

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**Secagem de Pêra em Secador a Microondas**

**Fabiola Fumagalli**

**Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Química como  
requisito parcial à obtenção  
do título de Mestre em  
Engenharia Química, área de  
concentração em Pesquisa e  
Desenvolvimento de Processos  
Químicos**

**Orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Maria da Silveira**

**São Carlos - SP  
2003**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

F976sp Fumagalli, Fabíola.  
Secagem de pêra em secador a microondas / Fabíola Fumagalli. -- São Carlos : UFSCar, 2003.  
130 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2003.

1. Secagem e desidratação. 2. Pêra. 3. Encolhimento. 4. Desidratação osmótica. 5. Microondas. I. Título.

CDD: 664.0284 (20<sup>a</sup>)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **FABÍOLA FUMAGALLI**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM DE DE 2003.

BANCA EXAMINADORA:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Maria da Silveira  
**Orientadora, PPG-EQ/UFSCar**

Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno  
FEQ/UFU

Profa. Dra. Maria do Carmo Ferreira  
PPG-EQ/UFSCar

“Dentre todos os conhecimentos, os sábios e bons  
buscam,  
acima de tudo, conhecerem-se a si mesmos.”  
- Shakespeare

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Antonio e Zuleica, pelo exemplo de vida e pelo apoio incondicional, não medindo esforços em minha formação pessoal e profissional.

Às minhas irmãs, Caroline e Fernanda e ao meu sobrinho, Rubens Jr., pelo amor e dedicação devotados a mim.

A Gilberto pelo apoio e paciência em todas as etapas deste trabalho.

Aos meus cunhados, Jean e Rubens, pelos momentos alegres de convívio.

A Prof<sup>a</sup> Ana Maria da Silveira pela orientação e amizade.

Aos professores do PPG-EQ/UFSCar, em especial aos professores do Centro de Secagem, pela dedicação e interesse pelos alunos do grupo.

Aos colegas/amigos do PPG-EQ/UFSCar, pelos momentos de convívio.

A todos os funcionários do DEQ/UFSCar, pela assistência e atenção.

Ao CNPQ e ao PRONEX, pelo suporte financeiro.

## **SUMÁRIO**

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>ii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xi</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Aspectos Gerais da Pêra.....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 A Desidratação Osmótica.....</b>	<b>13</b>
2.2.1 A Estrutura do Material.....	16
2.2.2 A Transferência de Massa.....	18
2.2.3 A Solução Osmótica.....	24
2.2.4 A Temperatura.....	27
2.2.5 Agitação.....	28
2.2.6 Mudanças Estruturais.....	29
<b>2.3 Comportamento Geral na Secagem.....</b>	<b>30</b>
2.3.1 A Cinética da Secagem.....	33
2.3.2 Secagem por Convecção Forçada.....	37
2.3.3 Secagem por Microondas.....	39
2.3.4 Secagem Combinada Microondas-Convecção Forçada.....	42
<b>2.4 O Encolhimento.....</b>	<b>45</b>
2.4.1 Efeito de Encolhimento na Desidratação Osmótica.....	45
2.4.2 Efeito de Encolhimento na Secagem.....	47
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1 Matéria Prima.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2 Equipamentos.....</b>	<b>53</b>
3.2.1 Desidratação Osmótica.....	53
3.2.2 Secagem.....	54
<b>3.3 Procedimento Experimental.....</b>	<b>56</b>
3.3.1 Seleção e Preparo das Amostras.....	57
3.3.2 Desidratação Osmótica.....	58
3.3.3 Secagem.....	59
3.3.4 Caracterização das Amostras de Pêra.....	60
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>65</b>
<b>4.1 Desidratação Osmótica.....</b>	<b>65</b>
<b>4.2 Secagem.....</b>	<b>82</b>
4.2.1 Secagem por Microondas.....	82
4.2.2 Secador Microondas-Convectivo.....	86
<b>4.3 Análise da Qualidade do Produto.....</b>	<b>96</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>101</b>
<b>6. SUGESTÕES.....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>106</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>121</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Principais partes da pêra.....	6
Figura 2.2:	Tecido vegetal esquemático mostrando os transportes simplasmático (flechas pretas) e apoplasmático (flecha vermelha).....	17
Figura 2.3:	Principais fluxos de transferência de massa que ocorrem durante a desidratação osmótica.....	18
Figura 2.4:	Teor de umidade em função do tempo para secagem convectiva .....	31
Figura 2.5:	Placa infinita indicando o sistema de coordenadas.....	34
Figura 2.6:	Micrografia do tecido da maçã seca após 2 horas à 70°C.....	49
Figura 3.1:	Secador tipo microondas com convecção forçada.....	55
Figura 3.2:	Fluxograma das etapas para obtenção de pêra seca.....	56
Figura 4.1:	Redução de peso em função do tempo para a desidratação osmótica de cubos de pêra em sacarose 25% em temperatura ambiente.....	66
Figura 4.2:	WL (a) e SG (b) em função do tempo para desidratação osmótica realizada com fatias em sacarose 37,5% e 40°C, durante 10 horas, parametrizado na velocidade de agitação do Shaker.....	67
Figura 4.3:	WL (a) e SG (b) em função do tempo para desidratação osmótica realizada com fatias de pêra em sacarose 50% e sem agitação, parametrizados na temperatura.....	70
Figura 4.4:	WL (a) e SG (b) em função do tempo para desidratação osmótica realizada com cubos de pêra a 30°C e sem agitação, parametrizados na concentração de sacarose.....	71
Figura 4.5:	WL em 6 horas de desidratação osmótica em função da temperatura e da concentração de sacarose, (a) ajustada por superfície de resposta e (b) superfície de contorno rebatida no plano.....	73
Figura 4.6:	SG em 6 horas de desidratação osmótica em função da temperatura e da concentração de sacarose, (a) ajustada por superfície de resposta e (b) superfície de contorno rebatida no plano.....	73
Figura 4.7:	WL (a) e SG (b) em função do tempo para desidratação osmótica realizada com sacarose a 50%, 30°C e sem agitação, parametrizados na geometria da amostra.....	75
Figura 4.8:	WL (a) e SG (b) em função do tempo para desidratação osmótica de fatias de pêra realizada com sacarose a 37,5%, 40°C e sem agitação ajustadas pelas Equações 2.4 e 2.6 do modelo de Azuara et al. (1992)....	77
Figura 4.9:	WL (a) e SG (b) em função do tempo para desidratação osmótica de fatias de pêra realizada com sacarose a 37,5%, 40°C e 120 rpm ajustadas pelas Equações 2.4 e 2.6 do modelo de Azuara et al. (1992)....	78
Figura 4.10:	Razão do volume de encolhimento em função do tempo para desidratação osmótica de fatias de pêra com sacarose a 37,5%, 40°C e 0 rpm ajustada pela Equação 2.19 do modelo de Mavroudis et al. (1998).....	80
Figura 4.11:	Razão do volume de encolhimento em função da razão de variação de massa para desidratação osmótica de fatias de pêra com sacarose a 37,5%, 40°C e 0 rpm ajustada pela Equação 2.12 do modelo de Lozano et al. (1983).....	81
Figura 4.12:	Visualização do encolhimento de fatias de pêra desidratadas a 40°C e 37,5% de sacarose; “in natura” (a) e após 6 horas de desidratação (b).....	82
Figura 4.13:	Umidade adimensional (a) e temperatura no interior da amostra (b) em função do tempo de secagem para pêra seca por microondas, parametrizados na potência de microondas.....	83

Figura 4.14:	Umidade adimensional (a) e temperatura no interior da amostra (b) em função do tempo de secagem para pêra seca por microondas em potência de 0,3 W/g amostra, parametrizados no pré-tratamento osmótico.....	85
Figura 4.15:	Potência em Watts em função da porcentagem da potência total para o forno de microondas White-Westinghouse ajustada por regressão linear.....	87
Figura 4.16:	Umidade adimensional (a) e temperatura no interior da amostra (b) em função do tempo de secagem para pêra seca após desidratação osmótica, parametrizados no modo de secagem.....	89
Figura 4.17:	Teor de umidade em função do tempo de secagem ajustado pela Equação 2.16 do modelo de Lewis (1921) parametrizados no modo de secagem (● dados experimentais e / curva do modelo).....	92
Figura 4.18:	Teor de umidade em função do tempo de secagem ajustado pela Equação 2.14 do modelo de Page (1949) parametrizados no modo de secagem (● dados experimentais e / curva do modelo).....	92
Figura 4.19:	Razão do volume de encolhimento em função da razão de variação de umidade para secagem de pêra “in natura” no modo combinado microondas-convectivo com potência 0,3 W/g, ajustada pela Equação 2.19 do modelo de Mavroudis et al. (1998).....	95
Figura 4.20:	Razão do volume de encolhimento em função do tempo para secagem de pêra “in natura” no modo combinado microondas-convectivo com potência 0,3 W/g, ajustada pela Equação 2.18 do modelo de Lozano et al. (1983).....	95



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Composição química geral, vitamínica e mineral da pêra.....	9
Tabela 2.2:	Área plantada e produção das principais fruteiras de clima temperado no Brasil.....	10
Tabela 2.3:	Valores mínimos de $a_w$ para o desenvolvimento de alguns microorganismos patogênicos.....	12
Tabela 3.1:	Valor da densidade, sólidos totais, teor de umidade e perda de massa após 3 horas de desidratação osmótica para pêra.....	53
Tabela 4.1:	Valor do coeficiente de transferência de massa, do coeficiente de difusão médio, do número de Reynolds, do número de Schmidt e do número de Biot mássico.....	69
Tabela 4.2:	Codificação dos níveis das variáveis temperatura e concentração de sacarose.....	74
Tabela 4.3:	Espessura e área superficial específica das amostras na desidratação osmótica.....	75
Tabela 4.4:	Constantes de equilíbrio preditas pelas Equações 2.4 e 2.6 para diferentes condições experimentais.....	78
Tabela 4.5:	Valores da razão entre áreas superficiais, volumes e massas iniciais e finais e da densidade das amostras de pêra.....	79
Tabela 4.6:	Valores dos parâmetros dos modelos de Lewis (1921) e Page (1949), preditos via regressão não linear para diferentes condições de secagem..	91
Tabela 4.7:	Valores da razão entre áreas superficiais, volumes e teores de umidade iniciais e finais e da densidade das amostras de pêra.....	93
Tabela 4.8:	Valores experimentais e da literatura para a caracterização da pêra “in natura”.....	96
Tabela 4.9:	Variação das características da pêra após desidratação osmótica.....	98
Tabela 4.10:	Variação das características da pêra após secagem.....	99

## NOMENCLATURA

- A área da amostra [ $L^2$ ];
- $A_0$  área inicial da amostra [ $L^2$ ];
- $a_w$  atividade de água (adimensional)
- B constante do modelo de Lozano et al., equação 2.18 (adimensional);
- $Bi_m$  número de Biot mássico (adimensional);
- D coeficiente de difusão [ $L^2/T$ ];
- $D_m$  coeficiente de difusão médio [ $L^2/T$ ];
- $D_t$  coeficiente de difusão aparente [ $L^2/T$ ];
- d expoente que determina o tipo de encolhimento (adimensional);
- $d_i$  diâmetro do béquer [L];
- E constante do modelo de Lozano et al., equação 2.18 (adimensional);
- $E_a$  energia de ativação [ $ML^2T^{-2}n^{-1}$ ];
- e espessura da amostra [L];
- K parâmetro do modelo de Lewis, equação 2.16 [ $T^{-1}$ ];
- $K'$  parâmetro do modelo de Page, equação 2.14 [ $T^{-n}$ ];
- $K_0$  constante de secagem a 25°C [L/T];
- $K_c$  coeficiente de transferência de massa [L/T];

- $K_d$  parâmetro do modelo de Azuara (adimensional);
- $L$  dimensão característica da amostra [L];
- $L_0$  dimensão característica inicial da amostra [L];
- $l$  espessura da placa [L];
- $MR$  coeficiente de umidade (adimensional);
- $m_{\text{água}}$  massa de água [M];
- $m_{\text{pic} + \text{água}}$  massa do picnômetro cheio de água [M];
- $m_{\text{pic} + \text{fruta}}$  massa do picnômetro com amostra de pêra [M];
- $m_{\text{pic}}$  massa do picnômetro [M];
- $m_{\text{pic} + \text{fruta} + \text{água}}$  massa do picnômetro com a amostra de pêra e cheio com água [M];
- $N$  número de termos da série (adimensional);
- $n$  número de dados experimentais (adimensional);
- $P_s$  peso bruto das amostras secas [M];
- $P_u$  peso bruto das amostras úmidas [M];
- $R$  constante dos gases ideais (adimensional);
- $Re$  número de Reynolds (adimensional);
- $S_1$  constante do modelo para descrever a perda de água [ $T^{-1}$ ];
- $S_2$  constante do modelo para descrever o ganho de sólidos [ $T^{-1}$ ];

- Sc número de Schmidt (adimensional);
- SG ganho de sólidos (%);
- SG $\infty$  ganho de sólidos no equilíbrio (%);
- ST sólidos totais [M/M];
- Sv coeficiente de encolhimento (adimensional);
- T temperatura de secagem [ $\theta$ ];
- Ta peso da tara da balança [M];
- t tempo [T];
- U teor de umidade em base úmida [M/M];
- V volume da amostra [L<sup>3</sup>];
- V<sub>0</sub> volume inicial da amostra [L<sup>3</sup>];
- V<sub>água</sub> volume de água [L<sup>3</sup>];
- V<sub>pic</sub> volume do picnômetro [L<sup>3</sup>];
- WL fração de água perdida pela amostra no tempo t (%);
- WL <sub>$\infty$</sub> <sup>exp</sup> fração de água perdida no equilíbrio obtido experimentalmente (%);
- WL <sub>$\infty$</sub> <sup>mod</sup> fração de água perdida no equilíbrio obtido pela equação 2.5 (%);
- WL <sub>$\infty$</sub>  fração de água perdida no equilíbrio (%);
- WR redução de peso (%);

- WS fração de água que pode difundir mas permanece na amostra (%);
- X umidade média do material no tempo t em base seca [M/M];
- X<sub>0</sub> umidade inicial do material em base seca [M/M];
- X<sub>e</sub> umidade do material no equilíbrio em base seca [M/M];
- y coordenada de posição [L];

### **SÍMBOLOS GREGOS**

- $\rho$  densidade [M/L<sup>3</sup>];
- $\rho_{\text{água}}$  densidade da água [M/L<sup>3</sup>];
- $\rho_{\text{amostra}}$  densidade aparente da amostra [M/L<sup>3</sup>];
- $\rho_s$  densidade da solução osmótica [M/L<sup>3</sup>];
- $\mu_s$  viscosidade da solução osmótica [M/LT];
- $\omega$  velocidade de agitação [L/T];

### **SIGLAS**

- CCDM Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais;
- FAO Organização para Alimentos e Agricultura (Food and Agriculture Organization);

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo principal a secagem de pêra em três diferentes secadores: convectivo, microondas e combinado microondas-convectivo. Pretende-se também avaliar o efeito da desidratação osmótica, como pré-tratamento, na qualidade do produto seco.

Antes de serem secas ou desidratadas as amostras passaram por um tratamento mecânico, que consistiu em descascar, retirar sementes e cortar a fruta, e por um tratamento químico com sua imersão em solução 1,5% de ácido ascórbico durante 15 minutos.

A etapa de desidratação osmótica foi conduzida analisando-se a influência da concentração do agente osmótico (sacarose a 25; 37,5 e 50%), da temperatura (30, 40 e 50°C), da geometria da amostra (cubos, palitos e fatias) e do uso ou não de agitação (0 e 120 rpm) na cinética do processo, através da perda de água e da incorporação de sacarose pela fruta. A melhor condição cinética obtida, através de análise estatística dos dados, foi para a amostra em fatias desidratada a 40°C, com 37,5% de sacarose e sem agitação, sendo esta condição utilizada como pré-tratamento à secagem. O ajuste dos dados experimentais foi realizado pelo modelo empírico de Azuara et al. (1992).

A etapa de secagem foi estudada para a fruta “in natura” e desidratada osmoticamente. Nesta etapa, a melhor condição cinética foi determinada pela análise da influência do tipo de secagem e da potência de microondas no teor de umidade final da fruta. A velocidade e a temperatura do ar foram mantidas constantes em 2m/s e 50°C, respectivamente e mediu-se a temperatura no interior da amostra

durante a secagem. A melhor condição cinética obtida foi para a secagem no modo combinado microondas-convectivo com potência de 0,3 W/(g amostra) para amostras pré-desidratadas osmoticamente. O ajuste dos dados experimentais foi realizado utilizando-se os modelos de Lewis (1921) e difusional de Page (1949), apresentando bons resultados.

Os materiais e produtos da desidratação osmótica e da secagem foram analisados quanto a sua qualidade, sendo as principais análises, cálcio, fósforo, potássio, atividade da água, densidade, teor de umidade, sólidos totais e encolhimento.

A desidratação osmótica demonstrou ter efeito benéfico nas características físico-químicas analisadas, contribuindo para a retenção dos principais constituintes e manutenção das demais características analisadas. Na secagem, a qualidade cai com o aumento da temperatura no interior da amostra. O encolhimento, dado pela redução no volume, foi bem representado pelo modelo de Lozano et al. (1983), sendo linearmente proporcional a variação no teor de umidade.

## ABSTRACT

The present work has as main objective the pear drying in three different dryers: convective, microwave and microwave-convective. It is also intended to evaluate the effect of the osmotic dehydration, as pré-treatment, in the quality of the dried product.

Before they be dried or dehydrated the samples passed by a mechanical treatment, which consists of peeling, seeds removing and cutting the fruit, and a chemical treatment with its immersion in solution 1,5% of ascorbic acid for 15 minutes.

The stage of osmotic dehydration was carried out by analyzing the influence of the osmotic agent concentration (sucrose to 25; 37,5 and 50%), of the temperature (30, 40 and 50°C), of the sample geometry (cubes, toothpicks and slices) and of the use of agitation (0 and 120 rpm) in the kinetics of the process, through the loss of water and the sucrose incorporation by the fruit. The best kinetic condition obtained, through statistical analysis of the data, was to the sample in slices dehydrated at 40°C, with 37,5% of sucrose and without agitation, being this condition used as pretreatment to the drying. The adjustment of the experimental data was accomplished by the empirical model of Azuara (1992).

The drying stage was studied for the fresh and osmotically dehydrated fruit. In this stage, the best kinetic condition was stablished based on the analysis of the influence of the kind of drying used and the power of the microwave in the moisture content of the fruit. The speed and temperature of the air was maintained constant at 2 m/s and 50°C, and the temperature inside the sample was measured during drying.



The best kinetic condition obtained was for the microwave-convective drying at 0,3W/g of osmotically dehydrated samples. The adjustment of the experimental data was accomplished by the Lewis (1921) and Page diffusion models (1949).

The materials and products of the osmotic dehydration and drying were analyzed concerning their quality, being the main analyses, calcium, phosphorus, potassium, water activity, density, moisture content, total solids and shrink.

The results obtained were compared in terms of the drying kinetics and quality of the product, for the equipments used through statistical treatment and with available data from the literature.

The osmotic dehydration had beneficial effects on the properties analyzed, giving the best results to the main components retention and maintenance of the others analyzed properties. During the drying, the quality decreases with the increase in the inner sample temperature. The shrink data adjustment, presented by the volume decrease, was well represented by the Lozano et al. (1983) model, being linearly proportional to the moisture content variation.

## **1. INTRODUÇÃO**

A secagem, na indústria de alimentos, é um dos mais importantes processos de conservação e visa a remoção de água do alimento a um nível tal que a deterioração por microorganismos é minimizada, aumentando a vida útil do alimento, bem como proporcionando uma redução de volume, que facilita seu manuseio no transporte e armazenagem.

Técnicas de processamento de alimentos convencionais ou novas têm sido utilizadas para melhorar a qualidade nutricional, higiênica e sensorial de um alimento, aperfeiçoando as características de processamento de materiais frescos, aumentando a variedade de produtos e, finalmente, levando em consideração aspectos econômicos e ambientais.

Dentre essas técnicas tem-se a desidratação osmótica associada ao processo de secagem que, do ponto de vista econômico e ambiental, é recomendada pela possível economia de energia que ocorrerá na secagem, pois atuará sobre um produto com umidade bem inferior ao produto fresco, processando-o em um tempo muito menor.

Outra técnica que vem despertando interesse na indústria e entre os pesquisadores, visando a maior qualidade dos produtos, é o uso do microondas na secagem. A secagem de alimentos em secador a microondas implica em interações entre o campo eletromagnético associado às microondas e os componentes dipolares ou cargas do alimento, formados principalmente pela água. As vantagens oferecidas pelo microondas incluem rapidez da operação, economia de energia e controle preciso do processo (Monzó-Cabrera et al., 2000).

A pêra, por ser uma importante fruta dos climas temperados, sendo muito apreciada por seu sabor e excelentes qualidades nutricionais, é comumente processada em alguns países, como os EUA, mas no Brasil seu processamento não é muito comum, pois a produção nacional não é muito significativa e o mercado de pêras secas é muito pequeno, devido ao fato do consumidor não estar habituado ao produto. Sendo assim, deve-se desenvolver técnicas de desidratação de pêras possibilitando que produtos de boa qualidade sejam comercializados, aumentando sua aceitação por parte do consumidor e incentivando a produção nacional.

Visando contribuir com os trabalhos sobre secagem, desenvolvidos no Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (DEQ/UFSCar), pela inclusão de um método de secagem ainda não utilizado pelo grupo, este trabalho se propõe a: secar pêra em secador a microondas, verificando a influência do pré-tratamento osmótico na secagem; adaptar um forno de microondas para operar como secador, nos modos microondas, convecção e microondas-convecção e analisar a qualidade do produto final.

Para atingir aos objetivos propostos as seguintes etapas devem ser cumpridas:

- caracterização da pêra “in natura” , desidratada osmoticamente e seca através de análises de umidade, sólidos totais, atividade de água, densidade, cálcio, fósforo e potássio;
- desidratação osmótica, avaliando a influência dos parâmetros concentração, temperatura e agitação do agente osmótico;
- secagem por microondas, avaliando a influência da potência de microondas na cinética de secagem e a variação da temperatura no interior da amostra;

- adaptação de um forno de microondas para operar nos modos microondas, convectivo e no modo combinado microondas-convectivo, realizando ensaios cinéticos para comparação da cinética de secagem nos três modos e análise da variação da temperatura no interior da amostra;
- estudo do encolhimento durante a desidratação osmótica e a secagem e
- análise da qualidade do produto processado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As frutas, legumes, carnes e outros alimentos são materiais que, sem um processamento adequado, deterioram-se facilmente. Um dos processos de conservação que há décadas tem sido muito utilizado em indústrias químicas e de alimentos, para se obter longos prazos de preservação de produtos finais é a secagem. O objetivo básico na secagem de produtos alimentícios é a remoção de água dos sólidos até um nível no qual o crescimento microbiano seja minimizado.

A secagem parcial ou total visa a redução da atividade de água de um dado alimento a qual pode ser relacionada intimamente com a sua estabilidade física, química e microbiológica. Outro objetivo da secagem é a significativa redução em volume do produto, o que promove uma maior eficiência no transporte e armazenamento do produto alimentício.

A secagem é a operação na qual a atividade de água ( $a_w$ ) de um alimento é diminuída pela remoção da quase totalidade da água livre presente, através de sua vaporização ou sublimação (Karel, 1975).

O processo de secagem pode ser feito mecanicamente, por meio de prensas ou centrífugas, ou termicamente, por vaporização. Devido à fragilidade de produtos alimentícios e a necessidade de manter sua forma, os processos mecânicos são normalmente inviáveis, utilizando-se, portanto, os processos térmicos.

Os principais equipamentos de secagem utilizados atualmente na indústria de alimentos são:

- secadores com fluido quente em convecção forçada;

- secadores por radiação;
- secadores à vácuo e
- liofilizadores.

O material a ser seco é muito importante no processo de secagem, sendo conhecidas duas classes. Na primeira têm-se os sólidos granulados ou cristalinos, nos quais as condições de secagem não alteram suas propriedades e podem ser determinadas pelas vantagens econômicas e a segunda, os sólidos orgânicos, nos quais se encaixam os alimentos, que tem a água como parte integrante de sua estrutura, sendo afetados pela sua remoção. Em virtude desta circunstância, as condições de realização da secagem são críticas e devem ser escolhidas, primordialmente, tendo em vista os efeitos sobre a qualidade do produto.

Observa-se que, uma das maiores desvantagens do processamento térmico de alimentos, é a degradação térmica, que altera as propriedades nutritivas e sensoriais do alimento. Com o intuito de estender o tempo de prateleira de produtos alimentícios e garantir uma alta qualidade final, têm-se estudado maneiras de realizar o processo de secagem de forma rápida e amena. Entre as muitas técnicas que têm sido estudadas com esta intenção, destacam-se a combinação de vários processos de secagem simultaneamente ou em seqüência e o uso da desidratação osmótica antes do tratamento térmico.

Para um maior aprofundamento dos conceitos expostos, nesta revisão serão abordados os seguintes tópicos: pêra, desidratação osmótica, secagem e encolhimento.

## 2.1 Aspectos Gerais da Pêra

Fruto da pereira, árvore originária da Europa e da Ásia, a pêra é cultivada em cerca de 2500 variedades, variando sua forma, cor e consistência, a maioria descende da espécie *Pyrus communis*. Como outras espécies da família das Rosáceas (pomoídeas), entre elas a maçã, o pêssgo e a ameixa, a pêra depende de bastante frio no inverno para que entre em um repouso hibernar e um período vegetativo, com dias quentes e claros, para seu desenvolvimento e frutificação (Nova Enciclopédia Barsa, 1998).

A pereira apresenta-se como um arbusto ou em forma de árvore alta. As folhas são longamente pecioladas; as flores são brancas, relativamente pequenas, pediceladas, reunidas em cachos e muito perfumadas; os frutos são bagas grandes e suculentas; a casca é fina ou grossa, lisa ou rugosa, variando sua cor entre o verde, o amarelo e o castanho (Enciclopédia Barsa, 1965).

Na Figura 2.1 pode-se observar as partes constituintes da pêra.

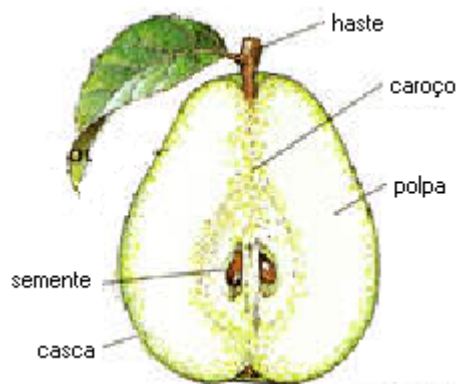


Figura 2.1: Principais partes da pêra.

No Brasil, o cultivo da pêra é feito com sucesso na região Sul e, em escala modesta, em áreas acima de 600 metros de altitude no Espírito Santo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. A chamada pêra d'água destaca-se entre as variedades que se aclimatam bem às Serras do Sudeste. A pereira começa a frutificar com três ou quatro anos e continua a produzir até cerca de trinta anos. O florescimento no Brasil ocorre em agosto e setembro, ao passo que a maturação das frutas se conclui em fevereiro e março (Nova Enciclopédia Barsa, 1998).

Os cultivares de pêra variam grandemente em tamanho, formato, qualidade e outras características. Alguns dos principais cultivares são Anjou, Bartlett, Red Bartlett, Packman's Triumph e Winter Nelis.

**Anjou** – grande, tardio e de boa qualidade; bom para estocagem e transporte. Árvore apenas razoavelmente produtiva, boa polinizadora. Origem: Bélgica, 1823.

**Bartlett** – uma das cultivares mais produzidas no mundo, principalmente nos EUA e Canadá. Fruto de ótima qualidade, de tamanho médio a grande, com polpa branca, suculenta, macia, de textura fina, doce, considerada padrão para as outras cultivares. Os frutos são de baixa conservação, são boas para fazer compotas, enlatar e secar. Árvore de boa adaptação para uma grande variedade de solos e condições climáticas. Origem: Inglaterra (onde é chamada William's), 1770.

**Red Bartlett** – Mutação da Bartlett que produz um fruto de cor vermelho brilhante. Em tamanho, formato e polpa   t pico da Bartlett. Origem: Washington (EUA), 1938.

**Packman's Triumph** –  rvore semi vigorosa, de porte ereto e bem ramificado com alta produtividade, frutifica o precoce e sem problemas de alternância de produ o. O fruto   grande, com a epiderme firme, de colora o verde amarelada quando madura, opaca, com manchas de ferrugem distribuídas no fruto e numerosas



pontuações pequenas e marrons. A polpa é de coloração creme clara, de textura fina, macia, suculenta, doce e de boa qualidade. Sua conservação em temperatura ambiente é razoável e em câmara fria é considerada boa, podendo ser de quatro a cinco meses se os frutos forem colhidos no ponto ideal. Origem: Washington (EUA), 1938.

**Winter Nelis** – pequena, atrativa, boa qualidade; muito boa para estocagem em câmara fria. Árvore de difícil poda e manutenção. Bélgica, 1880.

A pêra é muito apreciada por suas propriedades nutritivas e pelo delicado sabor, sendo ideal para regimes, pois tem baixo valor calórico.

Contém quantidades razoáveis de vitaminas B1, B2 e Niacina, todas do Complexo B, que regulam o sistema nervoso e o aparelho digestivo, fortificando o músculo cardíaco. Elas são essenciais ao crescimento e evitam a queda dos cabelos e problemas de pele.

Contendo ainda vitaminas A e C, a pêra é uma das frutas mais ricas em sais minerais incluindo Sódio, Potássio, Cálcio, Fósforo, Enxofre, Magnésio, Silício e Ferro. Eles contribuem na formação dos ossos, dentes e sangue, mantêm o equilíbrio interno e o vigor do sistema nervoso.

Como contém muita fibra, a pêra é boa também contra a prisão de ventre, inflamação do intestino e bexiga.

A composição da pêra em termos gerais, vitamínicos e minerais é dada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Composição química geral, vitamínica e mineral da pêra.

Substância	Quantidade em 100 g de Pêra	
	*	**
Água (g)	86	-
Calorias (cal)	63,3	47
Glicídios (g)	14,1	11,5
Proteínas (g)	0,6	0,3
Lipídios (g)	0,5	0
Cálcio (mg)	15	6
Fósforo (mg)	18	11
Ferro (mg)	0,32	0,1
Retinol (mcg)	3,5 - 4	-
Tiamina (mcg)	40 - 57	-
Riboflavina (mcg)	20 - 73	-
Niacina (mg)	0,15	-
Ácido Ascórbico (mg)	1,1	4
Sódio (mg)	23,1	2
Potássio (mg)	131,7	114
Magnésio (mg)	5	16
Enxofre (mg)	0,03	17
Cobre (mg)	0,06	0,08
Iodo (mg)	0,02	-

Fonte: \*FRANCO (1992); \*\*FAO

No contexto da produção mundial das frutíferas pomoídeas, as pêras só perdem para as maçãs e são consumidas tanto ao natural quanto industrializadas: em calda, secas, em sucos ou vinhos finos. Atualmente, estima-se a produção mundial de pêras em aproximadamente 10 milhões de toneladas: a Europa produz cerca de 5 milhões de toneladas, a Ásia 2 milhões, a América do Norte quase 1 milhão, a

América do Sul cerca de 500 mil e a Oceania e a África do Sul cerca de 250 mil cada um. Na Europa os países maiores produtores são a Itália (1/3 do total), a Alemanha e a França. Na Ásia, a China é a maior produtora, seguida do Japão. Na América do Norte, os EUA lideram com 75% da produção, seguido pelo Canadá. Na América do Sul, a Argentina lidera com mais da metade da produção, seguida do Chile e Brasil.

A pêra está entre as principais árvores frutíferas de clima temperado em produção no Brasil, como mostrado na Tabela 2.2, no entanto, sua produção ainda é pequena e não atende ao mercado interno.

*Tabela 2.2: Área plantada e produção das principais fruteiras de clima temperado no Brasil.*

<i>Fruteira</i>	<i>Área plantada (ha)</i>	<i>Produção (t)</i>
Videira	58.426	740.000
Macieira	28.050	627.000
Pessegueiro	16.930	164.550
Caquizeiro	5.570	92.780
Ameixeira	3.600	23.870
Pereira	2.525	16.800
Quivizeiro	370	2.430

\*Fonte: Nova Enciclopédia Barsa

A Itália além de ser o maior produtor mundial, é também o maior país exportador. Nesse particular, em ordem decrescente aparecem Argentina, França, Austrália, África do Sul e os EUA. O Brasil, nesse contexto, se destaca como um dos grandes importadores da pêra Argentina, a partir dos meses de fevereiro e março, consumindo mais de 70 mil toneladas das pêras William's, Anjou e Packham's

Triumph. Em seguida, entram as mesmas pêras provenientes da Europa (Itália, França, Portugal), EUA e, inclusive do Chile (Winter Nellis). Entretanto, alguns dados permitem verificar que o consumo aparente *per capita* nacional não deve ultrapassar 0,5 kg de pêras ao ano.

Espera-se que, com o aumento da população brasileira e a melhoria do seu poder aquisitivo, ocorra uma elevação do consumo dessa fruta. A produção brasileira (sendo Santa Catarina o maior produtor) de qualidade inferior, a curto prazo, não atenderá essa demanda e não impedirá os gastos superiores a 50 milhões de dólares na importação de pêras, até mesmo pela dificuldade climática encontrada no país. Este fato evidencia a importância do desenvolvimento de técnicas de processamento que possam suprimir a demanda do produto em qualquer época do ano, possibilitando inclusive que a fruta seja comprada, processada e armazenada durante períodos de safra, quando o preço é mais baixo e colocadas no mercado durante o período de entressafra, sendo uma alternativa de consumo nesse período, quando as pêras estão mais caras, e diminuindo sua importação.

Apesar do processamento de pêras ser comum em alguns países, como os EUA, isso não acontece no Brasil, até porque sua produção, apesar de estar entre as principais árvores frutíferas em produção no país, não é muito significativa.

As técnicas de processamento mais comuns visam a diminuição da atividade de água, de maneira a impedir a contaminação e a proliferação microbológica. A Tabela 2.3 mostra que a redução da atividade de água ( $a_w$ ) até um valor de 0,91 inibe a grande maioria dos patógenos, com exceção do *Staphylococcus aureus* aeróbio.

Tabela 2.3: Valores mínimos de  $a_w$  para o desenvolvimento de alguns microorganismos patogênicos.

<b>Patógeno</b>	<b><math>a_w</math></b>
<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 parahaemolyticus</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)

Nesse propósito as vantagens do processo de secagem são várias, entre as quais têm-se a facilidade na conservação do produto, a redução do seu peso e a economia, pois, via de regra, a secagem é mais barata que outros processos de conservação. A secagem pode ser feita para vários usos, como em produtos de

panificação, molhos e compotas, alimentos para recém nascidos e para consumo da própria fruta seca.

No entanto, devido ao fato do consumidor brasileiro não estar habituado ao consumo de pêras secas, seu mercado é muito pequeno, e, evidencia-se a importância do desenvolvimento de técnicas de desidratação de pêras que possibilitem a obtenção da pêra seca com características que impliquem em sua aceitação por parte do consumidor de maneira a incentivar a indústria de processamento e a produção nacional, aumentando a variedade de produtos secos disponíveis em nosso mercado e diminuindo a importação da matéria-prima.

## **2.2 A Desidratação Osmótica**

No processo de desidratação osmótica ocorre a diminuição da umidade do alimento sem a mudança de fase da água, o que significa que o aquecimento não é suficiente para que a água passe para o estado gasoso (Bolin et al., 1993).

Por essa técnica o alimento é imerso em uma solução aquosa hipertônica de solutos comestíveis, que deve ter alta pressão osmótica e, conseqüentemente, baixa atividade de água ( $a_w$ ), originando uma força motriz que impulsiona a transferência de massa entre o alimento e a solução, desidratando parcialmente o alimento.

Nas células do alimento, a parede celular atua naturalmente como uma membrana parcialmente seletiva, existindo portanto, além da desidratação do alimento, um escape de soluto, tanto do alimento para a solução quanto o inverso. A

desidratação osmótica direta é, portanto, um processo simultâneo de transferência de água e soluto.

Seu uso no processamento de alimentos pode ter efeitos benéficos. A incorporação de soluto do meio osmótico torna possível, em uma certa extensão, melhorar as propriedades nutricionais e funcionais do alimento, dando a possibilidade de formulação do produto sem modificar sua integridade (Mavroudis et al., 1998a).

No decorrer do processo há diminuição da atividade de água do alimento e o soluto que penetrou liga-se aos componentes das paredes celulares formando estruturas que dão rigidez ao produto (Bobbio & Bobbio, 1995).

Além de baixa atividade de água, a solução osmótica utilizada deve ser inócua e ter um bom sabor. Soluções concentradas de açúcares (50 – 70° Brix) tem sido as mais comumente utilizadas (Lerici et al., 1985).

A quantidade e a taxa de remoção de água depende de vários parâmetros do processo. Em geral tem sido mostrado que a perda de massa em frutas osmolizadas aumenta com o aumento da concentração de soluto da solução osmótica, do tempo de imersão, da temperatura, da razão mássica solução/alimento utilizada, da área superficial específica do alimento e pelo uso de sistemas de baixa pressão.

Contreras e Smyrl (1983) usaram xarope de amido de milho para desidratar anéis de maçã e observaram que a massa das amostras podiam ser reduzidos em até 70% no processo de desidratação osmótica.

Açúcares têm sido os agentes osmóticos mais comumente utilizados para frutas, em virtude de sua eficiência e por proporcionar a conservação do aroma. A alta concentração de açúcares no xarope em contato com as frutas previne o

escurecimento enzimático (pela ação da polifenoloxidase) e a fermentação causada por fungos e leveduras (Ponting et al., 1966) sendo possível a obtenção de um produto final com boa coloração sem a necessidade de utilizar agentes redutores tais como SO<sub>2</sub>. Além disso, pode-se ressaltar como características vantajosas do método, o tempo reduzido de exposição do produto a altas temperaturas, os danos baixos em relação à cor e ao sabor e a remoção de ácidos de algumas frutas que “substituídos” por açúcares conferem um sabor mais agradável às mesmas.

As desvantagens do processo são que o decréscimo na quantidade de ácidos pode ser ruim em alguns produtos após o processo de secagem; enrugamento do produto após a desidratação e a fruta pode apresentar uma fina camada de açúcar em sua superfície, o que pode ser indesejável. Além disso, deve ser adicionado às frutas secas um antioxidante de gorduras, pois o produto apresenta uma certa tendência em tornar-se rançoso após o armazenamento por várias semanas à temperatura ambiente.

Um processo de desidratação osmótica não leva a uma atividade de água baixa o bastante para garantir a preservação do produto. Ela produz um produto intermediário pronto para ser submetido a processos complementares, podendo ser usada como um pré-processamento para um produto final seco, congelado ou várias formas de posterior acondicionamento, obtendo além de um produto final com melhores qualidades nutricional e sensorial, uma considerável economia.

A desidratação parcial de frutas por osmose antes de sua exposição a outro processo com a finalidade de obter produtos de alta qualidade foi sugerida pela primeira vez em 1966 (Spieß & Beshnilian,1998). Desde então, o tratamento



osmótico tem sido estudado combinado com várias outras técnicas estabilizantes visando sempre analisar a qualidade final do produto associada a fatores econômicos.

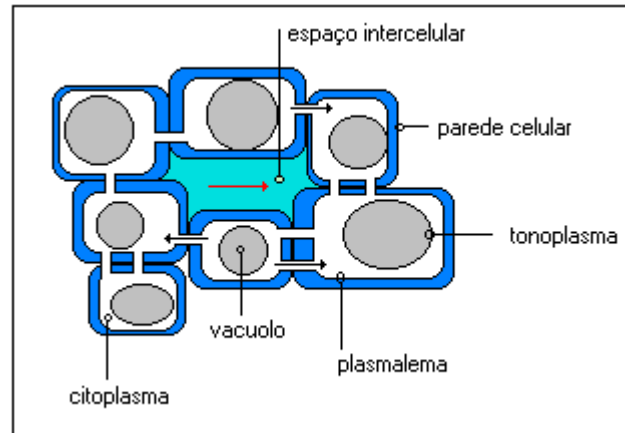
No processo de desidratação osmótica diversas variáveis como a estrutura do material, a transferência de massa, a solução osmótica, a temperatura, o uso de agitação e mudanças estruturais são estudados.

### **2.2.1 A Estrutura do Material**

Gekas et al. (1997) afirmam que, em geral, a força motriz e a estrutura representam os dois maiores fatores que controlam a transferência de massa durante o processamento de alimentos. Detalhes da estrutura do alimento em nível celular determinam os caminhos do transporte de água e nutrientes, afetando, portanto, as taxas de transferência de massa da célula ou para a célula, influenciando, desta maneira, a qualidade final de produtos processados.

Spieß & Beshnilian (1998) estudaram a influência da estrutura dos tecidos vegetais no transporte de massa, do qual pode-se descrever: tecidos vegetais são sistemas complexos que consistem de uma matriz de sólidos, espaços intercelulares, espaços extracelulares e gás aprisionado, como mostrado na Figura 2.2.

Existem 3 caminhos normalmente aceitos para transferência de massa no tecido vegetal: transporte apoplasmático (fora da membrana celular); transporte simplasmático (através dos pequenos canais entre 2 células vizinhas no espaço intracelular), e o transporte através da membrana (entre a célula e o espaço livre formando o espaço intercelular e a parede celular).



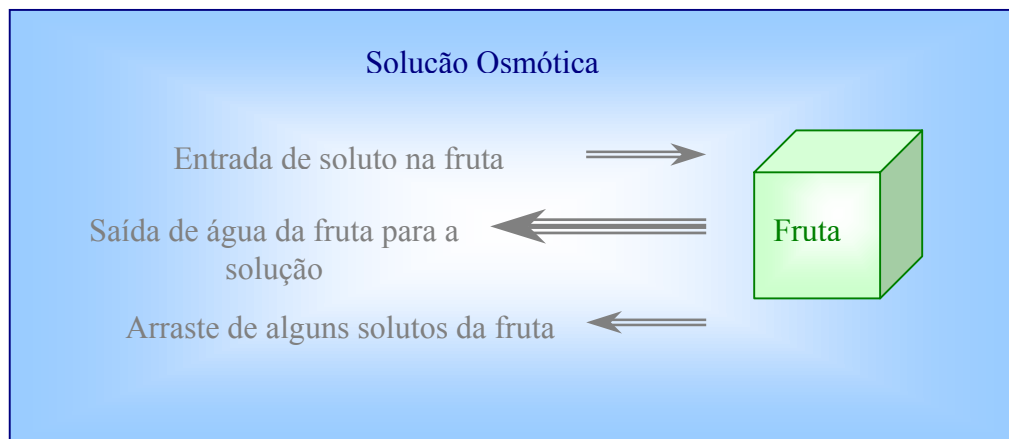
*Figura 2.2: Tecido vegetal esquemático mostrando os transportes simplasmático (flechas pretas) e apoplasmático (flecha vermelha).*

Durante o processo há a difusão de soluto no espaço intercelular e, dependendo das características do soluto, pode haver ou não sua passagem através da membrana para o espaço intracelular. As diferenças de potencial químico, entre a água e os solutos no sistema, resultam em fluxos de vários componentes da planta e da solução; a perda de água e o ganho de soluto são os dois principais fluxos simultâneos. Junto com as mudanças de composição química do tecido do alimento, ocorrem as mudanças estruturais como o encolhimento, a redução de porosidade e o colapso celular, que influenciam no comportamento do tecido na transferência de massa.

Durante o manuseio da fruta, ao cortá-la ou retirar sua casca, é importante tomar-se muito cuidado para não comprimir a amostra, pois isso pode causar alterações estruturais do tecido, como o rompimento da parede celular, que é sabido afetar o resultado da desidratação osmótica, isto é, aumentando o ganho de sólido e minimizando a perda de água (Mavroudis et al., 1998a).

### 2.2.2 A Transferência de Massa

O mecanismo da transferência de massa na desidratação osmótica é complicado e ainda se encontra em estágio de investigação (Yao & Lê Maguer, 1997). Quando o material celular é imerso em uma solução osmótica, três fluxos de transferência de massa ocorrem: O primeiro é a saída de água do tecido para o meio osmótico vizinho à amostra e o segundo é o movimento do soluto do meio para a amostra. O terceiro fluxo de transferência de massa é o arraste (lixiviação) de solutos naturais (açúcares, ácidos orgânicos, minerais, vitaminas) da amostra para o meio, sendo quantitativamente menor que os outros dois fluxos mais importantes na análise final do produto (Lazarides e Mavroudis, 1996). A Figura 2.3 ilustra o mecanismo descrito.



*Figura 2.3: Principais fluxos de transferência de massa que ocorrem durante a desidratação osmótica.*

Essa sequência ocorre da seguinte maneira: primeiro o soluto penetra ao longo do tecido através do volume extracelular. As propriedades seletivas da membrana celular restringem parcialmente ou totalmente que o soluto penetre no volume

intracelular (dependendo das características do soluto), mas permite que a água a atravesse com facilidade.

O aumento da concentração de soluto no volume extracelular destrói o equilíbrio na membrana celular e induz ao fluxo de água através da membrana do volume intracelular para o volume extracelular. Esse fluxo leva a célula a um novo equilíbrio pela concentração da solução no volume intracelular e a diluição da solução no volume extracelular.

A água que deixa o volume intracelular deve formar um fluxo de saída através do volume extracelular, formando um escoamento desde o centro da amostra e acumulando-se ao longo do caminho em direção à superfície da mesma. O escoamento se opõe à penetração de soluto e acentua o gradiente de concentração, tornando a transferência de massa na desidratação osmótica muito mais complexa do que é observado com a difusão pura, adotada em muitos trabalhos.

Yao & Le Maguer (1997) demonstraram que o primeiro fluxo pode transportar mais de 90% da água removida durante a desidratação osmótica de batatas com uma solução de manitol, e arrastar de volta 60% do manitol que difundiu para dentro da amostra.

Em adição, o encolhimento do tecido da amostra e o rearranjo de sua estrutura celular fazem com que a análise do processo de desidratação osmótica torne-se ainda mais complicada.

A força motriz para a remoção da água na desidratação osmótica é a diferença de potencial químico da água através da membrana celular e, essa diferença é devida à mudança da concentração de soluto no volume extracelular.

A concentração de soluto no volume extracelular é o resultado final da difusão do soluto da solução osmótica para o tecido, da diluição pelo fluxo de água através da membrana e o arraste pelo escoamento convectivo. A concentração, portanto, varia com o tempo e a posição. Além disso, a concentração determinada experimentalmente é a concentração parcial do tecido em uma posição específica, que é diferente da concentração de todo o volume extracelular. Portanto, o perfil de concentração parcial é bastante limitado (Yao & Le Maguer, 1997).

Conway et al. (1983) afirmam que a perda de água ocorre principalmente nas primeiras 2 horas e o máximo ganho de sólidos ocorre nos primeiros 30 minutos.

Infelizmente, não foram encontradas na literatura informações de como o escoamento e o fluxo através da membrana variam com a posição e o tempo no volume extracelular. Essa carência de informações torna difícil a elaboração de um modelo apurado para a transferência de massa na desidratação osmótica, limitando sua aplicação na indústria de alimentos.

Azuara et al. (1992) propõem um modelo a dois parâmetros, baseado no balanço de massa, o qual é utilizado para estimar o coeficiente de transferência de massa e os valores da perda de água e ganho de soluto no equilíbrio. Este modelo é capaz de prever a perda de água e o ganho de soluto em condições de equilíbrio usando os dados experimentais obtidos durante um período relativamente curto de tempo. Além disso, o modelo independe das condições de processo e da geometria da amostra, o que facilita sua aplicação.

Fazendo o balanço de massa para o movimento de água no interior do alimento, têm-se:

$$WL = WL_{\infty} - WS \quad (2.1)$$

onde:

WL - fração de água perdida pelo alimento no tempo t (%);

$WL_{\infty}$  - fração de água perdida no equilíbrio (%) e

WS - fração de água que pode difundir para a solução mas permanece no alimento (%).

Nessa equação  $WL_{\infty}$  tem um valor fixo para condições constantes de temperatura e concentração. Por outro lado, WL e WS são funções da taxa de perda de água e do tempo. Contudo, enquanto WL aumenta com o aumento dessas variáveis, WS diminui. Isso sugere a relação

$$WS = \frac{WL}{K_d} \quad (2.2)$$

para WL e WS, representada por um parâmetro  $K_d$ , que por sua vez é função do tempo e da taxa de perda de água.

A taxa de perda de água é função do tempo, da temperatura e da concentração inicial da solução osmótica. A maioria dos experimentos de desidratação osmótica ocorrem à temperatura constante e a uma dada concentração da solução osmótica. Desde que se possa assumir essas condições, a taxa de perda de água passa a ser função apenas do tempo. Baseado nisso, é possível propor uma função simples para  $K_d$  em termos do tempo (t) e uma constante ( $S_1$ ) relacionada a perda de água:

$$K_d = S_1 \cdot t \quad (2.3)$$

Substituindo as Equações 2.3 e 2.1 na Equação 2.2 e rearranjando os termos, chega-se à equação:

$$WL = \frac{S_1 t (WL_\infty)}{1 + S_1 t} \quad (2.4)$$

que associa a perda de água com o tempo através das constantes  $S_1$  e  $WL_\infty$ . Quando  $t \rightarrow \infty$  (no equilíbrio), a Equação 2.4 torna-se assintótica em um valor correspondendo a  $WL_\infty$ . Com a finalidade de prever a fração de perda de água pelo alimento em um tempo  $t$  pela Equação 2.4, é necessário conhecer os valores para  $S_1$  e  $WL_\infty$ . Estes, por sua vez, podem ser calculados usando uma regressão linear ou por uma regressão não linear, utilizando-se os dados obtidos experimentalmente durante um curto intervalo de tempo e a forma linearizada da Equação 2.4:

$$\frac{t}{WL} = \frac{1}{S_1 (WL_\infty)} + \frac{t}{WL_\infty} \quad (2.5)$$

Similar às Equações 2.4 e 2.5 pode-se escrever para o ganho de sólidos:

$$SG = \frac{S_2 t (SG_\infty)}{1 + S_2 t} \quad (2.6)$$

$$\frac{t}{SG} = \frac{1}{S_2 (SG_\infty)} + \frac{t}{SG_\infty} \quad (2.7)$$

onde:

$SG$  – fração de soluto ganho pela amostra em um tempo  $t$ ;

$SG_\infty$  – fração de soluto ganho pela amostra no equilíbrio e

$S_2$  – constante relacionada com a taxa de ganho de soluto pela amostra.

Baseado na Segunda Lei de Fick, Crank (1975) propôs uma equação para difusão unidimensional, em regime transiente, em uma placa plana em contato com uma quantidade infinita de solução. Sua forma simplificada para pequenos intervalos de tempo é:

$$\frac{WL_t}{WL_\infty} = 2 \left( \frac{D_t \cdot t}{\pi \cdot l^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

onde:

$WL_t$  – quantidade de água deixando (WL) ou soluto entrando (SG) na amostra no tempo  $t$ ;

$WL_\infty$  - quantidade de água deixando ou soluto entrando na amostra no equilíbrio;

$D_t$  – coeficiente de difusão aparente e

$l$  – metade da espessura da placa.

Para a obtenção do coeficiente de difusão da água deixando a amostra, devem-se utilizar dados experimentais de perda de água e a Equação 2.4 e, para o coeficiente de difusão de soluto penetrando na amostra, os dados experimentais do ganho de sólidos e a Equação 2.6.

Favetto et al. (1981) utilizaram a Equação 2.8 para determinar o coeficiente de difusão aparente de carne bovina durante a desidratação osmótica. A equação descreveu adequadamente somente os primeiros estágios da desidratação e o coeficiente de difusão foi assumido constante com o tempo.

Relacionando a Equação 2.8 com o modelo proposto pela Equação 2.4 obtém-se uma expressão simples através da qual  $D_t$  pode ser facilmente calculado em diferentes intervalos de tempo:

$$D_t = \frac{\pi \cdot t}{4} \left[ \left( \frac{S_i l}{1 + S_i t} \right) \cdot \left( \frac{WL_\infty^{\text{mod}}}{WL_\infty^{\text{exp}}} \right) \right]^2 \quad (2.9)$$

onde:

$S_i$  – pode ser  $S_1$  ou  $S_2$ ;



$WL_{\alpha}^{\text{mod}}$  – valor do equilíbrio obtido pelas equações 2.4 e 2.6;

$WL_{\alpha}^{\text{exp}}$  – valor do equilíbrio obtido experimentalmente e

$D_t$  – coeficiente de difusão aparente no tempo  $t$ .

Se os valores experimentais não são conhecidos, assume-se que são iguais aos previstos pelo modelo e a Equação 2.9 pode ser usada para obter uma boa estimativa de  $D_t$ , desde que a cinética do processo esteja bem representada pelas Equações 2.4 e 2.6.

O coeficiente de difusão médio ( $D_m$ ) é então calculado pela média aritmética dos coeficientes de difusão em cada tempo:

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^N (D_t)_i}{N} \quad (2.10)$$

onde:

$(D_t)_i$  – coeficiente de difusão aparente no tempo  $t$  e

$N$  – número de dados utilizados.

### 2.2.3 A Solução Osmótica

A influência das variáveis do meio osmótico, como a composição e concentração da solução osmótica, a temperatura, o uso de agitação e a proporção solução/amostra, no mecanismo de transferência de massa e qualidade do produto tem sido intensivamente estudadas (Bolin et al., 1983; Lericci et al., 1988; Colligan & Raoult-Wack, 1994).

A concentração da solução e a natureza do soluto (podendo ser este soluto um princípio ativo, um agente preservativo, um soluto de interesse nutricional ou ainda um melhorador da qualidade sensorial) influenciam a taxa de remoção de água e a impregnação com soluto. Soluções concentradas de açúcares como sacarose, frutose, dextrose, maltose em soluções puras ou multicompostas tem sido as mais comumente utilizadas (Lerici et al., 1988).

O xarope de sacarose tem sido considerado como o melhor agente osmótico devido à menor taxa de ganho de soluto, ao melhor comportamento durante as reciclagens e às melhores características sensoriais (Bolin et al., 1983). A combinação de agentes osmóticos, por exemplo, sal e açúcar, estabelece vantagens como efeitos de interação onde a presença do sal impede a formação da camada de açúcar na superfície do produto e a presença do açúcar limita a entrada de sal (Colligan & Raoult-Wack, 1994). Islam & Flink (1982) analisaram o uso de misturas binárias de solutos e verificaram que o uso dessas misturas reduz os custos e melhora a eficiência do processo.

Lenart & Dabrowska (1998) afirmaram que a diferença entre a taxa de penetração do soluto e a taxa de remoção da água é maior no início do processo, recomendando, portanto, um curto tempo de processamento para se alcançar um maior grau de desidratação com um pequeno ganho de soluto.

Soluções osmóticas com baixa concentração resultam em baixa perda de água e alto ganho de soluto pela amostra. Um aumento na concentração promove a troca de massa com aumento da taxa de perda de água em relação ao ganho de soluto. A

faixa de concentração destas soluções normalmente utilizadas está entre 40 – 70° Brix.

Panagiotou et al. (1998) notaram que soluções de açúcares com pesos moleculares mais baixos são mais efetivos na perda de água pela amostra, pois resultam em uma solução osmótica com alta concentração molecular e alta pressão osmótica, ou seja, um meio mais efetivo para o processo. No entanto, esses mesmos açúcares também resultam em um maior ganho de massa. Por outro lado, o uso de açúcares com alto peso molecular ou soluções mais concentradas contribuem para uma diminuição no ganho de soluto pela amostra, pois formam uma camada na superfície da amostra que diminui a difusão de soluto e bloqueia a saída de substâncias celulares, sem alterar a perda de água (Lerici et al., 1998).

Durante o processo, ocorre também a diluição da solução osmótica, devido à remoção de água do tecido da amostra, da difusão de soluto da solução para a amostra e pelo arraste de componentes da amostra. A extensão e a taxa dessa mudança depende da proporção em peso da solução para a amostra que é utilizada. Com baixas proporções, a diluição da solução diminui a eficiência do processo, porque a concentração da solução diminui. Para altas proporções, o efeito da diluição quase não é notado, mas envolve o manuseio de grandes volumes de solução aumentando os custos do processo. Geralmente, a proporção mássica de 5:1 é recomendada e satisfaz a suposição de concentração da solução osmótica constante.

Alguns pesquisadores têm usado, ao invés de uma solução de açúcar para a desidratação osmótica, o açúcar diretamente misturado à fruta. Com essa técnica melhores taxas de desidratação são encontradas e garante-se que a concentração do

açúcar seja constante durante o processo, já que a proporção de açúcar é tomada em relação à massa de fruta e a mesma não se altera durante o processo. Isto evita também grandes volumes reacionais que ocorrem quando se tem que usar massa de solução 5 vezes maior que a massa de amostra. Venkatachalapaty e Raghavan (1998) removeram 25% da umidade de “blueberries” desidratadas com sacarose em proporções de 3:1 e 4:1 em relação à massa de fruta durante 48 horas. Silveira e Raghavan (2001) usaram sacarose para desidratar morangos por 24 horas em uma proporção de 4:1 de fruta para sacarose em massa.

#### **2.2.4 A Temperatura**

A desidratação osmótica aumenta com a temperatura, que pode igualmente ocasionar danos ao produto. Acima de 50°C, dá-se o escurecimento enzimático e a deterioração do aroma e sabor. Acima de 60°C, há a modificação de tecidos, favorecendo a absorção de sólidos (Farkas & Lazar, 1969 e Lenart & Flink, 1984).

Rastogi & Raghavarao (1994) observaram que um aumento na concentração e temperatura da solução osmótica aumenta a taxa de transferência de massa até um certo ponto, após isso mudanças indesejáveis no sabor, cor e textura do alimento são observadas. Para vários autores, a faixa de temperaturas analisada em seus experimentos fica entre 5 e 60°C, sendo as temperaturas mais utilizadas entre 20 e 40°C.

Torregiani (1993) afirmou que a melhor temperatura de processamento depende do produto. Para vagens verdes, Biswal et al. (1991) consideraram 40°C uma temperatura alta, obtendo melhores resultados a 20°C. Heng et al. (1990),

trabalhando com mamão, verificaram que acima de 60°C a perda de ácido ascórbico e a descoloração são acentuadas.

Lerici et al. (1985) sugeriram um tratamento de temperatura alta e de tempo curto para evitar danos causados pelos processos de longa duração.

### **2.2.5 Agitação**

Em trabalhos não muito recentes (Ponting et al., 1966; Bongirwar & Sreenivasan, 1977), o efeito da agitação da solução osmótica foi estudado em termos de comparação entre tratamentos com ou sem agitação. As análises do efeito da agitação foram limitadas à perda de massa e não foram quantificadas. Contudo, fica claro que amostras tratadas com agitação apresentam uma perda de massa superior àquelas não agitadas. Garrote et al. (1992) estudaram o efeito da agitação em pêras, morangos e maçãs em cubos, em dois níveis de agitação. Para uma baixa agitação, ocorreu fluxo laminar na circulação da solução e para alta agitação ocorreu fluxo turbulento.

Um aumento na perda de água foi notado quando operando com altos valores de agitação, ou seja, em turbulência. Com respeito ao ganho de soluto, os dados obtidos por Garrote et al. (1992) concordam com os dados obtidos por Mavroudis et al. (1998a), ambos não encontraram um aumento desse parâmetro. Raoult et al. (1989) verificaram um aumento na perda de água e uma diminuição do ganho de soluto em sistema agitado comparado com sistema não agitado.

A diferença no comportamento da perda de água e do ganho de soluto com a agitação pode refletir diversos mecanismos de transporte, observando-se além da

difusão, a convecção. Contudo, mesmo com a sugestão de que ambos os mecanismos existam, não é possível avaliar com precisão em que extensão o ganho de soluto é influenciado pela difusão ou pela convecção livre. É sabido que, devido à complexidade da estrutura do tecido de gêneros alimentícios, ambos os mecanismos de transferência de massa existem simultaneamente para o mesmo componente. É possível que a convecção livre ocorra logo nos primeiros estágios, enquanto a difusão domine estágios posteriores. Logo, a difusão de Fick é sugerida como o mecanismo prevaiente à convecção, devido ao adequado comportamento da curva de penetração de soluto no tecido da amostra (Mavroudis et al., 1998b).

Outro efeito importante da agitação é dispersar a fina camada de solução diluída que se forma na superfície da amostra devido à perda de água e que pode alterar a taxa de desidratação (Leitão et al., 2000).

### **2.2.6 Mudanças Estruturais**

Quando os alimentos são osmoticamente desidratados, o fluxo de massa no sistema produz mudanças estruturais e nas propriedades físicas e geométricas (volume, dimensão, viscosidade, densidade, porosidade, ...), que por sua vez afetam subseqüentes fluxos de massa. De fato, tem sido observado que mudanças no volume e porosidade da amostra ocorrem durante o processo osmótico, promovendo a ação de forças não difusionais, como o gradiente de pressão, devido ao relaxamento da rede celular deformada com a liberação da tensão estrutural armazenada no sistema (Barat et al., 2000).

Parâmetros estruturais, como o volume da amostra, dimensões específicas e porosidade estão estritamente relacionados não somente com o comportamento do alimento nos processos de transferência de massa, mas também a outros aspectos como propriedades sensoriais e físicas do alimento.

Bolin et al. (1993) observaram, na desidratação de pêras cortadas em quatro partes, uma diminuição de sua firmeza após a perda de aproximadamente 20% de massa, seguida por um correspondente aumento da firmeza até a textura original em aproximadamente 50% de perda de massa.

### **2.3 Comportamento Geral na Secagem**

A secagem é normalmente considerada como uma operação de remoção de umidade de um sólido por evaporação. O comportamento na secagem é analisado com base em princípios gerais dos fenômenos de transferência de calor e massa (McCabe & Smith, 1967).

Foust et al. (1982) descrevem o comportamento na secagem de um sólido úmido mediante um gás a uma temperatura e a uma umidade fixas. Imediatamente após o contato entre o sólido e o meio secante, a temperatura do sólido ajusta-se até atingir um regime permanente. Neste regime, a temperatura da superfície do sólido molhado é a temperatura de bulbo úmido do meio secante. As temperaturas no interior do sólido tendem a ser iguais à temperatura de bulbo úmido do gás, mas a

concordância entre elas é imperfeita em virtude das defasagens entre o movimento de massa e o de calor.

Uma vez que as temperaturas do sólido tenham atingido a temperatura de bulbo úmido do gás, elas permanecem bastante estáveis e a taxa de secagem também permanece constante. Este período de secagem é o período de secagem a taxa constante e termina quando o sólido atinge o teor de umidade crítico. Além deste ponto, a temperatura da superfície eleva-se e a taxa de secagem cai rapidamente. O período de taxa decrescente pode ser bem maior do que o período de taxa constante, embora a remoção de umidade seja muito menor. A taxa de secagem aproxima-se de zero, num certo teor de umidade de equilíbrio, que é o menor teor de umidade atingível, no processo de secagem, com o sólido nas condições a que está submetido. A Figura 2.4 mostra uma curva típica de secagem.

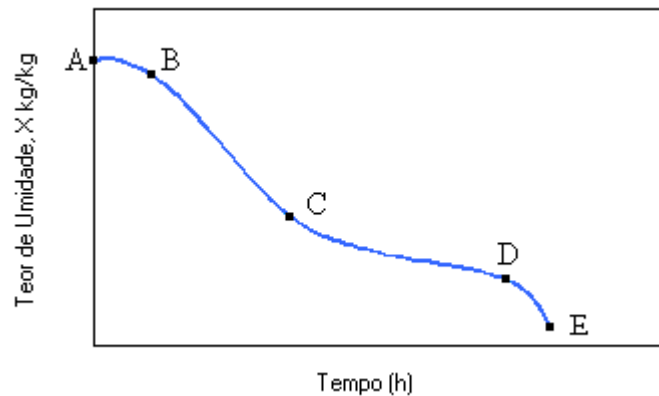


Figura 2.4: Teor de umidade em função do tempo para secagem convectiva.

Durante a secagem da maioria dos sólidos porosos, a umidade se move inicialmente por capilaridade até a superfície do sólido, de forma a manter uma umidade superficial constante. Neste estágio, que ocorre após um pequeno intervalo



de tempo (segmento AB da Figura 2.4), onde a temperatura do sólido atinge o valor de regime permanente, a taxa de secagem mantém-se constante, e refere-se ao processo como Período de Taxa de Secagem Constante (BC). Em estágios mais avançados da secagem, a água dos reservatórios sub-superficiais fica reduzida, diminuindo o fluxo capilar e, conseqüentemente, a área molhada da superfície do sólido diminui gradualmente. O período de secagem da superfície insaturada é chamado de Primeiro Período de Taxa de Secagem Decrescente (CD). Depois que a área molhada na superfície do sólido desaparece, o líquido da superfície retorna pelos capilares e mantém-se em áreas mais profundas, enquanto a secagem continua. Esse é chamado de Segundo Período de Taxa de Secagem Decrescente (DE), onde a evaporação ocorre abaixo da superfície do alimento e a difusão do vapor ocorre do ponto de vaporização até a superfície (Üretir et al., 1996).

No caso de alimentos, com a diminuição da água dos reservatórios sub-superficiais, a estrutura mecânica entra em colapso e o alimento sofre encolhimento. Em alimentos nos quais ocorre o encolhimento, o encurtamento do caminho para migração da água pode compensar a redução na porosidade da matriz (Üretir et al., 1996).

Na maioria dos alimentos, as curvas de secagem mostram períodos de taxas constantes muito curtos, já que o movimento de umidade é lento e provavelmente ocorre pela difusão do líquido através da estrutura do sólido, terminando em valores elevados do teor crítico de umidade. Pelas mesmas razões, o primeiro período de taxa decrescente é muito reduzido e a maior parte do processo de secagem é controlada pela velocidade de difusão do líquido, que ocorre no segundo período de taxa decrescente.

Durante os processos de secagem de alimentos, é muito importante considerar a variação temporal da temperatura no interior da amostra para uma melhor compreensão do processo e também para a análise da manutenção da qualidade do produto. Estudos nesse sentido foram feitos por Jolly (1986) e Silveira e Raghavan (1999). Jolly (1986) afirmou que o aumento da temperatura aumenta a taxa de secagem devido ao aumento da difusividade, mas que, no entanto, não são desejáveis taxas máximas de secagem pois a qualidade do produto fica comprometida devido às altas temperaturas encontradas, sendo que para materiais biológicos não se deve ultrapassar 60°C. Silveira e Raghavan (1999), secando morangos, encontraram um perfil de temperaturas na secagem por microondas, muito mais uniforme do que para secagem convectiva, porém atingindo temperaturas mais altas.

Com relação à cinética de secagem e ao encolhimento estes foram abordados por diversos autores para a secagem convectiva, a secagem por microondas e a secagem combinada microondas-convecção.

### **2.3.1 A Cinética da Secagem**

A cinética da secagem, considerando a difusão como mecanismo principal de transferência de massa, pode ser descrita por modelos matemáticos baseados na segunda Lei de Fick, que para um sistema unidimensional, retangular e homogêneo é dada pela equação:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (2.11)$$

onde:

$X$  – umidade média do material no tempo  $t$ ;

$t$  – tempo;

$D$  – coeficiente de difusão efetivo e

$y$  – coordenada de posição.

Considerando uma placa infinita, como dado na Figura 2.5, homogênea, movimento unidimensional da umidade, distribuição uniforme da umidade inicial e ausência de qualquer resistência externa à transferência de massa, as condições inicial e de contorno são:

$t = 0$	$X = X_0$	para todo $y$
$t > 0$	$X = X_{eq}$	$y = L$
$t > 0$	$X = \text{finito}$	$y = 0$

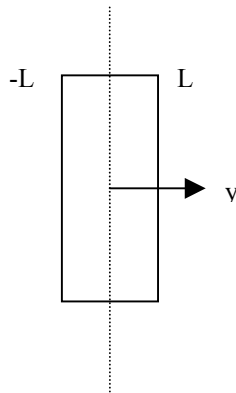


Figura 2.5: Placa infinita indicando o sistema de coordenadas.

A solução fornecida por Cranck (1983) para a equação 2.11 para uma placa infinita é dada por:

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(- (2n-1)^2 \frac{\pi^2 D \cdot t}{L^2}\right) \quad (2.12)$$

onde:

$X_e$  – umidade do material no equilíbrio;

$X_0$  – umidade inicial do material e

$n$  – número de parcelas da série.

Uma forma mais simples da equação pode ser obtida assumindo-se que a temperatura da amostra é constante durante a secagem e a Equação 2.12 pode ser truncada no primeiro termo:

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \exp\left[-\left(\pi^2 \frac{D \cdot t}{L^2}\right)\right] \quad (2.13)$$

Essa equação é uma aproximação simplificada da predição da cinética de secagem para o primeiro período de taxa decrescente.

O coeficiente de difusão efetivo,  $D$ , considerado constante, tem sido difícil de interpretar e em alguns casos tem levado a resultados que variam muito de estudo para estudo. O encolhimento do sólido não é normalmente considerado na interpretação do processo de secagem, uma vez que sólidos rígidos não encolhem apreciavelmente. Somente materiais coloidais e fibrosos como vegetais e outros gêneros alimentícios apresentam ao encolhimento.

É, portanto, importante observar que o coeficiente de difusão efetivo não deve ser interpretado como um coeficiente de difusão molecular, baseado no modelo clássico de difusão, mas como um coeficiente de uma natureza mais complexa, que

contêm vários efeitos, vindo daí a grande dificuldade de interpretá-lo e o fato de ser chamado de efetivo.

Um modelo empírico semi-logaritmico foi dado por Page (1949) e utilizado por Prabhanjan et al. (1995) para obtenção das curvas de secagem, sendo dado por:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-K' \cdot t^n) \quad (2.14)$$

onde:

MR – taxa de umidade e

K' e n – parâmetros dos modelos.

Um outro modelo derivado da aplicação da análise concentrada ao fenômeno que estabelece uma proporcionalidade entre a taxa de secagem e o teor de água livre foi utilizado por Lewis (1921), sendo representado pela seguinte equação:

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = -K \cdot (X - X_e) \quad (2.15)$$

com  $X = X_0$  no início da secagem.

Na forma integrada, tem-se:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-K \cdot t) \quad (2.16)$$

A Equação 2.15 é a expressão da lei de resfriamento de Newton e subentende que toda a resistência ao transporte de umidade concentra-se na camada limite, desconsiderando os efeitos no interior do material. Esta equação, associada à Equação 2.13, é utilizada por muitos pesquisadores da área de secagem para a determinação do parâmetro de difusividade efetiva, como observado por Vaccarezza et al. (1974).

### 2.3.2 Secagem por Convecção Forçada

Na secagem com ar quente em convecção forçada, a camada externa do sólido é aquecida por convecção enquanto a condução aquece o restante da amostra. A umidade se vaporiza e é expulsa em consequência da diferença de temperatura entre a superfície e o interior do sólido, que cria uma diferença de pressão. Os fatores que influenciam a taxa em que a secagem convectiva acontece são, dentre outras, a temperatura e velocidade do ar e a geometria do sólido.

- *A Temperatura do Ar*

Em um secador convectivo, a temperatura é a variável que tem o efeito mais pronunciado no processo de secagem, pois subentende a quantidade de calor fornecida externamente e determina a pressão parcial da umidade do sólido e a pressão de vapor de saturação do ar ambiente (Al-Duri & McIntyre, 1992).

A temperatura do ar possui grande influência nos valores das constantes das taxas de secagem. A dependência das constantes das taxas em relação a temperatura normalmente pode ser expressa pela equação de Arrhenius:

$$K = K_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \quad (2.17)$$

onde:

K – constante da taxa de secagem à temperatura do experimento;

$K_0$  – constante da taxa de secagem à temperatura padrão de 25°C;

$E_a$  - energia de ativação;

R – constante dos gases ideais e

T – temperatura de secagem.

Al-Duri & McIntyre (1992) observaram que a força motriz para transferência de massa em leite integral, leite desnatado e caseína em pó, aumentou com o aumento da temperatura. Além disso, a pressão de vapor de saturação do ar também aumentou, causando maior evaporação da umidade por unidade de tempo.

- ***A Velocidade do Ar***

A velocidade do ar na secagem convectiva, assim como a temperatura, apresenta influência nos valores das constantes das taxas de secagem, segundo Üretir et al. (1996), que observaram que a constante da taxa de secagem do primeiro período de secagem, aumenta com a velocidade do ar. Para o segundo período de taxa de secagem decrescente, que é essencialmente um processo difusivo, a constante da taxa não é afetada pela velocidade do ar.

- ***A Geometria da Amostra***

Üretir et al. (1996) observaram, em seus experimentos com cilindros de maçã, que os valores das taxas de secagem da Equação 2.15 no período de taxa de secagem decrescente diminuem com o aumento da espessura inicial da amostra. Normalmente esses parâmetros são analisados com relação à influência da área da amostra, no entanto, como os cubos de maçã sofreram um encolhimento considerável durante o processo de secagem, não foi possível expressar os efeitos da área superficial nas taxas de transferência de massa. Como o primeiro período de taxa decrescente de secagem envolve a remoção de água da superfície da amostra, é esperado que a taxa de secagem aumente com a área superficial. Por outro lado, o aumento simultâneo da área superficial e da espessura da amostra pode diminuir a velocidade do processo

global. Pelos resultados encontrados neste estudo, os efeitos de espessura superaram os efeitos da área superficial da amostra.

### **2.3.3 Secagem por Microondas**

A secagem por microondas é uma alternativa eficiente em relação aos processos convencionais pois a geração de calor não depende da condutividade térmica do material a ser seco (Monzó-Cabrera et al., 2000).

As microondas são radiações eletromagnéticas caracterizadas por comprimentos de onda entre 1 mm e 1 m, sendo poucos comprimentos de onda utilizados industrialmente, e por suas frequências, sendo a única irrestritamente autorizada em todo o mundo a de 2450Hz.

As microondas interagem com o material e geram calor em seu interior. Os alimentos pertencem à uma classe para a qual a interação com a onda é expressa pela remoção de calor. Nesses materiais dois meios são distinguidos: o meio com perda por condução, que contém cargas livres (metal) ou íons (soluções com sal), que, por oscilação, sofrem aquecimento (Laguerre et al., 1998) e os meios complexos, como os produtos biológicos, nos quais a remoção de calor é devida principalmente a perdas dielétricas nas moléculas polares (álcool, água); uma pequena parte do calor pode ser gerado por oscilação.

A água contribui para o volume de componentes dielétricos da maioria dos alimentos, especialmente para frutas e vegetais com alta umidade. Daí, esses produtos serem tão receptivos a aplicações de microondas e absorverem rápida e eficientemente a energia de microondas na presença de umidade residual. A



aplicação de microondas oferece, portanto, uma vantagem distinta: a absorção de energia proporcional à quantidade residual de umidade. Proteínas, lipídios e outros componentes também podem absorver energia das microondas, mas são relativamente menos receptíveis (Prabhanjan et al., 1995).

Na secagem por microondas, a curva de secagem pode ser descrita em 3 estágios: o período de aquecimento, o período de taxa de secagem constante e o período de taxa de secagem decrescente (Metaxas & Meredith, 1983). Tal situação é muito parecida com a secagem convectiva. No primeiro período, a energia gerada é gasta no aquecimento da água contida na amostra e a taxa de secagem aumenta linearmente. No segundo período, a curva de secagem pode ser descrita como uma linha reta com a inclinação dependente da potência alimentada ao microondas. Nesta fase, a energia é gasta para evaporar a umidade interna a uma taxa constante. O período de taxa de secagem decrescente começa quando a umidade crítica é alcançada. Isso se caracteriza por um decréscimo linear da taxa de evaporação com o decréscimo da quantidade de umidade do material (Monzó-Cabrera et al., 2000).

Outra importante característica da secagem por microondas é o aquecimento seletivo do material que possui uma distribuição não uniforme de umidade, isto é, as partes que contêm maior umidade irão produzir mais calor. Dessa forma, umidades iniciais diferentes levarão a taxas de secagem diferentes. Logo, quanto mais alta a umidade inicial da amostra, mais rápida será sua secagem, já que será produzido mais calor. Ao final da secagem, quantidades de umidade muito próximas são encontradas para as amostras com diferentes umidades iniciais, de onde se pode dizer que a secagem por microondas pode ser usada eficientemente para produzir uma

distribuição de umidades constante ao longo da amostra (Monzó-Cabrera et al., 2000).

- **Potência de Microondas**

Venkatachalapathy e Raghavan (1998) em seu trabalho com secagem de “blueberries” verificaram que a taxa de secagem do material depende fortemente da potência do microondas aplicada na amostra, sendo o tempo de secagem diminuído em 50 e 67% para potências de 0,1 e 0,2W/g, respectivamente, em relação à secagem convectiva com ar a 2 m/s e 45°C.

O tempo de secagem por microondas é menor que o tempo de secagem do mesmo material em convecção forçada para uma mesma umidade do produto. Com o aumento da potência do microondas ocorre a diminuição do tempo de secagem. O menor tempo de secagem sobre aquecimento por microondas é facilmente explicado pela energia adicional fornecida ao sistema, pela rápida penetração do calor e pela expulsão forçada dos gases (Al-Duri & Mc Intyre, 1991).

Al-Duri & Mc Intyre (1992) observaram que as taxas de secagem de macarrão, de leite desnatado e de caseína em pó aumentam com o aumento da potência, pois esta afeta as propriedades dielétricas do alimento.

No entanto, o que se nota nos trabalhos estudados é que a potência de microondas não pode ser aumentada indefinidamente. Potências muito altas costumam ocasionar a formação de uma camada enrijecida, como uma casca, no alimento. Além disso, pode ocorrer um aquecimento descontrolado da amostra que acaba queimando e mudando de coloração. A faixa usualmente empregada que fornece bons resultados é de 0,1 a 0,3 W/g de amostra.

### **2.3.4 Secagem Combinada Microondas-Convecção Forçada**

Muitos estudos tem sido feitos, combinando o uso de microondas com processos convencionais na secagem de diferentes produtos. Vários autores afirmam que essa combinação diminui significativamente o tempo de secagem e melhora a qualidade do produto comparado aos processos convencionais (Al Duri & McIntyre, 1992; Bouraoui et al., 1994; Prabhanjan et al., 1995; Abhayawick et al., 2000).

Fellows (1988) afirma que as maiores desvantagens da secagem com ar quente são o longo tempo de secagem, os danos às características sensoriais e propriedades nutricionais do alimento, oxidação de pigmentos e vitaminas pelo ar quente e a migração de solutos do interior para a superfície do alimento.

Em contraste, os dois mecanismos predominantes que governam o aquecimento por microondas de materiais dielétricos são a rotação do dipolo e a polarização iônica. Quando um sólido úmido é exposto ao aquecimento por microondas, sua temperatura pode alcançar o ponto de ebulição do líquido. A geração de vapor devido a vaporização interna da umidade provoca um gradiente de pressão que expulsa rapidamente a umidade do interior do sólido. Esse processo leva a uma secagem muito rápida sem superaquecimento da atmosfera ou da superfície da amostra, e previne o endurecimento da amostra já que ocorre apenas uma pequena migração de soluto na amostra (Bouraoui et al., 1994).

Uma recente inovação é a combinação das técnicas de convecção com microondas, onde o aquecimento é induzido pelas duas ações simultaneamente. As microondas penetram o material promovendo o aquecimento interno, enquanto a convecção se encarrega do aquecimento próximo à superfície. Isto representa uma

vantagem com relação ao processo convectivo convencional, no qual a necessidade de uma força motriz do interior para o exterior da amostra que gere o fluxo de energia normalmente leva a temperaturas extremamente altas na superfície da amostra, levando a deterioração da qualidade do produto. Este método, além do ganho na qualidade do produto, diminui o custo operacional, que é alto quando se utiliza apenas a energia de microondas, pela diminuição do tempo de operação. Nesse contexto, a secagem combinada oferece maior flexibilidade na garantia da segurança e qualidade do produto para consumo (Sanchez et al., 2000).

Logo, foi observado que a combinação de um secador a microondas com convecção resulta em taxas de secagem mais altas e maior remoção de umidade. Isto porque em secadores convectivos a remoção de umidade em baixas concentrações é um processo lento, ineficiente, enquanto a geração de calor interno por microondas supera este problema. Por outro lado, em secadores a microondas, desde que o calor é fornecido no centro do alimento, a pressão de vapor aumenta ao longo do alimento e não na superfície, direcionando a umidade para fora; conseqüentemente, a diferença de concentração e a diferença da pressão de vapor atuam na mesma direção (Lefeuvre, 1981 in Al-Duri & McIntyre, 1992).

Assim, como observado em estudos anteriores, a taxa de secagem em secadores mistos varia com a potência do microondas e a temperatura do ar, sendo o efeito da velocidade do ar insignificante em relação ao da temperatura.

- ***Potência de Microondas e Temperatura do Ar***

Prabhanjan et al. (1995) observaram, para a secagem de cenouras, que o tempo de secagem em microondas é menor que o tempo de secagem em convecção

forçada para uma mesma umidade final do produto. Com o aumento da potência do microondas ocorre a diminuição do tempo de secagem. Para uma mesma potência de microondas, o aumento da temperatura do ar diminui o tempo de secagem. A secagem mais rápida foi observada com 40% da potência do microondas de 600W e ar a 60°C.

O menor tempo de secagem sobre aquecimento por microondas é facilmente explicado pela energia adicional fornecida ao sistema, pela rápida penetração do calor e pela expulsão forçada dos gases da evaporação (Lyons et al., 1972; Lefeuvre, 1981 in Al-Duri & Mc Intyre, 1992).

Por outro lado, altas temperaturas fornecem uma grande diferença da pressão do vapor d'água (diferença entre a pressão do vapor d'água saturada e pressão parcial do vapor d'água no ar em uma dada temperatura), que é uma das forças motrizes para a difusão da umidade para fora do material no processo de secagem (Prabhanjan et al. 1995).

A influência da temperatura é maior para secagem em convecção forçada pura, sendo a diferença na taxa de secagem devida apenas à diferença de pressão do vapor d'água. Com altas potências de microondas, a influência da diferença de pressão do vapor d'água é diminuída devido a ação do microondas em facilitar a saída do fluxo de vapor d'água (Prabhanjan et al. 1995).

## 2.4 O Encolhimento

### 2.4.1 Efeito de Encolhimento na Desidratação Osmótica

Na desidratação de materiais biológicos, como as frutas, as mudanças na quantidade de umidade induzem mudanças em sua forma, densidade e porosidade, além de mudanças em suas propriedades de transporte. O desenvolvimento da estrutura física do tecido da amostra é caracterizado por vários parâmetros, sendo um deles o encolhimento. A taxa de retirada da água influencia a extensão em que ocorre o encolhimento do tecido do material nesses processos.

Alguns autores tem considerado o encolhimento do produto em termos de um modelo adicional ao de transferência de massa, que prevê mudanças de volume em alimentos desidratados (Barat et al., 2000). Dados experimentais têm mostrado que o encolhimento nos alimentos é função da umidade contida no mesmo (Lozano et al., 1983; Suzuki et al., 1976 in Raghavan & Venkatachalapaty, 1997).

O encolhimento de frutas foi analisado por Lozano et al. (1983) onde foi visto como uma função da quantidade total de água do alimento. A mudança de volume de partículas individuais foi expressa como a maior taxa de encolhimento ( $V/V_0$ ) do volume da amostra em qualquer tempo em função do volume inicial.

Lozano et al. (1983) modelaram, portanto, a mudança relativa no volume ( $S_v$ ) como uma função linear da umidade presente no alimento ( $X/X_0$ ) da forma:

$$S_v = \frac{V}{V_0} = B + E \cdot \frac{X}{X_0} \quad (2.18)$$

onde:

B e E – parâmetros do modelo.

Mavroudis et al. (1998b) propuseram três possíveis comportamentos em termos da mudança de volume: unidimensional; isotrópico e arbitrário.

O comportamento do encolhimento pode ser determinado pela relação entre o fator do volume de encolhimento ( $S_v$ ) e mudanças na superfície ( $A/A_0$ ) ou na dimensão ( $L/L_0$ ), respectivamente:

$$S_v^{\frac{2}{d}} = \left( \frac{A}{A_0} \right) \quad (2.19)$$

$$S_v = \left( \frac{L}{L_0} \right)^d \quad (2.20)$$

onde:

A – área da amostra após secagem;

$A_0$  – área inicial da amostra;

L – dimensão característica da amostra após secagem;

$L_0$  – dimensão característica da amostra antes da secagem e

d – parâmetro do modelo.

Dependendo do valor do expoente d, pode-se determinar que tipo de encolhimento está ocorrendo no sistema. Quando d é igual a 3 ou 1, o encolhimento é isotrópico ou unidimensional, respectivamente. Se d tiver valores entre 1 e 3 então o encolhimento é considerado arbitrário ou anisotrópico. No caso dos gêneros alimentícios, embora classificados como anisotrópicos, há uma tendência para usar aproximações de mudança de volume isotrópico.

Mavroudis et al. (1998b), em seu trabalho de desidratação osmótica de maçãs, encontrou uma relação fortemente linear entre  $S_v$  e a umidade presente na fruta para todas as condições de processo testadas em duas variedades de maçã, Kim e Granny Smith.

Alves (2002), em seu trabalho com tomates, encontrou uma boa concordância dos dados experimentais com o modelo de Mavroudis et al. (1998b) para mudanças na área das amostras com coeficiente igual a 1, ou seja, relação linear e que o encolhimento do tomate não está diretamente ligado a variação da massa, como proposto por Lozano et al. (1983).

#### **2.4.2 Efeito de Encolhimento na Secagem**

Durante a secagem, ao retirar-se a água, diminui-se a tensão que o líquido exerce contra a parede celular. Esta diminuição de tensão provoca o encolhimento do material (Van Arsdel, 1947).

A quantificação deste fenômeno é importante pelo fato de tornar possível a análise da totalidade do fenômeno de secagem. Do ponto de vista matemático, o efeito do encolhimento causa mudanças nas condições inicial e de contorno para a resolução da segunda lei de Fick (Park, 1987).

Vagenas & Marino-Kouris (1991), estudando a secagem de damasco, propuseram encolhimento linear, proporcional à variação do conteúdo de umidade do fruto. Supuseram que o material é isotrópico, consideraram variações nas três dimensões, sendo o mesmo coeficiente de encolhimento linear nas três direções.



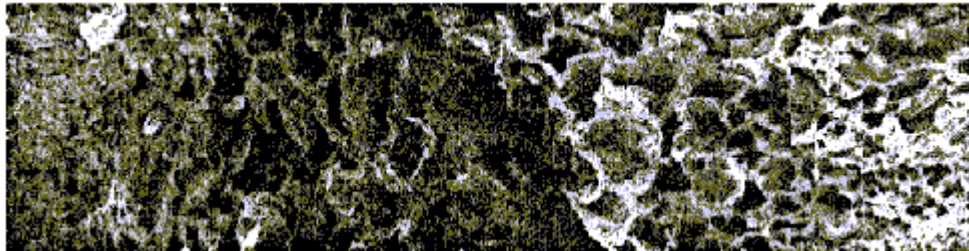
Na prática, o encolhimento depende da umidade do material e também das condições de secagem (Ratti, 1994). A secagem lenta pode levar a um encolhimento uniforme e a secagem muito rápida pode resultar em menor encolhimento devido à introdução de uma tensão permanente que preserva parte das dimensões originais, contudo, rachaduras e fissuras podem desenvolver-se internamente.

Foi mostrado em estudo realizado por McCarthy et al. (1991) que um simples modelo de difusão simulou o perfil transiente de umidade em fatias de maçã a 24°C com ar a 3 m/s por um período de secagem de 30 minutos sem um encolhimento considerável.

Para Özilgen et al. (1995), a faixa de temperaturas do experimento foi consideravelmente mais alta, entre 78 e 94°C, e as amostras de maçã perderam quase toda a água livre ao final do experimento, sofrendo um encolhimento substancial e distorção de sua forma.

Um modelo para materiais que sofrem grandes deformações foi desenvolvido por Kechaou & Roques (1989), secando gel em fatias. A partir de uma curva experimental correlacionando a densidade do material com seu teor de umidade, concluíram que o volume poderia ser representado por uma função linear do teor de umidade médio durante o encolhimento. Considerando o material anisotrópico, optaram por uma equação que relacionava a espessura das fatias em função do conteúdo de umidade médio. Através de uma mudança de coordenadas para um sistema ancorado no sólido, inseriram o coeficiente de encolhimento linear no equacionamento, resolvendo-o por diferenças finitas.

Salvatori et al. (1998) observaram que o tecido da maçã fresca mostrava células turgidas do parenquima como regiões claras, e pequenos espaços intercelulares entre as células como regiões escuras, mas as condições de secagem promoveram grandes mudanças estruturais. Como pode ser observado na Figura 2.6, a aparência do tecido da maçã seca revela um grande encolhimento das paredes celulares, deixando amplos espaços entre células vizinhas. Isso pode ser observado, em menor ou maior proporção, em toda a extensão do tecido da fruta, exceto nos primeiros 0,5 mm, onde o tecido é mais compacto e sofre colapso em decorrência da secagem.



*Figura 2.6: Micrografia do tecido da maçã seca por 2 horas à 70°C.*

Cada modificação do sistema afeta as características físicas do produto, assim como suas propriedades de transporte. McMinn & Magee (1997) avaliaram o efeito da secagem com ar em amostras cilíndricas de batata e concluíram que o encolhimento exibiu uma correlação linear com a umidade contida na amostra. Eles também examinaram as características da porosidade interna com a umidade contida na amostra e encontraram uma correlação não linear. Em acordo, Sjöholm & Gekas (1995) encontraram uma correlação linear da mudança de volume com a quantidade de água em fatias de maçã.

Confirmando a teoria, Bilbao et al., (2000) encontraram uma relação linear, porém não de igualdade entre o encolhimento global da amostra e o volume de água evaporada. Para baixas taxas de secagem, o encolhimento encontrado foi maior que o volume de água evaporada, sendo que a situação se inverteu para altas taxas de secagem. Resultados similares foram encontrados por Ratti (1994), que propôs que as características de encolhimento de batatas, maçãs e cenouras apresentavam uma clara dependência das condições de operação, sendo mostrado que a temperatura do ar exerceu uma influência negligenciável mas sua velocidade influenciou linearmente a relação entre o encolhimento e o volume de água evaporado, sendo que este diminuiu com o aumento da velocidade.

Em sistemas convencionais, o calor que é aplicado na superfície do sólido tem de ser levado ao interior através da resistência de uma camada de umidade que seca por evaporação até a água mais interna. Em um sistema de secagem por microondas, estas podem penetrar facilmente essas camadas secas inertes para serem absorvidas pela água interna. A absorção rápida de energia causa uma rápida evaporação que cria um fluxo de saída de vapor. Além de melhorar a taxa de secagem, esse fluxo de saída de vapor pode ajudar a prevenir o encolhimento do tecido, que prevalece na secagem convectiva convencional. Logo, melhores características de reidratação são esperadas em produtos secos por microondas (Al-Dury & McIntyre, 1991).

Bouraoui et al. (1994), em seu trabalho com fatias de batata, encontraram um tempo de secagem de 1/60 do tempo gasto na secagem convectiva, em que não se observou endurecimento da amostra e o encolhimento foi menor que nas amostras secas convectivamente.

Como previsto por Al-Dury & McIntyre (1991), Prabhanjan et al. (1995) encontraram em seus resultados uma menor extensão no encolhimento da amostra para a secagem feita por microondas associado à convecção. Apesar do encolhimento ser evidente em todas as corridas, sua extensão mostrou-se dependente da potência aplicada do microondas, sendo mínima na máxima potência utilizada (40%) e máxima na ausência de microondas (convecção pura).

Bouraoui et al. (1994) encontraram resultados muito parecidos da secagem por microondas com a secagem combinada microondas-convecção. Quanto mais baixa a potência do microondas, maior o tempo de secagem, menor a temperatura interna do produto e maior o encolhimento.

Considerando o exposto nesta revisão bibliográfica verifica-se a oportunidade de conduzir estudos sobre secagem de pêras desidratadas e não desidratadas osmoticamente, em secador a microondas, que possam contribuir para o desenvolvimento científico deste processo, bem como fornecer alternativas para obtenção de produtos de melhor qualidade.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Matéria Prima**

Os experimentos foram realizados com duas variedades de pêra. A razão do uso de duas variedades do material está no fato de que a mesma variedade da fruta não se encontra disponível no mercado durante o ano todo.

A pêra Willian's é a variedade com maior duração de safra, sendo encontrada a partir da segunda quinzena de janeiro até a primeira quinzena de setembro, aproximadamente. Neste período, praticamente nenhuma das outras variedades de pêra são encontradas, a não ser esporadicamente. Sendo assim, uma das variedades com que se trabalhou foi a pêra Willian's. A partir da segunda quinzena de setembro, as demais variedades de pêra analisadas são comercializadas, até a volta da safra da pêra Willian's. Portanto, com duas variedades de pêras foi possível ter material "in natura" durante todo o período de realização dos experimentos.

O critério de escolha das duas variedades baseou-se na proximidade de ambas nas características: densidade, quantidade de sólidos totais e teor de umidade da fruta e perda de massa após desidratação osmótica de 3 horas, analisadas para diversas variedades de pêra. Pelos ensaios realizados, mostrados na Tabela 3.1, comprovou-se que a pêra que mais se assemelha, nas características e no comportamento durante a desidratação osmótica, à pêra Willian's é a variedade Red Barlett. No entanto, esta

variedade, por ser mais cara é difícil de ser encontrada, e fez com que se optasse por trabalhar com a variedade Packhman's Triumph.

*Tabela 3.1: Valor da densidade, sólidos totais, teor de umidade e perda de massa após 3 horas de desidratação osmótica para pêra*

<i>Variedade</i>	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	<i>ST (g/g amostra)</i>	<i>Teor de Umidade (g/g amostra)</i>	<i>WR após 3 horas de D.O. (%)</i>
<i>William's</i>	1,012	0,122	0,878	37,2
<i>Packhman's Triumph</i>	1,0228	0,145	0,855	28,8
<i>Portuguesa</i>	1,047	0,152	0,848	32,3
<i>Red Bartlett</i>	1,005	0,135	0,865	37,4

## 3.2 Equipamentos

### 3.2.1 Desidratação Osmótica

Para a desidratação osmótica utilizou-se uma Incubadora Tecnal modelo Te – 420, com a finalidade de realizar uma desidratação osmótica em um equipamento que permitisse a agitação externa do recipiente de desidratação, possibilitando o uso de cristais do agente osmótico e não solução osmótica e, além disso, onde pudesse ser variada a temperatura ambiente. Os recipientes utilizados para colocar a pêra a ser desidratada no Shaker foram béqueres de 250 mL.

Para determinar a massa das amostras foi utilizada uma balança digital Adventurer da OHAUS , com precisão de  $10^{-6}$  kg.

### **3.2.2 Secagem**

Para a secagem por microondas foi utilizado o forno de microondas laboratorial Saírem S.A., modelo 0/600 W EL1098, de 600W de potência e frequência de 2450Hz. Sua cavidade apresentava capacidade de 31 litros com dimensões de 24 x 36 x 36 cm de altura, largura e profundidade, respectivamente.

Para a comparação dos três modos de secagem, microondas, convectivo e modo combinado microondas-convectivo foi utilizado um forno de microondas doméstico White-Whestinghouse de modelo EM 3500B, de 1350W de potência e frequência de 2450 Hz. Sua cavidade apresentava capacidade de 40 litros com dimensões de 26 x 37,5 x 40 cm de altura, largura e profundidade, respectivamente. A este forno foi adaptado um soprador e um sistema de aquecimento do ar pela perfuração da parede inferior de sua cavidade. Essa adaptação, que pode ser visualizada com suas partes constituintes na Figura 3.1, foi feita de modo que o equipamento pudesse operar nos três modos propostos, obtendo-se uma melhor comparação dos tipos de secagem, já que estas foram realizadas no mesmo equipamento.

Optou-se por fazer a adaptação do sistema convectivo em um forno de valor inferior, com o intuito de verificar a possibilidade de execução da adaptação e a eficiência do processo de secagem combinado e só então, recomendar ou não a adaptação ao microondas Saírem, de valor mais elevado e controle mais preciso.



- |                                |                            |
|--------------------------------|----------------------------|
| 1. Forno de microondas;        | 4. Sistema de Aquecimento; |
| 2. Cronômetro;                 | 5. Soprador.               |
| 3. Ajuste de Tempo e Potência; |                            |

*Figura 3.1: Secador tipo microondas com convecção forçada.*

A velocidade e a temperatura do ar no interior da cavidade do microondas foi mantida constante e mapeada com um termoanemômetro digital ALNOR com sonda telescópica, modelo 8525, com precisão de  $10^{-2}$  m/s.

As temperaturas no interior das amostras foram medidas com termômetro de fibra ótica Reflex da Nortech com precisão de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , sendo este equipamento especialmente desenvolvido para medidas de temperatura em ambiente de microondas.



### 3.3 Procedimento Experimental

As etapas do processo de obtenção da pêra seca adotadas neste trabalho podem ser visualizadas no fluxograma apresentado na Figura 3.2. Durante o processo foram realizadas análises físicas e físico-químicas de caracterização do material, tanto da fruta “in natura” quanto da fruta em diferentes estágios do processamento.

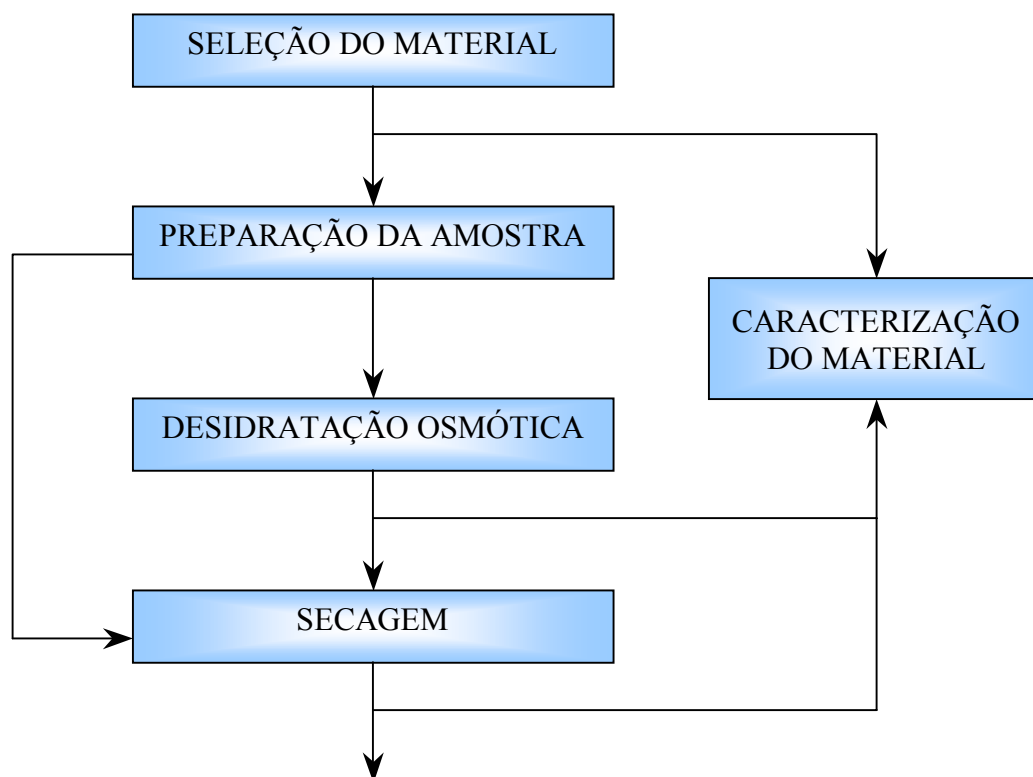


Figura 3.2: Fluxograma das etapas para obtenção de pêra seca.

### **3.3.1 Seleção e Preparo das Amostras**

As pêras foram adquiridas em mercados da cidade de São Carlos e sua seleção foi feita tomando-se como critério o grau de amadurecimento da fruta, cor, tamanho e firmeza, de forma a se obter sempre frutas com as características mais semelhantes possíveis.

A casca da pêra, considerada uma membrana semipermeável, dificultou a desidratação da fruta e, neste trabalho, optou-se por sua retirada mecânica, evitando a utilização de tratamentos químicos que aumentassem sua permeabilidade, e garantindo uma maior uniformidade da fruta processada. Além de descascadas, as pêras tiveram o caroço retirado e foram cortadas em diferentes geometrias, sendo:

- palito (com 10 mm de altura e largura e 30 mm de comprimento);
- cubo (com 10 mm de lado) e
- fatias (tendo a forma de  $\frac{1}{4}$  de circunferência com 40 mm de diâmetro e 5 mm de espessura) .

Um dos fatores que levam ao escurecimento da pêra durante sua armazenagem e processamento é o decréscimo no nível de ácido ascórbico presente na mesma, já que o ácido ascórbico é um antioxidante que atua contra espécies reativas de  $O_2$ . Portanto, as pêras já cortadas foram mergulhadas em solução de ácido ascórbico 1,5% durante 15 minutos, obtendo-se o resultado esperado no retardamento do escurecimento durante o processamento, como estudado por Veltman et al. (2000).

### **3.3.2 Desidratação Osmótica**

As amostras preparadas foram colocadas em béqueres, com uma massa aproximada de 20g por béquer, aos quais adicionou-se o agente osmótico. Os béqueres foram então colocados no *Shaker*, à temperatura e agitação ajustadas e o tempo cronometrado. Os parâmetros analisados e seus níveis nesta etapa foram:

- agente osmótico - sacarose;
- concentração do agente osmótico - valores de 25; 37,5 e 50% em proporção sacarose/fruta;
- geometria - cubos, palitos e fatias;
- temperatura da desidratação osmótica - 30; 40 e 50°C;
- agitação: 120 rpm ou ausência da mesma e
- tempo de desidratação osmótica – entre 0 e 10 horas.

A escolha dos níveis adotados para a agitação baseou-se no trabalho de Garrote et al. (1992) que diz que a agitação só faz efeito quando turbulenta, adotando-se então a maior agitação em que as amostras no interior do Shaker permaneceram estáveis e a ausência da mesma para efeito de comparação.

Em intervalos de tempo de 1 hora, num total de 6 horas de desidratação osmótica, foram retiradas amostras do material em triplicata, estas foram enxaguadas com água destilada para retirar o excesso de cristais de sacarose, secas em papel absorvente e pesadas para análise da perda de massa (WR). Essas amostras foram então secas em estufa para determinação de sólidos totais. A diferença dos sólidos totais da amostra desidratada e dos sólidos totais da fruta “in natura” fornece o ganho

de soluto da amostra no processo (SG). Relacionando esses dois valores, têm-se a perda de água da amostra (WL), dada pela seguinte equação:

$$WR = WL - SG \quad (3.1)$$

Nesta etapa foram determinados os níveis dos parâmetros que forneceram as melhores condições para a cinética da desidratação osmótica. A geometria de corte da fruta escolhida foi utilizada nas etapas de secagem.

### **3.3.3 Secagem**

A secagem foi realizada para amostras “in natura” e para amostras desidratadas osmoticamente.

Para a análise da secagem por microondas, utilizou-se o microondas Saírem S.A. que apresentava controle da potência aplicada mais preciso. O parâmetro analisado nesta etapa foi a potência de microondas nos níveis 0,1; 0,2 e 0,3 W/g amostra.

Para a comparação entre os três modos de secagem, assim como para a verificação da eficácia de adaptação do equipamento foi utilizado o microondas White-Whestinghouse. Para os ensaios de secagem convectiva o sistema gerador de microondas permaneceu desligado. Os parâmetros analisados e seus níveis foram:

- temperatura do ar – 50°C e
- velocidade do ar – 2 m/s.

Para os ensaios de secagem por microondas o sistema convectivo permaneceu desligado e analisou-se a potência de 0,3 W/g.

E, finalmente, para os ensaios de secagem pelo modo combinado microondas-convecção o soprador, o sistema de aquecimento do ar e o gerador de microondas permaneceram em funcionamento. Os parâmetros analisados e seus níveis foram a combinação dos parâmetros dos experimentos de convecção forçada e microondas, sendo:

- potência do microondas - 0,3 W/g amostra;
- temperatura do ar - 50°C e
- velocidade do ar – 2 m/s.

As amostras foram colocadas em placas de vidro apoiadas no suporte do equipamento com massa aproximada de 200g e ajustadas as condições de secagem. O equipamento foi então ligado e cronometrou-se o tempo de secagem.

Em intervalos de tempo de 10 minutos, num total de 3 horas de secagem, foram pesadas as massas das amostras em triplicata para análise do teor de umidade (X).

Para medidas da temperatura das amostras, 3 fatias de pêra foram perfuradas lateralmente, com o auxílio de uma agulha, até seu centro geométrico. Dessa maneira, o termômetro de fibra ótica foi inserido neste canal, garantindo que a extremidade do sensor permanecesse no centro da amostra e evitando danos ao equipamento na perfuração das amostras.

### **3.3.4 Caracterização das Amostras de Pêra**

As amostras foram caracterizadas “in natura”, após desidratação osmótica e após a secagem. As características das frutas após cada etapa do processo foram

comparadas às características da fruta “in natura” para análise do efeito de cada etapa em sua constituição, aparência e propriedades físicas. As análises realizadas para as amostras “in natura” foram adotadas como padrão na realização dos experimentos. As características analisadas foram atividade de água, sólidos totais, teor de umidade, densidade, cálcio, fósforo, potássio e o encolhimento.

- ***Atividade de Água***

A atividade de água foi medida no equipamento Thermoconstanter TH200 da Novasina, bastando para tanto inserir a amostra no equipamento dentro do recipiente específico, ajustar sua temperatura, que foi fixada em 25°C, e esperar a estabilização da leitura do equipamento, observando sua persistência entre duas leituras com intervalo de 10 minutos.

- ***Sólidos Totais e Teor de Umidade***

A determinação de sólidos totais foi feita para amostras “in natura” e após desidratação osmótica, etapa na qual há transferência de sacarose para a fruta. Após a secagem não foi feita esta análise, já que não há mudanças nesta propriedade resultante deste processo, no qual não há soluto a ser incorporado.

A determinação do teor de umidade foi feita para amostras “in natura”, após desidratação osmótica e após secagem. As análises foram realizadas colocando-se as amostras em estufa a  $(105 \pm 1)^\circ\text{C}$  até massa constante, sendo utilizadas placas de Petri como suporte para as amostras.

As placas de Petri vazias foram mantidas abertas no interior de um dessecador após secagem em estufa. Tomou-se os recipientes fechados, que foram pesados, anotando-se o peso (peso da Tara =  $Ta$ ). Em seguida as amostras foram colocadas uniformemente no interior das placas e pesadas (peso bruto das amostras úmidas =  $Pu$ ). Retirava-se as tampas das placas e colocava-se as placas em estufa a  $(105 \pm 1)^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Após esse período as placas eram fechadas, retiradas da estufa e colocadas em dessecador durante 30 a 45 minutos para resfriamento até temperatura ambiente e pesadas novamente (peso bruto das amostras secas =  $Ps$ ).

A percentagem de sólidos totais foi calculada usando a equação:

$$ST = \frac{Ps - Ta}{Pu - Ta} \quad (3.2)$$

onde:

ST – quantidade de sólidos totais da amostra (g/g amostra).

O cálculo do teor de umidade das amostras em base úmida e em base seca foi feito de acordo com as equações:

$$U = 1 - ST \quad (3.3)$$

$$X = \frac{Pu - Ps}{Ps - Ta} \quad (3.4)$$

onde:

U – umidade em base úmida (g/g amostra) e

X – umidade em base seca (g/g sólidos).

O ganho de sólidos na desidratação osmótica foi obtido pela diferença entre os valores de sólidos totais da amostra desidratada e “in natura”.

- **Densidade Aparente**

A determinação da densidade aparente da pêra foi feita para amostras “in natura”, após desidratação osmótica e após secagem. A análise foi feita pelo método de picnometria líquida com água destilada.

Pesou-se o picnômetro tampado ( $m_{pic}$ ), encheu-se o picnômetro com água, tomando cuidado para que não se formassem bolhas de ar, secou-se a água que escorreu por fora e pesou-se o picnômetro com a água ( $m_{pic + água}$ ). Mediu-se a temperatura da água com a qual têm-se sua densidade ( $\rho_{água}$ ). Calculou-se o volume do picnômetro, que corresponde ao volume de água, pela equação:

$$V_{pic} = \frac{m_{água}}{\rho_{água}} \quad (3.5)$$

Esvaziou-se o picnômetro e espalhou-se álcool em sua superfície interna, mantendo-o de cabeça para baixo até que estivesse seco. Introduziu-se a amostra no interior do picnômetro, tampou-se e pesou-se ( $m_{pic + fruta}$ ). Completou-se o volume com água e pesou-se ( $m_{pic + fruta + água}$ ). Pela diferença destas duas pesagens obteve-se a nova massa de água no picnômetro e o novo volume é dado pela equação:

$$V_{água} = \frac{(m_{pic+fruta+água} - m_{pic+fruta})}{\rho_{água}} \quad (3.6)$$

A massa de amostra foi determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com a amostra e do picnômetro vazio e o volume ocupado pela amostra pela diferença entre o volume do picnômetro e o volume de água, tendo-se o valor da densidade através da equação:



$$\rho_{fruta} = \frac{(m_{pic+fruta} - m_{pic})}{(V_{pic} - V_{água})} \quad (3.7)$$

onde:

$\rho_{fruta}$  – densidade aparente da amostra (g/cm<sup>3</sup>).

- ***Cálcio, Fósforo e Potássio***

Os teores de cálcio, fósforo e de potássio foram determinados no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, em 1 grama de amostras digeridas de pêra, por espectrometria de emissão atômica com plasma induzido, em equipamento VISTA da marca Varian.

- ***Encolhimento***

O encolhimento foi analisado para as melhores situações cinéticas da desidratação osmótica e da secagem. As amostras da fruta “in natura” e secas ou desidratadas osmoticamente foram fotografadas por câmera digital em intervalos de tempo determinados e as imagens analisadas no Software Image Pró-Plus, através do qual obteve-se a área das amostras.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para a cinética de desidratação osmótica e secagem, com a obtenção das melhores condições de processamento para cada etapa, a análise do encolhimento sofrido pela fruta, a validação dos modelos existentes na literatura via dados experimentais e a análise da qualidade da pêra processada em comparação à fruta “in natura”.

### 4.1 Desidratação Osmótica

A desidratação osmótica da pêra foi estudada em função dos seguintes parâmetros: tempo de desidratação osmótica, agitação, concentração do agente osmótico, temperatura e geometria da amostra, visando a obtenção da perda de água (WL) e do ganho de sólidos (SG) ou incorporação de sacarose. Também foi realizado o ajuste dos dados experimentais a modelos da literatura para obtenção do coeficiente de transferência de massa, da difusividade, do adimensional Biot mássico e de curvas que representem sua cinética.

- ***Tempo de Desidratação Osmótica***

Inicialmente realizaram-se testes de desidratação osmótica durante 10 horas. Na Figura 4.1 são apresentados resultados típicos obtidos com cubos desidratados com sacarose a 25% e em temperatura ambiente, no qual têm-se a redução de peso com o tempo, onde pode-se observar que a partir de 6 horas a

redução de peso atinge um patamar praticamente constante, no qual um pequeno acréscimo na redução de peso implica em um grande acréscimo de tempo, sendo que um prolongamento do processo de desidratação osmótica além desse tempo torna-se economicamente inviável, adotando-se, portanto, esta condição nos demais ensaios.

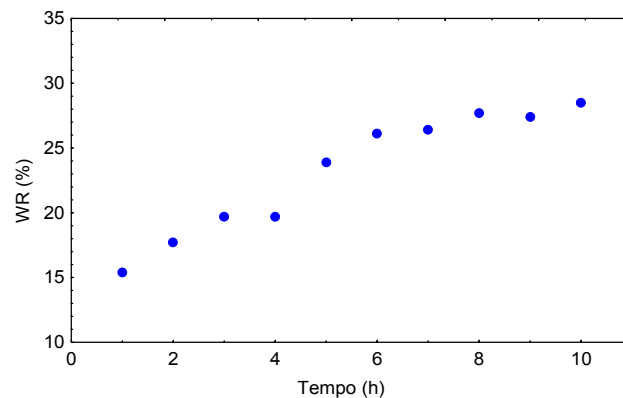


Figura 4.1: Redução de peso em função do tempo para a desidratação osmótica de cubos de pêra em sacarose 25% em temperatura ambiente.

#### • *Influência da Agitação*

A desidratação osmótica foi realizada na ausência de agitação e com agitação de 120 rpm. O ensaio foi prolongado até 10 horas para uma melhor observação da influência da agitação. Observa-se na Figura 4.2, que ilustra o comportamento geral ocorrido nos ensaios, que seu efeito na perda de água (Figura 4.2 (a)) é maior no início do processo, diminuindo gradativamente a cada amostragem, resultando em uma perda de água final aproximadamente igual para ambas as situações, o que está de acordo com o trabalho realizado por Garrote et al. (1992) que observaram não haver um aumento considerável na perda de água para amostras desidratadas em baixos níveis de agitação e com o trabalho de Mavroudis et al. (1998a) que

observaram que a convecção pode ocorrer nos primeiros estágios, enquanto a difusão domina estágios posteriores. A incorporação de sacarose (Figura 4.2 (b)) é menor para desidratação osmótica sem agitação em qualquer intervalo de tempo, beneficiando os resultados, de forma a não alterar excessivamente a constituição da fruta e não limitar seu consumo devido à grande incorporação de sacarose e concordando com os resultados obtidos por Raoult et al. (1989) que encontraram uma diminuição do ganho de soluto em sistema agitado comparado com sistema não agitado.

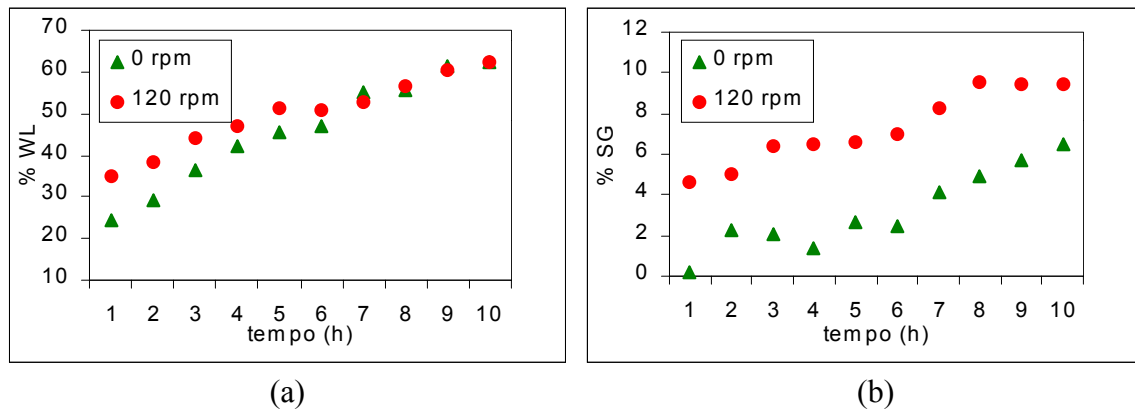


Figura 4.2: WL (a) e SG (b) em função do tempo para desidratação osmótica realizada com fatias em sacarose 37,5% e 40°C, durante 10 horas, parametrizado na velocidade de agitação do Shaker.

Para decidir-se pelo uso ou não da agitação devido à sua ação na perda de água (Figura 4.2(a)) verificou-se a influência dos fenômenos de convecção e difusão na transferência de massa durante a desidratação osmótica para o tempo de 6 horas pelo cálculo do adimensional Biot mássico ( $Bi_m$ ) que relaciona as resistências à transferência de massa por difusão e convecção pela expressão:

$$Bi_m = \frac{K_c \cdot e}{D_m} = \frac{R_{condução}}{R_{convecção}} \quad (4.1)$$

onde:

$K_c$  – coeficiente de transferência de massa (m/h);

$e$  – espessura da amostra (m);

$D_m$  – coeficiente de difusão médio (m<sup>2</sup>/h).

Os valores de  $D_m$  foram calculados pela Equação 2.10 e o coeficiente de transferência de massa pela seguinte correlação:

$$K_c = \frac{D_m}{l} \cdot (0,018 \cdot Re^{0,8} \cdot Sc^{1/3}) \quad (4.2)$$

$$Re = \frac{d_i \cdot \omega \cdot \rho_s}{\mu_s} \quad (4.3)$$

$$Sc = \frac{\mu_s}{\rho_s \cdot D_m} \quad (4.4)$$

onde:

$d_i$  – diâmetro do béquer (cm);

$\omega$  - velocidade de agitação do *Shaker* (rev/s);

$\rho_s$  – densidade da solução osmótica (g/cm<sup>3</sup>) e

$\mu_s$  – viscosidade da solução osmótica (g/cm.s).

A densidade da solução osmótica foi obtida através do trabalho de Barat et al. (2000) baseado na concentração da solução osmótica e a viscosidade através da Tabela 3-287 do Perry & Chilton (1953).

Na Tabela 4.1 são mostrados os valores de  $Bi_m$ , para as condições de trabalho apresentadas na Figura 4.2, calculados somente para os dados até 6 horas de

desidratação, através dos quais é possível analisar qual a etapa controladora do processo.

*Tabela 4.1: Valor do coeficiente de transferência de massa, do coeficiente de difusão médio, do número de Reynolds, do número de Schmidt e do número de Biot mássico.*

<b>Agitação</b> <b>(rpm)</b>	<b><math>Kc</math></b> <b><math>(m/h) * 10^2</math></b>	<b><math>D_m</math></b> <b><math>(m^2/h) * 10^6</math></b>	<b><math>Re</math></b>	<b><math>Sc</math></b>	<b><math>Bi_m</math></b>
0	1,077	1,628	0	36238,140	33,077
120	3,66	2,389	503,495	25289,928	76,601

Os valores de  $Bi_m$  obtidos são maiores que 0,1, o que indica que a resistência à difusão, ou seja, a transferência de massa no interior do alimento é a etapa controladora do processo (Alves, 2002), além disso o uso da agitação diminuiu a resistência convectiva e ocasionou um incremento no valor do  $Bi_m$  de aproximadamente 131%, acentuando o efeito da difusão como etapa controladora do processo.

Portanto, a convecção gerada pela agitação atua somente na homogeneização da solução formada pelo agente osmótico e a água perdida pela pêra e, para o tempo de 6 horas, adotado como situação padrão para a desidratação osmótica, o pequeno acréscimo na perda de água decorrente da agitação não justifica sua adoção.

- ***Influência da Concentração de Sacarose e da Temperatura***

Para análise do efeito da temperatura e da concentração do agente osmótico na cinética de desidratação osmótica, trabalhou-se com três concentrações de sacarose e três temperaturas, sendo os efeitos desses dois parâmetros analisados para as cinéticas

de perda de água e incorporação de sacarose, representadas pelos ensaios dados pelas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente.

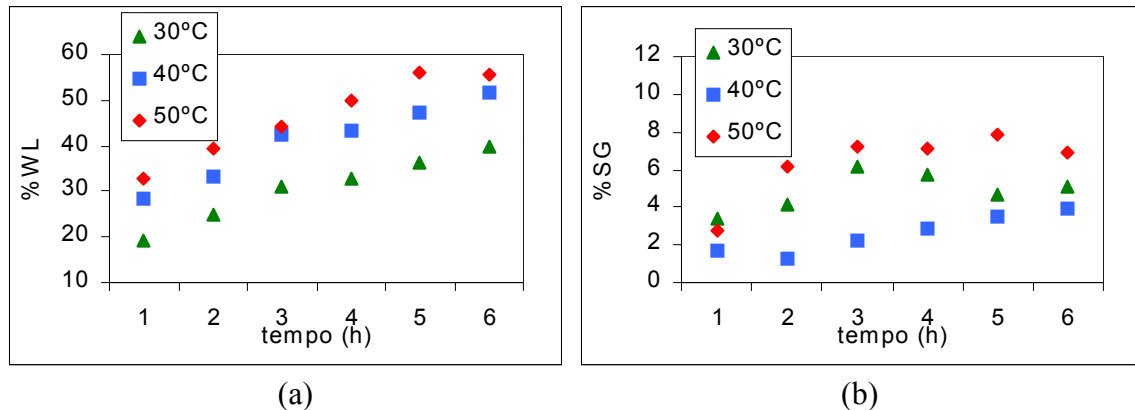


Figura 4.3: WL (a) e SG (b) em função do tempo para desidratação osmótica realizada com fatias de pêra em sacarose 50% e sem agitação, parametrizados na temperatura.

Pela Figura 4.3 (a) pode-se observar que ocorreu um acréscimo na perda de água com o aumento de temperatura. Esse acréscimo foi maior quando se variou a temperatura de 30°C para 40°C do que de 40°C para 50°C, sendo que para 6 horas de desidratação osmótica esse acréscimo foi de 23,2% e 7%, respectivamente. O menor acréscimo na perda de água quando se passou de 40°C para 50°C foi devido ao fato de que na temperatura de 50°C observou-se o início do cozimento da fruta e, conseqüentemente a evaporação de parte da água perdida pela fruta. A menor quantidade de água, decorrente da evaporação, fez a solução formada entre a sacarose e a água perdida pela pêra tornar-se mais concentrada, formando um xarope, que atuou como uma barreira à difusão da água, ou seja, o aumento da viscosidade, provocado pelo aumento da concentração, provocou uma resistência adicional na interface e, portanto, diminuiu a força motriz do processo, como observado por Alves, 2002.

A incorporação de sacarose, Figura 4.3 (b), apresentou um decréscimo quando a temperatura foi aumentada de 30°C para 40°C e um acréscimo quando a temperatura passa de 40°C para 50°C, sendo as porcentagens para 6 horas de desidratação osmótica de -23,2% e 43,7%. A não previsibilidade do comportamento cinético da incorporação de sacarose pode ser explicada pela permeabilidade da membrana da pêra, inicialmente permeável a água e pouco permeável ao soluto, devido ao alto peso molecular do último em comparação com a água, que perdeu parte de sua seletividade em 50°C, facilitando a difusão do soluto para o interior da amostra e não ocasionando um efeito tão acentuado para a perda de água. Yang & Maguer (1992) desidrataram osmoticamente morangos e verificaram este efeito para temperaturas superiores a 45°C. Além disso, devido a evaporação do solvente na temperatura de 50°C, formou-se uma camada de sacarose cristalizada ao redor das amostras mais espessa em comparação às camadas formadas nas outras temperaturas, que não foi possível ser retirada, contribuindo para o aumento da incorporação de sacarose.

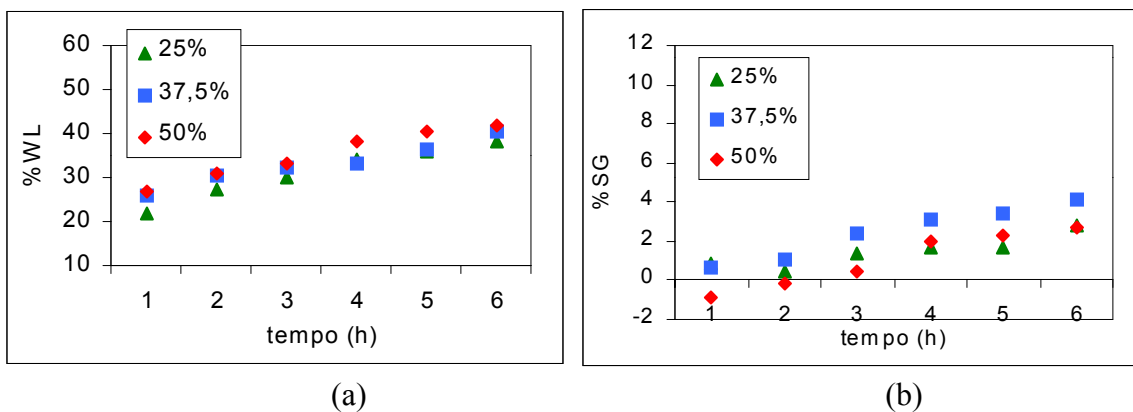


Figura 4.4: WL (a) e SG (b) em função do tempo para desidratação osmótica realizada com cubos de pêra a 30°C e sem agitação, parametrizados na concentração de sacarose.



Pela Figura 4.4 (a) observa-se que ocorre um aumento da perda de água com o aumento da concentração de sacarose utilizada na desidratação osmótica, pois, aumentando o gradiente de concentração ou o gradiente de pressão osmótica, aumenta-se a transferência de massa decorrente dessa força motriz. No entanto, esse acréscimo foi maior quando se varia a concentração de sacarose de 25% para 37,5% do que de 37,5% para 50%, sendo que, para 6 horas de desidratação osmótica, esse acréscimo foi em média de 5,9% e 2,9%, respectivamente. Isso é devido ao fato da sacarose, quando utilizada em proporção de 50% em relação à massa de fruta, não se dissolver completamente com a quantidade de água perdida pela pêra, ou seja, a solução tende a atingir o ponto de saturação, e a sacarose excedente permanece depositada no fundo do béquer, perdendo contato com as amostras de pêra e, portanto, diminuindo a força motriz efetiva do processo. A incorporação de sacarose (Figura 4.4 (b)) é maior para sacarose a 37,5%, tendo um decréscimo quando se usa sacarose 50%, sendo a porcentagem de variação de 33,3% e -38,1%, para 37,5% e 50%, respectivamente.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam, respectivamente, o comportamento de perda de água e de incorporação de sacarose da pêra em função da temperatura e concentração de sacarose traçadas com todos os dados experimentais obtidos para tempos de 6 horas. Na Tabela 4.2, têm-se a codificação dos níveis das variáveis utilizadas para traçar as superfícies de resposta.

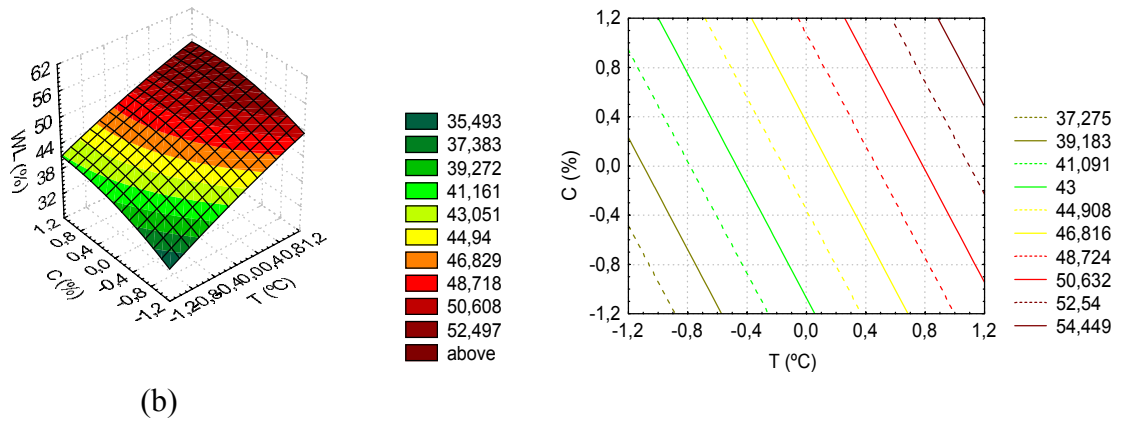


Figura 4.5: WL em 6 horas de desidratação osmótica em função da temperatura e da concentração de sacarose, (a) ajustada por superfície de resposta e (b) superfície de contorno rebatida no plano.

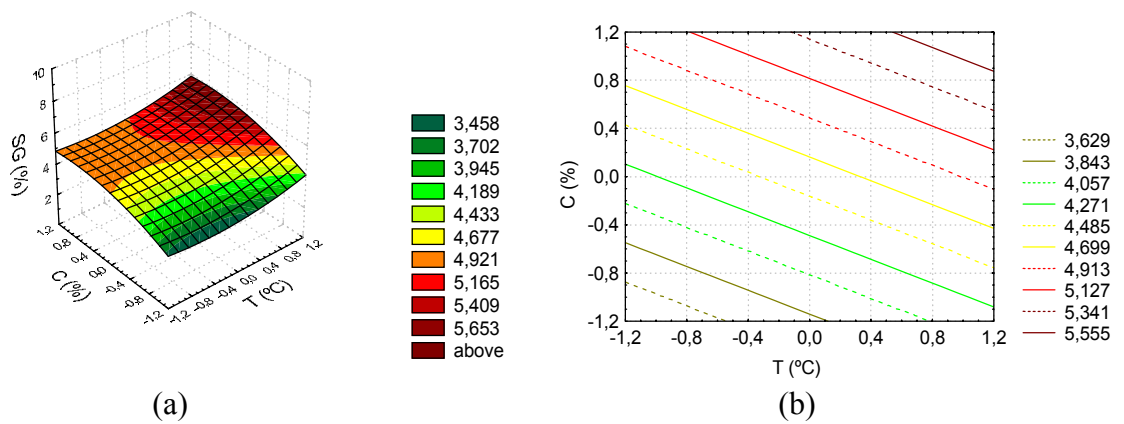


Figura 4.6: SG em 6 horas de desidratação osmótica em função da temperatura e da concentração de sacarose, (a) ajustada por superfície de resposta e (b) superfície de contorno rebatida no plano.

Tabela 4.2: Codificação dos níveis das variáveis temperatura e concentração de sacarose.

<i>Variáveis</i>	<i>Níveis das variáveis</i>		
	-1	0	+1
Temperatura (°C)	30	40	50
Concentração de Sacarose (%)	25	37,5	50

A partir das Figuras 4.5 e 4.6 é possível avaliar as condições de temperatura e concentração de sacarose em que se deve trabalhar para alcançar a maior perda de água (região vermelha da figura 4.5) e a menor incorporação de sacarose (região verde da figura 4.6) possíveis, levando-se em consideração a discussão realizada e sua combinação com os demais parâmetros estudados.

O mesmo comportamento obtido foi observado por Rastogi & Raghavarao (1994), em que o aumento da concentração do agente osmótico e da temperatura é benéfico até um certo ponto, a partir do qual efeitos indesejáveis, como o aumento da incorporação do agente osmótico, o cozimento da fruta, a formação de uma camada cristalizada mais espessa ao redor da fruta, começam a ocorrer. Para estas duas variáveis optou-se, portanto, como situação mais adequada, as condições de 40°C e 37,5% de sacarose.

- ***Influência da Geometria da Amostra***

A influência da geometria da amostra na cinética da desidratação osmótica foi estudada variando-se a área superficial em contato com o agente osmótico e a

espessura da amostra, que são dadas na Tabela 4.3, sendo que seu comportamento pode ser observado na Figura 4.7.

Tabela 4.3: Espessura e área superficial específica das amostras na desidratação osmótica.

Geometria	$A$ ( $cm^2$ )	$e$ (cm)	$A/e$
Cubo	54	1	54
Palito	48	1	48
Fatia	39	0,5	78

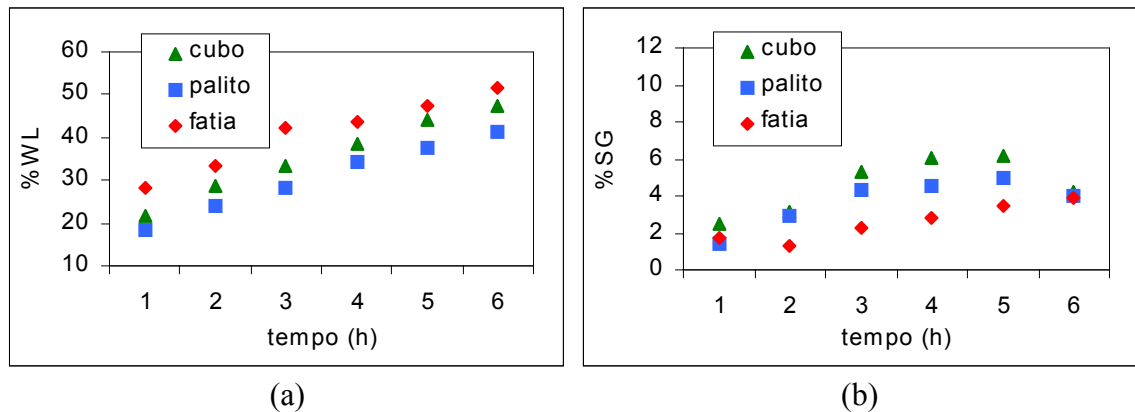


Figura 4.7: WL (a) e SG (b) em função do tempo para desidratação osmótica realizada com sacarose a 50%, 30°C e sem agitação, parametrizados na geometria da amostra.

A perda de água, dada pela Figura 4.7 (a), foi maior para as amostras desidratadas em fatias e menor para amostras em palitos. Apesar das amostras em fatias apresentarem menor área superficial para transferência de massa, como foi determinado anteriormente, o processo é comandado pela difusão e, por apresentar uma menor espessura, essa geometria foi beneficiada no transporte da água, ou seja, a perda de água aumentou com o aumento da relação  $A/e$ , em que  $A$  = área

superficial total e  $e$  = espessura de uma única peça. Lerici et al. (1985) obtiveram o mesmo comportamento quando estudaram o efeito da forma da amostra na desidratação osmótica de maçãs.

A incorporação de sacarose, dada pela Figura 4.7 (b), apresentou uma tendência a ser maior para a geometria com maior área superficial ao longo do processo, com exceção para o tempo de 6 horas, no qual as mudanças estruturais sofridas pela fruta durante a desidratação osmótica, como afirmam Gekas et al. (1997), passam a ter grande interferência no transporte da sacarose, levando a valores de incorporação muito próximos para todas as geometrias adotadas.

Definiu-se, portanto, a amostra em fatias como geometria padrão no processamento.

- ***Análise do Modelo Proposto para Cinética de Desidratação Osmótica***

A análise da cinética de desidratação osmótica foi feita através do ajuste dos dados experimentais ao modelo proposto por Azuara et al. (1992), dado pelas Equações 2.4 e 2.6. Nas Figuras 4.8 e 4.9 têm-se resultados típicos de WL (a) e SG (b) em função do tempo, onde se observa a localização dos dados experimentais em relação à curva do modelo de Azuara et al. (1992). Pode-se observar que os dados experimentais de perda de água e incorporação de sacarose são, em sua maioria, bem descritos pelo modelo proposto por Azuara et al. (1992). No Anexo A encontram-se as figuras correspondentes à análise estatística de resíduos realizada para esses ajustes. Nesses gráficos podem ser observadas a aleatoriedade dos valores preditos e residuais e a normalidade da distribuição de frequência, que demonstram se a estimação dos parâmetros é validada estatisticamente ou não.

Pela Tabela 4.4 pode-se observar que os valores de equilíbrio se relacionaram com a agitação, a geometria, a temperatura e a concentração de sacarose, ou seja, uma mudança em um desses parâmetros ocasionou a mudança das constantes de equilíbrio, como previsto em literatura, sendo que estas variações estão de acordo com o que foi analisado nos itens anteriores para cada parâmetro. Na maioria dos casos, o coeficiente de correlação foi maior que 0,91 indicando sua representatividade para prever os valores de equilíbrio, como citado por Kaymak-Ertekin & Sultanoglu (2000). Os coeficientes menores que 0,91 foram todos encontrados para a incorporação de sacarose, que, como dito anteriormente apresenta dados experimentais mais difíceis de previsão, já que para a variação na incorporação de sacarose obteve-se valores muito menores que para a perda de água, tendo, portanto, uma medida de menor precisão e, conseqüentemente, uma maior dispersão.

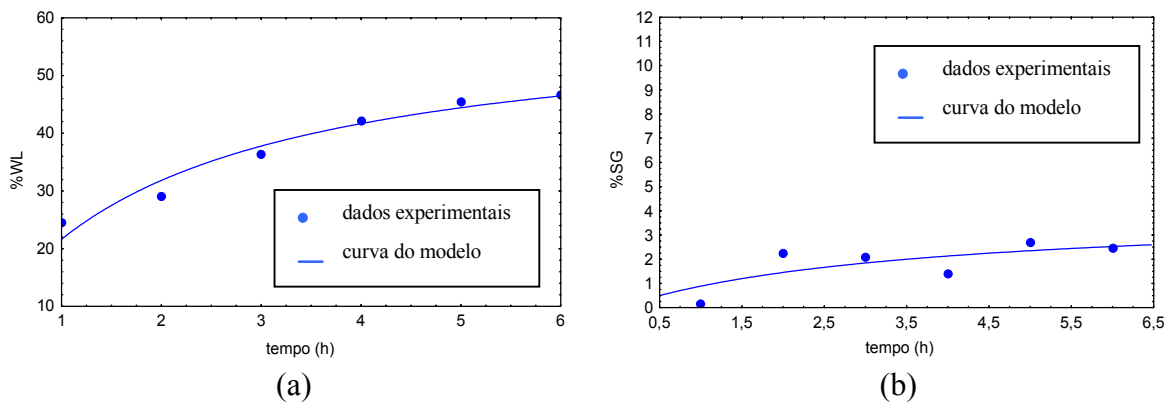


Figura 4.8: WL (a) e SG (b) em função do tempo para desidratação osmótica de fatias de pêra realizada com sacarose a 37,5%, 40°C e sem agitação ajustadas pelas Equações 2.4 e 2.6 do modelo de Azuara et al. (1992).

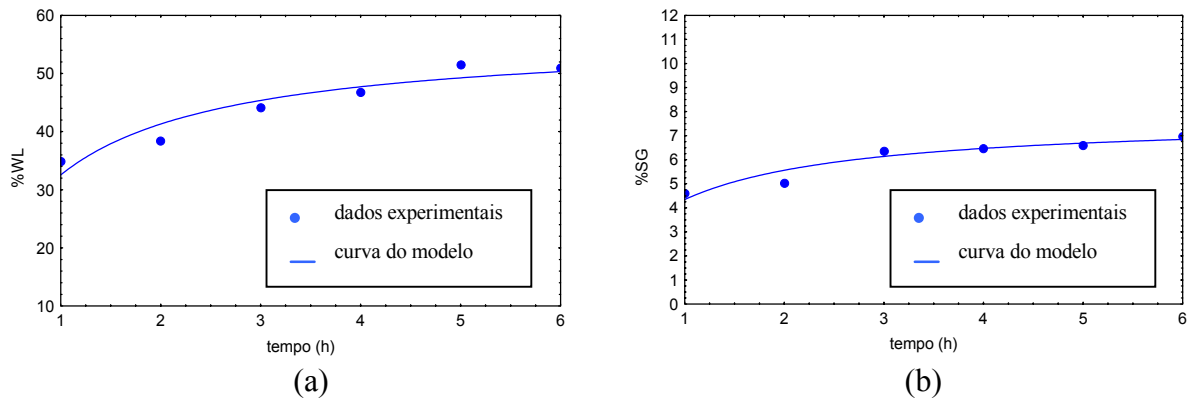


Figura 4.9: WL (a) e SG (b) em função do tempo para desidratação osmótica de fatias de pêra realizada com sacarose a 37,5%, 40°C e 120 rpm ajustadas pelas Equações 2.4 e 2.6 do modelo de Azuara et al. (1992).

Tabela 4.4: Constantes de equilíbrio previstas pelas Equações 2.4 e 2.6 para diferentes condições experimentais.

<i>Geometria</i>	<i>Agitação</i> (rpm)	<i>T (°C)</i>	<i>Concentração</i> <i>Sacarose (%)</i>	<i>WL<sub>∞</sub></i> <i>predito</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>SG<sub>∞</sub></i> <i>predito</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
Fatia	0	40	37,5	60,357	0,976	4,008	0,752
Fatia	120	40	37,5	56,495	0,950	7,735	0,954
Cubo	0	40	37,5	48,877	0,948	7,371	0,972
Cubo	0	50	37,5	94,385	0,969	6,014	0,884
Cubo	0	40	50,0	63,544	0,981	7,380	0,773

#### • *Encolhimento*

O encolhimento da pêra durante a desidratação osmótica foi avaliado através da variação na razão do volume pela variação na razão da área superficial das amostras e através da variação na razão do volume pela variação na razão do teor de umidade, calculados em função do tempo de desidratação osmótica, sendo amostras

retiradas a cada hora num total de 6 horas para a condição cinética padrão de desidratação de fatias de pêra com sacarose a 37,5% em 40°C e 0 rpm.

A área superficial das amostras foi determinada através programa Image Pró-Plus, através da análise de imagens provenientes de câmara fotográfica digital e o volume foi avaliado através da massa e da determinação da densidade das amostras, sendo seus valores apresentados na Tabela 4.5.

Os valores obtidos experimentalmente foram ajustados pelos modelos de Lozano et al. (1983) e pelo modelo de Mavroudis et al. (1998b) dados pelas Equações 2.18 e 2.19, respectivamente. No Anexo A encontram-se as figuras correspondentes à análise estatística de resíduos realizada para os ajustes.

*Tabela 4.5: Valores da razão entre áreas superficiais, volumes e teores de umidade iniciais e finais e da densidade das amostras de pêra.*

<i>Tempo (h)</i>	<i>A/A<sub>0</sub></i>	<i>V/V<sub>0</sub></i>	<i>X/X<sub>0</sub></i>	<i>ρ (g/cm<sup>3</sup>)</i>
0	1	1	1	1,023
1	0,957	0,719	0,745	1,065
2	0,850	0,677	0,691	1,083
3	0,814	0,645	0,660	1,078
4	0,825	0,614	0,625	1,102
5	0,790	0,562	0,557	1,119
6	0,667	0,516	0,517	1,104

O modelo de Mavroudis et al. (1998b) encontrou valor para o coeficiente de correlação,  $R^2$ , referente à regressão feita de 0,943 mas o coeficiente d encontrado, aproximadamente 4,77, não representa nenhum dos tipos de encolhimento conhecidos, que assumem valores 1, 2 ou 3, para encolhimento unidimensional,



anisotrópico e isotrópico, respectivamente. Os valores experimentais foram comparados com os valores obtidos por Mavroudis et al. (1998b) e com o valor da regressão obtida, através da Figura 4.10. Pode-se notar que as curvas obtidas via modelo para os coeficientes dados por Mavroudis et al. (1998b) apresentam um encolhimento menor do que foi observado experimentalmente, apesar do comportamento ser, qualitativamente, semelhante, concluindo-se que o encolhimento para a pêra não está diretamente ligado à variação da área superficial através do comportamento determinado pelos valores dos coeficientes de encolhimento propostos pelo modelo, como estudado por Mavroudis et al. (1998b).

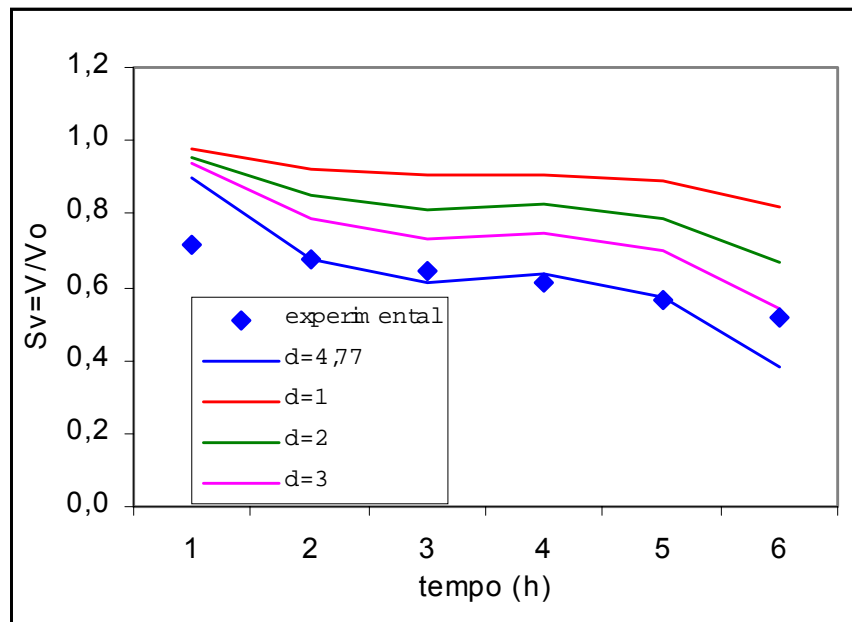
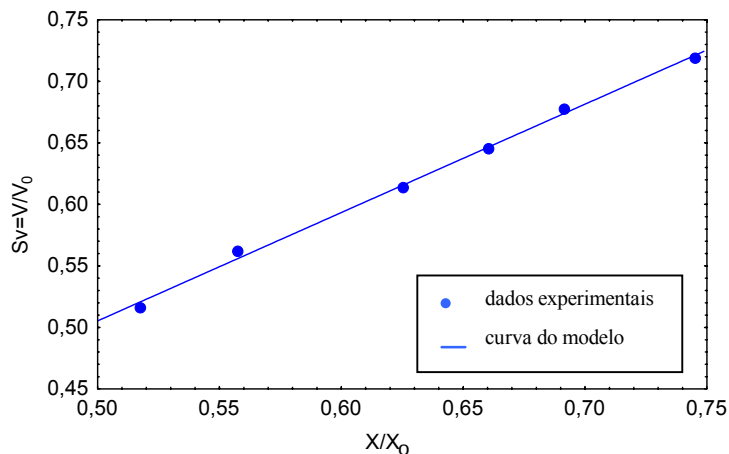


Figura 4.10: Razão do volume de encolhimento em função do tempo para desidratação osmótica de fatias de pêra com sacarose a 37,5%, 40°C e 0 rpm ajustada pela Equação 2.19 do modelo de Mavroudis et al. (1998b).

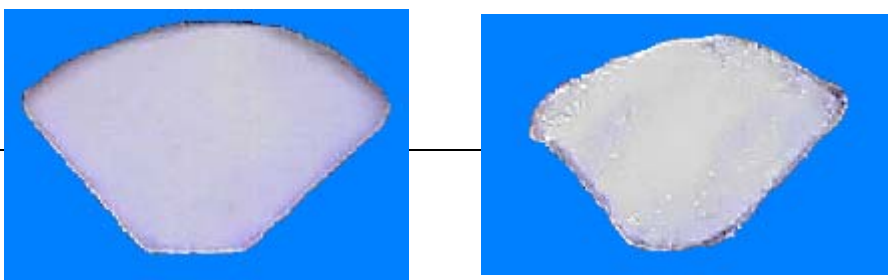
Pela Figura 4.11 pode-se concluir que o encolhimento da pêra durante a desidratação osmótica está diretamente ligado à variação da umidade de forma linear, como proposto por Lozano et al. (1983), sendo que outros fenômenos, como as mudanças estruturais não necessitam ser levados em consideração para sua modelagem. Os valores encontrados para os parâmetros B e E da Equação 2.18 do modelo de Lozano et al. (1983) e para o coeficiente de correlação foram de 0,065; 0,881 e 0,998, respectivamente.



*Figura 4.11: Razão do volume de encolhimento em função da razão de variação de umidade para desidratação osmótica de fatias de pêra com sacarose*

*a 37,5%, 40°C e 0 rpm ajustada pela Equação 2.18 do modelo de Lozano et al. (1983).*

Na Figura 4.12, têm-se um exemplo das imagens, que foram utilizadas para determinação da área da amostra pelo software Image Pró-plus, antes e após desidratação osmótica, podendo ser observado visualmente o encolhimento da amostra, que foi de 51,6% em volume.



(a)

(b)

*Figura 4.12: Visualização do encolhimento de fatias de pêra desidratadas a 40°C e 37,5% de sacarose; “in natura” (a) e após 6 horas de desidratação (b).*

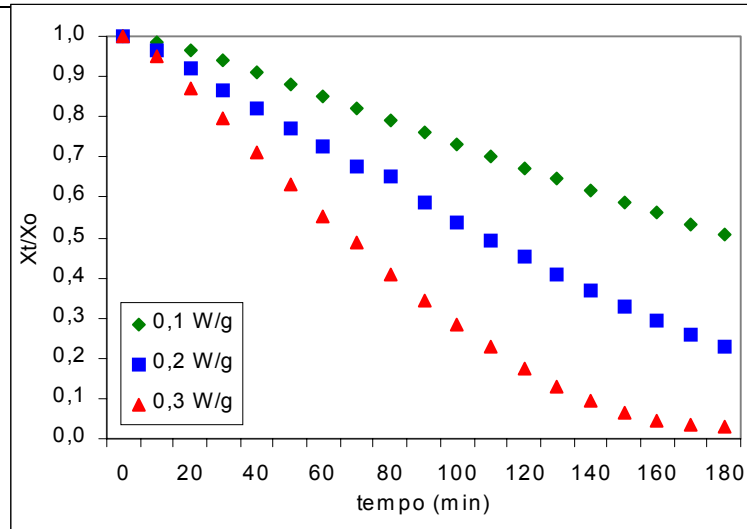
## 4.2 Secagem

### 4.2.1 Secagem por Microondas

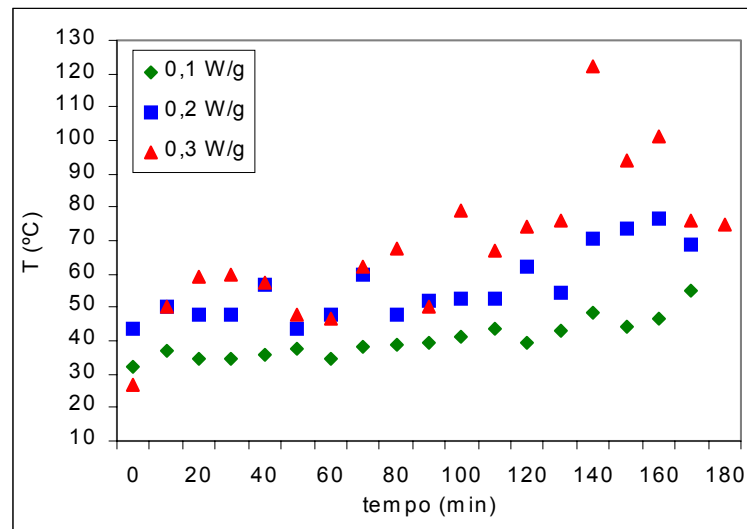
Na secagem por microondas foi utilizado o forno de microondas Sairem S.A., na qual analisou-se o efeito da potência de microondas e do pré-tratamento osmótico no teor de umidade e na temperatura no interior da amostra.

- ***Influência da Potência de Microondas***

As amostras foram secas com potência de microondas de 0,1; 0,2 e 0,3 W/g, em relação à massa inicial da amostra. Na Figura 4.13 pode-se observar seu efeito na cinética de secagem e na temperatura no interior das amostras de pêra, sendo que o aumento da potência acelerou a cinética de secagem e aumentou a temperatura no interior da amostra, assim como foi encontrado por Silveira e Raghavan (1999).



(a)



(b)

Figura 4.13: Umidade adimensional (a) e temperatura no interior da amostra (b) em função do tempo de secagem para pêsca seca por microondas, parametrizados na potência de microondas.

Pode-se observar pela Figura 4.13 (a) que, para as potências de 0,1 e 0,2 W/g, a curva de secagem apresenta somente o período de taxa de secagem constante e para a potência de 0,3 W/g a curva passa a apresentar o primeiro período de taxa de

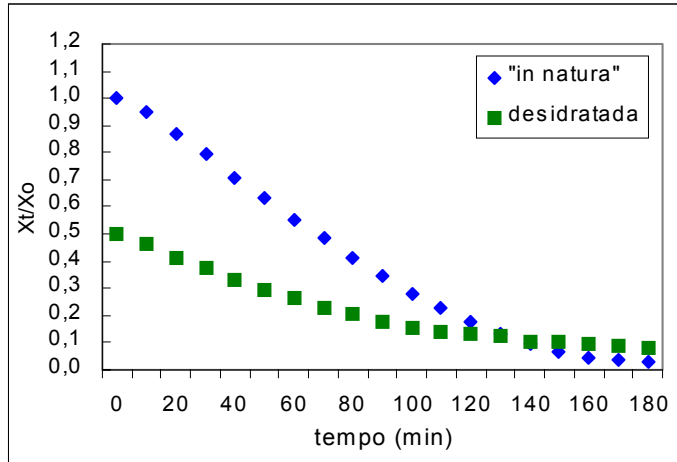
secagem decrescente. Para a temperatura, observada na Figura 4.13 (b), pode-se observar que, para a curva de secagem com potência de 0,3 W/g amostra, em torno de 100 – 120 minutos, tempo correspondente ao início do período de secagem decrescente, ocorre uma pequena elevação da temperatura no interior da amostra, que pode ser admitida muito próxima à da superfície devido o encolhimento já ocorrido até este ponto, como descrito por Foust et al. (1982).

- ***Influência do Pré-Tratamento Osmótico***

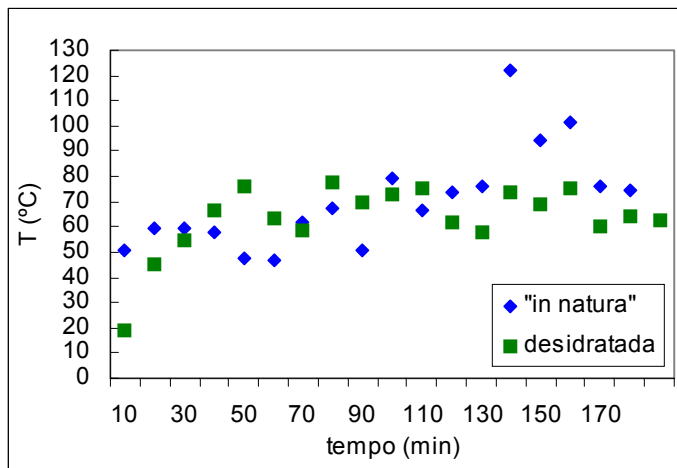
Na Figura 4.14 observa-se o efeito do pré-tratamento osmótico na cinética de secagem e na temperatura no interior das amostras de pêra.

É possível observar na Figura 4.14 (a) que a taxa de secagem para a amostra “in natura” é maior que para a amostra pré-desidratada osmoticamente. Isso acontece porque as microondas atuam principalmente na umidade presente no alimento (Prabhanjan et al., 1995) que, para o tempo zero é maior na amostra “in natura”. No entanto, no tempo de 130 minutos ocorre o cruzamento das duas linhas, onde a umidade presente na amostra passa a ser menor para a amostra “in natura”, que apresenta, portanto, uma tendência à uma taxa de secagem maior somente até este ponto. Pode-se dizer que para esta potência, para encontrar a umidade final pretendida neste trabalho de 15% em base úmida, têm-se os tempos de 125 minutos para as amostras “in natura” e 105 minutos para as amostras pré-desidratadas osmoticamente, o que representa uma economia de 20 minutos no tempo de secagem para as amostras pré-desidratadas osmoticamente, que corresponde a 16% do tempo total de secagem da amostra “in natura”. A amostra previamente desidratada

apresentou, assim como a amostra “in natura”, apenas o período de taxa de secagem constante.



(a)



(b)

Figura 4.14: Umidade adimensional (a) e temperatura no interior da amostra (b) em função do tempo de secagem para pêra seca por microondas em potência de 0,3 W/g amostra, parametrizados no pré-tratamento osmótico.

Para a temperatura no interior da amostra, Figura 4.14 (b), os valores permaneceram oscilando entre 46,4 e 101,2°C para as amostras “in natura” e entre 45,4 e 77,3°C para as amostras desidratadas osmoticamente, sendo uma faixa mais ampla para a amostra “in natura”; isto se deve provavelmente pelo maior teor de umidade presente na amostra. Ao final da secagem a temperatura apresentava-se mais baixa para a amostra pré-desidratada osmoticamente, provavelmente em função do menor encolhimento da amostra e do menor teor de umidade. Essa oscilação é devida às interações entre as microondas e as moléculas de água e também foram observadas por Jolly, 1986.

#### **4.2.2 Secador Microondas-Convectivo**

Nesta etapa o processo de secagem foi realizado no forno White-Whestinghouse em três modos diferentes, sendo microondas, microondas-convectivo e convecção. Foram analisados os parâmetros teor de umidade da amostra e a temperatura em seu centro geométrico, com a finalidade de comparação da influência dos três modos de secagem nesses parâmetros, de maneira a comprovar as vantagens do processo combinado, assim como verificar a eficácia do processo de adaptação do forno de microondas.

- ***Calibração***

Segundo James et al. (2002) fornos de microondas domésticos têm diferentes “performances” em termos da potência aplicada e eficiência de aquecimento, que podem divergir das características dadas pelo fabricante devido a variações da carga e

posição da mesma no forno. Logo, para uso deste tipo de equipamento em laboratório é necessário que se padronizem testes que definam o forno com relação à sua potência verdadeira e a reprodução de dados.

Para se trabalhar com o forno White-Whestinghouse foi feita, portanto, uma calibração de sua potência conforme metodologia descrita em manual do fabricante, cujos resultados podem ser vistos na Figura 4.15, na qual observa-se a curva de calibração que obteve variância explicada de 0,996. Os dados experimentais são resultados de experimentos em duplicata nos quais observou-se que o forno está trabalhando em 65% de sua capacidade máxima e que a capacidade mínima está 390% acima do nominal, e uma variação entre 0 e 28% em relação às duas medidas, o que confirma o que foi dito por James et al. (2002), sendo a potência real do forno diferente da nominal e não tendo uma reprodução de dados muito boa. No entanto, através da curva de calibração é possível trabalhar-se nas condições de operação do forno mais próximas do real.

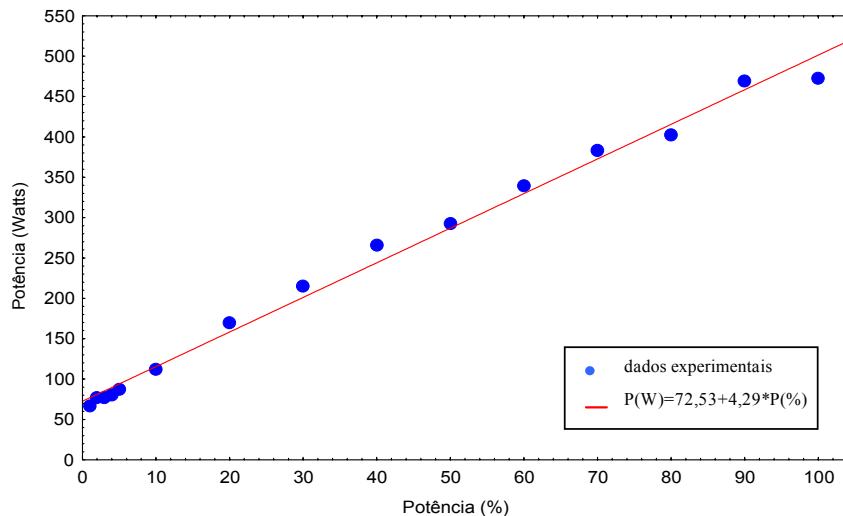


Figura 4.15: Potência em Watts em função da porcentagem da potência total para o forno de microondas White-Whestinghouse ajustada por regressão linear.

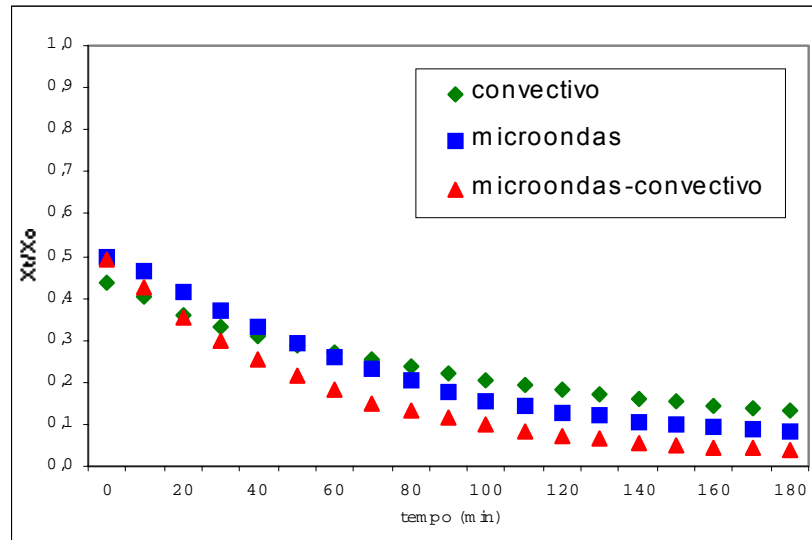


- ***Comparação Entre os Modos de Secagem***

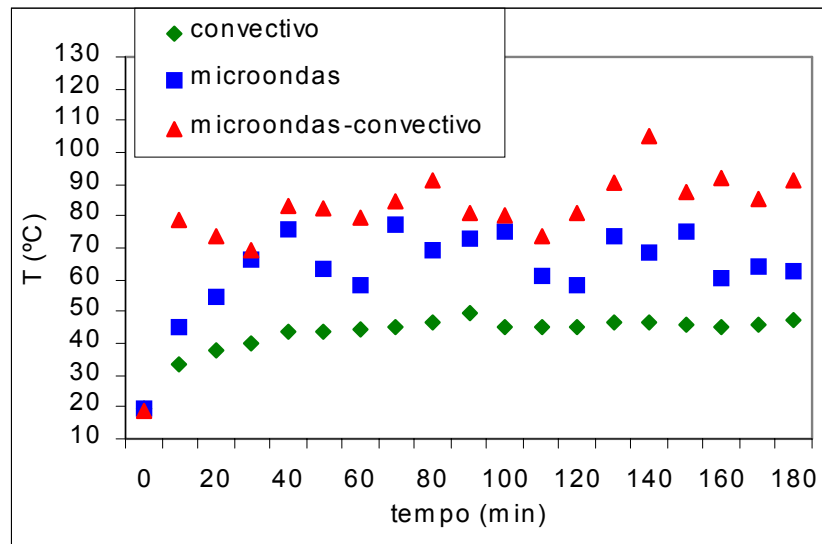
Os ensaios para comparação da cinética foram realizados para amostras previamente desidratadas e secas em potência de 0,3 W/g. As curvas para a comparação da cinética de secagem nos três modos propostos podem ser visualizadas na Figura 4.16.

Pela Figura 4.16(a) pode-se observar que o comportamento cinético obteve os resultados esperados, apresentando maior taxa para a secagem no modo combinado microondas-convectivo, seguida pela taxa da secagem por microondas e a menor taxa para a secagem convectiva, sendo que, para obtenção do teor de umidade final da pêra em 15%, seriam necessários 130, 90 e 60 minutos para os modos de secagem convectivo, por microondas e com microondas-convectivo, respectivamente. Tomando-se como referência o tempo de secagem convectivo, a secagem por microondas apresenta uma economia de aproximadamente 30% de tempo e a secagem combinada apresenta uma economia de 54%. Comparando-se ainda a secagem por microondas com a secagem combinada, esta última apresenta uma economia de 34% no tempo de secagem.

Na Figura 4.16(b) observa-se que a temperatura no interior das amostras permaneceu em valores mais baixos para a secagem convectiva, que apresenta valores próximos à temperatura do ar, aumenta para a secagem por microondas e tem os valores mais elevados para a secagem no modo combinado, devido, como previsto por Sanchez et al. (2000), ao aquecimento simultâneo pelas ações das microondas e do ar quente.



(a)



(b)

Figura 4.16: Umidade adimensional (a) e temperatura no interior da amostra (b) em função do tempo de secagem para pêra seca em 0,3W/g amostra, após desidratação osmótica, parametrizados no modo de secagem.

Nestes ensaios foi possível avaliar a eficiência da adaptação do forno, que apresentou excelente desempenho mecânico na secagem nos três modos propostos sem que nenhum problema estrutural ou de funcionamento tenha ocorrido, podendo-se recomendar este procedimento, face às vantagens da secagem combinada, para a adaptação do forno de laboratório Sairem S.A. sem que nenhum dano ao equipamento em decorrência da mesma seja esperado.

- ***Análise dos Modelos Propostos para Cinética de Secagem***

A análise da cinética de secagem foi feita através do ajuste dos dados experimentais aos modelos propostos por Lewis (1921) e por Page (1949), dados pelas Equações 2.16 e 2.14, respectivamente aos dados dos ensaios para comparação entre os modos de secagem. Na Tabela 4.6 têm-se os valores obtidos para os parâmetros dos modelos via regressão não linear e o coeficiente de correlação obtido. Nas Figuras 4.17 e 4.18 têm-se resultados típicos do teor de umidade em função do tempo para os ensaios realizados no microondas White-Westinghouse, nos quais se observa a localização dos dados experimentais em relação às curvas dos modelos. No Anexo A encontram-se as figuras correspondentes à análise estatística de resíduos realizada para esses ajustes.

Com base nos altos valores de  $R^2$  observados na Tabela 4.6 pode-se dizer que o ajuste dos dados experimentais aos modelos de Lewis (1921) e Page (1949) são considerados bons para a estimativa dos parâmetros, sendo que, em média, ambos apresentaram valores muito próximos para o coeficiente de correlação nas três condições experimentais analisadas. Avaliando-se os valores de K obtidos pelo modelo de Lewis (1921) pode-se observar que seu valor é 54,5% maior para a

secagem no modo combinado em relação aos outros modos de secagem, podendo-se confirmar o melhor desempenho deste modo de secagem.

Tabela 4.6: Valores dos parâmetros dos modelos de Lewis (1921) e Page (1949), preditos via regressão não linear para diferentes condições de secagem.

	<i>Parâmetros</i>	<i>Secagem modo</i>		
		<i>Convectivo</i>	<i>Microondas</i>	<i>Microondas-convectivo</i>
<i>Modelo de Lewis (1921)</i>	$R^2$	0,956	0,971	0,990
	Xe (g/g sólido seco)	0,459	0,013	0,095
	K (min <sup>-1</sup> )	0,011	0,011	0,017
<i>Modelo de Page (1949)</i>	$R^2$	0,952	0,973	0,989
	Xe (g/g sólido seco)	0,146	0,367	0,138
	K' (min <sup>-n</sup> )	0,0148	0,005	0,015
	n	0,873	1,253	1,048

Nas Figuras 4.17 e 4.18 têm-se a localização dos pontos experimentais em relação às curvas dos modelos, através das quais é possível observar que os dados experimentais são bem descritos por ambos os modelos. Sendo o modelo de Lewis (1921) mais simples, por apresentar um parâmetro a menos para ser estimado, matematicamente, seu desempenho é melhor, mas ambos os modelos são válidos para descrição da cinética de secagem da pêra.

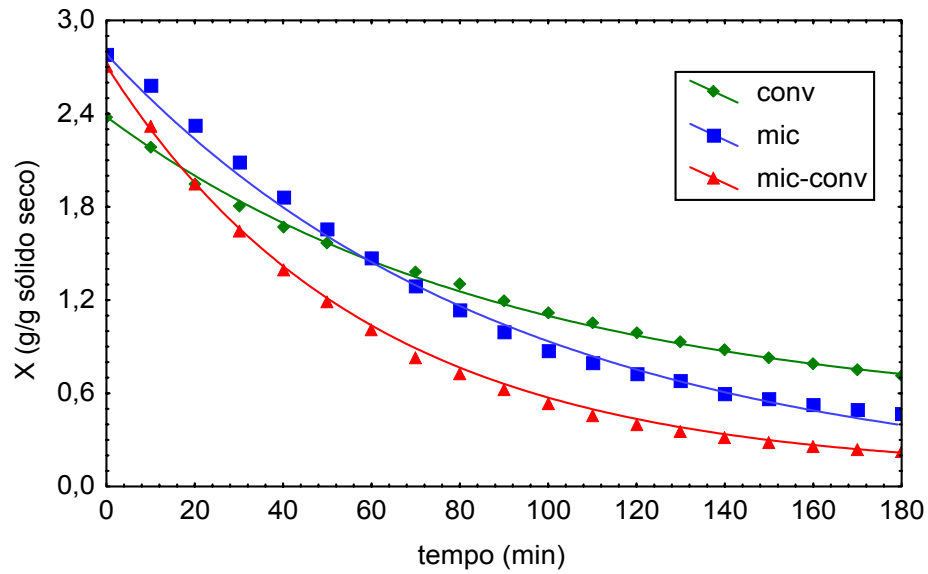


Figura 4.17: Teor de umidade em função do tempo de secagem ajustado pela Equação 2.16 do modelo de Lewis (1921) parametrizados no modo de secagem (● dados experimentais e / curva do modelo).

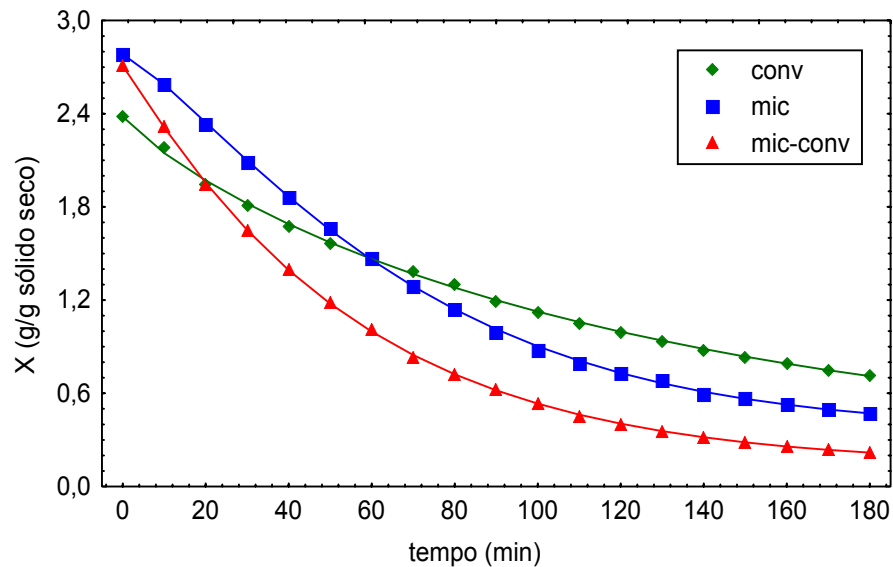


Figura 4.18: Teor de umidade em função do tempo de secagem ajustado pela Equação 2.14 do modelo de Page (1949) parametrizados no modo de secagem (● dados experimentais e / curva do modelo).

- **Encolhimento**

O encolhimento da pêra durante a secagem foi avaliado através da variação na razão do volume pela variação na razão da área superficial das amostras e através da variação na razão do volume pela variação na razão do teor de umidade, calculados em função do tempo de secagem, sendo amostras retiradas a cada 20 minutos num total de 3 horas para a secagem de pêras “in natura”, de maneira que só o efeito da secagem fosse avaliado, no modo de secagem combinado microondas-convectivo com potência de 0,3 W/g, que foi a melhor condição cinética de secagem.

A área superficial das amostras foi determinada pelo programa Image Pró-Plus, através da análise de imagens provenientes de câmera fotográfica digital e o volume foi avaliado através da massa e da densidade das amostras, assim como feito na desidratação osmótica, sendo seus valores apresentados na Tabela 4.7.

*Tabela 4.7: Valores da razão entre áreas superficiais, volumes e teores de umidade iniciais e finais e da densidade das amostras de pêra.*

<i>Tempo (h)</i>	<i>A/A<sub>0</sub></i>	<i>V/V<sub>0</sub></i>	<i>X/X<sub>0</sub></i>	<i>ρ (g/cm<sup>3</sup>)</i>
0	1	1	1	1,023
20	0,895	0,949	0,860	0,946
40	0,886	0,827	0,686	0,900
60	0,698	0,643	0,514	0,921
80	0,646	0,515	0,363	0,881
100	0,621	0,390	0,235	0,865
120	0,569	0,309	0,143	0,819
140	0,561	0,238	0,085	0,842
160	0,558	0,203	0,054	0,853
180	0,563	0,182	0,039	0,868

Os valores obtidos experimentalmente foram ajustados pelos modelos de Lozano et al. (1983) e pelo modelo de Mavroudis et al. (1998b) dados pelas Equações 2.18 e 2.19, respectivamente. No Anexo A encontram-se as figuras correspondentes à análise estatística de resíduos realizada para os ajustes.

Comparando-se a razão de variação na área e no volume das amostras durante a secagem, dadas na Tabela 4.7, com os valores para a desidratação osmótica, dados na Tabela 4.5, observa-se que a variação na área apresenta valores bem próximos enquanto a variação no volume é bem maior durante a secagem, devido à diminuição na densidade das amostras.

Testando o modelo de Mavroudis et al. (1998b) encontrou-se valor para o coeficiente de correlação de 0,945, mas o coeficiente  $d$  encontrado, aproximadamente 3,98, como no caso da desidratação osmótica, não representa nenhum dos tipos de comportamento definidos pelo modelo. Na Figura 4.19 compara-se os valores experimentais e da regressão obtida com os valores obtidos por Mavroudis et al. (1998b), observando-se que os valores dos coeficientes dados pelo modelo subestimam o encolhimento.

O modelo de Lozano et al. (1983), dado pela Equação 2.18, encontrou valores para os parâmetros  $B$  e  $E$  e para o coeficiente de correlação de 0,173; 0,886 e 0,991, respectivamente. Pela Figura 4.20 pode-se observar a localização dos resultados experimentais em relação à curva do modelo, permitindo-se concluir, que o encolhimento da pêra durante a secagem no modo combinado microondas-convectivo, assim como na desidratação osmótica, está diretamente ligado à variação da umidade de forma linear, como proposto por Lozano et al. (1983).

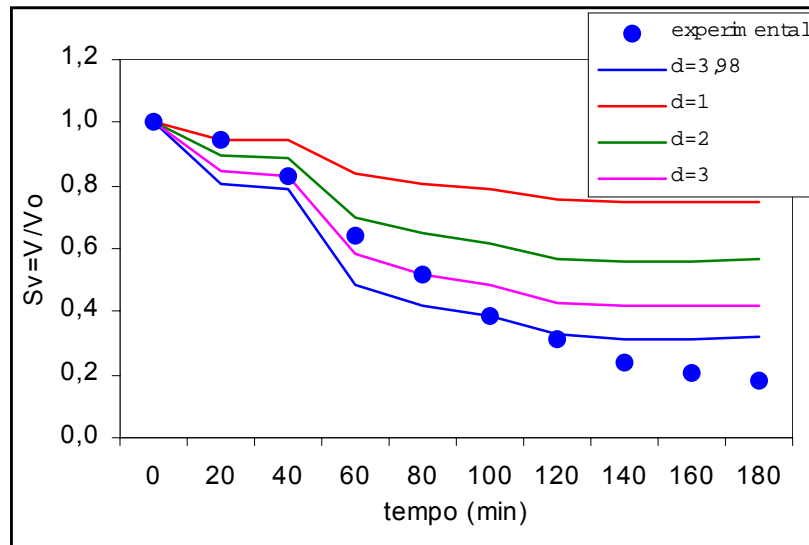


Figura 4.19: Razão do volume de encolhimento em função da razão de variação de umidade para secagem de pêra “in natura” no modo combinado microondas-convectivo com potência 0,3 W/g, ajustada pela Equação 2.19 do modelo de Mavroudis et al. (1998b).

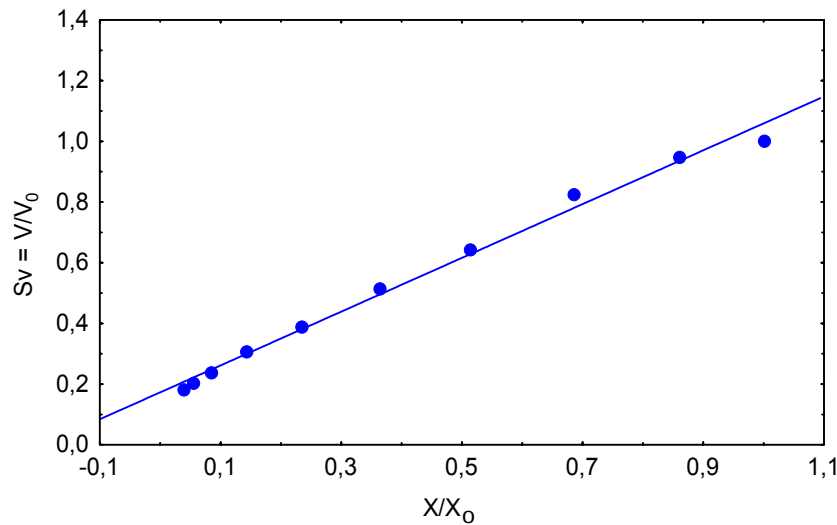


Figura 4.20: Razão do volume de encolhimento em função do tempo para secagem de pêra “in natura” no modo combinado microondas-convectivo com potência 0,3 W/g, ajustada pela Equação 2.18 do modelo de Lozano et al. (1983).



### 4.3 Análise da Qualidade do Produto

A caracterização física e química da pêra foi feita de acordo com os métodos descritos no item 3.3.4.

A Tabela 4.8 apresenta os valores obtidos nas determinações do teor de umidade, sólidos totais, densidade, atividade de água, cálcio, fósforo e potássio. Os experimentos foram feitos com amostras de pêra sem pele e sem caroço seguindo procedimento específico descrito anteriormente. Os valores dados nesta tabela para a fruta “in natura” podem ser comparados aos valores encontrados na literatura, extraídos das Tabelas 2.1 a 2.4.

*Tabela 4.8: Valores experimentais e da literatura para a caracterização da pêra “in natura”.*

<i>Propriedade</i>	<i>Valor Médio Experimental</i>	<i>Valor da Literatura</i>
Teor de umidade (%)	87,01	86*
Sólidos totais (%)	12,99	-
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,023	-
$a_w$	0,995	-
Cálcio (mg/100g pêra)	7,90	6* - 15**
Fósforo (mg/100g pêra)	8,99	11* - 18**
Potássio (mg/100g pêra)	42,13	114* - 131,7**

Fonte: \*FAO; \*\*FRANCO (1982).

O valor médio do conteúdo de umidade encontrado para a pêra “in natura” (87,01% em base úmida) apresenta-se em concordância com o valor da literatura dado pela FAO (86%). Em decorrência disso, o teor de sólidos totais também pode ser considerado semelhante aos dados da literatura. Para os valores da densidade e atividade de água não foram encontrados dados para comparação na literatura.

Para as análises de cálcio, fósforo e potássio observou-se uma diferença significativa entre os valores experimentais e da literatura para o teor de potássio, no entanto, mediante a confiabilidade do método experimental utilizado, esse valor é compreensível quando se sabe que a composição centesimal de uma fruta é função de diversos fatores como época do plantio, região (solo) de plantio, grau de amadurecimento, entre outros.

Na Tabela 4.9 pode-se observar o efeito da desidratação osmótica na qualidade da pêra, que pode ser avaliada através da análise da retenção dos constituintes nutricionais, da porcentagem de diminuição da umidade e da manutenção da densidade e quantidade de sólidos totais da fruta processada em comparação com os valores para a pêra “in natura”. A variação foi calculada através da equação:

$$Variação(\%) = \left( \frac{Valor \cdot "in \cdot natura" - Valor \cdot após \cdot tratamento}{Valor \cdot "in \cdot natura"} \right) \cdot 100 \quad (4.5)$$

Pela Tabela 4.9 pode-se observar que a desidratação osmótica da pêra em fatias, com sacarose em proporção de 37,5% e temperatura de 40°C obteve um bom resultado para a perda de água, reduzindo 53,71% do seu valor inicial com uma pequena incorporação de sacarose de 2,45%. Sua densidade não sofreu grande

variação e a atividade de água teve uma pequena diminuição, já que primeiramente é retirada a água livre do material, que não é quantificada pela atividade de água. A perda de fósforo e potássio foi bem pequena, sendo um pouco superior para a retenção do cálcio, obtendo-se, portanto, excelentes porcentagens de retenção dos três constituintes analisados.

Tabela 4.9: Variação das características da pêra após desidratação osmótica.

<i>Após Desidratação Osmótica</i>		
<i>Propriedade</i>	<i>Valor</i>	<i>Variação (%)</i>
Teor de umidade (%)	40,28	- 53,71
Sólidos totais (%)	15,44	2,45
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,1045	7,40
$a_w$	0,968	- 2,71
Cálcio (mg/100g pêra)	5,76	- 27,08
Fósforo (mg/100g pêra)	8,29	- 7,78
Potássio (mg/100g pêra)	40,96	- 2,77

Na Tabela 4.10 pode-se observar o efeito da secagem no tempo total de 180 minutos na qualidade da pêra. As análises foram feitas para amostras secas em microondas em 0,3W/g de potência, previamente desidratadas e “in natura” e para amostras secas “in natura” no modo combinado microondas-convectivo em 0,3W/g de potência, sendo a variação calculada em relação aos valores padrões para as amostras “in natura” como dado pela Equação 4.5.

Tabela 4.10: Variação das características da pêra após 3 horas de secagem.

<i>Propriedade</i>	<i>Após Secagem</i>					
	<i>microondas</i>		<i>microondas</i>		<i>microondas-</i>	
	<i>“in natura”</i>		<i>previamente</i>		<i>convectivo</i>	
	<i>Valor</i>	<i>Variação</i>	<i>Valor</i>	<i>Variação</i>	<i>Valor</i>	<i>Variação</i>
		<i>(%)</i>		<i>(%)</i>		<i>(%)</i>
Teor de umidade (%)	12,1	- 86,09	7,30	- 91,61	3,5	- 95,98
Sólidos totais (%)	12,99	0	15,44	2,45	12,99	0
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,903	- 11,7	0,802	- 21,60	0,868	- 15,1
$a_w$	0,653	- 34,37	0,431	- 56,68	0,313	- 68,54
Cálcio (mg/100g pêra)	5,21	- 34,05	6,12	- 22,53	4,53	- 42,66
Fósforo (mg/100g pêra)	10,80	20,13	14,67	63,18	9,63	7,12
Potássio (mg/100g pêra)	57,20	35,77	55,58	31,92	51,02	21,10

Pode-se observar pela Tabela 4.10 que os teores de umidade se apresentam abaixo do que o valor pretendido (15%), em alguns casos chegando a valores bem abaixo, o que implica que pode-se realizar os ensaios de secagem em tempos menores, como analisado anteriormente. Os sólidos totais não se alteram em função da secagem. Há uma diminuição na densidade da fruta, tornando-a mais macia, o que não é um efeito indesejável. Os valores de atividade de água encontrados para as três condições estão bem abaixo dos valores mínimos necessários para o desenvolvimento de microorganismos patogênicos, como dado na Tabela 2.3, confirmando a eficiência do processo de secagem na conservação de gêneros alimentícios.

Para os principais constituintes analisados, observou-se um aumento nos teores de fósforo e potássio, o que pode ser explicado pelas variações na composição centesimal de alimentos, levando-se em consideração a dificuldade de obtenção de amostras homogêneas ao se trabalhar com materiais biológicos, agravada pelo fato de ter-se trabalhado com duas variedades diferentes de pêra, sendo, possivelmente uma divergência em relação aos valores adotados como padrões para as amostras “in natura”, e uma diminuição no teor de cálcio.

Comparando-se os três modos de secagem analisados, pode-se observar que a amostra “in natura” seca no modo combinado microondas-convectivo apresentou a maior perda de cálcio e o menor aumento nos teores de fósforo e potássio, sendo que o pior desempenho desse método na manutenção dos constituintes era esperado, baseado na análise da temperatura no interior das amostras durante a secagem, que alcançava valores mais altos para este modo de secagem, determinando uma maior degradação dos componentes analisados. A amostra seca por microondas pré-desidratada osmoticamente apresentou uma menor perda de cálcio e um maior aumento no teor de fósforo comparado aos outros dois processos e para o teor potássio houve maior aumento em relação à amostra seca no modo combinado microondas-convectivo e um valor muito próximo à amostra seca por microondas.

Por essa análise pode-se afirmar que os três modos de secagem analisados na Tabela 4.10 podem ser adotados para secagem da pêra, preferencialmente com amostras desidratadas, de modo a diminuir a temperatura no interior das amostras, garantindo bons resultados na manutenção de suas propriedades físico-químicas e, que, a desidratação osmótica além de diminuir o tempo de secagem, demonstra também sua eficiência na melhoria das propriedades de produtos secos.

## 5. CONCLUSÕES

Considerando os objetivos propostos, os resultados e as discussões dos dados experimentais obtidos neste trabalho, chegou-se às seguintes conclusões sobre a desidratação osmótica, a secagem e a qualidade do produto.

- ***Desidratação Osmótica***

- Pêras em fatias proporcionam maiores perdas de água quando comparadas com cubos ou palitos, devido ao aumento da razão área/espessura para troca de massa.

- A sacarose demonstrou ser um bom agente osmótico na desidratação osmótica da pêra, sendo que a perda de água aumenta com o aumento da sua concentração.

- A agitação não exerceu efeito significativo na desidratação osmótica.

- O aumento da temperatura na desidratação osmótica provocou maiores perdas de água e menores ganhos de sólido, com exceção da temperatura de 50°C, a partir da qual efeitos indesejáveis como o aumento da incorporação do agente osmótico, o cozimento da fruta e a formação de uma camada cristalizada mais espessa ao redor da fruta começaram a ocorrer.

- O modelo de Azuara et al., 1992 representou bem os resultados experimentais da cinética da perda de água e ganho de sólidos da pêra, sendo possível obter os valores de equilíbrio e o coeficiente de difusão médio.

- O encolhimento das amostras de pêra em fatias durante a desidratação osmótica pode ser representado pelo modelo proposto por Lozano et al. (1983), estando diretamente ligado à variação da umidade de forma linear.

- ***Secagem por Microondas***

- O aumento da potência de microondas aplicada aumenta a taxa de secagem e a temperatura no interior da amostra, assim como altera os períodos de secagem.

- O pré-tratamento osmótico, para a umidade final pretendida diminuiu o tempo de secagem em 16% em relação às amostras “in natura”.

- As temperaturas no interior das amostras durante a secagem permaneceram mais baixas em média e menos oscilatórias para as amostras pré-desidratadas osmoticamente em relação às amostras “in natura”.

- ***Secagem Comparativa***

- A adaptação do equipamento mostrou-se eficiente, sendo que o mesmo operou de maneira satisfatória nos três modos propostos.

- A secagem no modo combinado microondas-convectivo apresentou maiores taxas que a secagem por microondas que apresentou, por sua vez, maiores taxas que a secagem convectiva, sendo a economia de tempo de, respectivamente 30 e 54%.

- As temperaturas no interior das amostras aumentou com o aumento da taxa de secagem.

- Os modelos de Lewis (1921) e de Page (1949) representaram bem os resultados experimentais da cinética de secagem.

- O encolhimento das amostras de pêra “in natura” durante a secagem no modo combinado microondas-convectivo, assim como na desidratação osmótica, pode ser representado pelo modelo proposto por Lozano et al. (1983), estando diretamente ligado à variação da umidade de forma linear.

- ***Análise da Qualidade do Produto***

- A partir da metodologia empregada foi possível caracterizar as amostras de pêra “in natura”, após desidratação osmótica e após secagem quanto aos teores de umidade, sólidos totais, atividade de água, densidade, cálcio, fósforo e potássio.

- A desidratação osmótica produziu o resultado esperado, ocasionando uma diminuição no teor de umidade da fruta e uma pequena variação nas demais características físico-químicas analisadas.

- Os três métodos de secagem para os quais analisou-se a qualidade da pêra apresentaram um aumento nos teores de fósforo e potássio e uma diminuição no teor de cálcio.

- O melhor método de secagem, considerando-se a qualidade do produto, foi a secagem por microondas de amostras pré-desidratadas osmoticamente.



Concluiu-se, portanto, que a secagem é um excelente método para preservação de alimentos com altos teores de umidade e que, as técnicas propostas neste trabalho contribuem para, além da diminuição do tempo de secagem, a melhor manutenção das características nutritivas e sensoriais do produto, sendo a melhor condição cinética para obtenção da pêra seca a desidratação osmótica de amostras em fatias com sacarose na concentração de 37,5%, temperatura de 40°C e sem agitação, seguida da secagem no modo combinado microondas-convectivo em potência de 0,3 W/g.

Para a descrição matemática do processo, concluiu-se que o modelo de Azuara et al. (1992) representou bem os dados experimentais obtidos durante a desidratação osmótica, que os modelos de Lewis (1921) e Page (1949) representaram bem os resultados experimentais da secagem e que o encolhimento, tanto na desidratação osmótica quanto na secagem, segue o modelo proposto por Lozano et al. (1983).

## **6. SUGESTÕES**

Para dar continuidade aos estudos desenvolvidos neste trabalho, sugere-se o seguinte:

- determinar as isotermas de sorção e dessorção para a pêra seca na temperatura adotada;
- realizar experimentos de secagem no modo combinado microondas-convectivo variando-se a temperatura e a velocidade do ar de secagem;
- analisar a qualidade das amostras após secagem nos tempos determinados para obtenção da pêra com aproximadamente 15% de umidade ao invés do tempo fixo de 3 horas para todos os modos de secagem;
- fazer a adaptação do microondas Saírem S. A. para operar nos três modos propostos e
- instrumentar o microondas White-westinghouse acoplado à ele uma balança para pesagem contínua das amostras e um controle mais eficiente da potência aplicada.

## **ANEXO A**

**Distribuição de resíduos referentes aos ajustes das equações da cinética de desidratação osmótica e encolhimento aos dados experimentais.**

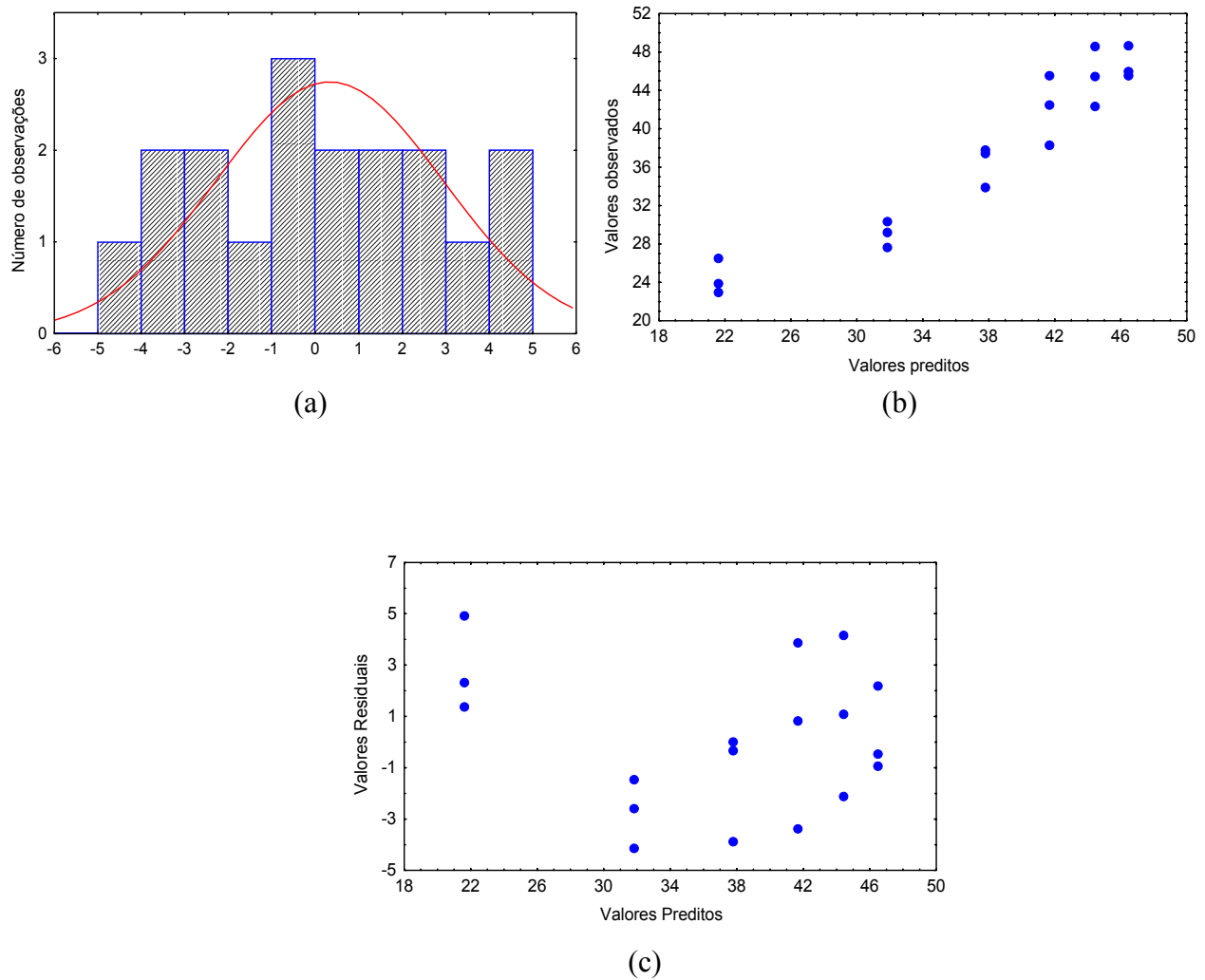
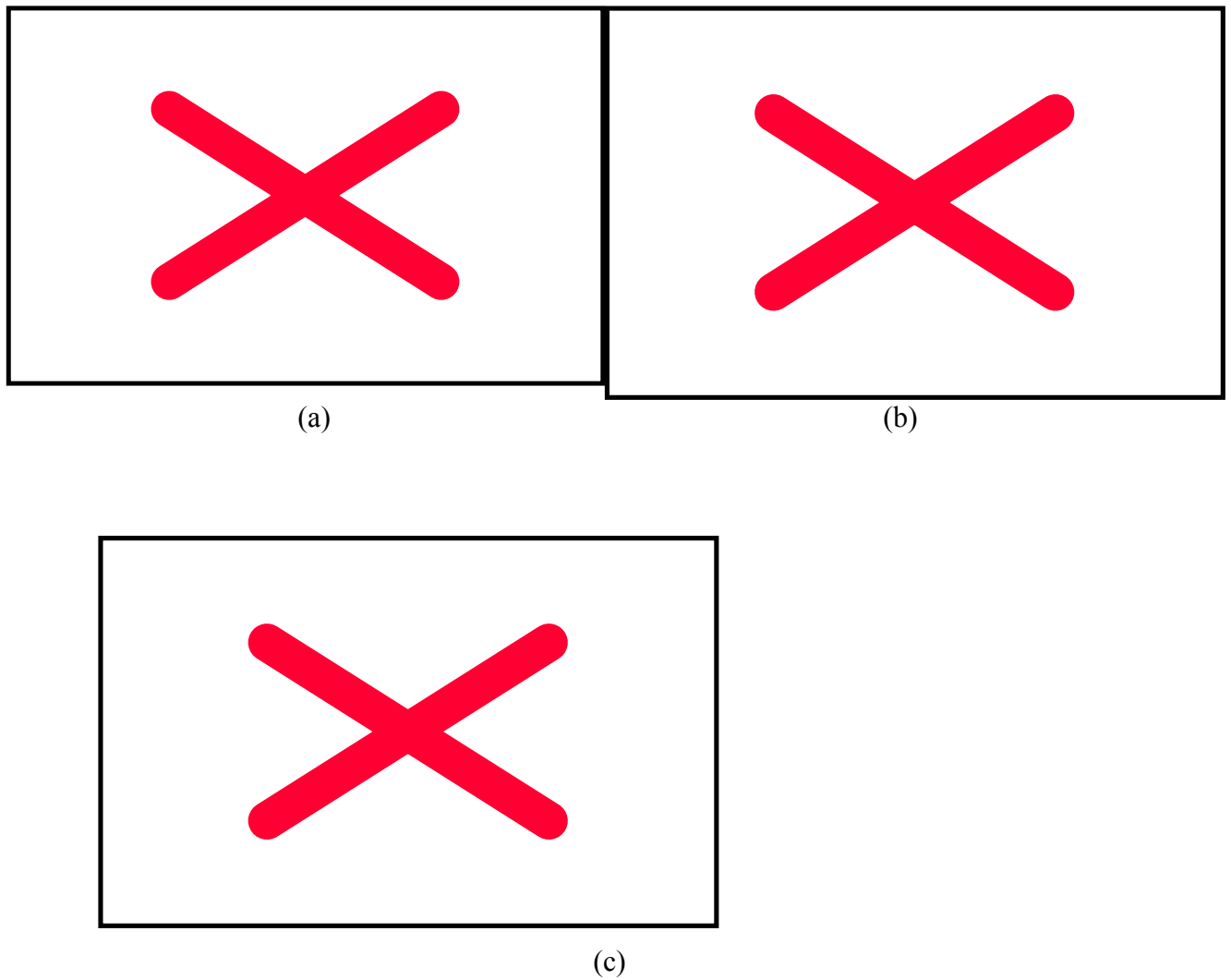


Figura A.1: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Azuara et al. (1992) aos dados da cinética de perda de água na desidratação osmótica de fatias de pêra a 40°C, 37,5% de sacarose e 0 rpm.



*Figura A.2: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Azuara et al. (1992) aos dados da cinética de incorporação de sacarose na desidratação osmótica de fatias de pêra a 40°C, 37,5% de sacarose e 0 rpm.*

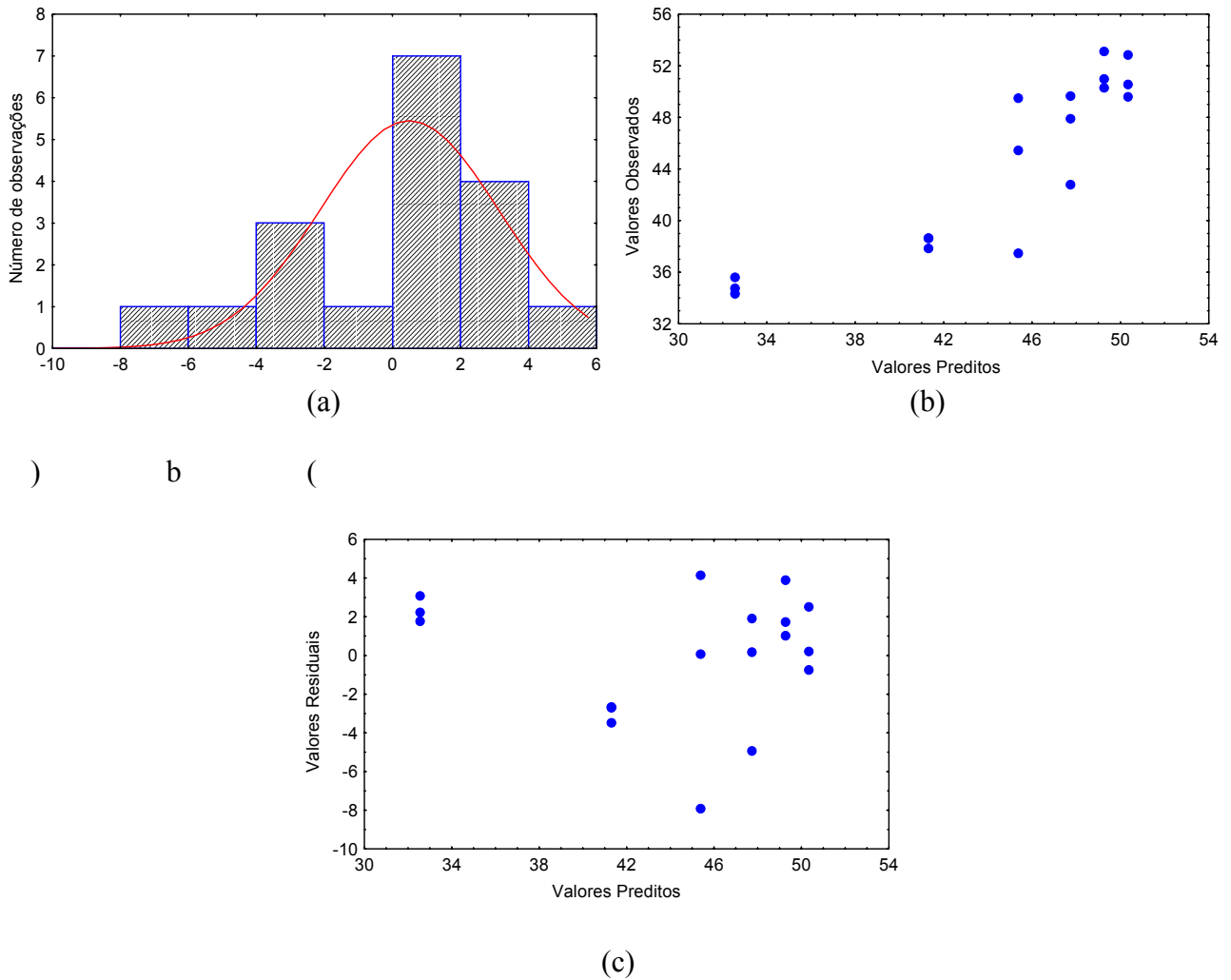
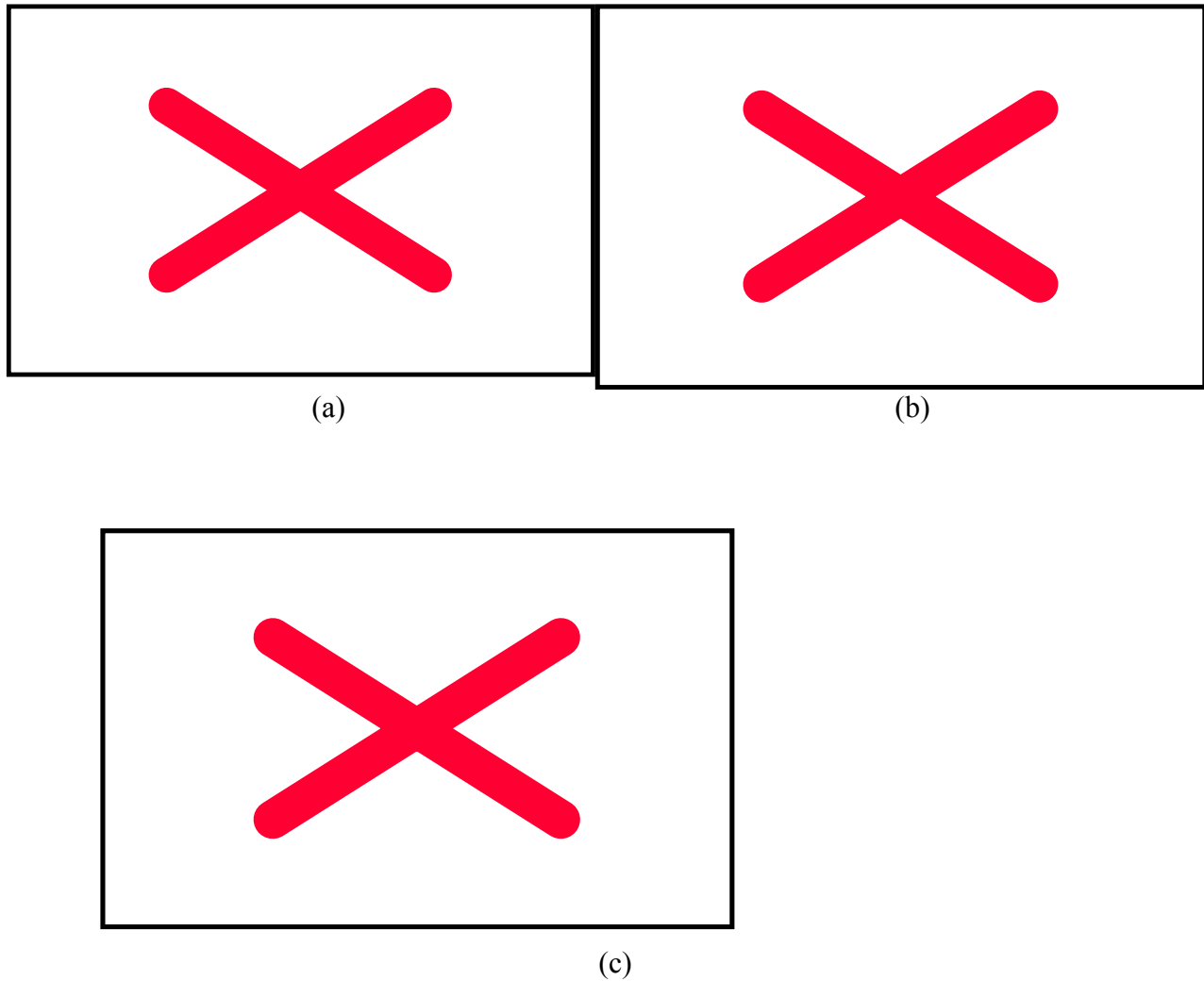
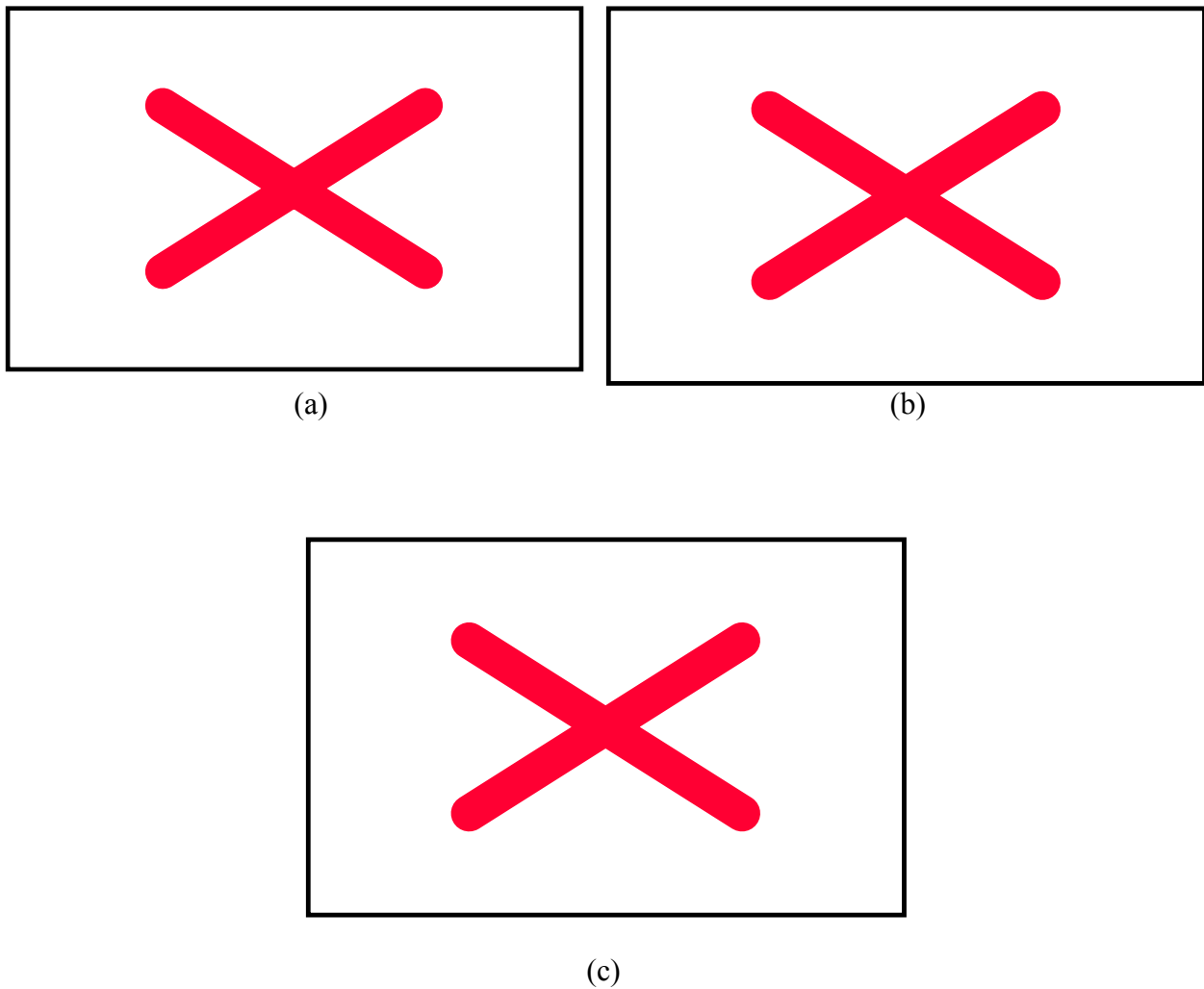


Figura A.3: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Azuara et al. (1992) aos dados da cinética de perda de água na desidratação osmótica de fatias de pêra a 40°C, 37,5% de sacarose e 120 rpm.



*Figura A.4: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Azuara et al. (1992) aos dados da cinética de incorporação de sacarose na desidratação osmótica de fatias de pêra a 40°C, 37,5% de sacarose e 120 rpm.*



*Figura A.5: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Lozano et al. (1983) aos dados de encolhimento durante a desidratação osmótica de fatias de pêra a 40°C, 37,5% de sacarose e 0 rpm.*



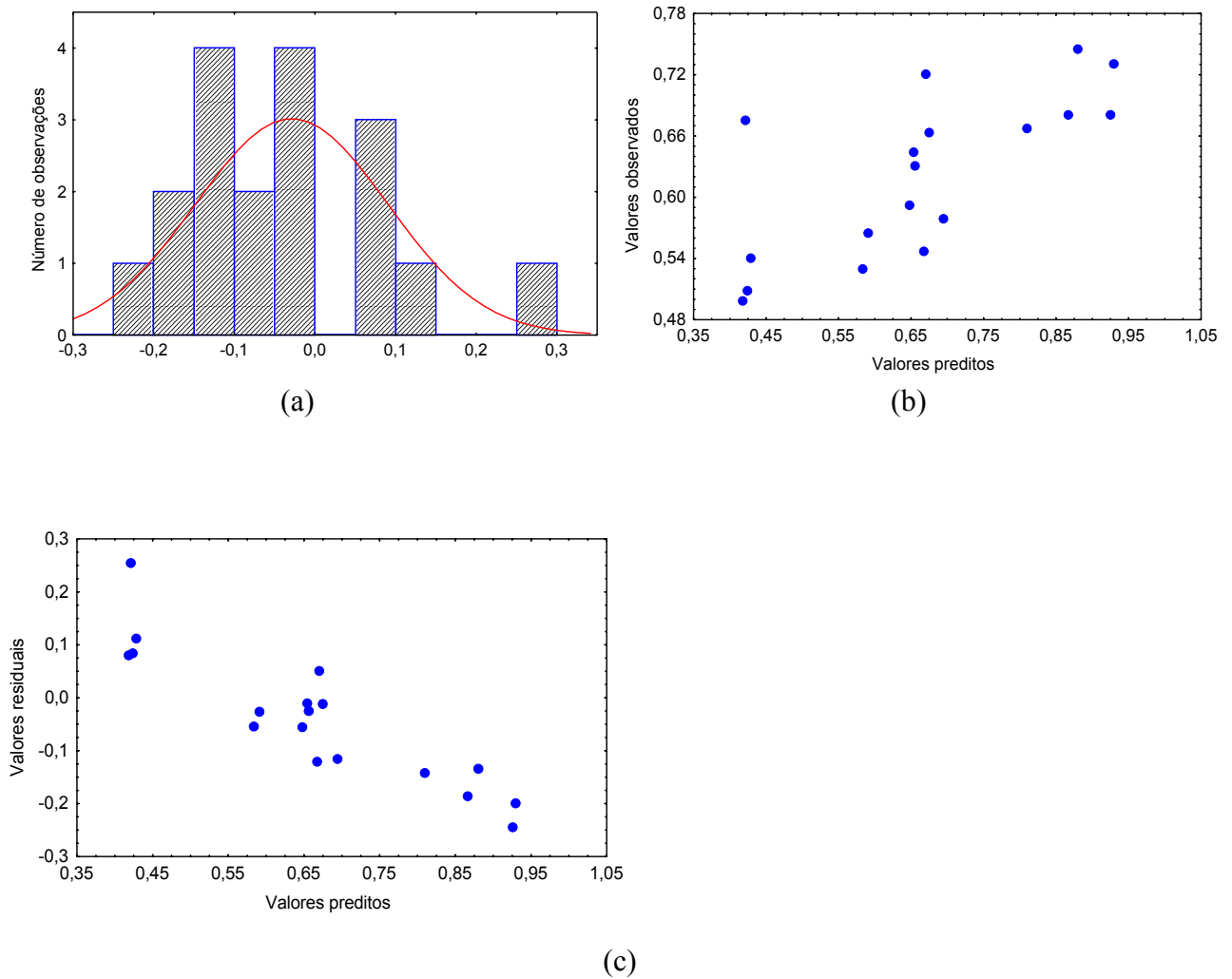
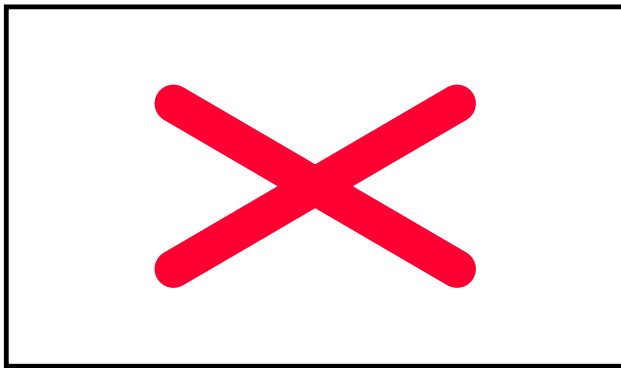
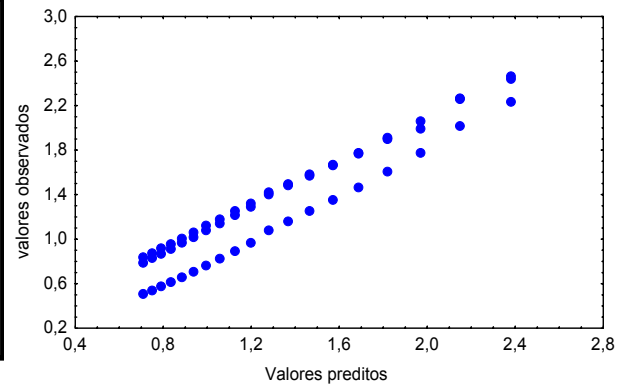


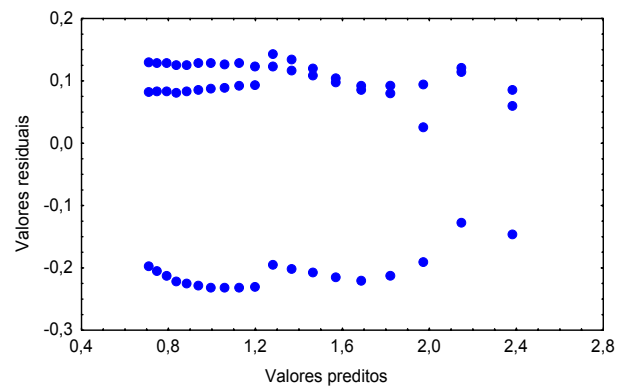
Figura A.6: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Mavroudis et al. (1998b) aos dados de encolhimento durante a desidratação osmótica de fatias de pêra a 40°C, 37,5% de sacarose e 0 rpm.



(a)



(b)



(c)

Figura A.7: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Page (1949) aos dados da cinética de secagem de pêras desidratadas osmoticamente e secas no modo convectivo.

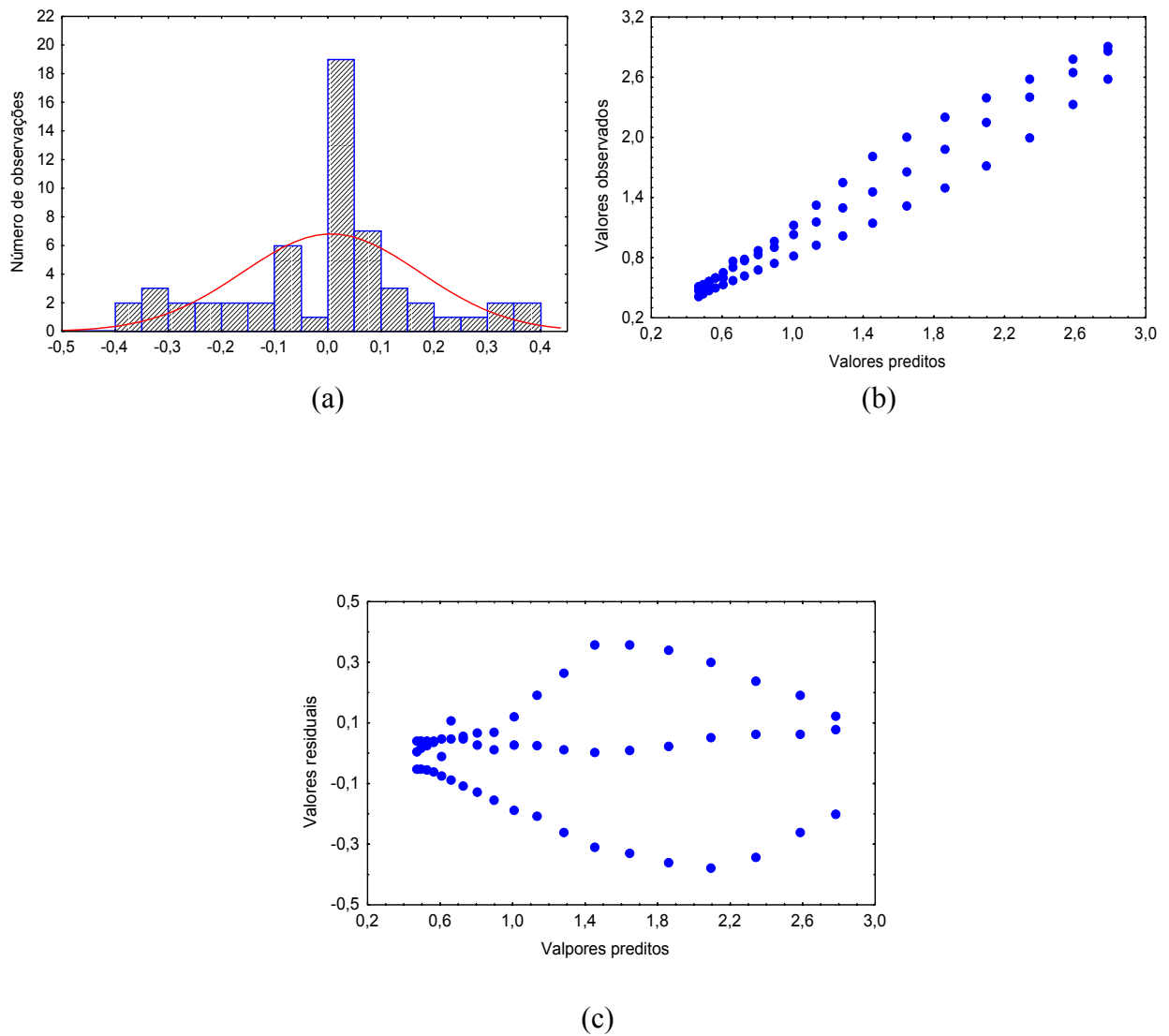


Figura A.8: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Page (1949) aos dados da cinética de secagem de pêras desidratadas osmoticamente e secas por microondas.

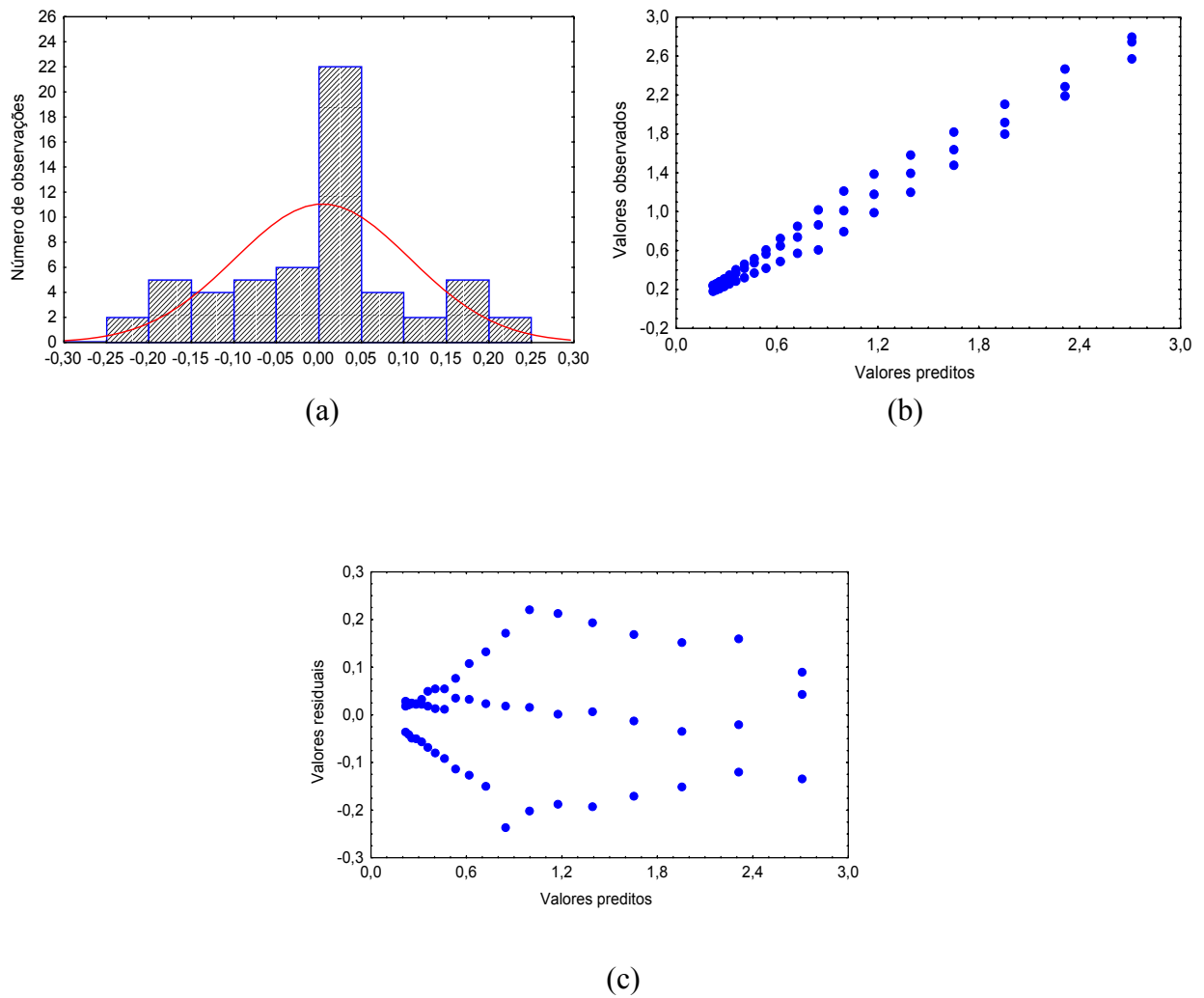


Figura A.9: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Page (1949) aos dados da cinética de secagem de pêras desidratadas osmoticamente e secas no modo combinado microondas-convectivo.

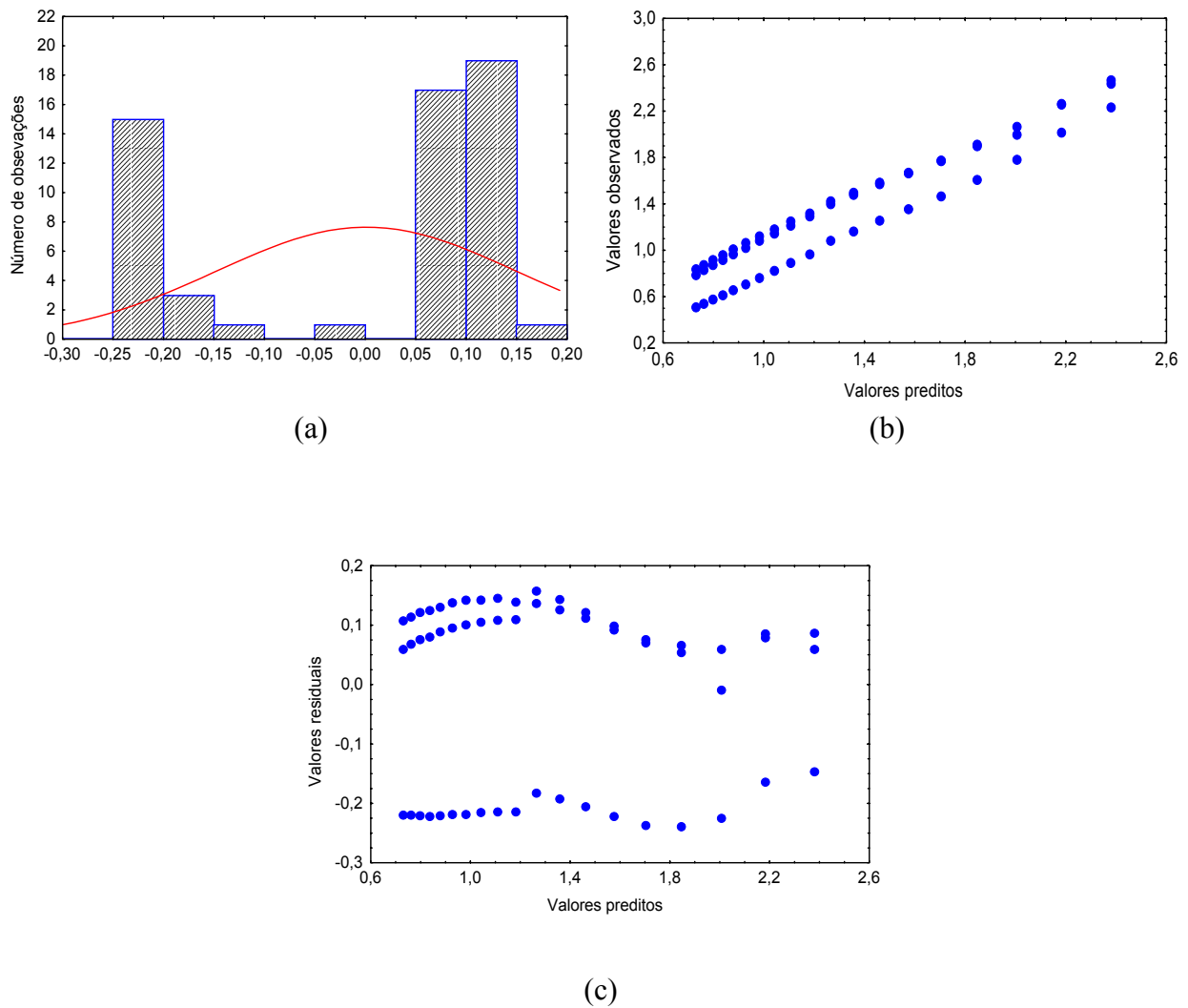


Figura A.10: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Lewis (1921) aos dados da cinética de secagem de pêras desidratadas osmoticamente e secas no modo convectivo.

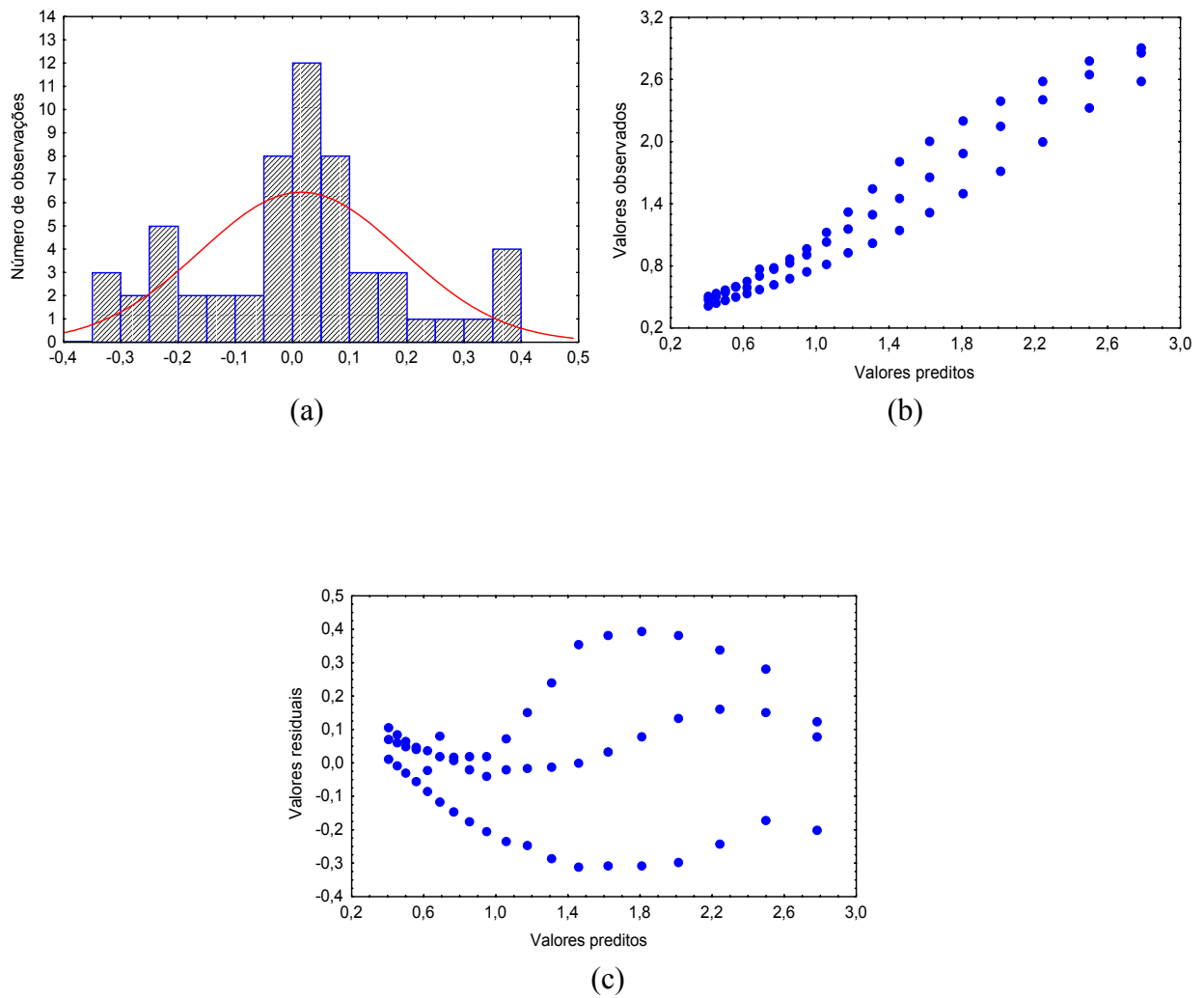
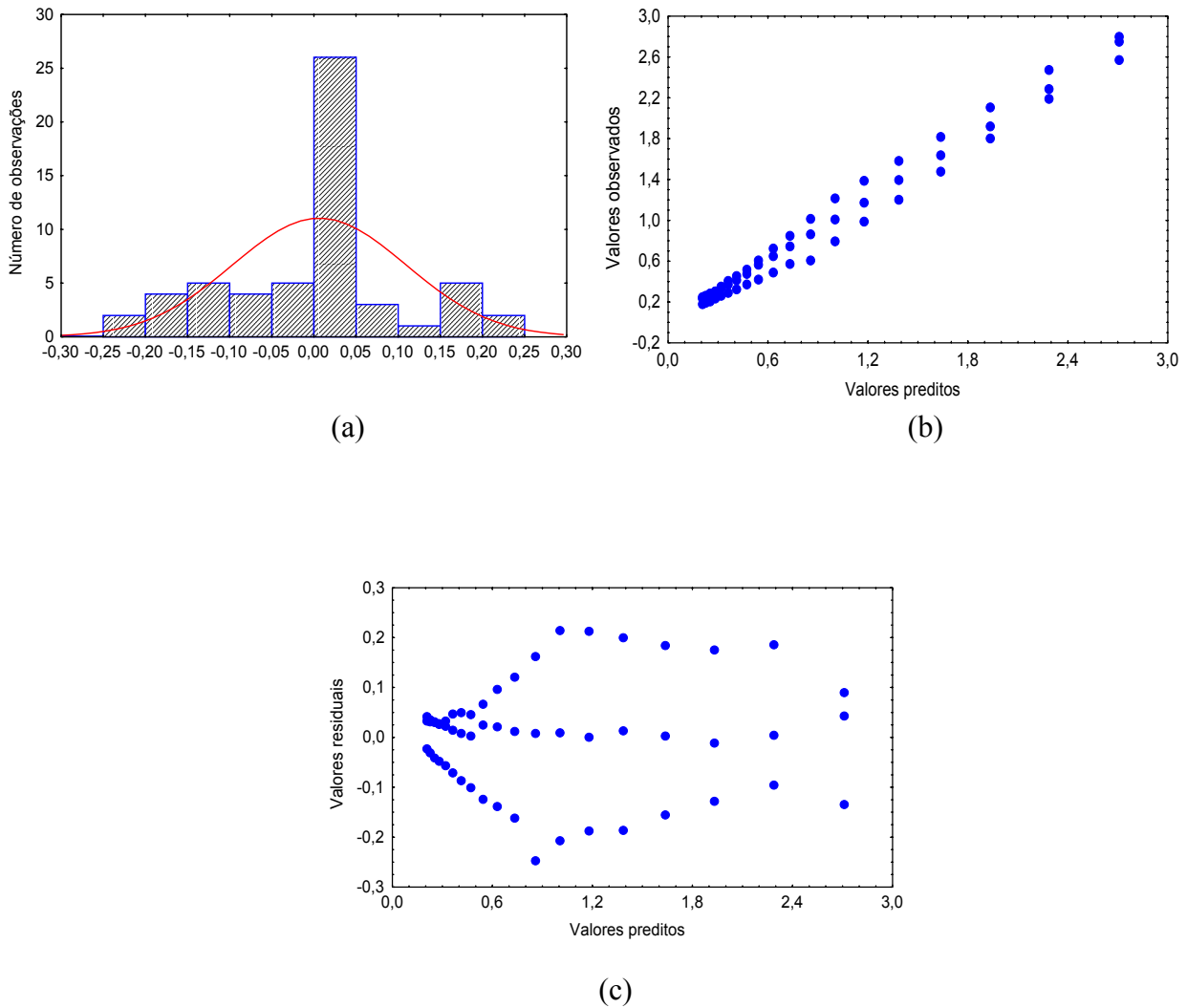


Figura A.11: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Lewis (1921) aos dados da cinética de secagem de pêras desidratadas osmoticamente e secas por microondas.



*Figura A.12: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Lewis (1921) aos dados da cinética de secagem de pêras desidratadas osmoticamente e secas no modo combinado microondas-convectivo.*

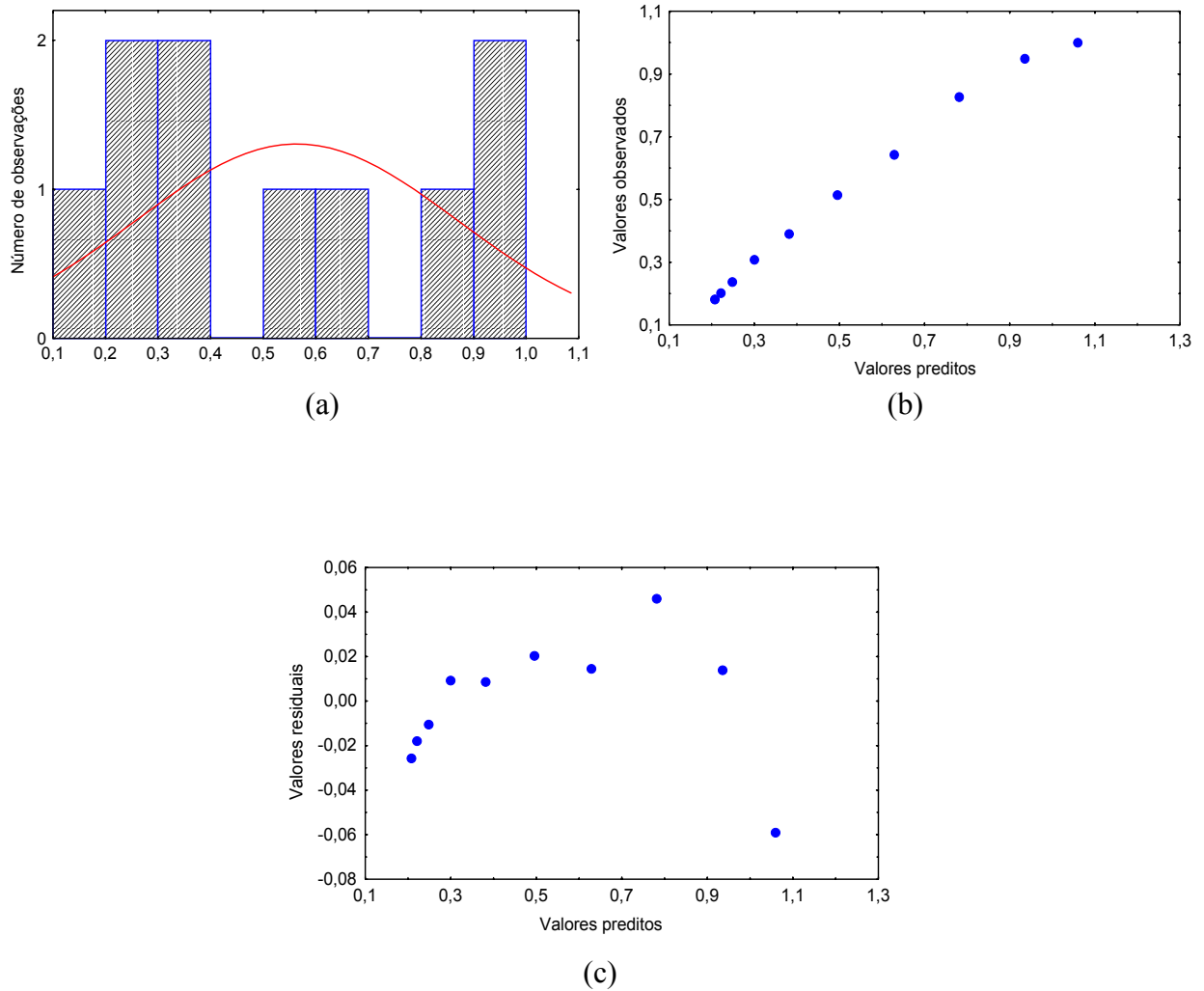


Figura A.13: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Lozano et al. (1983) aos dados de encolhimento durante a secagem de pêra “in natura” no modo combinado microondas-convectivo.



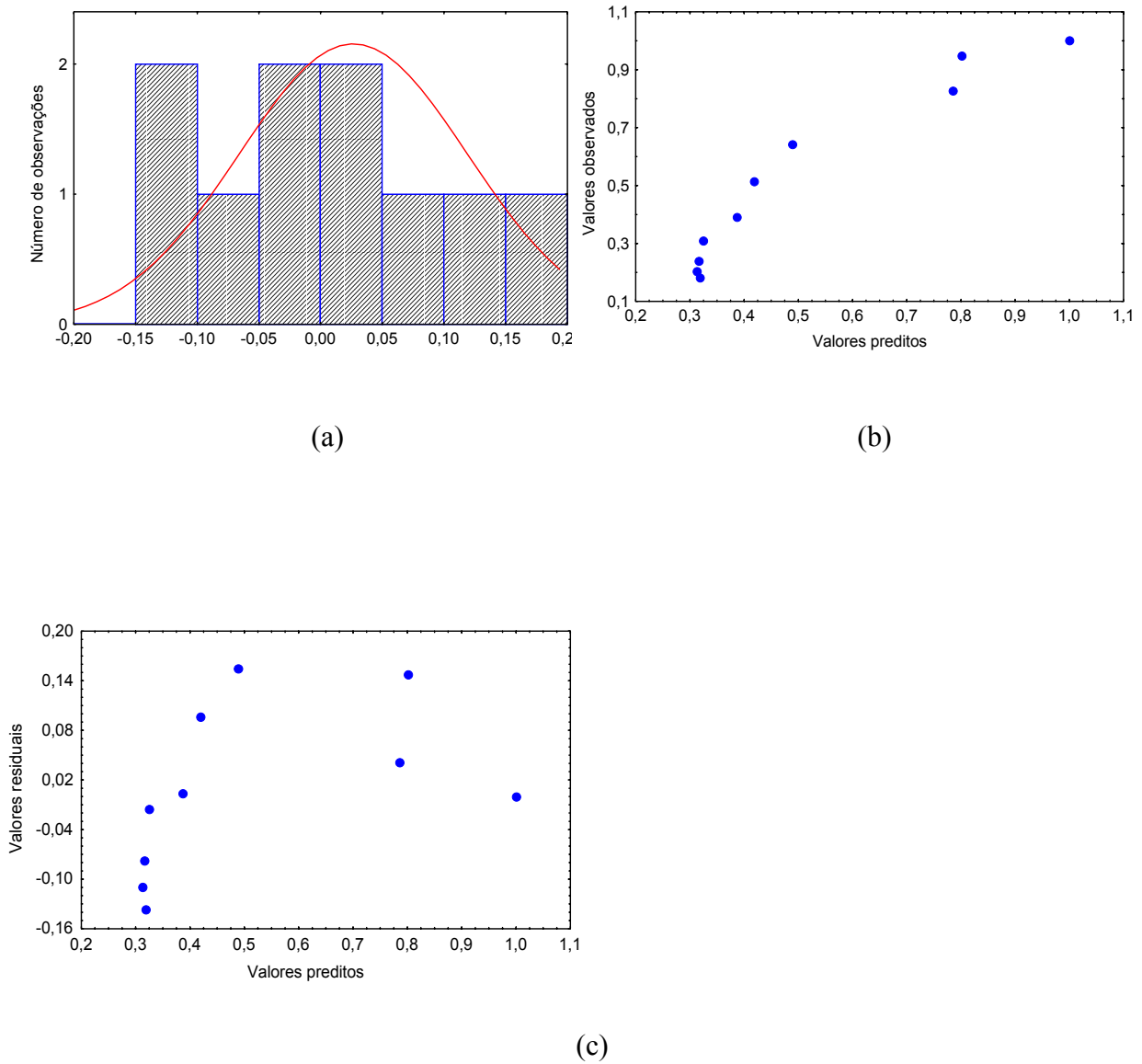


Figura A.14: Distribuição de resíduos (a), valores observados em função dos valores preditos (b) e valores residuais em função dos valores preditos (c), para o ajuste do modelo de Mavroudis et al. (1998b) aos dados de encolhimento durante a secagem de pêra “in natura” no modo combinado microondas-convectivo.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABHAYAWICK, L.; LAGUERRE, J. C. & DUQUENOY, A.. **Runaway Heating of Onions during Microwave Drying**. International Drying Simposium 2000 (In Drying'00), 58, 2000.
- AL-DURY, B. & McINTYRE.. **Comparison of Drying Kinetics of Foods using a Fan Assisted Convection Oven, a Microwave Oven and a Combined Microwave-Convection Oven**. Journal of Food Engineering 15, 139 – 155, 1992.
- ALVES, S. M.. **Estudo da Secagem de Tomate Pêra**. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP, dissertação de mestrado, 2002, 118p..
- AZUARA, E.; CORTÉS, R.; GARCIA, H. S. & BERISTAIN, C. L.. **Kinetic Model for Osmotic Dehydration and It's Relationship with Fick's Second Law**. International Journal of Food Science and Technology 27, 409 – 418, 1992.
- BALABAN, M.. **Effect of Volume Change in Foods on the Temperature and Moisture Content Predictions of Simultaneous Heat and Moisture Transfer Models**. Journal of Food Process Eng. 12(1), 67 – 88, 1989.
- BARAT, J. M.; CHIRALT, A. & FITO, P.. **Structural Change Kinetics in Osmotic Dehydration of Apple Tissue**. In Drying'00, 416, 2000.
- BILBAO, C.; ALBORS, A.; GRAS, M.; ANDRÉS, A. & FITO, P.. **Shrinkage During Apple Tissue Air-Drying: Macro and Microstructural Changes**. . In Drying'00, 330, 2000.

- BISWAL, R. N.; BOZORGMEHR, K.; TOMPKINS, F. D. & LIU, X.. **Osmotic Concentration of Green Beans Prior to Freezing**. Journal of Food Science 56, 1008 –1012, 1991.
- BOBBIO, P. A. & BOBBIO, F. O.. **Química do Processamento de Alimentos**. Livraria Varela, São Paulo, 2ª Edição, 1985.
- BOLIN, H. R.; HUXSOLL, C. C.; JACKSON, R. & NG, K. C.. **Effect of Osmotic Agents and Concentration on Fruit Quality**. Journal of Food Science, 48, 202 – 205, 1983.
- BOLIN, H. R.; HUXSOLL, C. C.; JACKSON, R. & NG, K. C.. **Partial Drying of Cut Pears to Improve Freeze-Thaw Texture**. Journal of Food Science, 58, 357 - 360, 1993.
- BONGIWAR, D. R. & SREENIVASAN, A.. **Studies on Osmotic Dehydration of Banana**. Journal of Food Science and Technology, 14, 104 – 112, 1977.
- BOURAOU, M.; RICHARD, P. & DURANCE, T.. **Microwave and Convective Drying of Potato Slices**. Journal of Food Process Engineering 17, 353 – 363, 1994.
- COLLIGNAN, A. & RAOULT-WACK, A. L.. **Dewatering and Salting of Cod by Immersion in Concentrated Sugar/salt Solution**. Lebensmittel-Wissenschaft-und-Technologie, 27, 259 – 264, 1994.
- CONWAY, J.; CASTAIGNE, F.; PICARD, G & VOVAN, X. **Mass Transfer Considerations in the Osmotic Dehydration of Apples**. Can. Inst. Food Science, 16, 25 – 29, 1983.
- CONTRERAS, J. E.; SMYRL, T.G..**Effect of Osmotic Agents and Concentration on Fruit Quality**. Journal of Food Science 48, 202 – 205, 1983.

- CRANCK, J. **Mathematics of Difusion**. UK: Oxford University Press, London, 56 – 57, 1975, 2<sup>a</sup> edição.
- CRANCK, J. **The Mathematics of Diffusion**. UK: Oxford University Press, London 1983, 2<sup>a</sup> edição.
- Enciclopédia Barsa**. Encyclopaedia Britannica Editores Ltda, v. 10, p. 386, Rio de Janeiro – São Paulo, 1965.
- FAO - Food and Agriculture Organization- site: [www.fao.org](http://www.fao.org).
- FAVETO, G.; CHIRIFE, J. & BARTHOLOMAI, G.B.. **A Study of Water Activity Lowering in Meat During Immersion Cooking in Sodium Chloride Glycerol Solutions. Equilibrium Considerations and diffusional Analysis of Solute Uptake**. Journal of Food Technology, 16, 609 –619, 1981.
- FARKAS, F. D. & LAZAR, M. E.. **Osmotic Dehydration of Apple Pieces: Effect of Temperature and Syrup Concentration on Rates**. Food Technology 23, 688 –690, 1969.
- FELLOWS, P.. **Dehydration**. Food Processing Technology, 281 – 311, Ellis Horwood Ltd., Chichester, England, 1988.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L. & ANDERSEN, L. B.. **Princípios das Operações Unitárias**. Editora Guanabara Dois, 2<sup>a</sup> Edição, 1982.
- FRANCO, G.. **Tabela de Composição Química dos Alimentos**. Editora Atheneu, 9<sup>a</sup> Edição, São Paulo – Rio de Janeiro, 1992.
- GARROTE, R. L.; SILVA, E. R. & BERTONE, R. A.. **Osmotic Concentration at 5°C and 25°C of Pear and Apple Cubes and Strawberry Halves**. Lebensmittel-Wissenschaft und Technology 25, 133 – 138, 1992.

- GEKAS, V.; CRAPISTE, G. & OLIVEIRA, F. A. R.. **Biological Membranes and Mass Transfer in Food Processing**. Submitted to Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1997.
- HENG, K.; GUILBERT, S. & CUQ, J. L.. **Osmotic Dehydration of Papaya: Influence of Process Variables on the Product Quality**. Sciences Des Aliments, s.1., 10(4), 831 –848, 1990.
- ISLAM, M. N. & FLINK, J. M... **Dehydration of Potato II, Osmotic Concentration and its Effects on Air Drying Behavior**. Journal of Food Technology 17, 387 – 403, 1982.
- JAMES, C.; SWAIN, M. V.; JAMES, S. J. & SWAIN, M. J.. **Development of Methodology for Assessing the Heating Performance of Domestic Microwave Ovens**. International Journal of Food Science, 37, 879 – 892, 2002.
- JOLLY, P. G.. **Temperature Controlled Combined Microwave-Convection Drying**. Journal Microwave Power, 65 – 74, 1986.
- KAREL, M.. **Dehydration of Foods**. In: FENNEMA, O. R. (ed). Principles of Food Science, preservation Physical of Foods. New York: Marcel Dekker, 4(10), 309 – 357, 1975.
- KECHAOU, N. & ROQUES, M. A.. **A Variable Diffusivity Model for Drying of Highly Deformable Materials**. In: MUJUNDAR, A. S. (ed.), Drying '89. Elsevier Sci. Publishers B. V., 1989.
- KAYMAK-ETERKIN, F. & SULTANOGLU, M.. **Modelling of Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Apples**. Journal of Food Engineering 46, 243 – 250, 2000.

- LAGUERRE, J. C.; TAUZIN, V. & GRENIER, E.. **Hot Air and Microwave Drying of Onions: A Comparative Study**. . In *Drying'98*, vol. B, 1280 – 1287, 1998.
- LAZARIDES, H. N. & MAVROUDIS, N. E.. **Kinetics of Osmotic Dehydration of a Highly Shrinking Vegetable Tissue in a Salt-Free Medium**. *Journal of Food Engineering* 30, 61 – 74, 1996.
- LEITÃO, A. E. B.; FERREIRA, A.; SAPATA, M. M.; BRONZE, M. R.; CURADO T.; ANDRADA, L.; ANTUNES, C.; FRAGA, A. M. & CANDEIAS, M.. **Influence of “combined” osmotic dehydration processes on quality of apricots**. In *Drying'00*, paper 146, 2000.
- LENART, A. & FLINK, J. M.. **Osmotic Concentration of Potato I, Criteria for the End-Point of the Osmosis Process**. *Journal of Food Technology* 19, 45 – 63, 1984.
- LENART, A. & DABROWSKA, R.. **Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Apples with Pectin Coatings**. In: *Drying'98*, vol A, 903 – 910, 1998.
- 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* 50, 1217 – 1219, 1985.
- LERICI, C. R.; MASTROCOLA, D.; SENSIDONI, A & DALLA ROSA, M.. **Osmotic Concentration in Food Processing**. In: *Preconcentration and Drying of Food Materials*, ed. S. Bruin. Elsevier, Amsterdam, 123 – 129, 1998.
- LEWIS, W. K.. **The Rate of Drying Solids Materials**. *Ind. Eng. Chem.* 13, 427, 1921.

- LOZANO, J. E., ROTSTEIN, E. & URBICAIN, M. J.. **Shrinkage, Porosity and Bulk Density of Foodstuffs at Changing Moisture Content.** Journal of Food Science 48, 1497 – 1502, 1983.
- LYONS, D. W., HATCHER, J. D. & SUNDERLAND, J. E.. **Drying of a Porous Medium with Internal heat Generation.** International Journal Heat and Mass Transfer 15, 897, 1972.
- MAVROUDIS, N. E.; GEKAS, V. & SJÖHOLM, I.. **Osmotic Dehydration of Apples – Effects of Agitation and Raw Material Characteristics.** Journal of Food Engineering 35, 191 – 209, 1998a.
- MAVROUDIS, N. E.; GEKAS, V. & SJÖHOLM, I.. **Osmotic Dehydration of Apples. Shrinkage Phenomena and the Significance of Initial Structure on Mass Transfer Rates.** Journal of Food Engineering, 101 – 123, 1998b.
- MAVROUDIS, N. E.; WADSÖ, L.; GEKAS, V. & SJÖHOLM, I.. **Shrinkage, Microscopic Studies and Kinetics of Apple Fruit Tissue During Osmotic Dehydration.** In Drying'98, vol. A, 844 – 851, 1998.
- METAXAS, A. C. & MEREDITH, R. J.. **Industrial Microwave Heating.** London, Ed. Peter Peregrinus Ltd., 89 – 120, 1983.
- McCARTHY, M. J.; PEREZ, E. & ÖZILGEN, M.. **Model for transient moisture profiles of a drying apple slab using the data obtained with magnetic resonance imaging.** Biotechnology Prog. 7, 540 – 543, 1991.
- McCABE, W. L. & SMITH, J. C.. **Unit Operations of Chemical Engineering.** Editora McGraw-Hill Book Company, 2<sup>a</sup> Edição, 1967.
- McMINN, W. A. M. & MAGEE, T. R. A.. **Physical Characteristics of Dehydrated Potatoes.** Journal of Food Engineering 33, 37 – 48, 1997).

- MONZÓ-CABRERA, J.; DÍAZ-MORCILLO, A.; CATALÁ-CIVERA, J. M. & DE LOS REYES, E.. **Heat and Mass Transfer Characterisation of Microwave Drying of Leather**. In *Drying'00*, 27, 2000.
- Nova Enciclopédia Barsa**. Encyclopaedia Britannica do Brasil Publicações Ltda, v. 11, p. 239, Rio de Janeiro – São Paulo, 1998;
- ÖZILGEN, M.; GÜVENÇ, G.; MAKARACI, M. & TÜMER, I.. **Color Change and Weight Loss of Apple Slices during Drying**. *Z. Lebensm. Unters. Forsch* 201, 40 – 45, 1995.
- PAGE, C.. **Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers**. Unpublished MS Thesis, Purdue University, Lafayette, IN, 1949.
- PANAGIOTOU, N. M.; KARATHANOS, V. T. & MAROULIS, Z.B.. **Modelling of The Osmotic Dehydration of Fruits**. In *Drying'98*, vol. A, 954 – 961, 1998.
- PARK, K. J.. **Estudo Comparativo do Coeficiente de Difusão com e sem Encolhimento durante a Secagem**. FEA/UNICAMP, Campinas, SP (Tese, Livre Docência), 1987.
- PERRY, R. H. & CHILTON, C. H.. **Chemical Engineers' Handbook**. Mc-Graw Hill Company, 5<sup>th</sup> edition, 1953.
- PONTING, J. D.; WATTERS, G. G.; FORREY, R. R.; JACKSON, R. & STANLEY, W. L.. **Osmotic Dehydration of Fruits**. *Food Technology*, s1., 20(10), 1365 – 1368, 1966.
- PRABHANJAN, D. G.; RAMASWAMY, H. S. & RAGHAVAN, G. S. V.. **Microwave-Assisted Convective Air-Drying of Thin Layer Carrots**. *Journal of Food Engineering* 25, 283 – 293, 1995.



- RAGHAVAN, G. S. V. & VENKATACHALAPATY, K.. **Osmotic and Microwave Drying of Strawberries.** An ASAE Meeting Presentation, paper 97 – 6046, 1997.
- RAGHAVAN, G. S. V. & VENKATACHALAPATY, K.. **Osmotic and Microwave Drying of Osmotically Dehydrated Blueberries.** Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, vol. 33 nº 2, 95 – 102, 1998.
- RAOULT, A. L.; LAFONT, F.; RIOS, G. & GUILBERT, S.. **Osmotic Dehydration: Study of Mass Transfer in Terms of Engineering Properties.** In Drying'89, eds A. S. Mujundar & M. Roques. Hemisphere, 487 – 495, 1989.
- RASTOGI, N. K. & RAGHAVARAO, K. S. M. S.. **Effect of Temperature and Concentration on Osmotic Dehydration of Coconut.** Lebensmittel-Wissenschaft und Technology 27, 564 – 567, (1994).
- RATTI, C.. **Shrinkage during Drying of Foodstuffs.** Journal of Food Engineering 23, 91 – 105, 1994.
- SALVATORI, D.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A. & FITO, P.. **Mathematical Model of Mass Transfer During Osmotic Dehydration..** In Drying'98, vol. A, 868 – 876, 1998.
- SANCHEZ, I.; BANGA, J. R. & ALONSO, A. A.; **Temperature Control in Microwave Combination Ovens.** Journal of Food Engineering 46, 21 –29, 2000.
- SILVEIRA, A. M. & RAGHAVAN, G. S. V.. **Temporal Variation of Surface and Internal Temperatures During Microwave Drying of Strawberries.** In: XXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 1999, Campos do Jordão – SP. Anais do XXVII ENEMP, p. 593-598, 1999.

- SILVEIRA, A. M. & RAGHAVAN, G. S. V.. **Drying Strawberries by Combined Process: Osmotic Dehydrated, Convective and Microwave-Convective Drying**. In: XXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2001, São João Del-Rei - MG. CD-Rom
- SJÖHOLM, I & GEKAS, V.. **Apple Shrinkage upon Drying**. Journal of Food Engineering 25, 123 –130, 1995.
- SPIEß, W. E. L. & BESHINILIAN, D.. **Osmotic Treatments in Food Processing – Current State and Future Needs**. In Drying'98, vol. A, 47 – 56, 1998.
- TORREGIANI, D.. **Osmotic Dehydration in Fruit and Vegetable Processing**. Food Research International 26, 59 – 68, 1993.
- TORREZAN, R.. **Preservação de Polpa de Goiaba por Métodos Combinados**. FEA/UNICAMP, Campinas, SP, dissertação de mestrado, 1996.
- ÜRETIR, G.; ÖZILGEM, M. & KATNAS, S.. **Effects of Velocity and Temperature of Air on the Drying rate Constants of Apple Cubes**. Journal of Food Engineering 30, 339 – 350, 1996.
- VACAREZZA, L. M.; LOMBARDI, J. L. & CHIRIFE, J.. **Kinetics of Moisture Moviment during Drying of Sugar Beet Root**. Journal of Food Technology 17, 317 – 327, 1974.
- VAGENAS, G. K. & MARINOS-KOURIS, D.. **Design and Optimization of an Industrial Dryier for Sultana Raisins**. Drying Technology 9, 439 – 461, 1991.

- VAN ARSDEL, W. B.. **Aproximate Diffusion Calculations for the Falling Rate Phase of Drying**. Trans. American Institute Chemical Engineers 43, 13 – 24, 1947.
- VELTMAN, R. H.; KHO, R. M.; van SCHAIK, A. C. R.; SANDERS, M. G. & OOSTERHAVEN, J.. **Ascorbic Acid and Tissue Browning in Pears (*Pyrus Communis* l. cvs Rocha and Conference) under Controlled Atmosphere Conditions**. Portharvest Biology and Technology 19, 129 – 137, 2000.
- VENKATACHALAPATY, K. & RAGHAVAN, G. S. V.. **Microwave Drying of Osmotically Dehydrated Blueberries**. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy 33, No 2, 95 – 102, 1998.
- YAO, Z. & LE MAGUER, M.. **Analysis of Mass Transfer in Osmotic Dehydration Based on Profiles of Concentration, Shrinkage, Transmembrane Flux and Bulk Flow Velocity in the Domain of Time and Space**. Journal of Food Process Engineering 20, 401 – 414, 1997.
- YANG, D. C. & MAGUER, M. L.. **Osmotic Dehydration of Strawberries in a Batch Recirculation System**. Journal of Food Quality 15, 387 – 397, 1992.