalho aos meus queridos Pais Abbas e Nédia a quem eu tanto amo e aos meus irmãos Adel, Nege e Walid que tanto me apoiaram e me incentivaram nos momentos difíceis por que passei. Sou realmente um privilegiado por fazer parte de uma família tão maravilhosa. Muito obrigado por tudo e que Deus os abençoe e os ilumine a todos.*

*Ânoar Abbas El-Aouar*



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, que me proporcionou e continua proporcionando a oportunidade de evoluir moral e profissionalmente.

À Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Fernanda Elizabeth Xidieh Murr pela orientação, conselhos e generosidade durante toda minha estada na pós-graduação; que Deus a abençoe.

Aos membros da banca examinadora Prof. Dr. Antonio Carlos Luz Lisboa, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Florência Cecília Menegalli, Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Helena Maria André Bolini, Prof. Dr. Kil Jin Park, Prof. Dr. Valdecir Luccas, pela disposição em fazer as correções em tempo hábil, e pelas valiosas sugestões visando a melhoria deste trabalho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo auxílio financeiro concedido.

À *Corn Products Brazil* pelo fornecimento do xarope de milho utilizado nos ensaios de desidratação osmótica.

À Andréia C. L. Pereira (Dedê) pelo amor e suporte emocional fundamentais para superar a distância da família durante todo o período que estive aqui em Campinas – SP.

Aos meus amigos do Laboratório de Medidas Físicas Eder Araújo e José Barbosa Junior (Patrões), Suezilde Ribeiro, Patrícia Azoubel, Graziella Antonio, Adélia Cristina, Maristela Santana, Louise Kurozawa, Márcia Simões e César Lescano que sempre souberam fazer do LAMEFI um ambiente agradável e aconchegante para se trabalhar.

Aos amigos dos laboratórios vizinhos Rafael (LPFTAR), Elias (LASEFI), “Lizi” (LEP), Flávio (LMA).

Aos funcionários da *Secretaria do Departamento de Engenharia de Alimentos* e ao Sr. Cosme Perrota pela disposição em ajudar sempre.

Seria praticamente impossível lembrar de todas as pessoas que contribuíram de alguma maneira para que este trabalho chegasse ao final com êxito. Caso tenha me esquecido de você, desculpe-me, mas tenha a certeza de que sou imensamente grato a você e a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho.

Muitíssimo obrigado a todos!!!

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Grupos de mamão comercializados no Brasil.....	05
Figura 3.2 – Área colhida e produção de mamão por região no Brasil.....	11
Figura 3.3 – Principais fluxos que ocorrem durante o processo de desidratação osmótica.....	18
Figura 3.4 – Exemplo de Ficha para teste de escala hedônica estruturada mista.....	57
Figura 4.1 – Mamão Formosa utilizado nos experimentos.....	61
Figura 4.2 – Mamão fresco cortado em placas.....	61
Figura 4.3 – Cortador utilizado nos experimentos.....	62
Figura 4.4 – Cotas para a medição da largura e profundidade em diferentes pontos das amostras de mamão.....	68
Figura 4.5 – Pontos de medição da espessura ao longo da amostra de mamão.....	68
Figura 4.6 - Esquema do secador vertical de leito fixo utilizado nos experimentos.....	74
Figura 5.1 – Curva de pressão osmótica das soluções de sacarose e xarope de milho utilizadas na desidratação osmótica de mamão.....	82
Figura 5.2 – Ajuste matemático para os dados de pressão osmótica das soluções de sacarose e xarope de milho utilizadas na desidratação osmótica de mamão.....	83
Figura 5.3 – Distribuição de resíduos para a perda de peso durante a desidratação osmótica de mamão em (a) soluções de sacarose e (b) xarope de milho.....	88
Figura 5.4 – Influência das variáveis independentes sobre a perda de peso durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose.....	91
Figura 5.5 – Influência das variáveis independentes sobre a perda de peso durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de xarope de milho.....	92
Figura 5.6 – Distribuição de resíduos para a perda de água durante a desidratação osmótica de mamão em (a) soluções de sacarose e (b) xarope de milho.....	95
Figura 5.7 – Influência das variáveis independentes sobre a perda de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose.....	98
Figura 5.8 – Influência das variáveis independentes sobre a perda de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de xarope de milho.....	99
Figura 5.9– Distribuição de resíduos para o ganho de sólidos durante a desidratação osmótica de mamão em (a) soluções de sacarose e (b) xarope de milho.....	103
Figura 5.10 – Influência das variáveis independentes sobre o ganho de sólidos durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose.....	105
Figura 5.11 – Influência das variáveis independentes sobre o ganho de sólidos durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de xarope de milho.....	106
Figura 5.12 – Distribuição de resíduos para a atividade de água durante a desidratação osmótica de mamão em (a) soluções de sacarose e (b) xarope de milho.....	109

Figura 5.13 – Influência das variáveis independentes sobre a atividade de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose.....	112
Figura 5.14 – Influência das variáveis independentes sobre a atividade de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de xarope de milho.....	113
Figura 5.15 – Influência das variáveis independentes sobre a razão PP/PA e $a_w$ durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose.....	117
Figura 5.16 – Influência das variáveis independentes sobre a razão PP/PA e $a_w$ durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de xarope de milho.....	118
Figura 5.17 – Cinética de perda de água e ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	121
Figura 5.18 – Taxas de perda de água e ganho de sólidos em função do conteúdo de umidade das amostras desidratadas osmoticamente em sacarose e xarope de milho.....	122
Figura 5.19 – Modelagem através do modelo de Azuara e colaboradores (1992) para a perda de água e para o ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	123
Figura 5.20 – Modelagem através do modelo de Peleg (1988) para a perda de água e para o ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	123
Figura 5.21 - Modelagem através do Modelo Difusional para a perda de água e para o ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	124
Figura 5.22 – Dados experimentais de encolhimento volumétrico de amostras de mamão desidratadas osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho em função do tempo de imersão.....	128
Figura 5.23 – Dados experimentais de encolhimento volumétrico de amostras de mamão desidratadas osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho em função do conteúdo de umidade.....	129
Figura 5.24 – Relação entre o encolhimento volumétrico e perda de matéria de amostras de mamão desidratadas osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.....	130
Figura 5.25 – Variação das dimensões do mamão em função do conteúdo de umidade das amostras.....	131
Figura 5.26 – Ajuste linear da relação entre o volume das amostras de mamão e o conteúdo de umidade das mesmas para a desidratação osmótica em soluções de sacarose e xarope de milho.....	132
Figura 5.27 - Relação entre o volume das amostras de mamão e o conteúdo de umidade das mesmas descrita pela Equação 4.9 para a desidratação osmótica em soluções de sacarose e xarope de milho.....	133

Figura 5.28 – Modelo Difusional considerando encolhimento para a desidratação osmótica de mamão Formosa em soluções de sacarose e xarope de milho.....	134
Figura 5.29 – Modelo Difusional modificado por Park (1998) para a desidratação osmótica de mamão Formosa em soluções de sacarose e xarope de milho.....	136
Figura 5.30 – Adimensional de umidade em função do tempo para o processo de secagem das frutas fresca e pré-tratada osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.....	138
Figura 5.31 – Adimensional de umidade em função do tempo para o processo de secagem das frutas fresca e pré-tratada osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.....	139
Figura 5.32 – Adimensional de umidade em função do tempo para o processo de secagem das frutas pré-tratadas osmoticamente em sacarose e xarope de milho a várias temperaturas de processo.....	139
Figura 5.33 – Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade das amostras para o processo de secagem da fruta fresca e pré-tratada osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.....	141
Figura 5.34 – Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade das amostras para o processo de secagem da fruta fresca e pré-tratada osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.....	141
Figura 5.35 – Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade das amostras para o processo de secagem das frutas frescas e pré-tratadas osmoticamente em sacarose e xarope de milho a várias temperaturas de processo.....	141
Figura 5.36 – Modelo Difusional para o processo de secagem de mamão in natura a várias temperaturas de processo.....	143
Figura 5.37 – Modelo Difusional para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.....	144
Figura 5.38 – Modelo Difusional para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.....	144
Figura 5.39 – Modelo empírico de Page para o processo de secagem de mamão in natura a várias temperaturas de processo.....	148
Figura 5.40 – Modelo empírico de Page para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.....	148
Figura 5.41 – Modelo empírico de Page para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.....	149
Figura 5.42 – Variação do volume das amostras em função de seus conteúdos de umidade para o processo de secagem de mamão in natura e pré-tratado osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.....	151

Figura 5.43 – Variação do volume das amostras em função de seus conteúdos de umidade para o processo de secagem de mamão in natura e pré-tratado osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.....	151
Figura 5.44 – Variação do volume das amostras em função de seus conteúdos de umidade para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em sacarose e xarope de milho a várias temperaturas de processo.....	152
Figura 5.45 – Variação do volume de água removida das amostras em função da variação em seus volumes para o processo de secagem de mamão in natura a várias temperaturas de processo.....	153
Figura 5.46 – Variação do volume de água removida das amostras em função da variação em seus volumes para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.....	154
Figura 5.47 – Variação do volume de água removida das amostras em função da variação em seus volumes para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.....	154
Figura 5.48 – Variação nas dimensões do material em função do conteúdo adimensional de umidade durante a secagem das amostras frescas a várias temperaturas de processo.....	157
Figura 5.49 – Variação nas dimensões do material em função do conteúdo adimensional de umidade durante a secagem das amostras pré-tratadas em sacarose a várias temperaturas de processo.....	157
Figura 5.50 – Variação nas dimensões do material em função do conteúdo adimensional de umidade durante a secagem das amostras pré-tratadas em xarope de milho a várias temperaturas de processo.....	158
Figura 5.51 – Modelo Difusional com encolhimento para o processo de secagem de mamão in natura a várias temperaturas de processo.....	159
Figura 5.52 – Modelo Difusional com encolhimento para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.....	160
Figura 5.53 – Modelo Difusional com encolhimento para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.....	160
Figura 5.54 – Modelos propostos por Suzuki e colaboradores (1976) para o processo de secagem da fruta fresca a várias temperaturas de processo. (a) Modelo uniforme 1 e (b) uniforme 2.....	162
Figura 5.55 – Modelos propostos por Suzuki e colaboradores (1976) para o processo de secagem da fruta pré-tratada em sacarose a várias temperaturas de processo. (a) Modelo uniforme 1 e (b) uniforme 2 .....	162

Figura 5.56 – Modelos propostos por Suzuki e colaboradores (1976) para o processo de secagem da fruta pré-tratada em xarope de milho a várias temperaturas de processo. (a) Modelo uniforme 1 e (b) uniforme 2.....	162
Figura 5.57 – Perfil dos provadores utilizados nos testes de aceitação das amostras de mamão passa. (a) sexo, (b) faixa etária e (c) consumo de frutas desidratadas do tipo passa.	168
Figura 5.58 – Histograma de freqüência para os atributos sensoriais de (a) aparência, (b) aroma, (c) sabor, (d) textura e (e) impressão global das amostras de mamão secas sem tratamento e pré-tratadas osmoticamente.....	170

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição centesimal média do mamão e valor alimentício.....	08
Tabela 3.2 – Efeito do grau de maturação no rendimento e qualidade do mamão fresco.....	10
Tabela 3.3 – Principais produtores mundiais de mamão para o ano de 2003.....	12
Tabela 3.4 – Valores mínimos de $a_w$ para o desenvolvimento de alguns microrganismos patogênicos.....	42
Tabela 4.1 – Planejamento experimental fatorial $2^3$ com pontos centrais e axiais realizado para avaliar a desidratação osmótica de mamão Formosa em soluções de sacarose e xarope de milho.....	64
Tabela 5.1 – Caracterização físico-química da fruta fresca.....	77
Tabela 5.2 – Valores experimentais das variáveis dependentes para a desidratação osmótica de mamão Formosa em soluções de sacarose.....	80
Tabela 5.3 – Valores experimentais das variáveis dependentes para a desidratação osmótica de mamão Formosa em soluções de xarope de milho.....	81
Tabela 5.4 – Composição média do xarope de milho.....	81
Tabela 5.5 – Relação entre as concentrações de sacarose e xarope de milho para obtenção de uma mesma pressão osmótica.....	83
Tabela 5.6 – Magnitude dos efeitos avaliada através do MS Erro puro e do MS Residual para a perda de peso durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e de xarope de milho.....	85
Tabela 5.7 – Análise de Variância (ANOVA) para a perda de peso durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	87
Tabela 5.8 – Coeficientes do modelo estatístico para a perda de peso durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	89
Tabela 5.9 – Magnitude dos efeitos avaliada através do MS Erro puro e do MS Residual para a perda de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e de xarope de milho.....	93
Tabela 5.10 – Análise de Variância (ANOVA) para a perda de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	95
Tabela 5.11 – Coeficientes do modelo estatístico para a perda de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	96
Tabela 5.12 – Magnitude dos efeitos avaliada através do MS Erro puro e do MS Residual para o ganho de sólidos durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e de xarope de milho.....	100
Tabela 5.13 – Análise de Variância (ANOVA) para o ganho de sólidos durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	102

Tabela 5.14 – Coeficientes do modelo estatístico para o ganho de sólidos durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	103
Tabela 5.15 – Magnitude dos efeitos avaliada através do MS Erro puro e do MS Residual para a atividade de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e de xarope de milho.....	107
Tabela 5.16 – Análise de Variância (ANOVA) para a atividade de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	109
Tabela 5.17 – Coeficientes do modelo estatístico para a atividade de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	110
Tabela 5.18 – Análise de Variância (ANOVA) para a razão PP/PA durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	116
Tabela 5.19 – Parâmetros de ajuste obtidos do modelo de Azuara e colaboradores (1992) durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	124
Tabela 5.20 – Parâmetros de ajuste obtidos do modelo de Peleg (1988) durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	125
Tabela 5.21 – Valores de difusividade efetiva de água e sólidos obtidos pelo modelo de Azuara e colaboradores (1992) durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	126
Tabela 5.22 – Parâmetros de ajuste obtidos do Modelo Difusional durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	126
Tabela 5.23 – Parâmetros de ajuste linear para a relação entre volume e umidade das amostras de mamão submetidas à desidratação osmótica em soluções de sacarose e xarope de milho.....	132
Tabela 5.24 – Parâmetros de ajuste não linear para a relação entre área superficial e volume das amostras de mamão submetidas à desidratação osmótica em soluções de sacarose e xarope de milho.....	134
Tabela 5.25 – Parâmetros de ajuste obtidos do Modelo Difusional considerando o encolhimento durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	135
Tabela 5.26 – Parâmetros de ajuste obtidos do Modelo Difusional modificado por Park (1998) considerando o encolhimento durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.....	136
Tabela 5.27 – Parâmetros de processo da secagem convectiva de mamão Formosa fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.....	137
Tabela 5.28 – Parâmetros de ajuste obtidos do Modelo Difusional durante a secagem convectiva de mamão fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.....	145

Tabela 5.29 – Parâmetros de ajuste obtidos do modelo empírico de Page durante a secagem convectiva de mamão fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.....	149
Tabela 5.30 – Parâmetros de ajuste obtidos do Modelo Difusional considerando o encolhimento durante a secagem convectiva de mamão fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.....	161
Tabela 5.31 – Parâmetros de ajuste obtidos dos modelos uniformes propostos por Suzuki e colaboradores (1976) na secagem convectiva de mamão fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.....	163
Tabela 5.32 – Dados de energia de ativação na secagem convectiva de mamão fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.....	165
Tabela 5.33 – Dados de atividade de água das amostras de mamão após o processamento.	166
Tabela 5.34 – Conteúdo total de carotenóides das amostras de mamão após o processamento.....	167
Tabela 5.35 – ANOVA para cada atributo sensorial analisado.....	171
Tabela 5.36 – Análise de médias para todos os atributos avaliados das amostras de mamão após processamento.....	172

## NOMENCLATURA

A	Área superficial total	m <sup>2</sup>
a, c e d	Constantes do modelo de Suzuki e colaboradores (1976)	-
a <sub>w</sub>	Atividade de água	-
C	Concentração	% p/p
D	Difusividade	m <sup>2</sup> /s
DMS	Diferença mínima significativa	-
E	Desvio relativo médio	%
E <sub>a</sub>	Energia de ativação	KJ/mol
ESP	Espessura do material	m
F	Distribuição F	-
FV	Fonte de variação	-
GL	Graus de liberdade	-
GS	Ganho de sólidos	%
K e b	Constantes do modelo de Page (1949)	-
K <sub>1</sub> e K <sub>2</sub>	Constantes do modelo de Peleg (1988)	-
L	Efeito linear do modelo estatístico	-
LRG	Largura	m
M	Massa de água	kg
MQ	Média quadrática	-
MS	Massa de sólidos	kg
N	Número de pontos experimentais	-
n	Coefficiente de encolhimento	-
NJ	Número de julgamentos	-
ns	Não significativo	-
p	Significância da regressão	%
P	Pressão	Pa
PA	Perda de água	%
PC	Perda de carotenóides	%
PCT	Relativo ao ponto central do planejamento experimental	-
PP	Perda de peso	%
PRF	Profundidade	m
Q	Efeito quadrático do modelo estatístico	-
QM	Quantidade de matéria (água ou sólidos)	kg
QM <sup>*</sup>	Quantidade de matéria (água ou sólidos) por <i>ms</i> inicial	%
R	Constante universal dos gases	KJ/mol K

$R^2$	Coeficiente de determinação	-
S	Constante do modelo de Azuara e colaboradores (1992)	$s^{-1}$
SQ	Soma quadrática	-
t	Tempo de processo	s
T	Temperatura de processo	$^{\circ}C$ ou K
TC	Teor de carotenóides	$\mu g/g$ ms
ts	Distribuição t	-
UR	Umidade relativa	%
V	Volume da amostra	$dm^3$
VC	Relativo ao valor codificado do planeamento experimental	-
VO	Valor observado	-
VP	Valor predito	-
VR	Relativo ao valor real do planeamento experimental	-
w	Massa da amostra	kg
X	Conteúdo de umidade da amostra em base seca	$Kg_{\text{água}}/kg_{ms}$
x, y e z	Direções do fluxo de matéria	m
Y	Por definição corresponde a X/V	$kg/kg_{ms} dm^3$

### Letras gregas

$\alpha$ e $\delta$	Coeficientes do modelo linear	-
$\chi$	Fração mássica	%
$\rho$	Densidade	$kg/dm^3$
$\nabla$	Operador matemático	-
$\Delta$	Relativo à variação	-
$\xi$	Variável dependente do planeamento experimental	-
$\beta$	Coeficiente do modelo estatístico	-
$\pi$	Pressão osmótica	Pa
$\varphi$	Função do planeamento experimental	-

### Subscritos

0	Relativo à condição inicial
e	Relativo à condição de equilíbrio
ef	Relativo à efetiva
f	Relativo à condição final
g	Relativo à transição vítrea
GS	Relativo ao ganho de sólidos

H <sub>2</sub> O	Relativo à água
LM	Relativo à quantidade líquida de matéria que flui
ms	Relativo à massa seca
PA	Relativo à perda de água
PCT	Relativo ao ponto central do planejamento experimental
R	Relativo à regressão
r	Relativo ao resíduo
s	Relativo a sólido

### Sobrescritos

mod	Relativo ao modelo
exp	Relativo ao experimento



## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estudar o processo de secagem de mamão Formosa (*Carica papaya L.*) fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho. O processo de desidratação osmótica foi estudado através de um delineamento experimental, tendo como variáveis independentes a temperatura (30 – 50°C) e concentração (40 – 60% p/p) da solução osmótica e o tempo de imersão (90 – 240min.), onde o objetivo foi obter uma máxima perda de água com uma mínima incorporação de sólidos. A secagem convectiva foi realizada a várias temperaturas (40 – 70°C) do ar de secagem e com uma única velocidade (2,25m/s) do ar. A melhor combinação de variáveis obtida para a desidratação osmótica do mamão Formosa foi: 34°C, 56% p/p e 210 minutos, para a sacarose; e 46°C, 56% p/p e 210 minutos, para o xarope de milho. As amostras pré-tratadas em sacarose apresentaram maiores valores de perda de água e ganho de sólidos do que aquelas pré-tratadas em xarope de milho. O volume das amostras, considerando o mesmo conteúdo de umidade, foi praticamente igual, para ambos os agentes osmóticos. As difusividades efetivas de água e sólidos, obtidas através da modelagem do processo de desidratação osmótica, foram da ordem de  $10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ . As maiores taxas de secagem foram obtidas para a fruta fresca, seguida das pré-tratadas em xarope de milho e em sacarose. O volume das amostras, considerando o mesmo conteúdo de umidade, foi maior para as amostras pré-tratadas em sacarose, seguidas daquelas pré-tratadas em xarope de milho e sem tratamento algum. As difusividades efetivas de água, obtidas através da modelagem do processo de secagem, foram da ordem de  $10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ . As condições de secagem que geraram um produto final com melhor qualidade foram: 50°C, para a fruta fresca, e 60°C, para as amostras pré-tratadas. As amostras pré-tratadas osmoticamente tiveram um maior nível de aceitação em relação ao atributo aparência, não havendo diferença significativa em relação aos atributos de aroma, sabor, textura e impressão global.

*Palavras-chave:* Mamão, Desidratação osmótica, Secagem, Encolhimento, Análise sensorial.

**ABSTRACT**

The present work had as objective to study the drying process of fresh and pre-treated papaya (*Carica papaya L.*). Two osmotic agents were used: sucrose and corn syrup. The osmotic dehydration process was studied by an experimental design, with the temperature (30 – 50°C) and concentration (40 - 60% w/w) of the osmotic solution and the immersion time (90 - 240 min.) as independent variables, where the objective was to obtain a maximum loss of water with minimum solids incorporation. The drying process was accomplished at several air temperatures (40 – 70°C) and with a single air speed (2,25 m/s). The best combination of independent variables obtained for the osmotic dehydration of papaya was: 34°C, 56% w/w and 210 minutes, for sucrose; and 46°C, 56% w/w and 210 minutes, for corn syrup. Samples pre-treated in sucrose presented higher values of loss of water and solids gain than those pre-treated in corn syrup. Samples volume considering the same moisture content was equal, practically, for both osmotic agents. The effective diffusivities of water and solids obtained from the osmotic process modelling were in the order of  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. The highest drying rates were obtained for the fresh fruit, followed by the pre-treated in corn syrup and in sucrose. Samples volume considering the same moisture content was higher for papayas pre-treated in sucrose, followed by those pre-treated in corn syrup and without some treatment. The effective diffusivities of water obtained from the drying process modelling were in the order of  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. The best drying conditions for final product quality were: 50°C, for fresh fruit, and 60°C, for the pre-treated samples. The osmotically pre-treated papayas had a higher acceptance level in relation to the appearance attribute, not having a significant difference in relation to the aroma, flavor, texture and global impression attributes.

*Keywords:* Papaya, Osmotic dehydration, Drying, Shrinkage, Sensory analysis.

## SUMÁRIO

EPÍGRAFE.....	v
AGRADECIMENTOS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiv
NOMENCLATURA.....	xvii
RESUMO.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
1 – INTRODUÇÃO.....	01
2 – OBJETIVOS.....	04
2.1 – OBJETIVO GERAL.....	04
2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	04
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	05
3.1 – O MAMÃO.....	05
3.1.1 – Aspectos gerais.....	05
3.1.2 – Botânica.....	06
3.1.3 – Tipos florais e formas sexuais.....	06
3.1.4 – Variedades do grupo “Solo”.....	07
3.1.5 – Composição centesimal e valor alimentício.....	07
3.1.6 – Mercado.....	10
3.1.6.1 – Comércio da fruta fresca.....	10
3.1.6.2 – Comércio de frutas desidratadas.....	12
3.1.7 – Considerações finais.....	14
3.2 – MÉTODOS DE SECAGEM DE ALIMENTOS.....	15
3.2.1 – Desidratação osmótica.....	15
3.2.1.1 – Aspectos gerais.....	15
3.2.1.2 – Cinética de desidratação osmótica.....	24
3.2.2 – Secagem convectiva.....	29
3.2.2.1 – Aspectos gerais.....	29
3.2.2.2 – Cinética de secagem.....	32
3.2.3 – Aspectos de qualidade na secagem de alimentos.....	36
3.2.3.1 – Escurecimento não-enzimático.....	37
3.2.3.2 – Carotenóides.....	37
3.2.3.3 – Atividade de água.....	40
3.2.4 – Encolhimento.....	43
3.2.4.1 – Mecanismo do encolhimento.....	44

3.2.4.2 – Modelagem do encolhimento.....	48
3.3 – AVALIAÇÃO SENSORIAL.....	54
3.4 – PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS.....	57
3.4.1 – Metodologia de superfície de resposta (RSM).....	58
4 – MATERIAL E MÉTODOS.....	61
4.1 – MATÉRIA-PRIMA.....	61
4.1.1 – Caracterização físico-química da matéria-prima.....	62
4.2 – DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA.....	64
4.2.1 – Planejamento experimental.....	64
4.2.2 – Preparação das soluções osmóticas.....	66
4.2.3 – Processo osmótico.....	66
4.2.4 – Cinética de desidratação osmótica para a melhor condição de desidratação de cada agente osmótico.....	67
4.2.5 – Modelagem matemática da cinética de desidratação osmótica.....	67
4.2.6 – Cinética de encolhimento na desidratação osmótica para a melhor condição de desidratação de cada agente osmótico.....	67
4.2.7 – Modelagem da cinética de encolhimento na desidratação osmótica.....	69
4.3 – SECAGEM CONVECTIVA.....	72
4.3.1 – Cinética de secagem.....	74
4.3.2 – Modelagem matemática da secagem.....	74
4.3.3 – Cinética de encolhimento durante a secagem.....	74
4.3.4 – Modelagem do encolhimento durante a secagem.....	74
4.4 – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DO DADOS.....	75
4.5 – QUALIDADE DO PRODUTO FINAL PROCESSADO.....	75
4.6 – ANÁLISE SENSORIAL.....	75
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
5.1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA MATÉRIA-PRIMA.....	77
5.2 – DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA.....	78
5.2.1 – Ajuste dos modelos estatísticos e influência das variáveis de processo sobre as respostas em estudo.....	84
5.2.1.1 – Perda de peso.....	84
5.2.1.2 – Perda de água.....	93
5.2.1.3 – Ganho de sólidos.....	100
5.2.1.4 – Atividade de água.....	107
5.2.2 – Otimização do processo de desidratação osmótica.....	114
5.2.3 – Cinética de desidratação osmótica para as condições otimizadas.....	120
5.2.3.1 – Modelagem matemática da cinética de desidratação osmótica.....	122

5.2.4 – Cinética de encolhimento na desidratação osmótica de mamão.....	127
5.2.4.1 – Modelagem do encolhimento na desidratação osmótica de mamão.....	131
5.3 – SECAGEM CONVECTIVA.....	137
5.3.1 – Cinética de secagem para a fruta fresca e para as condições otimizadas do pré- tratamento osmótico.....	137
5.3.1.1 – Modelagem matemática da cinética de secagem.....	143
5.3.2 – Cinética de encolhimento na secagem convectiva de mamão.....	150
5.3.2.1 – Modelagem do encolhimento na secagem convectiva de mamão.....	158
5.3.3 – Energia de ativação.....	164
5.4 – QUALIDADE DO PRODUTO FINAL PROCESSADO.....	165
5.5 – AVALIAÇÃO SENSORIAL DO PRODUTO FINAL PROCESSADO.....	168
5.5.1 – Considerações finais.....	172
6 – CONCLUSÕES.....	173
7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	175
8 – REFERÊNCIAS.....	176
9 – APÊNDICES.....	194
A1 – Teoria geral do equilíbrio: potencial químico.....	194
A2 – Cinética de desidratação osmótica.....	196
A3 – Cinética de encolhimento na desidratação osmótica.....	197
A4 – Cinética de secagem.....	202
A5 – Cinética de encolhimento durante a secagem.....	205



## **1 – INTRODUÇÃO**

O mamão é uma fruta típica de regiões tropicais e subtropicais, conhecido por vários nomes: papaia, no México; fruta-bomba, em Cuba; passaraiva, no nordeste do Brasil. É encontrado durante o ano todo e, dependendo da variedade a que pertence, tem tamanho, peso, sabor e cor diferentes. Contém grandes quantidades de sais minerais (cálcio, fósforo, ferro, sódio e potássio) e vitaminas A e C. Além disso, também contém papaína, uma enzima bastante importante que, quando ingerida, auxilia no bom funcionamento do aparelho digestivo (BAHIA, 1994).

O Brasil figura, atualmente, como o maior produtor mundial de mamão, destacando-se os estados da Bahia e Espírito Santo como maiores produtores nacionais (FAO, 2004; IBGE, 1998).

Na maior parte dos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, a abundância natural de frutas frescas tropicais leva, freqüentemente, a um excedente com relação às exigências locais. Somente uma limitada quantidade dos produtos destas frutas é comercializada. Uma das principais razões para a baixa produção e comercialização dos produtos de frutas tropicais resulta da carência de processos técnicos e equipamentos adequados para a conservação e transformação destes em produtos de boa qualidade e de maior atratividade para o consumidor.

O processo de secagem é considerado uma das mais antigas formas de conservação de alimentos. De maneira geral, a secagem é uma operação na qual calor é fornecido a um dado material que contém água, a fim de se vaporizar certo conteúdo de água deste material, obtendo-se, portanto, um produto sólido seco. Trata-se de um processo com transporte simultâneo de calor e massa, acompanhado de mudança de fase (BARBANTI; MASTROCOLA; SEVERINI, 1994; LEWICKI; JAKUBCZYK, 2004). O objetivo maior da secagem é a redução da atividade de água do alimento a qual está intimamente relacionada ao grau de estabilidade do mesmo, do ponto de vista físico, químico e microbiológico.

Os métodos de secagem acabaram sendo aprimorados pelos turcos, que tratavam uvas e ameixas com solução de soda cáustica diluída, fazendo com que suas cascas ficassem ralas, permitindo uma rápida evaporação da água. Com isso, melhorava-se a consistência da fruta seca, evitando cortá-la a fim de se adiantar o processo de secagem natural ao sol, tornando-o mais rápido e econômico (BAHIA, 2004).

Segundo Van Arsdel (1947), os produtos biológicos são células vivas possuindo um comportamento específico em que a célula é distendida pelo líquido nela contido, fazendo com que a parede celular seja submetida a uma tensão e, o líquido, a uma compressão. Este fenômeno é conhecido como *turgor*. À medida que a secagem prossegue, ocorre a diminuição da pressão que o líquido exerce sobre a parede celular. Os fenômenos associados a esta diminuição de pressão são tratados como consequência do encolhimento do material (KECHAOU; ROQUES, 1992). Sendo assim, o estudo do fenômeno de encolhimento de materiais biológicos durante o processo de secagem é extremamente importante, uma vez que tal fenômeno interfere de maneira decisiva na difusividade de água através do alimento (WANG; BRENNAN, 1995).

O processo de desidratação osmótica vem sendo bastante estudado nos últimos anos por diversos pesquisadores (TORREGGIANI; BERTOLO, 2001; RASTOGI *et al.*, 2002; AGUILERA; CHIRALT; FITO, 2003; CORZO; GÓMEZ, 2004). A desidratação osmótica é uma técnica bastante útil na concentração de frutas e vegetais, imergindo o alimento sólido, inteiro ou em pedaços, em soluções aquosas (sais ou açúcares) de alta pressão osmótica (TORREGGIANI, 1993).

A desidratação osmótica pode ser classificada como uma etapa preliminar na desidratação de frutas ou vegetais, sendo necessário um processo complementar de secagem a fim de se obter um produto com boas características de conservação no que diz respeito a sua atividade de água (SANKAT; CASTAIGNE; MAHARAJ, 1996; MÚJICA-PAZ *et al.*, 2003).

Atualmente, com as atenções voltadas à qualidade do alimento, no caso de frutas e vegetais, o processo de secagem convencional associado a um pré-tratamento osmótico vem sendo bastante utilizado. Sendo assim, é possível minimizar os efeitos danosos causados pela secagem, tais como perdas de vitaminas e sais minerais, gerando produtos de boa qualidade com relação, principalmente, à preservação da cor e redução da atividade de água.

De acordo com o exposto, é possível perceber a importância da utilização de técnicas capazes de conservar os alimentos, principalmente as frutas e vegetais, os quais são altamente perecíveis.

## **2 – OBJETIVOS**

### **2.1 – OBJETIVO GERAL**

Estudar o processo de secagem de mamão Formosa (*Carica papaya L.*) fresco e desidratado osmoticamente e avaliar sensorialmente o produto final através de testes de aceitação.

### **2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar o processo de desidratação osmótica de mamão Formosa (*Carica papaya L.*) em soluções de sacarose comercial e xarope de milho utilizando Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) a fim de que se possa escolher a melhor condição de desidratação osmótica para cada agente osmótico;
- Estudar e modelar a cinética de desidratação osmótica para a melhor condição de desidratação de cada agente osmótico considerando o encolhimento sofrido pelas amostras durante o processo;
- Estudar e modelar a cinética de secagem de mamão Formosa (*Carica papaya L.*) fresco e desidratado osmoticamente em sacarose comercial e xarope de milho considerando o encolhimento sofrido pelas amostras durante o processo;
- Escolher a melhor condição de secagem para cada um dos três tratamentos mencionados anteriormente com base na análise de atributos de qualidade da fruta processada (carotenóides totais e atividade de água), bem como na análise dos parâmetros de processo;
- Avaliar sensorialmente o produto final através de testes de aceitação, tendo como atributos de qualidade a aparência, aroma, sabor, textura e impressão global das amostras.

### 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

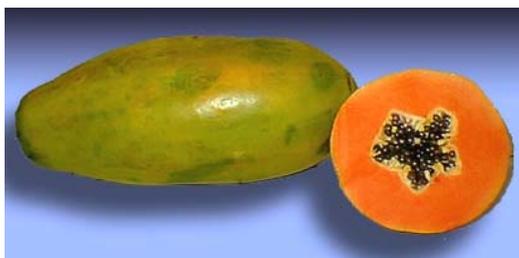
#### 3.1 – O MAMÃO

##### 3.1.1 – Aspectos gerais

O mamoeiro é uma planta herbácea, tipicamente tropical, cujo local de origem é, muito provavelmente, o noroeste da América do Sul – vertente oriental dos Andes, ou mais precisamente, na Bacia Amazônica Superior, onde sua diversidade genética é máxima (BRASIL, 1994). Possui uma vida útil de três anos, após os quais, baixa gradativamente de rendimento até morrer, podendo viver, não obstante, de 15 a 20 anos (BRASIL, 1974).

Amplamente conhecido no Oriente, já no início do Século XVIII, o mamão vem sendo bastante cultivado na Índia, Sri Lanka, Arquipélago Malaio, alguns países da América do Sul, América Central e Antilhas, bem como na África tropical, Havaí e Austrália (MEDINA *et al.*, 1980).

Há mais de 57 espécies conhecidas, mas, no Brasil, são plantados três tipos diferentes: mamão comum, papaia (“solo” e “sunrise-solo”) e, mais recentemente, o Formosa. O Havaí e o Formosa (Figura 3.1) são muito bem aceitos no mercado, pelo sabor e pelos preços compensadores. O Formosa, maior, resiste melhor ao transporte, possui teor de açúcar mais elevado, facilidade para obtenção de sementes e grande estabilidade genética (BAHIA, 2004).



**Formosa**



**Havaí**

Figura 3.1 – Grupos de mamão comercializados no Brasil.

### 3.1.2 – Botânica

O mamoeiro pertence à classe *Dicotyledoneae*, subclasse *Archichlamydeae*, ordem *Violales*, subordem *Caricineae*, família *Caricaceae* e gênero *Carica*.

Na realidade, a família *Caricaceae* possui 4 gêneros (*Carica*, *Jacaratia*, *Jarilla* e *Cylicomorpha*), mas o gênero *Carica* é mais conhecido por causa do mamoeiro (*Carica papaya* L.). Das 22 espécies válidas do gênero, com exceção de *C. papaya* L., nenhuma delas é de importância comercial, a maioria produzindo frutos pequenos.

A espécie *Carica papaya* L. é tida como o verdadeiro mamoeiro. Plantas sempre verdes de crescimento rápido e curta duração, de 3 a 8m de altura. Possui tronco de até 30cm de diâmetro, geralmente indiviso, herbáceo-lenhoso, fistuloso, suculento, com látex ralo e leitoso, ereto, marcado por grandes cicatrizes foliares, largas e quase horizontais, e encimado por uma coroa de grandes folhas (MEDINA *et al.*, 1980).

### 3.1.3. Tipos florais e formas sexuais

Segundo os tipos de flores que o *Carica papaya* L. é capaz de produzir, encontram-se as seguintes formas sexuais (MEDINA *et al.*, 1980):

- *Ginóica* – constituída de mamoeiros que têm flores exclusivamente femininas;
- *Andróica* – constituída de mamoeiros que têm flores exclusivamente masculinas;
- *Andromonóica* - constituída de mamoeiros que têm uma mistura de flores masculinas e hermafroditas.

De maneira básica, as flores do mamoeiro podem ser divididas em três tipos bem diferenciados: flor pistilada ou feminina, flor hermafrodita e flor estaminada ou masculina típica (BRASIL, 1994).

Dependendo do tipo de flor, tem-se a planta feminina (flores com pedúnculo curto e grande ovário globoso); a planta masculina (inflorescência com longo pedúnculo na extremidade, do qual brota um conjunto de flores masculinas, alongadas, que podem produzir frutos deformados, conhecidos como mamão-macho ou mamão-de-corda) e a planta hermafrodita (flores alongadas, com cerca de 10 cm de pedúnculo), que não depende de polinização de outra planta para frutificar.

A feminina precisa do pólen da masculina para frutificar, e a masculina só frutifica em casos excepcionais. Numa plantação com plantas femininas é necessário que 10% das plantas tenham flores masculinas e uniformemente distribuídas. Com as hermafroditas, não há esse problema, e os seus frutos alongados e não globosos são os preferidos pelo mercado (BAHIA, 2004).

#### **3.1.4. Variedades do grupo “Solo”**

A cultura do mamoeiro no Brasil está sustentada em uma estreita base genética, sendo bastante limitado o número de cultivares plantado nas principais regiões produtoras. O grupo “Solo”, onde encontramos a maioria das cultivares de mamão utilizadas no mundo, apresenta no Brasil um domínio quase que absoluto de duas cultivares, a saber, “Sunrise Solo” e “Improved Sunrise Solo cv. 72/12”. As cultivares deste grupo são linhagens puras, isto é, material geneticamente uniforme, fixado por sucessivas gerações de autofecundação (BRASIL, 1994).

#### **3.1.5. Composição centesimal e valor alimentício**

A composição da fruta difere com a variedade, mas a Tabela 3.1 é um exemplo típico de sua composição média:

Dos carotenóides, o principal é a criptoxantina, mas existem também a criptoflavina e os oxicarotenóides, dos quais 29,5% são na forma de caroteno. O licopeno está presente na variedade vermelha, mas não na variedade amarela

(MENEZES *et al.*, 1980). Segundo Heng, Guilbert e Cuq (1990), os carotenóides, tais como o  $\beta$ -caroteno, são os pigmentos característicos do mamão. Qualquer modificação no seu conteúdo afeta a cor da fruta.

Tabela 3.1 – Composição centesimal média e valor alimentício do mamão.

<b>Componente</b>	<b>Teor (%)</b>
Água	88,33
Proteína	0,50
Lipídeos	0,17
Açúcares Redutores	5,00
Açúcares Totais	6,26
Sacarose	1,14
Celulose Bruta	1,05
Cinzas	0,56
Ácidos (alcoometria)	0,60
Ácidos (como ácido cítrico)	0,04
Valor Calórico	34,38 cal./100g
Valor Nutritivo	15,80

<b>Vitamina</b>	<b>Quantidade (mg %)</b>
Ácido Ascórbico	30-130
Vitamina B <sub>1</sub>	40-45
Vitamina B <sub>2</sub>	40-50
Vitamina PP	0,2-0,8
Vitamina A	1200-1650 (unidades/100g)

FONTE: MENEZES *et al.* (1980).

De acordo com Chen (1963), o mamão cv. Solo, a uma temperatura de 28°C, precisa de, aproximadamente, 5 dias para sair do estado verdoeiro para o completamente maduro. A mudança na coloração do fruto se deve à destruição da clorofila no tecido epidérmico e ao aparecimento dos pigmentos carotenóides na polpa do fruto.

A presença de ácido ascórbico é um critério desejável de qualidade, tanto do ponto vista nutricional quanto do tecnológico. Sua característica antioxidante protege pigmentos sensíveis, tais como os carotenóides, de mecanismos de oxidação durante a estocagem (HENG; GUILBERT; CUQ, 1990). À medida que o mamão amadurece, seu teor de vitamina C tende a aumentar (WENKAN; MILLER, 1965).

Os sólidos solúveis podem ser usados como indicadores da qualidade da fruta e do grau de maturação. Compreendem cerca de 10% do peso da fruta fresca, dos quais 20% são de glicose e 10% de frutose. À medida que o fruto amadurece, grande porção da sacarose é hidrolisada a açúcares redutores (MOSCA, 1992).

Ocorre também mudança na textura do fruto, de firme para macia, causada pela quebra da protopectina insolúvel em pectina solúvel ou pela hidrólise de amido ou gorduras. As enzimas pectinesterase e poligalacturonase agem transformando a protopectina insolúvel em pectinas solúveis, provocando o amolecimento da polpa. Durante o amadurecimento há um decréscimo de substâncias pécticas. As pectinas também são importantes como fonte potencial de ácidos, açúcares e outras substâncias participantes do mecanismo de respiração. Com o progresso da maturação, ocorre um decréscimo no grau de esterificação da pectina (HONÓRIO, 1982).

O grau de maturação é capaz de afetar o rendimento e a qualidade do mamão fresco. Tal fato pode ser verificado na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Efeito do grau de maturação no rendimento e qualidade do mamão fresco.

<b>Coloração</b>						
<b>Pele (%)</b>	<b>Polpa</b>	<b>SST* (°Brix)</b>	<b>Ácido Ascórbico (mg/100g)</b>	<b>Perdas no descascamento (%)</b>	<b>Parte comestível (%)</b>	<b>Aroma (fresco)</b>
0-10	Esverdeado	7,1-9,2	30-45	28-32	40-50	Pobre
10-25	Esverdeado	10,7-11,4	-	18-20	50-52	Pobre
25-50	Amarelo	11,2-12,5	72-101	20-22	50-55	Regular
50-75	Amarelo- laranja	12,0-12,5	-	18-21	50-55	Regular
80-90	Laranja	12,5-13,5	110-123	15-17	60-62	Bom
100	Laranja intenso	12,5-14,0	110-150	15-18	54-65	Excelente

FONTE: LEVI; GAGEL; JUVEN, (1983).

\* conteúdo de sólidos solúveis totais.

### 3.1.6 – Mercado

#### 3.1.6.1 – Comércio da fruta fresca

A comercialização do mamão tem evoluído notadamente, mas muitos aspectos necessitam ser ainda melhorados; entre eles pode-se citar a logística, que no Brasil ainda é muito deficiente. Problemas com embalagens e manuseio da fruta constituem também um obstáculo à comercialização, pois implicam em perdas elevadas, falta de qualidade e preços baixos.

A questão de barreiras impostas pelos países importadores destaca-se no cenário internacional, merecendo maior atenção por parte de órgãos governamentais, através de medidas protecionistas para os produtos nacionais, ou pelo menos da valorização dos mesmos (TODA FRUTA, 2004).

A produção nacional do mamão está baseada em dois grupos: o Formosa, que se destina principalmente ao mercado interno, e o Havaí, tanto para o mercado interno como o externo. Os Estados da Bahia e do Espírito Santo destacaram-se como maiores

produtores nacionais, sendo responsáveis por cerca de 87% da produção, segundo dados do IBGE (1998).

O Estado da Bahia é o principal produtor de mamão Havaí, não certificado para exportação, respondendo por 60% da produção nacional. O Espírito Santo é o maior produtor deste grupo, destinado à exportação (Figura 3.2).

A Bahia constituiu-se, também, no maior fornecedor do mamão Formosa no entreposto atacadista da CEASA/MG, com cerca de 9 mil toneladas, representando 56% do total ofertado de 17,7 mil toneladas. Em seguida, estão os Estados do Espírito Santo e Minas Gerais, com 43% e 0,6%, respectivamente. Em relação aos municípios, destacaram-se Mucuri, São Desidério e Barreiras, na Bahia, e Pinheiros, no Espírito Santo (FRUTISÉRIES, 2004).

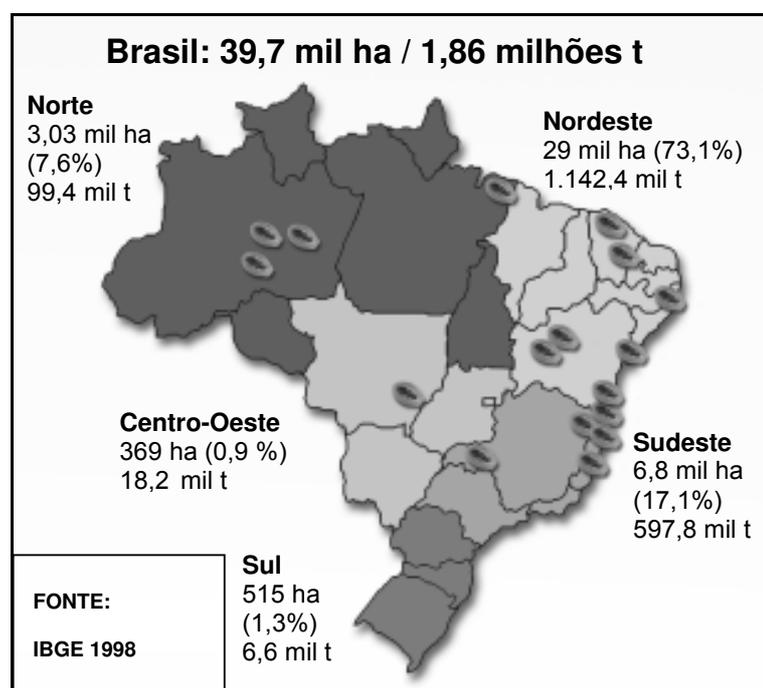


Figura 3.2 – Área colhida e produção de mamão por região no Brasil.

A Tabela 3.3 contém dados da produção mundial de mamão do ano de 2003:

Tabela 3.3 – Principais produtores mundiais de mamão em 2003.

<b>País</b>	<b>Produção (t)</b>
Brasil	1,600,000
Índia	700,000
Indonésia	491,389
Etiópia	230,540
República Democrática do Congo	210,305
Mundo	6,342,118

---

FONTE: FAO, 2004.

De acordo com a Tabela 3.3 podemos ver que o Brasil é o país que mais produz mamão em escala internacional, concentrando aproximadamente 25% da oferta mundial, seguido da Índia, Indonésia, Etiópia e República Democrática do Congo.

### **3.1.6.2 – Comércio de frutas desidratadas (TODA FRUTA, 2004)**

A fruticultura voltada especificamente para a agroindústria, com exceção da laranja, ainda é bastante limitada no Brasil. Na maioria dos casos os fruticultores produzem predominantemente para o mercado *in natura*, onde em geral conseguem um retorno maior, vendendo apenas o excedente a um preço menor para a indústria. Portanto, no Brasil, a produção e comercialização de frutas processadas acompanham de perto a produção e comercialização de fruta fresca.

Entre os produtos processados, as frutas desidratadas se destacam por serem normalmente de fácil obtenção, manterem as características do produto natural, reduzirem custo com transporte e por possuírem características que dificultam o desenvolvimento de microorganismos que poderiam promover a deterioração da fruta fresca.

A todos os fatores viabilizadores e propulsores do consumo de frutas frescas, acrescentam-se à possibilidade de consumo durante todo o ano e a praticidade de uso, quando se trata de frutas conservadas por processos como secagem e desidratação, redução da perecibilidade e do volume a ser transportado, além de facilitar a exportação de alguns produtos que deixam de estar sujeitos à lei de proteção de plantas dos países importadores.

Um exemplo é o mercado japonês de frutas secas, que em 1999 importou 66.246 toneladas, no valor de 15.175 milhões de ienes. Nesse mercado as frutas secas de damasco comum, figo, caqui, kiwi, ameixa, pêra, jujuba, tâmara, abacaxi, banana, mamão, uva, manga, pêssego e longan, não estão incluídas na Lei de Proteção às Plantas, apesar de estarem sujeitas à lei de Higiene Alimentar. Entretanto, as importações de nozes e frutas secas, que não são processadas usando o tratamento a base de calor e que não estão relacionadas acima, devem ser acompanhadas do Certificado Fitossanitário, emitido pelo órgão governamental competente do país exportador, apresentado junto como o “Formulário para Inspeção de Plantas e Artigos Proibidos para Importação”, à Agência de Proteção de Plantas, no qual um inspetor de quarentena irá inspecionar a carga para verificar se contém plantas nocivas ou pragas.

A importação mundial de frutas desidratadas em 2002 foi de 223.492.000 t, no valor de US\$ 280.730.000. Os maiores importadores em volume foram a China, Rússia, Alemanha e Malásia, e em valor foram o Reino Unido, EUA, Alemanha e China. Em 2002 o Brasil importou 172.000 t de frutas desidratadas, no valor de US\$ 738.000, e exportou 12.000 t no valor de US\$ 42.000. Portanto, apesar de ser um grande produtor de frutas, o Brasil importa mais frutas desidratadas do que exporta.

A primeira máquina para desidratar frutas e vegetais por meios artificiais foi construída na França em 1795, entretanto a desidratação só passou a ser aplicada de forma significativa na primeira Guerra Mundial, em razão da necessidade de alimentos em larga escala destinado a suprir as tropas em combate. Idêntica expansão ocorreu de 1939 a 1944, sendo que na segunda Guerra Mundial haviam sido desenvolvidas,

nos Estados Unidos, técnicas para desidratação de mais de 160 tipos de vegetais. Nos últimos cinquenta anos, tanto a ciência quanto à tecnologia se empenhou no sentido de aprimorar novos sistemas na área de preservação de alimentos e esses esforços tornaram viável a desidratação de enorme variedade de produtos para fins comerciais.

Entre as principais formas de conservação de frutas estão a dessecação e a desidratação. Industrialmente a desidratação é definida como secagem (retirada de água) pelo calor produzido artificialmente sob condições de temperatura, umidade e corrente de ar cuidadosamente controladas. Dessecação tem, em essência, o mesmo significado de desidratação, sendo mais genérico e às vezes usado para se referir a produtos da secagem ao sol. Tanto a desidratação quanto a secagem referem-se a um sistema qualquer de remoção de água por intermédio de um processo que, em geral, segue regras bastante simples. Em resumo, o aumento da temperatura do produto a ser desidratado força a evaporação da água, enquanto a circulação do ar arrasta a umidade evaporada.

A agroindústria agrega valor ao produto, porém a qualidade final de qualquer produto desidratado vai sempre depender da qualidade da matéria-prima utilizada. Industrialmente os principais produtos desidratados de frutas são: 1) farinhas, 2) flocos, 3) pó ou granulado e 4) fruta seca ou passa.

Os métodos de embalagem que se demonstraram mais adequados para a conservação de alimentos desidratados foram o sistema a vácuo e a embalagem hermética. Seja qual for o método utilizado, o importante é que o alimento esteja protegido contra a ação da umidade, do ar e da luz.

### **3.1.7 – Considerações finais**

O mamão, assim como a fruticultura em geral, tem um marketing muito fraco, com baixa divulgação de suas características sensoriais ou propriedades vitamínico-minerais, entre outras, tanto no mercado interno como no externo. Além disso, muitos

dos problemas atuais da cadeia do agronegócio do mamão poderiam ser solucionados com a união dos produtores ou demais segmentos, através de cooperativas ou associações. Apesar de todos os entraves, percebe-se que o mercado está aberto e com potencial de expansão, desde que se apresente um produto de boa qualidade, com distribuição adequada e eficiente, sabendo explorar com sucesso o nicho a que se destina, e sempre associado à imagem de qualidade de vida (TODA FRUTA, 2004).

### **3.2 – MÉTODOS DE DESIDRATAÇÃO DE ALIMENTOS**

Existem diversos métodos capazes de reduzir o conteúdo de umidade de materiais biológicos, dentre os quais podemos citar a secagem solar, secagem convencional, e, mais recentemente, a secagem por microondas e a desidratação por osmose.

Neste trabalho iremos tratar, especificamente, dos processos de desidratação osmótica e secagem convectiva.

#### **3.2.1 – Desidratação osmótica**

##### **3.2.1.1 – Aspectos gerais**

Na maior parte dos países em desenvolvimento, a abundância natural de frutas frescas tropicais leva, freqüentemente, a um excedente com relação às exigências locais. Infelizmente, este excedente nem sempre é completamente utilizado e valorizado como deveria ser. Somente uma limitada quantidade dos produtos destas frutas é comercializada. Uma das principais razões para a baixa produção e comercialização dos produtos de frutas tropicais resulta da carência de processos técnicos e equipamentos adequados para a conservação e transformação destes em produtos de boa qualidade e de maior atratividade ao mercado consumidor (HENG; GUILBERT; CUQ, 1990; TODA FRUTA, 2004).

Uma das principais causas da deterioração de alimentos frescos e também conservados é a quantidade de água livre presente nos mesmos (MANNHEIM; LIU; GILBERT, 1994). Portanto, faz-se necessária a utilização de métodos, ou combinação destes, a fim de que o alimento se torne estável à deterioração química e microbiana (LABUZA, 1980).

O processo de desidratação osmótica é considerado um método capaz de produzir alimentos de boa qualidade mediante redução de umidade, sem mudança de fase durante o processo (LENART, 1996).

A desidratação osmótica é uma técnica bastante útil na concentração de frutas e vegetais, submetendo o alimento sólido, inteiro ou em pedaços, a soluções aquosas (sais ou açúcares) de alta pressão osmótica (TORREGGIANI, 1993). A força motriz para remoção de água se encontra na diferença de potencial químico<sup>(\*)</sup>, no caso a pressão osmótica, entre o alimento e a solução que o circunda. A estrutura celular do alimento atua como uma membrana semipermeável. Admitindo-se que a membrana responsável pelo transporte osmótico não é perfeitamente seletiva, outros solutos presentes nas células do tecido vegetal do alimento podem também ser lixiviados para a solução osmótica (CORZO; GOMEZ, 2004; DIXON; JEN, 1977; GIANGIACOMO; TORREGGIANI; ABBO, 1987; LERICI *et al.*, 1985).

No caso de frutas, vêm sendo comumente usadas soluções de sacarose ou glicose de milho desidratada, com concentrações de 40 a 70 °Brix. Também, sugere-se a utilização do próprio suco concentrado da fruta como solução osmótica com a intenção de se preservar a composição da mesma.

Durante o processo de desidratação por osmose observam-se três tipos básicos de transferência de massa, ocorrendo simultaneamente (CORZO; GOMEZ, 2004; DIXON; JEN, 1977; GIANGIACOMO; TORREGGIANI; ABBO, 1987; LERICI *et al.*, 1985; RAOULT-WACK; LENART; GUILBERT, 1994; SABLANI; RAHMAN, 2003):

---

<sup>(\*)</sup> A definição de potencial químico, assim como algumas informações pertinentes, encontram-se no Apêndice A1.

- Saída de água do produto para a solução hipertônica;
- Saída de soluto da solução para o produto. Através desta transferência é possível se introduzir uma quantidade desejada de princípio ativo, agente conservante, qualquer outro soluto de interesse nutricional ou um capaz de conferir ao produto uma melhor qualidade sensorial;
- Saída de alguns solutos do próprio produto (açúcares, ácidos orgânicos, sais minerais, vitaminas). Embora seja em quantidades desprezíveis quando comparada aos dois itens anteriormente citados, exerce uma importante influência com relação à composição final do produto.

A Figura 3.3 ilustra o mecanismo descrito:

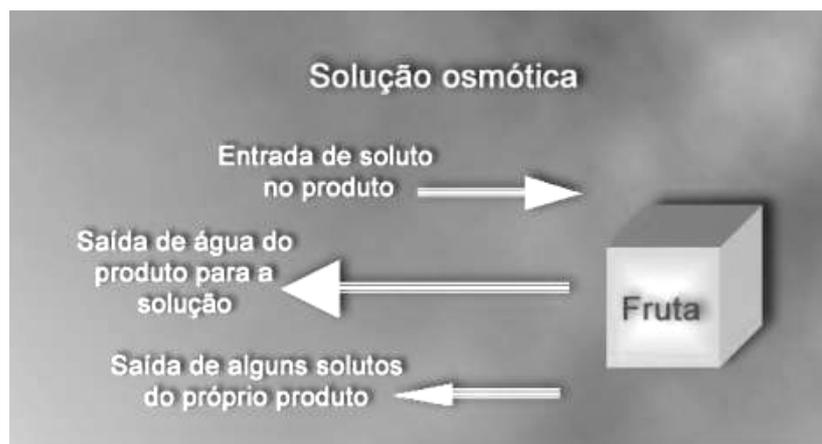


Figura 3.3 – Principais fluxos que ocorrem durante o processo de desidratação osmótica.

É importante salientar que a desidratação osmótica é descrita como um processo parcial na desidratação de frutas. Após a desidratação por osmose, um método complementar como secagem convencional, congelamento ou pasteurização, por exemplo, deve ser utilizado a fim de se obter um produto com boas características de conservação no que diz respeito a sua estabilidade química e microbiológica (CORZO; GOMEZ, 2004; MAURO; MENEGALLI, 2003; RASTOGI *et al.*, 2002; RASTOGI; RAGHAVARAO, 2004; SANKAT; CASTAIGNE; MAHARAJ, 1996).

Quando combinado à secagem convencional o processo de desidratação osmótica permite uma maior retenção da cor natural do produto, sem a adição de sulfitos; uma preservação de componentes voláteis; uma minimização do encolhimento e uma redução no consumo de energia durante a etapa de secagem (KROKIDA; KARATHANOS; MAROULIS, 2000; LE MAGUER, 1988; POKHARKAR; PRASAD; DAS, 1997; RAOULT-WACK; LENART; GUILBERT, 1992; RAMASWAMY; NSONZI, 1998; SHIPMAN *et al.*, 1972; SPIESS; BEHSNILIAN, 1998).

A taxa de perda de água durante a desidratação osmótica sofre a influência dos seguintes fatores: características do tecido vegetal, tipo e concentração do agente desidratante, temperatura, tempo de imersão, proporção fruta/solução e agitação (LERICI *et al.*, 1985; FITO, 1994; RAOULT-WACK; LENART; GUILBERT, 1994; RASTOGI; NIRANJAN, 1998; RASTOGI; RAGHAVARAO, 1997; SIMAL *et al.*, 1998; TORREGGIANI, 1993; CORZO; GOMEZ, 2004). A seguir, encontram-se os principais aspectos de cada um dos fatores mencionados.

- *Características do tecido vegetal*

Frutas e vegetais são constituídos de tecidos celulares porosos os quais tendem a entrar em *colapso* quando sujeitos a um processo de desidratação. O termo “colapso” pode ter diversos significados dependendo contexto onde esteja inserido. No caso específico de alimentos, o colapso pode ser causado de forma direta por forças mecânicas externas como na prensagem, por exemplo, resultando em danos na estrutura original do alimento. Pode ser causado também de forma indireta por gradientes de temperatura e por diferenças de pressão de vapor ou de pressão osmótica entre o produto e sua vizinhança (PROTHON; AHRNE; SJOHOLM, 2003).

Mavroudis, Gekas e Sjolholm (1998) apresentaram uma interessante comparação entre a desidratação osmótica e a secagem convectiva quanto ao encolhimento das amostras. Eles concluíram que o progresso do colapso das células, medido através do coeficiente de encolhimento, foi linear tanto para a desidratação osmótica quanto para

secagem convectiva, embora as amostras desidratadas osmoticamente tenham encolhido menos do que aquelas secas de forma convencional.

Lozano, Rotstein e Urbicain (1983) mostraram que quanto maior o conteúdo inicial de sólidos de uma fruta, menor o colapso do seu tecido celular. Considerando este fato, pode-se esperar que o colapso estrutural seja reduzido quando se promove uma impregnação na fruta com açúcares e/ou biopolímeros anteriormente à secagem.

As taxas de perda de água e ganho de sólidos pelo produto dependem, primeiramente, das propriedades do tecido vegetal. O branqueamento químico ou por calor, o congelamento, amadurecimento ou ação enzimática são fatores que afetam diretamente as características do tecido vegetal. Diferenças nas características do tecido vegetal como compactação, massa inicial de substâncias não solúveis, enzimas presentes no produto, tamanho dos espaços intercelulares, presença de gás retido nos capilares e complexos de pectina e celulose e grau de gelificação, determinam a cinética do processo de desidratação (TORREGIANNI, 1993).

A membrana plasmática é quem controla o processo de desidratação osmótica, permitindo a passagem das moléculas de água e em menor grau a passagem das moléculas do soluto (PONTING, 1973). Entretanto, Raoult-Wack, Lenart e Guilbert (1994) afirmam que a presença de uma membrana celular não é condição suficiente para que seja atingida uma alta perda de água e, baixo ganho de soluto. Isso foi comprovado em estudos realizados utilizando um modelo de alimento gel.

- *Agente desidratante*

O tipo de açúcar utilizado como agente osmótico afeta fortemente a cinética de transferência de massa. O aumento do peso molecular do agente provoca uma diminuição no ganho de sólidos e um aumento na perda de água, favorecendo, com isso, a perda de peso. Sacarídeos de baixo peso molecular como a glicose e a frutose,

favorecem o ganho de sólidos devido à alta taxa de penetração das moléculas do soluto (GARROTE; BERTONE, 1989; NIETO *et al.*, 2004; TORREGGIANI, 1993).

A sacarose é o agente desidratante mais utilizado para frutas em virtude de sua eficiência, conveniência e por proporcionar uma conservação do aroma da fruta. Quando comparada a outros tipos de açúcares utilizados como agentes desidratantes, a sacarose destaca-se por apresentar baixo custo. Desta forma, são inúmeros os autores que a utilizam na desidratação osmótica de frutas. (COLLIGNAN; RAOULT-WACK; THEMELIN, 1992; BORGES; MENEGALLI, 1994; MAVROUDIS; GEKAS; SJOHOLM, 1998; MOREIRA; SERENO, 2003; PROTHON; AHRNÉ, 2004; RASTOGI; RAGHAVARAO, 2004).

Panagiotou, Karathanos, e Maroulis (1999) estudaram os fenômenos de transferência de massa durante a desidratação osmótica de maçã, banana e kiwi em soluções osmóticas de glicose e sacarose. Uma completa bateria de experimentos foi feita para uma ampla faixa de temperatura, tamanho de amostra, velocidade de agitação, concentração de agentes osmóticos e tempo de imersão. Um modelo empírico, baseado em uma equação cinética de primeira ordem, foi satisfatoriamente utilizado para descrever os dados experimentais. Além disso, o efeito do peso molecular do soluto no fenômeno de transferência de massa durante o tratamento foi avaliado. Os resultados mostraram que solutos de baixo peso molecular (glicose) levam a uma maior perda de água e ganho de sólidos que solutos de maior peso molecular (sacarose), utilizando-se a mesma concentração de solução osmótica.

- *Concentração da solução osmótica*

De acordo com diversos autores (GIRALDO *et al.*, 2003; PARK *et al.*, 2002; RAOULT-WACK; LENART; GUILBERT, 1992; RODRIGUES; CUNHA; HUBINGER, 2003; SABLANI; RAHMAN; AL-SADEIRI, 2002; SABLANI; RAHMAN, 2003), um aumento da concentração da solução osmótica proporciona uma maior perda de água e, conseqüentemente, uma maior perda de peso pela fruta.

A utilização de soluções osmóticas concentradas pode reduzir as perdas de solutos hidrossolúveis, como é o caso do ácido ascórbico, mediante formação de uma camada periférica concentrada em soluto, prevenindo o arraste dos mesmos (RAOULT-WACK; LENART; GUILBERT, 1992).

Garrote e Bertone (1989) estudaram os efeitos da concentração da solução osmótica para desidratação de morangos a 5°C por um período de 21 horas. Para tal, utilizaram soluções de glicerol (10, 15, 20 e 25% em volume), glicose (10, 20, 30, 40, 50 e 60% em volume) e sacarose (10, 20, 30, 40, 50, 60 e 95% em volume). Das soluções citadas, as de glicose causaram uma maior taxa de ganho de sólidos que as de sacarose e glicerol. Foi estudada também a eficiência do processo de desidratação com relação à economia de energia.

Sablani, Rahman e Al-Sadeiri (2002) obtiveram os coeficientes de distribuição de equilíbrio de água e sólidos para a desidratação osmótica de cubos de maçã em soluções de sacarose a diferentes concentrações e temperaturas. Os autores definiram o coeficiente de distribuição de equilíbrio de um dado componente (água ou sólidos) como sendo a razão entre a fração mássica do componente presente no alimento na condição de equilíbrio e a fração mássica inicial do componente presente na solução osmótica. A faixa de concentração estudada variou de 30% a 70% p/p, e a de temperatura variou de 22<sup>o</sup>C a 90<sup>o</sup>C. O coeficiente de distribuição para os sólidos aumentou com o aumento na temperatura e diminuiu com o aumento na concentração de sacarose, enquanto que, o coeficiente de distribuição para água, diminuiu com o aumento da temperatura e aumentou com o aumento da concentração da solução osmótica.

- *Temperatura*

De acordo com Ponting e colaboradores (1966), a taxa de transferência de massa aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura, porém o escurecimento não enzimático, o amolecimento da parede vegetal e a deterioração de

sabor, que se iniciam a partir de 50°C, limitam o processo, sendo a temperatura máxima do processo uma particularidade de cada produto.

Lenart (1996) afirma que a temperatura do processo de desidratação osmótica constitui um parâmetro bastante importante no tempo de desidratação. A uma temperatura de 20°C, por exemplo, a transferência de massa ocorre mais intensamente nas primeiras 2-4 horas do processo, dependendo do tipo de agente osmótico e das características da matéria-prima. Entretanto, considerando uma faixa de temperatura de 70-90°C, o tempo de desidratação não excede 15 minutos. Como se pode observar, para determinar a temperatura ótima de processo, deve-se atentar para as características da matéria-prima, bem como para as características do produto final que se deseja obter.

Themelin e colaboradores (1997) verificaram, durante a etapa de secagem, uma limitação no processo de transferência de água na parte interior de fatias de maçã desidratadas osmoticamente, exatamente pela formação de uma camada protetora concentrada em sacarose na superfície do produto. De acordo com os autores, tal fato pode ser explicado por ter sido utilizada uma alta temperatura durante o processo de desidratação osmótica, o que provocou um aumento no ganho de sólidos pelo produto, devido ao colapso sofrido pelo tecido vegetal do mesmo.

Rodrigues, Cunha e Hubinger (2003), trabalhando com desidratação osmótica de mamão, utilizaram um modelo analítico baseado na 2ª Lei de Fick para representar a cinética do processo e observaram que um aumento nos valores das condições de processamento (temperatura e concentração da solução osmótica) levou a um aumento no processo de transferência de massa, mediante observação dos valores de difusividade efetiva encontrados.

- *Tempo de imersão*

Segundo Raoult-Wack, Lenart e Guilbert (1992), a transferência de massa ocorre, geralmente, de maneira mais intensa nas duas primeiras horas para a perda de água, e nos trinta primeiros minutos para o ganho de sólidos. Após este período, o processo de transferência de massa torna-se cada vez mais lento. Para um processo muito longo, a uma temperatura baixa, haverá um maior ganho de sólidos pelo produto, deixando-o mais doce ao final do processo. Sendo assim, segundo Lenart (1996), o processo de desidratação deve ser conduzido em um curto espaço de tempo a fim de se alcançar um alto grau de desidratação com um ganho de sólidos relativamente pequeno.

Moy, Lau e Dollar (1978) observaram que a remoção de água durante o processo de desidratação osmótica de manga e mamão aumentou com a concentração de sacarose e o tempo de contato, obtendo um tempo ótimo de seis horas com uma temperatura de 21°C. Após este tempo, a taxa de desidratação diminuiu até que o equilíbrio fosse alcançado.

- *Agitação*

A agitação é um dos fatores que desempenham um papel bastante importante no processo de desidratação. Segundo Hawkes e Flink (1978), a agitação tem a função de diminuir a resistência à transferência de massa, causada pela viscosidade da solução desidratante, proporcionando, com isso, uma maior superfície de contato entre a solução osmótica e o produto.

Mavroudis, Gekas e Sjöholm (1998) estudaram a influência da agitação e das características da matéria-prima na desidratação osmótica de maçã. Segundo os autores, a perda de água foi maior na região de fluxo turbulento do que na de fluxo laminar. Já para o ganho de sólidos, não houve diferença estatística em função da região de fluxo estudada.

### 3.2.1.2 – Cinética de desidratação osmótica

De acordo com diversos autores (AZUARA *et al.*, 1992; MAVROUDIS; GEKAS; SJOHOLM, 1998; MÚJICA-PAZ *et al.*, 2003; NIETO *et al.*, 2004; UDDIN; AINSWORTH; İBANOĞLU, 2004), a cinética de desidratação osmótica pode ser acompanhada mediante o cálculo da perda de água (PA), do ganho de sólidos (GS) e perda de peso (PP) que a amostra sofre durante a desidratação. Tais parâmetros de processo podem ser obtidos através das seguintes equações:

$$PA(\%) = \frac{(M_0 - M(t))}{W_0} \times 100 \quad (3.1)$$

$$GS(\%) = \frac{(MS(t) - MS_0)}{W_0} \times 100 \quad (3.2)$$

$$PP(\%) = \frac{(w_0 - w(t))}{w_0} \times 100 \text{ ou } PP(\%) = PA - GS \quad (3.3)$$

Em que:

$M_0$  = quantidade inicial de água da amostra;

$M(t)$  = quantidade de água da amostra desidratada;

$MS_0$  = matéria seca inicial da amostra;

$MS(t)$  = matéria seca da amostra desidratada;

$w_0$  = massa inicial da amostra;

$w(t)$  = massa da amostra desidratada.

Para descrever a cinética de desidratação osmótica, vem sendo bastante utilizada, por diversos autores (KAYMAK-ERTEKIN; SULTANOĞLU, 2000; PARK *et al.*, 2002; TELIS; MURARI; YAMASHITA, 2004), a segunda Lei de Fick, na qual o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração dentro do sólido.

Seja uma placa plana infinita com espessura  $2ESP$ , possuindo uma distribuição inicial uniforme de água ou sólidos ( $QM$ ), submetida a uma desidratação osmótica sob condições constantes. Tal situação pode ser representada pela equação de difusão unidirecional de Fick (CRANK, 1975):

$$\frac{\partial QM(t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ef} \frac{\partial QM(z, t)}{\partial z} \right) \quad (3.4)$$

Com as seguintes condição inicial e de contorno:

- Distribuição inicial de umidade uniforme:  $QM(z, 0) = QM_0$ ;
- Simetria de concentração:  $\left. \frac{\partial QM(z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$ ;
- Condição de equilíbrio na superfície:  $QM(ESP, t) = QM_e$ .

Aplicando a média do centro do material à superfície,

$$\overline{QM(t)} = \frac{1}{ESP} \int_0^{ESP} QM(z, t) dz \quad (3.5)$$

Chega-se à seguinte solução analítica:

$$\frac{\overline{QM(t)} - QM_e}{QM_0 - QM_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp \left[ - (2i+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{4ESP^2} \right] \quad (3.6)$$

Em que:

$QM(t)$  = quantidade de água ou sólidos após um tempo ( $t$ ) de processo;

$QM_0$  = quantidade inicial de água ou sólidos;

$QM_e$  = quantidade de água ou sólidos no equilíbrio;

$D_{ef}$  = difusividade efetiva de água ou sólidos;

ESP = dimensão característica do material (meia espessura da placa).

Até o momento, as equações publicadas para a desidratação osmótica são bastante complexas e específicas para certas condições de processamento e configurações geométricas (placa, cilindro, esfera). Desta forma, diversos autores têm utilizado modelos empíricos a fim de descreverem a cinética de desidratação osmótica.

Um modelo empírico bastante utilizado para prever a cinética de desidratação osmótica de materiais biológicos é o de Peleg (PELEG, 1988). Este modelo relaciona a quantidade de matéria que flui ao longo do tempo, no processo osmótico, com a quantidade inicial de matéria através de dois parâmetros de processo (Equação 3.7).

$$QM(t) = QM_0 \pm \frac{t}{K_1 + K_2 t} \quad (3.7)$$

Em que:

$K_1$  e  $K_2$  = parâmetros do modelo;

$t$  = tempo de processo.

O sinal  $\pm$  está relacionado ao sentido dos fluxos envolvidos no processo osmótico. Para a perda de água, convencionou-se o sinal -, enquanto que, para o ganho de sólidos, o sinal +.

De acordo com Park e colaboradores (2002), é possível determinar a quantidade de matéria que flui através do produto na condição de equilíbrio através da seguinte análise:

$$QM_e = \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{t}{K_1 + K_2 t} \right) = \frac{1}{K_2} \quad (3.8)$$

Desta forma, é possível prever o valor da perda de água ou sólidos na condição de equilíbrio sem, de fato, ser necessário conduzir o processo até esta condição.

Azuara e colaboradores (1992) encontraram uma equação capaz de prever a cinética de desidratação osmótica, bem como a determinação do ponto final de equilíbrio, sem a necessidade de se chegar, de fato, ao equilíbrio, utilizando apenas um curto período de processo. Partindo de um balanço de massa no material que sofre desidratação, chega-se a seguinte equação para a perda de água ou ganho de sólidos do produto:

$$QM^* = \frac{St(QM_e^*)}{1 + St} \quad (3.9)$$

Onde:

$QM^*$  = perda de água ou ganho de sólidos durante o processo (%);

$QM_e^*$  = perda de água ou ganho de sólidos no equilíbrio (%);

$S$  = constante referente à perda de água ou ao ganho de sólidos ( $h^{-1}$ );

$t$  = tempo de imersão (h).

Os valores de  $S$  e  $QM_e^*$  podem ser encontrados a partir de uma regressão não-linear da Equação 3.9.

O modelo pode ser usado para caracterizar a desidratação osmótica de diferentes tipos de alimentos, sem restrições de geometria.

Crank (1975), baseado na Segunda Lei de Fick para uma placa plana em contato com uma quantidade infinita de solução, considerando regime transiente e curtos períodos de tempo, apresentou uma equação simplificada do tipo:

$$\frac{QM^*(t)}{QM_e^*} = 2 \left( \frac{D_{ef} t}{\pi ESP^2} \right)^{1/2} \quad (3.10)$$

Baseados nas Equações 3.9 e 3.10, Azuara e colaboradores (1992) obtiveram uma equação capaz de calcular a difusividade efetiva para a perda de água, considerando uma geometria similar a uma placa plana infinita (Equação 3.11):

$$D_{ef} = \frac{\pi t}{4} \left[ \left( \frac{S ESP}{1 + S t} \right) \left( \frac{QM_e^{*mod}}{QM_e^{*exp}} \right) \right]^2 \quad (3.11)$$

Onde:

$QM_e^{*mod}$  = valor no equilíbrio obtido pela Equação 3.9;

$QM_e^{*exp}$  = valor no equilíbrio obtido experimentalmente.

A difusividade referente ao processo é calculada fazendo-se uma média aritmética dos valores de difusividade encontrados para cada tempo (Equação 3.12).

$$\overline{D_{ef}} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} D_{ef(i)}}{N} \quad (3.12)$$

Onde:

$\overline{D_{ef}}$  = difusividade efetiva média (m<sup>2</sup>/s);

$D_{ef(i)}$  = difusividades efetivas para cada tempo (m<sup>2</sup>/s);

$N$  = número de pontos experimentais utilizados para o cálculo.

## 3.2.2 – Secagem convectiva

### 3.2.2.1 – Aspectos gerais

A secagem é provavelmente o mais antigo método de conservação de alimentos. Por muitos séculos, foi a única forma de se prolongar a vida-de-prateleira de frutas e vegetais, juntamente à salga de produtos de carne e peixe. De maneira geral, o processo de secagem é uma operação na qual calor é fornecido a um dado material que contém água, a fim de se vaporizar certo conteúdo de água deste material, obtendo-se um produto sólido seco. Trata-se de um processo com transporte simultâneo de calor e massa, acompanhado de mudança de fase (BARBANTI; MASTROCOLA; SEVERINI, 1994; LEWICKI; JAKUBCZYK, 2004).

O processo de secagem pode ser também definido como sendo uma operação unitária através da qual ocorre a remoção de água, ou qualquer outro líquido, de um material sólido, na forma de vapor, para uma fase gasosa insaturada, mediante um mecanismo de vaporização térmica, em uma temperatura inferior à temperatura de ebulição do líquido o qual se deseja evaporar (FRUTHOTEC, 2001).

Antes de entrarmos na parte referente aos mecanismos de secagem, é extremamente importante, para se compreender as nuances do referido processo, a definição de alguns termos bastante usuais tais como umidade livre, umidade de equilíbrio, umidade total, umidade ligada e não-ligada.

Vamos considerar um material biológico qualquer sendo submetido a um processo de secagem convectiva. A umidade que esta amostra possui, no instante em que é posta no secador, é chamada de *umidade total*. À diferença entre a umidade total e a umidade de equilíbrio, dá-se o nome de *umidade livre*. A *umidade de equilíbrio*, por sua vez, é a umidade que o material possui, a uma dada temperatura e pressão, em equilíbrio com a umidade da fase gasosa insaturada, ou seja, com o ar de secagem (FRUTHOTEC, 2001). Ao conteúdo de umidade de equilíbrio de um sólido quando a

umidade da fase gasosa se encontra saturada, dá-se o nome de *conteúdo de umidade higroscópico máximo* (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

A umidade de equilíbrio de um material higroscópico pode ser determinada por diversos meios, sendo que o único pré-requisito necessário é manter a temperatura e a umidade do ar constantes. A determinação pode ser feita sob condições estáticas ou dinâmicas, sendo a determinação dinâmica preferível, principalmente, quando se trabalha com produtos alimentícios extremamente perecíveis.

Um procedimento estático simples, para se determinar a umidade de equilíbrio, consiste em colocar um dado número de amostras em dessecadores comuns de laboratório contendo, cada um deles, uma solução de ácido de concentração conhecida ou soluções saturadas de diferentes sais. Essas soluções fornecem uma umidade relativa conhecida. Os dessecadores são colocados em estufa à temperatura controlada e cada amostra, de cada dessecador, é pesada periodicamente até peso constante. O conteúdo de umidade neste peso final representa a umidade de equilíbrio para cada condição particular de cada dessecador (FRUTHOTEC, 2001).

Uma outra forma de se determinar a umidade de equilíbrio consiste em se conduzir a secagem do material até que se alcance peso constante do mesmo. Portanto, a umidade do material correspondente a este ponto da secagem é a própria umidade de equilíbrio.

Ao conteúdo de umidade, presente no sólido, que exerce uma pressão parcial de vapor inferior à pressão de vapor do líquido puro na temperatura em estudo, dá-se o nome de *umidade ligada*, enquanto que, a aquela umidade que se encontra em excesso em relação à umidade de equilíbrio correspondente ao ar saturado, dá-se o nome de *umidade não-ligada* (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

De posse de alguns dos principais conceitos envolvidos na secagem, iremos, agora, retornar ao estudo dos mecanismos que regem tal processo.

Durante a secagem, para que haja a evaporação de água da superfície do material, deve haver o seu transporte do interior do sólido até a superfície. Vários mecanismos físicos foram propostos para descrever a transferência de massa nos produtos capilares porosos (BROOKER; ARKEMA; HALL, 1974; FORTES; OKOS, 1980):

- A difusão líquida que ocorre devido à existência do gradiente de concentração;
- Difusão de vapor devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura;
- Escoamento de líquido e de vapor em virtude da diferença de pressão externa, concentração, alta temperatura e capilaridade;
- Conteúdo inicial de umidade do material;
- Conteúdo final de umidade que o material pode atingir, ou seja, a sua umidade de equilíbrio;
- De que forma a água se relaciona à estrutura do sólido;
- Como o transporte de água é feito do interior até a superfície do sólido.

Os fatores que governam a velocidade dos mecanismos de transferência descritos determinam a taxa de secagem. Estes fatores são: pressão de vapor do material e do ar de secagem, temperatura e velocidade do ar, velocidade de difusão da água no material, espessura e superfície exposta para secagem (VAN ARSDEL, 1963).

Segundo Daudin (1983), os materiais a serem secos possuem várias características diferenciadas em função de sua forma, estrutura celular e dimensões, além de as condições de secagem serem das mais diversas, conforme as propriedades do ar de secagem e a forma com que se promove o contato entre o produto e o ar.

### 3.2.2.2 – Cinética de secagem

A cinética de secagem pode ser acompanhada através da obtenção dos dados de umidade da amostra ao longo do tempo de processo. A evolução das transferências simultâneas de calor e massa no decorrer do processo faz com que a secagem seja subdividida em três períodos (PARK, 1988):

- *Período de indução*

Trata-se do período até se entrar em regime operacional. Inicialmente, o produto é geralmente mais frio do que o ar e a pressão parcial de vapor d'água na superfície do produto é débil, e, por conseqüência, a transferência de massa e a velocidade de secagem também o são. O calor, chegando em excesso, acarreta uma elevação da temperatura do produto ocorrendo um aumento de pressão e da velocidade de secagem. Este fenômeno continua até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa. Se a temperatura do ar for inferior àquela do produto, esta última diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio. A duração deste período é insignificante em relação ao período total de secagem (PARK, 1988).

- *Período de taxa constante*

Durante este período, como no anterior, a quantidade de água disponível dentro do produto é abundante. Neste caso, a água evapora como se estivesse em um reservatório aberto. A pressão de vapor d'água na superfície é constante e igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A temperatura do produto, por sua vez, é também constante e igual à temperatura de bulbo úmido, característica do fato de que as transferências de calor e de massa se compensam exatamente. A velocidade de secagem é, por conseguinte, constante (KEEY, 1972).

Este período continua, enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na

superfície. É bom ressaltar que, para os materiais biológicos, é difícil a existência deste período, pois as condições operacionais de secagem são tais que as resistências de transferências de massa encontram-se essencialmente no interior do produto, o que faz a taxa de evaporação da superfície ao ambiente bem superior à taxa de reposição de umidade do interior à superfície do material.

A velocidade de secagem durante o período de taxa constante depende de três fatores: coeficientes de transferência de calor e massa, da área de troca térmica e mássica e diferença de temperatura (ou pressões de vapor) do ar e da superfície exposta do material. O mecanismo interno de migração de água não influencia a velocidade de secagem durante este período (FORTES; OKOS, 1980).

- *Período de taxa decrescente*

A partir do momento em que a quantidade de água começa a ser deficiente na superfície do sólido, a velocidade de secagem diminui, o que caracteriza o início do chamado *período de taxa decrescente*. Ao teor de umidade do sólido intermediário aos períodos de taxa constante e de taxa decrescente, dá-se o nome de *umidade crítica*. Durante este período, a troca de calor não é mais compensada, conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Durante todo este período o fator limitante é a migração interna de água. Esta redução da taxa de secagem é devido ao abaixamento da pressão parcial de vapor de água na superfície do sólido. Ao final deste período o produto estará em equilíbrio com o ar de secagem e a velocidade de secagem é nula (KEEY, 1972).

O período de taxa decrescente pode ser subdividido em dois períodos: o primeiro período de taxa decrescente e o segundo período de taxa decrescente (STRUMILLO; KUDRA, 1986):

- *Primeiro período* – a água livre (fase líquida) presente no interior do produto é contínua, sem a presença de ar, e ocupa todos os poros do produto. O movimento

de água do interior para a superfície ocorre por capilaridade e este mecanismo controla a velocidade de secagem;

- *Segundo período* – a remoção de água da superfície de evaporação provoca a entrada de ar no interior do produto, o que dá origem a bolsões de ar que ficam dispersos na fase líquida dentro dos poros. Nesta fase o escoamento capilar ocorre apenas em alguns pontos isolados.

Com o intuito de se estimar o tempo médio de secagem durante o primeiro período de velocidade decrescente, a segunda lei de Fick tem sido bastante utilizada por diversos autores (BABALIS; BELESSIOTIS, 2004; DEMIREL; TURHAN, 2003; MASKAN, 2001; PARK, 1998; WANG; BRENNAN, 1995).

Crank (1975) apresentou diversas soluções analíticas para a equação de difusão, considerando diferentes condições iniciais e de contorno. Tratou também de casos onde a difusividade pode variar de forma linear ou exponencial com a concentração de umidade. Porém, estas situações se aplicam a sólidos com formas geométricas simples e regulares. Considerando um sistema de coordenadas retangulares, a equação de difusão pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (3.13)$$

Em que  $D_{ef}$  representa a difusividade efetiva de água a qual engloba os efeitos de todos os fenômenos podendo intervir sobre a migração de água, e seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais de secagem.

Considerando uma forma geométrica de uma placa plana infinita, onde a transferência interna de umidade durante a secagem ocorre apenas em uma única direção, podemos reduzir a Equação (3.13) à seguinte forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial x} \right) \quad (3.14)$$

Quando o coeficiente de difusão  $D_{ef}$  é considerado constante, o conteúdo de umidade inicial  $X_0$  é distribuído uniformemente no interior do sólido. Desta forma é possível desprezar as resistências externas à transferência de massa. O teor de umidade na superfície do material permanece constante durante o processo (em condições constantes) e seu valor corresponde à umidade de equilíbrio do produto. Desta forma, a Equação (3.14) pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (3.15)$$

Com as seguintes condições inicial e de contorno:

$$X = X_0 \text{ em } t = 0 \text{ para } 0 < x < \text{ESP};$$

$$X = X_e \text{ em } x = \text{ESP para } t > 0;$$

$$\frac{\partial X}{\partial x} = 0 \text{ em } x = 0 \text{ para } t > 0.$$

Considerando uma distribuição de umidade inicial uniforme e ausência de qualquer resistência térmica, a solução analítica da lei de Fick para uma placa plana infinita é dada na forma de séries infinitas (BROOKER; ARKEMA; HALL, 1974; CRANK, 1975):

$$\frac{\overline{X(t)} - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp \left[ - (2i+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{4\text{ESP}^2} \right] \quad (3.16)$$

Onde:

$\overline{X(t)}$  = conteúdo médio de umidade da amostra em um dado tempo  $t$  de processo;

$X_0$  = conteúdo inicial de umidade da amostra;

$X_e$  = conteúdo de umidade de equilíbrio da amostra;

$D_{ef}$  = difusividade efetiva de água.

Um outro modelo bastante utilizado a fim de se descrever a cinética de secagem no período de taxa decrescente é o chamado *Modelo Empírico de Page*, o qual foi proposto para descrever a cinética de secagem de milho (PAGE, 1949). Esta equação tem sido utilizada por alguns pesquisadores para estudar a cinética de secagem de outros produtos alimentícios (PARK *et al.*, 2002; PINTO, 1996).

$$\frac{X(t) - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-K t^b) \quad (3.17)$$

Onde:

$b$  = parâmetro do modelo;

$K$  = constante de secagem.

### 3.2.3 – Aspectos de qualidade na secagem de alimentos

A qualidade do alimento não depende apenas do seu estado antes do processamento e estocagem, mas também da extensão das alterações ocorridas durante o processamento. Isto é verdadeiro para as propriedades sensoriais, bem como para o conteúdo de nutrientes.

Na secagem de alimentos a relação entre as condições de processamento e a qualidade do produto é mais complicada que em outros tipos de processos. Tal fato é devido, principalmente, à temperatura e umidade. As taxas de degradação dos atributos de qualidade, normalmente, são funções destes dois parâmetros.

Segundo Strumillo e Adamiec (1991) existem quatro tipos de alterações que podem ocorrer durante o processo de secagem:

- Bioquímica – ação de leveduras, fungos e bactérias;
- Enzimática – perda de atividade por oxidação;
- Química – decréscimo de valores nutritivos;
- Física – perda de aroma e encolhimento.

### **3.2.3.1 – Escurecimento não enzimático**

O escurecimento não enzimático é um parâmetro de qualidade de muita importância para muitos alimentos desidratados. Para alguns tipos de alimentos como assados, café, melão, o escurecimento é desejado. Entretanto, em outros alimentos como frutas tropicais, por exemplo, o escurecimento é um fator negativo à aparência visual do produto final.

Os efeitos de deterioração por escurecimento incluem: decréscimo de valores nutricionais devido à perda de proteínas, desenvolvimento de odores desagradáveis, decréscimo de solubilidade, alteração na textura, destruição de vitaminas e aumento de acidez (RESNICK; CHIRIFE, 1979).

### **3.2.3.2 – Carotenóides**

A preocupação com a ação dos antioxidantes e a sua relação com os radicais livres se tornou essencial à compreensão de algumas etiopatogenias (SHAMI; MOREIRA, 2004).

Os antioxidantes podem ser definidos como qualquer substância que, presente em baixas concentrações, quando comparada a um substrato oxidável, atrasa ou inibe a oxidação desse substrato de maneira eficaz (AUST *et al.*, 2001; HANDELMAN, 2001; SIES; STAHL, 1995).

Os radicais livres são átomos ou moléculas produzidas continuamente durante os processos metabólicos e atuam como mediadores para a transferência de elétrons em várias reações bioquímicas, desempenhando funções relevantes no metabolismo. As principais fontes de radicais livres são as organelas citoplasmáticas que metabolizam o oxigênio, o nitrogênio e o cloro, gerando grande quantidade de metabólitos (MÉNDEZ FILHO; RODRÍGUEZ, 1997).

A produção excessiva de radicais livres pode conduzir a diversas formas de dano celular e sua cronicidade pode estar envolvida com a etiogênese ou com o desenvolvimento de numerosas doenças (SPEISKY; JIMÉNEZ, 2000).

As lesões causadas pelos radicais livres nas células podem ser prevenidas ou reduzidas por meio da atividade de antioxidantes, sendo estes encontrados em muitos alimentos (PAPAS, 1999).

Os antioxidantes podem agir diretamente na neutralização da ação dos radicais livres ou participar indiretamente de sistemas enzimáticos com essa função (HALLIWELL; GUTTERDGE, 1999).

O sistema de defesa antioxidante é formado por compostos enzimáticos e não-enzimáticos, estando presentes tanto no organismo (localizados dentro das células ou na circulação sanguínea) como nos alimentos ingeridos (MONTERO, 1996).

No sistema enzimático estão presentes as enzimas superóxido-dismutase, glutathiona-peroxidase e catalases. Várias enzimas antioxidantes são metaloenzimas, que contêm traços de minerais. A glutathiona-peroxidase é uma enzima dependente de selênio, e a enzima superóxidodismutase contém manganês, zinco ou cobre, dependendo da sua localização nos compartimentos celulares (HALLIWELL; GUTTERDGE, 1999).

Dos componentes não-enzimáticos da defesa antioxidante destacam-se alguns minerais (cobre, manganês, zinco, selênio e ferro), vitaminas (ácido ascórbico, vitamina E, vitamina A), carotenóides (beta-caroteno, licopeno e luteína), bioflavonóides (genisteína, quercetina) e taninos (catequinas) (PAPAS, 1999).

Os carotenóides são corantes naturais presentes nas frutas e vegetais (cenouras, tomates, espinafre, laranjas, pêssegos, entre outros), sendo que sua estrutura química é composta por ligações duplas conjugadas, que são responsáveis por sua cor e por algumas de suas funções biológicas (STAHL; SIES, 1999).

Estudos mostram a relação entre o aumento no consumo de alimentos ricos em carotenóides e a diminuição no risco de várias doenças. Segundo Olson (1999), os carotenóides seqüestram o oxigênio *singlete*, removem os radicais peróxidos, modulam o metabolismo carcinogênico, inibem a proliferação celular, estimulam a comunicação entre células (junções *gap*), e elevam a resposta imune.

Testes *in vitro* e *in vivo* sugerem que os carotenóides são excelentes antioxidantes, seqüestrando e inativando os radicais livres (ERDMAN, 1999).

A ação seqüestrante de radicais é proporcional ao número de ligações duplas conjugadas, presentes nas moléculas dos carotenóides. O mecanismo pelo qual os carotenóides protegem os sistemas biológicos dos radicais depende da transferência de energia do oxigênio excitado para a molécula do carotenóide, em que a energia é dissipada por meio de rotações e vibrações do carotenóide no meio solvente (STAHL; SIES, 1999).

Os carotenóides reagem com os radicais livres, notavelmente com os radicais peróxidos e com o oxigênio molecular, sendo a base de sua ação antioxidante. Carotenóides como o beta-caroteno, licopeno, zeaxantina e luteína, exercem funções antioxidantes em fases lipídicas, bloqueando os radicais livres que danificam as membranas lipoprotéicas (SIES; STAHL, 1995).

O licopeno é um carotenóide sem a atividade pró-vitamina A, lipossolúvel, composto por onze ligações conjugadas e duas ligações duplas não conjugadas. O licopeno é tido como o carotenóide que possui a maior capacidade seqüestrante do oxigênio *singlete*, possivelmente devido à presença das duas ligações duplas não conjugadas, o que lhe oferece maior reatividade (DI MASCIO; KAISER; SIES, 1989; KRINSKY, 2001). É o carotenóide predominante no plasma e nos tecidos humanos, sendo encontrado em um número limitado de alimentos de cor vermelha, como tomates e seus produtos, goiaba, melancia, mamão e pitanga (ARAB; STECK, 2000).

Do ponto de vista de processamento, os carotenóides possuem um alto grau de insaturação, o que os torna altamente susceptíveis à degradação. No seu estado natural, a ultra-estrutura celular e a complexação com proteínas lhes conferem estabilidade. A maior causa de degradação é a oxidação que depende da disponibilidade de oxigênio, temperatura, exposição à luz, acidez, presença de metais e estrutura do próprio pigmento (GODOY, 1985).

### **3.2.3.3 – Atividade de água**

A água é um dos principais componentes da maioria dos alimentos e pode exercer diversas funções importantes devido suas características físico-químicas, tais como: solvente, componente adsorvido, plastificante e reagente, de acordo com Quast e Teixeira Neto (1975).

A atividade de água é uma das propriedades mais importantes para o grau de processamento, conservação e armazenamento de alimentos. Ela quantifica o grau de ligação da água contida no produto e conseqüentemente sua disponibilidade para agir como um solvente e participar das transformações químicas, bioquímicas e microbiológicas (LABUZA, 1977).

O desenvolvimento microbiano nos alimentos é condicionado por diversos fatores ambientais como temperatura e umidade relativa, em que a atividade de água se constitui de um dos mais importantes.

Todos os microrganismos têm uma atividade de água mínima de desenvolvimento. De maneira geral, as bactérias são mais exigentes que os bolores e as leveduras, só se desenvolvendo em meios com  $a_w$  elevada. Muitas bactérias não se desenvolvem em valores de atividade de água menores que 0,91 e muitos bolores não se multiplicam em valores inferiores a 0,80. Em geral, considera-se 0,60 como o limite mínimo para o desenvolvimento de microrganismos (UBOLDI-EIROA, 1996).

A Tabela 3.4 a seguir mostra que a redução da atividade de água até um valor de 0,91 inibe a grande maioria dos patógenos com exceção do *Staphylococcus aureus* aeróbio. Se, por exemplo, é desejado um valor de atividade de água de 0,93 em um produto, tem-se um grande número de patógenos eliminados e os demais podem ser inibidos usando outros obstáculos como pH, conservadores, potencial redox, tratamento térmico brando em embalagem hermética, dentre outros.

Caso a intenção seja realmente promover um abaixamento significativo da atividade de água do produto, pode-se fazer uso dos chamados *depressores de atividade de água*.

A utilização dos depressores constitui o princípio básico dos alimentos que possuem a atividade de água como principal ou como um dos obstáculos para a sua preservação. A ação destes agentes baseia-se na formação de ligações químicas (fundamentalmente pontes de hidrogênio) entre o soluto e a água presente no alimento, tornando-a menos disponível química e biologicamente para reações de deterioração (ERICKSON, 1982).

Existem três classes gerais de compostos químicos usados como depressores de atividade de água em alimentos: polióis (propileno glicol, glicerol, sorbitol); açúcares

(sacarose, glicose, frutose) e os sais minerais (cloreto de sódio, cloreto de potássio e lactato de sódio). Os polióis apresentam alta afinidade pela água, são solúveis, têm baixo peso molecular, porém são mais caros que os açúcares, conferem sabor amargo aos produtos e a adição em altas concentrações acarreta aumento de viscosidade (ANTUNES; CANHOS, 1983). Os cloretos de sódio e potássio atuam fortemente no abaixamento da atividade de água.

Tabela 3.4 – Valores mínimos de  $a_w$  para o desenvolvimento de alguns microrganismos patogênicos.

Patógeno	$a_w$
<i>Campylobacter jejuni</i>	0,990
<i>Aeromonas hydrophila</i>	0,970
<i>Clostridium botulinum</i> tipo E	0,970
<i>Shigella</i> spp	0,960
<i>Yersinia enterocolítica</i>	0,960
<i>Clostridium botulinum</i> tipo G	0,965
<i>Clostridium botulinum</i> tipo A, B	0,945
<i>Clostridium perfringens</i>	0,950
<i>Vibrio parahemolyticus</i>	0,940
<i>Salmonella</i> spp	0,940
<i>Escherichia coli</i>	0,935
<i>Listeria monocytogenes</i>	0,930
<i>Bacillus cereus</i>	0,930
<i>Bacillus subtilis</i>	0,910
<i>Staphylococcus aureus</i> (anaeróbio)	0,910
<i>Staphylococcus aureus</i> (aeróbio)	0,860

FONTE: TORREZAN (1996).

Segundo Taoukis, Breene e Labuza (1988), os agentes depressores têm que reunir uma série de qualidades para que sejam utilizados em alimentos. Dentre estas, tem-se como principais:

- Ser efetivo no abaixamento de atividade de água em concentrações razoáveis;
- Possuir baixo peso molar;

- Ter alta solubilidade em água;
- Ser isento de toxicidade;
- Possuir atividade bacteriostática e fungistática;
- Ter baixa reatividade química;
- Ter baixo custo.

### **3.2.4 – Encolhimento**

A desidratação de alimentos é um dos processos mais utilizados para promover a estabilidade dos mesmos no que diz respeito ao decréscimo considerável na atividade de água do material, redução da atividade microbológica e minimização das mudanças físico-químicas durante a estocagem (MAYOR; SERENO, 2004).

Existe, atualmente, uma grande demanda por produtos de alta qualidade no mercado de alimentos. Em relação aos produtos desidratados, a tendência é que estes apresentem um alto nível nutricional e propriedades sensoriais o mais próximo possível da matéria-prima inicial. Conseqüentemente, a análise dos possíveis fatores responsáveis pela redução na qualidade do alimento desidratado é de extrema valia.

Uma das mais importantes mudanças físicas que o alimento sofre quando submetido a um processo de secagem é a redução no seu volume. A perda de água e o aquecimento durante o processo causam um estresse na estrutura celular do material levando a uma mudança na sua forma e decréscimo nas suas dimensões. Tais mudanças, na maioria das vezes, geram uma má impressão por parte dos consumidores. Por outro lado, existem produtos secos cujo encolhimento constitui um aspecto desejável, como é o caso das frutas passa.

Um outro fenômeno que pode ocorrer durante o processo de secagem são as rachaduras na superfície do material. Isto acontece quando o encolhimento devido ao processo ocorre de maneira não uniforme levando ao aparecimento de regiões de estresse aleatório na superfície do alimento. Tal fenômeno tem sido tema de discussão

de diversos autores (AKIYAMA; HAYAKAWA, 2000; FORTES; OKOS, 1980; GOGUS; LAMB, 1998; MENSAH *et al.*, 1984).

O encolhimento na secagem de alimentos é raramente desprezível, sendo aconselhável levar em conta este fenômeno no momento da predição dos perfis de umidade do material submetido a um processo de desidratação.

Vários autores revisaram de maneira sucessiva o processo de desidratação de alimentos envolvendo o encolhimento tanto do ponto de vista experimental quanto numérico, definindo novas aproximações e metodologias. Alguns exemplos representativos são os trabalhos de Bruin e Luiben (1980), Chirife (1983), Holdsworth (1971), Jayaraman e Das Gupta (1992), Rossen e Hayakawa (1977), Van Ardsel (1963), Waananen, Litchfield e Okos (1993).

#### **3.2.4.1 – Mecanismo do encolhimento**

Sistemas de alimentos sólidos e semi-sólidos são altamente heterogêneos, consistindo, basicamente, de uma matriz sólida tridimensional contendo, normalmente, grande quantidade de uma fase líquida. Os biopolímeros são os elementos estruturais mais comuns da matriz sólida. Em uma situação mais complexa, uma estrutura composta pode ser formada pela incorporação de elementos estruturais adicionais (AGUILERA, 1992).

As particularidades da estrutura do material juntamente com suas características mecânicas, em uma situação de equilíbrio, definem o volume da amostra, seu tamanho e forma. Quando a água contida no material é retirada do mesmo, um potencial de pressão é produzido entre o interior do material e a pressão externa, gerando tensões que provocam a contração da matriz sólida tendo como consequência o encolhimento do material como um todo, e/ou aparecimento de possíveis rachaduras na superfície do mesmo. Esta é a razão pela qual secagens sob vácuo, como a secagem por

congelamento, conduzem, geralmente, a um encolhimento menor (MAYOR; SERENO, 2004).

Existem alguns fatores que afetam a magnitude do encolhimento durante os processos de desidratação tais como o volume de água removida, a mobilidade da matriz sólida, a taxa de secagem e as condições de processamento.

- *Volume de água removida*

O encolhimento de materiais biológicos aumenta com o aumento do volume de água removida, uma vez que, quanto maior a quantidade de água removida do material, maior serão as tensões de contração originadas no interior do mesmo (MAYOR; SERENO, 2004).

Em alguns casos, o equilíbrio mecânico é alcançado quando o volume encolhido do material se iguala ao volume de água removida. Em dados de encolhimento para a secagem de cenoura, apresentados por Krokida e Maroulis (1997) e Lozano, Rotstein e Urbicain (1983), este comportamento foi observado durante todo o processo de secagem. Em outros casos, porém, o volume de água removido durante as fases finais de secagem é maior que a redução de volume da amostra; tal comportamento foi observado durante as secagens de carne de lula (RAHMAN; POTLURI, 1990; RAHMAN *et al.*, 1996), batata e batata-doce (LOZANO; ROTSTEIN; URBICAIN, 1983; WANG; BRENNAN, 1995) e maçã (KROKIDA; MAROULIS, 1997; LOZANO; ROTSTEIN; URBICAIN, 1980; MOREIRA; FIGUEIREDO; SERENO, 2000). Tal fato pode ser explicado pela diminuição na mobilidade da matriz sólida do material a baixos conteúdos de umidade.

- *Mobilidade da matriz sólida*

A mobilidade da matriz sólida está intimamente relacionada ao seu estado físico. Uma mobilidade alta corresponde a um comportamento visco elástico típico de um

estado de borracha enquanto que uma baixa mobilidade corresponde a um comportamento elástico típico de um estado vítreo. Levi e Karel (1995) concluíram que a mobilidade da matriz sólida é um processo dinâmico com taxas que dependem da diferença ( $T - T_g$ ), em que  $T$  é a temperatura da amostra que sofre desidratação e  $T_g$  é sua temperatura de transição vítrea.

Vários autores (ACHANTA *et al.*, 1997; DEL VALLE; CUADROS; AGUILERA, 1998; KARATHANOS; ANGLEA; KAREL, 1993; WILLIS; OKOS; CAMPANELLA, 1999) têm relacionado o encolhimento durante a secagem convectiva com a diferença ( $T - T_g$ ). A altos conteúdos de umidade, quando o material se encontra em um estado “borrachento”, o encolhimento quase que completamente acompanha a perda de umidade, e o volume do material decresce linearmente com seu conteúdo de umidade. A baixas umidades,  $T_g$  aumenta, fazendo com que o material passe do estado “borrachento” ao estado vítreo, e a taxa de encolhimento diminui significativamente. Este comportamento pode esclarecer os desvios da linearidade observados por vários autores na mudança relativa do volume da amostra vs a mudança relativa do conteúdo de umidade da mesma na fase final da secagem convectiva (ACHANTA *et al.*, 1997; LOZANO; ROTSTEIN; URBICAIN, 1983; RATTI, 1994; WANG; BRENNAN, 1995).

Quando o processo de secagem encontra-se na faixa de baixo conteúdo de umidade, em que a transição vítrea é predominante, a rigidez do material faz com que o encolhimento cesse, o que causa o aumento na porosidade da amostra (MAYOR; SERENO, 2004).

- *Taxa de secagem*

Quando são observadas altas taxas de secagem pelo material, o baixo conteúdo de umidade na superfície externa do produto pode induzir a uma transição vítrea e a formação de uma crosta porosa rígida na superfície do material o que traz complicações para o encolhimento subsequente da parte interna do alimento ainda no estado de borracha. Tal comportamento durante a secagem de géis foi verificado

experimentalmente por Schrader e Litchfield (1992), por meio de ressonância magnética. Wang e Brennan (1995), durante a secagem de batatas, mostraram microscopicamente este efeito de endurecimento superficial.

Por outro lado, quando se têm baixas taxas de secagem, a difusão de água do interior para a superfície do material acontece à mesma taxa que a evaporação de água da superfície do mesmo. Desta forma, o material encolhe uniformemente até as últimas fases do processo de secagem. Este comportamento foi observado por Litchfield e Okos (1992) durante a secagem de macarrão e por Wang e Brennan (1995) durante a secagem de batata.

O efeito do endurecimento superficial não pode ser observado caso as condições de secagem não permitam uma transição de fase na superfície do material, até mesmo a altas taxas de secagem. Willis, Okos e Campanella (1999), durante a secagem de macarrão, observaram um maior encolhimento quando as amostras foram desidratadas a 100 °C e 50% de umidade relativa do que em amostras desidratadas a 40 °C à mesma umidade relativa do ar de secagem. No primeiro caso, a temperatura do ar de secagem era maior que a temperatura de transição vítrea do macarrão, permanecendo o produto dentro do estado “borrachento” e encolhendo uniformemente durante todo o processo de secagem. No segundo caso, o efeito do endurecimento superficial foi observado devido a uma transição vítrea na superfície do material, o que diminuiu o nível de encolhimento e aumentou as tensões residuais no material seco, provocando rachaduras e quebra do mesmo durante o armazenamento.

- *Condições de processamento*

Vários autores vêm tentando estudar a influência das diferentes condições de processo nas mudanças de volume dos materiais durante a secagem. Na maioria dos casos, tal análise é realizada verificando o efeito de cada condição de processo como temperatura (MCMINN; MAGEE, 1997 com batata), velocidade do ar (KHRAISHEH; COOPER; MAGEE, 1997 com batata; RATTI, 1994 com batata, maçã e cenoura) ou umidade relativa do ar (RATTI, 1994 com batata, maçã e cenoura). Infelizmente, os

resultados destes trabalhos encontram-se obscuros sobre a influência destas condições de processamento no encolhimento.

Embora o aumento da temperatura do ar de secagem tenha produzido um menor encolhimento em alguns casos (DEL VALLE; CUADROS; AGUILERA, 1998; MCMINN; MAGEE, 1997; WANG; BRENNAN, 1995) em outros, tal influência não ficou bem definida (RATTI, 1994 com batata, maçã e cenoura).

Khraisheh, Cooper e Magee (1997), trabalhando com batata, e Ratti (1994), com batata, maçã e cenoura, concluíram que o aumento na velocidade do ar produziu um menor encolhimento, cuja magnitude dependeu apenas do tipo de material utilizado.

Lang e Sokhansanj (1993), trabalhando com trigo e óleo de colza, observaram uma leve influência da umidade relativa do ar no encolhimento que parece aumentar com o aumento da umidade relativa do ar. Por outro lado, Ratti (1994), não encontrou influência significativa da umidade do ar na faixa estudada.

Como sugerido anteriormente, acredita-se que é o efeito combinado das condições de processamento que facilita a formação de uma crosta na superfície do produto durante a fase inicial do processo de secagem, o que determina o tipo e a extensão do encolhimento (MAYOR; SERENO, 2004).

#### **3.2.4.2 – Modelagem do encolhimento**

A secagem de alimentos é um processo complexo que envolve transporte simultâneo de massa e energia em um sistema que sofre diferentes mudanças em sua composição química, na sua estrutura e propriedades físicas (MAYOR; SERENO, 2004).

Durante algum tempo, o encolhimento foi desconsiderado na modelagem do processo de secagem, o que fez com que os modelos de secagem ficassem mais fáceis

de serem resolvidos. Entretanto, em sistemas de materiais biológicos, o encolhimento é raramente desprezível.

Park (1998), estudando a desidratação de músculo de tubarão, utilizou dois modelos baseados na segunda lei de Fick, considerando e desprezando o fenômeno de encolhimento. Os resultados obtidos mostraram diferenças significativas nos valores de difusividade efetiva de água em função da consideração ou não do encolhimento.

Simal e colaboradores (1998) também encontraram valores de difusividade de água diferentes, utilizando o modelo de Fick, quando o encolhimento foi levado em conta. Segundo os autores, a predição das curvas de secagem tornou-se mais precisa no momento em que foi considerado o fenômeno de encolhimento durante o processo de secagem.

Existem duas diferentes abordagens as quais têm sido consideradas com o intuito de se modelar o fenômeno de encolhimento durante a secagem de materiais biológicos. A primeira consiste na modelagem empírica dos dados experimentais de encolhimento como função do conteúdo de umidade. A segunda é mais fundamental e se baseia na interpretação física do sistema e tenta prever as mudanças na geometria do material baseado na lei de conservação de massa. Em ambos os casos, são utilizados modelos lineares e não lineares a fim de se descrever o encolhimento como função do conteúdo de umidade da amostra (MAYOR; SERENO, 2004).

Dentre os vários modelos encontrados na literatura utilizados para modelar o encolhimento devido à secagem, podemos citar os modelos uniformes obtidos por Suzuki e colaboradores (1976) para cenoura, batata, batata doce e rabanete, os quais tentam relacionar as mudanças na área superficial total do material com o decréscimo no seu conteúdo de umidade, levando-se em consideração dados de densidade *bulk* do material na condição inicial ou no equilíbrio.

- *Modelo uniforme 1*

Caso o encolhimento no volume do material seja igual ao volume de água perdido por evaporação durante todos os estágios da secagem, a mudança na área superficial do produto com o encolhimento podem ser relacionados com a seguinte equação:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^n \quad (3.18)$$

Onde:

$A(t)$  = área superficial total da amostra em um dado tempo  $t$  de processo;

$A_0$  = área superficial inicial da amostra;

$V(t)$  = volume da amostra em um dado tempo de processo;

$V_0$  = volume inicial da amostra;

$n$  = coeficiente de encolhimento.

O volume do material submetido à secagem pode ser definido como a soma entre o volume do material na condição de equilíbrio e o volume de água contido em seus poros. Sendo assim, a Equação (3.18) fica da seguinte forma:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \left\{ \frac{V_e + [(w(t) - w_e) / \rho_{\text{água}}]}{V_e + [(w_0 - w_e) / \rho_{\text{água}}]} \right\}^n \quad (3.19)$$

Onde:

$V_e$  = volume da amostra na condição de equilíbrio;

$w(t)$  = massa da amostra em um dado tempo de processo;

$w_0$  = massa inicial da amostra;

$w_e$  = massa da amostra na condição de equilíbrio;

$\rho_{\text{água}}$  = densidade da água.

Considerando a densidade da água como sendo  $1\text{g/cm}^3$ , a Equação (3.19) pode ser rearranjada da seguinte forma:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \left[ \frac{w(t) + w_e(1/\rho_e - 1)}{w_0 + w_e(1/\rho_e - 1)} \right]^n \quad (3.20)$$

Com  $\rho_e$  correspondente à densidade da amostra na condição de equilíbrio.

Portanto, a forma simplificada da Equação (3.20) pode ser representada pela equação abaixo:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \left( \frac{X(t) + a}{X_0 + a} \right)^n \quad (3.21)$$

Onde:

$$a = X_e(1/\rho_e - 1) + 1/\rho_e;$$

$X(t)$  = conteúdo de umidade da amostra em um dado tempo de processo;

$X_0$  = conteúdo inicial de umidade da amostra;

$X_e$  = conteúdo de umidade da amostra na condição de equilíbrio.

- *Modelo uniforme 2*

Considerando agora que o volume do material seja expresso como sendo a diferença entre o volume inicial da amostra e o volume de água perdido por evaporação, a área superficial do material sofre a seguinte modificação:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \left[ \frac{V_0 + (w_0 - w(t))/\rho_{\text{H}_2\text{O}}}{V_0} \right]^n \quad (3.22)$$

Rearranjando a Equação (3.22), tem-se:

$$\frac{A(t)}{A_0} = (cX(t) + d)^n \quad (3.23)$$

Onde:

$$c = \rho_0 / (X_0 + 1);$$

$$d = 1 + c - \rho_0;$$

$\rho_0$  = densidade inicial da amostra.

Park (1998), como já mencionado anteriormente, utilizou o modelo difusional a fim de modelar o processo de secagem de músculo de tubarão levando em consideração o fenômeno de encolhimento. Para tal, utilizou o conceito de concentração de umidade.

A equação diferencial baseada na segunda lei de Fick para a difusão de água durante a secagem é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla C) \quad (3.24)$$

Representando a equação acima em termos de densidade do sólido seco  $\rho_s$ , teremos:

$$\frac{\partial(\rho_s X)}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla(\rho_s X)) \quad (3.25)$$

Ou, considerando a massa seca MS constante (PARK, 1987):

$$\frac{\partial MS \left( \frac{X}{V} \right)}{\partial t} = \frac{MS \partial \left( \frac{X}{V} \right)}{\partial t} = MS D_{ef} \nabla^2 \left( \frac{X}{V} \right) \quad (3.26)$$

Substituindo  $Y = \text{concentração de umidade} = X/V$ , teremos:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = D_{ef} \nabla^2 Y \quad (3.27)$$

Com as seguintes condições inicial e de contorno:

$$Y = X_0/V_0 \text{ em } t = 0 \text{ para } 0 < x < \overline{ESP};$$

$$Y = X_e/V_e \text{ em } x = \overline{ESP} \text{ para } t > 0;$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x} = 0 \text{ em } x = 0 \text{ para } t > 0.$$

Aplicando a condição inicial e de contorno na Equação (3.27), considerando difusão líquida unidirecional para uma placa plana infinita, teremos:

$$\frac{\overline{Y(t)} - Y_e}{Y_0 - Y_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-(2i+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{4\overline{ESP}^2}\right] \quad (3.28)$$

Onde  $\overline{ESP}$  corresponde ao valor médio da meia espessura da placa que pode ser obtido através da seguinte equação:

$$\frac{\overline{ESP}}{ESP_0} = \frac{1}{t_f} \int_{t_0=0}^{t_f} \frac{ESP}{ESP_0}(t) dt \quad (3.29)$$

Onde:

$ESP_0$  = dimensão característica inicial do material;

$t_0$  = tempo inicial do processo;

$t_f$  = tempo final do processo.

É possível também utilizar o Modelo Difusional para uma placa plana infinita (Equação 3.16) a fim de se descrever o fenômeno de encolhimento considerando as variações na espessura do material ao longo do processo de secagem. Neste caso, teremos duas variáveis independentes ( $t$  e ESP) ao efetuar o procedimento de regressão não-linear.

### **3.3 – AVALIAÇÃO SENSORIAL**

A avaliação sensorial dos alimentos é função primária do homem, que desde a sua infância, de forma consciente ou não, aceita ou rejeita alimentos de acordo com a sensação que experimenta ao observá-los ou ingeri-los (DA SILVA, 2000).

A análise sensorial de alimentos trata da avaliação da qualidade dos mesmos mediante utilização dos nossos sentidos (visão, olfação, gustação, tato e audição). Somente através da aplicação de métodos de teste científicos é possível obter resultados reprodutíveis e que possam ser analisados estatisticamente (JELLINEK, 1985).

Existem várias aplicações de análise sensorial como no controle de qualidade de matérias-primas e produtos processados, testes de estocagem, análises de produtos competitivos, desenvolvimento de novos produtos, investigação de fatores que influenciam no odor e sabor do alimento, testes de mercado e hedônicos (JELLINEK, 1985).

São quatro as fases na metodologia de avaliação da qualidade sensorial de alimentos (STONE; SIDEL, 1993):

- *Até 1940* – nesta fase, a qualidade sensorial é determinada pelo “dono” ou encarregado da indústria. Hoje se sabe que, em relação à qualidade sensorial, a opinião do mais alto funcionário da indústria não vale, necessariamente, mais do que o auxiliar de escritório;

- *De 1940 a 1950* – momento em que houve a incorporação de pessoal técnico na indústria de alimentos, geralmente vindo de outra área, como área química e farmacêutica. Nesta época, conceitos de controle de processo e produto final foram introduzidos, porém, os métodos utilizados eram químicos e instrumentais, não sensoriais;
- *De 1950 a 1970* – durante a segunda guerra, ocorreu um episódio que deu grande impulso ao desenvolvimento de metodologias de análise sensorial para produtos alimentícios. Rações balanceadas, desenvolvidas por nutricionistas e dietistas, encontraram baixo nível de aceitação por parte dos soldados americanos que lutavam nos campos europeus em função da pobre qualidade sensorial do produto;
- *De 1970 em diante* – nesta fase, define-se que a qualidade sensorial de um alimento não é uma característica própria do alimento, mas sim, o resultado da interação entre o alimento e o homem. Reconhece-se que a qualidade sensorial é função tanto dos estímulos provenientes do alimento como também das condições fisiológicas, psicológicas e sociológicas do indivíduo que avalia o alimento.

Atualmente, mesmo com a utilização de sofisticados instrumentos de medida na quantificação dos atributos sensoriais em alimentos, é impossível a substituição da “detecção biológica” por estes uma vez que conseguem apenas uma análise de alguns componentes presentes no alimento, enquanto que os nossos sentidos nos dão uma impressão completa acerca do alimento (JELLINEK, 1985).

Dentre os vários testes utilizados para avaliação sensorial da qualidade de alimentos, encontram-se os testes afetivos. Estes compreendem uma área de atuação necessária e muito útil no campo da análise sensorial.

Por estes testes, compreendem-se os que medem o grau com que os consumidores *gostam* ou *desgostam* de um determinado produto e a *preferência* que um consumidor assume sobre um produto em relação a outro. Evidentemente, a preferência de um produto em relação a outro pode também ser inferida através dos

testes de aceitação, assumindo-se que o consumidor irá preferir aquele produto do qual ele mais gostou (STONE; SIDEL, 1993).

Os testes de aceitação podem ser classificados em três tipos, como função do local de aplicação dos testes: *laboratório*, *localização central* e *uso doméstico*. Normalmente, são utilizados testes de escala hedônica (Figura 3.4), cujo princípio consiste da avaliação de quanto o provador gosta ou desgosta de amostras do produto que se está analisando, as quais são oferecidas de maneira codificada (DA SILVA, 2000).

Os dados obtidos a partir destes testes podem ser avaliados estatisticamente através de análise da variância (ANOVA), de acordo com Barros Neto, Scarmínio e Bruns (2003), tendo como fontes de variação o tipo de amostra e o número de provadores; e de um teste bastante utilizado, conhecido como *Teste de Tukey* conforme a Equação 3.30 (STONE; SIDEL, 1993).

$$DMS = ts \sqrt{\frac{SQM_{\text{resíduo}}}{NJ}} \quad (3.30)$$

Onde:

DMS = diferença mínima significativa;

ts = distribuição t;

$SQM_{\text{resíduo}}$  = soma quadrática média do resíduo;

NJ = número de julgamentos.

Nome: _____		Data: _____	
Avalie as amostras codificadas e use a escala abaixo para indicar o quanto você gostou ou desgostou de cada amostra quanto à <b>aparência, aroma, sabor, textura e impressão global</b> .			
9 – gostei muitíssimo 8 – gostei muito 7 – gostei moderadamente 6 – gostei ligeiramente 5 – nem gostei / nem desgostei 4 – desgostei ligeiramente 3 – desgostei moderadamente 2 – desgostei muito 1 – desgostei muitíssimo			
Amostra: _____			
<b><u>Atributo:</u></b>		<b><u>Nota:</u></b>	
Aparência		_____	
Aroma		_____	
Sabor		_____	
Textura		_____	
Impressão global		_____	
Comentários: _____			
_____			
_____			
_____			

Figura 3.4 – Exemplo de Ficha para teste de escala hedônica estruturada mista.

### 3.4 – PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS

As pessoas normalmente se lembram da estatística quando se vêem diante de grandes quantidades de informação. De acordo com o chamado senso comum, a estatística seria, grosso modo, algo semelhante à mineração. Um estatístico seria um tipo de mineiro bem-sucedido, capaz de escavar montanhas de números e delas extrair valiosas conclusões. Como tanta coisa associada ao senso comum, esta também é uma impressão falsa. A atividade estatística mais importante não é a análise dos dados, e sim o planejamento dos experimentos em que esses dados devem ser obtidos. Quando isso não é feito da forma apropriada, o resultado muitas vezes é uma montanha de números estéreis, da qual estatístico algum conseguiria arrancar quaisquer conclusões (BARROS NETO; SCARMÍNIO; BRUNS, 2003).

A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que se procura. Para isso, precisamos saber o que é que estamos procurando. Mais uma vez, isso parece óbvio, mas não é bem assim. Podemos dizer que um bom experimentador é, antes de tudo, uma pessoa que sabe o que quer. Dependendo do que ele queira, algumas técnicas são mais vantajosas que outras, enquanto determinadas técnicas são simplesmente inócuas (BARROS NETO; SCARMÍNIO; BRUNS, 2003).

### **3.4.1 – Metodologia de superfície de resposta (RSM)**

A metodologia de superfície de resposta, empregada desde a década de 50, é uma técnica baseada no emprego de planejamentos fatoriais e que até hoje tem sido largamente utilizada com bastante sucesso na modelagem de diversos processos industriais (BOX; HUNTER; HUNTER, 1978).

De acordo com Barros Neto, Scarmínio e Bruns (2003), a RSM é composta de duas etapas: a modelagem e o deslocamento. Ambas podem ser repetidas quantas vezes forem necessárias, até que se atinja uma região ótima (máximo ou mínimo), da superfície estudada. A primeira é conseguida se ajustando modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais obtidos a partir de planejamentos experimentais. A segunda ocorre em busca do caminho de máxima inclinação de um determinado modelo, que é o caminho onde a resposta varia de forma mais pronunciada.

O método do planejamento experimental é baseado na seleção de níveis (nível superior + e nível inferior -) para cada variável de entrada (variável independente) e na execução de experimentos para todas as possíveis combinações. Se  $n$  fatores (variáveis controladas pelo experimentador) estão envolvidos no estudo de um sistema, o planejamento necessita de  $2^n$  ensaios diferentes, que é o número mínimo para obtenção de um planejamento fatorial completo.

Outros ensaios podem ser adicionados ao experimento na forma repetições a fim de se calcular o erro experimental. Com os resultados obtidos, pode-se calcular os efeitos principais e de interação das variáveis independentes sobre as respostas (variáveis dependentes), determinando quais os efeitos mais significativos para o processo em estudo.

Para a obtenção dos modelos empíricos através de regressões lineares e não-lineares, Box, Hunter e Hunter (1978) afirmam que é necessário realizar primeiramente uma análise de variância (ANOVA), utilizando dois parâmetros muito importantes: coeficiente de correlação  $R^2$  e o valor estimado para o teste F.

O coeficiente de correlação é um parâmetro estatístico que relaciona a variância dos pontos experimentais em relação ao modelo proposto com a variância da própria população de pontos experimentais. Se a correlação entre os valores previstos pelo modelo e os valores experimentais for igual à unidade, diz-se que esta é perfeita; caso contrário, quando o valor for nulo, não existe correlação alguma entre eles.

A base do teste F consiste em verificar se existe relação entre as variáveis independentes e as respostas do planejamento. Quando não existe correlação entre as variáveis independentes e as respostas, pode-se demonstrar que a razão entre as médias quadráticas da regressão e do resíduo ( $MQ_R/MQ_r$ ) segue uma distribuição F (hipótese nula). Neste caso, a variação nos valores dos resultados foi devido, exclusivamente, a fatores aleatórios. A hipótese nula pode ser testada usando o valor efetivamente calculado para  $MQ_R/MQ_r$  e, para isto, basta compará-lo com o valor tabelado de F. Se as variações das respostas experimentais apresentarem alta probabilidade de pertencerem à distribuição F, não há motivos para se questionar a hipótese nula. Desta forma, pode-se dizer que a equação de regressão não é significativa.

Por outro lado, caso a razão  $MQ_R/MQ_r$  seja maior que o valor de F tabelado, pode-se dizer que a equação de regressão é estatisticamente significativa e que os

dados experimentais podem ser bem representados pelo modelo obtido. De acordo com BOX e WETZ (1993), para que um modelo seja considerado estatisticamente significativo e preditivo é necessário que o valor da razão  $MQ_R/MQ_r$  seja de quatro a cinco vezes superior ao valor de F tabelado.

A análise dos resíduos é outro parâmetro de importância fundamental ao se avaliar a qualidade do ajuste de um modelo. Valores residuais altos indicam má qualidade no ajuste (BARROS NETO; SCARMÍNIO; BRUNS, 2003).

## 4 – MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 – MATÉRIA-PRIMA

Foram utilizados mamões da variedade Formosa, observando-se critérios de grau de maturação (10 – 12<sup>o</sup>Brix), mesmo tamanho e forma com o objetivo de se padronizar a matéria-prima (Figura 4.1). Os mamões foram adquiridos no mercado local (CEASA de Campinas – SP).



Figura 4.1 – Mamão Formosa utilizado nos experimentos.

Os frutos foram descascados manualmente até a remoção completa da casca. As sementes foram removidas e a polpa foi cortada em fatias de dimensões 50 x 30 x 5mm (Figura 4.2) com o auxílio de um cortador projetado para este fim (Figura 4.3).



Figura 4.2 – Mamão fresco cortado em placas.



Figura 4.3 – Cortador utilizado nos experimentos.

#### **4.1.1 – Caracterização físico-química da matéria-prima**

As análises descritas a seguir foram todas feitas em triplicata. Portanto, o valor final de cada análise corresponde à média das três repetições.

- **Ácido ascórbico (vitamina C) (LEES, 1975)**

A determinação do teor de ácido ascórbico é realizada através da redução do 2,6-diclorofenol indofenol-sódio (DCF<sub>I</sub>) pelo ácido ascórbico. O resultado é expresso em mg de ácido ascórbico por 100g de amostra.

- **Atividade de água**

Baseia-se na determinação direta, em equipamento (AQUALAB SERIES 3 TE), da atividade de água a 25<sup>0</sup>C da amostra acondicionada em cápsula plástica, em equilíbrio com a atmosfera interna do equipamento. O valor de atividade de água é registrado quando há a formação da primeira gota de orvalho em função do equilíbrio alcançado entre a fase líquida, presente na amostra, e a fase gasosa.

- **Carotenóides totais** (RANGANNA, 1977)

Consiste na extração dos carotenóides com solvente orgânico e quantificação através de espectrofotometria.

- **Fibras** (A.O.A.C., 1984)

O método baseia-se na determinação enzimática do teor de fibras. O resultado é expresso em percentagem de fibras.

- **Pectina** (PEARSON, 1970)

Baseia-se na neutralização das cargas dos resíduos de ácidos urônicos livres pelos íons cálcio, provocando a gelatinização da pectina e sua precipitação.

- **Sólidos solúveis ou Brix** (A.O.A.C., 1984)

Baseia-se na leitura direta dos graus Brix, a 20<sup>0</sup>C, utilizando refratômetro.

- **Teor de açúcares redutores e totais** (A.O.A.C., 1984)

Baseia-se na redução do cobre em solução cúprica (solução de Fehling) através de açúcares invertidos. O conteúdo de açúcar presente na amostra é obtido sabendo-se o volume de solução de açúcar necessário para reduzir completamente a solução de Fehling de volume conhecido.

- **Umidade** (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1985)

Este método se fundamenta na evaporação da água presente no alimento e pesagem do resíduo.

## 4.2 – DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA

### 4.2.1 – Planejamento experimental

O processo de desidratação osmótica de fatias de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho foi estudado mediante planejamento experimental fatorial completo com três variáveis independentes (temperatura e concentração da solução osmótica e tempo de imersão), avaliadas em dois níveis (- e +), com pontos axiais (- $\alpha$  e + $\alpha$ ) e triplicata nos pontos centrais (0), totalizando 17 experimentos para cada agente osmótico. As variáveis dependentes do planejamento foram a perda de peso (PP), a perda de água (PA), o ganho de sólidos (GS) e a atividade de água ( $a_w$ ). A Tabela 4.1 mostra a planilha de planejamento utilizada para o estudo.

Tabela 4.1 – Planejamento experimental fatorial  $2^3$  com pontos centrais e axiais realizado para avaliar a desidratação osmótica de mamão Formosa em soluções de sacarose e xarope de milho.

Ensaio	T (°C)	C (%p/p)	t (min.)
1	34(-1)	44(-1)	120(-1)
2	34(-1)	56(+1)	120(-1)
3	34(-1)	44(-1)	210(+1)
4	34(-1)	56(+1)	210(+1)
5	46(+1)	44(-1)	120(-1)
6	46(+1)	56(+1)	120(-1)
7	46(+1)	44(-1)	210(+1)
8	46(+1)	56(+1)	210(+1)
9	40(0)	50(0)	165(0)
10	40(0)	50(0)	165(0)
11	40(0)	50(0)	165(0)
12	30(-1,68)	50(0)	165(0)
13	50(1,68)	50(0)	165(0)
14	40(0)	40(-1,68)	165(0)
15	40(0)	60(1,68)	165(0)
16	40(0)	50(0)	90(-1,68)
17	40(0)	50(0)	240(1,68)

Através do presente estudo foi possível obter modelos estatísticos capazes de predizerem o comportamento das variáveis dependentes (respostas) em função das variáveis independentes, na faixa adotada para a análise das últimas.

As faixas utilizadas neste trabalho para a temperatura e a concentração foram baseadas na literatura sobre desidratação osmótica de frutas. A faixa adotada para o tempo de imersão foi obtida mediante uma cinética no ponto central, para ambos os agentes osmóticos, observando as curvas de taxa de perda de água em função do tempo de processo.

Foi assumido existir uma função matemática  $\varphi$  para cada resposta  $\xi$  (PP, PA, GS e  $a_w$ ) em função das três variáveis independentes (temperatura, concentração e tempo de imersão) (KHURI; CORNELL, 1996):

$$\xi = \varphi(T, C, t) = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_{11} T^2 + \beta_2 C + \beta_{22} C^2 + \beta_3 t + \beta_{33} t^2 + \beta_{12} T.C + \beta_{13} T.t + \beta_{23} C.t \quad (4.1)$$

Onde  $\beta$  corresponde ao coeficiente da equação e os sub-índices 0, 1, 2, 3, 12, 13 e 23 correspondem ao valor médio da função  $\varphi$ , temperatura, concentração, tempo de imersão, interação entre temperatura e concentração, interação entre temperatura e tempo de imersão e interação entre concentração e tempo de imersão, respectivamente. A Equação 4.1 corresponde ao modelo codificado das variáveis dependentes avaliadas neste estudo. A fim de se obter o valor real correspondente à faixa estudada das variáveis independentes, a seguinte equação pode ser usada:

$$VC = \frac{VR - PCT}{\Delta VR_{PCT}} \quad (4.2)$$

Em que VC, VR, PCT e  $\Delta VR_{PCT}$  correspondem ao valor codificado, valor real, ponto central e variação entre valor real e o ponto central, respectivamente.

A fim de se obter os coeficientes da Equação 4.1, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) para cada resposta, utilizando o pacote estatístico Statistica 5.0 (STATSOFT, 1997).

O objetivo do estudo foi obter uma maximização da perda de peso e perda de água, juntamente com uma minimização do ganho de sólidos e da atividade de água do produto. Para tal, foi realizada uma análise conjunta entre as superfícies obtidas para a razão PP/PA e  $a_w$ , a fim de se encontrar a região que melhor atendesse aos objetivos do presente estudo, para cada agente osmótico.

#### **4.2.2 – Preparação das soluções osmóticas**

Foram preparadas soluções de sacarose (comercial) e xarope de milho (MOR-REX<sup>®</sup> 1940, Corn Products Brazil) em água destilada para concentrações que variaram de 40 – 60% p/p. As soluções foram deixadas em repouso até sua estabilização (solução límpida, sem partículas suspensas). A concentração das soluções foi verificada através de um refratômetro.

#### **4.2.3 – Processo osmótico**

As fatias de mamão, previamente pesadas e identificadas, foram colocadas em frascos de aproximadamente 250ml, juntamente com a solução osmótica. As amostras foram levadas a uma incubadora, marca TECNAL, modelo TE-421, com controle de agitação (80 rpm) e temperatura (30 – 50°C). Foi utilizada uma proporção fruta:solução de 1:10, a fim de se garantir que a concentração da solução osmótica permanecesse constante ao longo do processo.

As amostras foram retiradas em tempos que variaram de 90 a 240 minutos. Após serem retiradas da incubadora, as amostras foram lavadas com água destilada, para se remover o excesso de solução desidratante, drenadas e finalmente pesadas. Após pesagem, foi determinado o conteúdo de umidade das amostras, de acordo com o

procedimento referenciado na Seção 4.1.1. Todas as determinações foram feitas em triplicata.

#### **4.2.4 – Cinética de desidratação osmótica para a melhor condição de desidratação de cada agente osmótico**

A cinética de desidratação foi estudada pelo acompanhamento da perda de água (PA) e do ganho de sólidos (GS) para a melhor condição de desidratação de cada agente osmótico (Apêndice A2) escolhidas mediante análise dos dados do planejamento experimental realizado.

#### **4.2.5 – Modelagem matemática da cinética de desidratação osmótica**

A modelagem da desidratação foi feita pelo Modelo Difusional, utilizando os 8 primeiros termos da série, para uma geometria de placa plana infinita. Também foram utilizados os modelos empíricos de Peleg e de Azuara e colaboradores.

#### **4.2.6 – Cinética de encolhimento na desidratação osmótica para a melhor condição de desidratação de cada agente osmótico**

A cinética de encolhimento foi realizada mediante acompanhamento das variações de área superficial total e volume aparente das amostras ao longo do processo.

As medidas das dimensões, da área superficial e do volume aparente das amostras foram realizadas através de fotografia em máquina digital SONY Cyber-shot e de paquímetro MITUTOYO (Apêndice A3).

As amostras foram fotografadas (Apêndice A3) no mesmo instante em que foram pesadas. A largura e comprimento foram obtidas diretamente pelas fotografias, através

de uma média aritmética das medidas realizadas em cinco diferentes pontos ao longo da amostra, conforme Figura 4.4.

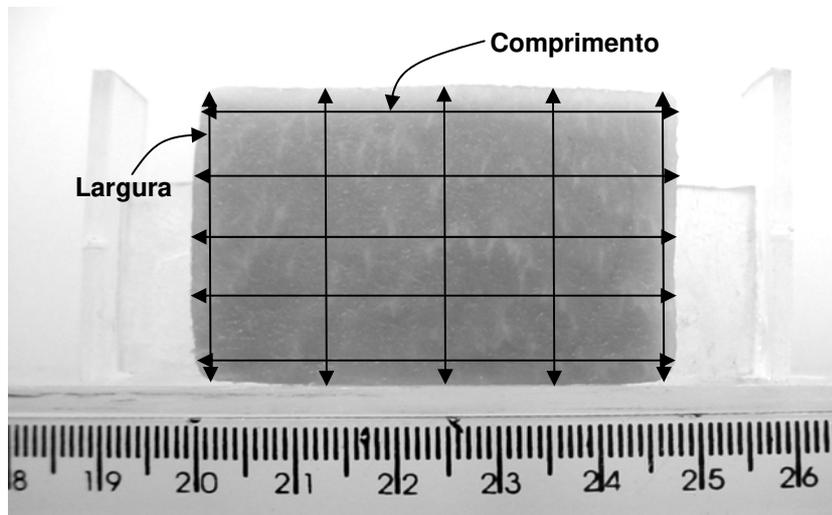


Figura 4.4 – Cotas para a medição da largura e comprimento em diferentes pontos das amostras de mamão.

A espessura das amostras foi determinada através de uma média aritmética das medidas feitas em cinco diferentes pontos da amostra, com a utilização de micrômetro digital (Figura 4.5).

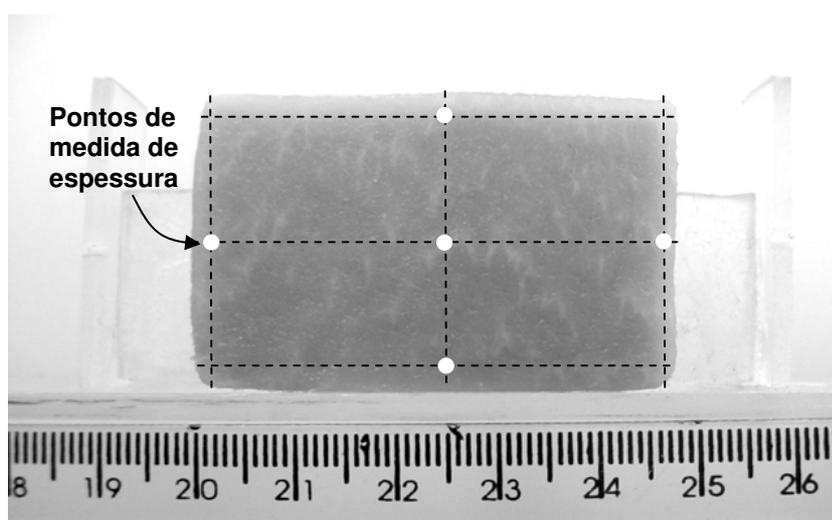


Figura 4.5 – Pontos de medição da espessura ao longo da amostra de mamão.

A área superficial fotografada foi determinada através da impressão das fotos em folhas de papel, tamanho A4, recortando-se a forma da amostra e estabelecendo uma relação entre área e peso, considerando o mesmo papel. Juntamente com os dados de largura, profundidade e espessura médios foi determinada a área superficial total das amostras. Os dados de volume aparente foram obtidos multiplicando-se a área superficial fotografada pela espessura média do material.

#### 4.2.7 – Modelagem da cinética de encolhimento na desidratação osmótica

A modelagem da cinética de encolhimento para a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho foi realizada através dos modelos uniformes propostos por Suzuki e colaboradores (1976), pelo Modelo Difusional modificado proposto por Park (1998), assim como também de forma empírica, tentando correlacionar as modificações no volume aparente da amostra com a variação em seu conteúdo de umidade ao longo do tempo.

A fim de se utilizar os modelos propostos por Suzuki e colaboradores (1976) (Seção 3.2.4.2) para o processo de desidratação osmótica foi necessário fazer algumas modificações sobre os mesmos, uma vez que tais modelos foram deduzidos considerando a massa seca constante, o que não ocorre na desidratação osmótica devido à impregnação de soluto.

Assumindo que haja uma relação de proporcionalidade entre a área superficial total das amostras e o volume aparente das mesmas, teremos a seguinte equação:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \left( \frac{V(t)}{V_0} \right)^n \quad (4.3)$$

Partindo-se do conceito do *Modelo Uniforme 1*, utilizado por Suzuki e colaboradores (1976), o volume do material submetido à desidratação osmótica pode ser definido em função do volume correspondente à condição de equilíbrio, pois nesta

condição o material não sofre mais a alteração na sua forma geométrica. Portanto, para o presente caso, a variação do volume ao longo da desidratação osmótica pode ser expressa como a soma entre o volume do material na condição de equilíbrio e o volume líquido de matéria que flui através do produto, ao longo do tempo. Sendo assim, teremos:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \left[ \frac{V_e + V(t)_{LM}}{V_e + V_{0LM}} \right]^n \quad (4.4)$$

Definindo a Equação 4.4 em função dos principais fluxos observados no processo de desidratação osmótica, teremos:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \left[ \frac{V_e + (V(t)_{PA} - V(t)_{GS})}{V_e + (V_{0PA} - V_{0GS})} \right]^n \quad (4.5)$$

O volume de água perdida ao longo do tempo pode ser definido da seguinte forma:

$$V(t)_{PA} = V(t)_{H_2O} - V_{eH_2O} \quad (4.6)$$

O volume de sólidos ganhos ao longo do tempo pode ser definido da seguinte forma:

$$V(t)_{GS} = V_{eMS} - V_{0MS} \left( \frac{MS(t)}{MS_0} \right) \quad (4.7)$$

O volume de matéria seca na condição de equilíbrio pode ser obtido através da seguinte equação:

$$V_{eMS} = V_e - V_{eH_2O} \quad (4.8)$$

Rearranjando as Equações 4.5 a 4.8, teremos a seguinte relação entre as variações na área superficial total do material e as variações no seu volume devido ao processo osmótico:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \left[ \frac{V(t)_{\text{H}_2\text{O}} + V_{0\text{ms}} \left( \frac{MS(t)}{MS_0} \right)}{V_{0\text{H}_2\text{O}} + V_{0\text{ms}}} \right]^n \quad (4.9)$$

Os parâmetros da Equação 4.9 podem ser determinados mediante as equações abaixo:

$$V(t)_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{w(t) \chi(t)}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (4.10)$$

$$MS(t) = w(t) (1 - \chi(t)) \quad (4.11)$$

$$V_{0\text{ms}} = V_0 - V_{0\text{H}_2\text{O}} \quad (4.12)$$

Seguindo o mesmo raciocínio para o *Modelo Uniforme 2*, considerando agora que o volume do material seja expresso como sendo a diferença entre o volume inicial da amostra e o volume líquido de matéria que flui, a área superficial do material sofre a seguinte modificação:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \left[ \frac{V_0 - V(t)_{\text{LM}}}{V_0} \right]^n \quad (4.13)$$

Definindo a Equação 4.13 em função dos principais fluxos observados no processo de desidratação osmótica, teremos:

$$\frac{A(t)}{A_0} = \left[ \frac{V_0 - (V(t)_{PA} - V(t)_{GS})}{V_0} \right]^n \quad (4.14)$$

O volume de água perdida ao longo do tempo pode ser definido da seguinte forma:

$$V(t)_{PA} = V_{0\text{H}_2\text{O}} - V(t)_{\text{H}_2\text{O}} \quad (4.15)$$

O volume de sólidos ganhos ao longo do tempo pode ser definido da seguinte forma:

$$V(t)_{GS} = V_{0\text{ms}} \left( \frac{MS(t)}{MS_0} \right) - V_{0\text{ms}} \quad (4.16)$$

Através da equação abaixo, o volume de matéria seca inicial pode ser obtido.

$$V_{0\text{ms}} = V_0 - V_{e\text{H}_2\text{O}} \quad (4.17)$$

Rearranjando as Equações 4.14 a 4.17, chegaremos a uma equação idêntica à Equação 4.9.

Portanto, a cinética de encolhimento foi descrita através da Equação 4.9, para ambos os agentes osmóticos.

### **4.3 – SECAGEM CONVECTIVA**

Para o processo de secagem, tanto da fruta fresca quanto da pré-tratada osmoticamente, foi utilizado um secador de fluxo contínuo em leito fixo com uma velocidade do ar de secagem de 2,25m/s e quatro temperaturas (40, 50, 60 e 70°C).

O sistema de operação do secador consiste da passagem de ar verticalmente através de bandejas, com recirculação, constituindo um circuito fechado. O aquecimento do ar é feito através de três resistências (duas de 1600W e uma de 800W), as quais podem ser acionadas independentemente, controladas por um termostato digital.

Foi utilizado ainda um termo higrômetro da marca TESTO, modelo 635, a fim de se medir tanto a temperatura de bulbo seco quanto a umidade do ar de secagem. Utilizou-se também um anemômetro digital marca AIRFLOW Co., modelo LCS 6000, para medir a velocidade do ar de secagem. Um esquema do secador é apresentado na Figura 4.6.

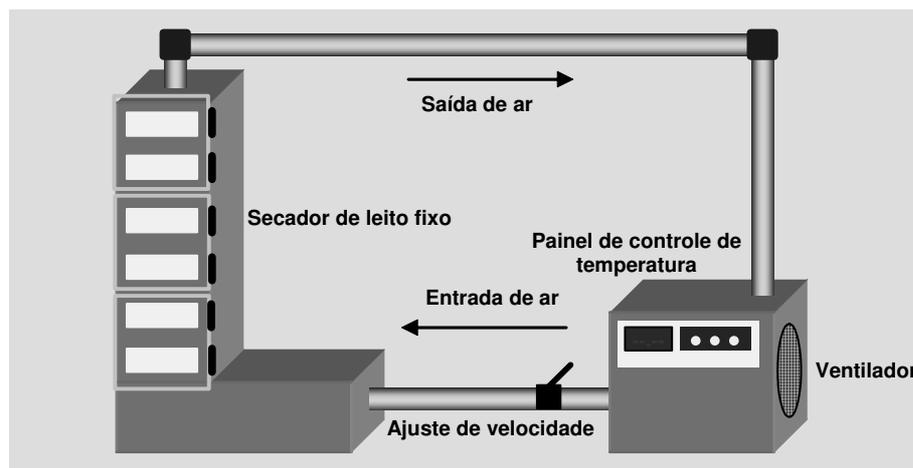


Figura 4.6 – Esquema do secador vertical de leito fixo utilizado nos experimentos.

As amostras foram colocadas na segunda bandeja do secador (de baixo para cima), sendo a primeira bandeja reservada à sílica-gel, a fim de se manter a umidade constante e mais baixa possível no interior do secador. A pesagem das amostras foi realizada através de uma balança semi-analítica em intervalos de tempo pré-determinados até que o equilíbrio dinâmico entre a amostra e o ar de secagem fosse alcançado.

#### **4.3.1 – Cinética de secagem**

A cinética de secagem foi estudada mediante as curvas do adimensional de umidade em função do tempo de processo, assim como também pelas curvas de taxa de secagem em função do conteúdo de umidade das amostras. Os dados experimentais da cinética de secagem se encontram no Apêndice A4.

#### **4.3.2 – Modelagem matemática da secagem**

Para a modelagem foram utilizados o Modelo Difusional, com os 8 primeiros termos da série, para uma geometria de placa plana infinita e o modelo empírico de Page.

#### **4.3.3 – Cinética de encolhimento durante a secagem**

A cinética de encolhimento foi realizada mediante acompanhamento das variações de área superficial total e volume aparente das amostras ao longo do processo, seguindo a mesma metodologia adotada para a desidratação osmótica. Os dados experimentais da cinética de encolhimento se encontram no Apêndice A5.

#### **4.3.4 – Modelagem do encolhimento durante a secagem**

Foi realizada utilizando-se o Modelo Difusional para uma placa plana infinita considerando, agora, as variações na espessura do material ao longo do processo. Também foram utilizados os modelos de Suzuki e colaboradores (1976). Em função da própria dimensão da amostra e do tipo de fluxo considerado (unidirecional), foram utilizados apenas os modelos uniformes propostos por Suzuki e colaboradores (1976).

#### **4.4 – TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS**

Os ajustes dos modelos aos dados experimentais foram realizados mediante regressão linear e não linear utilizando o pacote estatístico Statistica 5.0 (STATSOFT, 1997). O critério de escolha dos melhores ajustes foi o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (BARROS NETO; SCARMÍNIO; BRUNS, 2003) e o desvio relativo médio E, cuja definição encontra-se descrita pela Equação 4.18 (LOMAURO; BAKSHI; LABUSA, 1985):

$$E = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|VP - VO|}{VO} \quad (4.18)$$

#### **4.5 – QUALIDADE DO PRODUTO FINAL PROCESSADO**

Os produtos finais obtidos foram submetidos a determinações de atividade de água ( $a_w$ ) e conteúdo de carotenóides totais para avaliar a influência de cada tratamento sobre a qualidade do produto final. O procedimento para tais análises já foi descrito anteriormente.

#### **4.6 – ANÁLISE SENSORIAL**

O teste sensorial foi aplicado entre 9h e 11h no Laboratório de Análise Sensorial do Departamento de Alimentos e Nutrição da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Unicamp. Foram utilizados 30 provadores consumidores do produto, de ambos os sexos, recrutados entre funcionários e alunos da faculdade.

O procedimento experimental consistiu em cada provador receber uma amostra codificada de cada vez (apresentação monádica), juntamente com a ficha de avaliação. Para cada amostra o julgador deveria avaliar o quanto gostou em relação à aparência, aroma, sabor, textura e impressão global em uma escala estruturada de nove pontos. A

ficha utilizada para tal análise foi semelhante àquela mostrada na Figura 3.4 da Seção 3.3 sobre análise sensorial.

## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA MATÉRIA-PRIMA

A caracterização físico-química do mamão Formosa fresco foi feita de acordo com os métodos referenciados na Seção 4.1.1. A Tabela 5.1 ilustra os resultados obtidos:

Tabela 5.1 – Caracterização físico-química da fruta fresca.

Análise	Valor médio
Atividade de água (%)	0,990 ± 0,002
Conteúdo de umidade (bu* - %)	89,73 ± 1,57
Sólidos solúveis ( <sup>o</sup> Brix)	11 ± 1,0
Açúcares redutores (%)	10,16 ± 0,13
Açúcares totais (%)	10,19 ± 0,15
Fibras (%)	1,32 ± 0,40
Pectina (%)	0,92 ± 0,51
Carotenóides totais (µg/g ms)	1117,19 ± 12,40
Vitamina C (mg/100g ácido ascórbico)	71,31 ± 8,14

\*base úmida.

Comparando os resultados da Tabela 5.1 aos obtidos por Menezes e colaboradores (1980), observa-se que o conteúdo de umidade é ligeiramente inferior ao da literatura. O mesmo não acontece com os açúcares redutores e totais e fibras os quais apresentam valores um pouco superiores aos encontrados pela literatura. O teor de vitamina C encontra-se na faixa de 30 – 130mg/100g ácido ascórbico. A quantidade de carotenóides totais está na faixa de 27,8 – 37,8 µg/g obtida por Kimura, Rodriguez-Amaya e Yokoyama (1991). O teor de pectina está próximo ao encontrado por Medina e colaboradores (1980). A atividade de água foi um pouco maior que a observada por Rodrigues (1999) para a mesma fruta. O teor de sólidos solúveis se encontra dentro da faixa apresentada na literatura.

As diferenças apresentadas entre os valores obtidos neste estudo e os da literatura são perfeitamente compreensíveis quando se sabe que a composição centesimal de uma fruta é função de diversos fatores, tais como: época do ano, técnica de irrigação utilizada para o plantio, região da qual a fruta é oriunda, dentre outros.

## **5.2 – DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA**

Os dados experimentais para a perda de peso (PP), perda de água (PA), ganho de sólidos (GS) e atividade de água ( $a_w$ ) durante o processo de desidratação osmótica de fatias de mamão Formosa em soluções de sacarose e xarope de milho, de acordo com o planejamento experimental proposto, encontram-se nas Tabelas 5.2 e 5.3, respectivamente.

Segundo as Tabelas 5.2 e 5.3, considerando as mesmas condições de desidratação, observou-se que as amostras de mamão desidratadas em soluções de sacarose apresentaram maiores valores das respostas avaliadas, com exceção dos valores obtidos para a atividade de água. A variação percentual, em relação aos valores das respostas encontrados para o xarope de milho, foi de 12,76 – 106,38% para PP, 31,57 – 111,55% para PA, 56,09 – 184,31% para GS e 1,12 – 4,09% para  $a_w$ . É importante salientar que, embora a variação para  $a_w$  tenha sido bem inferior àquelas encontradas para as outras respostas, tal variação é extremamente significativa do ponto de vista microbiológico (TORREZAN, 1996).

Uma das razões para os baixos valores encontrados para as respostas PP, PA e GS, quando o xarope de milho foi utilizado como agente osmótico, é, provavelmente, devido ao alto teor de polissacarídeos encontrado nestas soluções, como pode ser observado através da Tabela 5.4. A alta concentração de polissacarídeos faz com que a solução osmótica se torne mais viscosa, dificultando o contato entre esta e a fruta, o que resulta em um decréscimo na difusividade mássica através do produto. De acordo com Ponting e colaboradores (1966), existe uma tendência ao aumento no coeficiente

de transferência de massa com o aumento da temperatura, exatamente pela redução da viscosidade da solução osmótica.

Portanto, do ponto de vista de processo, o que pode ser feito, a fim de se obter níveis de transferência de massa compatíveis com aqueles obtidos para a sacarose, é o aumento da temperatura do sistema ou do nível de agitação da solução osmótica.

Existe ainda uma questão colocada por Bolin, Huxoll e Jackson (1983) os quais afirmam que solutos com alto peso molecular promovem menor pressão osmótica. Sendo assim, quanto maior o tamanho molecular do soluto, menor a incorporação de sólidos no processo osmótico, conforme resultados obtidos também por outros pesquisadores (CONTRERAS; SMYRL, 1981; LERICI *et al.*, 1985). Observando as Tabelas 5.2 e 5.3, para uma mesma concentração osmótica, nota-se que os valores de atividade de água das soluções de xarope de milho são superiores aos respectivos valores obtidos para as soluções de sacarose.

Em se tratando de desidratação osmótica, a força motriz do processo é oriunda do poder osmótico que o agente produz quando em solução. De acordo com Lewicki e Lenart (1995), a pressão excedente necessária para se alcançar o equilíbrio entre o solvente puro e a solução é chamada de *pressão osmótica*. Na condição de equilíbrio, temos que:

$$\text{Potencial Químico}_{\text{solvente}}^{\text{solvente}} \Big|_{P_1} = \text{Potencial Químico}_{\text{solvente}}^{\text{solução}} \Big|_{P_2}$$

Partindo-se do princípio de que, em alimentos, a água é o solvente, a seguinte equação pode ser utilizada (LEWICKI; LENART, 1995):

$$\Pi = -4,6063 \times 10^5 T \ln(a_w) \quad (5.1)$$

Em que  $\Pi$  corresponde à pressão osmótica;  $a_w$  é a atividade de água e T, a temperatura absoluta. A Figura 5.1 ilustra a alta pressão osmótica das soluções de

sacarose comparado com as soluções de xarope de milho, utilizando os dados de atividade de água, obtidos experimentalmente, correspondentes a cada concentração das soluções osmóticas contidos no rodapé das Tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5.2 – Valores experimentais das variáveis dependentes para a desidratação osmótica de mamão Formosa em soluções de sacarose.

Tratamento			Respostas			
T(°C)	C*(%p/p)	t(min.)	PP(%)	PA(%)	GS(%)	a <sub>w</sub>
34(-1)	44(-1)	120(-1)	21,1118	32,3727	11,2609	0,971
34(-1)	56(+1)	120(-1)	31,6949	41,3509	9,6560	0,965
34(-1)	44(-1)	210(+1)	25,1572	39,1398	13,9826	0,959
34(-1)	56(+1)	210(+1)	40,7464	52,0543	11,3079	0,943
46(+1)	44(-1)	120(-1)	18,1894	32,6556	14,4661	0,965
46(+1)	56(+1)	120(-1)	34,2436	45,7640	11,5204	0,959
46(+1)	44(-1)	210(+1)	19,6129	37,3972	17,7843	0,951
46(+1)	56(+1)	210(+1)	38,1404	52,8174	14,6771	0,939
40(0)	50(0)	165(0)	28,9679	41,1868	12,2189	0,958
40(0)	50(0)	165(0)	29,8380	41,8423	12,0043	0,959
40(0)	50(0)	165(0)	28,9371	41,2147	12,2776	0,958
30(-1,68)	50(0)	165(0)	29,5110	42,6178	10,2588	0,960
50(1,68)	50(0)	165(0)	27,9260	43,6582	14,4060	0,951
40(0)	40(-1,68)	165(0)	14,9450	30,0167	13,0049	0,966
40(0)	60(1,68)	165(0)	40,4920	50,2189	11,6599	0,947
40(0)	50(0)	90(-1,68)	26,8460	35,4647	10,5514	0,972
40(0)	50(0)	240(1,68)	30,5910	46,7709	15,1134	0,944

\* Atividade de água para algumas soluções de sacarose a 40°C: 0,955 (40% p/p); 0,937 (50% p/p); 0,897 (60% p/p).

Tabela 5.3 – Valores experimentais das variáveis dependentes para a desidratação osmótica de mamão Formosa em soluções de xarope de milho.

Tratamento			Respostas			
T(°C)	C*(%p/p)	t(min.)	PP(%)	PA(%)	GS(%)	a <sub>w</sub>
34(-1)	44(-1)	120(-1)	14,7350	18,6958	3,9608	0,982
34(-1)	56(+1)	120(-1)	22,3107	28,1983	5,8876	0,979
34(-1)	44(-1)	210(+1)	21,5960	28,2997	6,7037	0,978
34(-1)	56(+1)	210(+1)	32,3181	39,5627	7,2446	0,974
46(+1)	44(-1)	120(-1)	10,5884	16,0981	5,5097	0,985
46(+1)	56(+1)	120(-1)	18,0818	22,7525	4,6707	0,985
46(+1)	44(-1)	210(+1)	14,4351	20,8695	6,4344	0,982
46(+1)	56(+1)	210(+1)	22,9628	30,2412	7,2784	0,979
40(0)	50(0)	165(0)	19,3164	24,7903	5,4739	0,980
40(0)	50(0)	165(0)	19,2498	24,6899	5,4400	0,980
40(0)	50(0)	165(0)	19,2689	24,7451	5,4762	0,981
30(-1,68)	50(0)	165(0)	14,2995	20,1453	5,8255	0,984
50(1,68)	50(0)	165(0)	24,7665	30,5717	5,8255	0,977
40(0)	40(-1,68)	165(0)	12,3174	17,6232	5,3056	0,983
40(0)	60(1,68)	165(0)	26,7486	33,0938	6,3454	0,978
40(0)	50(0)	90(-1,68)	14,1514	18,3721	4,2209	0,984
40(0)	50(0)	240(1,68)	24,9146	32,3449	7,4301	0,977

\* Atividade de água para algumas soluções de xarope de milho a 40°C: 0,966 (40% p/p); 0,952 (50% p/p); 0,928 (60% p/p).

Tabela 5.4 – Composição média do xarope de milho.

Análise	Valor médio
Conteúdo máximo de umidade (%)	5,0
Dextrose equivalente	38 – 40
pH	4,5 – 5,5
Dextrose (% em base seca)	15,0
Maltose (% em base seca)	12,0
Outros açúcares (% em base seca)	73,0

FONTE: MOR-REX® 1940, Corn Products Brazil.

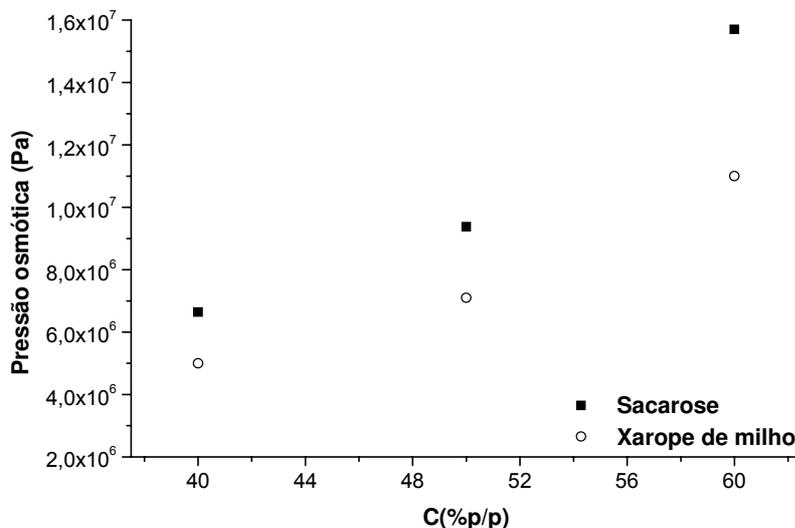


Figura 5.1 – Curva de pressão osmótica das soluções de sacarose e xarope de milho utilizadas na desidratação osmótica de mamão.

Para, de fato, compararmos a influência do agente osmótico sobre as respostas do planejamento experimental, é conveniente que tal estudo seja realizado considerando uma mesma pressão osmótica, para ambos os agentes osmóticos. Sendo assim, com base nos dados experimentais utilizados na Figura 5.1, é possível estabelecer uma relação empírica entre a concentração osmótica da sacarose e do xarope de milho para que ambos os solutos produzam uma mesma pressão osmótica quando em solução. A Figura 5.2 mostra o ajuste de potência, em função da concentração, para ambos os agentes osmóticos.

Desta forma, de acordo com os modelos de potência obtidos para ambos os agentes, para que estes produzam uma mesma pressão osmótica, é necessário obedecer a seguinte relação entre suas concentrações (Equação 5.2):

$$C_{\text{Sacarose}} = 1,27 C_{\text{Xarope de milho}}^{0,90} \quad (5.2)$$

A Tabela 5.5 mostra os valores de concentração das soluções de sacarose, obtidos pela Equação 5.2, correspondentes a toda faixa de concentração das soluções de xarope de milho utilizada no presente trabalho.

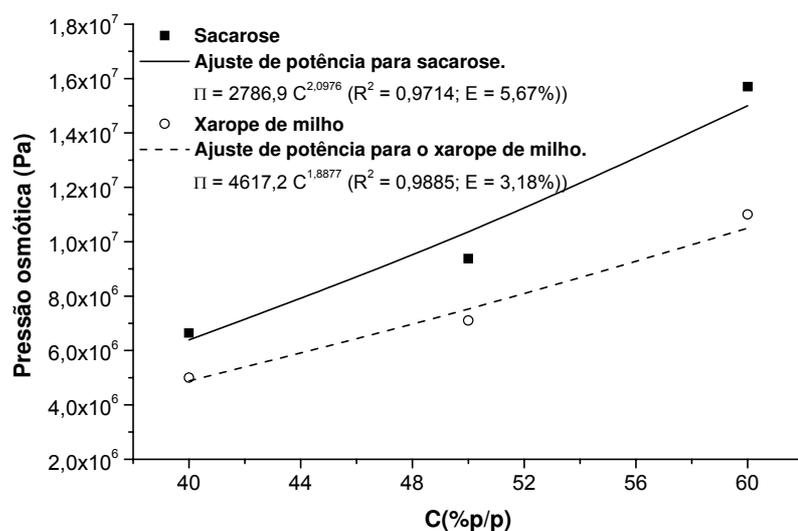


Figura 5.2 – Ajuste matemático para os dados de pressão osmótica das soluções de sacarose e xarope de milho utilizadas na desidratação osmótica de mamão.

Tabela 5.5 – Relação entre as concentrações de sacarose e xarope de milho para obtenção de uma mesma pressão osmótica.

Xarope de milho (% p/p)	Sacarose (% p/p)
40	35
50	43
60	51

Como pode ser observado na Tabela 5.5, para conseguirmos uma pressão osmótica de xarope de milho igual à pressão osmótica de sacarose necessitamos de uma concentração inferior do último agente mencionado. Portanto, a relação ilustrada na Tabela 5.5 será levada em consideração a fim de se interpretar os resultados do planejamento experimental de forma coerente com respeito à influência de cada agente osmótico sobre as respostas em estudo.

### **5.2.1 – Ajuste dos modelos estatísticos e influência das variáveis de processo sobre as respostas em estudo**

O planejamento experimental foi realizado a fim de avaliar a influência das variáveis de processo (temperatura e concentração da solução osmótica e tempo de imersão) sobre a perda de peso, perda de água, ganho de sólidos e atividade de água das amostras de mamão desidratadas em soluções de sacarose e xarope de milho.

A intenção é que se obtenha uma máxima perda de água com uma mínima incorporação de sólidos. Fazendo-se um balanço de massa no material a ser desidratado e, considerando que o fluxo de saída de solutos do próprio material seja desprezível em relação aos fluxos de saída de água e de ganho de sólidos, é possível concluir que, para o objetivo ser alcançado, faz-se necessária a maximização da perda de peso. Um outro objetivo do planejamento consiste em se obter um abaixamento considerável da atividade de água do produto processado.

Portanto, será feita uma análise individual de cada resposta do planejamento, para ambos os agentes osmóticos, a fim de que se possa avaliar a eficiência de tais agentes quando utilizados sob as mesmas condições de processamento, levando-se em consideração a relação estabelecida entre as concentrações dos agentes osmóticos para obtenção de uma mesma pressão osmótica.

#### **5.2.1.1 – Perda de peso**

Os resultados obtidos para a análise estatística aplicada aos dados experimentais de perda de peso na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho se encontram na Tabela 5.6. Os efeitos foram todos estimados a um nível de significância de 5% ( $p \leq 0,05$ ), ou seja, admitindo um intervalo de confiança de 95%, tanto pelo *MS Erro puro* quanto pelo *MS Residual*.

Tabela 5.6 – Magnitude dos efeitos avaliada através do MS Erro puro e do MS Residual para a perda de peso durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e de xarope de milho.

<b>Sacarose</b>					
<b>Variável</b>	<b>Efeito</b>	<b>MS Erro puro</b>	<b>p</b>	<b>MS Residual</b>	<b>p</b>
Média	29,2297	0,2947	0,0001	0,5937	0,0000
(1)T (L)	-1,6384	0,2768	0,0274	0,5576	0,0218
T (Q)	-0,2503	0,3046	0,4976 (ns)	0,6136	0,6955 (ns)
(2)C (L)	15,1884	0,2768	0,0003	0,5576	0,0000
C (Q)	-0,9572	0,3046	0,0881 (ns)	0,6136	0,1627 (ns)
(3)t (L)	3,6191	0,2768	0,0058	0,5576	0,0003
t (Q)	-0,2503	0,3046	0,4976 (ns)	0,6136	0,6955 (ns)
1L e 2L	2,1023	0,3617	0,0283	0,7286	0,0235
1L e 3L	-1,9442	0,3617	0,0329	0,7286	0,0321
2L e 3L	1,8699	0,3617	0,0354	0,7286	0,0372
<b>Xarope de milho</b>					
<b>Variável</b>	<b>Efeito</b>	<b>MS Erro puro</b>	<b>p</b>	<b>MS Residual</b>	<b>p</b>
Média	19,2732	0,0198	0,0000	0,1659	0,0000
(1)T (L)	6,2230	0,0186	0,0000	0,1558	0,0000
T (Q)	0,2156	0,0204	0,0089	0,1715	0,2491 (ns)
(2)C (L)	8,5798	0,0186	0,0000	0,1558	0,0000
C (Q)	0,2156	0,0204	0,0089	0,1715	0,2491 (ns)
(3)t (L)	6,3990	0,0186	0,0000	0,1558	0,0000
t (Q)	0,2156	0,0204	0,0089	0,1715	0,2491 (ns)
1L e 2L	0,5692	0,0242	0,0018	0,2036	0,0267
1L e 3L	2,0352	0,0242	0,0001	0,2036	0,0000
2L e 3L	1,0452	0,0242	0,0005	0,2036	0,0013

ns: não significativo.

O efeito estimado de uma variável indica o quanto esta exerce de influência sobre a resposta. Desta forma, quanto maior for o seu valor, maior será a sua influência sobre a resposta. Um efeito positivo sobre a resposta indica que, ao passar de um valor mínimo a um valor máximo da variável, o valor da resposta aumenta. Já um efeito negativo indica o contrário, ou seja, ao passar de um valor mínimo a um valor máximo da variável, o valor da resposta diminui.

De acordo com a Tabela 5.6, observa-se que, para a sacarose, somente os efeitos quadráticos das variáveis não foram significativos a 5% de significância. Tal fato sugere um comportamento linear da perda de peso em relação às variáveis em questão, na faixa estudada destas variáveis. Os efeitos de interação foram significativos e praticamente de mesma magnitude que o efeito da temperatura. A interação entre a temperatura e o tempo de imersão foi negativa, ao contrário das outras interações. O efeito da concentração foi o que mais influenciou na perda de peso sendo, aproximadamente, quatro vezes maior que o efeito do tempo de imersão e oito vezes maior que o efeito da temperatura. Os efeitos de concentração e tempo de imersão foram positivos.

Destaca-se o efeito negativo da temperatura indicando que um aumento em seus níveis levou a uma redução na perda de peso das amostras processadas em sacarose. De acordo com Islam e Flink (1982) e Ponting e colaboradores (1966), a taxa de transferência de massa aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura, porém existe o inconveniente do amolecimento e eventual ruptura da parede vegetal, sendo a temperatura máxima de um processo uma particularidade de cada produto. Neste caso, o material submetido a uma temperatura relativamente alta de processo, tende a ganhar mais sólidos. Como a perda de peso é praticamente uma relação direta entre a perda de água e o ganho de sólidos, provavelmente, o efeito da temperatura deve ter sido importante sobre o ganho de sólidos, provocando este comportamento.

Ainda pela Tabela 5.6, percebe-se que, para o xarope de milho, fazendo-se a “interseção” entre a análise feita pelo MS Erro puro e pelo MS Residual, apenas os efeitos lineares e de interação das variáveis foram significativos a 5% de significância. Da mesma forma que para a sacarose, um comportamento linear da perda de peso em relação às variáveis em questão foi observado. Todos os efeitos foram positivos. Mais uma vez, o efeito da concentração foi o que mais influenciou na perda de peso seguido pelo efeito do tempo de imersão e da temperatura. A magnitude dos efeitos principais das variáveis foi praticamente a mesma.

Analisando o nível de significância dos efeitos foi possível eliminar aqueles que não foram significativos. Após este procedimento, foi verificada, através de uma Análise de Variância (ANOVA), a significância da regressão e da falta de ajuste a um nível de confiança de 95%, utilizando o teste F para o planejamento estudado, conforme a Tabela 5.7. Este procedimento será repetido para todas as demais respostas em estudo.

Tabela 5.7 – Análise de Variância (ANOVA) para a perda de peso durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

<b>Sacarose</b>					
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>Calculado</sub></b>	<b>F<sub>Tabelado</sub></b>
Regressão	6	864,9808	144,1635	143,8779	3,22
Resíduo	10	10,0198	1,0020	-	-
Falta de ajuste	8	9,4966	1,1871	4,5376	19,37
Erro puro	2	0,5232	0,2616	-	-
Total	16	875,0007	-	$R^2 = 0,9886$	
<b>Xarope de milho</b>					
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>Calculado</sub></b>	<b>F<sub>Tabelado</sub></b>
Regressão	6	534,5170	89,0862	1076,66	3,22
Resíduo	10	0,8274	0,0827	-	-
Falta de ajuste	8	0,8251	0,1031	87,6919	19,37
Erro puro	2	0,0024	0,0012	-	-
Total	16	535,3444	-	$R^2 = 0,9985$	

Pela Tabela 5.7, observa-se que os modelos apresentaram regressão significativa com o valor de  $F_{\text{Calculado}}$  sendo maior que o  $F_{\text{Tabelado}}$ . Somente para a sacarose a falta de ajuste não foi significativa. Tal situação pode ocorrer, principalmente, quando o erro puro é muito inferior à falta de ajuste, como pode ser observado.

Segundo Barros Neto, Scarmínio e Bruns (2003), uma regressão, embora significativa do ponto de vista do teste F, pode não ser útil para realizar previsões, por cobrir uma faixa de variação pequena dos fatores estudados. Box e Wetz (1993)

sugeriram que para uma regressão ser significativa e também útil para fins preditivos, o valor de  $F_{\text{Calculado}}$  para a regressão deva ser, no mínimo de quatro a cinco vezes maior que o valor de  $F_{\text{Tabelado}}$ . Esta condição é amplamente satisfeita neste estudo.

Conforme a Tabela 5.7, os coeficientes de correlação  $R^2$  obtidos para os modelos ajustados foram superiores a 0,98, ou seja, a percentagem da variação explicada pelo modelo foi maior que 98%. A Figura 5.3 ilustra o excelente ajuste obtido para os modelos de perda de peso para a desidratação osmótica em soluções de sacarose e xarope de milho.

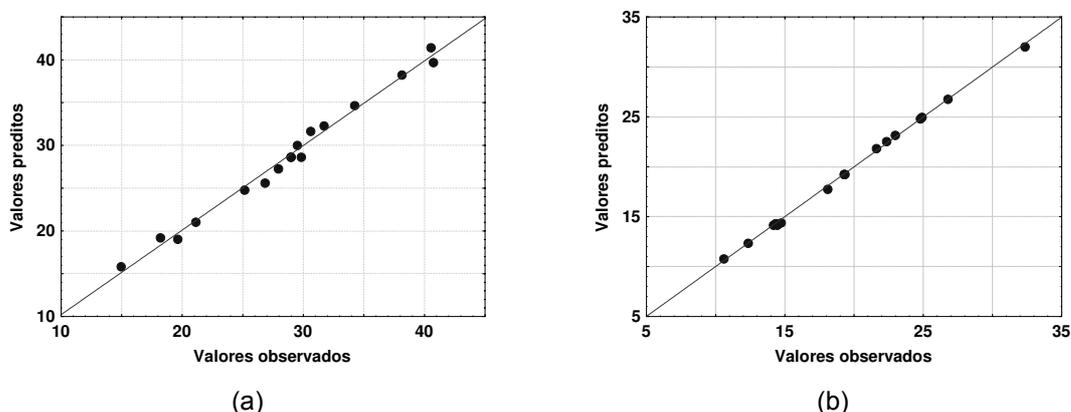


Figura 5.3 – Distribuição de resíduos para a perda de peso durante a desidratação osmótica de mamão em (a) soluções de sacarose e (b) xarope de milho.

A Tabela 5.8 mostra os coeficientes codificados de regressão polinomial de segunda ordem dos modelos estatísticos obtidos para a perda de peso na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Tabela 5.8 – Coeficientes do modelo estatístico para a perda de peso durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Coeficientes	Sacarose	Xarope de milho
$\beta_0$	28,6441	19,5330
$\beta_1$	-0,8192	3,1115
$\beta_{11}$	ns	ns
$\beta_2$	7,5942	4,2899
$\beta_{22}$	ns	ns
$\beta_3$	1,8095	3,1995
$\beta_{33}$	ns	ns
$\beta_{12}$	1,0512	0,2846
$\beta_{13}$	-0,9721	1,0176
$\beta_{23}$	0,9349	0,5226

ns: não significativo.

As superfícies de resposta e as curvas de nível geradas pelos modelos de perda de peso para cada agente osmótico se encontram representadas nas Figuras 5.4 (sacarose) e 5.5 (xarope de milho). Tais Figuras expressam a interação entre duas variáveis independentes sobre a perda de peso. Neste caso, a terceira variável independente foi mantida no ponto central do planejamento. Tal procedimento foi também adotado para as demais respostas em estudo.

Pela Figura 5.4 (a), para a sacarose, observa-se um aumento considerável na perda de peso quando se eleva o valor da concentração acima de 56% p/p. Por outro lado, a temperatura exerceu praticamente nenhuma influência sobre a perda de peso. As Figuras 5.4 (b) e (c) mostram que somente acima de um tempo de imersão de 210 minutos, com uma temperatura de, no máximo, 40<sup>0</sup>C e uma concentração de, pelo menos, 56% p/p é que se obtêm níveis consideráveis de perda de peso.

Para o xarope de milho, as Figuras 5.5 (a), (b) e (c) mostram que os valores mínimos necessários das variáveis de processo sugeridos para se obter uma perda de peso compatível com a obtida para a sacarose são uma concentração de 60% p/p, 50<sup>0</sup>C de temperatura por um tempo de imersão de 240 minutos.

Considerando a mesma pressão osmótica das soluções de sacarose e de xarope de milho, apenas a título de comparação, para uma concentração de xarope de milho de 50% p/p (e a concentração correspondente de sacarose segundo a Tabela 5.5), uma temperatura de 40<sup>0</sup>C e um tempo de imersão de 165 minutos, as amostras de mamão desidratadas em soluções de sacarose apresentaram perda de peso, aproximadamente, 3% superior às amostras desidratadas em xarope de milho. O percentual mencionado para a perda de peso, assim como aqueles que serão obtidos para as demais respostas, foram calculados mediante os próprios modelos estatísticos.

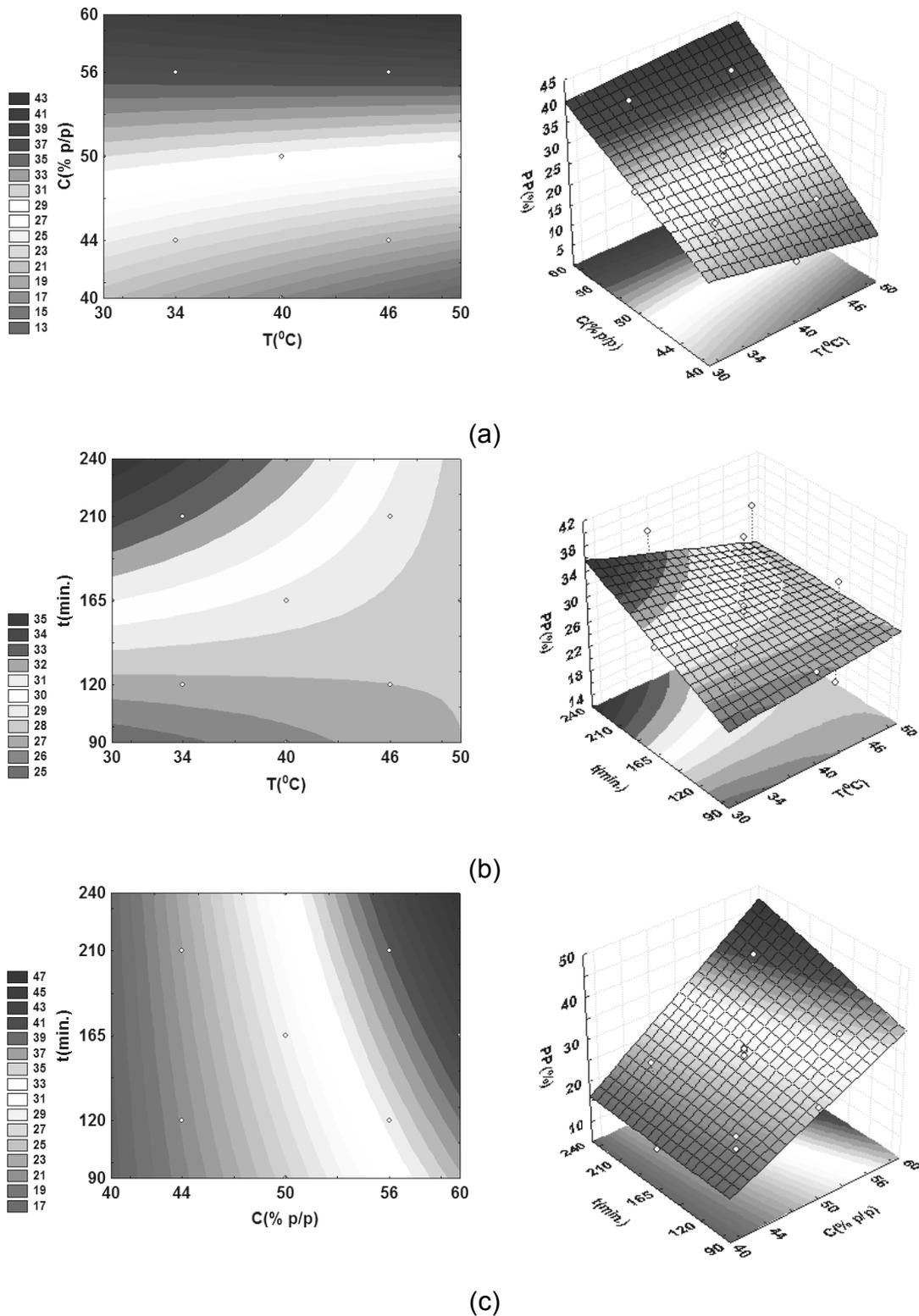


Figura 5.4 – Influência das variáveis independentes sobre a perda de peso durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose.

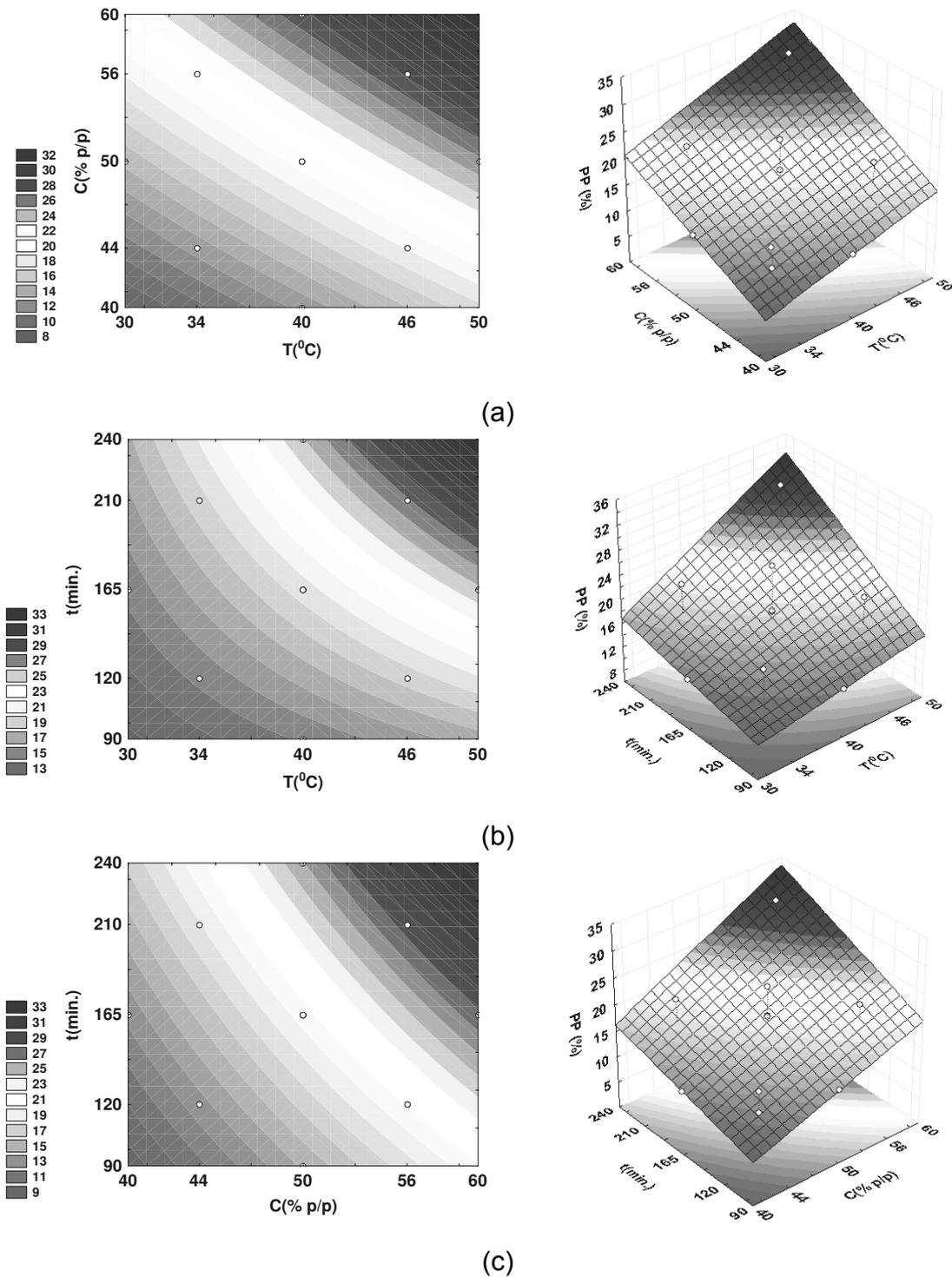


Figura 5.5 – Influência das variáveis independentes sobre a perda de peso durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de xarope de milho.

### 5.2.1.2 – Perda de água

A influência das variáveis independentes bem como da interação entre elas sobre perda de água na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho se encontram na Tabela 5.9. Os efeitos foram todos estimados a um nível de significância de 5% ( $p \leq 0,05$ ).

Tabela 5.9 – Magnitude dos efeitos avaliada através do MS Erro puro e do MS Residual para a perda de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e de xarope de milho.

<b>Sacarose</b>					
<b>Variável</b>	<b>Efeito</b>	<b>MS Erro puro</b>	<b>p</b>	<b>MS Residual</b>	<b>p</b>
Média	41,3996	0,2136	0,0000	0,2617	0,0000
(1)T (L)	0,8005	0,2006	0,0574 (ns)	0,2458	0,0139
T (Q)	1,3219	0,2208	0,0268	0,2705	0,0018
(2)C (L)	12,3590	0,2006	0,0003	0,2458	0,0000
C (Q)	-0,8131	0,2208	0,0664 (ns)	0,2705	0,0198
(3)t (L)	7,0701	0,2006	0,0008	0,2458	0,0000
t (Q)	-0,1062	0,2208	0,6780 (ns)	0,2705	0,7063 (ns)
1L e 2L	1,6590	0,2621	0,0241	0,3212	0,0013
1L e 3L	-1,4189	0,2621	0,0325	0,3212	0,0031
2L e 3L	1,5620	0,2621	0,0270	0,3212	0,0018
<b>Xarope de milho</b>					
<b>Variável</b>	<b>Efeito</b>	<b>MS Erro puro</b>	<b>p</b>	<b>MS Residual</b>	<b>p</b>
Média	24,7293	0,0290	0,0000	0,1066	0,0000
(1)T (L)	6,1988	0,0272	0,0000	0,1001	0,0000
T (Q)	0,5221	0,0299	0,0033	0,1102	0,0021
(2)C (L)	9,1979	0,0272	0,0000	0,1001	0,0000
C (Q)	0,5221	0,0299	0,0033	0,1102	0,0021
(3)t (L)	8,3071	0,0272	0,0000	0,1001	0,0000
t (Q)	0,5221	0,0299	0,0033	0,1102	0,0021
1L e 2L	1,1848	0,0356	0,0009	0,1308	0,0000
1L e 3L	2,1771	0,0356	0,0003	0,1308	0,0000
2L e 3L	1,1194	0,0356	0,0010	0,1308	0,0001

ns: não significativo.

Pela Tabela 5.9, fazendo-se a mesma análise realizada para a perda de peso com relação ao MS Erro puro e MS Residual, nota-se que, para a sacarose, dos efeitos quadráticos, somente o da temperatura foi significativo. Tal efeito foi positivo indicando que a concavidade da superfície de resposta é voltada para cima. Os efeitos lineares da concentração e tempo de imersão, assim como os de interação foram todos significativos e positivos, com exceção do efeito de interação entre temperatura e tempo de imersão, que foi negativo. O efeito da concentração foi o que mais influenciou na perda de água, sendo, aproximadamente, duas vezes maior que o efeito do tempo de imersão e doze vezes maior que o efeito da temperatura.

A Tabela 5.9 mostra também que, para o xarope de milho, todos os efeitos das variáveis foram significativos a 5% de significância, embora os efeitos quadráticos tenham sido bem inferiores aos lineares, assim como para a perda de peso. De maneira semelhante à sacarose, um comportamento linear da perda de água em relação às variáveis em questão foi observado. Todos os efeitos foram positivos, sendo o efeito da concentração o mais importante na perda de água seguido pelo efeito do tempo de imersão e da temperatura. Igualmente à perda de peso, para o mesmo agente osmótico, a magnitude dos efeitos principais das variáveis foi praticamente a mesma.

De acordo com a Análise de Variância mostrada na Tabela 5.10, os coeficientes de correlação  $R^2$  obtidos para os modelos ajustados foram superiores a 0,99 indicando um ótimo ajuste aos dados experimentais. A Figura 5.6 mostra mais claramente o excelente ajuste obtido para os modelos de perda de água para a desidratação osmótica em soluções de sacarose e xarope de milho. Percebe-se também que os modelos apresentaram regressão significativa e falta de ajuste não significativa a 5% de significância.

Tabela 5.10 – Análise de Variância (ANOVA) para a perda de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

<b>Sacarose</b>					
Fonte	GL	SQ	MQ	$F_{\text{Calculado}}$	$F_{\text{Tabelado}}$
Regressão	6	714,2963	119,0494	214,4440	3,22
Resíduo	10	5,5515	0,5552	-	-
Falta de ajuste	8	5,2768	0,6596	4,8009	19,37
Erro puro	2	0,2748	0,1374	-	-
Total	16	719,8479	-	$R^2 = 0,9923$	

<b>Xarope de milho</b>					
Fonte	GL	SQ	MQ	$F_{\text{Calculado}}$	$F_{\text{Tabelado}}$
Regressão	9	671,9551	74,6617	2182,5175	3,68
Resíduo	7	0,2395	0,0342	-	-
Falta de ajuste	5	0,2344	0,0469	18,5420	19,30
Erro puro	2	0,0051	0,0025	-	-
Total	16	672,1946	-	$R^2 = 0,9992$	

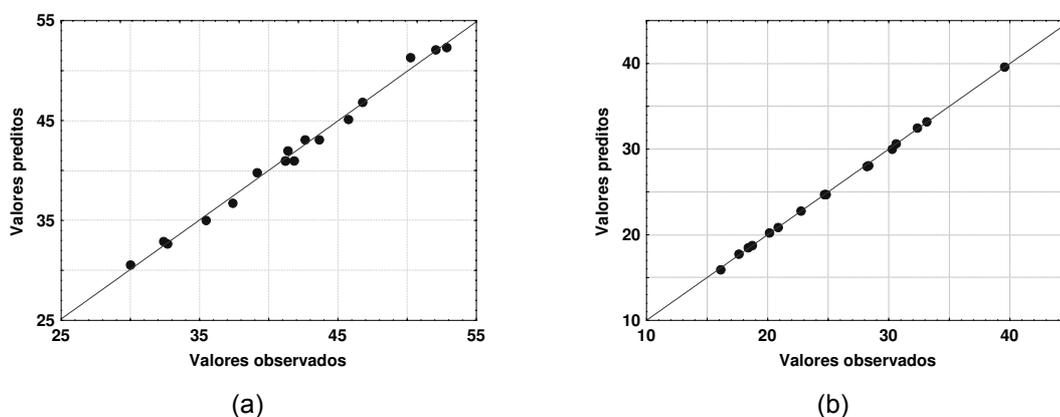


Figura 5.6 – Distribuição de resíduos para a perda de água durante a desidratação osmótica de mamão em (a) soluções de sacarose e (b) xarope de milho.

A Tabela 5.11 mostra os coeficientes codificados dos modelos estatísticos obtidos para a perda de água na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Tabela 5.11 – Coeficientes do modelo estatístico para a perda de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

<b>Coeficientes</b>	<b>Sacarose</b>	<b>Xarope de milho</b>
$\beta_0$	40,9461	24,72931
$\beta_1$	ns	3,09940
$\beta_{11}$	0,7658	0,26103
$\beta_2$	6,1795	4,59893
$\beta_{22}$	ns	0,26103
$\beta_3$	3,5350	4,15357
$\beta_{33}$	ns	0,26103
$\beta_{12}$	0,8295	0,59242
$\beta_{13}$	-0,7094	1,08853
$\beta_{23}$	0,7810	0,55972

ns: não significativo.

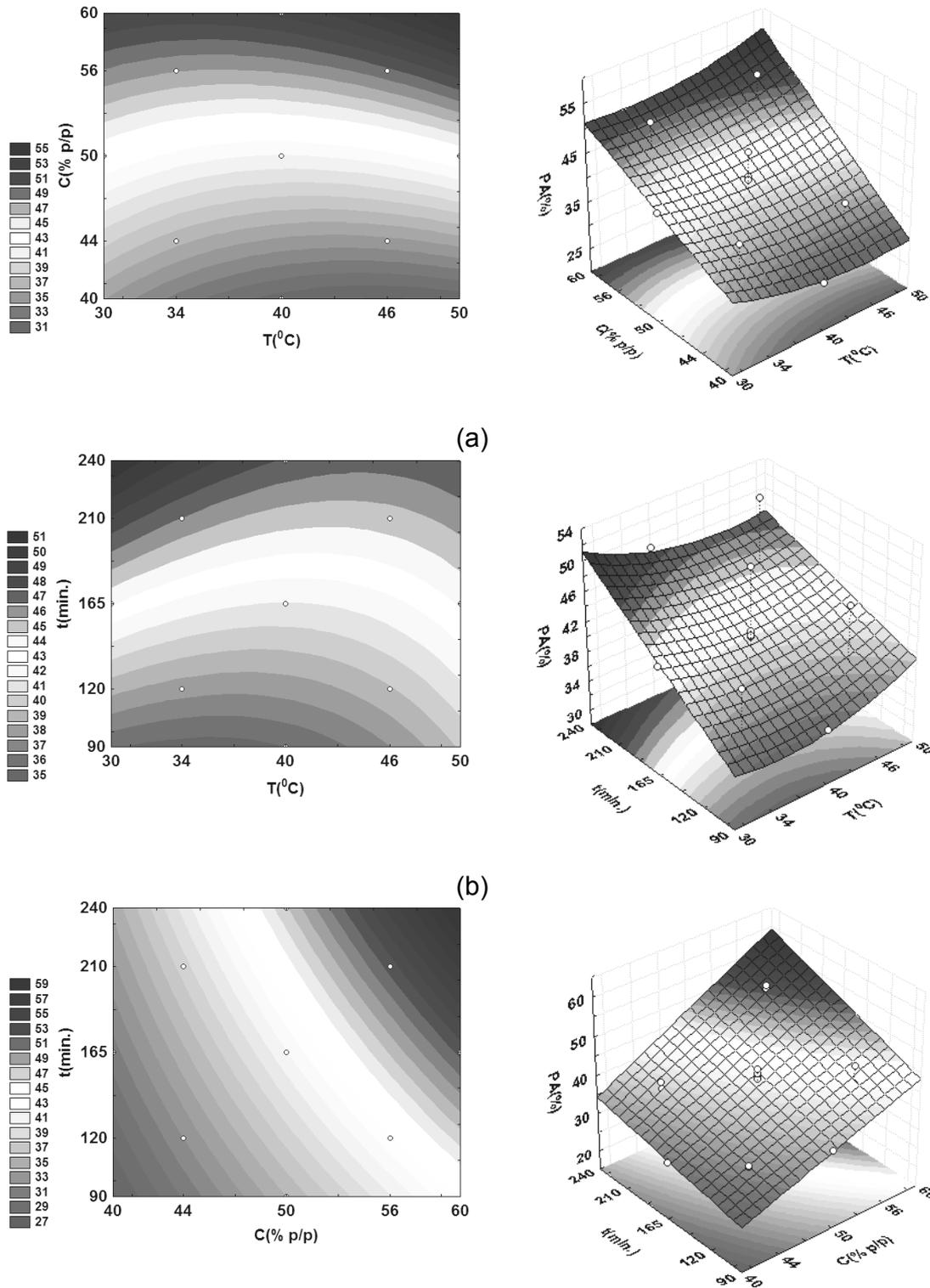
As Figuras 5.7 (sacarose) e 5.8 (xarope de milho) ilustram as superfícies de resposta e as curvas de nível geradas pelos modelos de perda de água, para cada agente osmótico avaliado.

Para a sacarose, observa-se a pequena influência da temperatura sobre a perda de água (Figuras 5.7 (a) e (b)). Entretanto, a concentração e o tempo de imersão exerceram uma influência marcante sobre a perda de água mostrando que altos níveis desta resposta são alcançados quando são utilizadas concentrações acima de 56% p/p por um tempo de imersão de, pelo menos, 165 minutos (Figuras 5.7 (b) e (c)).

Para o xarope de milho, as Figuras 5.8 (a), (b) e (c) nos permitem chegar aos mesmos níveis das variáveis obtidos para a perda de peso.

Comparando os agentes osmóticos para uma mesma pressão osmótica inicial, utilizando os mesmos níveis mencionados para a perda de peso, observa-se que as amostras desidratadas em sacarose apresentaram valores de perda de água cerca de 27% superiores aos encontrados para àquelas processadas em xarope de milho.

Ao tentar igualar a pressão osmótica das soluções de xarope de milho com as de sacarose, é necessário aumentar a concentração de xarope de milho o que gera um aumento na viscosidade destas soluções, fazendo com que o coeficiente de difusão de água através das amostras diminua. Ainda existe o agravante de que o xarope de milho é composto de uma concentração relativamente alta de polissacarídeos, como visto anteriormente (Tabela 5.4). Portanto, todos estes fatores, certamente, contribuíram para o comportamento aqui encontrado.



(c)

Figura 5.7 – Influência das variáveis independentes sobre a perda de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose.

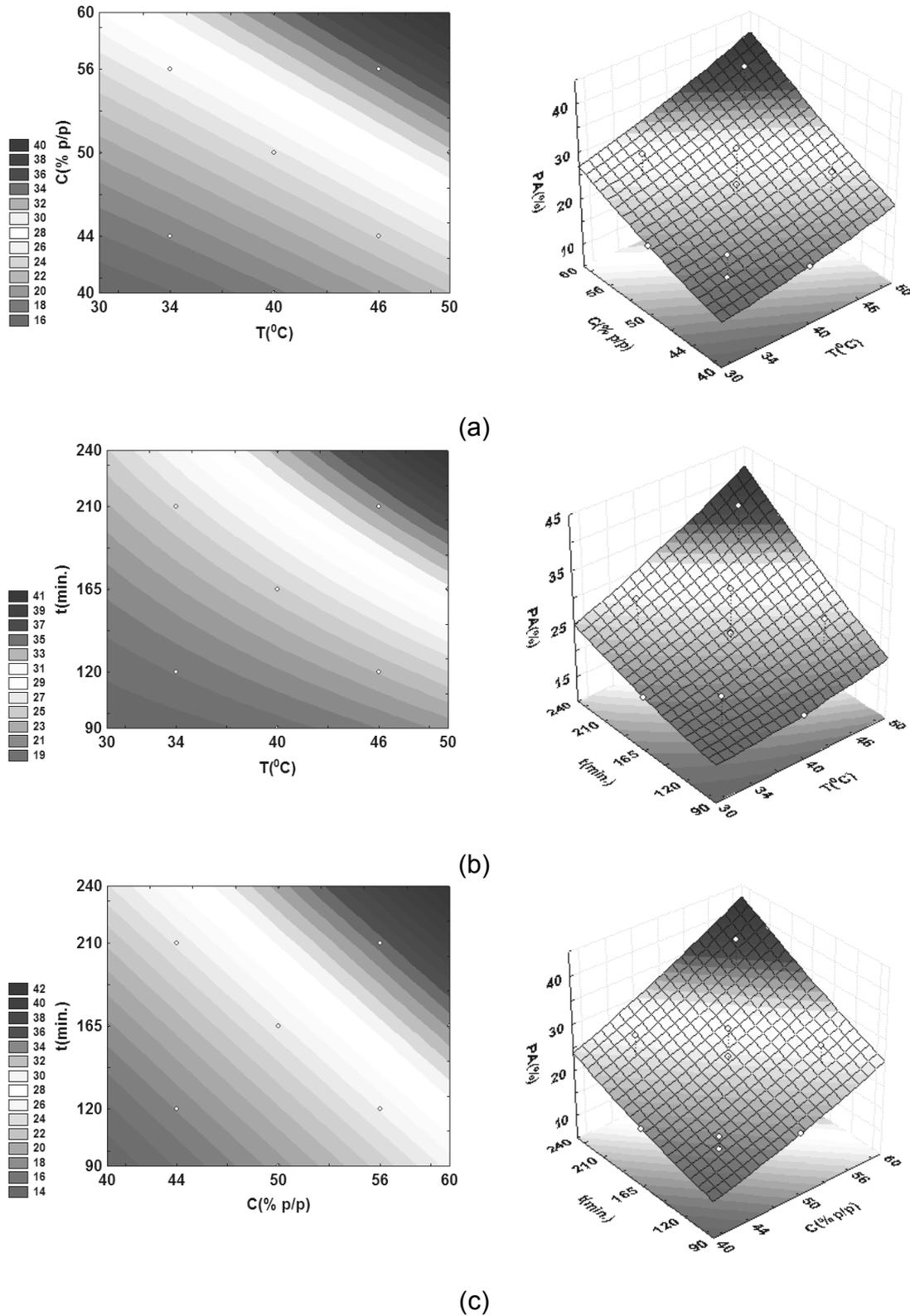


Figura 5.8 – Influência das variáveis independentes sobre a perda de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de xarope de milho.

**5.2.1.3 – Ganho de sólidos**

Os efeitos dos fatores sobre o ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho se encontram explicitados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Magnitude dos efeitos avaliada através do MS Erro puro e do MS Residual para o ganho de sólidos durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e de xarope de milho.

<b>Sacarose</b>					
<b>Variável</b>	<b>Efeito</b>	<b>MS Erro puro</b>	<b>p</b>	<b>MS Residual</b>	<b>p</b>
Média	12,1308	0,0829	0,0000	0,4401	0,0000
(1)T (L)	2,8138	0,0779	0,0008	0,4133	0,0003
T (Q)	0,3667	0,0857	0,0505 (ns)	0,4548	0,4466 (ns)
(2)C (L)	-1,8443	0,0779	0,0018	0,4133	0,0029
C (Q)	0,3667	0,0857	0,0505 (ns)	0,4548	0,4466 (ns)
(3)t (L)	2,7122	0,0779	0,0008	0,4133	0,0003
t (Q)	0,7202	0,0857	0,0139	0,4548	0,1574 (ns)
1L e 2L	-0,4433	0,1017	0,0488	0,5400	0,4387 (ns)
1L e 3L	0,5253	0,1017	0,0355	0,5400	0,3631 (ns)
2L e 3L	-0,3078	0,1017	0,0941 (ns)	0,5400	0,5865 (ns)
<b>Xarope de milho</b>					
<b>Variável</b>	<b>Efeito</b>	<b>MS Erro puro</b>	<b>p</b>	<b>MS Residual</b>	<b>p</b>
Média	5,4561	0,0117	0,0000	0,2406	0,0000
(1)T (L)	0,0141	0,0110	0,3266 (ns)	0,2259	0,9519 (ns)
T (Q)	0,3065	0,0121	0,0015	0,2486	0,2574 (ns)
(2)C (L)	0,6182	0,0110	0,0003	0,2259	0,0291
C (Q)	0,3065	0,0121	0,0015	0,2486	0,2574 (ns)
(3)t (L)	1,9080	0,0110	0,0000	0,2259	0,0001
t (Q)	0,3065	0,0121	0,0015	0,2486	0,2574 (ns)
1L e 2L	-0,6157	0,0143	0,0005	0,2952	0,0754 (ns)
1L e 3L	-0,1419	0,0143	0,0101	0,2952	0,6454 (ns)
2L e 3L	0,0743	0,0143	0,0353	0,2952	0,8086 (ns)

ns: não significativo.

Com relação à sacarose, os efeitos quadráticos juntamente com os efeitos de interação não foram significativos. Os efeitos principais tiveram, praticamente, a mesma ordem de grandeza, sendo a temperatura o fator mais importante seguido do tempo de imersão e da concentração. Os efeitos principais foram positivos, com exceção da concentração.

Em relação ao efeito negativo da concentração, de acordo com Heng, Guilbert e Cuq (1990), trabalhando com desidratação osmótica de mamão, um pequeno ganho de sólidos pode ser obtido quando o fluxo de saída de água é rápido e bem mais pronunciado do que o fluxo de entrada de sólidos. Tal fato acontece quando se utiliza temperaturas ou concentrações mais altas, com alguma agitação. O aumento da perda de água, sem modificação no ganho de sólidos, quando a temperatura ou a concentração da solução de desidratação é aumentada, foi observado por vários autores (BONGIRWAR; SREENIVASAN, 1977; HAWKES; FLINK, 1978; ISLAM; FLINK, 1982). Este efeito é, geralmente, atribuído à influência das membranas do tecido vegetal assim como também das propriedades de difusão de água e solutos como uma função de suas respectivas massas molares.

A Tabela 5.12 mostra ainda que, para o xarope de milho, apenas os efeitos principais da concentração e do tempo de imersão foram significativos. Os efeitos principais foram positivos. O efeito do tempo de imersão foi o mais influente sobre o ganho de sólidos.

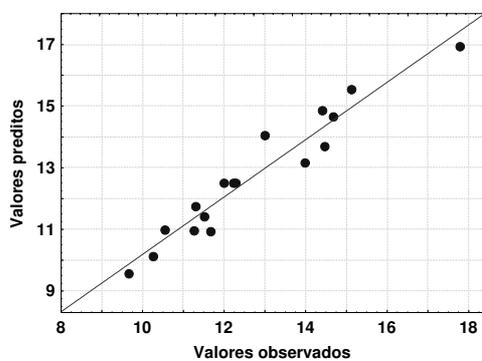
De acordo com a Tabela 5.13, os coeficientes de correlação  $R^2$  obtidos para os modelos ajustados foram superiores a 0,84 mostrando um ajuste razoável aos dados experimentais. A Figura 5.9 mostra mais claramente o ajuste obtido para os modelos de ganho de sólidos para a desidratação osmótica em soluções de sacarose e xarope de milho. É possível perceber que os valores residuais obtidos foram consideráveis, embora tal fato não tenha comprometido o nível de predição dos modelos, como pode ser observado pela comparação entre os valores da distribuição F calculados e tabelados. Tais modelos apresentaram regressão e falta de ajuste significativas.

Tabela 5.13 – Análise de Variância (ANOVA) para o ganho de sólidos durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

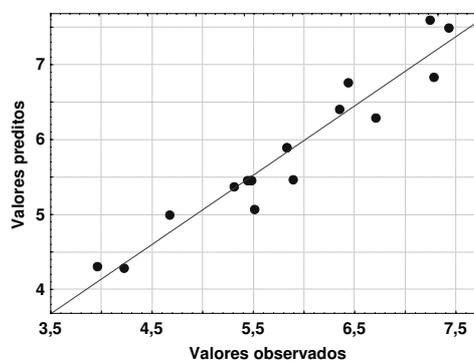
<b>Sacarose</b>					
Fonte	GL	SQ	MQ	F <sub>Calculado</sub>	F <sub>Tabelado</sub>
Regressão	3	63,7668	21,2556	40,6445	3,41
Resíduo	13	6,7985	0,5230	-	-
Falta de ajuste	11	6,7571	0,6143	29,6776	19,40
Erro puro	2	0,0414	0,0207	-	-
Total	16	70,5654	-	$R^2 = 0,9037$	

<b>Xarope de milho</b>					
Fonte	GL	SQ	MQ	F <sub>Calculado</sub>	F <sub>Tabelado</sub>
Regressão	2	13,7360	6,8680	38,01	3,74
Resíduo	14	2,5295	0,1807	-	-
Falta de ajuste	12	2,5287	0,2107	512,9239	19,41
Erro puro	2	0,0008	0,0004	-	-
Total	16	16,2655	-	$R^2 = 0,8445$	



(a)



(b)

Figura 5.9– Distribuição de resíduos para o ganho de sólidos durante a desidratação osmótica de mamão em (a) soluções de sacarose e (b) xarope de milho.

A Tabela 5.14 mostra os coeficientes codificados dos modelos estatísticos obtidos para o ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Tabela 5.14 – Coeficientes do modelo estatístico para o ganho de sólidos durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Coeficientes	Sacarose	Xarope de milho
$\beta_0$	12,7147	5,8255
$\beta_1$	1,4069	ns
$\beta_{11}$	ns	ns
$\beta_2$	-0,9221	0,3091
$\beta_{22}$	ns	ns
$\beta_3$	1,3561	0,9540
$\beta_{33}$	ns	ns
$\beta_{12}$	ns	ns
$\beta_{13}$	ns	ns
$\beta_{23}$	ns	ns

ns: não significativo.

As superfícies de resposta e as curvas de nível geradas pelos modelos de ganho de sólidos para cada agente osmótico avaliado são mostradas nas Figuras 5.10 (sacarose) e 5.11 (xarope de milho).

Pelas Figuras 5.10 (a), (b) e (c), para a sacarose, observa-se que uma pequena incorporação de sólidos é alcançada quando são utilizados a temperatura e tempo de imersão em seus níveis inferiores com uma concentração superior a 56% p/p.

Para o xarope de milho, analisando as Figuras 5.11 (a), (b) e (c) em conjunto, é possível concluir que baixos valores de ganho de sólidos são obtidos utilizando níveis de concentração e tempo de imersão inferiores ao ponto central das variáveis em questão, independentemente da temperatura de processo.

A incorporação de sólidos, assim como a perda de água, é dependente das características do material tais como a estrutura do tecido vegetal e membrana celular, os quais podem se modificar durante o processamento, ocasionando uma perda da integridade da estrutura do material, provocando alterações na permeabilidade e seletividade da membrana celular do tecido vegetal (RASTOGI *et al.*, 2002).

Sendo assim, é provável que o aumento da temperatura tenha provocado o rompimento da membrana celular do mamão ocasionando um aumento na incorporação de sólidos, principalmente, quando a sacarose foi utilizada como agente osmótico. Tal fato confirma o que foi discutido na seção 5.2.1.1 sobre o efeito negativo da temperatura na perda de peso, utilizando soluções de sacarose.

Analisando do ponto de vista de pressão osmótica, utilizando os mesmos níveis de comparação assumidos para as respostas discutidas anteriormente, pode-se concluir que os valores de ganho de sólidos obtidos para as amostras desidratadas em sacarose foram, aproximadamente, 60% superiores àqueles encontrados para as amostras desidratadas em xarope de milho. Isto mostra que a massa molar relativamente alta do xarope de milho e a conseqüente viscosidade das soluções contendo este agente foram fatores decisivos para os resultados encontrados neste trabalho em relação ao ganho de sólidos do mamão desidratado osmoticamente.

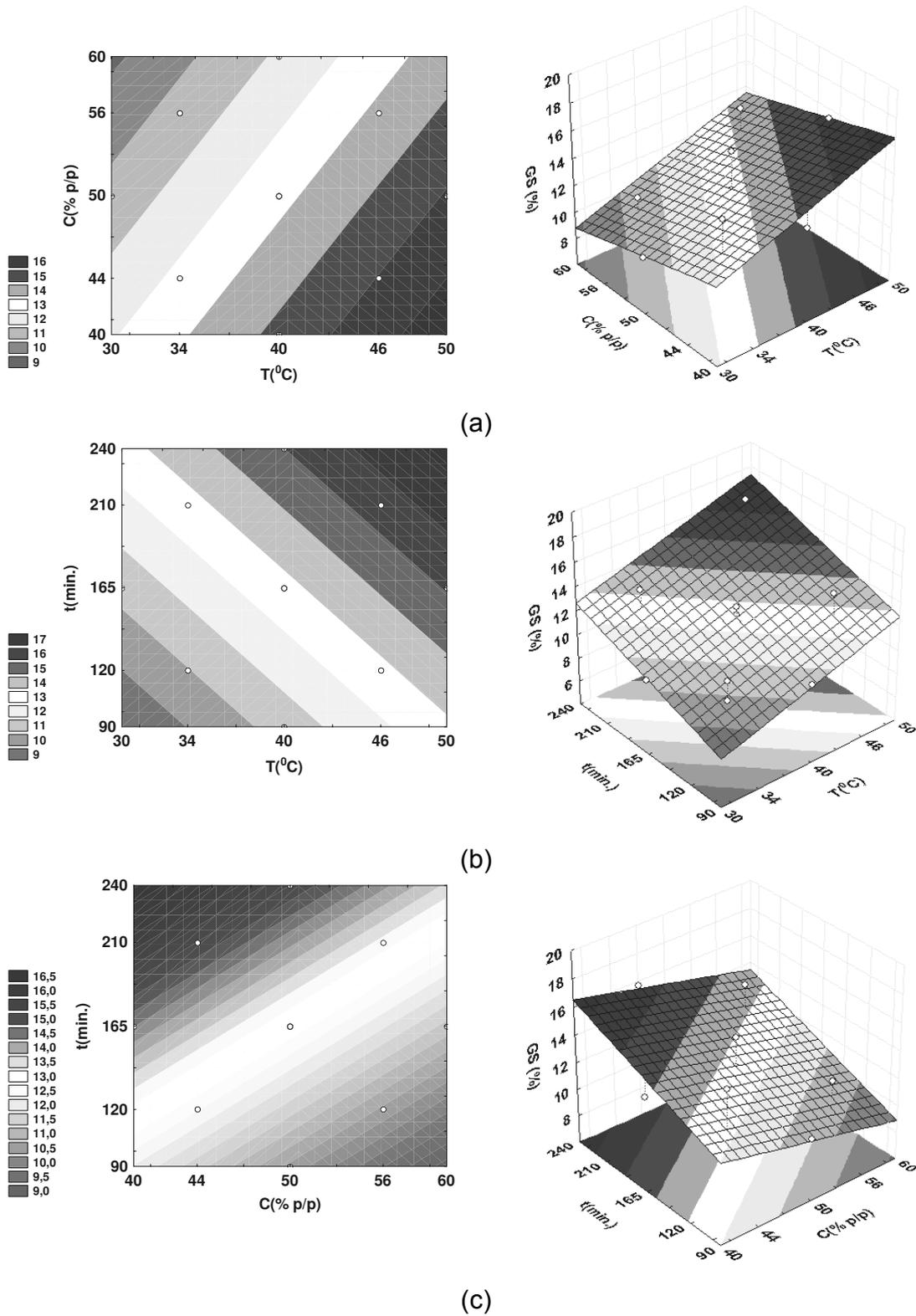


Figura 5.10 – Influência das variáveis independentes sobre o ganho de sólidos durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose.

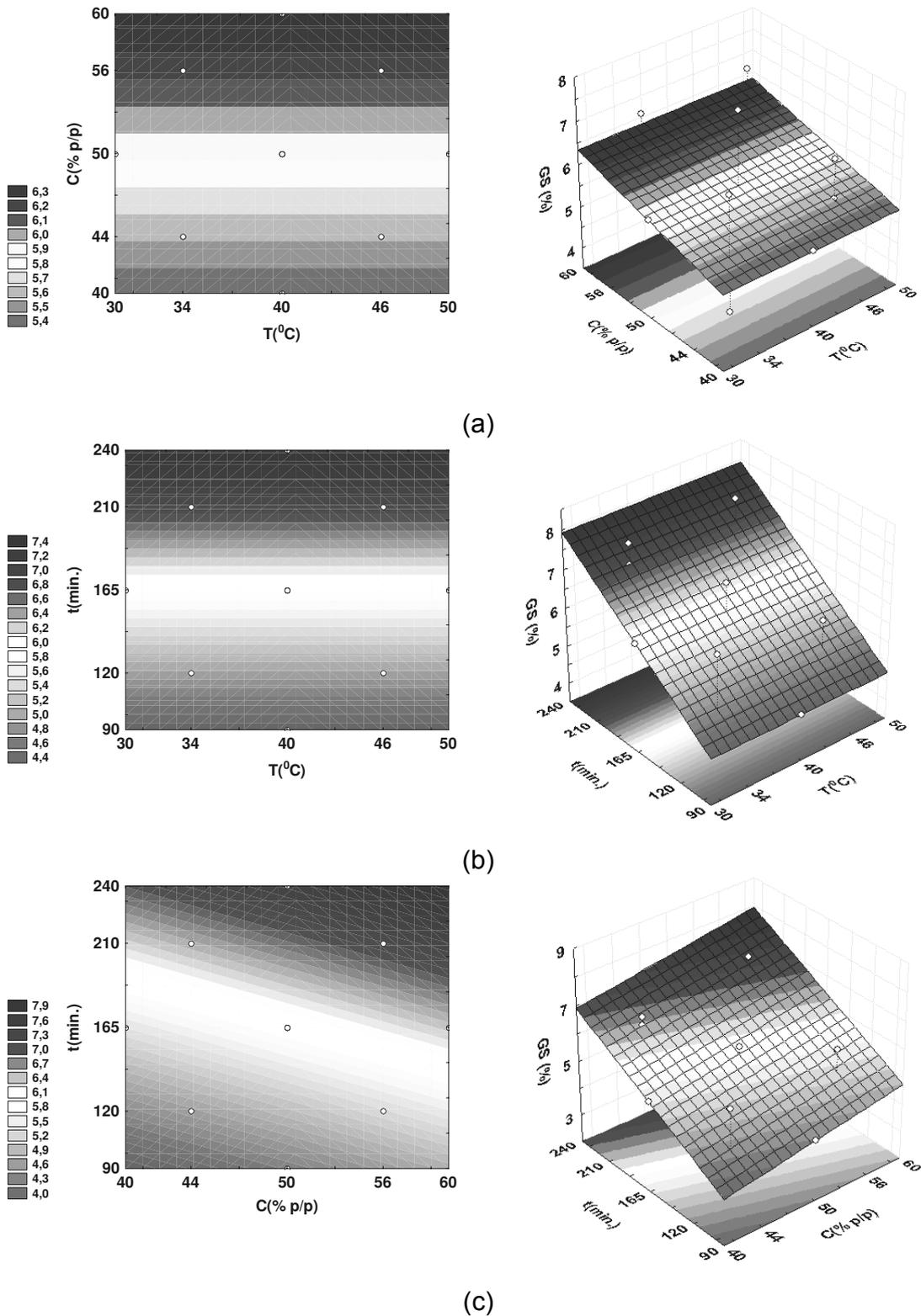


Figura 5.11 – Influência das variáveis independentes sobre o ganho de sólidos durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de xarope de milho.

### 5.2.1.4 – Atividade de água

A magnitude dos efeitos das variáveis de processo sobre a atividade de água na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho se encontra na Tabela 5.15, sendo tais efeitos estimados a um nível de significância de 5% ( $p \leq 0,05$ ).

Tabela 5.15 – Magnitude dos efeitos avaliada através do MS Erro puro e do MS Residual para a atividade de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e de xarope de milho.

<b>Sacarose</b>					
<b>Variável</b>	<b>Efeito</b>	<b>MS Erro puro</b>	<b>p</b>	<b>MS Residual</b>	<b>p</b>
Média	0,9583	3,33E-04	1,21E-07	4,63E-04	1,63E-21
(1)T (L)	-5,73E-03	3,12E-04	2,96E-03	4,35E-04	3,39E-06
T (Q)	-2,03E-03	3,44E-04	2,75E-02	4,79E-04	3,82E-03
(2)C (L)	-1,05E-02	3,12E-04	8,78E-04	4,35E-04	5,21E-08
C (Q)	-1,33E-03	3,44E-04	6,12E-02 (ns)	4,79E-04	2,78E-02
(3)t (L)	-1,69E-02	3,12E-04	3,44E-04	4,35E-04	1,99E-09
t (Q)	-2,65E-04	3,44E-04	5,22E-01 (ns)	4,79E-04	5,97E-01 (ns)
1L e 2L	1,00E-03	4,08E-04	1,34E-01 (ns)	5,69E-04	1,22E-01 (ns)
1L e 3L	0,00E+00	4,08E-04	1,00E+00 (ns)	5,69E-04	1,00E+00 (ns)
2L e 3L	-4,00E-03	4,08E-04	1,03E-02	5,69E-04	2,05E-04
<b>Xarope de milho</b>					
<b>Variável</b>	<b>Efeito</b>	<b>MS Erro puro</b>	<b>p</b>	<b>MS Residual</b>	<b>p</b>
Média	0,9803	3,33E-04	1,15E-07	2,77E-04	3,81E-23
(1)T (L)	-4,29E-03	3,12E-04	5,26E-03	2,60E-04	7,34E-07
T (Q)	8,97E-05	3,44E-04	8,19E-01 (ns)	2,86E-04	7,63E-01 (ns)
(2)C (L)	-2,71E-03	3,12E-04	1,31E-02	2,60E-04	1,65E-05
C (Q)	8,97E-05	3,44E-04	8,19E-01 (ns)	2,86E-04	7,63E-01 (ns)
(3)t (L)	-4,54E-03	3,12E-04	4,70E-03	2,60E-04	4,99E-07
t (Q)	8,97E-05	3,44E-04	8,19E-01 (ns)	2,86E-04	7,63E-01 (ns)
1L e 2L	-1,00E-03	4,08E-04	1,34E-01 (ns)	3,40E-04	2,17E-02
1L e 3L	0,00E+00	4,08E-04	1,00E+00 (ns)	3,40E-04	1,00E+00 (ns)
2L e 3L	-1,00E-03	4,08E-04	1,34E-01 (ns)	3,40E-04	2,17E-02

ns: não significativo.

De acordo com a Tabela 5.15, observa-se que, para a sacarose, apenas os efeitos quadráticos da concentração e tempo de imersão bem como os de interação entre a temperatura e a concentração e entre a temperatura e o tempo de imersão não foram significativos. Os demais efeitos foram significativos e negativos. O efeito da temperatura foi o que mais influenciou na atividade de água, sendo, aproximadamente, seis vezes maior que o efeito do tempo de imersão e da concentração.

Em relação ao xarope de milho, somente os efeitos principais das variáveis foram significativos a 5% de significância. Desta forma, um comportamento linear da atividade de água em relação às variáveis em questão foi observado. Todos os efeitos foram negativos. O efeito do tempo de imersão juntamente com o da temperatura foram os que mais influenciaram na atividade de água.

Pela Tabela 5.16, os coeficientes de correlação  $R^2$  obtidos para os modelos ajustados foram superiores a 0,96 mostrando um bom ajuste aos dados experimentais. A Figura 5.12 mostra mais claramente o ajuste obtido para os modelos de atividade de água para a desidratação osmótica em soluções de sacarose e xarope de milho, evidenciando os baixos valores residuais obtidos. Tais modelos apresentaram regressão significativa e falta de ajuste não significativa.

Tabela 5.16 – Análise de Variância (ANOVA) para a atividade de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Sacarose					
Fonte	GL	SQ	MQ	F <sub>Calculado</sub>	F <sub>Tabelado</sub>
Regressão	5	1,50E-03	3,00E-04	286,7221	3,20
Resíduo	11	1,15E-05	1,05E-06	-	-
Falta de ajuste	9	1,09E-05	1,21E-06	3,6200	19,38
Erro puro	2	6,67E-07	3,33E-07	-	-
Total	16	1,51E-03	-	R <sup>2</sup> = 0,9924	

Xarope de milho					
Fonte	GL	SQ	MQ	F <sub>Calculado</sub>	F <sub>Tabelado</sub>
Regressão	3	1,58E-04	5,28E-05	121,2223	3,41
Resíduo	13	5,66E-06	4,35E-07	-	-
Falta de ajuste	11	4,99E-06	4,54E-07	1,3622	19,41
Erro puro	2	6,67E-07	3,33E-07	-	-
Total	16	1,64E-04	-	R <sup>2</sup> = 0,9655	

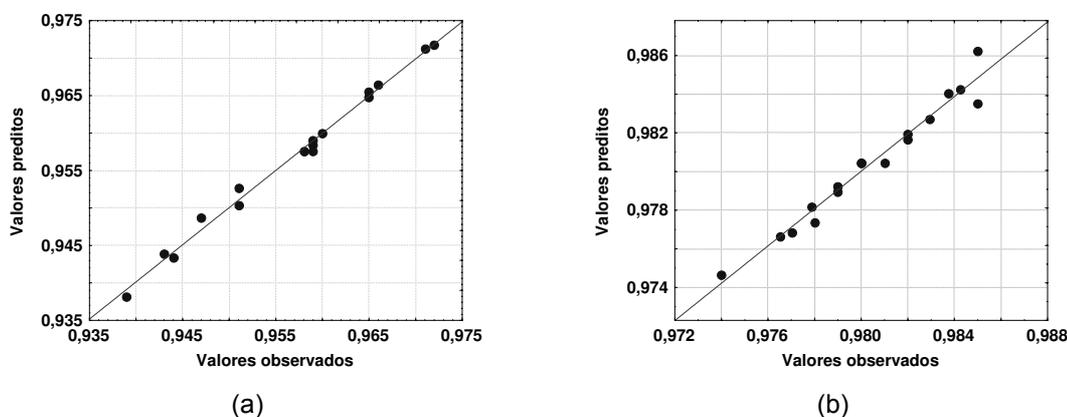


Figura 5.12 – Distribuição de resíduos para a atividade de água durante a desidratação osmótica de mamão em (a) soluções de sacarose e (b) xarope de milho.

A Tabela 5.17 mostra os coeficientes codificados dos modelos estatísticos obtidos para a atividade de água na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Tabela 5.17 – Coeficientes do modelo estatístico para a atividade de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

<b>Coeficientes</b>	<b>Sacarose</b>	<b>Xarope de milho</b>
$\beta_0$	0,958	0,980
$\beta_1$	-0,0029	-0,0021
$\beta_{11}$	-0,0008	ns
$\beta_2$	-0,0053	-0,0014
$\beta_{22}$	ns	ns
$\beta_3$	-0,0084	-0,0023
$\beta_{33}$	ns	ns
$\beta_{12}$	ns	ns
$\beta_{13}$	ns	ns
$\beta_{23}$	-0,0020	ns

ns: não significativo.

As superfícies de resposta e as curvas de nível geradas pelos modelos de ganho de sólidos para cada agente osmótico avaliado são mostradas nas Figuras 5.13 (sacarose) e 5.14 (xarope de milho).

De acordo com as Figuras 5.13 (a), (b) e (c), para a sacarose, observa-se que menores valores de atividade de água são alcançados para temperaturas superiores à 46°C, concentrações de, pelo menos, 56% p/p por um tempo de imersão de, no mínimo, 210 minutos.

Em relação ao xarope de milho, analisando as Figuras 5.14 (a), (b) e (c) em conjunto, é possível concluir que, para se obter baixos valores de atividade de água, faz-se necessária a utilização das variáveis independentes em seus níveis mais altos, assim como para a sacarose.

Um aumento na concentração da solução osmótica, geralmente, causa um maior ganho de sólidos, devido ao maior potencial químico produzido. O aumento no teor de sólidos solúveis no alimento gera uma redução na pressão de vapor de água sobre o mesmo e, conseqüentemente, uma redução na sua atividade de água.

Analisando os resultados para uma mesma pressão osmótica resultante dos agentes osmóticos em estudo, observa-se que as amostras desidratadas em soluções de sacarose alcançaram um abaixamento de atividade de água cerca de 2% superior aos encontrados quando o xarope de milho foi utilizado como agente osmótico, o que é bastante significativo do ponto de vista de atividade de água, como já foi discutido anteriormente.

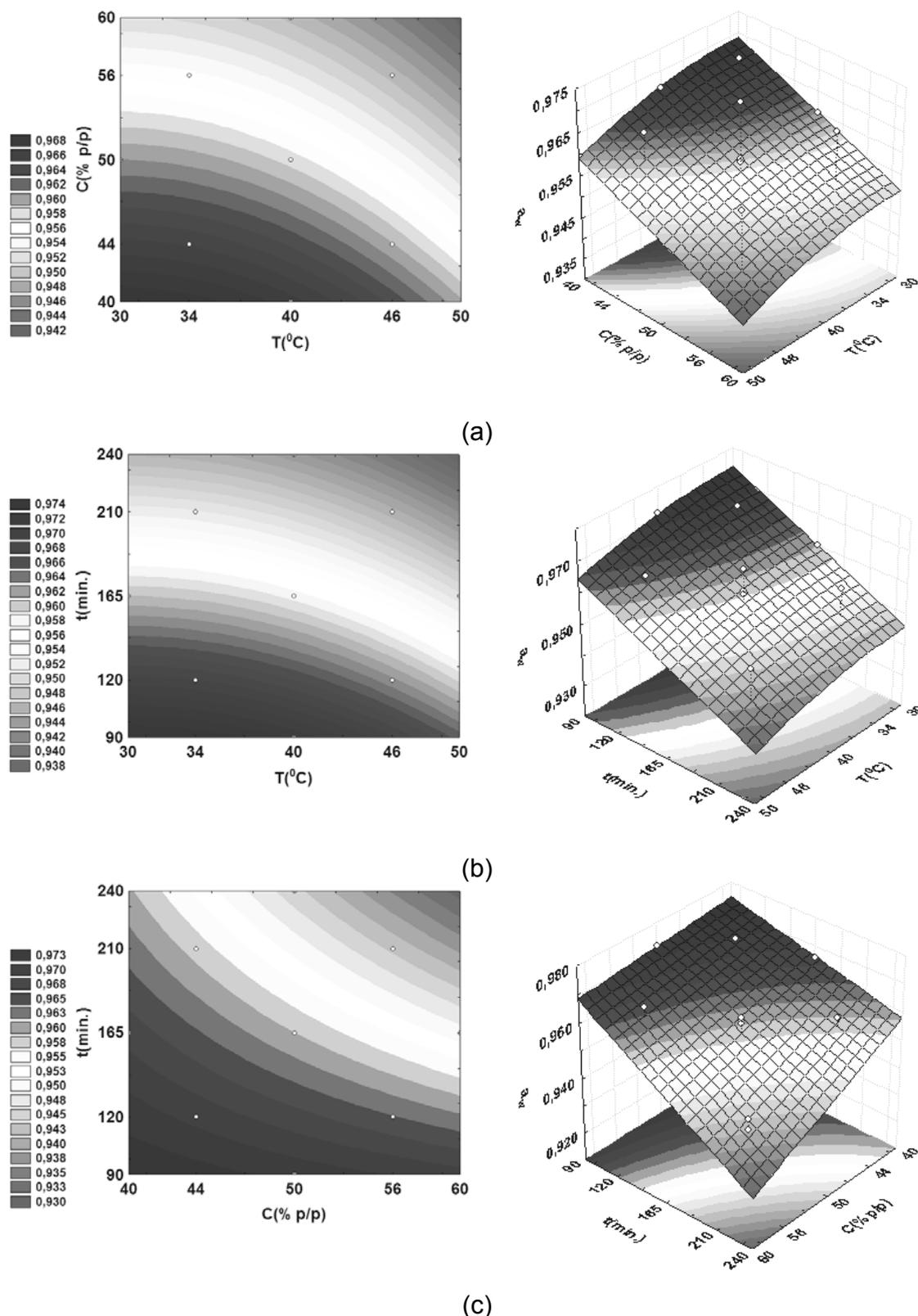
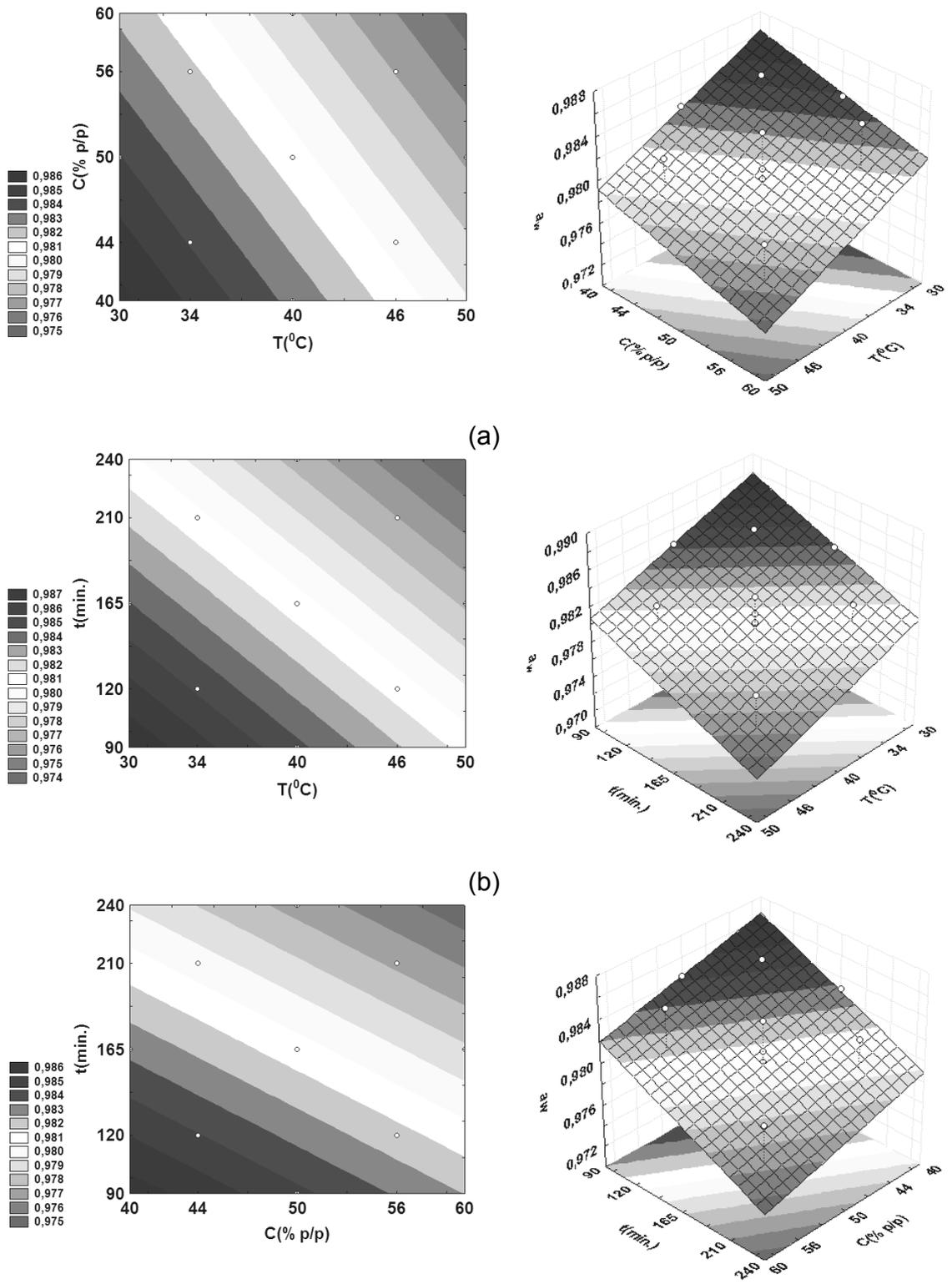


Figura 5.13 – Influência das variáveis independentes sobre a atividade de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose.



(c)

Figura 5.14 – Influência das variáveis independentes sobre a atividade de água durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de xarope de milho.

### 5.2.2 – Otimização do processo de desidratação osmótica

A otimização do processo de desidratação de mamão, para ambos os agentes osmóticos, tem como objetivo a maximização da perda de água e minimização da incorporação de sólidos e da atividade de água do produto. É importante mencionar que a otimização foi feita também tentando se conciliar o que fosse melhor do ponto de vista de processo (mínima temperatura e concentração e mínimo tempo de imersão possíveis) com o melhor em relação às características nutricionais, sensoriais e de conservação do produto processado.

A entrada de açúcar na fruta durante o processamento modifica a sua estrutura e o sabor do produto final (PONTING, 1973), além de permitir o desenvolvimento de uma camada de sólidos na superfície da fruta, resistente à transferência de massa. Segundo Menting e colaboradores (1970), uma incorporação mínima de sólidos durante a desidratação osmótica leva a uma secagem posterior mais rápida, devido ao coeficiente de difusão de água aumentar com a redução do ganho de sólidos. Em relação às características do produto final, a incorporação de açúcar também afeta a reidratação, embora favoreça a retenção do aroma (LAZARIDES; KATSANIDIS; NICKOLAIDIS, 1995).

De acordo com Lazarides, Katsanidis e Nickolaidis (1995), um bom parâmetro para se avaliar a eficiência do processo osmótico é a razão GS/PA. Desta forma, o que se procura é a minimização desta razão. Utilizando-se a mesma idéia, é possível analisar a eficiência da desidratação osmótica também através da razão PP/PA. Neste caso, a otimização está na maximização desta razão.

Fazendo-se um balanço material na fruta submetida ao processo osmótico, teremos a seguinte equação global:

$$PP = (PA + SS) - GS \quad (5.3)$$

Onde SS corresponde ao fluxo de saída de solutos da própria fruta para a solução. Assumindo que tal fluxo seja desprezível em relação aos demais, chegamos à seguinte equação:

$$PP = PA - GS \quad (5.4)$$

Dividindo a Equação 5.4 por PA, teremos:

$$\frac{PP}{PA} = 1 - \frac{GS}{PA} \quad (5.5)$$

Fazendo-se a razão GS/PA tender a zero, conclui-se que a razão PP/PA tenderá a unidade, conforme a Equação 5.6.

$$\left(\frac{PP}{PA}\right)_{\text{Máximo}} = \lim_{(GS/PA) \rightarrow 0} \left(1 - \frac{GS}{PA}\right) = 1 \quad (5.6)$$

Desta forma, é possível analisar a eficiência do processo com os dados experimentais de perda de peso, os quais são obtidos de forma direta, através da pesagem das amostras durante o processo de osmose. Quanto mais próximo da unidade for a razão PP/PA, mais eficiente terá sido o processo.

É importante salientar que, como um dos objetivos do presente estudo consiste também em se alcançar os menores níveis possíveis de atividade de água no produto, de acordo com o que foi discutido na Seção 5.2.1.4, para a atividade de água, uma considerável redução em seu valor é encontrada mediante - além do aumento da temperatura do sistema - o aumento na incorporação de sólidos, o que é indesejável, segundo o que foi discutido no tópico sobre ganho de sólidos.

Sendo assim, para se otimizar o processo de desidratação osmótica de mamão, faz-se necessária a sobreposição das curvas de nível encontradas para PP/PA e  $a_w$ .

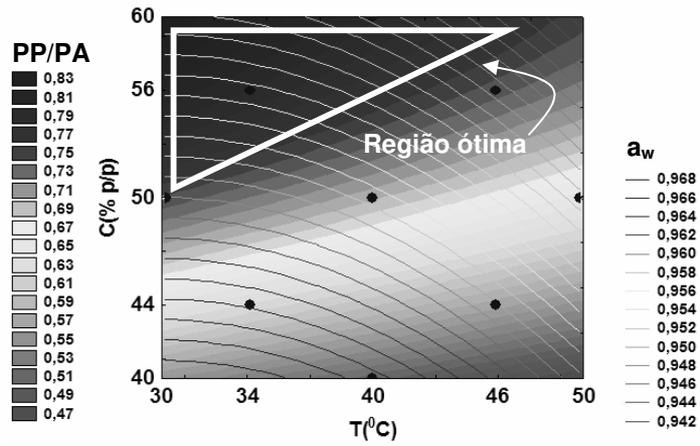
Portanto, foi feita uma Análise de Variância (ANOVA) a  $p \leq 0,05$  para a resposta de otimização PP/PA (Tabela 5.18), para cada agente osmótico, a fim de se verificar o nível de significância e predição dos modelos estatísticos para tal resposta, possibilitando a utilização de suas curvas de nível.

Pela Tabela 5.18, observa-se que todos os modelos estatísticos foram considerados preditivos, embora a falta de ajuste do modelo de PP/PA para o xarope de milho tenha sido significativa.

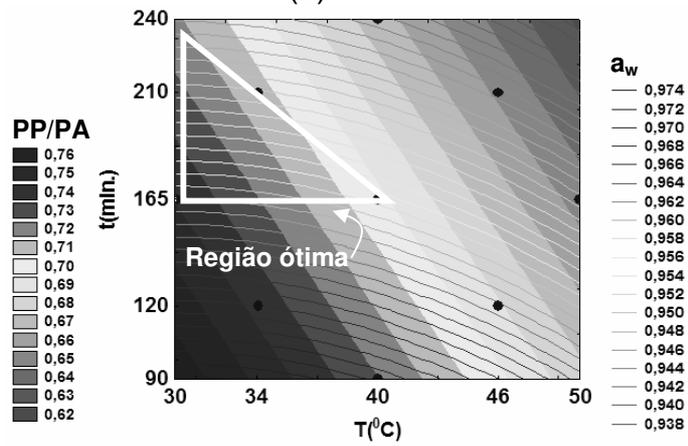
As Figuras 5.15 e 5.16 representam a sobreposição entre curvas de nível da razão PP/PA e as curvas de  $a_w$ , para ambos os agentes osmóticos.

Tabela 5.18 – Análise de Variância (ANOVA) para a razão PP/PA durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

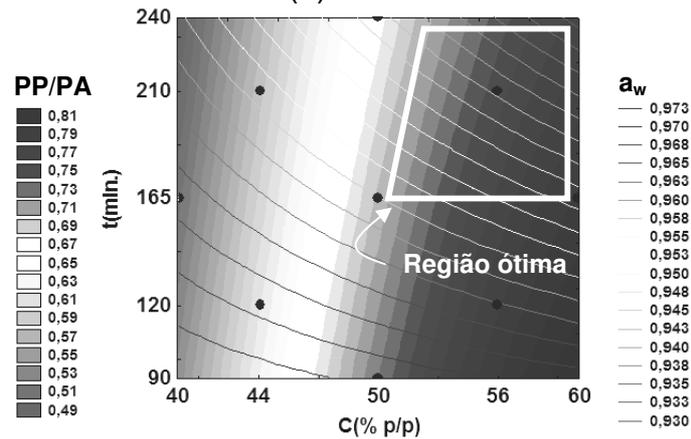
<b>Sacarose</b>					
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>Calculado</sub></b>	<b>F<sub>Tabelado</sub></b>
Regressão	4	0,1164	0,0291	37,8996	3,26
Resíduo	12	0,0092	0,0008	-	-
Falta de ajuste	10	0,0091	0,0009	25,1462	19,40
Erro puro	2	0,0001	0,0000	-	-
Total	16	0,1256	-	$R^2 = 0,9635$	
<b>Xarope de milho</b>					
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F<sub>Calculado</sub></b>	<b>F<sub>Tabelado</sub></b>
Regressão	3	0,0304	0,0101	41,76	3,41
Resíduo	13	0,0032	0,0002	-	-
Falta de ajuste	11	0,0032	0,0003	1227,331	19,40
Erro puro	2	0,0000	0,0000	-	-
Total	16	0,0336	-	$R^2 = 0,9454$	



(a)



(b)



(c)

Figura 5.15 – Influência das variáveis independentes sobre a razão PP/PA e  $a_w$  durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose.

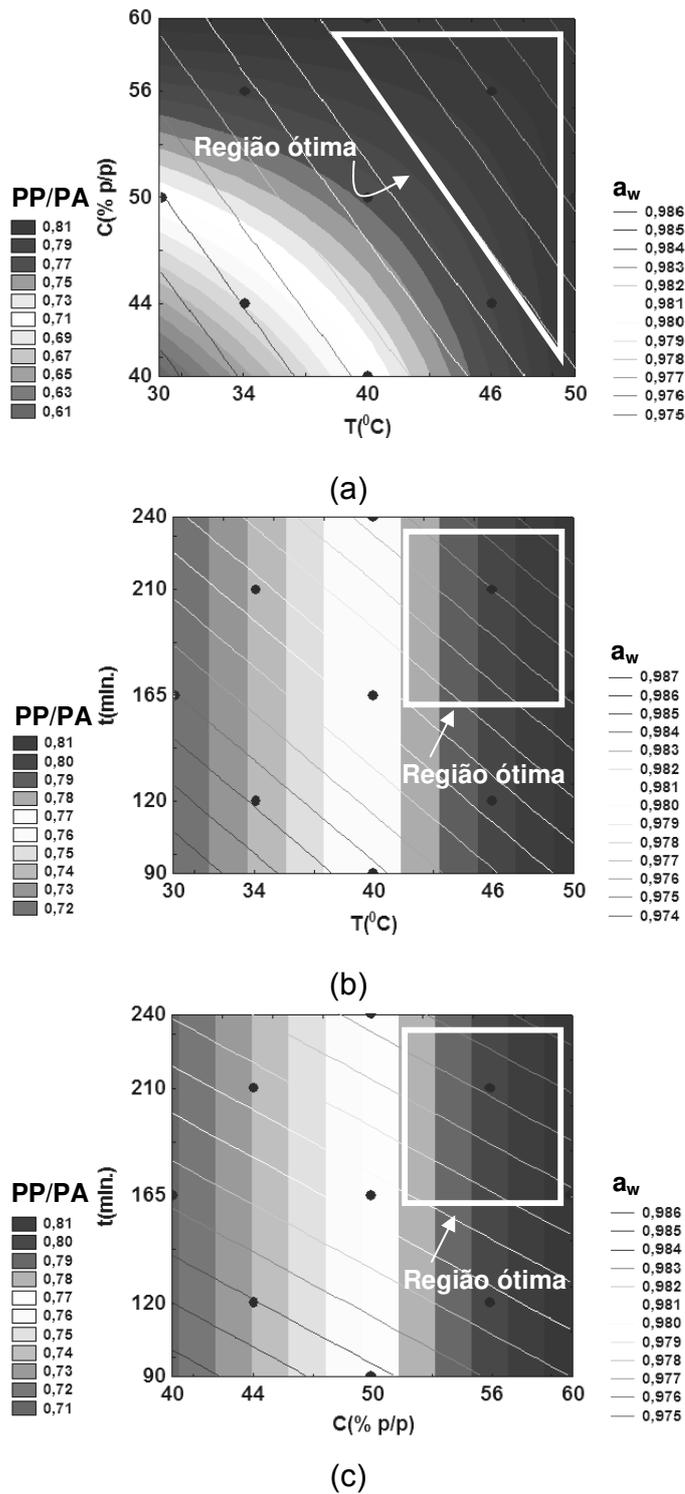


Figura 5.16 – Influência das variáveis independentes sobre a razão PP/PA e  $a_w$  durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de xarope de milho.

Pela Figura 5.15 (a), é possível perceber que, para atingirmos uma região ótima, ou seja, altos valores de PP/PA e baixos valores de  $a_w$ , faz-se necessária a utilização de uma concentração de, pelo menos, 56% p/p, para temperaturas até 46°C, uma vez que, temperaturas superiores a este valor não contribuiriam de forma significativa para a redução da atividade de água.

De acordo com a Figura 5.15 (b), observa-se que, valores ótimos de atividade de água são alcançados para tempos de imersão de, pelo menos, 210 minutos. Porém, para que a condição de máxima razão PP/PA seja satisfeita, é preciso reduzir a faixa de temperatura para valores que convergem para uma temperatura de 34°C.

A Figura 5.15 (c), confirma que, para atingirmos uma região de mínimos valores de  $a_w$  e altos valores de PP/PA, é necessário utilizar concentrações de até 56% p/p, para tempos de imersão de, no mínimo, 210 minutos.

Analisando de forma conjunta as Figuras 5.15 (a), (b) e (c), como condição ótima para a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose, a seguinte combinação das variáveis de processo é sugerida: temperatura de 34°C, concentração de 56% p/p e tempo de imersão de 210 minutos.

Com relação ao xarope de milho, pela Figura 5.16 (a), para atingirmos a região ótima tanto da razão PP/PA quanto de  $a_w$ , é necessário utilizar uma concentração de 56% p/p, com uma temperatura de, no máximo, 46°C.

De acordo com a Figura 5.16 (b), valores mínimos de  $a_w$  e altos valores de PP/PA são alcançados quando se utiliza uma temperatura de 46°C, por um tempo de imersão de 210 minutos.

Confirmando o que foi discutido anteriormente, a Figura 5.16 (c), mostra que para se obter valores ótimos das respostas em questão, faz-se necessário a utilização de uma concentração de 56% p/p, por um tempo de imersão de 210 minutos.

Observando as Figuras 5.16 (a), (b) e (c), foi possível escolher a seguinte condição ótima para o processo osmótico de mamão em soluções de xarope de milho: temperatura de 46<sup>o</sup>C, concentração de 56% p/p e tempo de imersão de 210 minutos.

De posse da melhor condição de desidratação osmótica de mamão para cada agente osmótico, será feito, a seguir, um estudo da cinética destas condições a fim de que se possa analisar de forma mais completa os resultados a serem obtidos na etapa de secagem convencional.

### **5.2.3 – Cinética de desidratação osmótica para as condições otimizadas**

As curvas de cinética de perda de água e ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão para ambos os agentes osmóticos se encontram a seguir.

De acordo com a Figura 5.17, é possível perceber que existe uma tendência de que o ganho de sólidos se estabilize logo nas primeiras horas de desidratação, enquanto que, para a perda de água, o equilíbrio é alcançado mais tardiamente. Tal comportamento foi também evidenciado por alguns autores (GIANGIACOMO; TORREGGIANI; ABBO, 1987; HAWKES; FLINK, 1978; LE MAGUER, 1988; RAOULT-WACK; LENART; GUILBERT, 1994). Observa-se também que os níveis de perda de água foram bem superiores aos de ganho de sólidos, para ambos os agentes osmóticos. Este fato pode estar relacionado ao encolhimento sofrido pelas amostras durante o processo.

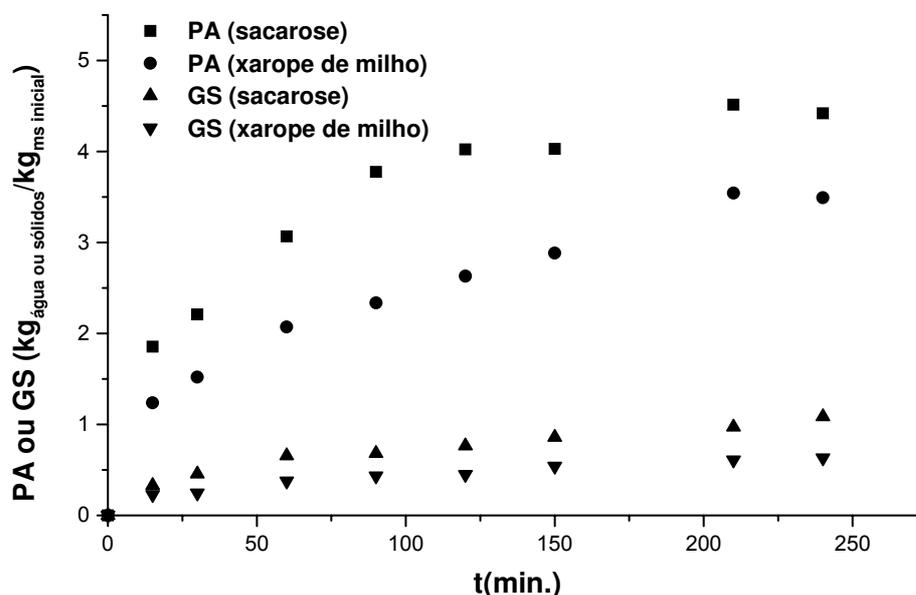


Figura 5.17 – Cinética de perda de água e ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

É importante salientar que, com o decorrer do processo, houve, para ambos os agentes, mas, principalmente, quando a sacarose foi usada como agente osmótico, a formação de uma película de açúcar na superfície do produto. Tal fato, certamente, dificultou a entrada de solutos através do material. Este comportamento foi também relatado por Raoult-Wack, Lenart e Guilbert (1994) e Torreggiani (1993).

A Figura 5.18 mostra as taxas de perda de água e ganho de sólidos em função do conteúdo de umidade das amostras processadas em sacarose e xarope de milho. Nota-se que, para um mesmo conteúdo de umidade, a taxa de perda de água foi bem superior à de ganho de sólidos. A diferença encontrada entre as taxas de ganho de sólidos da sacarose e xarope de milho foi menor do que a observadas entre as taxas de perda de água, para os dois solutos.

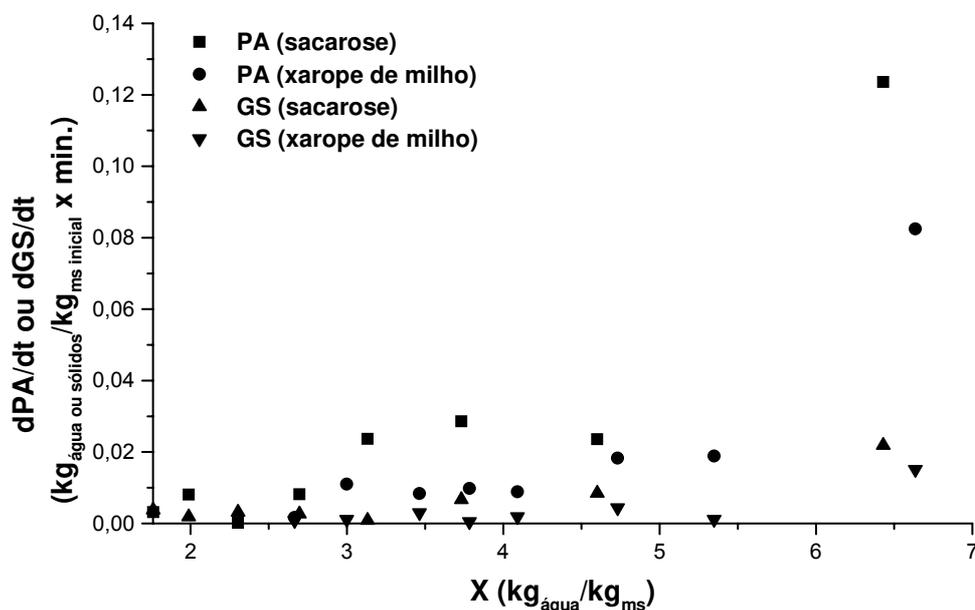


Figura 5.18 – Taxas de perda de água e ganho de sólidos em função do conteúdo de umidade das amostras desidratadas osmoticamente em sacarose e xarope de milho.

### 5.2.3.1 – Modelagem matemática da cinética de desidratação osmótica

A modelagem matemática foi realizada a fim de se tentar prever a cinética de desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho, obtendo, com isso, parâmetros importantes do ponto de vista de processo, tais como a difusividade efetiva de água e de sólidos e os valores de perda de água e ganho de sólidos no equilíbrio.

As Figuras 5.19, 5.20 e 5.21 mostram a modelagem matemática realizada através dos modelos de Azuara e colaboradores (1992), Peleg (1988) e Fick (Modelo Difusional), respectivamente, para a perda de água e para o ganho de sólidos.

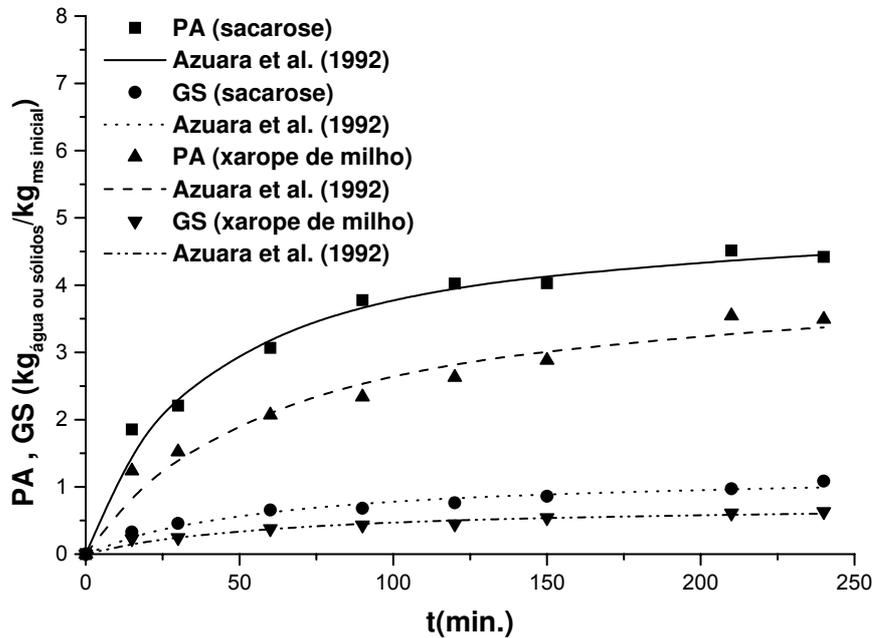


Figura 5.19 – Modelagem através do modelo de Azuara e colaboradores (1992) para a perda de água e para o ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

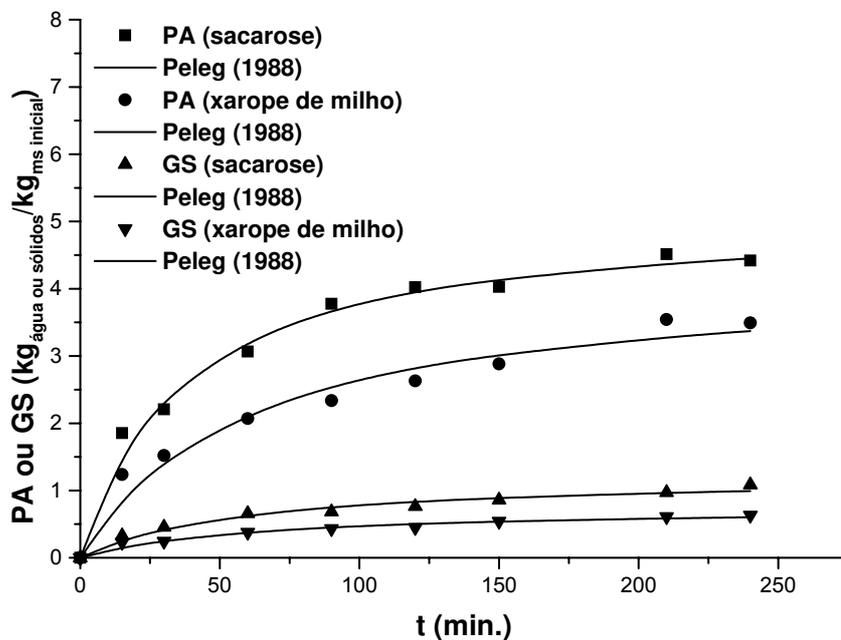


Figura 5.20 – Modelagem através do modelo de Peleg (1988) para a perda de água e para o ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

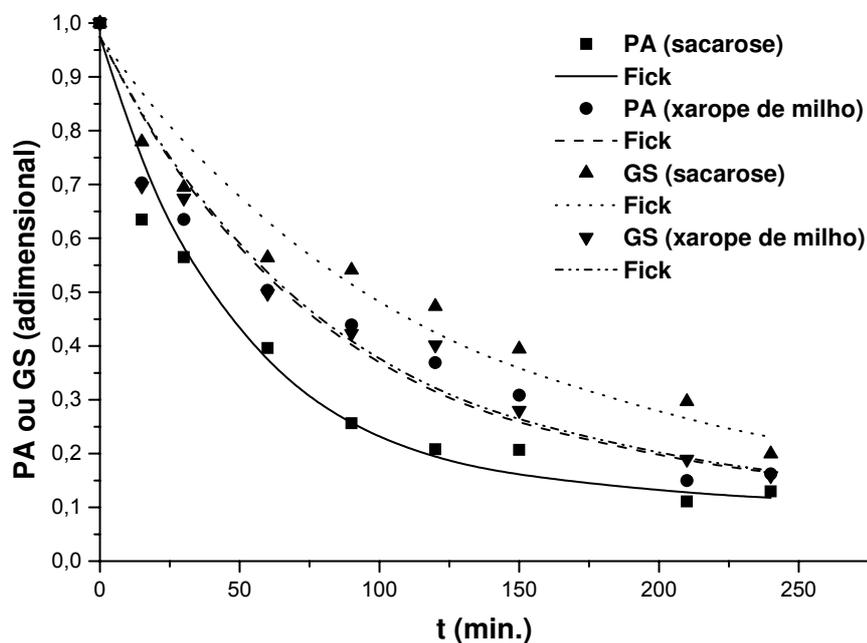


Figura 5.21 - Modelagem através do Modelo Difusional para a perda de água e para o ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

As Tabelas 5.19 e 5.20 mostram os parâmetros de ajuste obtidos pelos modelos de Azuara e colaboradores (1992) e Peleg (1988), respectivamente, para a perda de água e ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Tabela 5.19 – Parâmetros de ajuste obtidos do modelo de Azuara e colaboradores (1992) durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Perda de água				
Agente osmótico	$S_1 \times 10^2$	$PA_e$	$R^2$	E(%)
Sacarose	2,93	5,0778	0,9722	5,04
Xarope de milho	1,76	4,1678	0,9324	8,88
Ganho de sólidos				
Agente osmótico	$S_2 \times 10^2$	$GS_e$	$R^2$	E(%)
Sacarose	1,80	1,2213	0,9500	7,93
Xarope de milho	1,71	0,7500	0,9360	7,87

Tabela 5.20 – Parâmetros de ajuste obtidos do modelo de Peleg (1988) durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Perda de água					
Agente osmótico	a	b	PA <sub>e</sub>	R <sup>2</sup>	E(%)
Sacarose	6,66	0,20	5,0778	0,9890	4,48
Xarope de milho	13,62	0,24	4,1678	0,9675	7,90
Ganho de sólidos					
Agente osmótico	a	b	GS <sub>e</sub>	R <sup>2</sup>	E(%)
Sacarose	45,46	0,82	1,2213	0,9712	7,05
Xarope de milho	78,09	1,33	0,7500	0,9688	7,00

Pelas Tabelas 5.19 e 5.20, observa-se que ambos os modelos apresentaram parâmetros de equilíbrio idênticos. Os valores de desvio relativo médio foram aceitáveis para fins preditivos, variando de 4,48 a 8,88%. Percebe-se também que os valores de perda de água e ganho de sólidos encontrados na condição de equilíbrio, para ambos os agentes osmóticos, foram coerentes com a cinética de desidratação obtida para as soluções de sacarose e xarope de milho.

Como a modelagem feita com o modelo de Azuara e colaboradores (1992) foi satisfatória, segundo os próprios autores, é possível determinar as difusividades efetivas de água e sólidos referentes ao processo de desidratação através da Equação 3.13, estendida também ao ganho de sólidos. Uma vez que não se dispõe dos valores de perda de água e ganho de sólidos experimentais no equilíbrio, em função do bom ajuste aos dados experimentais obtido, foi considerado que a razão  $PA_e^{\text{mod}} / PA_e^{\text{exp}}$  assim como a razão  $GS_e^{\text{mod}} / GS_e^{\text{exp}}$  sejam iguais à unidade. Sendo assim, a Tabela 5.21 ilustra os resultados obtidos.

Segundo a Tabela 5.21, nota-se que os valores de difusividade efetiva de água e sólidos para o xarope de milho foram inferiores àqueles encontrados para a sacarose. Em concordância com o comentário feito no item anterior sobre as taxas de perda de água e ganho de sólidos, a diferença entre os valores de  $D_{\text{ef}}$  de água para a sacarose e

o xarope de milho foi maior do que a encontrada para  $D_{ef}$  de sólidos, entre ambos os agentes osmóticos.

Tabela 5.21 – Valores de difusividade efetiva de água e sólidos obtidos pelo modelo de Azuara e colaboradores (1992) durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

<b>Agente osmótico</b>	<b><math>D_{ef} \text{ Água} \times 10^{10} \text{ (m}^2/\text{s)}</math></b>	<b><math>D_{ef} \text{ Sólidos} \times 10^{10} \text{ (m}^2/\text{s)}</math></b>
Sacarose	4,36	2,97
Xarope de milho	2,92	2,84

A Tabela 5.22 mostra os parâmetros de ajuste para o Modelo Difusional para a perda de água e ganho de sólidos na desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Tabela 5.22 – Parâmetros de ajuste obtidos do Modelo Difusional durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

<b>Perda de água</b>			
<b>Agente osmótico</b>	<b><math>D_{ef} \times 10^{10} \text{ (m}^2/\text{s)}</math></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>E(%)</b>
Sacarose	9,52	0,9770	9,67
Xarope de milho	5,61	0,9494	11,41
<b>Ganho de sólidos</b>			
<b>Agente osmótico</b>	<b><math>D_{ef} \times 10^{10} \text{ (m}^2/\text{s)}</math></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>E(%)</b>
Sacarose	3,87	0,9461	10,13
Xarope de milho	5,48	0,9527	7,98

Pela Tabela 5.22 é possível perceber que as difusividades efetivas de água obtidas para a sacarose e o xarope de milho foram coerentes com a cinética de desidratação. Entretanto, a difusividade efetiva de sólidos para o xarope de milho foi maior do que a obtida para a sacarose, o que não está de acordo com o que foi discutido na seção de cinética do processo de desidratação de mamão para os dois agentes osmóticos.

A comparação entre dados de difusividade efetiva reportados na literatura é uma tarefa um tanto difícil em função dos diferentes métodos de estimativa e diferentes modelos utilizados, associado às variações na composição do alimento e em sua estrutura física. Portanto, as possíveis diferenças encontradas devem ser atribuídas a estes fatores.

KAyamak-Ertekin e Sultanoğlu (2000), trabalhando com desidratação osmótica de maçã em soluções de sacarose e dextrose, com concentrações que variaram de 40 a 66% p/p, para a sacarose e de 30 a 50% p/p para a dextrose, e temperaturas de 20 a 50°C, obtiveram valores de difusividade efetiva na faixa de  $10^{-11}$  -  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Valores de difusividade efetiva de água e sólidos para a desidratação osmótica de cubos de pêra foram obtidos por Park e colaboradores (2002). Estes valores variaram de  $1,99 \times 10^{-10}$  a  $3,60 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. Telis, Murari, e Yamashita (2004), trabalhando com desidratação osmótica de tomate em soluções ternárias de NaCl e sacarose, encontraram valores de difusividade efetiva de água e sacarose da ordem de  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Estes resultados foram similares aos obtidos por Rastogi e Raghavarao (1997), trabalhando com cenoura. Rastogi e Raghavarao (2004), desidratando osmoticamente cubos de melão, obtiveram valores de difusividade efetiva de água e sacarose da ordem de  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s.

Podemos concluir que os valores de difusividade efetiva de água e sólidos encontrados no presente trabalho para o processo de desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho se encontram dentro da faixa relatada pela literatura, para o mesmo processo.

#### **5.2.4 – Cinética de encolhimento na desidratação osmótica de mamão**

A Figura 5.22 mostra a variação do volume das amostras em função do tempo de processo. Nota-se que, para um mesmo tempo de desidratação, as amostras processadas em sacarose sofreram um encolhimento volumétrico maior do que as amostras desidratadas em xarope de milho. Isto mostra que quanto maior a perda de água, devido ao processo, maior a redução no volume da amostra.

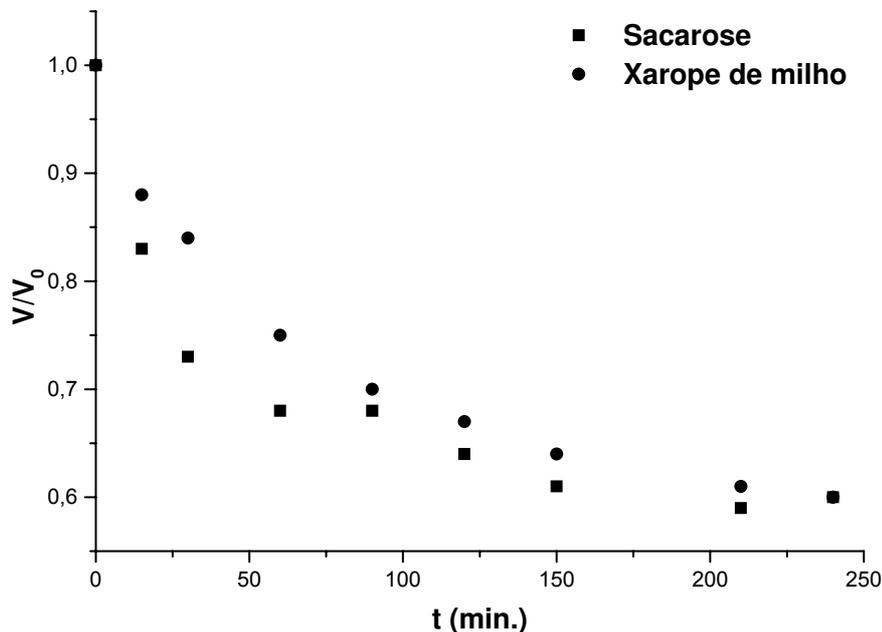


Figura 5.22 – Dados experimentais de encolhimento volumétrico de amostras de mamão desidratadas osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho em função do tempo de imersão.

Por outro lado, expressando a variação do volume das amostras em função de seus conteúdos de umidade, teremos um comportamento contrário, como observado na Figura 5.23. Considerando o mesmo conteúdo de umidade, nota-se que as amostras desidratadas em xarope de milho sofreram um encolhimento volumétrico relativo maior do que as amostras desidratadas em soluções de sacarose. O comportamento aqui encontrado pode ser explicado em função da maior impregnação sofrida pelas amostras processadas em sacarose, o que deixa a matriz sólida do material com uma menor mobilidade, dificultando a sua redução de volume, comparado com as amostras desidratadas em xarope de milho.

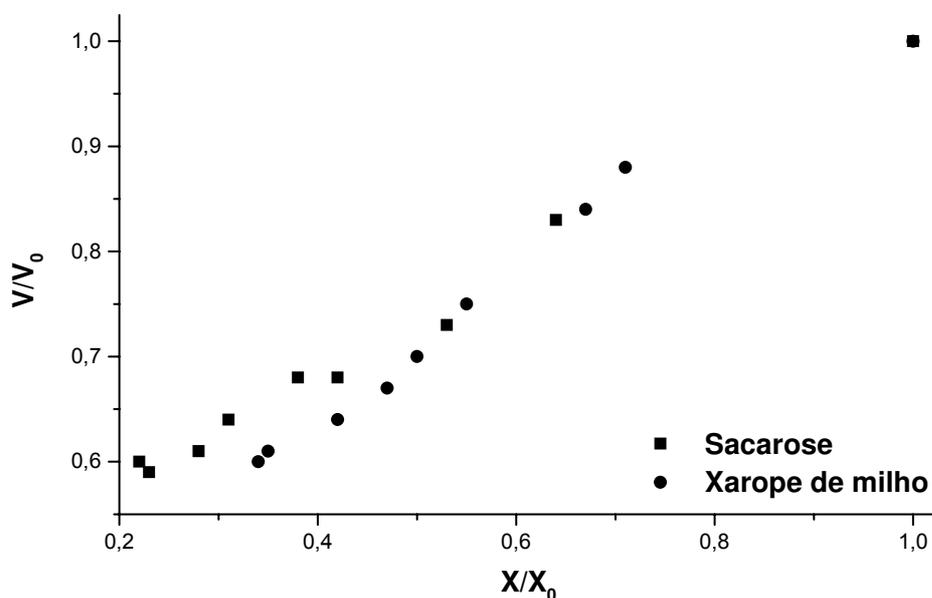


Figura 5.23 – Dados experimentais de encolhimento volumétrico de amostras de mamão desidratadas osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho em função do conteúdo de umidade.

A Figura 5.24 mostra a relação existente entre o encolhimento volumétrico das amostras de mamão desidratadas em sacarose e xarope de milho e a perda líquida de matéria (diferença entre a quantidade de água que sai e a quantidade de sólido que entra no material) durante o processo osmótico. Podemos perceber que, praticamente, a redução no volume das amostras de mamão desidratadas em sacarose e xarope de milho corresponde à redução no peso das mesmas durante o processo. Este comportamento também foi encontrado por Mavroudis, Gekas e Sjöholm (1998), Moreira e Sereno (2003) e Nieto e colaboradores (2004), trabalhando com maçã.

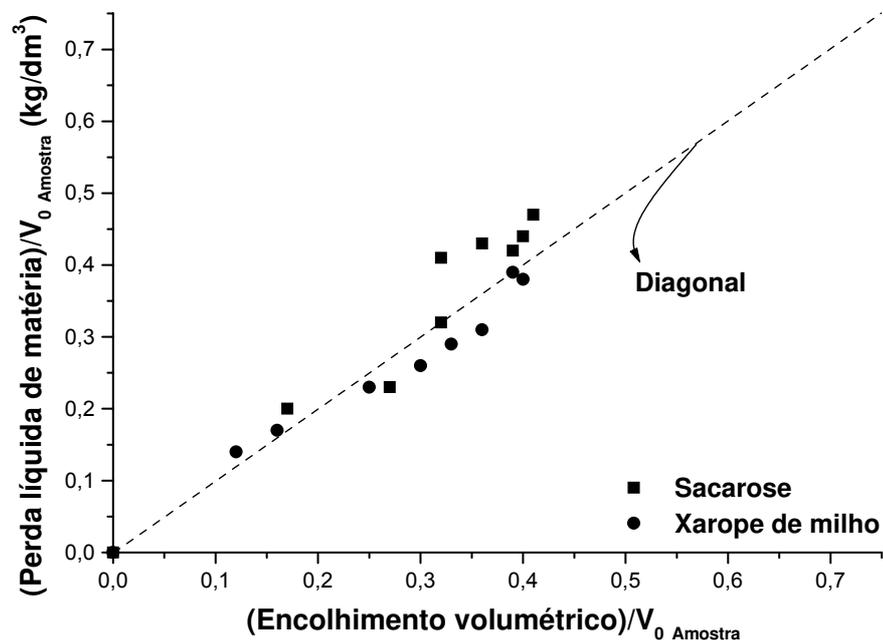


Figura 5.24 – Relação entre o encolhimento volumétrico e perda de matéria de amostras de mamão desidratadas osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.

A Figura 5.25 mostra a variação percentual de cada uma das três dimensões do mamão devido ao processo osmótico em soluções de sacarose e xarope de milho em função do conteúdo de umidade das amostras. A dimensão que mais sofreu variação devido ao processo de desidratação osmótica foi a espessura, chegando a, aproximadamente, 77% do seu valor inicial, seguido pela largura, com 86% do seu valor inicial e, por fim, da profundidade, com 90% de seu valor inicial. Considerando o mesmo conteúdo de umidade, os valores das dimensões das amostras desidratadas em xarope de milho foram menores do que aqueles encontrados para as amostras desidratadas em sacarose.

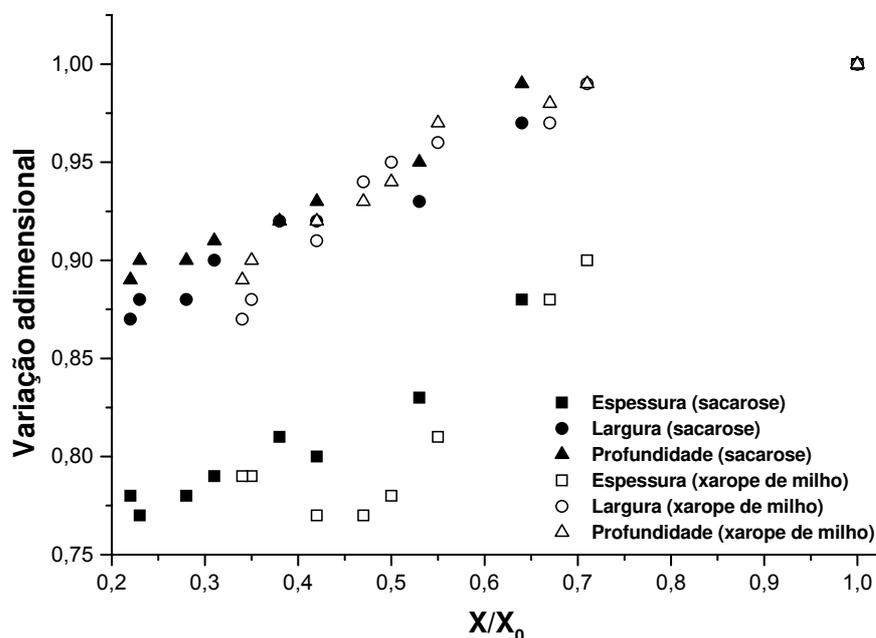


Figura 5.25 – Variação das dimensões do mamão em função do conteúdo de umidade das amostras.

#### 5.2.4.1 – Modelagem do encolhimento na desidratação osmótica de mamão

Observando a Figura 5.23, percebemos existir um comportamento linear entre a variação de volume das amostras e a variação no conteúdo de umidade das mesmas. Sendo assim, sugere-se que o encolhimento volumétrico das fatias de mamão possa ser descrito através da seguinte equação:

$$\frac{V(t)}{V_0} = \alpha \left( \frac{X(t)}{X_0} \right) + \delta \quad (5.7)$$

A Figura 5.26 ilustra o ajuste linear obtido para a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

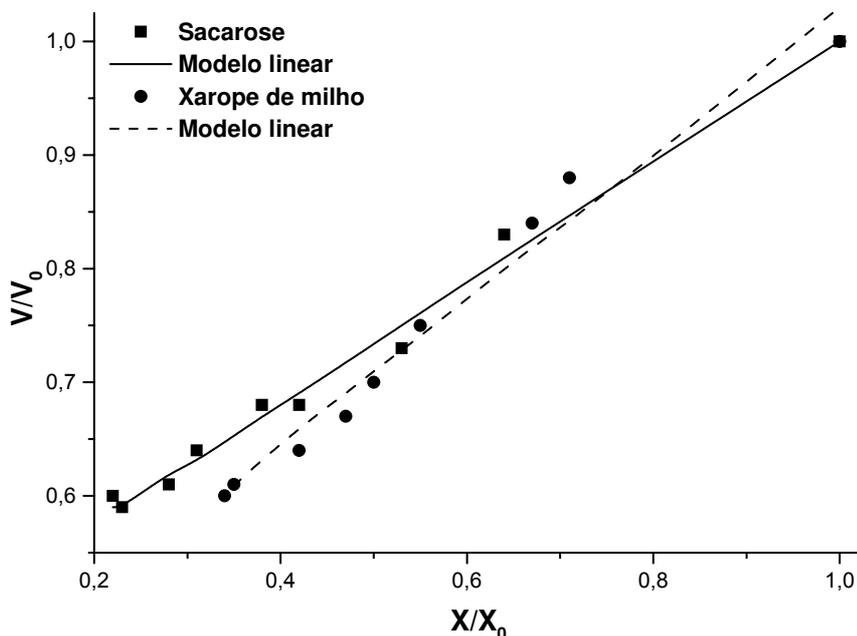


Figura 5.26 – Ajuste linear da relação entre o volume das amostras de mamão e o conteúdo de umidade das mesmas para a desidratação osmótica em soluções de sacarose e xarope de milho.

A Tabela 5.23 mostra os parâmetros de ajuste obtidos da regressão linear da Equação 5.7 para ambos os agentes osmóticos.

Tabela 5.23 – Parâmetros de ajuste linear para a relação entre volume e umidade das amostras de mamão submetidas à desidratação osmótica em soluções de sacarose e xarope de milho.

Agente osmótico	$\alpha$	$\delta$	$R^2$	E(%)
Sacarose	0,53	0,47	0,9904	1,46
Xarope de milho	0,64	0,39	0,9757	1,96

Pela Tabela 5.23, observa-se que o coeficiente angular obtido do ajuste feito para o xarope de milho foi superior ao encontrado para a sacarose. Tal fato sugere que as amostras desidratadas em sacarose sofreram menor encolhimento volumétrico do que àquelas desidratadas em xarope de milho, considerando um mesmo conteúdo de umidade. Isto confirma o comportamento encontrado na seção 5.2.4 sobre cinética de encolhimento. O coeficiente linear nos dá uma informação acerca do volume adimensional das amostras quando o conteúdo de umidade das mesmas for igual a zero. Sabemos que, do ponto de vista de processo, tal condição seria, praticamente,

impossível de se obter. Mas, a título de comparação, nota-se que o volume obtido nesta condição para a sacarose seria maior do que aquele obtido para as amostras desidratadas em xarope de milho.

A Figura 5.27 mostra o ajuste utilizando a Equação 4.9 para a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

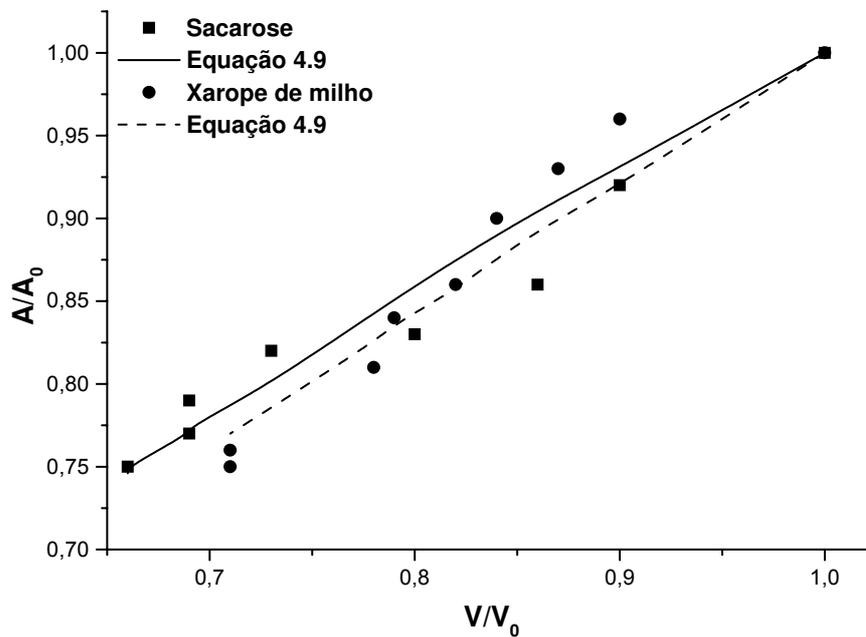


Figura 5.27 - Relação entre o volume das amostras de mamão e o conteúdo de umidade das mesmas descrita pela Equação 4.9 para a desidratação osmótica em soluções de sacarose e xarope de milho.

A Tabela 5.24 mostra os parâmetros de ajuste obtidos da regressão não linear da Equação 4.9 para ambos os agentes osmóticos. Percebemos que as amostras desidratadas em xarope de milho obtiveram um maior valor de  $n$  comparadas com as amostras processadas em sacarose. Na realidade, o parâmetro  $n$  indica apenas o grau de proporcionalidade existente entre a variação da área superficial total das amostras e o volume das mesmas ao longo do processo.

Tabela 5.24 – Parâmetros de ajuste não linear para a relação entre área superficial e volume das amostras de mamão submetidas à desidratação osmótica em soluções de sacarose e xarope de milho.

Agente osmótico	n	R <sup>2</sup>	E(%)
Sacarose	0,71	0,9392	1,74
Xarope de milho	0,76	0,9397	1,88

A Figura 5.28 mostra o ajuste utilizando o Modelo Difusional considerando encolhimento, para a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho e a Tabela 5.25 ilustra os parâmetros de ajuste obtidos da regressão não linear do Modelo Difusional considerando encolhimento para ambos os agentes osmóticos.

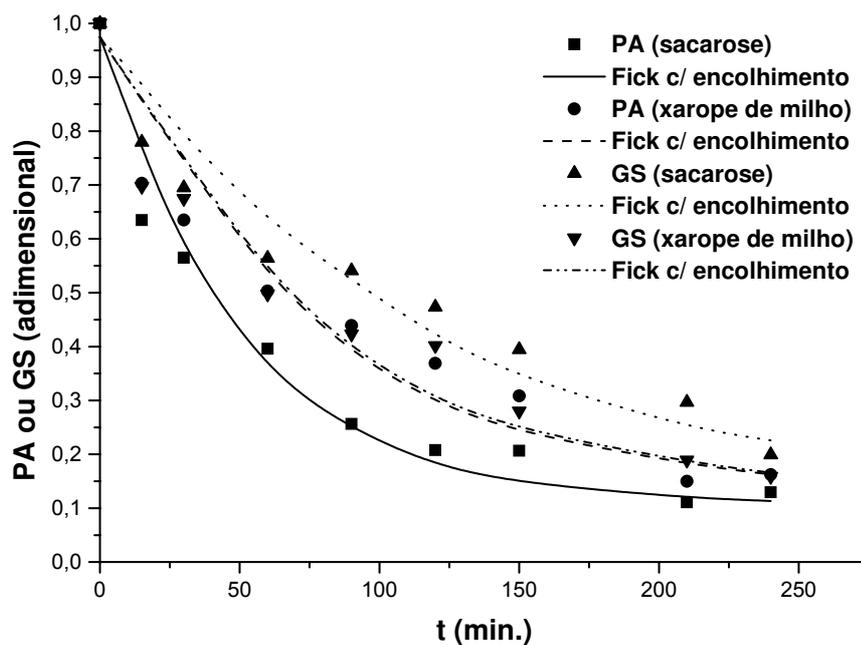


Figura 5.28 – Modelo Difusional considerando encolhimento para a desidratação osmótica de mamão Formosa em soluções de sacarose e xarope de milho.

Tabela 5.25 – Parâmetros de ajuste obtidos do Modelo Difusional considerando o encolhimento durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

<b>Perda de água</b>			
<b>Agente osmótico</b>	<b><math>D_{ef} \times 10^{10} (m^2/s)</math></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>E(%)</b>
Sacarose	6,53	0,9629	11,60
Xarope de milho	3,66	0,9142	13,66
<b>Ganho de sólidos</b>			
<b>Agente osmótico</b>	<b><math>D_{ef} \times 10^{10} (m^2/s)</math></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>E(%)</b>
Sacarose	2,50	0,9281	11,07
Xarope de milho	3,57	0,9219	10,58

Analisando a Tabela 5.25, podemos observar o mesmo comportamento obtido descrito na Tabela 5.22 para as difusividades efetivas de água e sólidos. Percebemos também que os valores de desvio relativo médio foram ligeiramente superiores àqueles encontrados na Tabela 5.22.

A modelagem feita utilizando a modificação do Modelo Difusional proposta por Park (1998) a fim de se considerar o encolhimento durante o processo, encontra-se ilustrada na Figura 5.29. Para se utilizar este modelo no processo de desidratação osmótica foi necessário corrigir ponto a ponto a massa seca das amostras, uma vez que tal modelo foi deduzido considerando a massa seca das amostras constante ao longo do processo, exatamente por ter sido aplicado ao processo de secagem convectiva. Os dados de espessura média se encontram no Apêndice A3.

A Tabela 5.26 ilustra os parâmetros de ajuste obtidos da regressão não linear do Modelo Difusional modificado considerando encolhimento para ambos os agentes osmóticos.

Pela Tabela 5.26, observa-se que os valores obtidos para as difusividades efetivas de água e sólidos estariam completamente coerentes não fosse a difusividade efetiva de sólidos para a sacarose ter sido maior do que a difusividade efetiva de água

para o xarope de milho. Apesar desta incoerência, os valores de desvio relativo médio foram inferiores aos obtidos pelos Modelos Difusionais com e sem encolhimento.

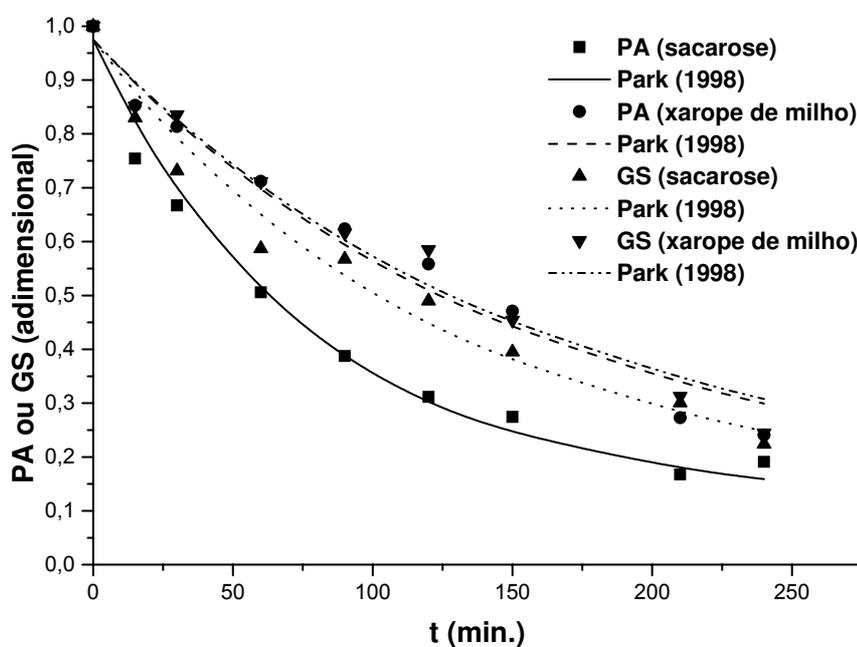


Figura 5.29 – Modelo Difusional modificado por Park (1998) para a desidratação osmótica de mamão Formosa em soluções de sacarose e xarope de milho.

Tabela 5.26 – Parâmetros de ajuste obtidos do Modelo Difusional modificado por Park (1998) considerando o encolhimento durante a desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Perda de água			
Agente osmótico	$D_{ef} \times 10^{10} (m^2/s)$	$R^2$	E(%)
Sacarose	4,15	0,9876	6,14
Xarope de milho	2,07	0,9722	8,83
Ganho de sólidos			
Agente osmótico	$D_{ef} \times 10^{10} (m^2/s)$	$R^2$	E(%)
Sacarose	2,53	0,9723	7,00
Xarope de milho	2,00	0,9750	6,96

Neste caso, em função do que foi discutido sobre difusividade efetiva, embora o modelo de Azuara e colaboradores (1992) seja semi-empírico, é plausível considerá-lo

como o mais representativo do processo de desidratação osmótica de mamão Formosa em soluções de sacarose e xarope de milho em função dos resultados obtidos.

### 5.3 – SECAGEM CONVECTIVA

#### 5.3.1 – Cinética de secagem para a fruta fresca e para as condições otimizadas do pré-tratamento osmótico

A Tabela 5.27 ilustra as umidades médias relativas do ar de secagem, para cada condição estudada e também as umidades de equilíbrio, que foram obtidas dinamicamente pesando-se as amostras até que se atingisse peso constante durante o processo de secagem de mamão Formosa fresco e pré-tratado osmoticamente, nas condições ótimas escolhidas na etapa de desidratação osmótica, para ambos os agentes osmóticos. O parâmetro estudado foi a temperatura do ar de secagem, a qual variou de 40 a 70°C.

Tabela 5.27 – Parâmetros de processo da secagem convectiva de mamão Formosa fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.

Condições de processo T (°C)	<i>in natura</i>		Sacarose		Xarope de milho	
	UR(%)	X <sub>e</sub> (bs)	UR(%)	X <sub>e</sub> (bs)	UR(%)	X <sub>e</sub> (bs)
40	22,8	0,11	23,4	0,31	22,2	0,29
50	19,2	0,10	17,2	0,29	16,7	0,28
60	14,3	0,09	14,1	0,28	13,8	0,26
70	10,9	0,08	10,8	0,27	11,6	0,25

De acordo com a Tabela 5.27, nota-se que as umidades de equilíbrio obtidas para a fruta fresca foram menores do que aquelas encontradas para a fruta pré-tratada osmoticamente, certamente, em função da quantidade de sólidos impregnados na matéria-prima durante a etapa de desidratação osmótica, o que consistiu de uma barreira à saída de água na fase de secagem convectiva.

As Figuras 5.30 a 5.32 mostram os adimensionais de umidade em função do tempo de processo, nas várias temperaturas do ar de secagem.

Analisando as Figuras 5.30 a 5.32 de maneira geral, podemos notar que quanto maior a temperatura de processo, mais acentuada é a curva de secagem, tanto para a fruta fresca quanto para as amostras pré-tratadas osmoticamente, isto é, quando comparamos as amostras secas a uma temperatura maior com aquelas secas em uma temperatura menor observamos que, para que as últimas alcancem um mesmo conteúdo de umidade das anteriores, faz-se necessário um maior tempo de processo.

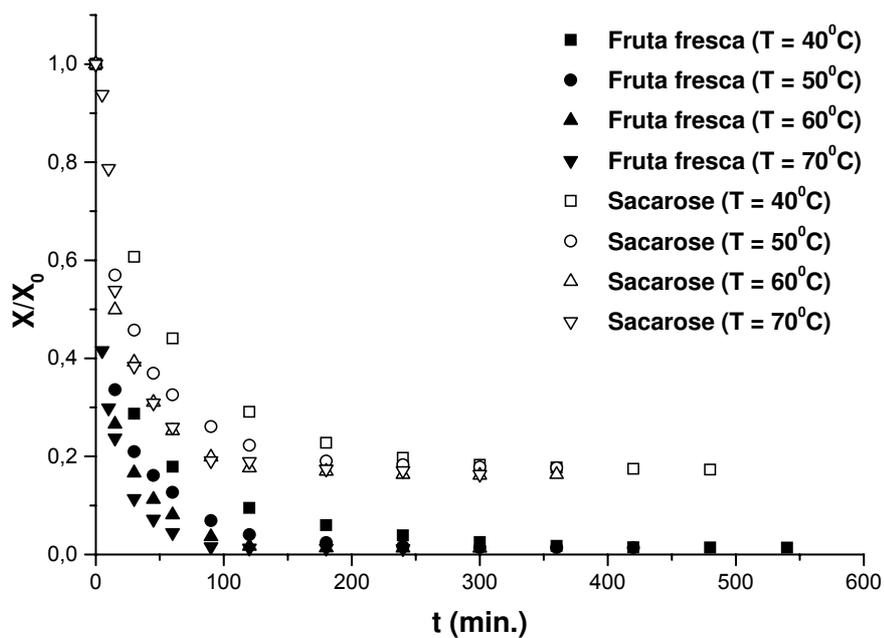


Figura 5.30 – Adimensional de umidade em função do tempo para o processo de secagem das frutas frescas e pré-tratada osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.

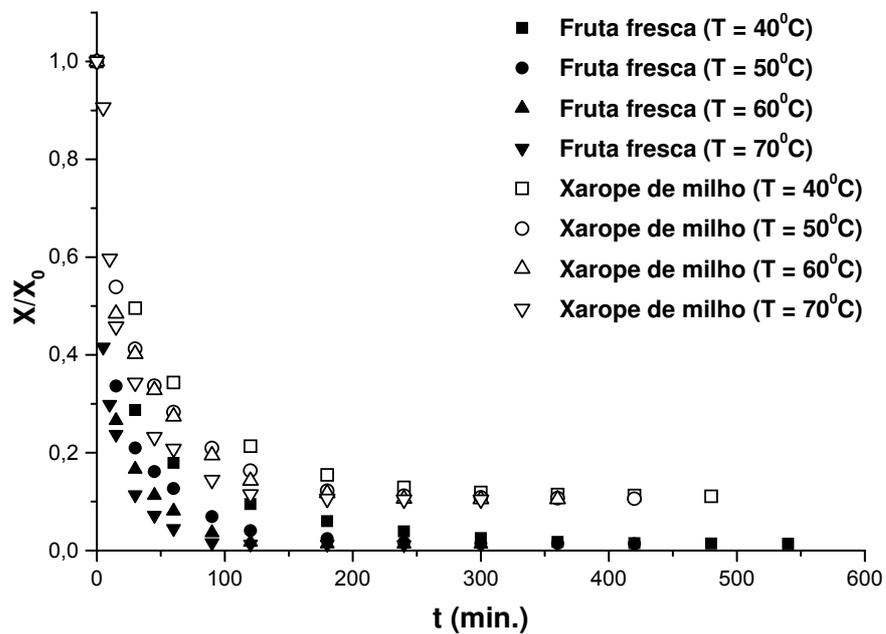


Figura 5.31 – Adimensional de umidade em função do tempo para o processo de secagem das frutas frescas e pré-tratada osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.

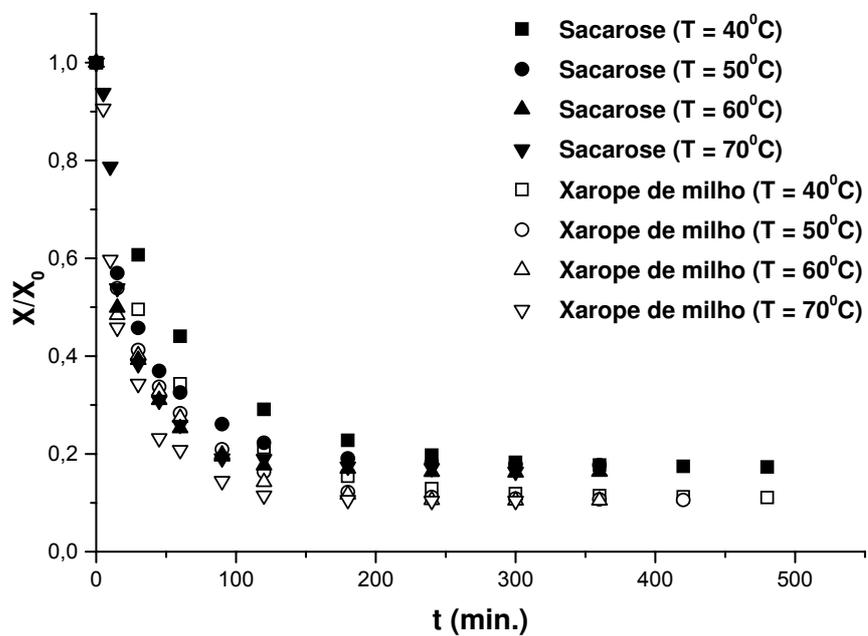


Figura 5.32 – Adimensional de umidade em função do tempo para o processo de secagem das frutas pré-tratadas osmoticamente em sacarose e xarope de milho a várias temperaturas de processo.

Pela Figura 5.30, observa-se que, para um mesmo conteúdo de umidade adimensional, as amostras *in natura* secam mais rapidamente do que as amostras pré-tratadas em sacarose. É bastante evidente que o conteúdo de umidade das amostras pré-tratadas em sacarose ao final do processo é superior ao das amostras *in natura*, confirmando o que foi discutido anteriormente na Tabela 5.28. Nota-se ainda que existe uma tendência ao equilíbrio dinâmico de umidade após um tempo de processo de 240 minutos, tanto para as amostras *in natura* quanto para as pré-tratadas osmoticamente em sacarose.

De acordo com a Figura 5.31, observa-se o mesmo comportamento discutido na Figura 5.30, sendo também bastante evidente que o conteúdo de umidade das amostras pré-tratadas em xarope de milho ao final do processo é superior ao das amostras *in natura*. Há uma tendência ao equilíbrio dinâmico de umidade após um tempo de processo de 240 minutos para as amostras pré-tratadas osmoticamente em xarope de milho.

Analisando a Figura 5.32, percebe-se que, para um mesmo conteúdo de umidade adimensional, as amostras pré-tratadas em xarope de milho secam mais rapidamente do que as amostras pré-tratadas em sacarose.

Portanto, podemos concluir que quanto menos sólidos o material ganhe durante a etapa de desidratação osmótica, menor será a resistência à saída de água durante a etapa de secagem convencional. Tal fato foi também observado por Azoubel (2002), estudando o processo de secagem de pedúnculo de caju e por Araújo (2005), trabalhando com secagem de nectarina.

As Figuras 5.33 a 5.35 mostram a taxa de secagem em função do conteúdo de umidade das amostras durante o processo de secagem da fruta fresca e pré-tratada osmoticamente em sacarose e xarope de milho, a várias temperaturas do ar de secagem.

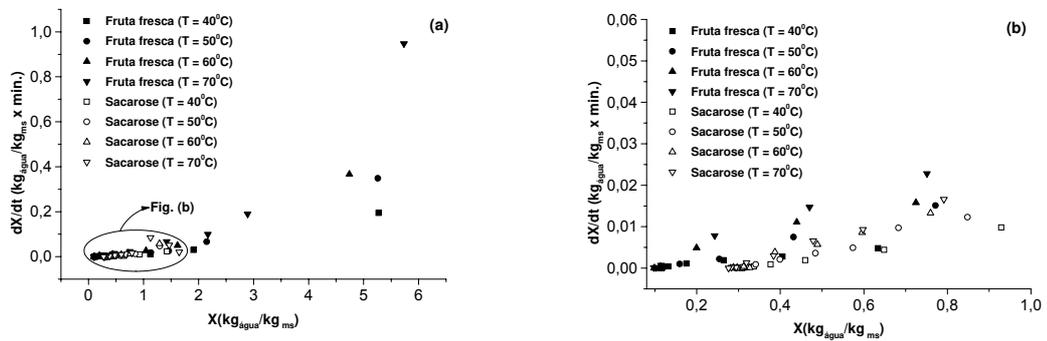


Figura 5.33 – Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade das amostras para o processo de secagem da fruta fresca e pré-tratada osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.

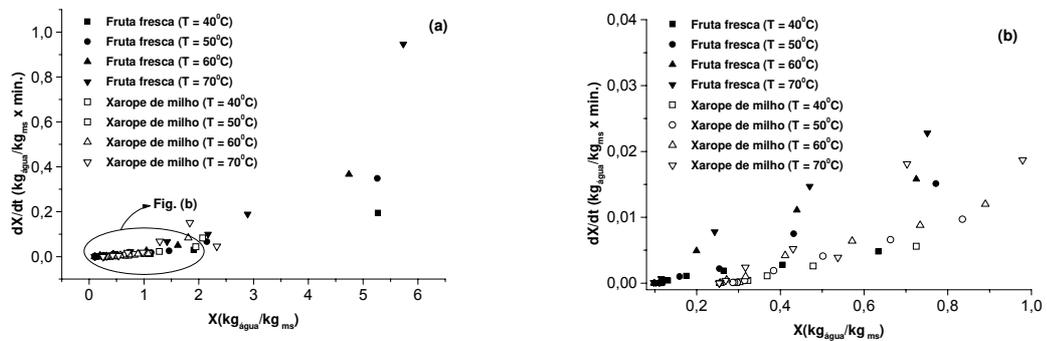


Figura 5.34 – Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade das amostras para o processo de secagem da fruta fresca e pré-tratada osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.

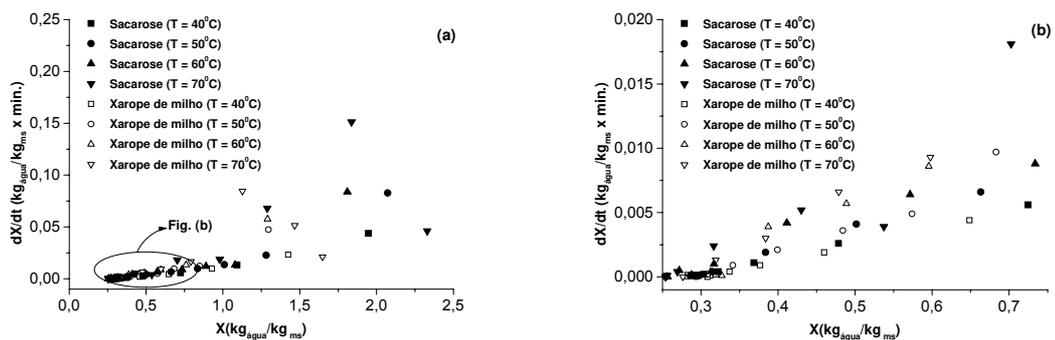


Figura 5.35 – Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade das amostras para o processo de secagem das frutas frescas e pré-tratadas osmoticamente em sacarose e xarope de milho a várias temperaturas de processo.

Analisando as Figuras 5.33 a 5.35 (a) e (b), observa-se que, do início ao final do processo, a temperatura do ar de secagem exerceu uma influência diretamente proporcional sobre a taxa de secagem, ou seja, quanto maior a temperatura, maior a taxa de secagem, tanto para as amostras frescas quanto para aquelas pré-tratadas osmoticamente em sacarose e xarope de milho.

Observando as Figuras 5.33 a 5.35 (a), nota-se que altas taxas de secagem foram obtidas no início do processo, quando o conteúdo de umidade das amostras foi maior.

Pelas Figuras 5.33 a 5.35 (b), é possível perceber que, para um conteúdo de umidade inferior a  $1,00 \text{ kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{ms}}$ , as maiores taxas foram apresentadas pelas amostras *in natura*, seguidas das amostras pré-tratadas em xarope de milho e, por fim, das amostras pré-tratadas em sacarose. Tal comportamento ocorreu, certamente, devido ao menor conteúdo de umidade inicial das amostras pré-tratadas osmoticamente, comparado com o conteúdo de umidade inicial da fruta fresca, bem como em função da impregnação sofrida pelas amostras pré-tratadas durante a etapa de desidratação osmótica, como já discutido anteriormente. Tal comportamento foi também observado por diversos autores como, Rahman e Lamb (1991), trabalhando com abacaxi, Karathanos, Kostaropoulos e Saravacos (1995) e Nieto e colaboradores (1998), com maçã.

Mazza (1983), trabalhando com cenoura, atribuiu estas baixas taxas encontradas para as amostras pré-tratadas à redução da pressão de vapor de água no produto em função da dissolução do soluto e da cristalização do mesmo sobre a superfície do material, dificultando o processo de transferência de massa.

Nieto, Castro e Alzamora (2001), trabalhando com manga, atribuíram o comportamento aqui mencionado ao aumento da resistência ao fluxo de saída de água causado pelo encolhimento sofrido pelas amostras durante o processo, bem como

devido ao ganho de sólidos durante a osmose e/ou pela gelatinização do amido sobre a superfície do material ao longo do processo de secagem.

### 5.3.1.1 – Modelagem matemática da cinética de secagem

Os dados experimentais foram ajustados inicialmente pelo Modelo Difusional (2ª Lei de Fick), considerando uma geometria de placa plana infinita, para o cálculo da difusividade efetiva da água ( $D_{ef}$ ). Também foi utilizado o modelo empírico de Page (PAGE, 1949).

As Figuras 5.36, 5.37 e 5.38 mostram a modelagem utilizando o Modelo Difusional para o mamão fresco e pré-tratado osmoticamente em sacarose e xarope de milho, respectivamente. Os valores de difusividade efetiva da água se encontram na Tabela 5.28, assim como os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) e os valores de desvio relativo médio (E).

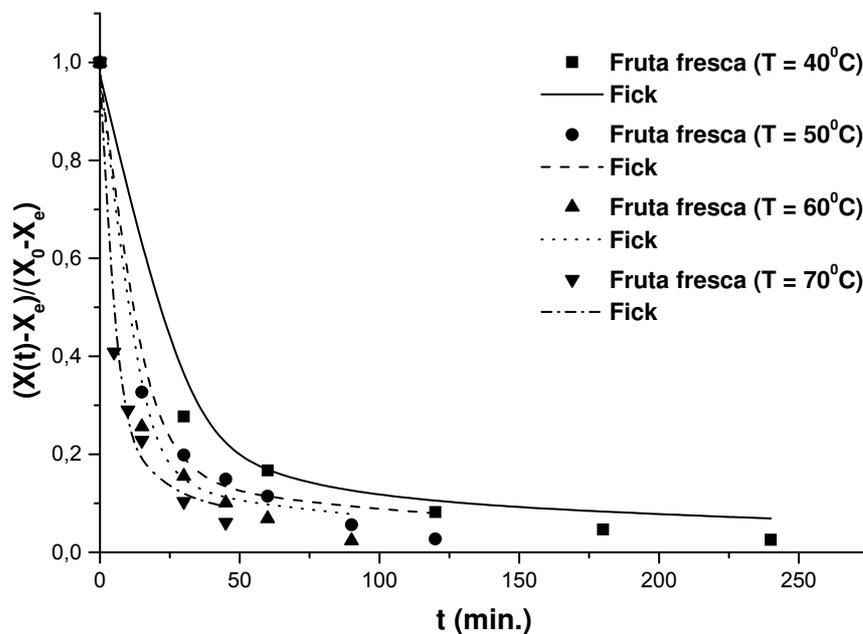


Figura 5.36 – Modelo Difusional para o processo de secagem de mamão *in natura* a várias temperaturas de processo.

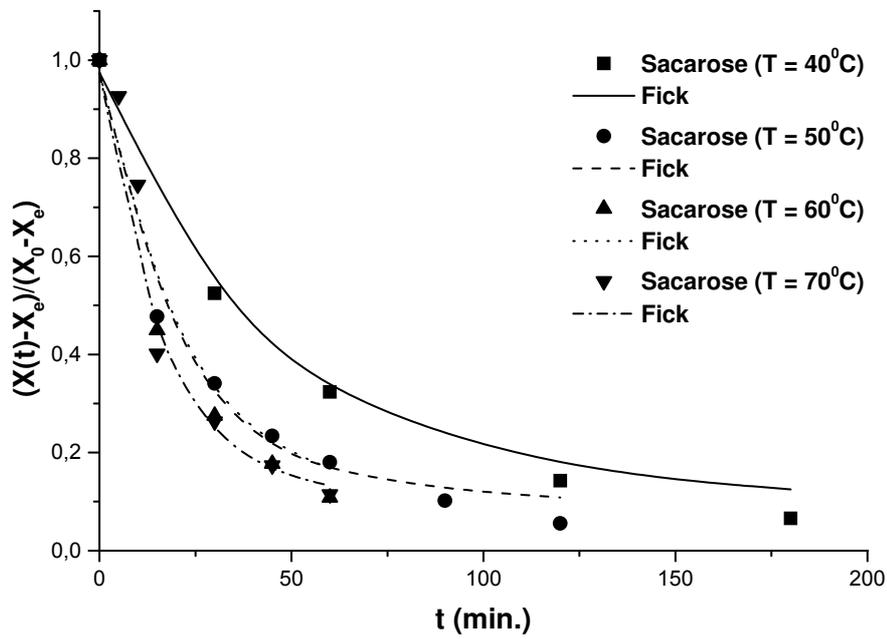


Figura 5.37 – Modelo Difusional para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.

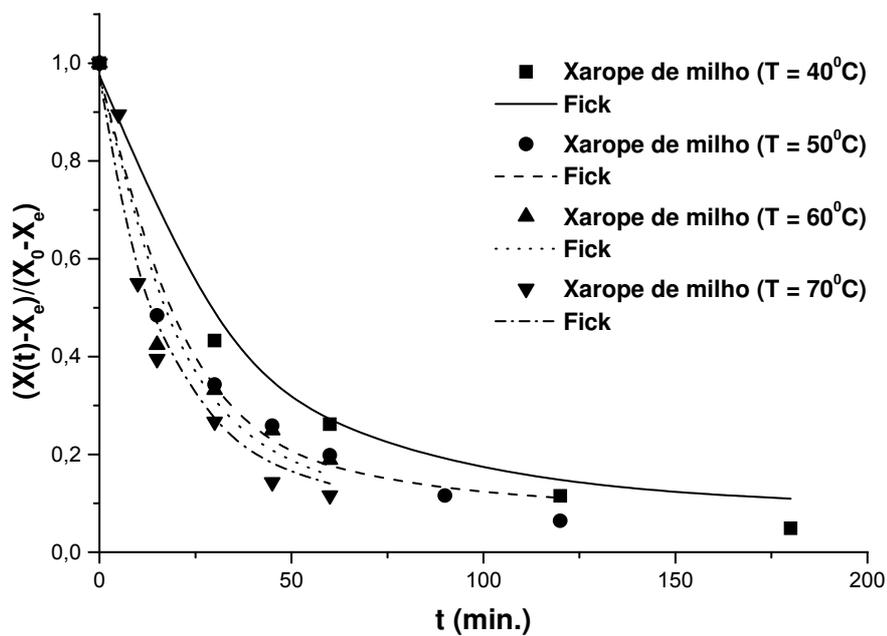


Figura 5.38 – Modelo Difusional para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.

Tabela 5.28 – Parâmetros de ajuste obtidos do Modelo Difusional durante a secagem convectiva de mamão fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.

Pré-tratamento	$D_{ef} \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	E(%)
<b><i>In natura</i></b>			
T = 40°C	2,64	0,9932	48,10
T = 50°C	4,37	0,9916	41,45
T = 60°C	6,29	0,9964	49,31
T = 70°C	8,67	0,9865	18,64
<b>Sacarose</b>			
T = 40°C	0,69	0,9913	22,55
T = 50°C	1,31	0,9881	22,58
T = 60°C	1,44	0,9950	8,46
T = 70°C	1,51	0,9440	20,14
<b>Xarope de milho</b>			
T = 40°C	0,86	0,9911	30,34
T = 50°C	1,38	0,9870	14,72
T = 60°C	1,69	0,9731	15,19
T = 70°C	1,78	0,9603	11,60

De acordo com a Tabela 5.28, observa-se que, quanto maior a temperatura de processo maior o valor da difusividade efetiva de água. Os maiores valores de difusividade efetiva foram obtidos para as amostras *in natura*, devido ao alto conteúdo de umidade presente nestas amostras, facilitando, portanto, o fluxo de saída de água. Em relação aos valores de difusividade encontrados para as amostras que sofreram pré-tratamento osmótico, verifica-se que aquelas pré-tratadas em xarope de milho, apresentaram valores de difusividade maiores do que as pré-tratadas em sacarose. Como as amostras desidratadas osmoticamente em sacarose perderam mais água e incorporaram mais sólidos durante o pré-tratamento osmótico, conseqüentemente, a água livre disponível foi menor nestas amostras, assim como também a taxa de transferência de massa, como já discutido anteriormente no tópico sobre cinética de secagem (Seção 5.3.1).

Ainda pela Tabela 5.28, analisando o coeficiente de correlação, verifica-se que em, praticamente, todas as condições estudadas, os valores obtidos se encontram

próximos à unidade. Já para os valores dos desvios relativos médios, foram obtidos valores relativamente altos, os quais variaram de 8,46 a 49,31%.

De acordo com Contreras e Smyrl (1981), a utilização de xarope de milho no processo osmótico de maçã, seguido de secagem, quando comparada com a utilização de sacarose, torna-se vantajosa, pois, como a difusividade da água depende, entre outros fatores, do conteúdo de sólidos dissolvidos (a difusividade diminui com o aumento dos sólidos), a menor incorporação de sólidos na desidratação osmótica com xarope de milho favorece a saída mais rápida da água presente na fruta, aumentando com isso a difusividade efetiva de água através do material.

Karathanos, Kostaropoulos e Saravacos (1995) reportaram que a difusividade efetiva da água durante secagem convectiva de cilindros de maçã, na temperatura de 55°C, decresceu como consequência do aumento na concentração das soluções osmóticas (15 – 45% p/p) usadas como pré-tratamentos à secagem. Os autores acreditam que este comportamento foi devido à redução da porosidade dos tecidos resultante da infiltração de açúcar e seu subsequente colapso durante a secagem. Islam e Flink (1982) também observaram redução nos valores de difusividade de água em amostras de batata pré-tratadas osmoticamente em soluções de sacarose e sacarose-sal.

Collignan, Raoult-Wack e Themelin (1992) afirmam que a formação de uma camada periférica de sacarose durante a desidratação osmótica é a responsável pelo aumento da resistência ao movimento da água durante a etapa de secagem, reduzindo com isso os valores de difusividade efetiva.

Mazza (1983) observou que ao aumentar a concentração de sacarose de 5 para 60% (aumentando, conseqüentemente, o ganho de sólidos durante o pré-tratamento osmótico), a taxa de secagem decresce. Segundo o autor, este fato ocorreu devido à cristalização da sacarose durante o processo de secagem, diminuindo a difusividade

efetiva de água, dificultando a transferência de calor com a redução da pressão de vapor d'água no produto em consequência da dissolução do açúcar no mesmo.

Comparado os valores obtidos de difusividade com aqueles encontrados na literatura para frutas, verifica-se que os mesmos se encontram dentro da mesma faixa de ordem de grandeza.

Valores de difusividade variando entre 0,32 e  $1,27 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s foram obtidos por Simal e colaboradores (1997) ao estudar a secagem de maçãs *in natura* nas temperaturas de 30 e 60°C, e de 1,98 a  $9,79 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, quando estas foram pré-tratadas osmoticamente, utilizando temperaturas entre 30 e 90°C.

Azoubel (2002), estudando a influência do pré-tratamento osmótico na secagem de caju, encontrou valores de difusividade na faixa de 1,08 a  $2,50 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s para o caju *in natura*, e de 0,86 a  $2,07 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s para o caju desidratado osmoticamente.

As Figuras 5.39, 5.40 e 5.41 mostram a modelagem utilizando o modelo empírico de Page para o mamão fresco e pré-tratado osmoticamente em sacarose e xarope de milho, respectivamente.

Os parâmetros do modelo (K e b) se encontram na Tabela 5.29, juntamente com os valores do coeficiente de correlação (R<sup>2</sup>) e desvio relativo médio (E). Verifica-se que o modelo se ajustou muito bem aos dados experimentais, apresentando baixos valores de desvio relativo médio, sendo, portanto, um bom modelo para predizer a cinética de secagem de mamão Formosa fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.

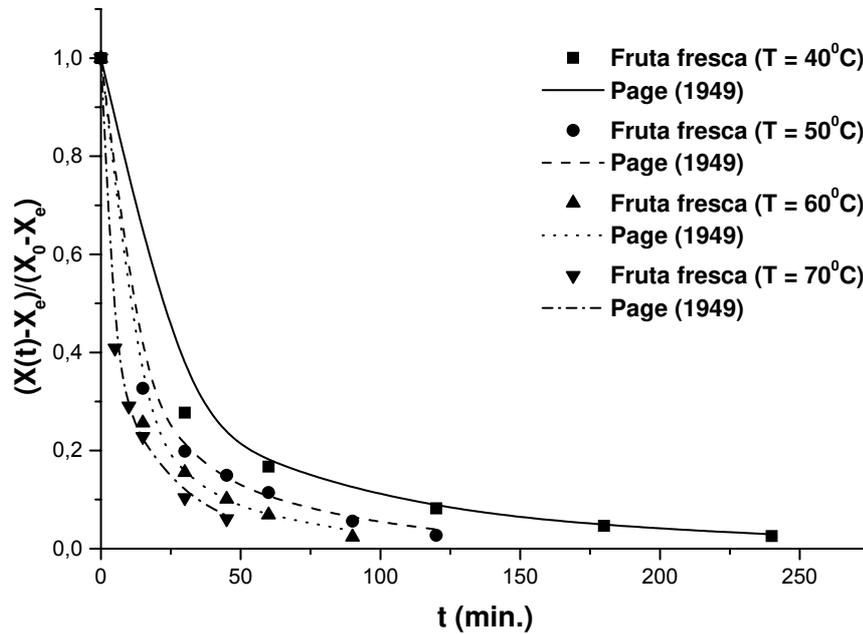


Figura 5.39 – Modelo empírico de Page para o processo de secagem de mamão *in natura* a várias temperaturas de processo.

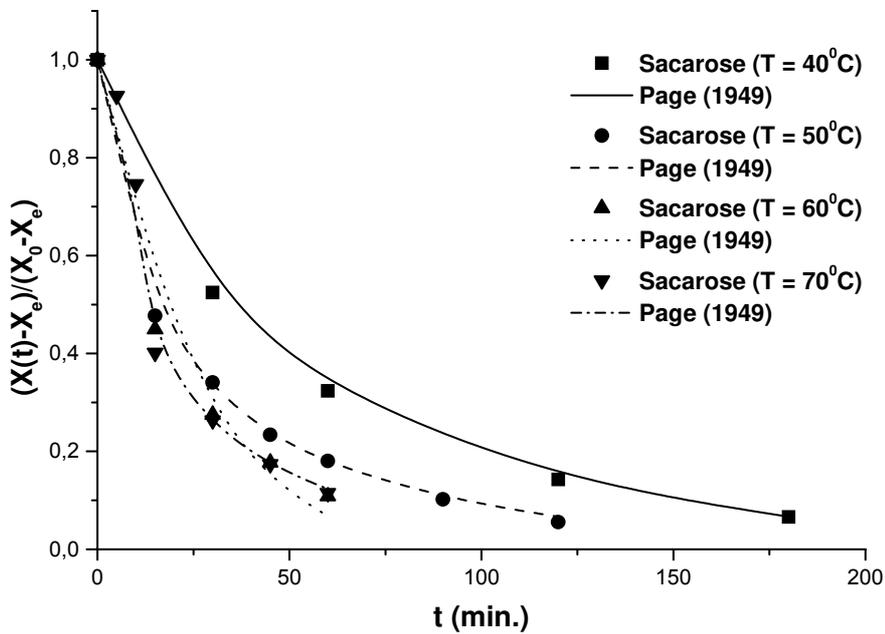


Figura 5.40 – Modelo empírico de Page para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.

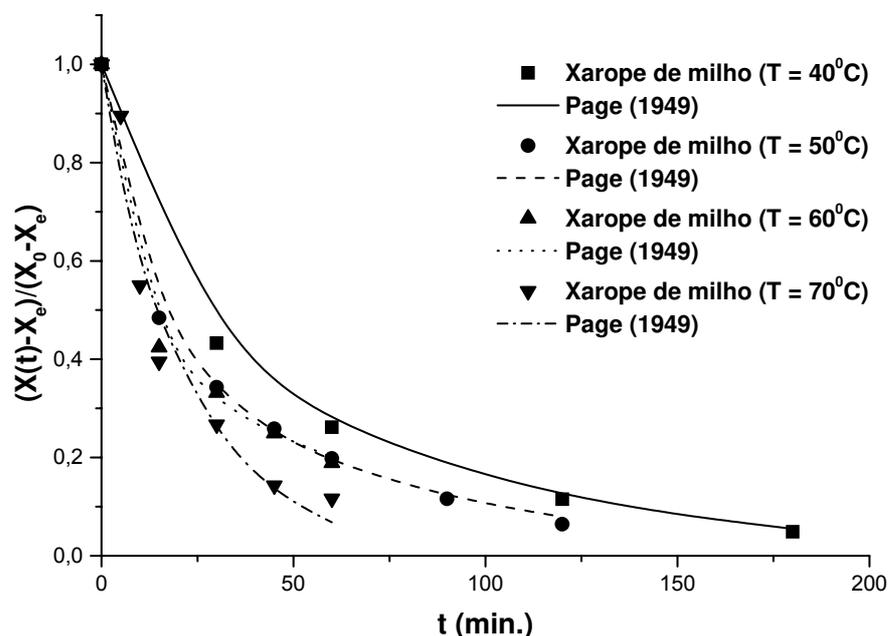


Figura 5.41 – Modelo empírico de Page para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.

Tabela 5.29 – Parâmetros de ajuste obtidos do modelo empírico de Page durante a secagem convectiva de mamão fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.

Pré-tratamento	K	b	R <sup>2</sup>	E(%)
<b><i>In natura</i></b>				
T = 40°C	0,24	0,49	0,9999	2,94
T = 50°C	0,28	0,51	0,9994	4,56
T = 60°C	0,34	0,50	0,9996	2,50
T = 70°C	0,38	0,51	0,9994	4,50
<b>Sacarose</b>				
T = 40°C	0,04	0,80	1,0000	0,49
T = 50°C	0,13	0,64	0,9993	4,61
T = 60°C	0,03	1,12	0,9683	9,19
T = 70°C	0,17	0,61	0,9996	2,63
<b>Xarope de milho</b>				
T = 40°C	0,08	0,70	0,9999	2,68
T = 50°C	0,13	0,61	0,9992	5,22
T = 60°C	0,23	0,47	0,9987	3,04
T = 70°C	0,06	0,93	0,9611	10,68

Observando os valores de K da Tabela 5.29, os mesmos parecem aumentar com o aumento da temperatura do ar de secagem, exceto para a temperatura de 70<sup>o</sup>C. Já para a constante b, parece não haver um comportamento bem definido com relação à temperatura do ar de secagem. Tal fato foi também evidenciado por Park e colaboradores (2002), trabalhando com desidratação osmótica de pêra.

### **5.3.2 – Cinética de encolhimento na secagem convectiva de mamão**

A relação entre o encolhimento do material em função do seu conteúdo de umidade tem sido uma das formas empregadas para se estudar o fenômeno do encolhimento. Kilpatrick, Lower e Van Arsdel (1955) foram um dos primeiros a propor uma relação linear entre o encolhimento sofrido pelo material e a quantidade de água removida. Estudos posteriores realizados por Lozano, Rotstein e Urbicain (1983) mostraram que este comportamento linear foi observado somente para o início do processo de secagem, quando a quantidade de água livre no material é grande. Deste modo, um outro modelo de comportamento não linear foi proposto por Lozano, Rotstein e Urbicain (1983) para descrever o estágio final do processo de secagem.

As Figuras 5.42 a 5.44 mostram a variação do volume das amostras em função de seus conteúdos de umidade para as amostras in natura e pré-tratadas osmoticamente em sacarose e xarope de milho, a várias temperaturas de processo.

A análise da variação do volume das amostras em função da umidade do material foi realizada para uma mesma faixa de umidade, uma vez que as amostras pré-tratadas iniciaram o processo de secagem com diferentes conteúdos de umidade.

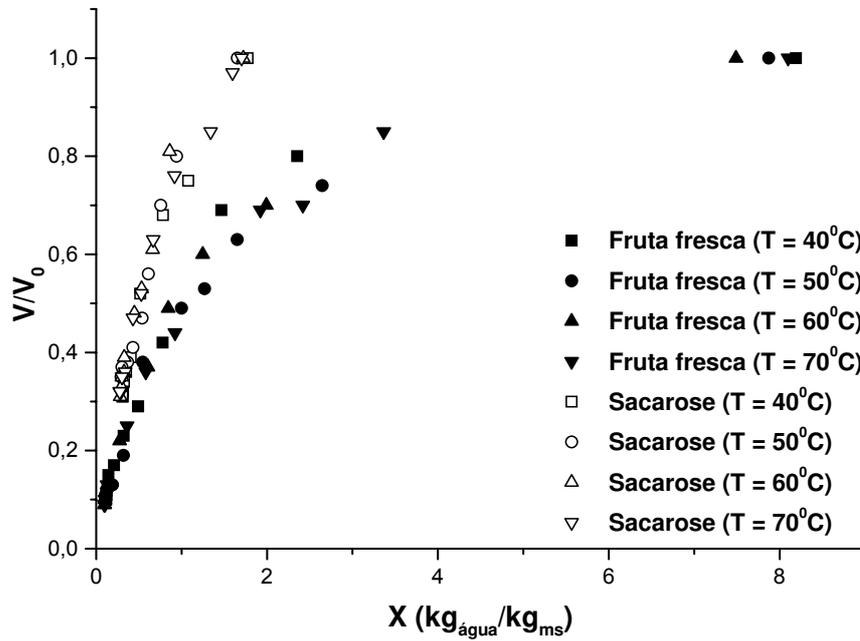


Figura 5.42 – Variação do volume das amostras em função de seus conteúdos de umidade para o processo de secagem de mamão *in natura* e pré-tratado osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.

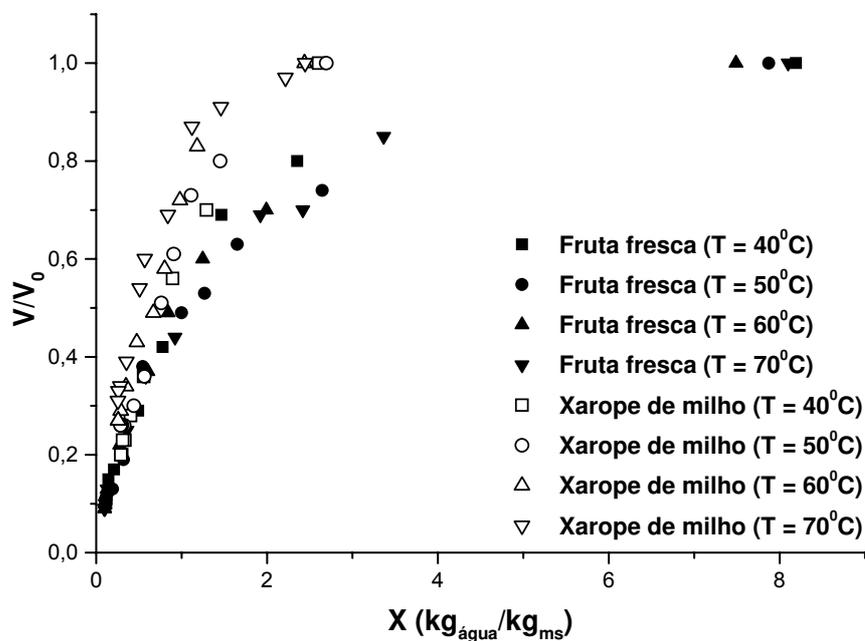


Figura 5.43 – Variação do volume das amostras em função de seus conteúdos de umidade para o processo de secagem de mamão *in natura* e pré-tratado osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.

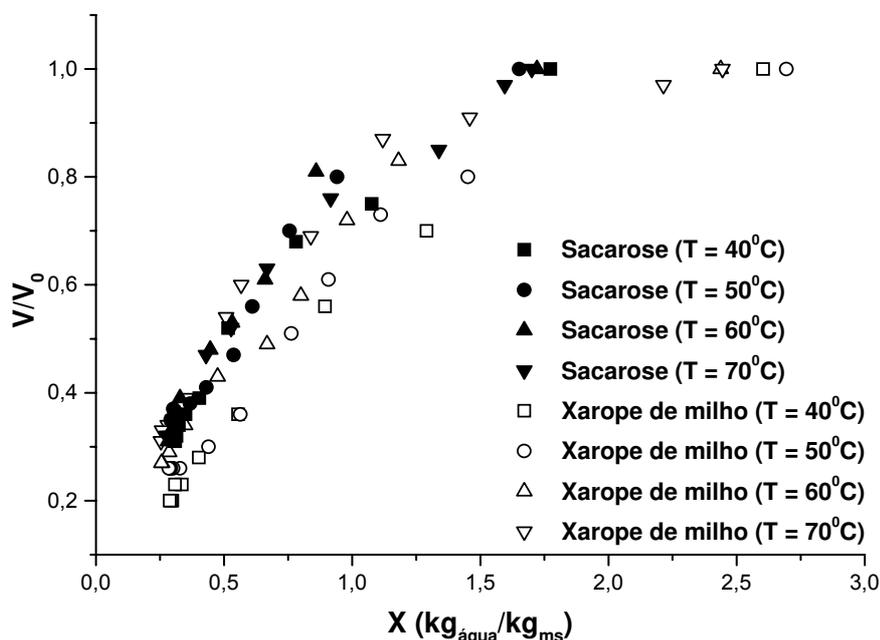


Figura 5.44 – Variação do volume das amostras em função de seus conteúdos de umidade para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em sacarose e xarope de milho a várias temperaturas de processo.

De acordo com as Figuras 5.42 e 5.43, observa-se que as amostras pré-tratadas osmoticamente apresentaram uma variação de volume menor do que aquelas secas sem tratamento algum.

Pela Figura 5.44, comparando-se a variação de volume apenas das amostras pré-tratadas osmoticamente, observa-se que o pré-tratamento com sacarose fez com que as amostras pré-tratadas com este agente osmótico sofressem um menor encolhimento em relação às amostras pré-tratadas em xarope de milho.

Este comportamento apresentado pelas amostras pré-tratadas pode ser atribuído à modificação na matriz sólida durante a etapa de desidratação osmótica pela entrada de soluto, resultando, com isso, em um menor encolhimento na etapa de secagem convectiva, em função da menor mobilidade da matriz sólida (MAYOR; SERENO, 2004).

Para a desidratação osmótica realizada com sacarose, a incorporação de sólidos média foi de, aproximadamente 13%, enquanto que, para o xarope de milho, a incorporação média de sólidos foi de apenas 6%. Essa diferença de sólidos incorporados certamente contribuiu para a menor variação de volume observada entre as amostras pré-tratadas e a amostra *in natura*.

As Figuras 5.45 a 5.47 ilustram a variação no volume de água removida durante o processo de secagem como função da variação do volume das amostras devido ao processo para as amostras frescas e pré-tratadas em sacarose e xarope de milho.

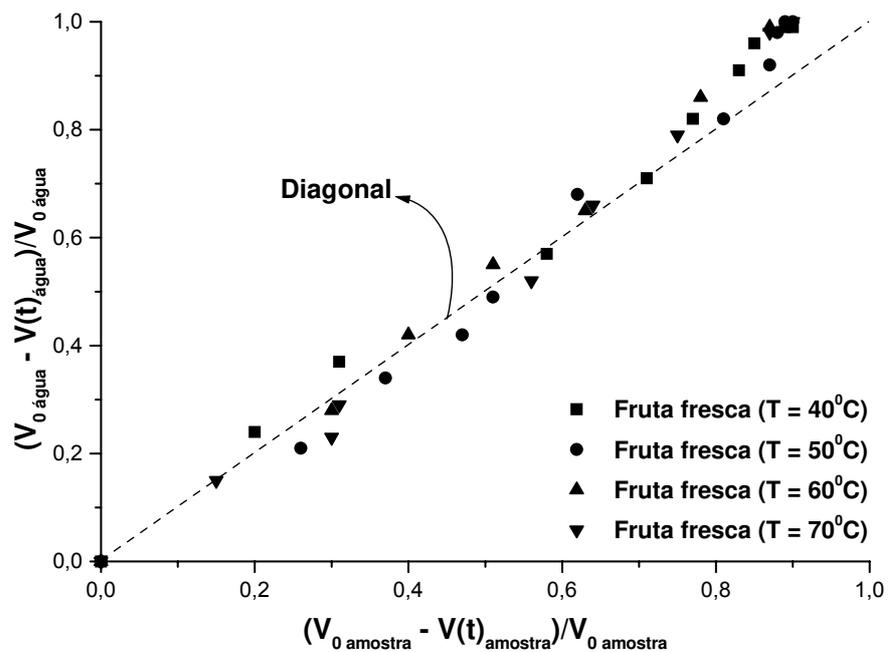


Figura 5.45 – Variação do volume de água removida das amostras em função da variação em seus volumes para o processo de secagem de mamão *in natura* a várias temperaturas de processo.

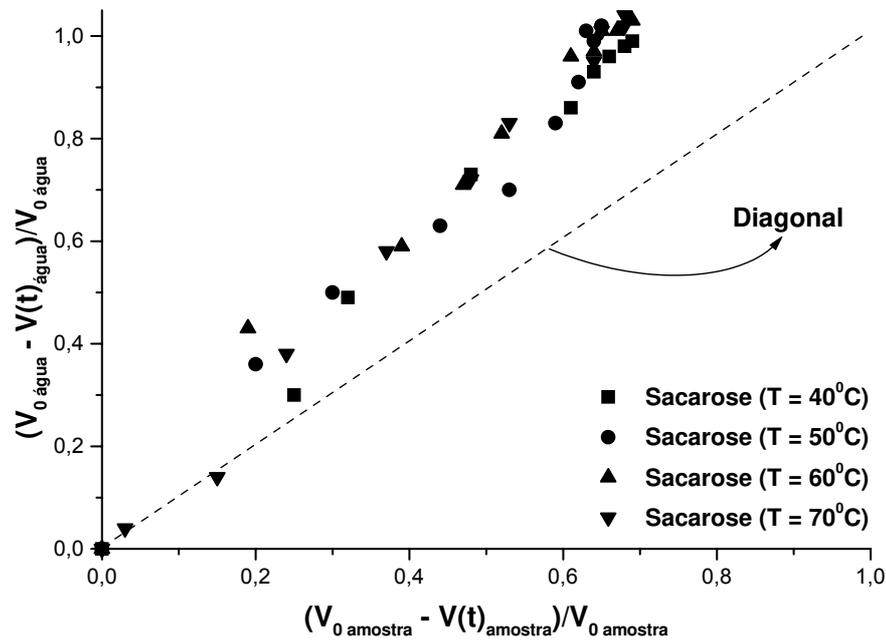


Figura 5.46 – Variação do volume de água removida das amostras em função da variação em seus volumes para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.

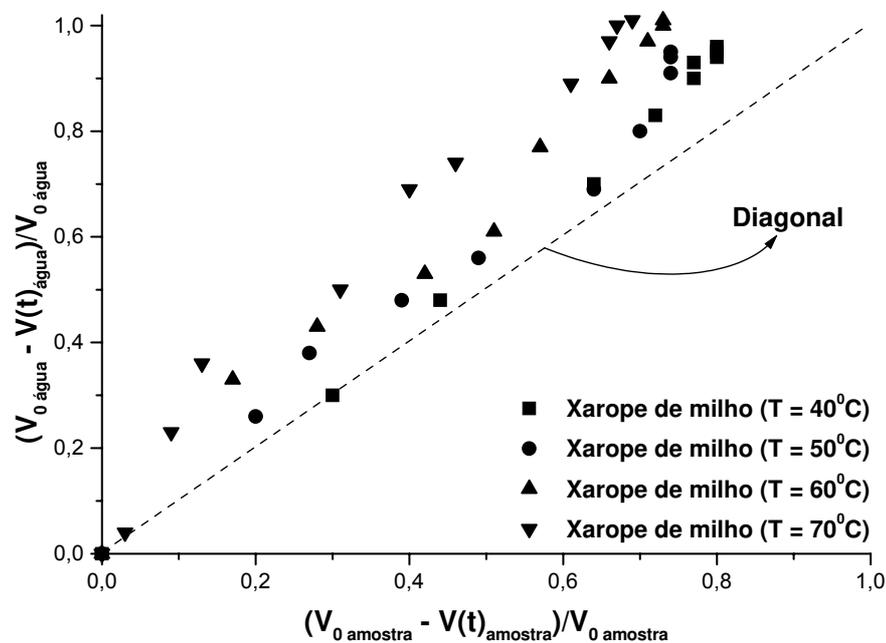


Figura 5.47 – Variação do volume de água removida das amostras em função da variação em seus volumes para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.

De acordo com as Figuras 5.45 a 5.47, parece não haver um comportamento definido com relação à temperatura de processo. Isto sugere que o encolhimento das amostras seja função apenas de seus conteúdos de umidade.

Pela Figura 5.45, percebemos que, praticamente, durante quase todo o processo, o volume de água removida foi igual à redução no volume das amostras, exceto no final do processo (a partir de um valor adimensional de volume igual a 0,8), onde o volume de água removida foi superior à redução no volume das amostras. Tal fato pode ser explicado sabendo-se que a redução no conteúdo de umidade da amostra provoca uma redução na mobilidade da matriz sólida, dificultando o encolhimento desta. Como ainda existe algum fluxo de saída de água do material (por mínimo que seja), isto é um indício de que este esteja se tornando cada vez mais poroso ao final do processo.

Analisando a Figura 5.46, nota-se que o volume de água removida foi maior do que a redução no volume das amostras, durante praticamente todo o processo. Tal comportamento está intimamente relacionado à mobilidade da matriz sólida do material. O fato de o material ter sofrido impregnação durante a etapa prévia, fez com que o mesmo entrasse na etapa de secagem já com uma mobilidade menor de sua matriz sólida, o que certamente dificultou o encolhimento do material.

Da mesma forma que na Figura 5.46, observa-se que o volume de água removida foi maior do que a redução no volume das amostras pré-tratadas em xarope de milho, durante praticamente todo o processo, embora este desvio em relação à diagonal do gráfico tenha sido menor do que para as amostras pré-tratadas em sacarose (Figura 5.47).

Em alguns casos, o equilíbrio mecânico é alcançado quando o volume encolhido do material se iguala ao volume de água removida. Em dados de encolhimento para a secagem de cenoura, apresentados por Krokida e Maroulis (1997) e Lozano, Rotstein e Urbicain (1983), este comportamento foi observado durante todo o processo de secagem. Em outros casos, porém, o volume de água removido durante as fases finais

de secagem é maior que a redução de volume da amostra; tal comportamento foi observado durante as secagens de carne de lula (RAHMAN; POTLURI, 1990; RAHMAN *et al.*, 1996), batata e batata-doce (LOZANO; ROTSTEIN; URBICAIN, 1983; WANG; BRENNAN, 1995) e maçã (KROKIDA; MAROULIS, 1997; LOZANO; ROTSTEIN; URBICAIN, 1980; MOREIRA; FIGUEIREDO; SERENO, 2000). Tal fato pode ser explicado pela diminuição na mobilidade do matriz sólida do material a baixos conteúdos de umidade.

Podemos concluir, então, que para a secagem do mamão Formosa, quanto maior a impregnação durante o pré-tratamento osmótico, menor o encolhimento durante a subsequente secagem.

As Figuras 5.48 a 5.50 ilustram a variação em cada dimensão do material em função do conteúdo adimensional de umidade das amostras frescas e pré-tratadas em sacarose e xarope de milho a várias temperaturas de processo.

De acordo com as Figuras 5.49 a 5.50, nota-se não haver uma influência da temperatura de processo sobre a variação nas dimensões das amostras. Portanto, tal variação foi apenas função do conteúdo de umidade das amostras. Podemos perceber também que a dimensão que sofreu maior variação devido ao processo de secagem foi a espessura, seguida da largura e da profundidade. Tal fato sugere que o fluxo de saída de água das amostras foi praticamente unidirecional.

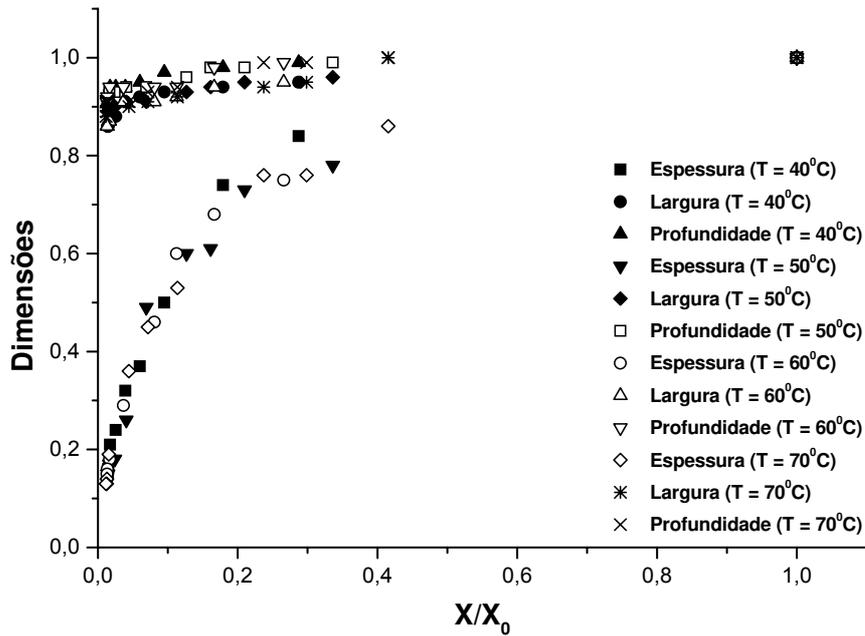


Figura 5.48 – Variação nas dimensões do material em função do conteúdo adimensional de umidade durante a secagem das amostras frescas a várias temperaturas de processo.

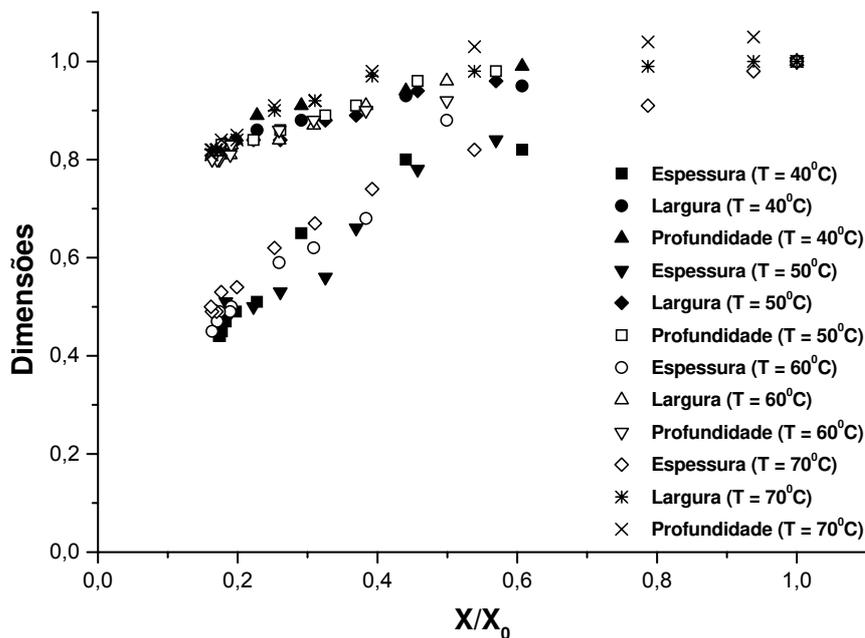


Figura 5.49 – Variação nas dimensões do material em função do conteúdo adimensional de umidade durante a secagem das amostras pré-tratadas em sacarose a várias temperaturas de processo.

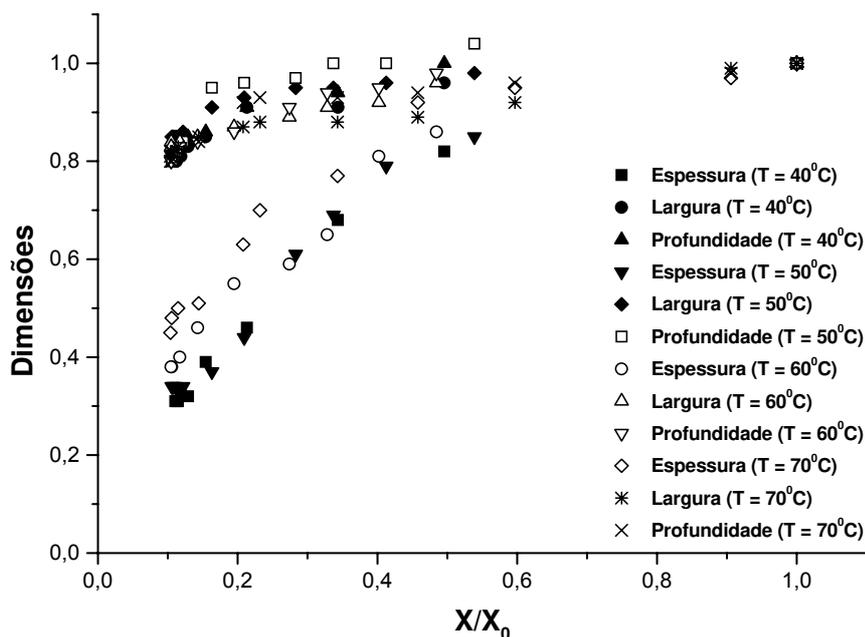


Figura 5.50 – Variação nas dimensões do material em função do conteúdo adimensional de umidade durante a secagem das amostras pré-tratadas em xarope de milho a várias temperaturas de processo.

### 5.3.2.1 – Modelagem do encolhimento na secagem convectiva de mamão

A modelagem da secagem considerando o fenômeno de encolhimento foi realizada, inicialmente, através do Modelo Difusional, considerando a dimensão característica variável ao longo do processo. Foram utilizados também os modelos uniformes 1 e 2 propostos por Suzuki e colaboradores (1976).

As Figuras 5.51 a 5.53 ilustram a modelagem realizada com o Modelo Difusional, considerando encolhimento, para as amostras frescas, pré-tratadas em sacarose e em xarope de milho, respectivamente.

A Tabela 5.30 mostra os parâmetros de ajuste obtidos utilizando o Modelo Difusional com encolhimento para as amostras *in natura*, pré-tratadas em sacarose e em xarope de milho.

Quando comparamos os resultados obtidos pela Tabela 5.30 (com encolhimento) com aqueles encontrados na Tabela 5.28 (sem encolhimento), percebemos que os primeiros resultados são mais coerentes com a cinética de secagem de mamão Formosa fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho. Nota-se também que, de maneira geral, os valores de desvio relativo médio foram inferiores quando foi considerado o encolhimento no Modelo Difusional. Portanto, é mais interessante considerar os valores de difusividade efetiva de água obtidos quando o fenômeno de encolhimento foi levado em conta como sendo os mais representativos do processo de secagem de mamão Formosa *in natura* e pré-tratado osmoticamente em sacarose e xarope de milho.

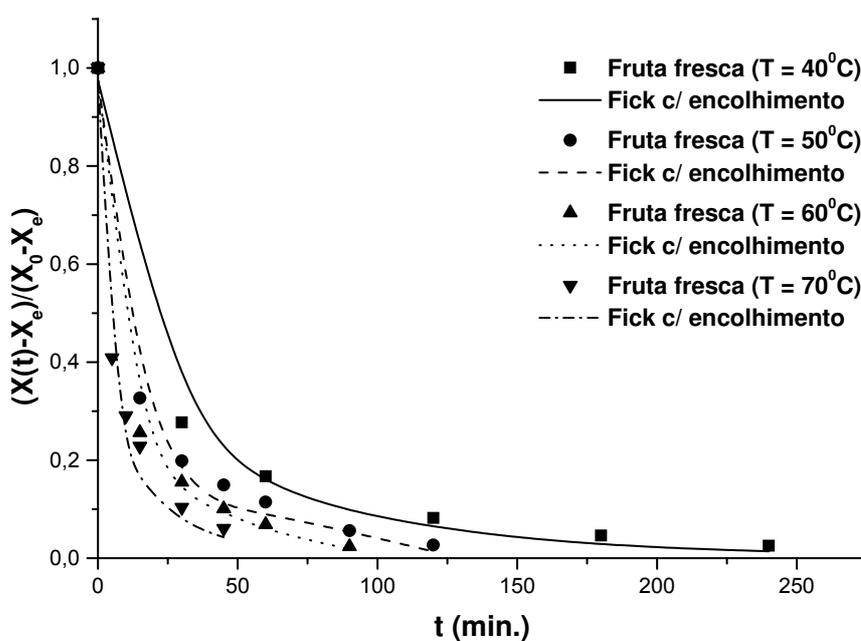


Figura 5.51 – Modelo Difusional com encolhimento para o processo de secagem de mamão *in natura* a várias temperaturas de processo.

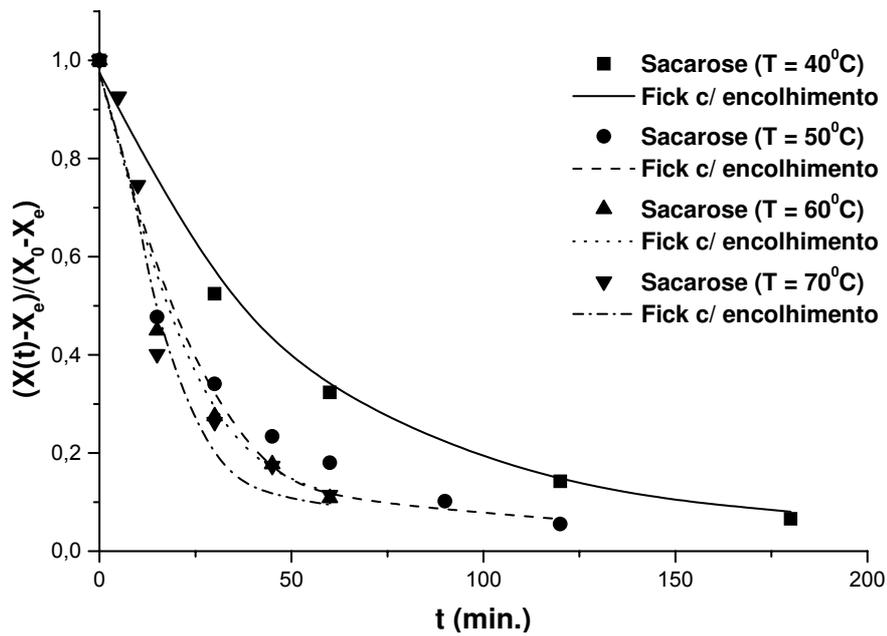


Figura 5.52 – Modelo Difusional com encolhimento para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em sacarose a várias temperaturas de processo.

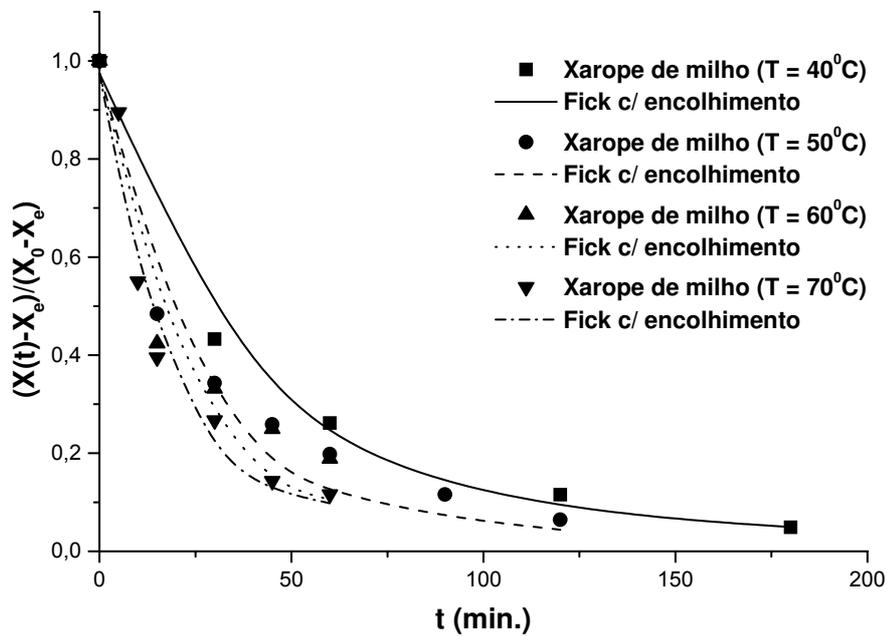


Figura 5.53 – Modelo Difusional com encolhimento para o processo de secagem de mamão pré-tratado osmoticamente em xarope de milho a várias temperaturas de processo.

Tabela 5.30 – Parâmetros de ajuste obtidos do Modelo Difusional considerando o encolhimento durante a secagem convectiva de mamão fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.

Pré-tratamento	$D_{ef} \times 10^9$ (m <sup>2</sup> /s)	R <sup>2</sup>	E(%)
<b><i>In natura</i></b>			
T = 40°C	1,69	0,9952	24,72
T = 50°C	2,48	0,9924	18,61
T = 60°C	3,22	0,9988	11,74
T = 70°C	5,78	0,9700	18,95
<b>Sacarose</b>			
T = 40°C	0,43	0,9973	8,65
T = 50°C	0,77	0,9693	19,45
T = 60°C	1,23	0,9645	21,48
T = 70°C	1,32	0,9771	8,89
<b>Xarope de milho</b>			
T = 40°C	0,50	0,9862	11,26
T = 50°C	0,82	0,9600	14,61
T = 60°C	1,17	0,9247	21,56
T = 70°C	1,38	0,9592	11,11

As Figuras 5.54, 5.55 e 5.56 mostram a modelagem realizada com os modelos uniformes 1 e 2 propostos por Suzuki e colaboradores (1976) para as amostras frescas, pré-tratadas em sacarose e em xarope de milho, respectivamente.

A Tabela 5.31 ilustra os parâmetros de ajuste obtidos utilizando os modelos uniformes propostos por Suzuki e colaboradores (1976) para o processo de secagem das amostras *in natura*, pré-tratadas em sacarose e em xarope de milho.

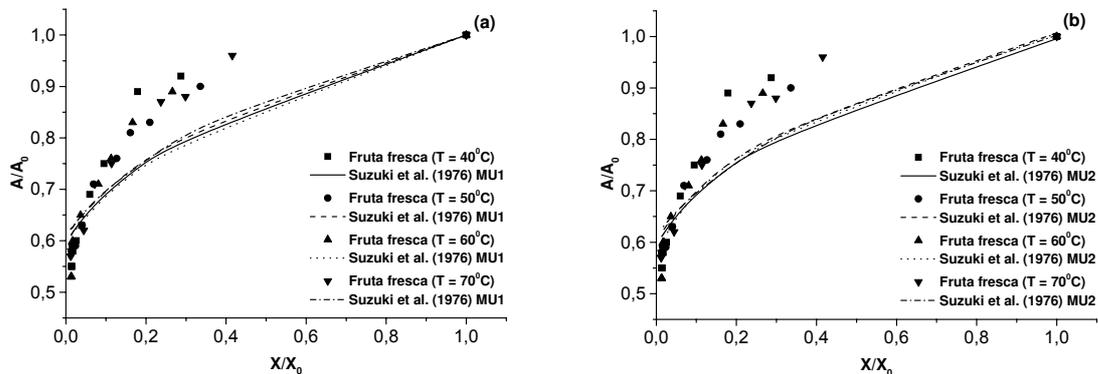


Figura 5.54 – Modelos propostos por Suzuki e colaboradores (1976) para o processo de secagem da fruta fresca a várias temperaturas de processo. (a) Modelo uniforme 1 e (b) uniforme 2.

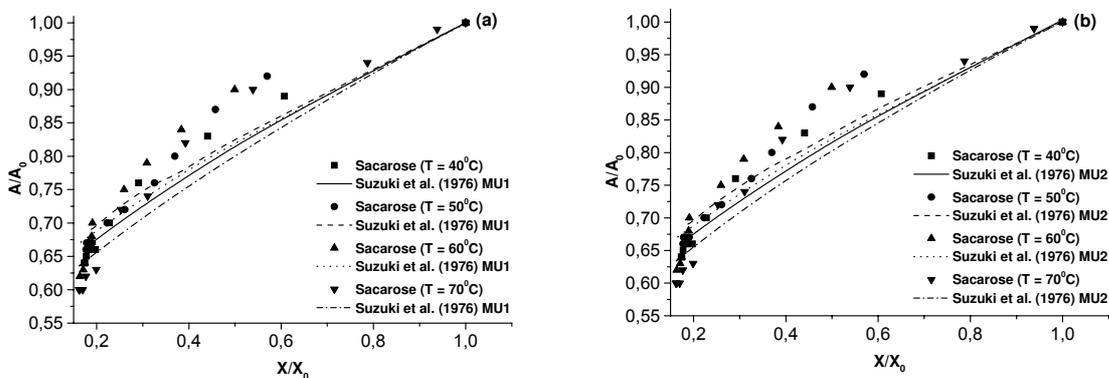


Figura 5.55 – Modelos propostos por Suzuki e colaboradores (1976) para o processo de secagem da fruta pré-tratada em sacarose a várias temperaturas de processo. (a) Modelo uniforme 1 e (b) uniforme 2.

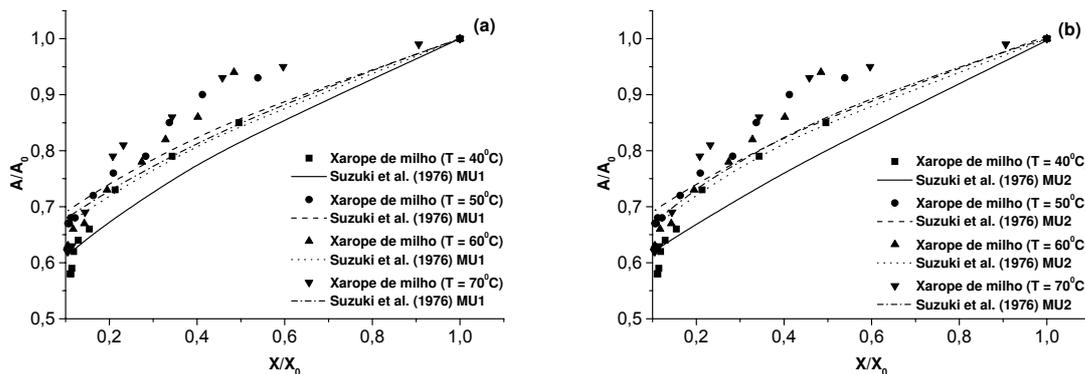


Figura 5.56 – Modelos propostos por Suzuki e colaboradores (1976) para o processo de secagem da fruta pré-tratada em xarope de milho a várias temperaturas de processo. (a) Modelo uniforme 1 e (b) uniforme 2.

Tabela 5.31 – Parâmetros de ajuste obtidos dos modelos uniformes propostos por Suzuki e colaboradores (1976) na secagem convectiva de mamão fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.

Pré-tratamento	Modelo uniforme 1			Modelo uniforme 2		
	n	R <sup>2</sup>	E(%)	n	R <sup>2</sup>	E(%)
<b>In natura</b>						
T = 40°C	0,22	0,8002	8,08	0,21	0,8073	7,94
T = 50°C	0,22	0,8744	6,28	0,21	0,8941	5,81
T = 60°C	0,23	0,8098	8,85	0,20	0,8635	7,51
T = 70°C	0,22	0,8586	7,09	0,23	0,8497	7,37
<b>Sacarose</b>						
T = 40°C	0,45	0,9624	2,72	0,50	0,9638	2,70
T = 50°C	0,46	0,9206	3,01	0,42	0,9295	2,82
T = 60°C	0,46	0,8659	5,19	0,46	0,8699	5,13
T = 70°C	0,52	0,9288	4,71	0,48	0,9336	4,53
<b>Xarope de milho</b>						
T = 40°C	0,39	0,9478	3,83	0,57	0,9219	4,65
T = 50°C	0,31	0,9120	3,37	0,34	0,9088	3,49
T = 60°C	0,35	0,8823	4,59	0,30	0,9012	4,13
T = 70°C	0,35	0,8438	6,65	0,26	0,8826	5,70

Observando-se os coeficientes de correlação juntamente com os valores dos desvios médios relativos contidos na Tabela 5.31, nota-se que o modelo utilizado ajustou-se de maneira satisfatória aos dados experimentais, tanto para a amostra *in natura*, como para as amostras pré-tratadas osmoticamente.

Com relação aos valores do coeficiente n, verificou-se que as amostras secas *in natura* foram as que apresentaram um menor valor deste parâmetro, seguida das amostras pré-tratadas em xarope de milho e sacarose.

Não se observou uma tendência definida do coeficiente de encolhimento em relação à temperatura do ar de secagem.

A fim de se poder interpretar melhor o significado do parâmetro n, faremos algumas observações. Sabe-se que n representa um fator de proporcionalidade entre a

variação na área superficial total da amostra e a variação em seu volume, ao longo do processo de secagem. Sabe-se também que a variação adimensional do volume é sempre menor do que a variação adimensional da área. Sendo assim, o parâmetro  $n$  funciona como um fator de correção, a fim de tornar a variação da área igual à variação correspondente no volume. Portanto, quanto maior for a variação entre a área e o volume, menor será o valor de  $n$  correspondente a esta variação. Desta forma, compilando as informações obtidas acerca da cinética de encolhimento com aquelas sobre o significado do parâmetro  $n$ , quanto menor o valor de  $n$ , maior o nível de encolhimento sofrido pelas amostras.

### 5.3.3 – Energia de ativação

Trata-se de um parâmetro de processo bastante importante e pode ser obtida através da dependência existente entre a difusividade efetiva de água com a temperatura do processo. A equação que relaciona todos estes termos é a conhecida equação de Arrhenius:

$$D_{ef} = D_0 \text{Exp}\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5.8)$$

A equação é apresentada como função linear relacionada com o logaritmo da difusividade e o inverso da temperatura.

$$\text{Ln}(D_{ef}) = \text{Ln}(D_0) + \frac{E_a}{RT} \quad (5.9)$$

A energia de ativação pode ser obtida mediante regressão linear da Equação (5.9), de posse dos dados de difusividade efetiva de água a várias temperaturas de processo.

Os valores de energia de ativação obtidos através dos dados de difusividade estimados pelo Modelo Difusional considerando o fenômeno de encolhimento são apresentados na Tabela 5.32.

Tabela 5.32 – Dados de energia de ativação na secagem convectiva de mamão fresco e pré-tratado osmoticamente em soluções de sacarose e xarope de milho.

Pré-tratamento	$E_a$ (KJ/mol)	$R^2$
<i>In natura</i>	35,20	0,9680
Sacarose	34,39	0,9287
Xarope de milho	30,74	0,9643

Os valores encontrados para o mamão estão próximos daqueles encontrados na literatura para frutas como pêra *d'anjou* (24,30 - 31,20 KJ/mol), pedúnculo de caju (38,49 kJ/mol), abacaxi (35,50 kJ/mol), maçã (39,70 kJ/mol) e banana (38,8 kJ/mol), conforme estudos de Park e colaboradores (2002), Azoubel (2002), Uddin e Hawlander (1990), Simal e colaboradores (1997) e Johnson, Brennan e Addo-Yobo (1998), respectivamente.

#### 5.4 – QUALIDADE DO PRODUTO FINAL PROCESSADO

A análise de qualidade do produto final processado foi realizada mediante determinações da atividade de água ( $a_w$ ) e do conteúdo de carotenóides totais, a fim de se avaliar a influência de cada tratamento.

Os resultados obtidos para a atividade de água se encontram na Tabela 5.33, juntamente com os dados de umidade final após o processamento ( $X_{final}$ ) e do tempo de processo necessário para se atingir tal conteúdo de umidade ( $t_{final}$ ).

De acordo com a Tabela 5.33, observa-se que todas as amostras atingiram um valor de atividade de água onde é possível impedir o desenvolvimento de todos os microrganismos patogênicos mencionados na Tabela 3.4 do item 3.2.3.3, sobre atividade de água.

Tabela 5.33 – Dados de atividade de água das amostras de mamão após o processamento.

<b>Pré-tratamento</b>	<b>X<sub>final</sub>(kg<sub>água</sub>/kg<sub>ms</sub>)</b>	<b>t<sub>final</sub>(min.)</b>	<b>a<sub>w</sub></b>
<b><i>In natura</i></b>			
T = 40 <sup>o</sup> C	0,1429	360	0,495
T = 50 <sup>o</sup> C	0,1288	240	0,467
T = 60 <sup>o</sup> C	0,1257	120	0,441
T = 70 <sup>o</sup> C	0,1261	90	0,466
<b>Sacarose</b>			
T = 40 <sup>o</sup> C	0,3243	300	0,542
T = 50 <sup>o</sup> C	0,3023	240	0,438
T = 60 <sup>o</sup> C	0,2992	180	0,321
T = 70 <sup>o</sup> C	0,3001	120	0,344
<b>Xarope de milho</b>			
T = 40 <sup>o</sup> C	0,3356	240	0,458
T = 50 <sup>o</sup> C	0,3282	180	0,451
T = 60 <sup>o</sup> C	0,3479	120	0,536
T = 70 <sup>o</sup> C	0,3524	90	0,699

Os conteúdos de umidade final foram estipulados em função da aparência global do produto final processado, para cada tratamento.

A Tabela 5.34 mostra os resultados obtidos para o conteúdo total de carotenóides (TC) e para as perdas de carotenóides (PC) das amostras processadas, para cada tratamento utilizado, juntamente com os dados de umidade final após o processamento e do tempo de processo necessário para se atingir tal conteúdo de umidade. Os resultados aqui encontrados para o teor de carotenóides totais das amostras processadas mostram que, na realidade, o que estamos evidenciando é o efeito combinado da temperatura do ar de secagem e do tempo de exposição ao processo sobre a degradação dos carotenóides, e não o efeito da temperatura de forma isolada.

Tabela 5.34 – Conteúdo total de carotenóides das amostras de mamão após o processamento.

Pré-tratamento	X <sub>final</sub> (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ms</sub> )	t <sub>final</sub> (min.)	TC (µg/g ms)	PC (%)
<b><i>In natura</i></b>				
T = 40 <sup>o</sup> C	0,1429	360	173,41	84,31
T = 50 <sup>o</sup> C	0,1288	240	196,15	82,71
T = 60 <sup>o</sup> C	0,1257	120	107,82	90,33
T = 70 <sup>o</sup> C	0,1261	90	135,08	87,88
<b>Sacarose</b>				
T = 40 <sup>o</sup> C	0,3243	300	293,69	78,34
T = 50 <sup>o</sup> C	0,3023	240	111,77	90,98
T = 60 <sup>o</sup> C	0,2992	180	353,05	73,21
T = 70 <sup>o</sup> C	0,3001	120	184,28	86,43
<b>Xarope de milho</b>				
T = 40 <sup>o</sup> C	0,3356	240	83,80	93,64
T = 50 <sup>o</sup> C	0,3282	180	235,21	81,03
T = 60 <sup>o</sup> C	0,3479	120	306,74	77,41
T = 70 <sup>o</sup> C	0,3524	90	281,53	79,24

Rodriguez-Amaya (1999), comenta que um maior tempo de processamento além de aumentar a degradação pelo calor, aumenta ainda o tempo de exposição do alimento ao oxigênio, que é um agente catalisador da oxidação dos carotenóides. Comparando-se as amostras pré-tratadas osmoticamente com as amostras *in natura*, verifica-se que a perda média de carotenóides é, praticamente, a mesma, ou seja, de 86,31% para as amostras *in natura*, de 82,24% para as amostras pré-tratadas em sacarose e de 82,83% para as amostras pré-tratadas em xarope de milho, considerando um conteúdo inicial médio de carotenóides igual a 1217,52µg/g ms. Tal fato pode ser explicado exatamente em função de os tempos finais de processamento terem sido bastante próximos.

Em relação às amostras *in natura*, a diferença percentual da perda de carotenóides entre as temperaturas de 50 e 60<sup>o</sup>C, que foram as condições de mínima e máxima perda, respectivamente, foi de 57,69% do valor médio das perdas encontradas para as amostras frescas. Sendo esta diferença bastante significativa do ponto de vista

de qualidade, foi escolhido o tratamento na temperatura de 50<sup>o</sup>C como sendo o ideal para ser avaliado na etapa de análise sensorial.

Para as amostras pré-tratadas em sacarose, a diferença percentual da perda de carotenóides entre as temperaturas de 60 e 50<sup>o</sup>C foi de 40,98% do valor médio das perdas encontradas para as amostras pré-tratadas com o referido agente osmótico. Portanto, foi escolhido o tratamento na temperatura de 60<sup>o</sup>C como sendo o ideal para ser avaliado na etapa de análise sensorial.

Para as amostras pré-tratadas em xarope de milho, a diferença percentual da perda de carotenóides entre as temperaturas de 60 e 40<sup>o</sup>C foi de 43,85% do valor médio das perdas encontradas para as amostras pré-tratadas em xarope de milho. Sendo assim, o tratamento na temperatura de 60<sup>o</sup>C foi escolhido como sendo o ideal para ser avaliado na etapa de análise sensorial.

## 5.5 – AVALIAÇÃO SENSORIAL DO PRODUTO FINAL PROCESSADO

O perfil dos consumidores que participaram do teste de aceitabilidade se encontra ilustrado na Figura 5.57, onde se verifica que a maioria dos provadores utilizados foi do sexo feminino, com faixa etária entre 20 e 25 anos e são consumidores de frutas desidratadas do tipo passa.

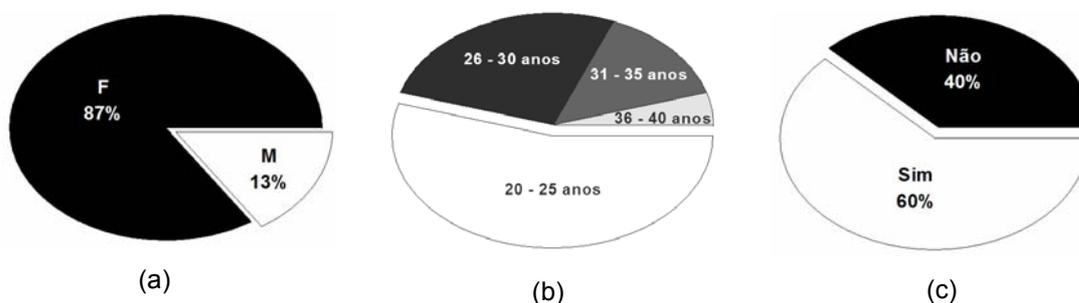


Figura 5.57 – Perfil dos provadores utilizados nos testes de aceitação das amostras de mamão passa. (a) sexo, (b) faixa etária e (c) consumo de frutas desidratadas do tipo passa.

Os resultados do teste sensorial de aceitação para as amostras secas sem tratamento e pré-tratadas osmoticamente se encontram ilustrados nos histogramas de frequência referentes a todos os atributos sensoriais avaliados no presente trabalho (Figura 5.58).

Observando-se a Figura 5.58, verifica-se que a maioria das respostas obtidas se encontra na faixa que indica a aceitação dos produtos, ou seja, valores iguais ou superiores a 5, para todos os atributos avaliados.

De acordo com a Figura 5.58 é possível perceber que, de maneira geral, as amostras pré-tratadas osmoticamente apresentaram notas superiores àquelas sem tratamento para todos os atributos avaliados, principalmente, com relação à aparência.

A Tabela 5.35 mostra a Análise de Variância feita para cada atributo sensorial avaliado tendo como fontes de variação as amostras e os provadores. Podemos perceber que o valor da distribuição F calculado para os provadores foi significativo para todos os atributos avaliados, o que é normal em equipes de consumidores.

A Tabela 5.36 mostra os valores médios de aceitabilidade para os atributos de aparência, aroma, sabor, textura e impressão global de cada um dos três tipos de amostra avaliados juntamente com os resultados do teste de Tukey. É possível notarmos que apenas para o atributo de aparência é que houve diferença significativa entre as amostras sem e com pré-tratamento osmótico. Percebemos ainda um maior nível de aceitação das amostras pré-tratadas em relação àquelas sem tratamento, para o mesmo atributo mencionado. Por outro lado, não houve diferença significativa entre os tratamentos para os demais atributos analisados. Embora não tenham sido estatisticamente significativas, é possível observar que, de maneira geral, as médias para os atributos de aroma, sabor, textura e impressão global das amostras pré-tratadas osmoticamente foram maiores do que aquelas obtidas para as amostras sem tratamento, exceto para o atributo de textura das amostras pré-tratadas em xarope de milho.

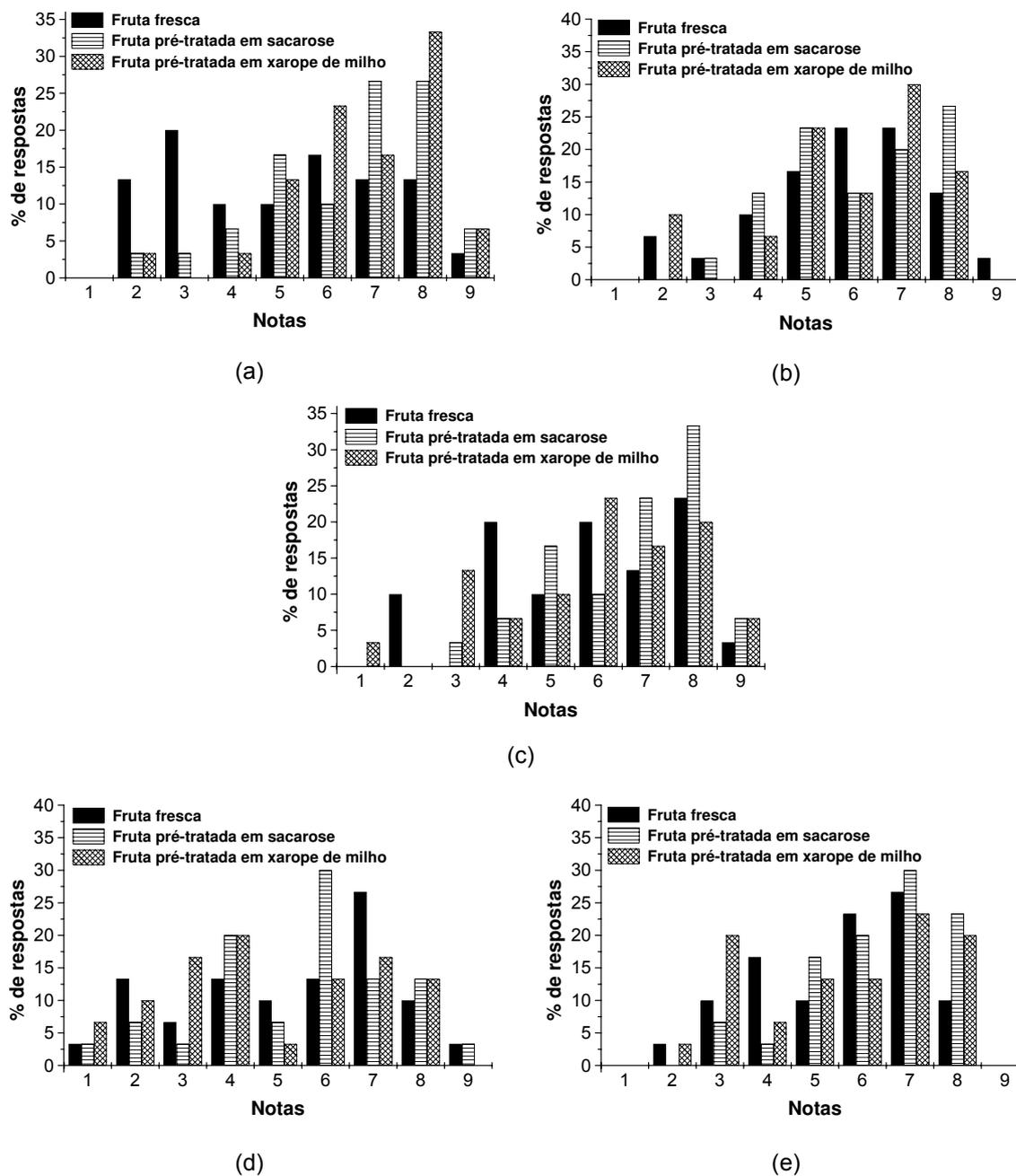


Figura 5.58 – Histograma de freqüência para os atributos sensoriais de (a) aparência, (b) aroma, (c) sabor, (d) textura e (e) impressão global das amostras de mamão secas sem tratamento e pré-tratadas osmoticamente.

Tabela 5.35 – ANOVA para cada atributo sensorial analisado.

<b>Aparência</b>				
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>
Amostra	2	46,82	23,41	10,73*
Provador	29	171,12	5,90	2,71*
Resíduo	58	126,51	2,18	-
Total	89	344,46	-	-
<b>Aroma</b>				
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>
Amostra	2	1,42	0,71	0,45(ns)
Provador	29	157,82	5,44	3,41*
Resíduo	58	92,58	1,60	-
Total	89	251,82	-	-
<b>Sabor</b>				
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>
Amostra	2	13,76	6,88	2,61(ns)
Provador	29	153,16	5,28	2,00*
Resíduo	58	152,91	2,64	-
Total	89	319,82	-	-
<b>Textura</b>				
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>
Amostra	2	8,62	4,31	1,29(ns)
Provador	29	203,79	7,03	2,11*
Resíduo	58	193,38	3,33	-
Total	89	405,79	-	-
<b>Impressão global</b>				
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>
Amostra	2	10,29	5,14	3,30*
Provador	29	160,46	5,53	3,55*
Resíduo	58	90,38	1,56	-
Total	89	261,12	-	-

\* significativo a 5%.

Tabela 5.36 – Análise de médias para todos os atributos avaliados das amostras de mamão após processamento

<b>Atributo</b>	<b>Fruta fresca</b>	<b>Pré-tratada em sacarose</b>	<b>Pré-tratada em xarope de milho</b>
Aparência	5,07 <sup>a</sup>	6,47 <sup>b</sup>	6,70 <sup>b</sup>
Aroma	5,87 <sup>a</sup>	6,13 <sup>a</sup>	5,87 <sup>a</sup>
Sabor	5,80 <sup>a</sup>	6,70 <sup>a</sup>	5,97 <sup>a</sup>
Textura	5,30 <sup>a</sup>	5,50 <sup>a</sup>	4,77 <sup>a</sup>
Impressão global	5,60 <sup>a</sup>	6,33 <sup>a</sup>	5,63 <sup>a</sup>

As letras distintas indicam haver diferença significativa entre os tratamentos a 5% de significância.

### 5.5.1 – Considerações finais

De acordo com o que foi discutido anteriormente, pudemos perceber que as amostras pré-tratadas osmoticamente geraram um produto final com uma aparência significativamente melhor do que as amostras que não sofreram tratamento algum, não havendo diferenças para os demais atributos em função do tipo de tratamento utilizado. Tal fato se constitui de um aspecto positivo quando se sabe que a aparência é um atributo decisivo (o primeiro, certamente) na intenção de compra deste tipo de produto por parte dos consumidores.

## **6 – CONCLUSÕES**

- A melhor combinação de variáveis obtida para a desidratação osmótica do mamão Formosa foi: 34<sup>0</sup>C, 56% p/p e 210 minutos, para a sacarose; e 46<sup>0</sup>C, 56% p/p e 210 minutos, para o xarope de milho;
- As amostras pré-tratadas em sacarose apresentaram maiores valores de perda de água e ganho de sólidos do que aquelas pré-tratadas em xarope de milho;
- O volume das amostras, considerando o mesmo conteúdo de umidade adimensional, foi praticamente igual, para ambos os agentes osmóticos;
- As difusividades efetivas de água e sólidos, obtidas através da modelagem do processo de desidratação osmótica, foram da ordem de 10<sup>-10</sup>m<sup>2</sup>/s;
- As maiores taxas de secagem foram obtidas para a fruta fresca, seguida das pré-tratadas em xarope de milho e em sacarose;
- O volume das amostras, considerando o mesmo conteúdo de umidade, foi maior para as amostras pré-tratadas em sacarose, seguidas daquelas pré-tratadas em xarope de milho e sem tratamento algum;
- As difusividades efetivas de água, para o processo de secagem, foram da ordem de 10<sup>-9</sup>m<sup>2</sup>/s;
- As condições de secagem que geraram um produto final com melhor qualidade foram: 50<sup>0</sup>C, para a fruta fresca, e 60<sup>0</sup>C, para as amostras pré-tratadas;

- As amostras pré-tratadas osmoticamente tiveram um maior nível de aceitação em relação ao atributo aparência, não havendo diferença significativa em relação aos atributos de aroma, sabor, textura e impressão global.

## **7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Utilizar como variável independente a pressão osmótica das soluções osmóticas, ao invés de concentração % p/p, a fim de se comparar, de fato, as diferenças entre agentes osmóticos;
- Avaliar também a influência da viscosidade da solução osmótica nas taxas de perda de água e ganho de sólidos;
- Testar a combinação de agentes osmóticos (soluções ternárias) a fim de se conseguir um efeito barreira satisfatório do ponto de vista de processo e, conseqüentemente, sensorial;
- Modelar o fenômeno de encolhimento na secagem através do Modelo Difusional considerando “fronteiras móveis”;
- Utilizar outros métodos de secagem tais como a liofilização, secagem por “spray”, dentre outros, a fim de se obter produtos finais diferenciados, os quais possam fazer parte da composição de alimentos que já são comumente consumidos.

## 7 – REFERÊNCIAS

A.O.A.C. (Association of Official Analytical Chemists). *Official Methods of Analysis*. 14<sup>a</sup> ed., Arlington, 1984.

ACHANTA, S.; OKOS, M. R.; CUSHMAN, J. H.; KESSLER, D. P. Moisture transport in shrinking gels during saturated drying. *AIChE Journal*, v.43, p.2112–2122, 1997.

AGUILERA, J. M. Generation of engineered structures in gels. In H. G. SCHWARTZBERG, R. W. HARTEL (Eds.), *Physical Chemistry of Foods*, New York: Marcel Dekker Inc. p.391–393, 1992.

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

AKIYAMA, T.; HAYAKAWA, K. Heat and moisture transfer and hygrophysical changes in elastoplastic hollow cylinder-food during drying. *Journal of Food Science*, v.65, p.315–323, 2000.

ANTUNES, A. J.; CANHOS, W. P. Aditivos em alimentos. São Paulo – SP. *Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo*, 178 p., 1983.

ARAB, L.; STECK, S. Lycopene and cardiovascular disease. *Am. J. Clin. Nutr.* v.71, n.6, p.1691-1695, 2000.

ARAUJO, E. A. *Estudo da cinética de secagem de fatias de banana nanica (Musa acuminiata var. Cavendish)*. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

AUST, O.; SIES, H.; STAHL, W.; POLIDORI, M. C. Analysis of lipophilic antioxidants in human serum and tissues: tocopherols and carotenoids. *J. Chromatogr.* p.936:83 – 93, 2001.

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

AZUARA, E.; CORTÉS, R.; GARCIA, H. S.; BERISTAIN, C. I. Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. *International Journal of Food Science and Technology*, n. 27, p. 409 – 418, 1992.

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

BAHIA. *Secretaria de Agricultura, Irrigação e Reforma Agrária. Mamão*. Disponível em <<http://www.bahia.ba.gov.br/seagri/mamao1.htm>>. Acesso em: 11 set. 2004.

BARBANTI, D.; MASTROCOLA, D.; SEVERINI, C. Air drying of plums. A comparison among twelve cultivars. *Sciences des Aliments*, n. 14, p. 61 – 73, 1994.

BARROS NETO, B. de; SCARMÍNIO, I. S.; BRUNS, R. E. *Planejamento e Otimização de Experimentos*. Campinas, Editora da UNICAMP, 2003.

BOLIN, H. R.; HUXOLL, C. C.; JACKSON, R.; NG, K. C. Effect of osmotic agent and concentration on food quality. *Journal of Food Science*, v.48, p.202–205, 1983.

BONGIRWAR, D. R.; SREENIVASAN, A. Studies of osmotic dehydration of banana. *Journal of Food Science and Technology*, v.14, p.104–112, 1977.

BORGES, S. V.; MENEGALLI, F. C. Influência da desidratação osmótica sobre a cinética de secagem de manga. *Pesq. Agrop. Bras.*, Brasília – DF, v.29, n.4, p. 637 – 642, 1994.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. *Statistics for experimenters. An introduction designs, data analysis and model building*. Nova York: Wiley, 1978.

BOX, G. E. P.; WETZ, J. *Criteria for judging adequacy of estimation by an approximate response function*. University of Wisconsin Tec. Report. n.9, 1993.

BRASIL. Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária. Secretaria de Desenvolvimento Rural. Programa de Apoio à Produção e Exportação de Frutas, Hortaliças, Flores e Plantas Ornamentais. *Mamão para exportação: aspectos técnicos da produção*. Brasília – DF: EMBRAPA – SPI (Série Publicações Técnicas, FRUPEX), v.9, 52p., 1994.

BRASIL. Ministério do Interior. *Contribuição ao Desenvolvimento da Agroindústria: mamão*. Campinas – SP: GEIDA/FCTPTA. v.4, 95p., 1974.

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

BRUIN, S.; LUIBEN, K. C. A. M. Drying of food materials: A review of recent developments. In A. S. MUJUMDAR (Ed.), *Advances in drying*, New York: Hemisphere Publishing Corp. v. I, p.155–215, 1980.

CHEN, N. K. L. *Chemical changes during the post-harvest ripening of papaya fruit*. 1963. Dissertação (Mestrado) – University of Hawaii, Honolulu, 1963.

CHIRIFE, J. (1983). Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In A. S. MUJUMDAR (Ed.), *Advances in drying*, New York: Hemisphere Publishing Corp. v.2, p.73–102, 1983.

COLLIGNAN, A.; RAOULT-WACK, A. L.; THEMELIN, A. Energy study of food processing by osmotic dehydration and air drying. *Agricultural Engineering Journal*, v.1, n.3, p. 125 – 135, 1992.

CONTRERAS, J. M.; SMYRL, T. G. An evaluation of osmotic concentration of apple rings using corn syrup solids solutions. *Canadian Institute of Food Science and Technology*, v.14, p.301-314, 1981.

CORZO, O.; GOMEZ, E. R. Optimization of osmotic dehydration of cataloupe using desired function methodology. *Journal of Food Engineering*, v. 64, p. 213– 219, 2004.

CRANK, J. *The Mathematics of Diffusion*, 2<sup>a</sup> ed. S.I Claredon Press Oxford, 414p., 1975.

DA SILVA, M. A. A. P. *Apostila de aulas teóricas da disciplina de análise sensorial de alimentos (TA 712)*. Departamento de Nutrição da Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNICAMP, 2000.

DAUDIN, J. D. Calcul des cinétiques du séchage por l'air choud dès. *Sci. Aliments*. v.3, n.1, p.1 – 36, 1983.

DEL VALLE, J. M.; CUADROS, T. R. M.; AGUILERA, J. M. Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces. *Food Research International*, v.31, p.191–204, 1998.

DEMIREL, D.; TURHAN, M. Air-drying behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices. *Journal of Food Engineering*, v.59, p.1–11, 2003.

DI MASCIO, P.; KAISER, S.; SIES, S. Lycopene as the most efficiente biological carotenoid singlet oxygen quencher. *Arch. Biochem. Biophys.* v.274, n.2, p.532-538, 1989.

DIXON, G. M.; JEN, J. Changes of sugar and acid in osmovac dried apple slices. *Journal of Food Science*. V.42, p.1126-1131, 1977.

ERDMAN JR., J. W. Variable bioavailability of carotenoids from vegetables. *Am. J. Clin. Nutr.* v.70, n.2, p.179-80, 1999.

ERICKSON, L. E. Recent developments in intermediate moisture foods. *Journal of Food Protection*, Ames, vol. 45, n. 5, p. 484 – 491, 1982.

FAO Statistical Databases. Disponível em <<http://www.fao.org>> Acesso em: 11 set. 2004.

FITO, P. Modeling of vacuum osmotic dehydration of food. *Journal of Food Engineering*, v. 22 (1-4), p. 313-328, 1994.

FORTES, M.; OKOS, M. P. Changes in physical properties of corn during drying. *Transactions of ASAE*, St. Joseph, Michigan, v.23, n.4, p.1004 – 1008, 1980.

FRUTHOTEC. *Desidratação de frutas e hortaliças: Manual técnico*. Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), Campinas – SP, 2001.

FRUTISÉRIES. *Mamão*, v. 7. Disponível em <[www.integracao.gov.br](http://www.integracao.gov.br)> Acesso em: 11 set. 2004.

GARROTE, R. L.; BERTONE, R. A. Osmotic concentration at low temperature of frozen of strawberry halves. Effect of glicerol, glucose and sucrose solutions on exudate loss during thawing. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, v. 22, p. 264 – 267, 1989.

GIANGIACOMO, R.; TORREGGIANI, D.; ABBO, E. Osmotic dehydration of fruit: Part 1. Sugars exchange between fruit and extracting syrups. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 11, p. 183 – 195, 1987.

GIRALDO, G.; TALENS, P.; FITO, P.; CHIRALT, A. Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of Food Engineering*, v.58, p.33-43, 2003.

GODOY, H. T. *Mudanças na composição de carotenóides durante processamento térmico e estocagem de manga (Mangifera indica) e mamão (Carica papaya)*. 1985. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1985.

GOGUS, F.; LAMB, J. Choice of model gel systems for the food dehydration studies. *Drying Technology*, v.16, p.297–309, 1998.

HALLIWELL, B.; GUTTERIDGE, J. M. C. Antioxidant defenses. In: *Free radicals in biology and medicine*. 3rd ed. Oxford: Clarenton Press, p.105-245, 1999.

HANDELMAN, G. J. The evolving role of carotenoids in human biochemistry. *Nutrition*, v.17, p.818-822, 2001.

HAWKES, J.; FLINK, J. M. Osmotic concentration of fruit slices prior to freeze dehydration. *Journal of Food Process Engineering*, v.2, n. 4, p.265 – 284, 1978.

HENG, K.; GUILBERT, S.; CUQ, J. L. Osmotic dehydration of papaya: Influence on the product quality. *Science des Aliments*, v. 10, p. 831 – 848, 1990.

HOLDSWORTH, S. D. Dehydration of food products. A review. *Journal of Food Technology*, v.6, p.331–370, 1971.

HONÓRIO, S. L. *Fisiologia pós-colheita de mamão (Carica papaya L.) cultivar solo*. 1982. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1982.

IBGE. *Anuário Estatístico do Brasil*, Rio de Janeiro, 1998.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. *Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz*. v.1. Métodos químicos e físicos para análises de alimentos. São Paulo, 3a ed., 1985.

ISLAM, M. N.; FLINK, J. M. Dehydration of potato. II. Osmotic concentration and its effects on air drying behaviour. *Journal of Food Technology*, v.17, p.387–403, 1982.

JAYARAMAN, K. S.; DAS GUPTA, D. K. Dehydration of fruits and vegetables -recent developments in principles and techniques. *Drying Technology*, v.10, p.1–50, 1992.

JELLINEK, G. *Sensory Evaluation of Food. Theory and Practice*. Ellis Horwood Ltda., Chichester, England, 429p., 1985.

JOHNSON, P-N. T.; BRENNAN, J.G.; ADDO-YOBO, F.Y. Air-drying characteristics of platain (Musa AAB). *Journal of Food Engineering*, v.37, p. 233-242, 1998.

KARATHANOS, V. T.; KOSTAROPOULOS, A. E.; SARAVACOS, G. D. Air-drying of osmotically dehydrated fruits. *Drying Technology*, 13 (5/7), p.1503-1521, 1995.

KARATHANOS, V.; ANGLEA, S.; KAREL, M. Collapse of structure during drying of celery. *Drying Technology*, v.11, p.1005–1023, 1993.

KAYMAK-ERTEKIN, F.; SULTANOĞLU, M. Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering*, v.46, p.243-250, 2000.

KECHAOU, N.; ROQUES, M. A. A variable diffusivity model for drying of highly deformable materials. In: MUJUNDAR, S. (ed.) *Drying'89*. Elsevier Sci. Publishers B. V., 1992.

KEEY, R. B. *Drying: principles and practice*. Oxford, Pergammon Press, 358p., 1972.

KHRAISHEH, M. A. M.; COOPER, T. J. R.; MAGEE, T. R. A. Shrinkage characteristics of potatoes dehydrated under combined microwave and convective air conditions. *Drying Technology*, v.15, p.1003–1022, 1997.

KHURI, A. J., CORNELL, F. A. *Response surfaces: design and analyses*, New York: Marcel Dekker, New York, 510p., 1996.

KILPATRICK, P. W.; LOWER, E.; VAN ARSDEL, W. B. Tunnel dehydrators for fruits and vegetables. *Advances in Food Research*, v.6, p.360-375, 1955.

KIMURA, M.; RODRIGUEZ-AMAYA, D. B.; YOKOYAMA, S. M. Cultivar differences and geographic effects on the carotenoid composition and vitamin A value of papaya. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*. v. 24, p. 415 – 418, 1991.

KRINSKY, N. I. Carotenoids as antioxidants. *Nutrition*, v.17, p.815-817, 2001.

KROKIDA, M. K.; KARATHANOS, V. T.; MAROULIS, Z. B. Effect of osmotic dehydration on color and sorption characteristics of apple and banana. *Drying Technology*, vol. 18, n. 4, p. 937 – 950, 2000.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, v.15, p.2441–2458, 1997.

LABUZA, T. P. The effect of water activity on reaction kinetics of food deterioration. *Food Technology*, abril, p. 36 – 41, 1980.

LABUZA, T. P. The properties of water in relationship to water binding in food: a review. *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 1, n. 2, p. 167 – 190, 1977.

LANG, W.; SOKHANSANJ, S. Bulk volume shrinkage during drying of wheat and canola. *Journal of Food Process Engineering*, v.16, p.305–314, 1993.

LAZARIDES, H. N.; KATSANIDIS, E.; NICKOLAIDIS, A. Mass transfer during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. *Journal of Food Engineering*, v.25, p.151–166, 1995.

LE MAGUER, M. Osmotic dehydration: review and future directions. In: *Proceedings of the International Symposium on Progress in Food Preservation Processes*, Brussels, Belgium: CERIA, v.1, pp.283–309, 1988.

LEES, R. *Food analysis and quality control methods for the food manufacturer and buyer*. Leonard Hill Books, London, 1975.

LENART, A. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: Technology and application. *Drying Technology*, v. 14, n. 2, p. 391 – 413, 1996.

LERICI, C. R.; PINNAVAIA, G.; DALLA ROSA, M.; BARTOLUCCI, L. Osmotic dehydration of fruit: Influence of osmotic agents on drying behavior and product quality. *Journal of Food Science*, v. 50, p. 1217 – 1226, 1985.

LEVI, A.; GAGEL, S.; JUVEN, B. Intermediate moisture tropical fruit products for developing countries. I. Technological data on papaya. *Journal of Food Technology*, v. 18, p. 667 – 685, 1983.

LEVI, G.; KAREL, M. Volumetric shrinkage (collapse) in freeze-dried carbohydrates above their glass transition temperature. *Food Research International*, v.28, p.145–151, 1995.

LEWICKI, P. P.; JAKUBCZYK, E. Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering*, v.64, p.307–314, 2004.

LEWICKI, P. P.; LENART, A. Osmotic dehydration of fruits and vegetables. In: A. S. MUJUMDAR (Eds), *Hanbook of industrial drying*. Marcel Dekker, New York, p.691–713, 1995.

LITCHFIELD, J. B.; OKOS, M. R. Moisture diffusivity in pasta during drying. *Journal of Food Engineering*, v.17, p.117–142, 1992.

LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S.; LABUSA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: fruit, vegetable and meat products. *Lebensmittel – Wissenschaft and Technologies*. v.18, p. 112 – 122, 1985.

LOZANO, J. E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M. J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science*, v.48, p.1497–1502, 1553, 1983.

LOZANO, J. E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M. J. Total porosity and open-pore porosity in the drying of fruits. *Journal of Food Science*, v.45, p.1403–1407, 1980.

MANNHEIM, C. H.; LIU, J. X.; GILBERT, S. G. Control of water in foods during storage. *Journal of Food Engineering*, n. 22, p. 509 – 532, 1994.

MASKAN, M. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, v.48, p.177–182, 2001.

MAURO, M. A.; MENEGALLI, F. C. Evaluation of water and sucrose diffusion coefficients in potato tissue during osmotic concentration. *Journal of Food Engineering*, v. 57, p. 367– 374, 2003.

MAVROUDIS, N. E.; GEKAS, V.; SJOHOLM, I. Osmotic dehydration of apples. Shrinkage phenomena and the significance of initial structure on mass transfer rates. *Journal of Food Engineering*, v.38, p.101-123, 1998.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, v.61, p.373–386, 2004.

MAZZA, G. Dehydration of carrots. Effects of pre-drying treatments on moisture transport and product quality. *Journal of Food Technology*, v.18, p.113-123, 1983.

MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Physical characteristics of dehydrated potatoes. *Journal of Food Engineering*, v.33, p.37–48, 1997.

MEDINA, J. C.; GARCIA, J. L. M.; SALOMÓN, E. A. G.; VIEIRA, L. F.; RENESTO, O. V.; FIGUEIREDO, N. M. S.; CANTO, W. L. *Mamão: da cultura ao processamento e comercialização*. Campinas – SP: ITAL, Cap. I, p. 7 – 112 . (Série Frutas Tropicais, 7), 1980.

MÉNDEZ FILHO, J. D.; RODRÍGUEZ, H. G. R. Sobre los beneficios de los radicales libres. *Rev. Méd. IMSS*, v.34, n.4, p.309-313, 1997.

MENEZES, H. C.; DRAETTA, I. S.; SALES, A. M.; LEITÃO, M. F. F.; CAMPOS, S. D. S.; CABRAL, A. C. D.; ORTIZ, S. A.; MADI, L. F. C.; SOLER, R. M.; GAZETA, E. F. *Alguns Aspectos Tecnológicos das Frutas Tropicais e Seus Produtos*, p. 46 – 50, 1980.

MENSAH, J. K.; NELSON, G. L.; HERUM, F. L.; RICHARD, T. G. Mechanical properties related to soybean seedcoat cracking during drying. *Transactions of the ASAE*, v.27, p.550, 1984.

MENTING, L. C.; HOOGSTAD, B.; THIJSSSEN, H. A. C. Aroma retention during the drying of liquid foods. *Journal of Food Technology*, v.5, p.127–139, 1970.

MONTERO, M. Los radicales libres y las defensas antioxidantes: revisión. *Ann. Fac. Méd.* v.57, n.4, p.278-81, 1996.

MOORE, W. J. *Físico-Química*. 2ª ed., Editora da USP, Rio de Janeiro, 100p., 1968.

MOREIRA, R.; FIGUEIREDO, A.; SERENO, A. Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology*, v.18, p.279–294, 2000.

MOREIRA, R.; SERENO, A. M. Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions. *Journal of Food Engineering*, v.57, p.25-31, 2003.

MOSCA, J. L. *Conservação pós-colheita de frutos do mamoeiro carica papaya (L.) 'improved sunrise solo line 72/12', com utilização de filmes protetores e cera, associados à refrigeração*. 1992. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterenárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1992.

MOY, J. H.; LAU, N. B. H.; DOLLAR, A. M. Effect of sucrose and acids on osmotic dehydration of tropical fruits. *Journal of Food Processing and Preservation*, n.2, p.131 – 135, 1978.

MÚJICA-PAZ, H.; VALDEZ-FRAGOSO, A.; LÓPEZ-MALO, A.; PALOU, E.; WELTI-CHANES, J. Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *Journal of Food Science and Technology*, v. 57, p. 305 – 314, 2003.

NIETO, A. B.; SALVATORI, D. M.; CASTRO, M. A.; ALZAMORA, S. M. Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features. *Journal of Food Engineering*, v.61, p.269-278, 2004.

NIETO, A.; CASTRO, M. A.; ALZAMORA, S. M. Kinetics of moisture transfer during air drying of blanched and/or osmotically dehydrated mango. *Journal of Food Engineering*, v.50, n.3, p.175-185, 2001.

NIETO, A.; SALVATORI, D.; CASTRO, M. A.; ALZAMORA, S. M. Air drying behaviour of apples as affected by blanching and glucose. *Journal of Food Engineering*, v.36, n.1, p.63-79, 1998.

OLSON, J. A. Carotenoids and human health. *Arch. Latinoam. Nutr.* v.49, n.3 (Supl 1), p.7-11, 1999.

PAGE, G.E. *Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer*. Dissertação (Mestrado) – Purdue University, Indiana, USA, 1949.

PANAGIOTOU, N. M.; KARATHANOS, V. T.; MAROULIS, Z. B. Effect of osmotic agent on osmotic dehydration of fruits. *Drying Technology*, v. 17, n. 1&2, 1999.

PAPAS, A. M. Diet and antioxidant status. *Food Chem. Toxicol.* v.37, p.999-1007, 1999.

PARK, K. J. Diffusional model with and without shrinkage during salted fish muscle drying. *Drying Technology*, v.16, p.889–905, 1998.

PARK, K. J. *Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem*. 1987 (Tese Livre Docência em Fenômenos de Transporte) – Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos. Campinas, 1987.

PARK, K. J. *Fundamentos de secagem*. Notas de aula. Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, 1988.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R.; PARK, T. H. K. B. Osmotic dehydration kinetics of pear D'anjou (*Pyrus communis* L.). *Journal of Food Engineering*, v.52, p.293-298, 2002.

PEARSON, D. *The chemical analysis of foods*. J. & A. Churchill, London, 6a ed., 1970.

PELEG, M. An empirical-model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, v.53, p.1216–1219, 1988.

PINTO, L. A. A. *Cinética da secagem de filés de peixes: uso de um modelo difusivo com variação de volume*. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996.

POKHARKAR, S. M.; PRASAD, S.; DAS, H. A model for osmotic concentration of banana slices. *Journal Food Science Technology*. v. 34(3) 230-232, 1997.

PONTING, J. D. Osmotic dehydration of fruit – recent modification and applications. *Process Biochemistry*, v. 8, n. 12, p.18-20, 1973.

PONTING, J. D.; WATTERS, R. R.; FORREY, R.; JACKSON, R.; STANLEY, W. L. Osmotic dehydration of fruit. *Food Technology*, v. 20 n. 10, p.1363-1368, 1966.

PROTHON, F. AHRNÉ, L. M. Application of the Guggenheim, Anderson and De Boer model to correlate water activity and moisture content during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering*, v.61, p.467-470, 2004.

PROTHON, F.; AHRNE, L.; SJOHOLM, I. Mechanisms and prevention of plant tissue collapse during dehydration: A critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. v.43, p. 447-479, 2003.

QUAST, D. G.; TEIXEIRA NETO, R. O. Atividade de água em alguns alimentos de teor intermediário de umidade. *Coletânea do Instituto de Tecnologia de Alimentos*, Campinas, vol. 6, n. 1, p. 203 – 232, 1975.

RAHMAN, M. S.; PERERA, C. O.; CHEN, X. D.; DRISCOLL, R. H.; POTLURI, P. L. Density, shrinkage and porosity of Calamari Mantle Meat during air drying in a cabinet dryer as a function of water content. *Journal of Food Engineering*, v.30, p.135–145, 1996.

RAHMAN, M. S.; POTLURI, P. L. Shrinkage and density of squid flesh during air drying. *Journal of Food Engineering*, v.12, p.133–143, 1990.

RAHMAN, S.; LAMB, J. Air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated pineapple. *Journal of Food Processing Engineering*, v.14, p.163-171, 1991.

RAMASWAMY, H. S.; NSONZI, F. Convective-air drying kinetics of osmotically pre-treated blueberries. *Drying Technology*, v.16 (3-5), p.743-759, 1998.

RANGANNA, S. *Manual of Analysis of Fruit and Vegetables Products*. New Delhi: Mc – Graw Hill Publishing Company, 634p., 1977.

RAOULT-WACK, A. L.; LENART, A.; GUILBERT S. Recent advances in dewatering through immersion in concentrated solutions. In: *Drying of Solids*. ed. A. S. Mujundar. International Science Publishers, New York, p. 211-51, 1992.

RAOULT-WACK, A. L.; LENART, A.; GUILBERT, S. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Trends in Food Science and Technology*, v. 5, agosto, p. 225 – 260, 1994.

RASTOGI, N. K.; NIRANJAN, K. Enhanced mass transfer during osmotic dehydration of high pressure treated pineapple. *Journal of Food Science*, v.63 (3), p.508-511, 1998.

RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* v.37, p.43–47, 2004.

RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S. Water and solute diffusion coefficients of carrot as a function of temperature and concentration during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, v.34 (4), p.429-440, 1997.

RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S.; NIRANJAN, K.; KNORR, D. Recent developments in osmotic dehydration. *Trends in Food Science and Technology*. v.13, p.48-59, 2002.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, v.23, p.91–105, 1994.

RESNICK, S.; CHIRIFE, G. Effect of moisture content and temperature on some aspects of nonenzymatic browning in dehydrated apple. *Journal of Food Science*, v. 44, n. 2, p. 601 – 605, 1979.

RODRIGUES, A. C. C. *Influência dos aditivos na obtenção de mamão desidratado osmoticamente*. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

RODRIGUES, A. C. C.; CUNHA, R. L.; HUBINGER, M. D. Rheological properties and colour evaluation of papaya during osmotic dehydration processing. *Journal of Food Engineering*, v.59, p.129-135, 2003.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. Changes in carotenoids during processing and storage of foods. *Archivos Latinoamericanos de Nutricion*, v.49, n.1-S, p.38S-47S, 1999.

ROSSEN, J. L.; HAYAKAWA, K. Simultaneous heat and moisture transfer in dehydrated food: A review of theoretical models. *AIChE Symposium Series*, v.73, p.71–81, 1977.

SABLANI, S. S.; RAHMAN, M. S. Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango. *Food Research International*. v.36, p.65–71, 2003.

SABLANI, S. S.; RAHMAN, M. S.; AL-SADEIRI, D. S. Equilibrium distribution data for osmotic drying of apple cubes in sugar-water solution. *Journal of Food Engineering*, v. 52, p. 193– 199, 2002.

SANKAT, C. K.; CASTAIGNE, F.; MAHARAJ, R. The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. *International Journal of Food Science and Technology*, n. 31, p. 123 – 135, 1996.

SCHRADER, G. W.; LITCHFIELD, J. B. Moisture profiles in a model food gel during drying: measurement using magnetic resonance imaging and evaluation of the Fickian model. *Drying Technology*, v.10, p.295–332, 1992.

SHAMI, N. J. I. E.; MOREIRA, E. A. M. Licopeno como agente antioxidante. *Revista de Nutrição*. Campinas – SP, v.17, n.2, p.227 – 236, 2004.

SHIPMAN, J. W.; RAHMAN, A. R.; SEGRAS, R. A.; KASPSALIS, J. G.; WEST, D. E. Improvement of the texture of dehydrated celery by glycerol treatment. *Journal of Food Science*, v.37, p.568–571, 1972.

SIES, H.; STAHL, W. Vitamins E and C, beta-carotene, and other carotenoids as antioxidants. *Am. J. Clin. Nutr.* v.62, n.6, p.1315-1321, 1995.

SIMAL, S.; DEYÁ, E.; FRAU, M.; ROSELLÓ, C. Simple modelling of drying curves of fresh and osmotically pré-dehydrated apple cubes. *Journal of Food Engineering*, v.33, p.139-150, 1997.

SIMAL, S.; ROSSELLÓ, C.; BERNA, A.; MULET, A. Drying of shrinking cylinder-shaped bodies. *Journal of Food Engineering*, v.37, n.4, p.423–435, 1998.

SPEISKY, H. C.; JIMÉNEZ, I. T. Radicales libres y antioxidantes en la prevención de enfermedades III: evidencias clínico epidemiológicas de los riesgos y beneficios asociados al consumo de antioxidantes en la prevención de enfermedades cardiovasculares. *Rev. Chil. Nutr.* v.27, n.3, p.314-325, 2000.

SPIESS, W. E. L.; BEHSNILIAN, D. Osmotic treatments in food processing current state and future needs. In: A. S. MUJUMDAR (Ed.), *Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS98)*, Greece: Halkidiki, v.A, pp. 47–56, 1998.

STAHL, W.; SIES, H. Carotenoids: occurrence, biochemical activities, and bioavailability. In: Packer L, Hiramatsu M, Yoshikawa T. *Antioxidant Food Supplements in Human Health*. San Diego: Academic Press; p.183-98, 1999.

STATSOFT. *Statistica for windows*, Tulsa, USA, 1997.

STONE, H.; SIDEL, J. L. *Sensory Evaluation Practices*. 2ª ed. Academic Press, Inc., 338p., 1993.

STRUMILLO, C.; ADAMIEC, J. Advanced ing of biosynthesis products. *Anais do XIX Encontro sobre Escoamento em Meios Poroso*, Campinas – SP. v. 1, p. 17 – 61, 1991.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying: Principles, Applications and Design*. N. York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

SUZUKI, K.; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T.; HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root vegetables. *Journal of Food Science*, v.41, p.1189–1193, 1976.

TAOUKIS, P. S.; BREENE, W. M.; LABUZA, T. P. Intermediate moisture foods. In: POMERANZ, Y. (ed.). *Advanced in Cereal Science and Technology*, St. Paul, v. 9, p. 91 – 128, 1988.

TELIS, V. R. N.; MURARI, R. C. B. D. L.; YAMASHITA, F. Diffusion coefficients during osmotic dehydration of tomatoes in ternary solutions. *Journal of Food Engineering*, v.61, p.253-259, 2004.

THEMELIN, A.; RAOULT-WACK, A. L.; LEBERT, A.; DANZART, M. Multicriteria optimization of food combining soaking prior to air drying. *Drying Technology*, v.15, n.9, p. 2263 – 2279, 1997.

TODA FRUTA. Disponível em <<http://www.todafruta.com.br>> Acesso em: 10 nov. 2004.

TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food Research International*, v. 26, p. 59 – 68, 1993.

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

TORREZAN, R. *Preservação de polpa de goiaba por métodos combinados*. 1996, Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

UBOLDI-EIROA, M. N. Microbiologia de frutas e hortaliças desidratadas. In: AGUIRRE, J. M. de; GASPARINO FILHO, J. (coord.). *Desidratação de frutas e hortaliças*. Campinas, ITAL (Manual Técnico), p. 6.1 – 6.26, 1996.

UDDIN, M. B.; AINSWORTH, P.; İBANOĞLU, Ş. Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of carrots using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, v.65, p.473-477, 2004.

UDDIN, M. S. & HAWLANDER, M. N. A. Evaluation of drying characteristics of pineapple in the production of pineapple powder. *Journal of Food Processing an Preservation*, v.14, p.375-391, 1990.

VAN ARDSEL, W. E. *Food dehydration. v.1 – principles*. Westport, CT: The AVI Publishing Co., 1963.

VAN ARSDEL, W. B. Aproximate diffusion calculations for the falling-rate phase of drying. *Transaction American Institute Chemical Engineers*, v. 43, n. 1, p. 13 – 24, 1947.

WAANANEN, K. M.; LITCHFIELD, J. B.; OKOS, M. R. Classification of drying models for porous solids. *Drying Technology*, v.11, p.1–40, 1993.

WANG, N.; BRENNAN, J. G. A mathematical model of simultaneous heat and mass transfer during drying of potato. *Journal of Food Engineering*, v. 24, p. 47– 60, 1995.

WENKAM, N. S.; MILLER, C. D. *Composition of Hawaii fruits*. University of Hawaii. College of Tropical Agriculture. Hawaii Agricultural Experiment Station. Honolulu. Bulletin, 135, 87p., 1965.

WILLIS, B.; OKOS, M.; CAMPANELLA, O. Effects of glass transition on stress development during drying of a shrinking food system. In: *Proceedings of the sixth conference of food engineering (CoFE099)*, Dallas, TX. p. 496–451, 1999.

## 8 – APÊNDICES

### A1 – Teoria geral do equilíbrio: potencial químico (MOORE, 1968)

Sob condições de temperatura e pressão constantes, qualquer transformação do sistema se faz de um estado de energia livre mais alta  $G_1$  para um de energia livre mais baixa  $G_2$ . Por esta razão, é natural pensar que a energia livre  $G$  é um potencial termodinâmico e que toda transformação representa a passagem do sistema de um estado de potencial mais elevado para um outro mais baixo. Evidentemente, a escolha de  $G$  como função potencial é condicionada à condição de  $T$  e  $P$  constantes. À  $T$  e  $V$  constante,  $A$  é que seria a função potencial apropriada; à  $T$  e  $S$ , seria  $H$  e assim por diante.

Se um sistema contém mais de um componente numa dada fase, seu estado não pode ser especificado sem alguma informação precisa sobre a composição daquela fase. Além de  $P$ ,  $T$  e  $V$ , precisa-se introduzir novas variáveis que meçam as quantidades dos diferentes constituintes químicos do sistema. Como de praxe, escolhe-se o mol como medida química, com os símbolos  $n_1, n_2, n_3... n_i$  representando o número de moles dos componentes 1, 2, 3...i da fase particular em questão.

Segue-se então que cada função termodinâmica depende tanto dos valores de  $n_i$  quanto de  $P$ ,  $V$  e  $T$ . Assim,  $E = E(V, T, n_i)$ ;  $G = G(P, T, n_i)$ , etc... Consequentemente vem, por exemplo, para a diferencial total de energia livre:

$$dG = \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_{P, n_i} dT + \left( \frac{\partial G}{\partial P} \right)_{T, n_i} dP + \sum \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, P, n_j} dn_i \quad (1)$$

Sabe-se que, pela equação  $dG = -S dT + V dP$ , para um sistema qualquer, à composição constante, teremos que  $dn_i = 0$ . Portanto, teremos:

$$dG = -S dT + V dP + \sum \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_j} dn_i \quad (2)$$

Os coeficientes  $(\partial G / \partial n_i)_{T,P,n_j}$  foram introduzidos por Gibbs, que lhes deu o nome de *potencial químico* e o símbolo especial  $\mu_i$ . Teremos que:

$$\mu_i = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_j} dn_i \quad (3)$$

Onde  $\mu_i$  corresponde à variação da energia livre do sistema fase por unidade de variação do número de moles da componente  $i$ , quando são mantidos constantes a temperatura, a pressão e o número de moles de todos os outros componentes. Os potenciais químicos medem, por conseguinte, de que modo a energia livre de uma fase depende das mudanças de sua composição.

Pode-se agora reescrever a Equação (2) da seguinte forma:

$$dG = -S dT + V dP + \sum \mu_i dn_i \quad (4)$$

Diz-se que uma equação como a (4), que inclui a variação de uma função termodinâmica em função do número de moles dos diferentes componentes, aplica-se a um *sistema aberto*. Pode-se alterar a quantidade de um componente  $i$  qualquer de um sistema aberto adicionando ou removendo uma quantidade  $dn_i$  do mesmo. Considerando T e P constantes, teremos:

$$dG = \sum \mu_i dn_i \quad (5)$$

A cada fase de um sistema de diversas fases, aplica-se uma equação desse tipo, em que a transferência de massa  $dn_i$  se dá de uma a outra fase.

**A2 – Cinética de desidratação osmótica**

Valores experimentais médios de perda de água e ganho de sólidos da desidratação osmótica de mamão em soluções de sacarose e xarope de milho.

Tempo (min.)	Sacarose		Xarope de milho	
	PA (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ms</sub> inicial)	GS (kg <sub>sólidos</sub> /kg <sub>ms</sub> inicial)	PA (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ms</sub> inicial)	GS (kg <sub>sólidos</sub> /kg <sub>ms</sub> inicial)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
15	1,85	0,33	1,24	0,23
30	2,21	0,46	1,52	0,24
60	3,07	0,66	2,07	0,38
90	3,78	0,68	2,34	0,43
120	4,02	0,76	2,63	0,45
150	4,03	0,86	2,88	0,54
210	4,51	0,97	3,54	0,61
240	4,42	1,09	3,49	0,63

Valores experimentais médios de umidade em base seca das amostras de mamão desidratadas em soluções de sacarose e xarope de milho.

Tempo (min.)	Sacarose (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ms</sub> )	Xarope de milho (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ms</sub> )
0	7,83	7,76
15	5,03	5,51
30	4,18	5,19
60	3,29	4,27
90	2,98	3,91
120	2,42	3,66
150	2,19	3,27
210	1,79	2,73
240	1,74	2,60

### A3 – Cinética de encolhimento na desidratação osmótica

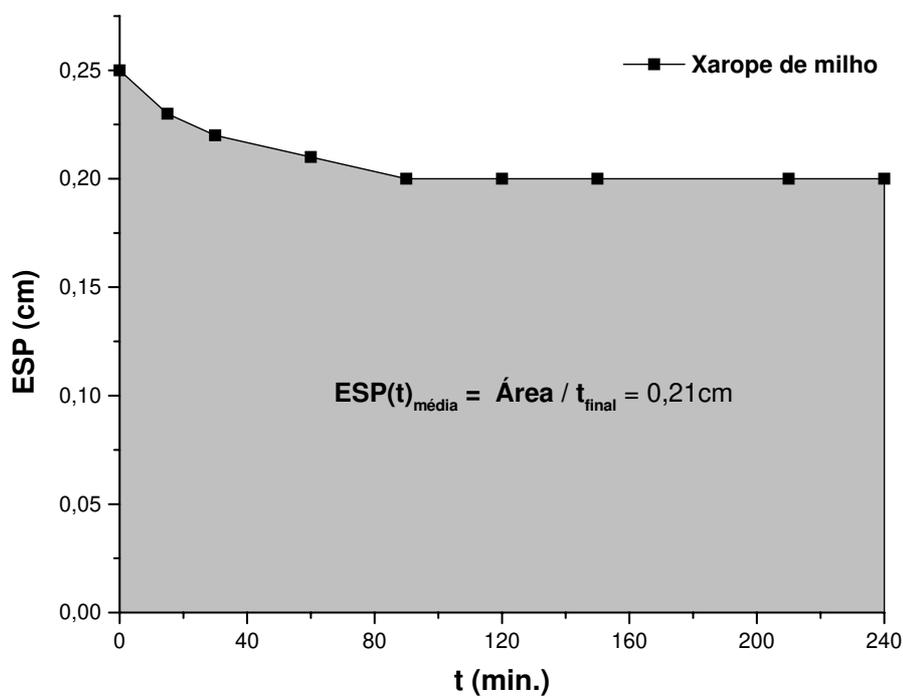
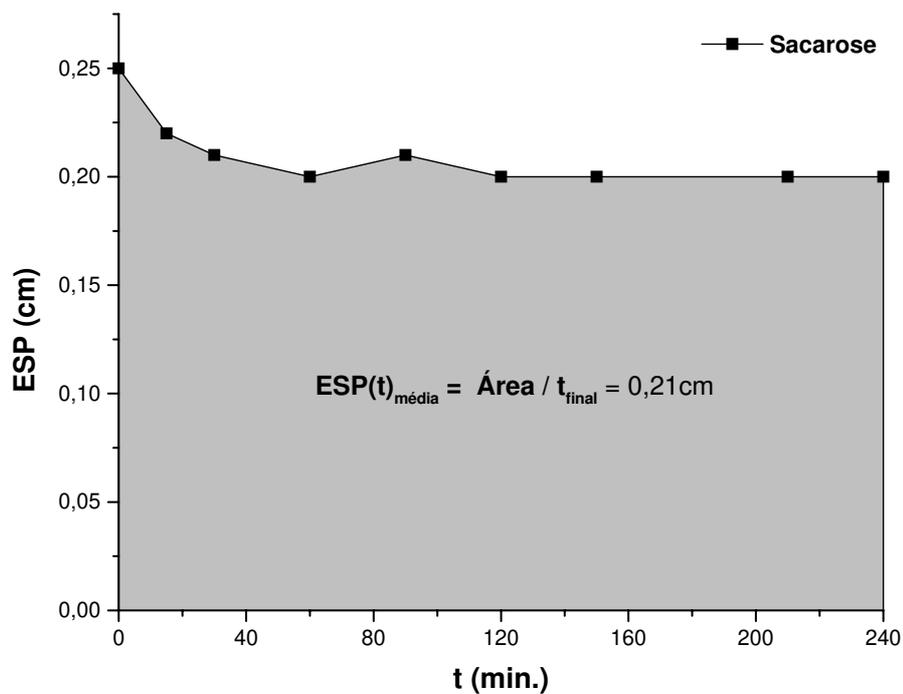
Valores experimentais médios das dimensões características, da área superficial total e volume aparente das placas de mamão desidratadas em sacarose.

Tempo(min.)	ESP x 10 <sup>2</sup> (m)	LRG x 10 <sup>2</sup> (m)	PRF x 10 <sup>2</sup> (m)	A x 10 <sup>3</sup> (m <sup>2</sup> )	V x 10 <sup>3</sup> (dm <sup>3</sup> )
0	0,51	3,03	4,88	3,76	7,51
15	0,45	2,93	4,84	3,47	6,21
30	0,42	2,81	4,62	3,23	5,47
60	0,41	2,78	4,56	3,11	5,11
90	0,41	2,78	4,48	3,10	5,08
120	0,40	2,72	4,43	2,98	4,81
150	0,39	2,66	4,40	2,88	4,57
210	0,39	2,67	4,38	2,83	4,47
240	0,40	2,64	4,36	2,82	4,50

Valores experimentais médios das dimensões características, da área superficial total e volume aparente das placas de mamão desidratadas em xarope de milho.

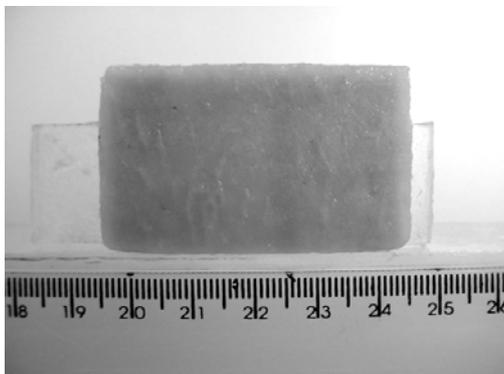
Tempo(min.)	ESP x 10 <sup>2</sup> (m)	LRG x 10 <sup>2</sup> (m)	PRF x 10 <sup>2</sup> (m)	A x 10 <sup>3</sup> (m <sup>2</sup> )	V x 10 <sup>3</sup> (dm <sup>3</sup> )
0	0,51	3,01	4,88	3,74	7,46
15	0,46	2,95	4,83	3,60	6,59
30	0,45	2,97	4,77	3,48	6,25
60	0,41	2,93	4,71	3,36	5,60
90	0,40	2,85	4,60	3,22	5,23
120	0,39	2,86	4,54	3,14	5,02
150	0,39	2,76	4,47	3,02	4,80
210	0,40	2,61	4,38	2,86	4,58
240	0,40	2,58	4,36	2,81	4,50

Dados de espessura média obtidos através da integração da função  $ESP(t)$  para o processo de desidratação osmótica utilizando ambos os agentes osmóticos.

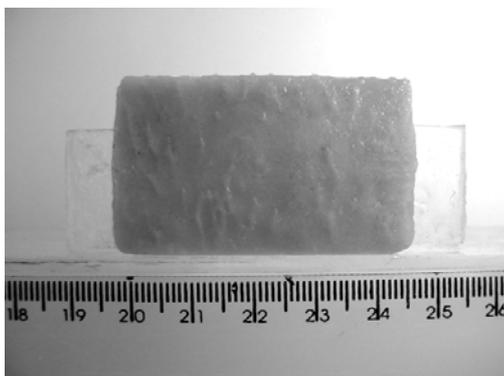


Seqüência de fotos das amostras de mamão desidratadas em soluções de sacarose e xarope de milho.

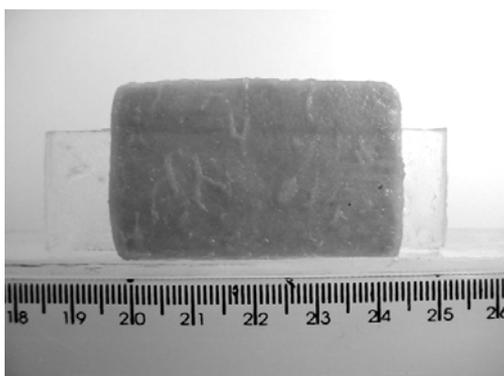
**Sacarose**



0 min.

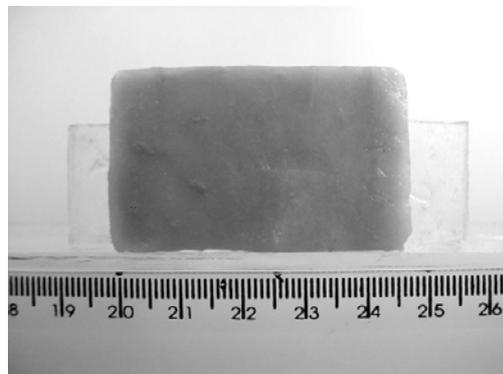


15 min.

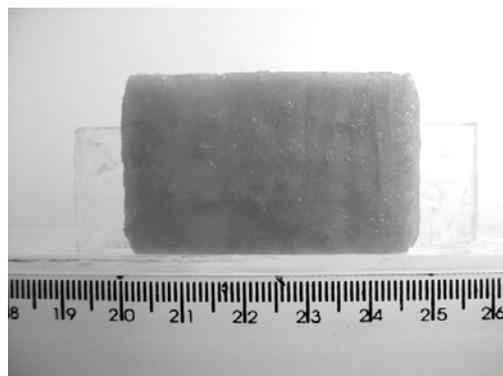


30 min.

**Xarope de milho**



0 min.



15 min.



30 min.



60 min.



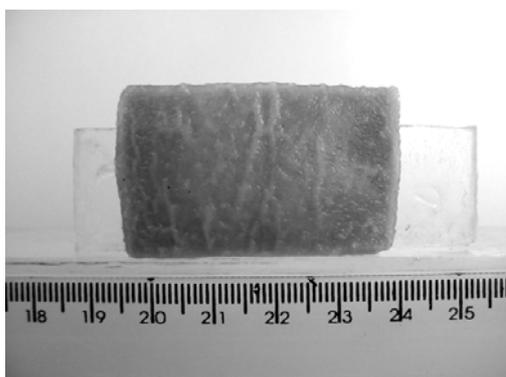
60 min.



90 min.



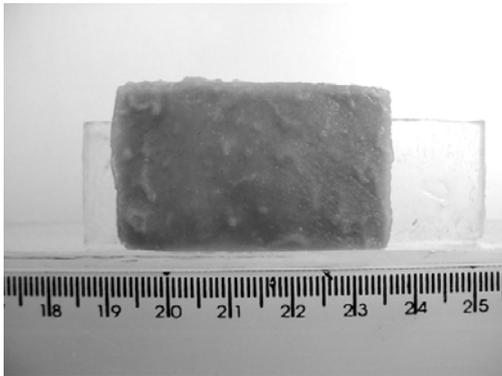
90 min.



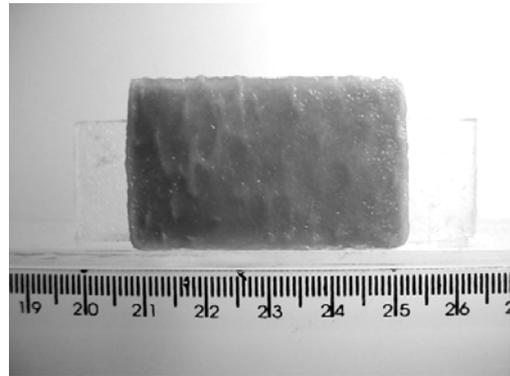
120 min.



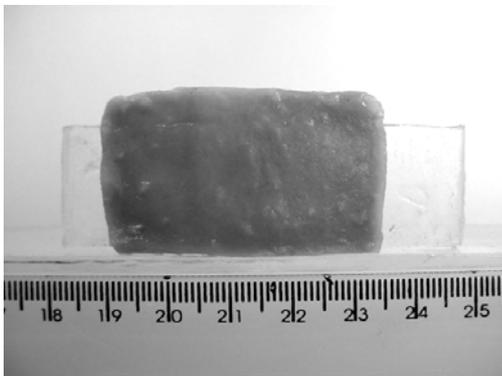
120 min.



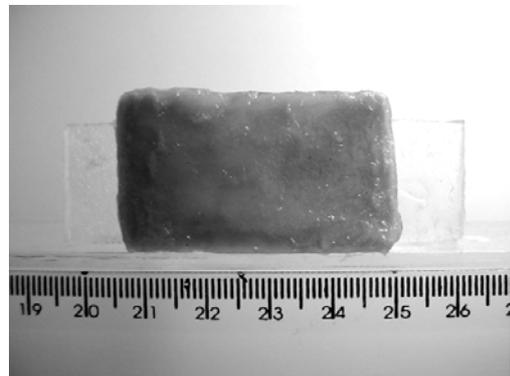
150 min.



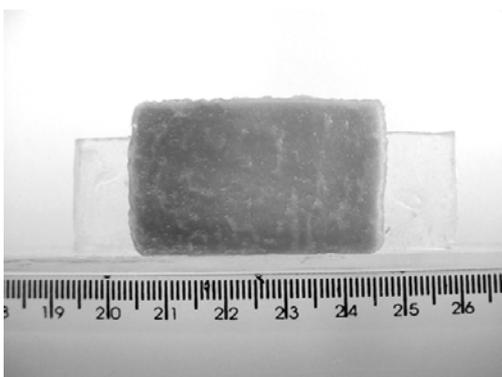
150 min.



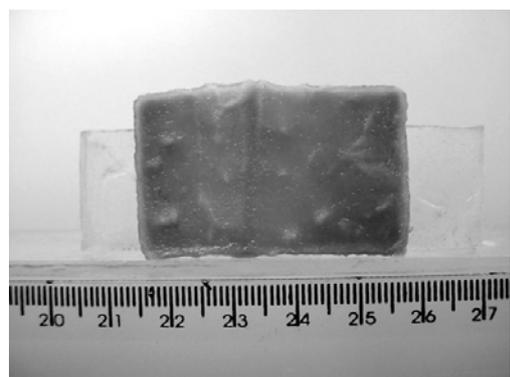
210 min.



210 min.



240 min.



240 min.

**A4 – Cinética de secagem**

Valores experimentais médios de umidade em base seca das amostras de mamão in natura secas a várias temperaturas do ar de secagem.

<b>Tempo (min.)</b>	<b>T = 40°C</b>	<b>T = 50°C</b>	<b>T = 60°C</b>	<b>T = 70°C</b>
0	8,1912	7,8731	7,4890	8,0992
5	-	-	-	3,3652
10	-	-	-	2,4182
15	-	2,6459	1,9909	1,9208
30	2,3523	1,6507	1,2459	0,9221
45	-	1,2680	0,8433	0,5802
60	1,4654	0,9983	0,6058	0,3598
90	-	0,5448	0,2732	0,1262
120	0,7779	0,3190	0,1258	0,1043
180	0,4904	0,1896	0,1005	0,1010
240	0,3209	0,1287	0,0984	0,0939
300	0,2080	0,1111	0,0972	-
360	0,1429	0,1117	-	-
420	0,1202	0,1090	-	-
480	0,1158	-	-	-
540	0,1146	-	-	-

Valores experimentais médios de umidade em base seca das amostras de mamão pré-tratadas em sacarose e secas a várias temperaturas do ar de secagem.

Tempo (min.)	T = 40°C	T = 50°C	T = 60°C	T = 70°C
0	1,7732	1,6518	1,7211	1,7005
5	-	-	-	1,5952
10	-	-	-	1,3383
15	-	0,9410	0,8591	0,9160
30	1,0762	0,7558	0,6601	0,6673
45	-	0,6104	0,5313	0,5281
60	0,7813	0,5376	0,4463	0,4296
90	-	0,4310	0,3283	0,3381
120	0,5160	0,3677	0,3256	0,3001
180	0,4038	0,3149	0,2992	0,2887
240	0,3499	0,3023	0,2940	0,2774
300	0,3244	0,2949	0,2813	0,2752
360	0,3145	0,2924	0,2813	-
420	0,3096	-	-	-
480	0,3071	-	-	-

Valores experimentais médios de umidade em base seca das amostras de mamão pré-tratadas em xarope de milho e secas a várias temperaturas do ar de secagem.

Tempo (min.)	T = 40°C	T = 50°C	T = 60°C	T = 70°C
0	2,6036	2,6941	2,4376	2,4447
5	-	-	-	2,2145
10	-	-	-	1,4586
15	-	1,4515	1,1809	1,1192
30	1,2905	1,1112	0,9798	0,8384
45	-	0,9078	0,7997	0,5669
60	0,8940	0,7625	0,6679	0,5079
90	-	0,5638	0,4748	0,3524
120	0,5552	0,4396	0,3479	0,2804
180	0,4018	0,3282	0,2856	0,2581
240	0,3356	0,3013	0,2577	0,2537
300	0,3089	0,2927	0,2556	0,2537
360	0,2980	0,2883	0,2556	-
420	0,2925	0,2847	-	-
480	0,2884	-	-	-

**A5 – Cinética de encolhimento durante a secagem**

Valores experimentais médios de espessura (ESP), largura (LRG), profundidade (PRF), área superficial total (A) e volume aparente (V) das amostras de mamão in natura secas a 40°C.

<b>Tempo (min.)</b>	<b>ESP x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>LRG x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>PRF x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>A x 10<sup>3</sup> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V x 10<sup>3</sup> (dm<sup>3</sup>)</b>
0	0,50	3,00	4,74	3,59	7,05
30	0,42	2,85	4,71	3,32	5,63
60	0,37	2,81	4,63	3,18	4,87
120	0,25	2,80	4,59	2,71	2,94
180	0,18	2,76	4,50	2,47	2,01
240	0,16	2,72	4,45	2,26	1,60
300	0,12	2,63	4,45	2,15	1,18
360	0,11	2,60	4,45	2,07	1,03
420	0,08	2,58	4,34	1,99	0,74
480	0,08	2,57	4,34	1,99	0,72
540	0,08	2,57	4,33	1,98	0,71

Valores experimentais médios de espessura (ESP), largura (LRG), profundidade (PRF), área superficial total (A) e volume aparente (V) das amostras de mamão in natura secas a 50°C.

<b>Tempo (min.)</b>	<b>ESP x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>LRG x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>PRF x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>A x 10<sup>3</sup> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V x 10<sup>3</sup> (dm<sup>3</sup>)</b>
0	0,51	2,91	4,71	3,58	7,15
15	0,40	2,80	4,65	3,24	5,28
30	0,37	2,77	4,62	2,97	4,49
45	0,31	2,73	4,60	2,91	3,82
60	0,30	2,72	4,50	2,73	3,49
90	0,25	2,65	4,45	2,53	2,74
120	0,13	2,64	4,42	2,26	1,38
180	0,09	2,62	4,40	2,12	0,92
240	0,08	2,60	4,36	2,10	0,84
300	0,08	2,60	4,30	2,09	0,76
360	0,08	2,60	4,29	2,09	0,76
420	0,08	2,59	4,28	2,09	0,75

Valores experimentais médios de espessura (ESP), largura (LRG), profundidade (PRF), área superficial total (A) e volume aparente (V) das amostras de mamão in natura secas a 60<sup>o</sup>C.

<b>Tempo (min.)</b>	<b>ESP x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>LRG x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>PRF x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>A x 10<sup>3</sup> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V x 10<sup>3</sup> (dm<sup>3</sup>)</b>
0	0,52	2,93	4,86	3,62	7,30
15	0,39	2,78	4,83	3,20	5,08
30	0,36	2,75	4,75	3,00	4,39
45	0,31	2,70	4,56	2,75	3,57
60	0,24	2,67	4,59	2,58	2,69
90	0,15	2,66	4,57	2,37	1,63
120	0,09	2,54	4,57	2,17	0,95
180	0,08	2,52	4,45	1,93	0,76
240	0,07	2,52	4,44	1,91	0,67
300	0,08	2,52	4,43	1,92	0,69

Valores experimentais médios de espessura (ESP), largura (LRG), profundidade (PRF), área superficial total (A) e volume aparente (V) das amostras de mamão in natura secas a 70<sup>o</sup>C.

<b>Tempo (min.)</b>	<b>ESP x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>LRG x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>PRF x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>A x 10<sup>3</sup> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V x 10<sup>3</sup> (dm<sup>3</sup>)</b>
0	0,51	2,97	4,75	3,72	7,47
5	0,44	2,96	4,73	3,56	6,34
10	0,39	2,82	4,72	3,27	5,23
15	0,39	2,80	4,70	3,24	5,16
30	0,27	2,74	4,46	2,79	3,26
45	0,23	2,71	4,43	2,63	2,66
60	0,18	2,68	4,34	2,32	1,89
90	0,09	2,66	4,33	2,20	0,98
120	0,07	2,64	4,33	2,15	0,74
180	0,07	2,63	4,32	2,12	0,69
240	0,07	2,62	4,31	2,11	0,67

Valores experimentais médios de espessura (ESP), largura (LRG), profundidade (PRF), área superficial total (A) e volume aparente (V) das amostras de mamão pré-tratadas osmoticamente em sacarose e secas a 40<sup>o</sup>C.

<b>Tempo (min.)</b>	<b>ESP x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>LRG x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>PRF x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>A x 10<sup>3</sup> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V x 10<sup>3</sup> (dm<sup>3</sup>)</b>
0	0,39	2,66	4,07	2,56	3,97
30	0,32	2,54	4,03	2,28	2,97
60	0,31	2,48	3,83	2,12	2,69
120	0,25	2,34	3,70	1,93	2,06
180	0,20	2,30	3,63	1,80	1,55
240	0,19	2,24	3,42	1,70	1,41
300	0,18	2,22	3,37	1,68	1,35
360	0,17	2,19	3,35	1,66	1,28
420	0,17	2,18	3,31	1,63	1,25
480	0,17	2,18	3,30	1,63	1,24

Valores experimentais médios de espessura (ESP), largura (LRG), profundidade (PRF), área superficial total (A) e volume aparente (V) das amostras de mamão pré-tratadas osmoticamente em sacarose e secas a 50<sup>o</sup>C.

<b>Tempo (min.)</b>	<b>ESP x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>LRG x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>PRF x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>A x 10<sup>3</sup> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V x 10<sup>3</sup> (dm<sup>3</sup>)</b>
0	0,37	2,63	4,12	2,47	3,65
15	0,31	2,53	4,02	2,28	2,91
30	0,29	2,48	3,94	2,14	2,57
45	0,24	2,35	3,75	1,97	2,04
60	0,21	2,32	3,68	1,89	1,71
90	0,20	2,22	3,55	1,78	1,51
120	0,18	2,20	3,47	1,74	1,40
180	0,18	2,19	3,43	1,66	1,33
240	0,19	2,18	3,42	1,66	1,35
300	0,18	2,17	3,41	1,65	1,28
360	0,18	2,17	3,40	1,64	1,27

Valores experimentais médios de espessura (ESP), largura (LRG), profundidade (PRF), área superficial total (A) e volume aparente (V) das amostras de mamão pré-tratadas osmoticamente em sacarose e secas a 60°C.

Tempo (min.)	ESP x 10 <sup>2</sup> (m)	LRG x 10 <sup>2</sup> (m)	PRF x 10 <sup>2</sup> (m)	A x 10 <sup>3</sup> (m <sup>2</sup> )	V x 10 <sup>3</sup> (dm <sup>3</sup> )
0	0,38	2,58	4,13	2,47	3,73
15	0,33	2,48	3,79	2,22	3,01
30	0,26	2,35	3,72	2,08	2,28
45	0,24	2,25	3,63	1,94	1,96
60	0,22	2,17	3,55	1,85	1,79
90	0,19	2,14	3,43	1,72	1,44
120	0,19	2,10	3,35	1,67	1,36
180	0,19	2,09	3,32	1,59	1,30
240	0,18	2,09	3,32	1,57	1,22
300	0,17	2,09	3,31	1,53	1,16
360	0,17	2,09	3,30	1,53	1,16

Valores experimentais médios de espessura (ESP), largura (LRG), profundidade (PRF), área superficial total (A) e volume aparente (V) das amostras de mamão pré-tratadas osmoticamente em sacarose e secas a 70°C.

Tempo (min.)	ESP x 10 <sup>2</sup> (m)	LRG x 10 <sup>2</sup> (m)	PRF x 10 <sup>2</sup> (m)	A x 10 <sup>3</sup> (m <sup>2</sup> )	V x 10 <sup>3</sup> (dm <sup>3</sup> )
0	0,40	2,50	3,77	2,47	3,96
5	0,40	2,49	3,95	2,45	3,84
10	0,37	2,47	3,92	2,32	3,39
15	0,33	2,45	3,90	2,23	3,00
30	0,30	2,42	3,68	2,04	2,49
45	0,27	2,29	3,47	1,83	2,05
60	0,25	2,24	3,43	1,77	1,87
90	0,22	2,11	3,22	1,55	1,45
120	0,22	2,06	3,18	1,53	1,40
180	0,20	2,06	3,11	1,49	1,28
240	0,20	2,06	3,07	1,48	1,27
300	0,20	2,05	3,06	1,47	1,27

Valores experimentais médios de espessura (ESP), largura (LRG), profundidade (PRF), área superficial total (A) e volume aparente (V) das amostras de mamão pré-tratadas osmoticamente em xarope de milho e secas a 40<sup>o</sup>C.

<b>Tempo (min.)</b>	<b>ESP x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>LRG x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>PRF x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>A x 10<sup>3</sup> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V x 10<sup>3</sup> (dm<sup>3</sup>)</b>
0	0,38	2,66	4,27	3,16	5,00
30	0,31	2,56	4,25	2,69	3,51
60	0,26	2,42	4,00	2,48	2,79
120	0,18	2,41	3,90	2,30	1,82
180	0,15	2,25	3,67	2,08	1,42
240	0,12	2,20	3,65	2,04	1,16
300	0,13	2,16	3,56	1,97	1,15
360	0,12	2,15	3,49	1,86	1,02
420	0,12	2,14	3,48	1,83	1,01
480	0,12	2,14	3,47	1,82	1,00

Valores experimentais médios de espessura (ESP), largura (LRG), profundidade (PRF), área superficial total (A) e volume aparente (V) das amostras de mamão pré-tratadas osmoticamente em xarope de milho e secas a 50<sup>o</sup>C.

<b>Tempo (min.)</b>	<b>ESP x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>LRG x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>PRF x 10<sup>2</sup> (m)</b>	<b>A x 10<sup>3</sup> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>V x 10<sup>3</sup> (dm<sup>3</sup>)</b>
0	0,39	2,52	4,01	2,87	4,60
15	0,33	2,47	4,18	2,65	3,66
30	0,31	2,41	4,03	2,58	3,38
45	0,27	2,39	4,02	2,42	2,81
60	0,24	2,39	3,90	2,27	2,34
90	0,17	2,35	3,86	2,17	1,67
120	0,15	2,30	3,79	2,07	1,37
180	0,13	2,16	3,36	1,95	1,20
240	0,13	2,13	3,27	1,94	1,21
300	0,13	2,13	3,25	1,92	1,19
360	0,13	2,13	3,21	1,91	1,18
420	0,13	2,13	3,21	1,91	1,18

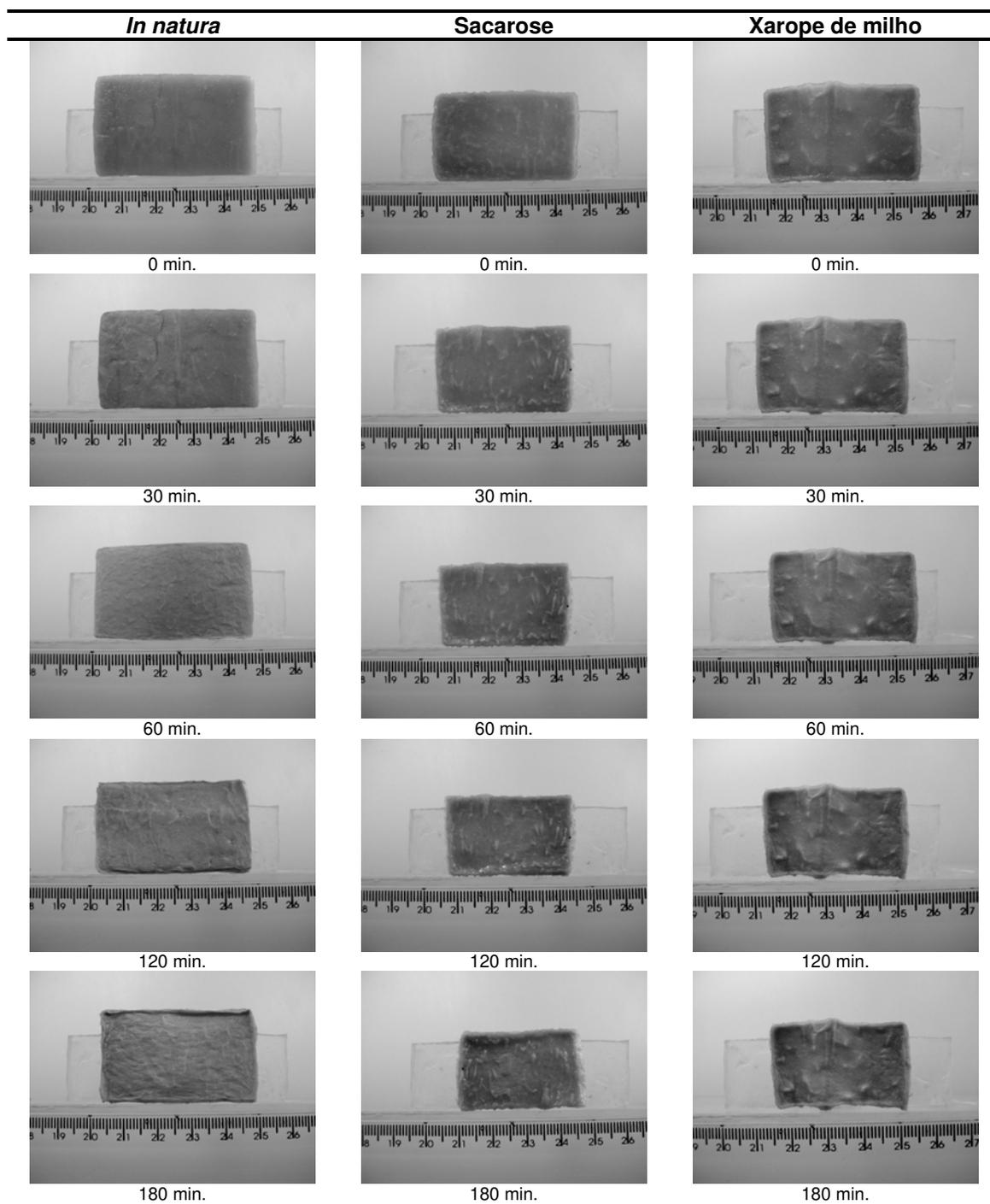
Valores experimentais médios de espessura (ESP), largura (LRG), profundidade (PRF), área superficial total (A) e volume aparente (V) das amostras de mamão pré-tratadas osmoticamente em xarope de milho e secas a 60°C.

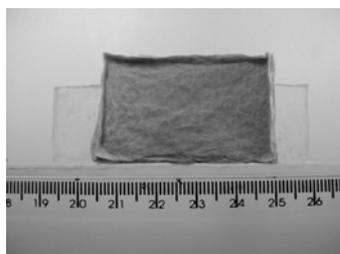
Tempo (min.)	ESP x 10 <sup>2</sup> (m)	LRG x 10 <sup>2</sup> (m)	PRF x 10 <sup>2</sup> (m)	A x 10 <sup>3</sup> (m <sup>2</sup> )	V x 10 <sup>3</sup> (dm <sup>3</sup> )
0	0,42	2,45	3,97	2,70	4,54
15	0,36	2,35	3,90	2,53	3,75
30	0,34	2,25	3,78	2,32	3,25
45	0,27	2,22	3,72	2,23	2,61
60	0,25	2,18	3,60	2,10	2,24
90	0,23	2,12	3,43	1,96	1,97
120	0,19	2,08	3,35	1,82	1,55
180	0,17	2,07	3,28	1,78	1,34
240	0,16	2,06	3,22	1,71	1,23
300	0,16	2,05	3,19	1,70	1,23
360	0,16	2,04	3,18	1,70	1,23

Valores experimentais médios de espessura (ESP), largura (LRG), profundidade (PRF), área superficial total (A) e volume aparente (V) das amostras de mamão pré-tratadas osmoticamente em xarope de milho e secas a 70°C.

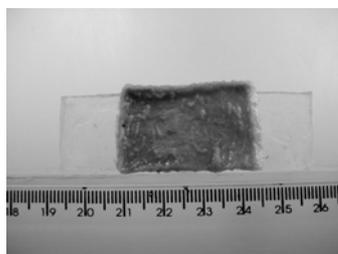
Tempo (min.)	ESP x 10 <sup>2</sup> (m)	LRG x 10 <sup>2</sup> (m)	PRF x 10 <sup>2</sup> (m)	A x 10 <sup>3</sup> (m <sup>2</sup> )	V x 10 <sup>3</sup> (dm <sup>3</sup> )
0	0,39	2,52	4,06	2,63	4,13
5	0,38	2,49	3,99	2,59	3,99
10	0,37	2,31	3,91	2,49	3,76
15	0,36	2,24	3,82	2,44	3,61
30	0,30	2,22	3,78	2,26	2,86
45	0,27	2,21	3,76	2,14	2,47
60	0,25	2,20	3,74	2,09	2,22
90	0,20	2,13	3,41	1,83	1,61
120	0,20	2,08	3,31	1,66	1,42
180	0,19	2,07	3,26	1,64	1,35
240	0,18	2,07	3,25	1,63	1,28
300	0,18	2,05	3,25	1,63	1,27

Amostras de mamão *in natura* e pré-tratadas em sacarose e xarope de milho, secas a 40<sup>0</sup>C.

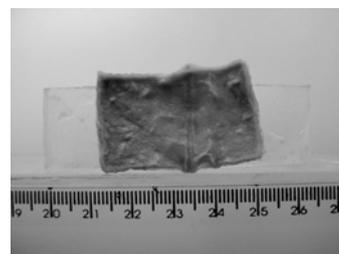




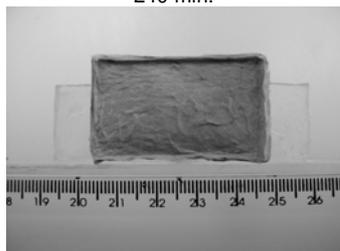
240 min.



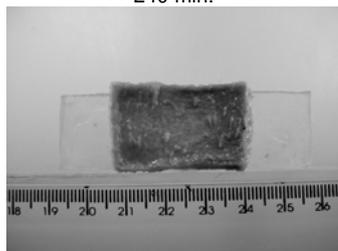
240 min.



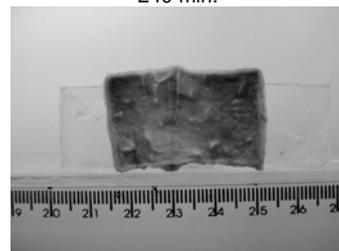
240 min.



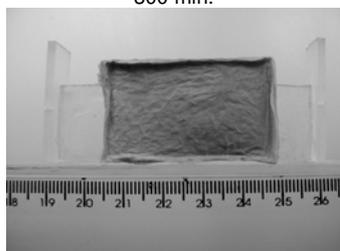
300 min.



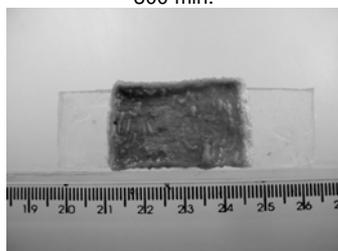
300 min.



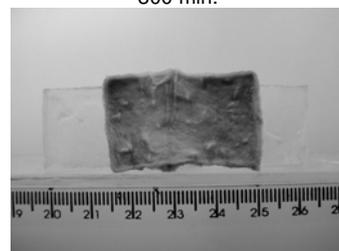
300 min.



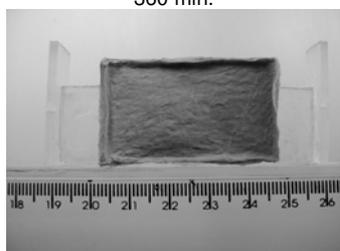
360 min.



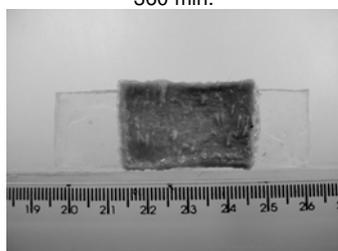
360 min.



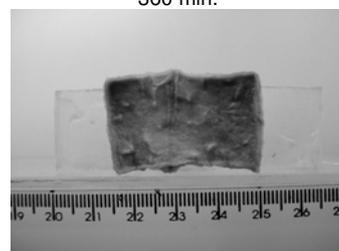
360 min.



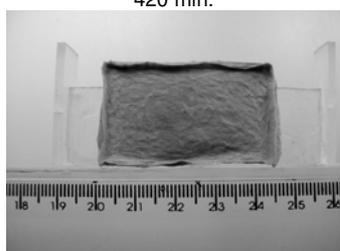
420 min.



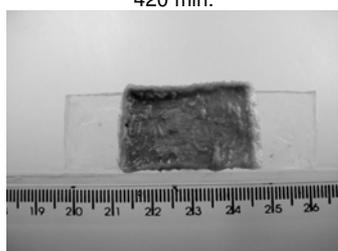
420 min.



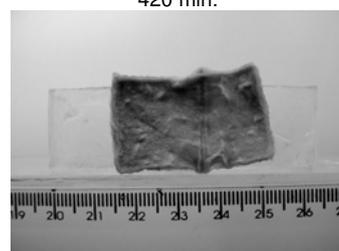
420 min.



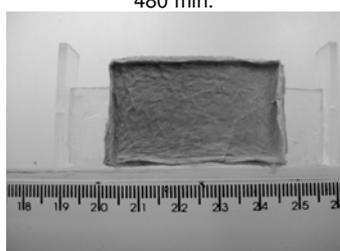
480 min.



480 min.

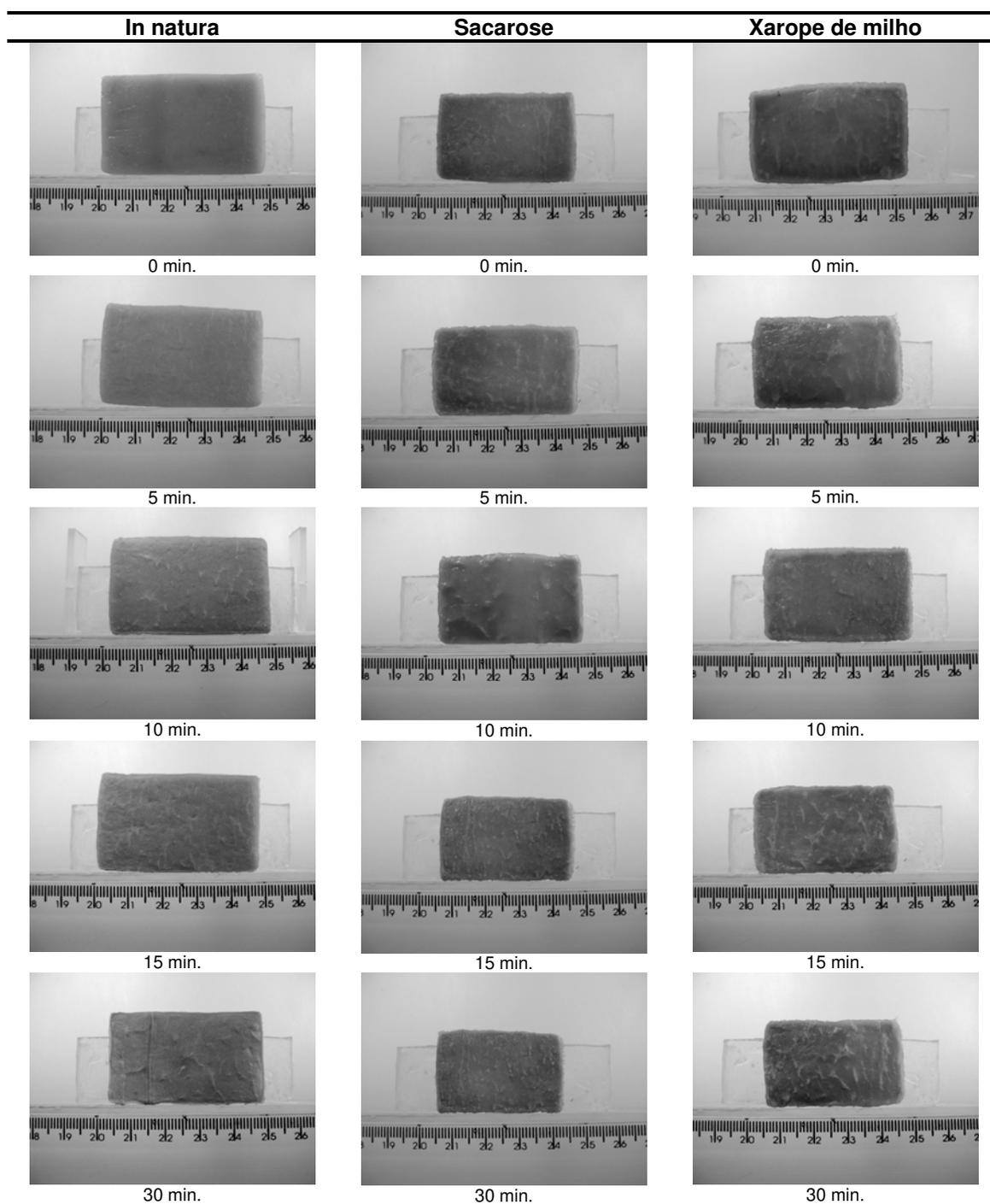


480 min.

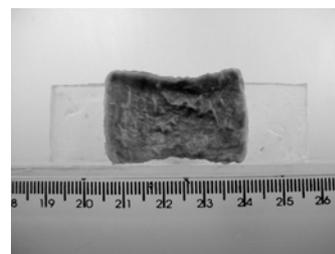
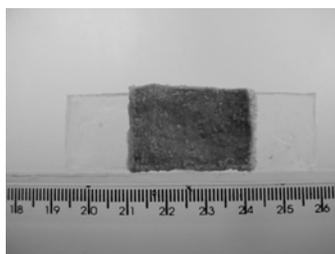


540 min.

Amostras de mamão *in natura* e pré-tratadas em sacarose e xarope de milho, secas a 70°C.







300 min.

300 min.

---