

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**ESTUDO DA CINÉTICA DE DESIDRATAÇÃO  
POR IMERSÃO E SECAGEM DE  
TOMATE CEREJA (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*)**

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Patrícia Moreira Azoubel aprovada pela Comissão Julgadora em 29 de julho de 1999.

Por

**PATRICIA MOREIRA AZOUBEL  
(Engenheira Química)**

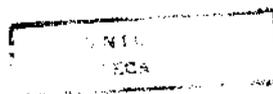
Campinas, 29 de julho de 1999

  
Prof. Dra. Fernanda E. X. Murr  
Presidente da Banca

**Orientadora: Profa. Dra. FERNANDA E. XIDIEH MURR**

**Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da  
Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia de Alimentos**

Campinas, 1999



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

Az68e

Azoubel, Patricia Moreira

Estudo da cinética de desidratação por imersão e secagem  
de tomate cereja (*Lycopersicon esculentun* var. *cerasiforma*) /  
Patricia Moreira Azoubel. – Campinas, SP [s.n.], 1999.

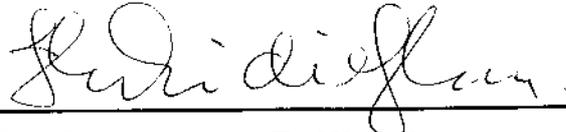
Orientador: Fernanda Elizabeth Xidieh Murr  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de  
Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1.Tomate. 2.Desidratação. 3.Secagem. I.Murr, Fernanda  
Elizabeth Xidieh. II.Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia de Alimentos. III.Título.

UNIDADE	BC
N.º CATEGORIA:	
-----	
C.A.	
IBR	38682
P.º	229/99
C	<input type="checkbox"/>
D	<input type="checkbox"/>
X	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	04/09/99
N.º CFC	

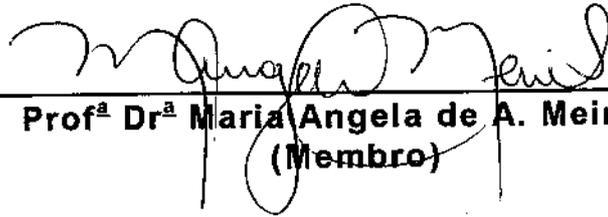
CM-00125680-5

# BANCA EXAMINADORA



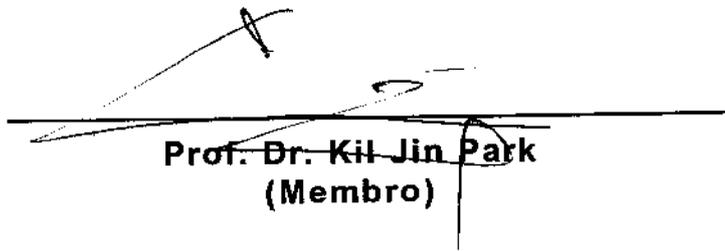
---

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



---

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria Angela de A. Meireles**  
**(Membro)**



---

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

---

**Prof. Dr. Fernando A. Cabral**  
**(Membro)**

Aos meus pais, Mateus e Graça,  
E aos meus irmãos, Mateus Filho e Isabela,  
por todo amor e carinho.

## AGRADECIMENTO

À Deus por tudo.

À Profa. Dra. Fernanda E. X. Murr pela orientação, apoio, incentivo e amizade durante todo o trabalho.

Aos professores Dr. Kil Jin Park, Dra. Maria Angela de A. Meireles e Dr. Fernando A. Cabral pela atenção e sugestões durante a correção da dissertação.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos meus professores de graduação da Universidade Federal de Pernambuco, Dr. Maurício Bezerra Jr., Angeles Peres Palha, Dra. Sônia Albuquerque e Alice Andrade Lima pela amizade e incentivo.

Às amigas de todas as horas, Alcilene, Simone, Nicole, Jesus e Geo.

À Ângela Grandin, Éder Araújo, Suzi Ribeiro e Luciana Schramm pela enorme ajuda e pela amizade.

À Antônio, Raniere, Denise, Isabel, Guilherme e demais colegas do Laboratório de Medidas Físicas pelos bons momentos compartilhados.

Aos meus amigos Guilherme, Rosi, Daniel, Isabel, Daniela, Fernanda, Jean, Fernando, Eliana, Vera, Li, Lia, e ao pessoal de Recife, que mesmo longe, está sempre em meus pensamentos.

À todos que contribuíram, de uma forma ou de outra, com o desenvolvimento deste trabalho.

# SUMÁRIO

<b>NOMENCLATURA</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMO</b>	<b>vi</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>viii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1. OBJETIVO</b>	<b>2</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>4</b>
<b>2.1. ASPECTOS GERAIS</b>	<b>4</b>
2.1.1. Histologia	5
2.1.2. Composição do tomate	5
<b>2.2. DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA</b>	<b>8</b>
2.2.1. Variáveis de processo	10
2.2.1.1. Agentes desidratantes	10
2.2.1.2. Temperatura	12
2.2.1.3. Tempo de imersão	13
2.2.1.4. Agitação	14
<b>2.3. UMIDADE DE EQUILÍBRIO</b>	<b>20</b>
2.3.1. Métodos de medida	23
2.3.2. Modelos matemáticos	24
2.3.3. Calor isostérico de sorção	30
<b>2.4 SECAGEM</b>	<b>31</b>
2.4.1 Período de secagem a taxa constante	34
2.4.2 Período de secagem a taxa decrescente	35
2.4.3 Secadores de leito fixo	39
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>40</b>
<b>3.1. MATÉRIA-PRIMA</b>	<b>40</b>
<b>3.2. METODOLOGIA</b>	<b>40</b>
3.2.1. Caracterização da matéria-prima	42
3.2.1.1. Determinação da acidez	42
3.2.1.2. Determinação do teor de sal (NaCl)	43
3.2.1.3. Determinação do teor de açúcares redutores e totais	44
3.2.1.4. Determinação do pH	44
3.2.1.5. Determinação do teor de sólidos solúveis (Brix)	44
3.2.1.6. Determinação do teor de umidade	44
3.2.1.7. Determinação do teor de ácido ascórbico	45
3.2.1.8. Determinação da densidade	46
<b>3.3. TRATAMENTO DA PELE</b>	<b>47</b>
<b>3.4. DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA</b>	<b>47</b>
<b>3.5. DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO NA DESSORÇÃO DO TOMATE CEREJA</b>	<b>48</b>

<b>3.6. CINÉTICA DE SECAGEM</b>	<b>52</b>
<b>3.7. CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO</b>	<b>54</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>55</b>
<b>4.1. CARACTERIZAÇÃO DO TOMATE CEREJA</b>	<b>55</b>
<b>4.2. DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA</b>	<b>56</b>
<b>4.3. ISOTERMAS DE SORÇÃO</b>	<b>62</b>
<b>4.4. CINÉTICA DE SECAGEM</b>	<b>68</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>90</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>92</b>
<b>7. APÊNDICE</b>	<b>100</b>

## NOMENCLATURA

- $\rho$ : densidade (g/mL)  
 $\Delta H_{BET}$ : entalpia de absorção da monocamada (J/g)  
 $\Delta H_{vap}$ : calor de vaporização da água (J/mol)  
 $A$ : área da superfície exposta ( $m^2$ )  
 $A$  e  $B$ : constantes da equação 2.  
 $a_w$ : atividade de água  
 $b$  e  $p$ : constantes da equação  
bu: base úmida  
bs: base seca  
 $c'$ : constante da equação 2.6  
 $c$  e  $n'$ : constantes da equação 2.12  
 $C_{BET}$ : constante de BET  
 $C_{GAB}$ : constante de GAB  
 $D$ : difusividade aparente ( $m^2/s$ )  
 $D_{ef}$ : difusividade efetiva ( $m^2/s$ )  
 $D_t$ : difusividade aparente no tempo  $t$  ( $m^2/s$ )  
 $D_m$ : difusividade aparente média ( $m^2/s$ )  
 $G$  e  $J$ : constantes do modelo de Page  
 $h$ : coeficiente de transferência de massa ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )  
 $H_L$ : calor de condensação do vapor de água (J/mol)  
 $H_m$ : calor da camada monomolecular de água (J/mol)  
 $H_n$ : calor de sorção da camada multimolecular da água (J/mol)  
 $k$ : coeficiente de ajuste da equação 2.  
 $k'$ : constante da equação 2.  
 $K$ : parâmetro da equação 3.  
 $K_1$ ,  $K_2$ ,  $n_1$  e  $n_2$ : constantes da equação 2.  
 $K_{GAB}$ : constante de GAB  
 $L$ : meia espessura (m)  
 $m$ : massa da amostra (g)  
 $m_s$ : massa do sólido (g)  
 $n$ : número de camadas moleculares  
 $n'$ : número de experimentos  
 $N$ : normalidade do álcali  
 $P$ : pressão do vapor de água no alimento  
 $P_o$ : pressão do vapor de água pura na mesma temperatura  
 $q_{st}$ : excesso de calor de sorção (J/mol)  
 $r$ : raio da esfera (m)

$R$ : constante universal dos gases (J/mol K)  
 $S_1$ : constante da equação 2.4  
 $t$ : tempo (s)  
 $T$ : temperatura (K)  
 $T_a$ : temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $T_{bu}$ : temperatura de bulbo úmido ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $tw$ : peso da amostra no tempo  $t$   
 UR: umidade relativa  
 $V$ : volume aferido (mL)  
 $V_A$ : volume da alíquota (mL)  
 $V_{Bl}$ : volume gasto na titulação do branco (mL)  
 $V_e$ : valor experimental  
 $V_p$ : valor predito pelo modelo  
 $V_t$ : volume titulado na padronização da solução indicadora (mL)  
 $V_s$ : volume do sólido (mL)  
 $V_T$ : volume gasto na titulação da amostra (mL)  
 $X$ : umidade da amostra (g água/ g sólidos)  
 $X_e$ : umidade de equilíbrio (g água/ g sólidos)  
 $X_o$ : umidade inicial da amostra (g água/ g sólidos)  
 $X_m$ : umidade na monocamada monomolecular (g água/ g sólidos)  
 $WL$ : fração de água perdida pelo alimento no tempo  $t$  (g água/ 100g amostra)  
 $WL_{\infty}$ : fração de água perdida pelo alimento no equilíbrio (g água/ 100g amostra)  
 $WL_{\infty}^{\text{mod}}$ : valor no equilíbrio obtido pela equação 2.5  
 $WL_{\infty}^{\text{exp}}$ : valor no equilíbrio obtido experimentalmente  
 $ww_o$ : conteúdo inicial de água (g)  
 $ws_o$ : conteúdo inicial de sólidos (g)  
 $WS$ : peso de sólidos (g)

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1-</b> Composição do tomate.....	6
<b>Tabela 3.1-</b> Valores de umidade relativa relacionado às soluções salinas saturadas nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.....	51
<b>Tabela 4.1-</b> Análise físico-química do tomate cereja <i>in natura</i> .....	55
<b>Tabela 4.2-</b> Valores de $S_1$ e $D_m$ obtidos pelo modelo e o erro médio relativo.....	61
<b>Tabela 4.3-</b> Valores experimentais de umidade de equilíbrio de dessorção de tomate cereja <i>in natura</i> nas temperaturas de 50 e 70°C.....	62
<b>Tabela 4.4-</b> Parâmetros de ajuste da isoterma de dessorção do tomate cereja <i>in natura</i> para a temperatura de 50°C.....	63
<b>Tabela 4.5-</b> Parâmetros de ajuste da isoterma de dessorção do tomate cereja <i>in natura</i> para a temperatura de 70°C.....	64
<b>Tabela 4.6-</b> Valores experimentais de umidade equilíbrio para a dessorção do tomate cereja desidratado na temperatura de 50°C..	66
<b>Tabela 4.7-</b> Parâmetros de ajuste da isoterma de dessorção do tomate cereja desidratado para a temperatura de 50°C.....	67
<b>Tabela 4.8-</b> Valores de umidade relativa do ar de secagem para as diferentes condições de temperatura e de velocidade para o tomate cereja <i>in natura</i> .....	69
<b>Tabela 4.9-</b> Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional para o tomate cereja <i>in natura</i> .....	74
<b>Tabela 4.10-</b> Parâmetros da equação de Page, coeficiente de correlação e erro médio relativo para as temperaturas e velocidades do ar de secagem.....	75
<b>Tabela 4.11-</b> Valores de umidade relativa do ar de secagem para as diferentes condições de temperatura e de velocidade para o tomate cereja desidratado osmoticamente.....	77
<b>Tabela 4.12-</b> Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional para o tomate cereja desidratado osmoticamente.....	82
<b>Tabela 4.13-</b> Parâmetros da equação de Page, coeficiente de correlação e erro médio relativo para as temperaturas e velocidades do ar de secagem.....	82
<b>Tabela 4.14-</b> Valores de difusividade efetiva para o tomate cereja com e sem tratamento osmótico.....	86
<b>Tabela 4.15-</b> Variação do conteúdo de ácido ascórbico do tomate cereja seco.....	88
<b>Tabela 4.16-</b> Variação da densidade do tomate cereja seco.....	89

## RESUMO

Neste trabalho estudou-se a cinética de secagem do tomate cereja (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*) com e sem pré-tratamento osmótico. Analisou-se o efeito do pré-tratamento, da temperatura e da velocidade do ar de secagem.

A desidratação osmótica foi feita com solução de sal e uma mistura de sal e açúcar nas concentrações de 10 e 25%p/p, na temperatura ambiente. Analisou-se o efeito das variáveis concentração e tipo de agente osmótico para escolher as melhores condições do pré-tratamento.

Os dados experimentais das isotermas de dessecção nas temperaturas de 50 e 70°C, com umidade relativa do ar variando de 10,75 a 81,20% para a fruta *in natura* e para a fruta desidratada osmoticamente, na temperatura de 50°C, variando de 11,10 a 81,20%, foram obtidos através de soluções salinas saturadas. As curvas foram ajustadas pelos modelos de BET, GAB, Halsey e Oswin. As equações que representaram melhor ajuste aos dados experimentais foram a de GAB para a fruta *in natura* e a de Halsey para a fruta desidratada.

As corridas experimentais de secagem foram conduzidas em um secador de leito fixo, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidades de 0,75 e 2,60 m/s do ar de secagem, com umidade relativa variando de 28 a 42%. As curvas de secagem foram ajustadas pela equação de difusão de Fick sem considerar o encolhimento e pela equação de Page. Os valores de difusividade efetiva obtidos foram de 3,010 a  $9,442 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$  para o tomate cereja

seco sem pré-tratamento e de  $3,010$  a  $5,473 \times 10^{-10}$   $\text{m}^2/\text{s}$  para o tomate cereja tratado osmoticamente e seco.

A avaliação do produto final foi feita mediante a análise do teor de ácido ascórbico e densidade, em comparação com a fruta fresca.

---

**Palavras-chaves:** tomate cereja, desidratação, secagem, umidade de equilíbrio

## SUMMARY

The drying kinetics of fresh and osmo-dehydrated cherry tomato (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*) was studied in this research. The effect of pre-treatment, temperature and velocity of the air was analysed.

The osmotic dehydration was studied using a sodium chloride and a mixed sodium chloride-sucrose solutions at 10 and 25w/w and at room temperature. The effect of the osmotic agent and solution concentration was studied in order to choose the best conditions of this process before drying.

The experimental values of sorption isotherms at 50 and 70°C for fresh cherry tomato were obtained at relative humidity ranging from 10.75 to 81.20%, and at 50°C for the osmotic dehydrated fruit, with relative humidity ranging from 11.10 to 81.20%, and correlated by BET, GAB, Halsey and Oswin models. GAB model presented the best fitting for fresh fruit and Halsey model presented the best correlation to the dehydrated cherry tomato.

The experimental drying curves were obtained at 50, 60 and 70°C and air velocities of 0.75 and 2.60 m/s in a static dryer. The relative humidity ranged from 28 to 42%. The drying curves were fitted using Fick's second law for the infinite level slab without considering shrinkage and using Page's equation. The best correlation was given by Page's equation. The effective diffusivity ranged from 0.73 to 2.10 m<sup>2</sup>/s for fresh fruit and from 0.81 to 1.60 m<sup>2</sup>/s for osmotic dehydrated tomato.

Evaluation of the final product was done by means of density, ascorbic acid content and rehydration, in comparison to the fresh fruit.

---

**Keyword:** cherry tomato, dehydration, drying, equilibrium moisture

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o descobrimento da América, o tomate tem se difundido pelo mundo, sendo sua origem designada à região Andina, devido à difusão do gênero *Lycopersicon* nesta área. A princípio era uma curiosidade, chegando até a ser considerado venenoso. Somente no início do século XX tornou-se popular e nos anos recentes tem sido um dos mais importantes vegetais mundialmente produzidos (YAMAGUSHI, 1983).

A introdução da cultura do tomate no Brasil é recente e o seu crescimento, tanto em área como em produtividade, foi bastante regular nas décadas de 50 e 60. A partir de 1972 houve um aumento muito grande na produção, principalmente no estado de São Paulo (MINAMI e HAAG, 1980). Cerca de 40% da produção nacional é procedente da área de "tomate industrial" nos estados de São Paulo, Pernambuco e Bahia, sendo o restante destinado ao consumo *in natura* (NAGAI, 1993).

A grande variedade de condições em que se cultiva o tomate tem levado ao desenvolvimento de uma notável diversidade de técnicas e à criação de variedades adaptadas a ela (FOLQUER, 1976). São muitas as espécies cultivadas e consumidas no Brasil (MINAMI e HAAG, 1980), destacando-se o tomate cereja (*L. esculentum* var *cerasiforme*), considerada a forma ancestral do tomate cultivado, baseado no fato do tamanho e da forma dos frutos de *L. cerasiforme* (2 a 2,5 cm de diâmetro) serem intermediários entre a selvagem e o tomate cultivado. Este tipo de tomate é muito utilizado em saladas e como suplemento nas dietas de astronautas em longos períodos de permanência no espaço, devido a sua rápida produção "in vitro" (KAUR-SAWHNEY et al., 1996).

O tomate é muito sensível ao frio e a numerosas doenças, e é tolerante às altas temperaturas (NONNECKE, 1989). Sua nutrição requer cuidados especiais e os frutos são de alta perecibilidade (MINAMI e HAAG, 1980), tornando-se necessário a remoção de água para a sua preservação através de tratamentos como a desidratação osmótica. As vantagens deste método consistem, entre outras, em minimizar os danos causados pelo calor à cor, à textura e ao sabor. Porém, o alimento deve atingir níveis mais baixos de atividade de água para ter uma estabilidade mais prolongada, o que pode ser conseguido através de uma secagem adicional (BORGES e MENEGALLI, 1994). A secagem é uma forma de preservação do alimento, evitando, assim, as perdas e os danos nas colheitas sazonais e permitindo que ele dure por um período maior (HAWLADER et al., 1991), através da remoção de água a um nível em que o crescimento microbiano é minimizado. As operações de secagem são utilizadas em indústrias químicas e alimentícias, e no armazenamento de grãos (FORTES e OKOS, 1980).

### **1.1. OBJETIVO**

Este trabalho teve como objetivo o estudo da secagem do tomate cereja em um secador de leito fixo, levando-se em consideração os dados de umidade de equilíbrio e utilizando-se a desidratação osmótica como pré-tratamento.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar o tomate cereja através das análises da composição centesimal;
- Avaliar a influência do agente osmótico e de sua concentração na desidratação osmótica do tomate cereja à temperatura ambiente;

- Obter as isotermas de dessorção nas temperaturas de 50, 60 e 70°C para o tomate cereja *in natura* e desidratado osmoticamente, além de testar algumas equações de ajuste das curvas de sorção (BET, GAB, Halsey e Oswin).
- Estudar a cinética de secagem do tomate cereja com e sem pré-tratamento osmótico nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidades do ar de secagem de 0,75 e 2,60 m/s;
- Caracterizar o produto seco através da comparação da densidade e do conteúdo de ácido ascórbico.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. ASPECTOS GERAIS

Dentre as olerícolas mais importantes cultivadas e consumidas no mundo, o tomate tem um destaque especial. Esta hortaliça possui alto teor de caroteno, tiamina, niacina e vitamina C (NAGAI, 1993).

O tomateiro pertence à família Solanaceae, gênero *Lycopersicon*. A família Solanaceae é uma das mais importantes do Reino Vegetal para a economia humana por possuir várias espécies comestíveis ou por ser plantas daninhas. Ela compõe-se de cerca de 75 gêneros, com mais de duas mil espécies. Os principais representantes destas famílias são: a batata, a berinjela, o pimentão, a petúnia, o fumo, entre outros, além do tomate (MINAMI e HAAG, 1980).

Os tomates estão disponíveis o ano todo nos trópicos. Em regiões temperadas, sua colheita é sazonal e, por isso, existe um excesso numa estação e uma deficiência em outra. A falta de um processo apropriado resulta em perdas consideráveis nas colheitas em muitos países tropicais, sendo a secagem uma forma de preservar alimentos, permitindo que estes se conservem por um período maior (HAWLADER et al., 1991).

No Brasil os maiores produtores são os estados de São Paulo, Minas Gerais, Pernambuco, Goiás e Bahia, correspondendo a cerca de 75% da produção nacional (ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO BRASIL, 1996).

Todos os povos do mundo consomem o tomate tanto ao natural como industrializado. Ao natural, é consumido com sal ou em saladas, e ainda, em molhos e temperos. Quando industrializado, é empregado como matéria-prima na fabricação de extrato, purê, suco, catchup e fruto depelado (PAGOTTO, 1986). O tomate seco, cuja procura vem crescendo consideravelmente, é utilizado como aperitivo e no preparo de pizzas (IGARASHI, 1998).

### **2.1.1. Histologia**

A Figura 2.1 apresenta a seção transversal de um tomate cereja. O tomate é composto pelo epicarpo, cujas células amarela-esverdeadas permanecem firmemente encaixadas, pelo mesocarpo, que é formado por células claras maiores que as da parede e pelo endocarpo, que possui células estreitas e pequenas. As células do núcleo são pequenas e possuem paredes finas ao seu redor (GOULD, 1974).

### **2.1.2. Composição do tomate**

O tomate contém cerca de 7 a 8,5% de sólidos, onde 1% corresponde a pele e a semente. Esta percentagem de sólidos depende de uma série de fatores, como: a variedade do tomate, a característica do solo, a quantidade de chuva durante o crescimento e a sua colheita (GOULD, 1974). A Tabela 2.1 apresenta a composição média de sólidos do tomate.

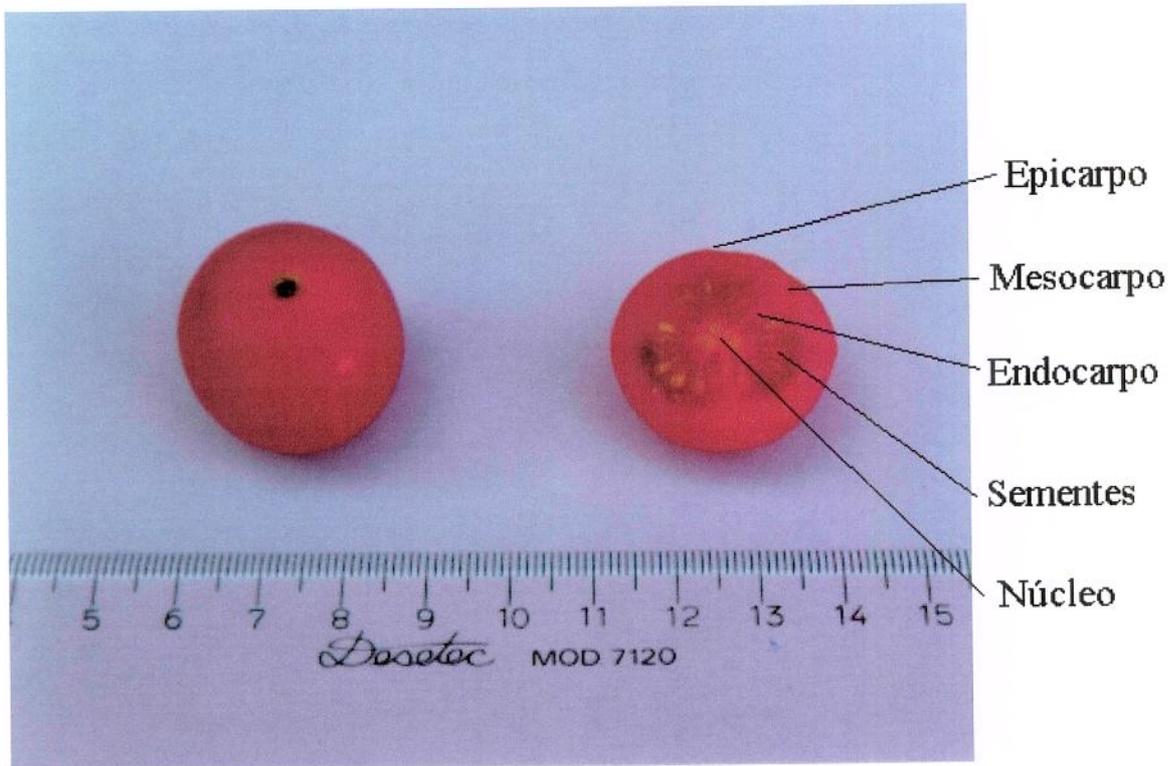


Figura 2.1- Partes do tomate cereja

Tabela 2.1- Composição do tomate

Constituinte	Porcentagem (%)
Sólidos totais	7,8-8,5
Sólidos insolúveis	1,0
Sólidos solúveis	4,0-6,0
Açúcar	2,0-3,0
Ácido	0,3-0,5
Proteína solúvel e aminoácido	0,8-1,2
Minerais	0,3-0,6
Sal (cloreto de sódio)	0,05-0,1

Fonte: GOULD (1974)

A presença de carboidratos nos tomates é predominantemente de açúcares redutores, como frutose e glicose. A quantidade de sacarose é insignificante, não excedendo a 0,1% do peso úmido do tomate (GOULD, 1974). Em relação ao tomate cereja, frutose é o açúcar encontrado em maior quantidade na fruta e sacarose também é encontrada em baixas concentrações (PICHA, 1987).

O ácido cítrico é o ácido presente em maior quantidade no tomate, seguido do ácido málico (GOULD, 1974). O tomate cereja segue o mesmo comportamento segundo PICHA (1987).

A quantidade de minerais encontrada nos tomates varia de 0,3 a 0,6%, onde o cloreto de sódio representa 0,05 a 0,1%. Os minerais exercem um papel secundário na qualidade do produto final (GOULD, 1974).

O tomate é uma excelente fonte de vitaminas A e C, e de ferro. A vitamina C, anti-ascórbica, é necessária para o metabolismo. Ela é cicatrizante e sintetizadora do colágeno. Nos tomates, a atividade de vitamina C é concentrada na forma de reduzida de ácido ascórbico. A concentração de ácido ascórbico em tomates maduros frescos é cerca de 25mg por 100g, ou seja, um tomate pequeno supre cerca de 40% da necessidade diária de vitamina C de um indivíduo adulto e cerca de 66% da necessidade de uma criança (GOULD, 1974).

A vitamina A encontra-se na forma de caroteno, que são responsáveis pela cor do tomate. A retenção dos carotenóides é uma preocupação durante o processamento e estocagem dos alimentos. Nos tomates os principais carotenóides são o licopeno e o beta-caroteno (GOULD, 1974).

## 2.2. DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA

O processo de desidratação osmótica, também conhecido como desidratação-impregnação por imersão (DII) (RAOULT-WACK et al., 1994; COLLIGNAN et al., 1992) baseia-se na imersão de alimentos, inteiro ou fatiado, em soluções hipertônicas (açúcares, cloreto de sódio, sorbitol, glicerol), originando dois fluxos simultâneos opostos: uma saída da água do produto para a solução e uma migração de solutos da solução para o sólido. Um terceiro fluxo, também envolvido consiste na perda de alguns sólidos naturais, como açúcares, minerais, entre outros nutrientes que, embora sejam insignificantes proporcionalmente aos dois fluxos principais, podem ser importantes para as qualidades organolépticas (aroma, cor, textura) e nutricionais (mineral e vitamina) do produto (RAOULT-WACK et al., 1989).

Um importante aspecto deste processo é que ele efetua, simultaneamente, uma redução da quantidade de água presente inicialmente no produto e uma incorporação de outros sólidos aos que já existiam, levando o alimento a uma nova formulação (MIGUEL e KIECKBUSCH, 1995). Estes processos geralmente envolvem uma significativa remoção da água (40-70g de água é perdida por 100g do produto inicial), com uma limitada e controlada incorporação de solutos (5-25g do soluto é acrescentado por 100g do produto inicial). Isto é alcançado principalmente pelo uso de soluções altamente concentradas (50-75g de soluto por 100g de solução) (RAOULT-WACK, 1994).

O processo de desidratação osmótica tem sido usado em frutas, vegetais, carnes, peixes, além de materiais de gel, como o agar (RAOULT-WACK, 1994). Este processo geralmente não fornece produtos estáveis, sendo considerado como um método de pré-

processamento para a secagem, pasteurização, congelamento e liofilização, além de ser um meio conveniente de controlar a perecibilidade de produtos naturais, mesmo quando estes são mantidos na temperatura ambiente (MIGUEL e KIECKBUSCH, 1995). A influência da DII realizada antes da secagem de manga em secador de bandeja foi estudada por BORGES e MENEGALLI (1994), que conseguiram uma redução de umidade de até 72% e um aumento de açúcares totais de até 21%. Este tratamento também provocou uma redução das taxas de secagem. COLLIGNAN et al. (1992) também pesquisaram sobre a secagem com ar quente de frutas frescas e frutas que passaram pela DII. As frutas impregnadas por soluto apresentaram uma melhor qualidade.

A tendência de usar a desidratação osmótica como um tratamento preliminar, geralmente ocorre devido ao desejo de melhorar a qualidade do alimento seco e não a uma massiva retirada de água. Este pré-tratamento tem um efeito protetor na estrutura do material seco. Praticamente a fruta ou verdura que sofre desidratação osmótica-secagem convectiva é caracterizada por ter uma estrutura flexível e macia. Além disso, há uma diminuição do encolhimento na secagem. No caso da preservação da maçã, LENART (1996) conseguiu uma redução do encolhimento de 80 para 60%, dependendo do grau de desidratação osmótica. Estudos realizados por RAOULT-WACK (1994) também apresentam algumas razões do uso da DII como pré-tratamento. Além da melhoria da qualidade, destaca-se a economia de energia. O produto é processado em fase líquida, geralmente fornecendo bons coeficientes de transferência de calor e massa. Além disso, a água é removida do produto sem mudança de fase (BOLIN et al., 1983).

### **2.2.1. Variáveis de processo**

A quantidade e a taxa de água removida dos materiais na DII depende de algumas variáveis e parâmetros de processamento, como: concentração do soluto na solução osmótica, tempo de imersão, temperatura, relação solução/alimento, área da superfície específica do alimento e pressão (LERICI et al., 1985).

#### **2.2.1.1. Agentes desidratantes**

A escolha do tipo e concentração da substância desidratante é uma questão complexa. As mudanças nos valores nutritivos e nas propriedades organolépticas do produto final, com respeito ao custo do processo são os indicadores básicos para a avaliação da utilização de cada substância osmótica (LENART, 1996).

O soluto pode ser empregado como agente de desumidificação e/ou impregnação. A impregnação é favorecida por solutos de baixo peso molecular e a desumidificação por solutos de alto peso molecular. Sacarose ou cloreto de sódio são muito utilizados como agentes desidratantes, mas qualquer soluto ou solvente muito solúvel que seja miscível com água pode ser usado (como dextrose, etanol, entre outros) (RAOULT-WACK, 1994).

A solução osmótica deve possuir uma baixa atividade de água e os solutos devem ser inofensivos a qualidade do produto e ter um bom sabor (LERICI et al., 1985). A sacarose é considerada a melhor substância osmótica, principalmente quando a desidratação é utilizada como pré-tratamento para a secagem. A presença de sacarose na superfície do material é um obstáculo ao contato com o oxigênio, resultando numa redução do escurecimento enzimático.

Entretanto, devido à sua doçura, seu uso na desidratação de vegetais é limitado (LENART, 1996). Estudos feitos por COLLIGNAN et al. (1992) e PONTING et al. (1966) descrevem o uso de soluções de sacarose para a remoção de água em frutas. BORGES e MENEGALLI (1994) também utilizaram como solução desidratante a sacarose a 65% para a manga.

O cloreto de sódio é um excelente agente desidratante para vegetais, porém sua utilização na desidratação de frutas é limitada, devido ao sabor salgado concebido ao alimento (LERICI et al., 1985). BISWAL et al. (1991) utilizaram uma solução aquosa de cloreto de sódio na desidratação de vagens e HAWKES e FLINK (1978) utilizaram este composto na desidratação de maçãs, obtendo uma boa eficácia, porém o sabor salgado foi confirmado por testes sensoriais.

O uso de misturas de solutos pode fornecer algumas vantagens. A combinação sacarose-sal foi utilizada na desidratação e salga de peixes. Em concentrações baixas de sacarose, o ganho de sal aumenta linearmente com a sua concentração, enquanto que em altas concentrações de sacarose, o ganho de sal é independente de sua concentração, permanecendo baixa (RAOULT-WACK, 1994).

Estudos realizados por HAWKES e FLINK (1978) sobre a utilização de misturas binárias de solutos (sal, maltodextrina e lactose) com sacarose, com a finalidade de reduzir os custos e melhorar a eficiência do processo, mostraram que estas combinações podem ser quase tão eficientes quanto a sacarose sozinha na mesma concentração total. MOY et al. (1978) pesquisaram o efeito da combinação entre sacarose e ácidos orgânicos em manga e mamão, mostrando que a acidificação aumentou a taxa de remoção de água

do mamão, o que não ocorreu para a manga. O aumento da concentração de sacarose também permitiu uma maior taxa de remoção de água.

#### **2.2.1.2. Temperatura**

Um importante parâmetro com influência decisiva na desidratação é a temperatura do processo (LENART, 1996). VIDEV et al. (1990) observaram que o aumento da temperatura proporcionou uma maior perda de peso em amostras de maçã. A taxa de desidratação osmótica é controlada pela diferença das pressões parciais, que é diretamente relacionada com as concentrações do xarope e da temperatura. Entretanto, existe uma temperatura limite (50°C) para a desidratação destas frutas para que não haja o escurecimento e perda do sabor.

O efeito da temperatura e da concentração da solução osmótica na desidratação de côco foi estudado por RASTOGI e RAGHAVARAO (1994), que verificaram que a elevação da temperatura (24 a 45°C) e da concentração de sacarose (40 a 70°Brix) aumentou a perda de água para esta fruta. Apesar do maior coeficiente de difusividade efetiva ser obtido a 45°C e 70°Brix, o produto apresentou melhor qualidade sensorial em condições amenas.

VIAL et al. (1991) estudando a desidratação osmótica do kiwi constataram que em altas temperaturas e alta concentração de açúcar, obtém-se alta taxa de transferência de água, mas não se observa influência na taxa de transferência de soluto. O processamento a 50°C ou a temperaturas superiores levou à modificações não vantajosas na cor, e no conteúdo de ácido

ascórbico e de clorofila. A 40°C ou menos, o conteúdo de ácido ascórbico e pigmento foram satisfatórios.

De acordo com YANG e LE MAGUER (1992), a temperatura teve um significativo efeito no fluxo de água e açúcares (glicose, sacarose e frutose) entre o morango e a solução osmótica, observando-se que à alta temperatura (50°C), a perda de água e o ganho de açúcares foi maior que a baixa temperatura (25°C). Porém, como a membrana semi-permeável funciona normalmente em uma certa faixa de temperatura, temperaturas acima de um valor limite podem induzir a destruição da membrana celular, o que ocorreu a 50°C. Além disso, verificou-se que a retenção da cor só foi possível na temperatura mais baixa.

### **2.2.1.3. Tempo de imersão**

VIDEV et al. (1990), desidratando osmoticamente vagens em solução com 17% de cloreto de sódio a (40°C), constataram que a taxa de remoção de água e a incorporação de sal foram máximas no início do processo, decrescendo gradualmente com o tempo de contato. As curvas da cinética indicaram que o conteúdo de umidade destas verduras aproximou-se do equilíbrio mais rapidamente que o conteúdo de sal. Estas curvas também indicaram que a incorporação de sal pode ser controlada pela duração do tempo de contato.

MOY et al. (1978) observaram que a remoção de água na desidratação de manga e de mamão aumentou com a concentração de sacarose e com o tempo de contato, obtendo um tempo ótimo de seis horas a 21°C. Depois deste tempo, a taxa de desidratação decresceu até o estabelecimento do equilíbrio.

De acordo com RAOULT-WACK (1994), a transferência de massa, durante a desidratação por imersão e impregnação de frutas e verduras, ocorre principalmente nas duas primeiras horas. Depois, esta torna-se progressivamente menor, até que o fluxo de água não ocorra mais, enquanto o ganho de sólidos continua invariavelmente. Desta forma, o produto tende a aumentar o peso, tornando-se rico em soluto desidratante.

#### **2.2.1.4. Agitação**

O processo de desidratação osmótica é mais rápido quando conduzido sob agitação, porém deve-se fazer um controle para que não haja danos ao produto, além de se levar em consideração os custos relacionados com equipamento, energia, entre outros (PONTING, 1966).

De acordo com HAWKES e FLINK (1978), a agitação durante a desidratação osmótica de maçãs em soluções com alta concentração de sólidos favorece à diminuição da viscosidade e da resistência à transferência de massa.

ERTEKIN e CAKALUZ (1996) verificaram que as taxas de perda de água e ganho de soluto na desidratação osmótica de ervilhas, em solução de 40% de sacarose e 20% de citrato (proporção amostra/solução de 1:4), aumentaram com a agitação (200 rpm), observando, ainda, que a difusividade aparente para o sistema agitado é quatro vezes maior que o sistema não agitado e que o tempo para atingir o equilíbrio decresceu significativamente. Este fenômeno prova a existência de uma resistência a transferência de massa na solução.

### **2.2.2. O tomate**

A desidratação osmótica consiste em um método que pode ser utilizado para minimizar as modificações negativas que ocorrem aos alimentos frescos durante o processamento (SHI et al., 1997).

Os tomates cortados não são apropriados para a desidratação osmótica devido à uma textura heterogênea e à uma inevitável perda de nutrientes. Entretanto o fator limitante para a remoção de água no tomate inteiro está na sua pele, já que a desidratação osmótica é governada predominantemente pela permeabilidade da mesma. A espessa camada de pele cerosa presente na superfície do tomate é uma barreira grande à transferência de massa, sendo necessário realizar um tratamento para uma melhor permeabilidade desta. SHI et al. (1997) estudaram a influência de diversos tratamentos da pele na desidratação osmótica de tomates na temperatura ambiente, utilizando sacarose como agente desidratante. Foram feitos os seguintes tratamentos: químico (com NaOH, HCl e oleato de etila); físico (furando o tomate com agulhas e com água fervente). Os autores concluíram que os tomates furados apresentaram uma melhor qualidade do produto final, mais próxima da fruta fresca.

### **2.2.3 Cinética da desidratação osmótica**

O processo de desidratação osmótica requer muitas horas para alcançar o equilíbrio. Entretanto, em alguns casos não é possível atingir o equilíbrio devido à instabilidade biológica e/ou física do material (AZUARA et al., 1992).

As equações utilizadas para descrever a cinética do processo osmótico são complexas e geralmente específicas para certas condições de processo e configurações geométricas (placa plana, cilindro, entre outros), além de não predizerem o ponto de equilíbrio. Devido à importância da desidratação osmótica, torna-se necessário desenvolver modelos simples que possam fornecer informações sobre as variáveis que controlam o processo (AZUARA et al., 1992).

Estudos feitos por AZUARA et al. (1992) apresentam uma equação de dois parâmetros a partir do balanço de massa para prever a cinética de desidratação osmótica e o ponto final de equilíbrio. Este modelo foi testado usando os dados da cinética de dez diferentes experimentos, sendo capaz de gerar valores de difusividade através de equações simples obtidas ao relacionar o modelo com a segunda lei de Fick para a difusão unidimensional em estado não estacionário em uma placa plana, utilizando dados dos tempos iniciais da curva de desidratação.

Para o caso do tomate cereja, adaptou-se a equação desenvolvida por AZUARA et al. (1992) para a difusão em uma esfera, em estado não estacionário. Assim como os referidos autores, partiu-se do balanço de massa para o movimento de água no interior do alimento, de acordo com a equação abaixo:

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

Onde:

$WL$  = fração de água perdida pelo alimento no tempo  $t$  (g água/100g amostra);

$WL_{\infty}$  = fração de água perdida pelo alimento no equilíbrio (g água/100g amostra);

$WS$  = fração de água que pode difundir para fora do alimento, mas que permanece dentro do mesmo no tempo  $t$  (g água/100g amostra).

A fração de água perdida pelo alimento no tempo  $t$  foi calculada pela seguinte equação:

$$WL = \frac{ww_o - (tw - w_s)}{ws_o + ww_o} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Onde:

$WL$  = perda de água (g água/100g amostra);

$ww_o$  = conteúdo inicial de água (g);

$ws_o$  = conteúdo inicial de sólidos (g);

$tw$  = peso da amostra no tempo  $t$  (g);

$w_s$  = peso de sólidos (g).

O valor de  $WL_\infty$  é fixo para uma determinada condição de temperatura e concentração, mas os valores de  $WL$  e  $WS$  são função da taxa de perda de água e do tempo. O valor de  $WL$  é diretamente proporcional à taxa de perda de água e do tempo, enquanto  $WS$  decresce com o aumento destes. A relação entre  $WL$  e  $WS$  é representada pelo parâmetro  $K$ , onde , segundo AZUARA et al. (1992):

$$WS = \frac{WL}{K} \quad (2.3)$$

A taxa de perda de água é função do tempo, da temperatura e da concentração inicial da solução osmótica. Como a desidratação osmótica foi realizada em temperatura constante e em uma concentração inicial conhecida, a perda de água é função do tempo.

Baseado neste fato, foi proposta uma função simples para o parâmetro  $K$  em termos do tempo ( $t$ ) e de uma constante ( $S_1$ ) relacionada com a perda de água:

$$K = S_1 t \quad (2.4)$$

Substituindo as equações (2.4) e (2.3) na equação (2.1) e rearranjando os termos, tem-se que:

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

Esta equação associa a perda de água ( $WL$ ) com o tempo ( $t$ ) através de duas constantes:  $S_1$  e  $WL_\infty$ . Quando  $t \rightarrow \infty$  (no equilíbrio), a equação torna-se uma assíntota em um valor correspondente a  $WL_\infty$ . Para o cálculo da perda de água pelo alimento ( $WL$ ) em qualquer tempo  $t$  na equação (2.5) é necessário saber os valores de  $S_1$  e  $WL_\infty$ , que podem ser calculados aplicando regressão linear aos dados obtidos para um tempo curto do experimento (sem atingir o equilíbrio) e a seguinte equação linear:

$$\frac{t}{WL} = \frac{1}{S_1 (WL_\infty)} + \frac{t}{WL_\infty} \quad (2.6)$$

onde  $S_1$  é obtido pela constante de intersecção e  $WL_\infty$  pela inclinação da reta.

Baseado na segunda lei de Fick, CRANK (1975) propôs uma equação de difusão em regime transiente para uma esfera em contato

com uma quantidade infinita de solução. Esta equação, simplificada para tempos curtos, é:

$$\frac{WL}{WL_{\infty}} = 6 \left( \frac{Dt}{\pi r^2} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Onde:

$WL$  = quantidade de água deixando o sólido no tempo  $t$  (g água/100g amostra);

$WL_{\infty}$  = quantidade de água deixando o sólido depois de um tempo infinito (g água/100g amostra);

$D$  = difusividade aparente ( $m^2/s$ );

$r$  = raio da esfera (m).

Esta equação é aplicada apenas no estágio inicial de adsorção, quando assumiu-se que a difusão ocorre em um meio semi-infinito. Neste estágio, ambos a quantidade de água saindo e os sólidos solúveis entrando no alimento são diretamente proporcionais à raiz quadrada do tempo. O valor de  $D$  calculado pela equação (2.7) é uma difusividade média para a faixa de concentrações durante o processo difusional.

Relacionando a equação (2.7) com o modelo proposto pela equação (2.5), obtém-se uma expressão simples através da qual a difusividade pode ser calculada a diferentes tempos:

$$D_t = \frac{\pi t}{36} \left[ \left( \frac{S_1 r}{1 + S_1 t} \right) \cdot \left( \frac{WL_{\infty}^{\text{mod}}}{WL_{\infty}^{\text{exp}}} \right) \right]^2 \quad (2.8)$$

Onde:

$WL_{\infty}^{\text{mod}}$  = valor no equilíbrio obtido pela equação (2.5);

$WL_{\infty}^{\text{exp}}$  = valor no equilíbrio obtido experimentalmente;

$D_t$  = difusividade aparente no tempo  $t$ .

Se  $WL_{\infty}^{exp}$  é desconhecida, assume-se que seu valor seja igual a  $WL_{\infty}^{mod}$  e a equação (2.8) pode ser usada para obter boas estimativas para  $D_t$ , desde que os dados da cinética sejam adequadamente ajustados pela equação (2.5).

A difusividade média ( $D_m$ ) foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^n (D_t)_i}{N} \quad (2.9)$$

Onde:

$(D_t)_i$  = difusividade aparente no tempo  $t$ ;

$N$  = número de dados utilizados.

### 2.3. UMIDADE DE EQUILÍBRIO

A água é o constituinte presente em maior concentração em alimentos frescos. Sua influência na palatibilidade, digestibilidade, estrutura física e manuseio do material alimentício é considerável. Praticamente todos os processos deteriorativos que ocorrem com os alimentos são influenciados pela sua concentração e sua mobilidade. A intensidade e a taxa desta deterioração podem ser caracterizados pela atividade de água (WOLF et al., 1985).

Quando um material biológico é exposto a uma determinada umidade, ele reage no sentido de ajustar sua própria umidade a uma

condição de equilíbrio com o ambiente. Isto ocorre quando a pressão de vapor de água na superfície do material se iguala à pressão de vapor de água do ar que o envolve (TREYBAL, 1963).

O nível de umidade que o produto alcança, quando deixado em contato com uma determinada condição atmosférica por um longo tempo, é definido como umidade de equilíbrio (GUSTAFSON e HALL, 1974).

No equilíbrio, a atividade de água ( $a_w$ ) está relacionada com a umidade relativa (UR) do ambiente através da seguinte equação (IGLESIAS e CHIRIFE, 1982):

$$a_w = \frac{P}{P_0} = \frac{\%UR}{100} \quad (2.10)$$

Onde:

$P$  = pressão do vapor de água no alimento;

$P_0$  = pressão do vapor de água pura na mesma temperatura.

O estudo da atividade de água pode ser feito através de isotermas, que consistem em curvas que descrevem a relação entre o conteúdo de umidade dos alimentos e a atividade de água ( $a_w$ ) para temperatura e pressão constantes (IGLESIAS e CHIRIFE, 1982).

Uma isoterma de sorção pode ser obtida em duas direções: adsorção e dessorção. A primeira é feita quando um material completamente seco é colocado em várias atmosferas, aumentando a umidade relativa e medindo o aumento de peso devido ao ganho de água. Na segunda, o material inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições ambientais utilizadas na adsorção, sendo medida a perda de peso, devido à saída de água (LABUZA, 1968). A isoterma de dessorção possui valores de umidade de equilíbrio superiores ao

da isoterma de adsorção a uma dada atividade de água (YOUNG e NELSON, 1976). A defasagem entre estas duas curvas é denominada histerese (YOUNG, 1974).

Isotermas de sorção são importantes na análise e montagem de vários processos alimentares, tais como preservação, secagem, embalagem e mistura. As isotermas de sorção podem ser usadas para prever as mudanças na estabilidade do alimento e para selecionar o material de embalagem e ingredientes apropriados (ZHANG et al., 1996).

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

LABUZA (1968) relata que a isoterma de sorção dos alimentos pode ser dividida em três regiões, em função do estado físico da água presente no alimento. A primeira região, para valores de atividade de água entre 0 e 0,35, representa a adsorção de um filme de água monomolecular. A Segunda região representa a adsorção das camadas adicionais da água acima da monocamada para níveis de atividade de água entre 0,35 e 0,60. A terceira região, que abrange valores de atividade de água acima de 0,60, representa a

água condensada nos poros do material seguida pela dissolução do material solúvel presente.

Não são encontradas na literatura isotermas de sorção do tomate cereja, sendo necessário sua determinação, pois quando se trabalha com secagem, a umidade de equilíbrio representa o valor limite para uma dada condição de temperatura e umidade relativa.

### **2.3.1. Métodos de medida**

Os métodos experimentais para a obtenção das curvas de sorção foram classificados por GAL (1975):

a) Métodos gravimétricos: consiste na determinação da mudança de peso da amostra em equilíbrio com diferentes pressões de vapor.

a.1) Métodos com registro contínuo de mudança de peso: a balança é parte integrante do sistema e as mudanças de peso são determinadas sem interrupção do processo de sorção.

a.2) Método dinâmico: a circulação de ar transfere o vapor de água para amostra (adsorção) e da amostra para o ar (dessorção).

a.3) Método com registro descontínuo de mudança de peso: a balança não é parte integrante do sistema e as amostras, condicionadas em diferentes umidade relativas, têm sua umidade determinada por métodos apropriados em operações separadas. Através destes métodos é possível o exame visual das amostras e a observação de mudanças físicas, como o encolhimento, o endurecimento, entre outros.

a.3.1) Sistemas estáticos: as amostras são colocadas em dessecadores contendo soluções salinas saturadas ou solução de

ácidos até atingir o equilíbrio, que é detectado pelo peso constante da amostra de umidade relativa conhecida.

a.3.2) Sistemas dinâmicos: possui o mesmo princípio do sistema estático, com a adição de um ventilador ao conjunto, para permitir a circulação do ar entre as amostras, diminuindo o tempo para atingir o equilíbrio.

b) Métodos manométrico e higrométrico: utilizados em processo de controle de qualidade para a determinação rápida da atividade de água.

c) Métodos especiais: são métodos não convencionais que utilizam uma membrana de célula de pressão para determinar a atividade de água em materiais com alto conteúdo de umidade.

O conteúdo de umidade de equilíbrio para o tomate, a batata, a cenoura, o pimentão e a cebola foi determinado por KIRANOUDIS et al. (1993) com sucesso através do método gravimétrico. TEIXEIRA NETO e QUAST (1977) usaram o método estático na determinação das isotermas de adsorção de quarenta alimentos.

O método higrométrico foi utilizado para determinação de isotermas de sorção de manga, goiaba e abacaxi, obtendo bons resultados a 25° e 50°C (HUBINGER et al., 1992).

### **2.3.2. Modelos matemáticos**

Existem inúmeras equações na literatura que são utilizadas para representar as curvas experimentais de sorção de alimentos,

sendo algumas apresentadas abaixo (CHIRIFE e IGLESIAS, 1978; VALENTINI et al., 1997; RIZVI, 1986):

**1. Equação de BET (BRUNAUER, EMMET e TELLER, 1938):** é provavelmente a equação mais utilizada, sendo baseada no conceito de LANGMUIR (1918) de adsorção de água na monocamada molecular. A relação entre atividade de água e umidade de equilíbrio é descrita do seguinte modo:

$$X = \frac{X_m C_{BET} a_w [1 - (n+1)(a_w)^n + n(a_w)^{n+1}]}{(1-a_w) [1 - (1-C_{BET})a_w - C_{BET}(a_w)^{n+1}]} \quad (2.11)$$

Onde:

$n$  = número de camadas moleculares;

$X$  = umidade expressa em base seca (g água/g sólidos secos);

$X_m$  = conteúdo de umidade na monocamada molecular (g água/g sólidos secos);

$C_{BET}$  = constante de BET, que está relacionada ao calor de sorção da camada molecular, sendo:

$$C_{BET} = K' \exp\left(\frac{\Delta H_{BET}}{RT}\right) \quad (2.12)$$

Onde:

$\Delta H_{BET}$  = entalpia de absorção da monocamada;

$K'$  = constante da equação;

$R$  = constante universal dos gases (J/mol K);

$T$  = temperatura (K).

**2. Equação de BET linearizada:** constitui um caso especial da equação de BET, quando  $n$  tende a um valor infinito. Esse modelo restringe o ajuste a dois parâmetros,  $X_m$  e  $C_{BET}$ , e tem apresentado um ajuste satisfatório para atividade de água entre 0,1 e 0,5 (LABUZA, 1968). Esta equação é expressa da seguinte forma:

$$X = \frac{X_m C_{BET} a_w}{(1 - a_w) [1 - (C_{BET} - 1) a_w]} \quad (2.13)$$

Onde:

$X$  = umidade expressa em base seca (g água/g sólidos secos);

$X_m$  = conteúdo de umidade na monocamada molecular (g água/g sólidos secos);

$C_{BET}$  = constante de BET, relacionada ao calor de sorção da camada molecular.

**3. Equação de GAB (Guggenheim-Anderson-De Boer):** constitui em uma extensão do modelo BET, sendo introduzida por van der BERG (1984) para padronizar a descrição e comparação de isotermas em material biológico. A equação de GAB é uma equação de três parâmetros:

$$X = \frac{X_m C_{GAB} K_{GAB} a_w}{[(1 - K_{GAB} a_w)(1 - K_{GAB} a_w + C_{GAB} K_{GAB} a_w)]} \quad (2.14)$$

Onde  $C_{GAB}$  e  $K_{GAB}$  são constantes de adsorção relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes, em um dado sítio de sorção:

$$C_{GAB} = c' \cdot \exp\left[\frac{(H_m - H_n)}{RT}\right] \quad (2.15)$$

Onde:

$H_m$  = calor da camada monomolecular da água (J/mol);

$H_n$  = calor de sorção da camada multimolecular da água (J/mol);

$c'$  = constante da equação;

$R$  = constante universal dos gases (J/mol K);

$T$  = temperatura (K).

$$K_{GAB} = k \cdot \exp\left[\frac{(H_L - H_n)}{RT}\right] \quad (2.16)$$

Onde:

$H_L$  = calor de condensação do vapor de água (J/mol);

$k$  = coeficiente de ajuste.

As vantagens da utilização do modelo GAB são a descrição da sorção de alimentos em uma faixa de atividade de água de 0,1 a 0,9; é uma equação matemática de três parâmetros simples; é capaz de descrever algum efeito da temperatura no processo de sorção; e de possuir base teórica fundamentada.

**4. Equação de Halsey (1948):** esta equação considera a condensação da multicamada a uma distância relativamente grande da superfície:

$$a_w = \exp \left[ \frac{-A}{X_e^B} \right] \quad (2.17)$$

Onde:

$X_e$  = umidade de equilíbrio expressa em base seca (g água/g sólidos secos);

$A$  e  $B$  = constantes do modelo.

**5. Equação de Oswin:** é a expansão de uma série matemática para curvas sigmoidais, que é escrita como:

$$X = A \left( \frac{a_w}{1-a_w} \right)^B \quad (2.18)$$

Onde:

$A$  e  $B$  = constantes do modelo.

**6. Equação de Peleg:** representa um modelo com quatro parâmetros para ajustar os dados de isotermas de sorção:

$$X = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2} \quad (2.19)$$

Onde:

$K_1$ ,  $K_2$ ,  $n_1$  e  $n_2$  = constantes do modelo.

A restrição para esta equação é  $n_1 < 1$  e  $n_2 > 1$ .

**7. Equação de Iglesias e Chirife:** a análise do fenômeno de sorção em alimentos com alto conteúdo de açúcar, como a maioria das frutas, é complicado devido à dissolução de açúcares e por esta razão a predição teórica da isoterma é difícil. Estes autores propuseram uma equação empírica que descrevesse o comportamento de muitas frutas e outros produtos com alto teor de açúcar:

$$\ln\left(X + \sqrt{(X^2 + X_{0,5})}\right) = ba_w + p \quad (2.20)$$

Onde:

$X_{0,5}$  = umidade para  $a_w=0,5$  (g água/g sólidos secos);

$b$  e  $p$  = constantes do modelo.

Esta equação descreveu adequadamente o conteúdo de umidade de equilíbrio de nove alimentos diferentes que possuíam alto teor de açúcar, entre estes, banana, "grapefruit", pêssego, pêra, abacaxi e morango.

**8. Equação de Henderson (1952):** esta é uma das equações mais usadas e pode ser escrita como:

$$1 - a_w = \exp(-c T X^{n'}) \quad (2.21)$$

Onde:

$c$  e  $n'$  = parâmetros que dependem da temperatura e natureza do produto.

KIRANOUDIS et al. (1993) fizeram um ajuste de isotermas de dessorção de batata, cenoura, tomate, pimentão e cebola, com o modelo de GAB, usando regressão não linear. Este modelo foi considerado satisfatório para a predição dos dados experimentais obtidos.

Isotermas de dessorção para batata, cenoura, tomate e pimentão também foram estudados por ZHANG et al. (1996). Além do modelo GAB, os modelos de Halsey e Iglesias e Chirife foram utilizados. Os modelos de GAB e Iglesias e Chirife descreveram satisfatoriamente os dados obtidos experimentalmente.

Dados de isotermas de frutas, vegetais, produtos cárneos, condimentos, leite, café, entre outros, foram analisados por LOMAURO et al. (1985), utilizando três equações de dois parâmetros e uma equação de três parâmetros. A equação de três parâmetros (equação de GAB) apresentou melhores ajustes aos dados de isotermas de que as equações de dois parâmetros (Halsey, Oswin e Iglesias e Chirife).

### **2.3.3. Calor isostérico de sorção**

O calor isostérico de sorção ( $Q_{st}$ ) é definido como a diferença entre o calor total de sorção da água do alimento e o calor de vaporização da água (ZHANG et al., 1996).

O valor do calor isostérico de sorção é frequentemente calculado através da equação de Clausius-Clayperon, que relaciona a atividade de água e a temperatura (IGLESIAS e CHIRIFE, 1982). LABUZA et al. (1985) descreveram a seguinte equação:

$$\ln \frac{a_{w_2}}{a_{w_1}} = \frac{q_{st}}{R} \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \quad (2.22)$$

Onde:

$a_{w_2}$  e  $a_{w_1}$  = atividade de água nas temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  (K),  
respectivamente;

$R$  = constante dos gases [8,314 J/mol.K];

$q_{st}$  = excesso de calor de sorção (J/mol).

Onde:

$$q_{st} = Q_s - \Delta H_{vap} \quad (2.23)$$

Onde:

$\Delta H_{vap}$  = calor de vaporização da água pura (J/mol).

O calor isostérico de sorção é usado para estimar a energia necessária ao processo de desidratação (KIRANOUDIS et al., 1993). Seu conhecimento fornece uma indicação da energia de ligação das moléculas de água, tendo importância no balanço energético das operações de secagem (IGLESIAS e CHIRIFE, 1982).

## 2.4 SECAGEM

A desidratação é provavelmente o método mais antigo de preservação de alimentos. A secagem de frutas ao sol e a defumação de peixes e carnes são processos bastante conhecidos originados na antiguidade (COHEN e YANG, 1995).

As operações de desidratação ou secagem são importantes nas indústrias de processos químicos e alimentícios. O objetivo básico de secar produtos alimentícios é a remoção da água dos sólidos para um nível em que o crescimento dos microrganismos seja minimizado. A grande variedade de alimentos desidratados (misturas, sopas, frutas, verduras, entre outros) e a crescente preocupação em reunir as especificações de qualidade e de energia, enfatiza a necessidade de um completo entendimento da operação de secagem (VAGENAS et al., 1990).

A secagem consiste em um processo simultâneo de transferência de calor e de massa. A transferência de calor ocorre durante a evaporação da água removida da amostra sólida secando, enquanto a transferência de massa acontece durante a remoção da água da superfície desta amostra por meio de um fluido secante externo, que geralmente é o ar (DINCER e DOST, 1995).

Os mecanismos de transporte de água em sólidos foram citados por FORTES e OKOS (1980):

- Difusão líquida devido ao gradiente de concentração;
- Difusão do vapor devido ao gradiente de pressão parcial (causado pelos gradientes de temperatura);
- Movimento do líquido devido às forças capilares;
- Fluxo de líquido ou vapor devido à diferença na pressão total, causada pela pressão externa, encolhimento, temperaturas altas e capilaridade;
- Escoamento por efusão que existe quando o caminho livre médio das moléculas de vapor for compatível com o diâmetro dos poros;
- Movimento do líquido devido à força gravitacional.

O processo de secagem pode ser dividido em três períodos, de acordo com a evolução das transferências de calor e de massa durante sua operação:

Período 0 (período de indução ou período até entrar em regime operacional). Inicialmente, o produto está mais frio que o ar de secagem e a pressão parcial de vapor de água na superfície do produto é débil. Consequentemente, a transferência de massa e a taxa de secagem também são. À medida que o ar entra em contato com o produto, a temperatura deste aumenta, ocorrendo uma elevação na pressão de vapor de água e na velocidade de secagem. Este fenômeno continua até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa. Se a temperatura do ar for inferior à do produto, esta última diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio.

Período 1 (período de velocidade constante de secagem). Durante este período, como no anterior, a quantidade de água disponível dentro do produto é grande. A água evapora como água livre. A pressão de vapor da água na superfície é igual à pressão de vapor da água pura na temperatura do produto (temperatura de bulbo úmido). A transferência de calor e massa se compensam exatamente. Consequentemente, a velocidade de secagem é constante. Este período continua até que a migração de água do interior à superfície seja suficiente para acompanhar a evaporação da água superficial.

Período 2 (período de velocidade decrescente de secagem). Durante este período, a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa e, como consequência, a temperatura do material aumenta, tendendo assintoticamente à temperatura do ar de secagem. O fator limitante neste período é a migração interna de

água. A secagem continua até que o produto atinja a umidade de equilíbrio.

#### 2.4.1 Período de secagem a taxa constante

Durante o período de taxa constante, a secagem é controlada somente pelas condições ambientais (JASON, 1958). De acordo com SHERWOOD (1929), a secagem é similar à evaporação de água de uma superfície livre.

A velocidade de secagem durante o período de secagem a taxa constante depende dos coeficientes de transferência de calor e massa, da área exposta ao meio de secagem, da geometria da amostra, e da diferença de temperatura e umidade entre o vapor e a superfície úmida do sólido. O mecanismo interno de migração de água não afeta a velocidade de secagem deste período (FORTES e OKOS, 1980).

A taxa de secagem pode ser calculada através da equação de transferência de massa ou da equação de transferência de calor. Como a pressão de vapor de água na superfície do material é constante, a temperatura do material é igual a temperatura de bulbo úmido. Desprezando-se a transferência de calor por condução e radiação, a taxa de secagem é dada por:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{h A (T_a - T_{bu})}{H_{vap}} \quad (2.24)$$

Onde:

$\frac{dX}{dt}$  = taxa de secagem;

$h$  = coeficiente de transferência de massa ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ );

$A$  = área da superfície exposta ( $m^2$ );

$T_a$  = temperatura ambiente ( $^\circ C$ );

$T_{bu}$  = temperatura de bulbo úmido ( $^\circ C$ );

$H_{vap}$  = calor de vaporização ( $J/mol$ ).

Pesquisas realizadas por CHIRIFE (1983) constataram que o fim do período de taxa constante, onde o teor de umidade é definido como teor de umidade crítico, corresponde ao tempo onde a migração de água para a superfície não suporta a taxa de evaporação correspondente à transferência de massa da água livre na superfície.

Estudos feitos por HAWLADER et al. (1991) sobre a influência da temperatura ( $40-80 \text{ }^\circ C$ ) e da velocidade do ar de secagem ( $0,4-1,8 \text{ m/s}$ ) na secagem do tomate demonstraram que o período de taxa constante não foi observado em nenhuma das amostras.

#### **2.4.2 Período de secagem a taxa decrescente**

O período de taxa decrescente tem seu início quando termina o período de taxa constante, no teor de umidade crítica. Se o teor de umidade inicial for abaixo da umidade crítica, todo processo de secagem ocorre no período de taxa decrescente (PERRY, 1984).

Este período pode ser dividido em duas fases distintas: uma na qual o coeficiente de difusão é constante e outra com um coeficiente de difusão consideravelmente reduzido (HOLDSWORTH, 1971).

Conforme CHIRIFE (1983), os principais mecanismos de transporte durante a primeira fase são: difusão líquida, escoamento capilar e difusão de vapor. Estes mecanismos podem ocorrer simultaneamente.

Segundo KING (1968), na segunda fase do período decrescente, onde a umidade de equilíbrio está abaixo da umidade de saturação, a difusão da fase vapor é o mecanismo predominante de transporte de umidade.

Um dos primeiros a interpretar a secagem como fenômeno de difusão interna de água líquida foi LEWIS (1921). O período de taxa decrescente é controlado pelo mecanismo de difusão líquida e descrito pela 2ª Lei de Fick.

A solução analítica para a 2ª Lei de Fick para diversas condições iniciais e diferentes formas geométricas foram obtidas e descritas por CRANK (1975). Para coordenadas retangulares, a equação de difusão é expressa como:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{ef} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{ef} \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \quad (2.25)$$

Assumindo a forma geométrica de uma placa plana infinita, onde a transferência de umidade durante a secagem é predominantemente unidirecional, a equação acima se reduz a:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{ef} \frac{\partial X}{\partial y} \right) \quad (2.26)$$

Quando o coeficiente de difusão  $D_{ef}$  é considerado constante, a umidade inicial  $X_o$  é distribuído uniformemente no interior do produto desprezando as resistências externas à transferência de massa. A umidade na superfície da amostra permanece constante durante o processo e seu valor corresponde ao termo de umidade de equilíbrio  $X_e$  do produto. Considerando o encolhimento do material durante a secagem desprezíveis, a equação (2.17) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (2.27)$$

Com as seguintes condições de contorno:

$$X = X_o \quad \text{em } t=0 \quad 0 < y < L$$

$$X = X_e \quad \text{em } y=L \quad t > 0$$

$$\frac{\partial X}{\partial y} = 0 \quad \text{em } y=0 \quad t > 0$$

A solução analítica da Lei de Fick para uma placa plana infinita dada por CRANK (1975) é:

$$\frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp \left[ -(2i+1)^2 \pi^2 D_{ef} \frac{t}{4L^2} \right] \quad (2.28)$$

Onde:

$X$  = umidade (g água/g secos sólidos);

$X_e$  = umidade de equilíbrio (g água/g sólidos secos);

$X_o$  = umidade inicial da amostra (g água/g sólidos secos);

$\frac{X - X_e}{X_i - X_e}$  = adimensional de umidade;

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

$t$  = tempo (s);

$L$  = meia espessura (m).

Para as condições em que  $L$  é pequeno e  $t$  é grande, os termos da equação (2.28) correspondentes a  $i > 1$  são negligenciáveis. Sob estas condições, tem-se que:

$$\ln\left(\frac{X - X_e}{X_o - X_e}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{ef} t}{L^2} \quad (2.29)$$

onde a difusividade efetiva pode ser obtida através da inclinação da reta do gráfico de  $\ln\left(\frac{X - X_e}{X_o - X_e}\right)$  versus  $t$ .

Um outro modelo utilizado para descrever a secagem consiste na equação de Page. Esta equação foi utilizada por CORNEJO et al. (1998) para representar o comportamento de secagem da soja, obtendo-se o melhor ajuste aos dados experimentais. KALWAR et al. (1991), trabalhando com grãos de milho, também observou que esta equação foi apropriada para descrever a cinética de secagem deste produto. A equação de Page é representada por:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \exp(-G t^J) \quad (2.30)$$

Onde:

$G$  e  $J$ : constantes de Page

### 2.4.3 Secadores de leito fixo

Devido à maioria dos produtos da indústria atual serem submetidos à secagem em algum estágio do seu processamento, existem uma grande variedade de secadores.

Os secadores de leito fixo caracterizam-se por possuir baixo custo e uma fácil operação, podendo ser utilizados para secagem de diversos produtos alimentícios. O produto permanece estático durante a secagem e o ar aquecido é forçado a passar pela massa do produto. Possuem uma câmara de secagem, no interior da qual é insuflado ar quente por um ventilador. O ar de secagem movimentase no sentido ascendente passando pela superfície da massa do produto. A troca de umidade que acontece entre o material e o ar ocorre numa região denominada zona de secagem, dando origem a um gradiente de umidade, que não se pode ser elevado por comprometer a qualidade do produto final. (NUCCI e MURR, 1995).

Segundo estudos realizados por BROOKER et al. (1974), o manuseio deste tipo de secador é simplificado, além de apresentar alta eficiência e a transferência de umidade do produto para o ar ocorrer numa faixa finita. No início da secagem, esta faixa encontra-se no fundo do leito, movendo-se através da massa em sentido ascendente de modo que no final o produto encontre-se seco (BROOKER et al., 1974).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Medidas Físicas da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

#### **3.1. MATÉRIA-PRIMA**

Foram utilizados tomates cereja (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*) comprados na CEASA - Campinas. A origem das frutas foi de São Miguel do Arcanjo, São Paulo, e as safras utilizadas nesta pesquisa foram as de 98 e 99.

A escolha da fruta foi baseada no seu tamanho e no seu estado de maturação, sendo escolhidos aquelas que possuíam coloração vermelha uniforme e textura firme. Os tomates cereja que apresentaram doenças e manchas foram descartados.

#### **3.2. METODOLOGIA**

A composição e as características da matéria-prima foram determinadas através de uma série de análises físicas e físico-químicas descritas a seguir (RANGANNA, 1977), feitas para cada novo lote comprado do produto.

As etapas que seguiram à caracterização da matéria-prima consistiram no tratamento da pele do tomate cereja; na desidratação osmótica; nos estudos das isotermas de sorção; nos ajustes dos

modelos matemáticos aos dados experimentais; no estudo da cinética de secagem; e na caracterização do produto final.

A Figura 3.1 apresenta, de maneira geral, as diferentes etapas deste trabalho para obtenção de tomate cereja seco.

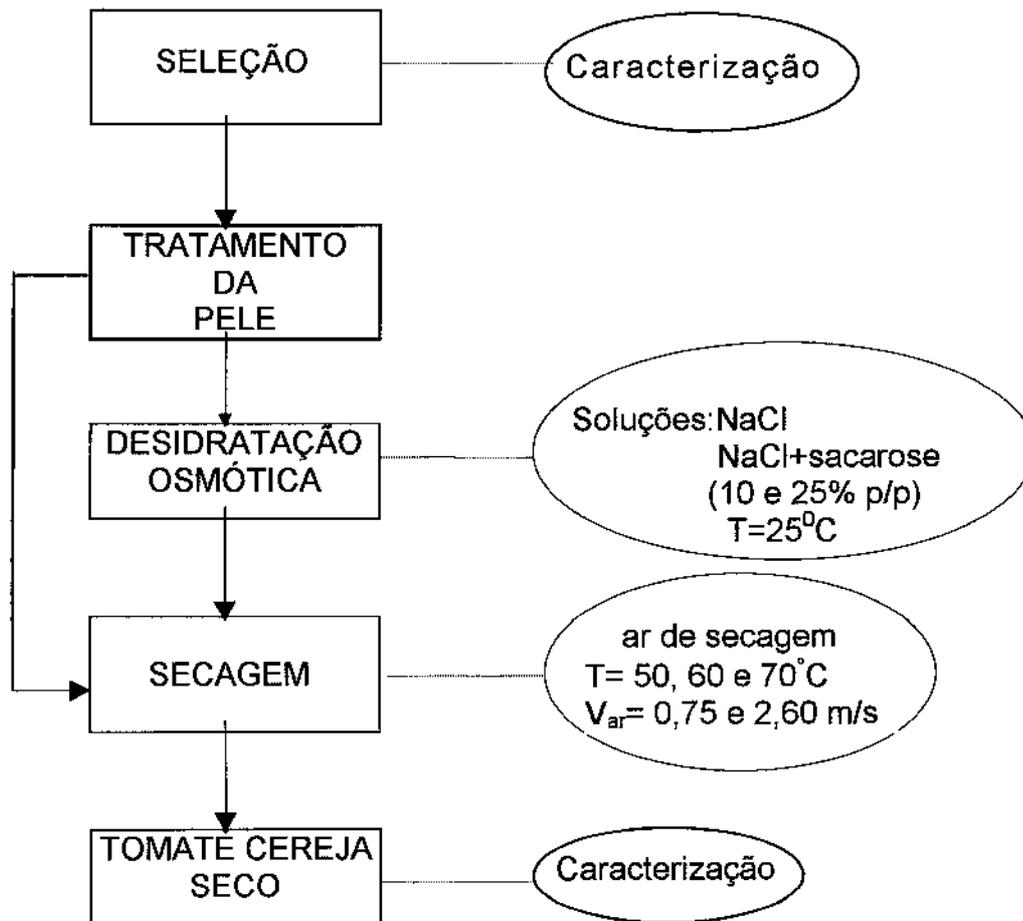


Figura 3.1- Fluxograma para obtenção de tomate cereja seco

### 3.2.1. Caracterização da matéria-prima

#### 3.2.1.1. Determinação da acidez

A determinação da acidez foi baseada no Método de Mohr (RANGANNA, 1977), através da titulação direta, sendo expressa em percentagem de ácido cítrico.

Pesou-se cerca de 15g do purê da polpa de tomate cereja, misturou-se com 200mL de água destilada recém fervida, esfriou-se e transferiu-se para um balão volumétrico de 250mL, completando-se o volume com água. O líquido foi filtrado e tomou-se 100 mL do filtrado como alíquota. Titulou-se com NaOH (marca Dinâmica, pureza 97%) 0,1N, utilizando-se fenolftaleína (marca Synth, P.A.) como indicador. A titulação foi feita em triplicata.

A quantidade de ácido cítrico presente foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\%Acidez = \frac{V_T \cdot N \cdot 64 \cdot V \cdot 100}{V_A \cdot m \cdot 1000} \quad (3.1)$$

Onde:

$V_T$ : volume gasto na titulação da amostra (mL);

$N$ : normalidade do álcali (g/L);

$V$ : volume aferido (mL);

$V_A$ : volume da alíquota (mL);

$m$ : massa da amostra (g).

### 3.2.1.2. Determinação do teor de sal (NaCl)

O conteúdo de sal foi determinado pelo Método de Mohr modificado (RANGANNA, 1977).

Pesou-se 10g de tomate cereja triturado e adicionou-se 100mL de água destilada. O material foi homogeneizado e agitado por 30 minutos, sendo transferido para um balão volumétrico de 250mL e aferido. Filtrou-se usando papel de filtro Whatman N<sup>o</sup> 4. Uma alíquota de 50mL foi titulada com nitrato de prata (marca Synth, P.A.), usando-se 0,5mL de cromato de potássio (marca Ecibra, pureza 99,5%) a 5% como indicador. Como titulação em branco utilizou-se 100mL de água destilada e 1mL de indicador. A titulação foi feita em triplicata.

O conteúdo de sal foi calculado pela seguinte equação:

$$\%NaCl = \frac{(V_t - V_{Bl}) \cdot N \cdot V \cdot 58,45 \cdot 100}{V_A \cdot m \cdot 1000} \quad (3.2)$$

Onde:

$V_t$ : volume gasto na titulação da amostra (mL);

$V_{Bl}$ : volume gasto na titulação do branco (mL);

$N$ : normalidade do álcali (g/L);

$V$ : volume aferido (mL);

$V_A$ : volume da alíquota (mL);

$m$ : massa da amostra (g).

### **3.2.1.3. Determinação do teor de açúcares redutores e totais**

A determinação de açúcares redutores e totais foi feita de acordo com o Método de Lane e Eynon (RANGANNA,1977), que consiste na redução do cobre presente na solução de Fehling através de açúcares invertidos. O conteúdo de açúcar presente na amostra de tomate cereja foi estimado determinando-se o volume de solução de açúcar necessário para reduzir completamente a solução de Fehling de volume conhecido.

### **3.2.1.4. Determinação do pH**

Realizou-se por leitura direta no pHmetro digital Mettler Toledo, modelo pH320, da polpa de tomate liquidificada e homogeneizada.

### **3.2.1.5. Determinação do teor de sólidos solúveis (Brix)**

A percentagem de sólidos solúveis do tomate cereja foi determinada utilizando-se um refratômetro de bancada da marca PZO Warszawa, modelo RL3. O tomate cereja foi triturado, obtendo-se uma massa homogênea. Colocou-se uma pequena quantidade dessa massa no prisma do refratômetro e realizou-se a leitura.

### **3.2.1.6. Determinação do teor de umidade**

A umidade foi realizada de acordo com a metodologia da AOAC (1984), modificada para o tomate cereja. Pesou-se aproximadamente 30g de tomate cereja, cortado em fatias finas e colocou-se em

cadinhos de alumínio previamente tarados. O conjunto cadinho mais amostra foi colocado em uma estufa de circulação forçada da marca FANEM, modelo 320-SE por 24 horas e em seguida em estufa a vácuo da marca SUPRILAB, modelo EST920, por 24 horas, ambas na temperatura de 70°C. As determinações foram feitas em triplicata.

### **3.2.1.7. Determinação do teor de ácido ascórbico**

A determinação do teor de ácido ascórbico foi realizada para o tomate cereja através da redução do 2,6-diclorofenol-indofenol pelo ácido ascórbico (RANGANNA, 1977).

A solução indicadora padrão foi feita dissolvendo-se 50mg de 2,6-diclorofenol-indofenol (marca Sigma) em 150mL de água destilada quente contendo 42mg de bicarbonato de sódio (marca Synth, pureza 99,7%). Resfriou-se e diluiu-se com água destilada até 200mL. As amostras foram guardadas no refrigerador da marca Brastemp, modelo Duplex 410, e padronizadas, titulando-se 5mL de ácido ascórbico (marca Synth, pureza 99,0%), (100mg/L) e adicionando-se 5mL de  $\text{HPO}_3$  (marca Synth, pureza 99,5%).

Triturou-se 1g de tomate cereja e aferiu-se a 50mL com  $\text{HPO}_3$  3% e filtrou-se. Uma alíquota de 10mL foi titulada com solução indicadora padrão até aparecer a coloração rosa persistente por 15 segundos.

A quantidade de ácido ascórbico presente nas amostras, feita em triplicata, foi determinada pela equação abaixo:

$$A_{\text{ascorb}} = \frac{V_T \cdot (0,5/V_i) \cdot V \cdot 100}{V_A \cdot m} \quad (3.3)$$

Onde:

$A_{\text{ascorb}}$ : ácido ascórbico (mg/100g);

$V_T$ : volume gasto na titulação (mL);

$V_i$ : volume titulado na padronização da solução indicadora (mL);

$V$ : volume aferido (mL);

$V_A$ : volume da alíquota (mL);

$m$ : massa do tomate cereja (g).

### 3.2.1.8. Determinação da densidade

O cálculo da densidade (RANGANNA, 1977) foi realizado utilizando-se um picnômetro com capacidade de 25mL. O fluido usado foi o tolueno (marca Ecibra, pureza 99,9%), devido à sua pouca tendência em penetrar no sólido, sua baixa tensão superficial, pouca ação do solvente nos constituintes do sólido, alto ponto de ebulição e sua viscosidade e seu peso específico quando exposto à atmosfera.

O picnômetro foi previamente calibrado com água destilada a 25°C. O picnômetro foi tarado a cada análise. Colocou-se 1,0 a 1,5g de amostra no picnômetro, obtendo-se a massa do picnômetro mais a amostra. Em seguida, completou-se o volume do picnômetro com tolueno e pesou-se, obtendo-se a massa total. A densidade real do tomate cereja foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\rho = \frac{m_s}{V_s} \quad (3.4)$$



Onde:

$\rho$ : densidade (g/mL);

$m_s$ : massa do sólido (g);

$V_s$ : volume do sólido (mL).

O volume de tomate cereja foi determinado sabendo-se a densidade do tolueno ( $0,866\text{g/cm}^3$  a  $25^\circ\text{C}$ ), a massa do sólido colocada no picnômetro e o volume de tolueno necessário para completar o picnômetro até a marca de aferição. Esse valor foi subtraído do volume real do picnômetro previamente estabelecido por meio da calibração com água, encontrando desta forma o volume real do sólido contido.

### 3.3. TRATAMENTO DA PELE

Visando diminuir a barreira a transferência de massa, foi realizado um tratamento da pele do tomate cereja inteiro, que consistiu em perfurações uniformes, mediante o uso de agulhas da marca Coats (modelo corrente darning nº6), com uma densidade de 16 furos/cm<sup>2</sup>.

### 3.4. DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA

Os tomates cereja inteiros e furados foram pesados, dois a dois, e colocados em béqueres de 250mL, contendo a solução desidratante na temperatura ambiente. Para garantir a concentração constante da solução osmótica, foi utilizada a relação amostra/solução de 1:10 (p/p).

Os frascos foram colocados em uma incubadora refrigerada da marca TECNAL, modelo TE-421, com agitação de 70 rpm, mantendo-se a temperatura constante. Após tempos pré-determinados, os tomates cereja foram retirados da solução, enxaguados com água destilada para retirar o excesso de solução, colocados em papel absorvente e pesados.

As amostras foram retiradas em intervalos de 15 minutos até a primeira hora, seguido de intervalos de 30 minutos até a segunda hora e posteriormente em intervalos maiores. Todas as análises foram feitas em triplicata.

As condições de desidratação estudadas foram com relação ao agente osmótico (sal e a mistura sal e sacarose) e à concentração (10 e 15% p/p), sendo determinados o conteúdo de sal e de água nos produtos processados de acordo com a metodologia descrita anteriormente.

A análise do processo de desidratação osmótica e o cálculo da difusividade aparente foram realizados conforme o modelo de AZUARA et al. (1992), adaptado para geometria esférica, conforme o item 2.2.3.

### **3.5. DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO NA DESSORÇÃO DO TOMATE CEREJA**

As umidades de equilíbrio do tomate cereja foram determinadas por meio do método gravimétrico estático, utilizando-se soluções salinas saturadas em água destilada, para uma faixa de umidade relativa de 10,75 a 81,25 % (GREENSPAN, 1977), conforme a Tabela

3.1. Os testes foram conduzidos nas temperaturas de 50, 60 e 70°C em estufa de circulação forçada da marca FANEM, modelo 320-SE, sendo essas temperaturas regularmente verificadas com o auxílio de termômetros padrão colocados no interior de cada estufa.

As amostras da fruta *in natura*, feitas em triplicata, foram colocadas em cadinhos de alumínio e em seguida armazenadas em potes herméticos (Figura 3.2) com as respectivas soluções de sais para cada valor de umidade relativa desejado. Os potes herméticos foram então colocados nas estufas de circulação forçada da marca FANEM, modelo 320-SE, nas temperaturas de trabalho definidas anteriormente.

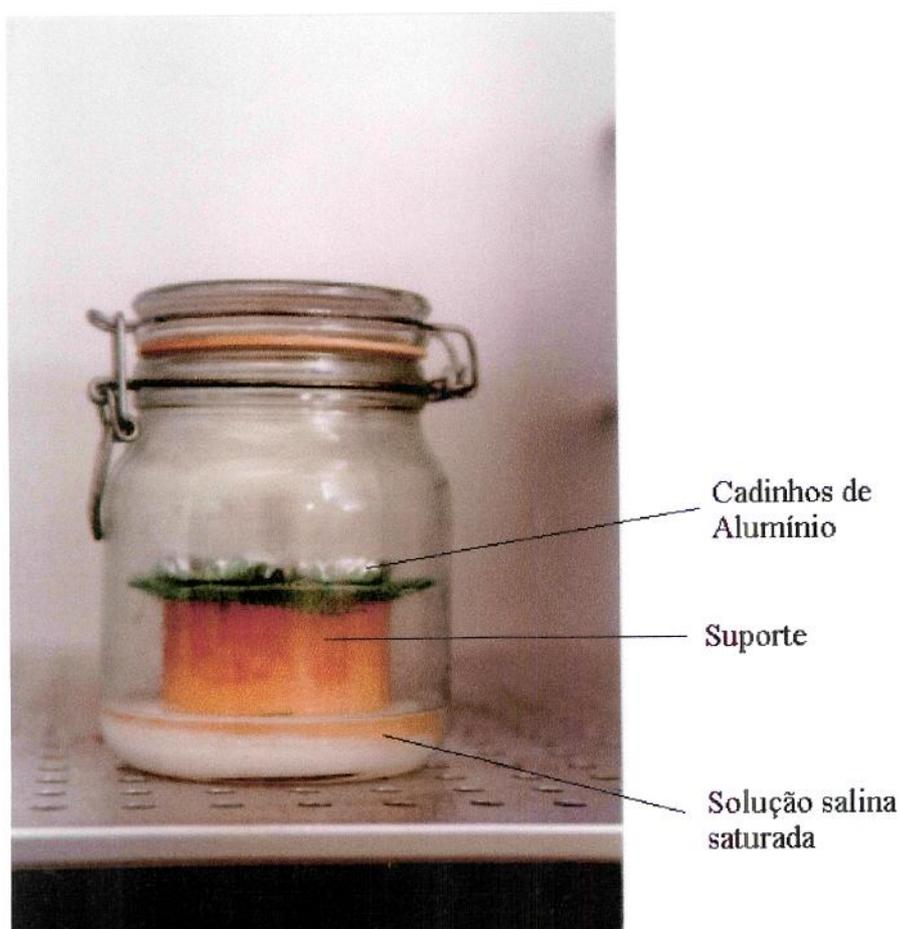


Figura 3.2- Detalhes do pote com fechamento hermético

As amostras com umidade relativa previamente determinada foram pesadas em balança analítica (marca BOSCH, modelo SAE 200) em intervalos regulares de tempo, sendo a primeira pesagem em 4 dias e após este período os intervalos foram de 2 em 2 dias até se alcançar o ponto de equilíbrio.

As umidades de equilíbrio (em base seca) foram calculadas de acordo com a seguinte equação:

$$X_e = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (3.5)$$

Onde:

$X_e$ : umidade de equilíbrio (base seca);

$m_{eq}$ : massa da amostra quando atingido o equilíbrio (g);

$m_s$ : massa seca da amostra (g).

Após alcançado o equilíbrio, as amostras foram levadas para estufa à vácuo da marca SUPRILAB, modelo EST920, a uma temperatura de 70°C durante 48h com a finalidade de se obter sua massa seca.

Para o ajuste das isotermas de sorção do tomate cereja foram testados os modelos BET, GAB, Halsey e Oswin. Os parâmetros destas equações foram encontrados através de uma análise de regressão não linear dos dados experimentais, utilizando o pacote estatístico Statistica 5.0. Os critérios utilizados para escolha do melhor ajuste foram o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) entre as respostas observadas e os valores previstos pelo modelo ajustado e o erro médio relativo, definido conforme equação (3.6).

**Tabela 3.1-** Valores de umidade relativa relacionados às soluções salinas saturadas nas temperaturas de 50, 60 e 70°C

SAL	UR ou $a_w$		
	T= 50°C	T= 60°C	T= 70°C
LiCl	11,10	10,95	10,75
KF	20,80	20,77	21,74
MgCl <sub>2</sub>	30,54	29,26	27,77
NaBr	50,93	49,26	49,70
KI	64,49	63,11	61,93
NaNO <sub>3</sub>	69,04	67,35	66,04
NaCl	74,43	74,50	75,06
KCl	81,20	80,25	79,49

$$E = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|(V_e - V_p)|}{V_e} \quad (3.6)$$

Onde:

$V_e$ : valor experimental;

$V_p$ : valor predito pelo modelo;

$N$ : número de experimentos.

Com base nesta equação, determinou-se o melhor ajuste através do maior  $R^2$  e do menor  $E$ , ou seja,  $R^2$  próximo da unidade e  $E$  menor que 10% (LOMAURO et al., 1985).

### 3.6. CINÉTICA DE SECAGEM

Para a realização desta etapa foram utilizados tomates cereja furados (16 furos/cm<sup>2</sup>), *in natura* e desidratados osmoticamente. Retirou-se uma fina fatia da parte superior e outra na inferior de cada fruta e fez-se dois cortes axiais e dos quartos obtidos foram removidas as partes centrais, como mostrada na Figura 3.3.



Figura 3.3- Detalhes do corte das amostras de tomate cereja

O estudo da cinética de secagem, expressos pela umidade adimensional  $\left[ \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \right]$  em função do tempo, foi efetuado em um secador de leito fixo (Figura 3.4), para as temperaturas de 50, 60 e 70°C e velocidades do ar de secagem de 0,75 e 2,60 m/s.

Os tomates cereja cortados foram colocados na gaveta do secador, onde o fluxo de ar passava verticalmente pelas frutas, retornando ao ventilador em um sistema de circuito fechado. O ar foi aquecido por três conjuntos de resistências de 800, 1600 e 1600W, que podem ser acionadas independentes, sendo controladas por um termostato digital.

As temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco do ambiente de secagem foram medidas, utilizando-se um psicrômetro, para se conhecer a umidade relativa do ar de secagem. A temperatura no interior do secador foi monitorada por um termopar de cobre constantan e a velocidade do ar de secagem foi verificada pelo uso de um anemômetro (marca TSI, modelo 8330-M). Na primeira gaveta do secador foi colocado um leito de sílica-gel, com a finalidade de manter o ar desumidificado. Detalhes do secador e acessórios podem ser vistos na Figura 3.4.

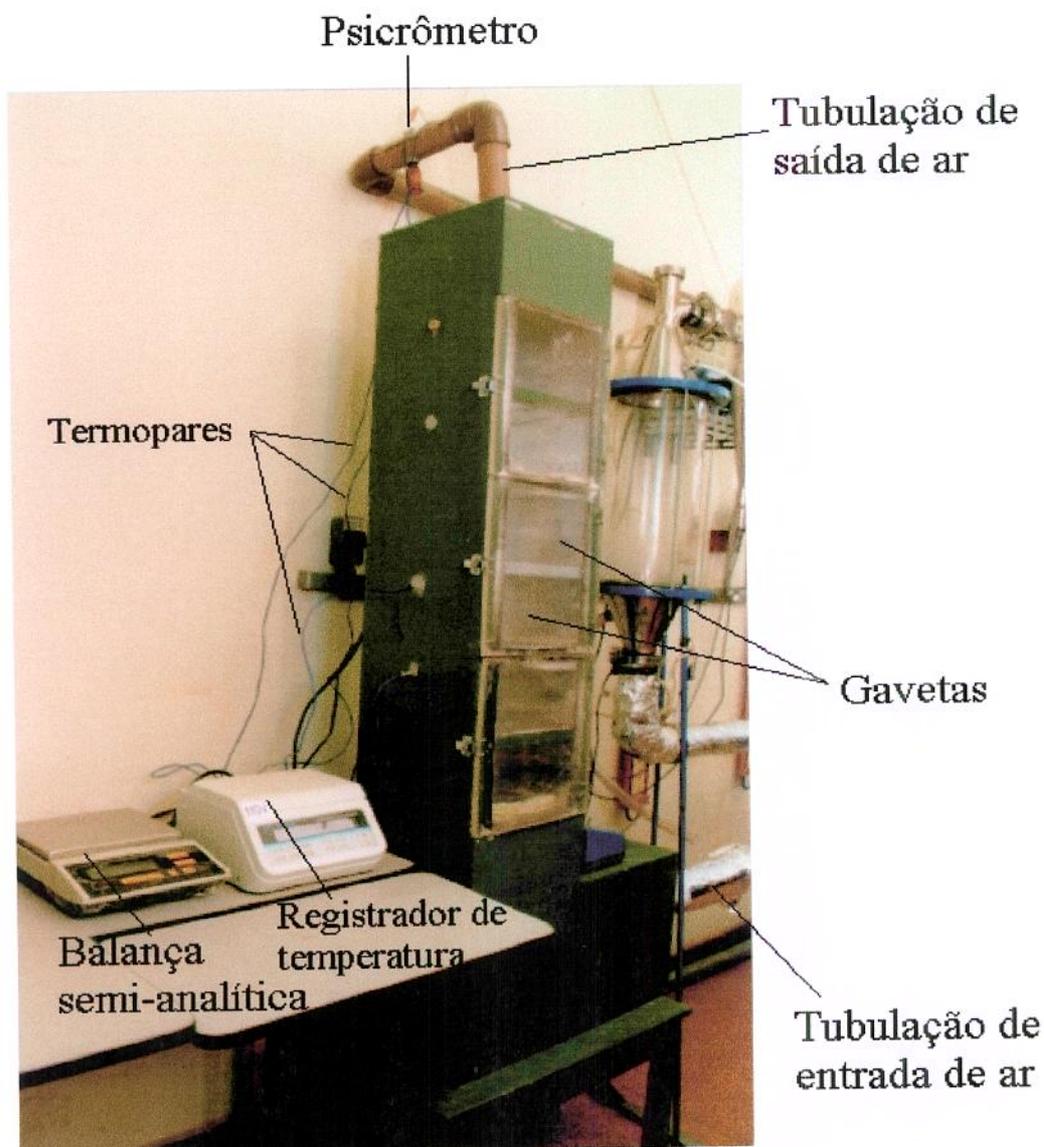


Figura 3.4- Detalhes do secador de leito fixo

A quantidade de água perdida durante a secagem foi medida pela pesagem das amostras. O tempo de pesagem foi de 15 minutos até a primeira hora, seguido de intervalos de 30 minutos e uma hora, até que as variações do peso das amostras fossem insignificantes. Em seguida, foi feita a determinação da massa seca, de acordo com a metodologia descrita anteriormente, no item 3.2.1.6.

A análise do processo de secagem, os ajustes das curvas experimentais e o cálculo da difusividade efetiva foram realizados de acordo com a 2ª Lei de Fick para geometria de placa plana infinita, conforme a equação 2.29. Foram usados valores da meia espessura inicial das amostras. Também foi utilizada a equação de Page (2.30) para representar a cinética de secagem.

### **3.7. CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO**

Nas amostras de tomate cereja seco foram feitas três determinações: densidade e conteúdo de ácido ascórbico, conforme descrito nos itens 3.2.1.8 e 3.2.1.7, respectivamente.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DO TOMATE CEREJA

A caracterização física e química do tomate cereja foi feita sob a forma *in natura* e seca, de acordo com os métodos descritos no item 3.2. Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados da análise físico-química para a fruta *in natura*.

**Tabela 4.1-** Análise físico-química do tomate cereja *in natura*

Análise	Valor médio
Conteúdo de umidade (bu-%)	94,39±0,01
Acidez (% ácido cítrico)	0,64±0,01
Sal (%NaCl)	0,65±0,08
Açúcares redutores (%)	1,03±0,05
pH	4,04±0,06
Brix	5,53±0,05
Ácido ascórbico	31,29±0,04
Densidade (g/mL)	0,99±0,01

A percentagem de sólidos totais está próxima ao encontrado para o tomate comum, assim como a acidez e o teor de açúcares totais (Tabela 2.1). O teor de sal (NaCl) está bem acima do encontrado por GOULD (1974) e açúcares redutores está abaixo da faixa relatada pelo mesmo autor. Os açúcares e os ácidos orgânicos constituem a maior parte da matéria seca do tomate cereja estudado, concordando com os resultados obtidos por PICHA (1987). O pH encontra-se próximo à faixa relatada por PETRO-TURZA (1989) para

o tomate, que foi de  $4,45 \pm 0,09$  e o Brix está na faixa proposta por GOULD (1974). O valor da densidade está próximo a faixa encontrada por RANGANNA (1977) para a polpa de tomate, que foi de 1,0291 a 1,0866g/mL.

## 4.2. DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA

A desidratação osmótica do tomate cereja foi estudada avaliando-se a influência da concentração e do agente osmótico (sal e mistura de sal e açúcar) através do conteúdo de umidade e do teor de sal (NaCl), na temperatura ambiente.

A Figura 4.1 mostra o conteúdo de umidade ao longo do processo de desidratação osmótica para as soluções de sal e mistura de sal e açúcar nas concentrações de 10 e 25%. Observa-se uma forte influência da concentração da solução osmótica sobre a perda de água. Isto se deve ao fato de que o aumento na concentração resulta em um maior gradiente de pressão osmótica e conseqüentemente no aumento da transferência de massa (RASTOGI e RAGHAVARAO, 1997). A perda de água é maior nas duas primeiras horas do processo. Este comportamento de maior perda de água no início do processamento também foi observado por SANJINÉZ-ARGADOÑA (1999) trabalhando com goiaba e por GARCIA DE LA CRUZ (1998) estudando a cinética de osmose da berinjela. Observa-se também uma tendência de estabilização da perda de água ao longo do processo devido ao equilíbrio atingido com o soluto do meio.

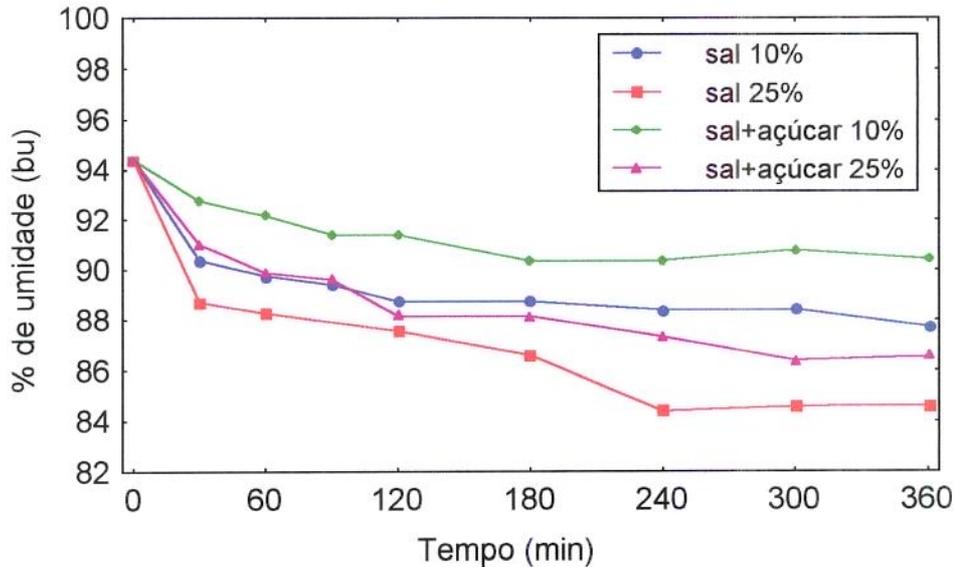


Figura 4.1-Perda de água em função do tempo na temperatura de 25°C para as concentrações de solução osmótica de 10 e 25%

A Figura 4.2 mostra o ganho de sal (NaCl) durante a desidratação do tomate cereja. Para as soluções desidratantes mais concentradas observa-se um maior ganho de sal após 6 horas de processo. Neste período, as soluções a 10% mostraram ter atingido o equilíbrio, o mesmo não acontecendo para as soluções a 25%. Fixando-se a concentração da solução, pode-se analisar o efeito do agente osmótico, que, neste caso, para a mistura de sal e açúcar o ganho de sal foi menor. Ao diminuir a concentração da solução de sal em 60% (de 25 para 10%), percebe-se uma diminuição no ganho de sal da ordem de 33%.

De acordo com LENART (1996), o processo de desidratação osmótica deve ser realizado por um período de tempo pequeno suficiente para atingir altas taxas de perda de água e ganho de sólidos relativamente baixo. Assim sendo, escolhe-se a solução de sal a 10%p/p e o tempo de imersão de 2 horas como a condição de

desidratação osmótica usada como pré-tratamento para o processo de secagem do tomate cereja.

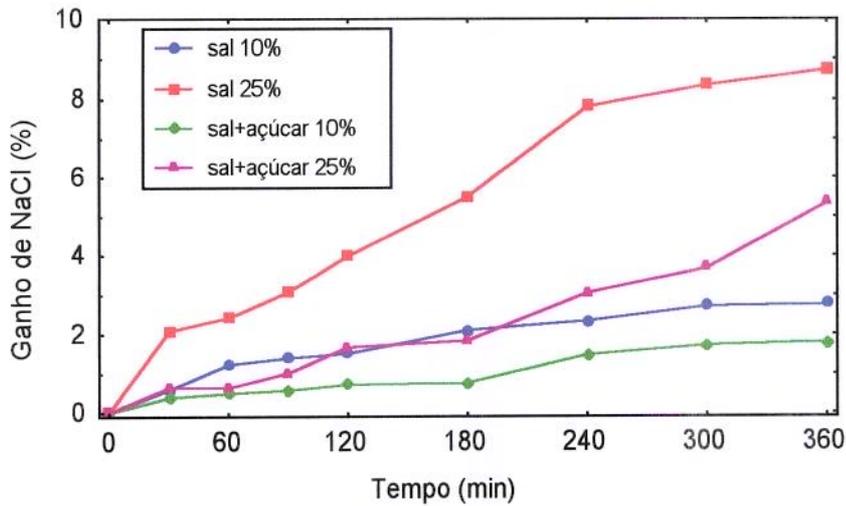


Figura 4.2- Ganho de sal (NaCl) durante a desidratação osmótica do tomate cereja a 25°C

Em relação a modelagem matemática da cinética de desidratação osmótica, as Figuras 4.3 a 4.6 mostram os dados da perda de água até 3h de processo e as respectivas linearizações, obtidas pela equação 3.10. O valor do parâmetro  $S_1$  a partir destes dados foi apresentado na Tabela 4.2, juntamente com a difusividade aparente média ( $D_m$ ) e o erro médio relativo (E). Observa-se que para valores mais altos de  $S_1$ , obtém-se maiores valores de  $D_m$ , indicando uma maior difusão por unidade de tempo. Pode-se perceber que o modelo foi capaz de prever a desidratação osmótica utilizando os dados iniciais, obtendo-se erros médio relativo satisfatórios.

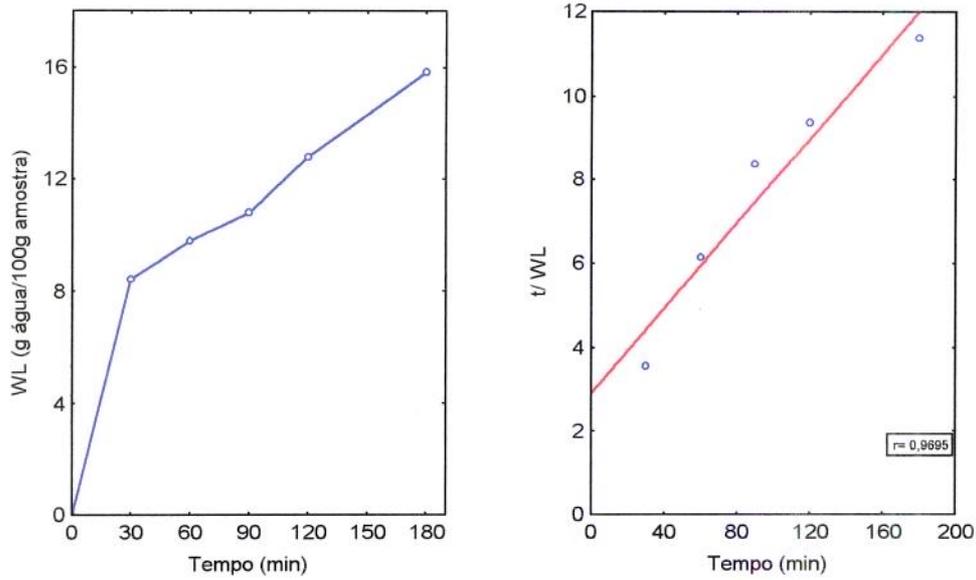


Figura 4.3- Perda de água na desidratação osmótica do tomate cereja utilizando solução de sal 10%p/p

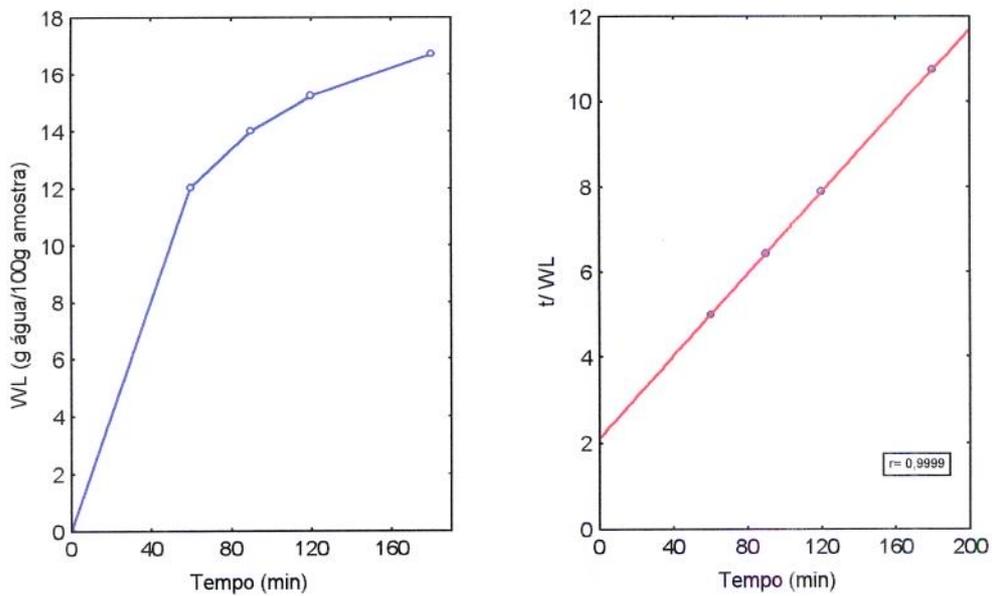


Figura 4.4- Perda de água na desidratação osmótica do tomate cereja utilizando solução de sal 25%p/p

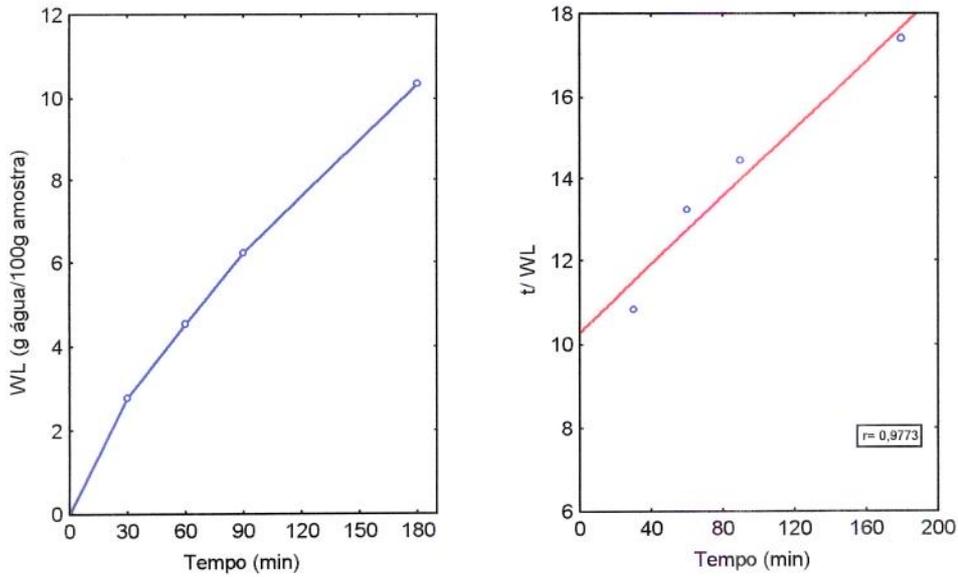


Figura 4.5- Perda de água na desidratação osmótica do tomate cereja utilizando solução de sal+açúcar 10%p/p

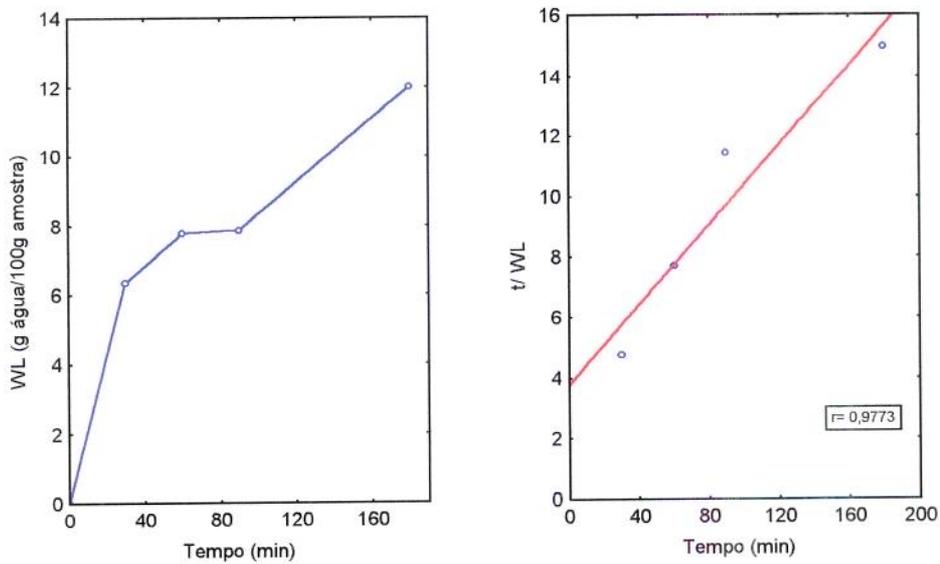


Figura 4.6- Perda de água na desidratação osmótica do tomate cereja utilizando solução de sal+açúcar 25%p/p

Tabela 4.2- Valores de  $S_1$  e  $D_m$  obtidos pelo modelo e o erro médio relativo

Amostra	$S_1 (10^{-2})$	$D_m (10^8 \text{m}^2/\text{min})$	E(%)
sal (10%)	1,757	7,014	8,849
sal (25%)	2,280	8,654	0,122
sal+açúcar (10%)	0,040	1,299	3,677
sal+açúcar (25%)	1,751	6,993	10,008

A composição da solução é um importante parâmetro na desidratação osmótica. As soluções osmóticas mais concentradas obtiveram maior perda de água e conseqüentemente uma maior difusividade aparente que as soluções menos concentradas. MOY et al. (1978), trabalhando com a desidratação osmótica de manga e papaia com diferentes concentrações de sacarose, GARCIA DE LA CRUZ (1998) estudando a desidratação de berinjela e BARONI e HUBINGER (1998) a cebola, variando as concentrações de sal (NaCl) na solução osmótica obtiveram o mesmo resultado. Em relação a utilização da mistura binária, percebe-se que a combinação sal-sacarose fornece menores taxas de perda de água, quando comparadas ao uso de apenas NaCl, o que ocorre devido ao baixo peso molecular permitir maior penetração nos tecidos vegetais em relação a solutos de maior peso molecular, como a sacarose, e sua ionização na solução, concordando com os resultados obtidos por HAWKES e FLINK (1978) na desidratação osmótica da maçã. Estes autores perceberam que o sal (NaCl) a 25% foi o melhor agente desidratante, mesmo utilizando a mistura sal-sacarose. Entretanto, o seu uso é limitado devido ao sabor salgado conferido ao alimento.

### 4.3. ISOTERMAS DE SORÇÃO

Os resultados experimentais da umidade de equilíbrio para a dessorção do tomate cereja são mostrados na Tabela 4.3 e na Figura 4.7.

Pode-se verificar que a dependência da temperatura das isotermas foi desprezível, portanto não foi levantada a curva de dessorção para a temperatura de 60°C. Este efeito também foi observado por BOLIN (1980) para a ameixa e por HUBINGER et al. (1992) para a manga, a goiaba e o abacaxi, trabalhando nas temperaturas de 25 e 50°C

**Tabela 4.3-** Valores experimentais de umidade de equilíbrio de dessorção de tomate cereja *in natura* nas temperaturas de 50 e 70°C

Solução Salina	T= 50°C		T=70°C	
	$a_w$	$X_e$	$a_w$	$X_e$
LiCl	0,111	-	0,108	-
KF	0,208	-	0,214	0,141
MgCl <sub>2</sub>	0,305	0,174	0,278	0,176
NaBr	0,509	0,233	0,497	0,233
KI	0,645	0,284	0,619	0,269
NaNO <sub>3</sub>	0,690	0,293	0,660	0,281
NaCl	0,744	0,335	0,761	0,342
KCl	0,812	-	0,795	0,395

As isotermas de sorção do tomate cereja não se interceptaram. A interseção é observada em produtos com alto conteúdo de açúcar, como frutas (SARAVACOS et al., 1986; MAROULIS et al., 1988). Para produtos com baixo conteúdo de açúcar, como a maçã, as curvas não se interceptam. Para produtos com alto teor de proteína e amido, também não se observa a interseção das curvas com o aumento de temperatura (BENADO e RIZVI, 1985).

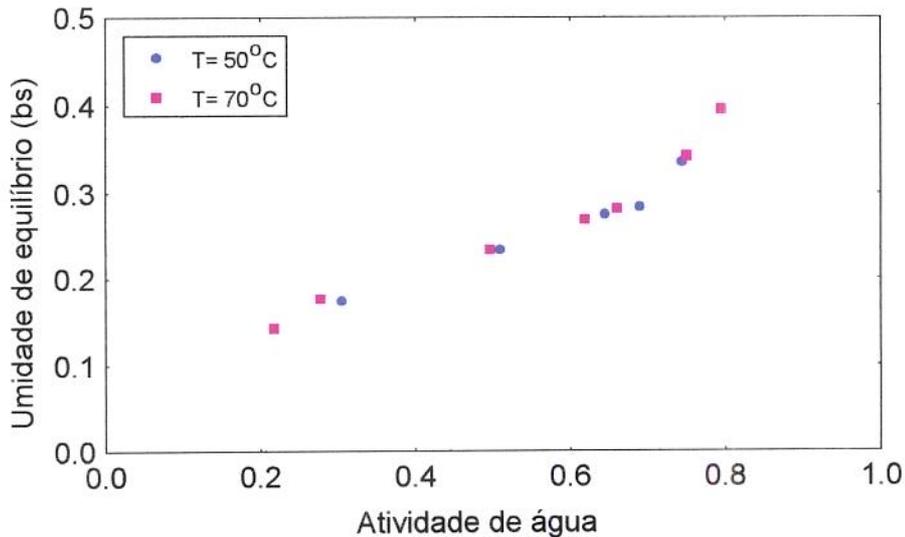


Figura 4.7- Dados experimentais de sorção do tomate cereja *in natura*

Os dados experimentais das isotermas de dessorção do tomate cereja foram ajustados pelas equações de BET, GAB, Halsey e Oswin. A escolha do melhor ajuste foi feita observando o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e o erro médio relativo para cada equação citada acima e para cada condição estudada. Estes valores, juntamente com as constantes dos modelos testados, são apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5.

**Tabela 4.4-** Parâmetros de ajuste da isoterma de dessorção do tomate cereja *in natura* para a temperatura de 50°C

Modelos	Parâmetros			$R^2$	E (%)
<b>BET</b>	$X_m$ 0,133	$C_{BET}$ 20,087	$n$ 5,000	0,979	3,221
<b>GAB</b>	$X_m$ 0,138	$C_{GAB}$ 95,615	$K_{GAB}$ 0,781	0,990	2,278
<b>Halsey</b>	$A$ 0,026	$B$ 2,205	-	0,995	2,341
<b>Oswin</b>	$A$ 0,227	$B$ 0,336	-	0,990	2,171

**Tabela 4.5-** Parâmetros de ajuste da isoterma de dessorção do tomate cereja *in natura* para a temperatura de 70°C

Modelos	Parâmetros			R <sup>2</sup>	E (%)
<b>BET</b>	$X_m$ 0,145	$C_{BET}$ 11,154	$n$ 5,000	0,970	8,022
<b>GAB</b>	$X_m$ 0,135	$C_{GAB}$ 51,868	$K_{GAB}$ 0,82	0,994	3,747
<b>Halsey</b>	$A$ 0,036	$B$ 1,988	-	0,992	6,617
<b>Oswin</b>	$A$ 0,231	$B$ 0,370	-	0,993	3,353

Analisando os dados das tabelas acima e as Figuras 4.8 e 4.9, observou-se que os modelos estudados apresentaram um bom ajuste aos dados experimentais de dessorção nas temperaturas de 50 e 70°C, com coeficientes de correlação próximos a unidade e erros médio relativos menores que 10% para todos os casos. O modelo de BET apresentou maior erro médio relativo e menor coeficiente de correlação em ambos os casos, sendo considerado o pior ajuste. Este modelo teve um bom ajuste para atividades de água menores (até  $a_w$  em torno de 0,5). Como o modelo de GAB descreveu bem os dados obtidos nas temperaturas estudadas, e devido a sua aplicabilidade em alimentos, este foi considerado o modelo para predição do conteúdo de umidade de equilíbrio do tomate cereja. Em relação ao modelo de GAB, também pode-se observar que os valores do conteúdo de umidade da monocamada ( $X_m$ ) e da constante do modelo ( $C_{GAB}$ ) decresceram com o aumento da temperatura, enquanto o valor de  $K_{GAB}$  (fator relacionado com a energia de interação entre as múltiplas camadas de água) apresentou um pequeno acréscimo.

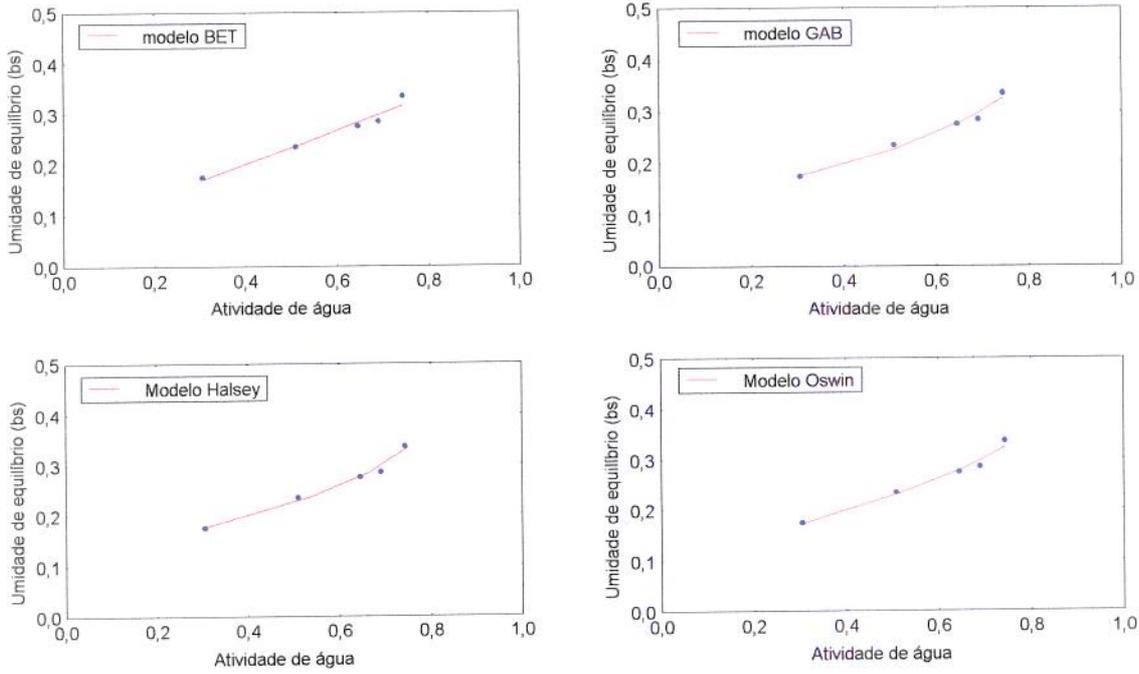


Figura 4.8- Isothermas de dessorção de tomate cereja *in natura* para a temperatura de 50°C

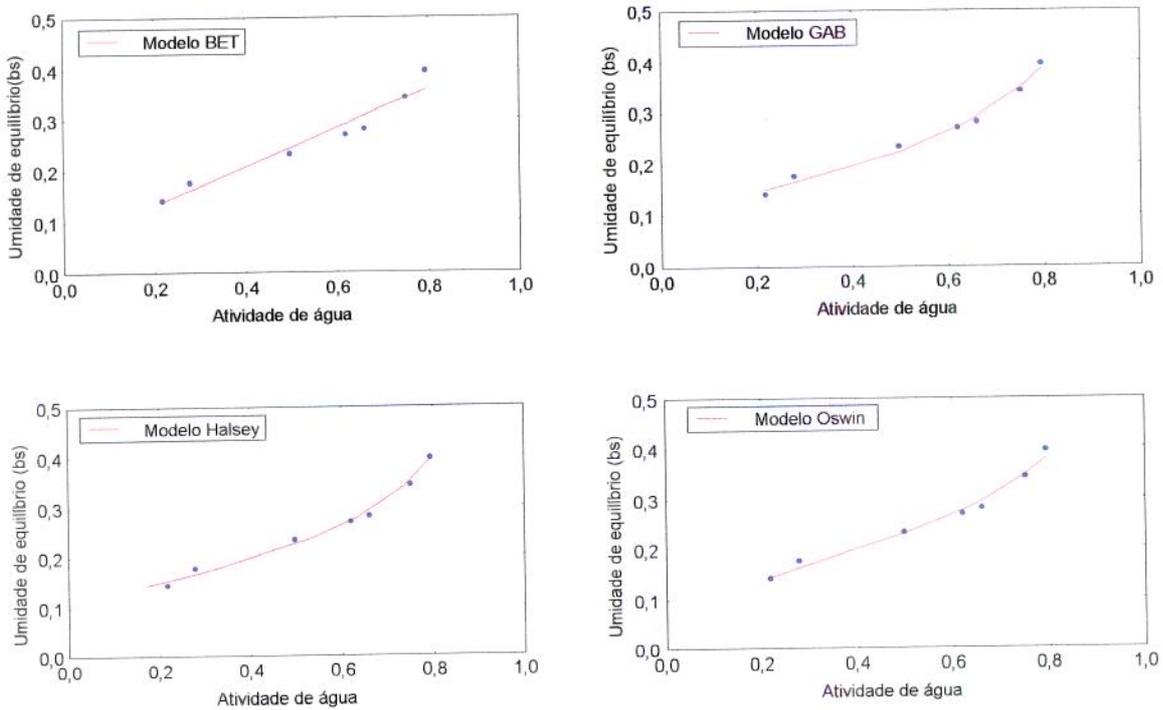


Figura 4.9- Isothermas de sorção de tomate cereja *in natura* para a temperatura de 70°C

Como a desidratação osmótica resulta em ganho de soluto, nos produtos que sofreram esse pré-tratamento ocorreram mudanças na sua composição, o que pode influenciar o processo subsequente de secagem. Por isso, foram obtidos os dados experimentais da isoterma de dessorção do tomate cereja desidratado com sal 10% p/p a 50°C, conforme mostrado na Tabela 4.6. Nota-se que o produto desidratado apresentou valores menores de atividade de água que o *in natura* (Figura 4.10). SLOAN e LABUZA (1976), citado por ISLAM e FLINK (1982) também observaram que alguns componentes, como sal e glicerol, são particularmente efetivos na redução da atividade de água. Estes autores também ressaltaram que a desidratação osmótica como pré-tratamento para secagem resulta em uma menor quantidade de água a ser retirada do produto, em maior densidade de sólidos, devido ao ganho de sólidos, e em um alto conteúdo de umidade na saída do secador devido à influência do ganho de sólidos no comportamento de sorção do produto.

**Tabela 4.6-** Valores experimentais de umidade de equilíbrio para a dessorção do tomate cereja desidratado na temperatura de 50°C

Solução	T= 50°C	
	$a_w$	$X_e$ (bs)
Salina		
NaBr	0,509	0,124
KI	0,645	0,191
NaNO <sub>3</sub>	0,690	0,222
NaCl	0,744	0,254
KCl	0,812	0,364

O ajuste da curva experimental de dessorção pelos modelos de BET, GAB, Halsey e Oswin encontram-se na Tabela 4.7. Todos os modelos apresentaram um bom ajuste aos dados experimentais, com

coeficientes de correlação próximos à unidade e erros médio relativos inferiores a 10%. O modelo de Halsey apresentou o melhor ajuste e o menor erro, sendo adotado para predizer o conteúdo de umidade de equilíbrio do tomate cereja desidratado osmoticamente. A Figura 4.11 mostra o ajuste do modelo de Halsey aos dados experimentais.

**Tabela 4.7-** Parâmetros de ajuste da isoterma de desorção do tomate cereja desidratado para a temperatura de 50°C

Modelos	Parâmetros			R <sup>2</sup>	E (%)
<b>BET</b>	$X_m$ 0,575	$C_{BET}$ 0,110	$n$ 5,000	0,983	6,060
<b>GAB</b>	$X_m$ 0,074	$C_{GAB}$ 5,973	$K_{GAB}$ 0,991	0,997	2,573
<b>Halsey</b>	$A$ 0,069	$B$ 1,100	-	0,997	2,211
<b>Oswin</b>	$A$ 0,120	$B$ 0,751	-	0,996	3,353

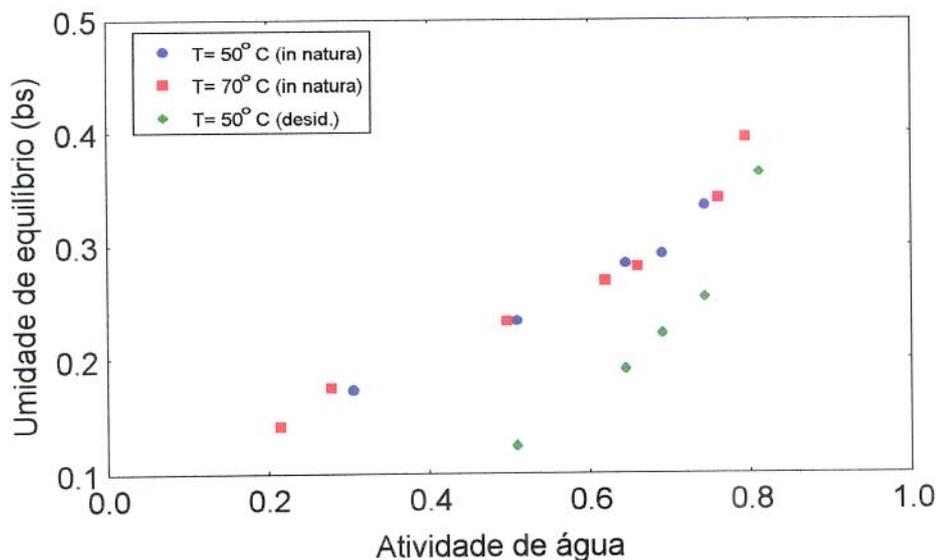


Figura 4.10- Comparação dos dados experimentais de sorção do tomate cereja *in natura* e desidratado osmoticamente

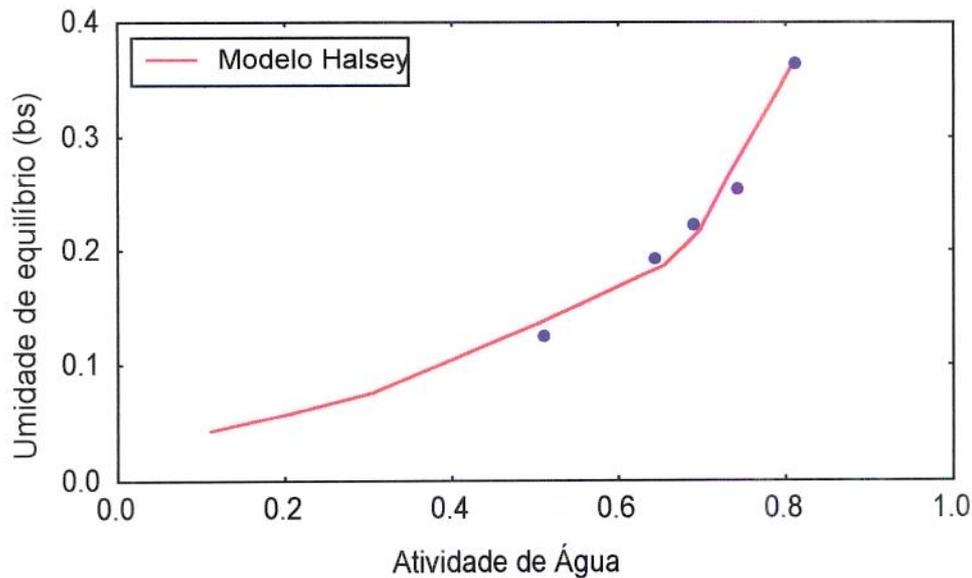


Figura 4.11- Isotherma de desorção de tomate cereja desidratado osmoticamente para a temperatura de 50°C

#### 4.4. CINÉTICA DE SECAGEM

##### 4.4.1. Tomate cereja *in natura*

A cinética de secagem do tomate cereja foi estudada para três temperaturas (50, 60 e 70°C) e duas velocidades do ar de secagem (0,75 e 2,60 m/s), levando-se em consideração a umidade relativa do ar de secagem, que variou de acordo com a Tabela 4.8. Estes valores foram obtidos através das leituras das temperaturas de bulbo úmido e de bulbo seco do psicrômetro construído na tubulação de retorno do ar do secador.

Os dados de secagem obtidos experimentalmente e as razões de umidade correspondentes são mostrados nas Figuras 4.12 e 4.13 para as duas velocidades do ar de secagem, 0,75 e 2,60 m/s, respectivamente. Os adimensionais  $(X - X_e)/(X_o - X_e)$  foram calculados

utilizando os conteúdos de umidade em base úmida. Os valores de  $X_e$  foram determinados a partir dos dados de umidade relativa do ar de secagem, conforme Tabela 4.8, aplicados na equação de GAB, utilizando dos valores dos parâmetros conforme Tabela 4.4, pois foi a equação que melhor representou os dados experimentais das isotermas de dessorção.

**Tabela 4.8-** Valores de umidade relativa do ar de secagem para as diferentes condições de temperatura e de velocidade para o tomate *in natura*

Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	Umidade relativa (%)
50	0,75	39
	2,60	44
60	0,75	38
	2,60	34
70	0,75	29
	2,60	32

As Figuras 4.12 e 4.13 traduzem o efeito da temperatura na cinética de secagem do tomate cereja. Pode-se perceber que, com o aumento desta variável, a taxa de remoção de umidade do produto foi maior.

As Figura 4.14 a 4.16 mostram o efeito da velocidade do ar na cinética de secagem. Assim como para a temperatura, um aumento na velocidade do ar de secagem provoca uma maior perda de umidade do produto, em uma determinada temperatura.

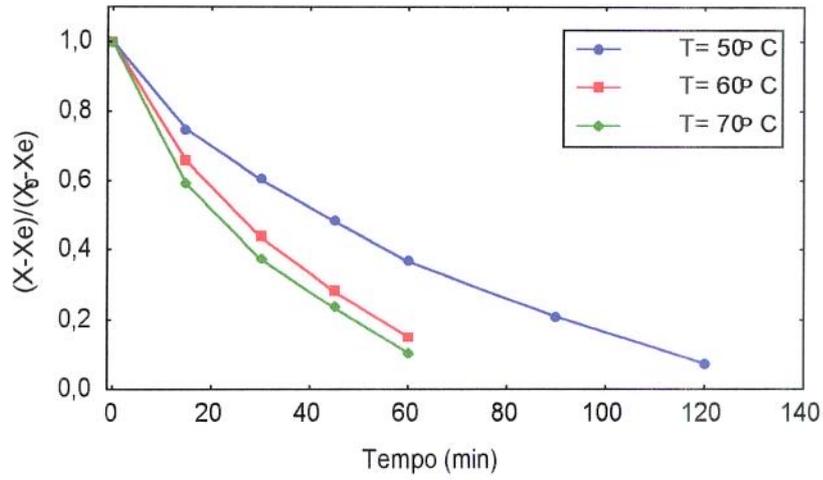


Figura 4.12- Efeito da temperatura na secagem de tomate cereja *in natura* ( $v = 0,75 \text{ m/s}$ )

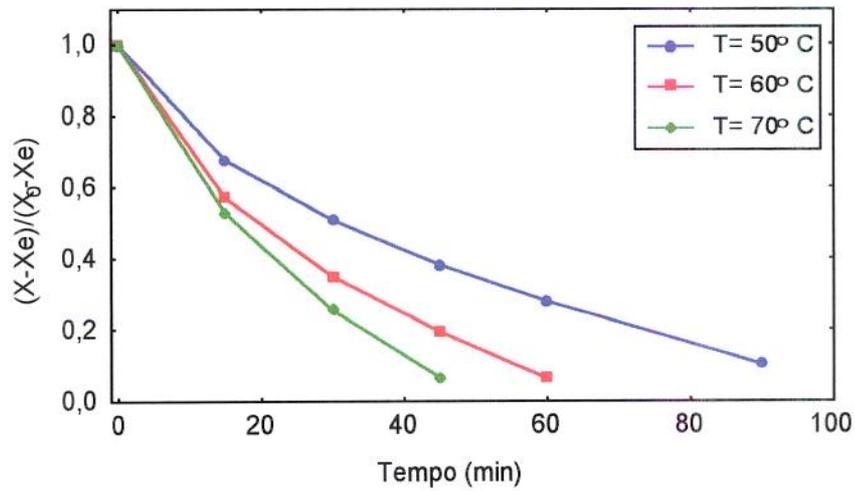


Figura 4.13- Efeito da temperatura na secagem de tomate cereja *in natura* ( $v = 2,60 \text{ m/s}$ )

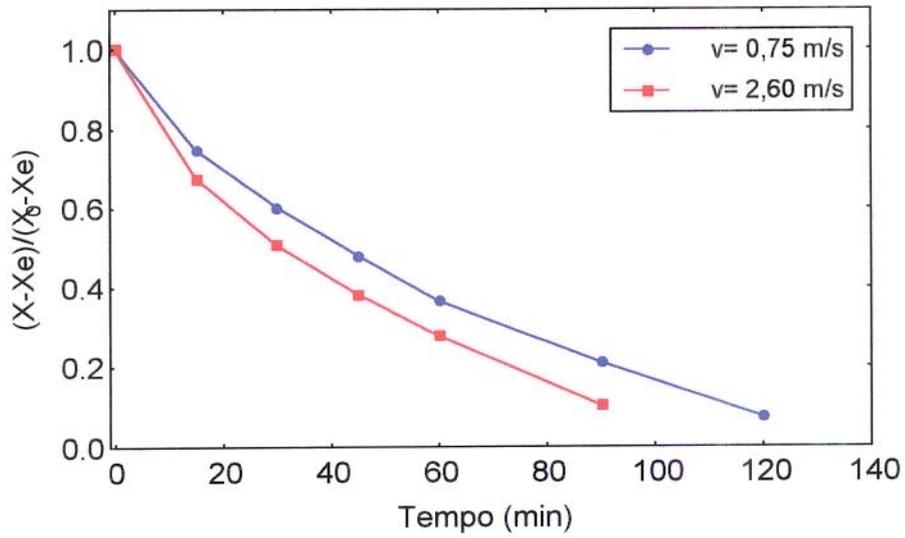


Figura 4.14- Efeito da velocidade do ar de secagem de tomate *in natura* ( $T= 50^{\circ}\text{C}$ )

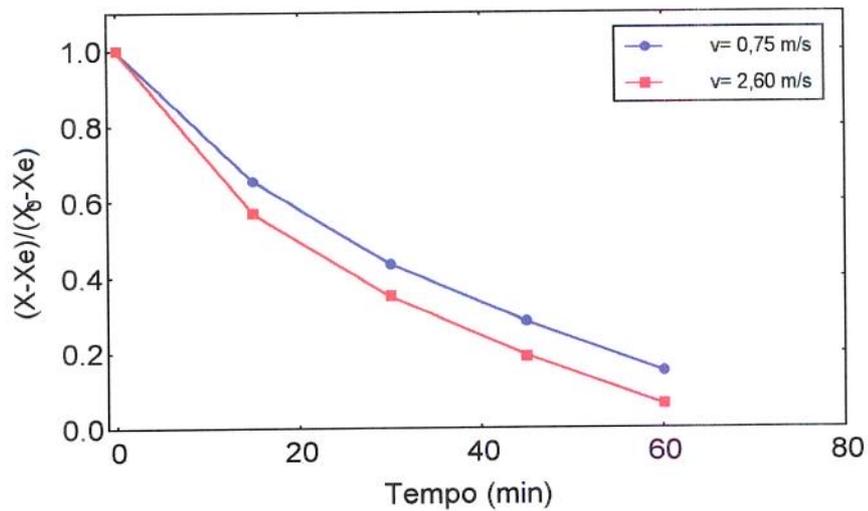


Figura 4.15- Efeito da velocidade do ar de secagem de tomate *in natura* ( $T= 60^{\circ}\text{C}$ )

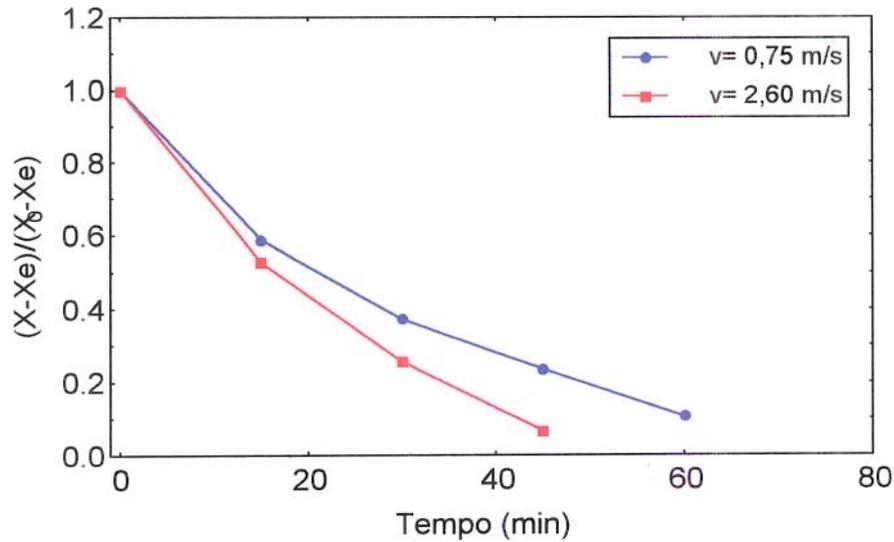


Figura 4.16- Efeito da velocidade do ar de secagem de tomate *in natura* (T= 70°C)

Os dados experimentais da cinética de secagem foram correlacionados com o modelo difusional simplificado baseado na 2ª lei de Fick (equação 2.29) e com a equação de Page (2.30).

Considerando as amostras de tomate cereja como uma placa plana infinita com espessura de 1,8 mm (valor médio da espessura das amostras no início da secagem) e aplicando o modelo difusional simplificado foi possível calcular os valores de difusividade efetiva. Esta equação mostra que  $D_{ef}$  pode ser obtido da inclinação da reta, quando se constrói o gráfico de  $\ln\left(\frac{X-X_e}{X_0-X_e}\right)$  em função do tempo de secagem. Nas Figuras 4.17 e 4.18 são mostrados os gráficos de  $\ln\left(\frac{X-X_e}{X_0-X_e}\right)$  em função do tempo e na Tabela 4.9 são apresentados os valores da difusividade efetiva ( $D_{ef}$ ), do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e do erro médio relativo (E%). Observa-se que os valores de  $D_{ef}$  aumentam com o aumento da temperatura e da velocidade do ar de

secagem, porém o efeito da temperatura é mais pronunciado na alta velocidade de secagem. HAWLADER et al. (1991), analisando a cinética de secagem de tomate da variedade "Malaysian", nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80°C e velocidades do ar de secagem de 0,4, 1,0 e 1,8 m/s, obtiveram valores de difusividade efetiva na faixa de  $1,52 \times 10^{-10}$  a  $9,12 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ , considerando o encolhimento, e utilizando o mesmo modelo difusional simplificado baseado na 2ª lei de Fick.

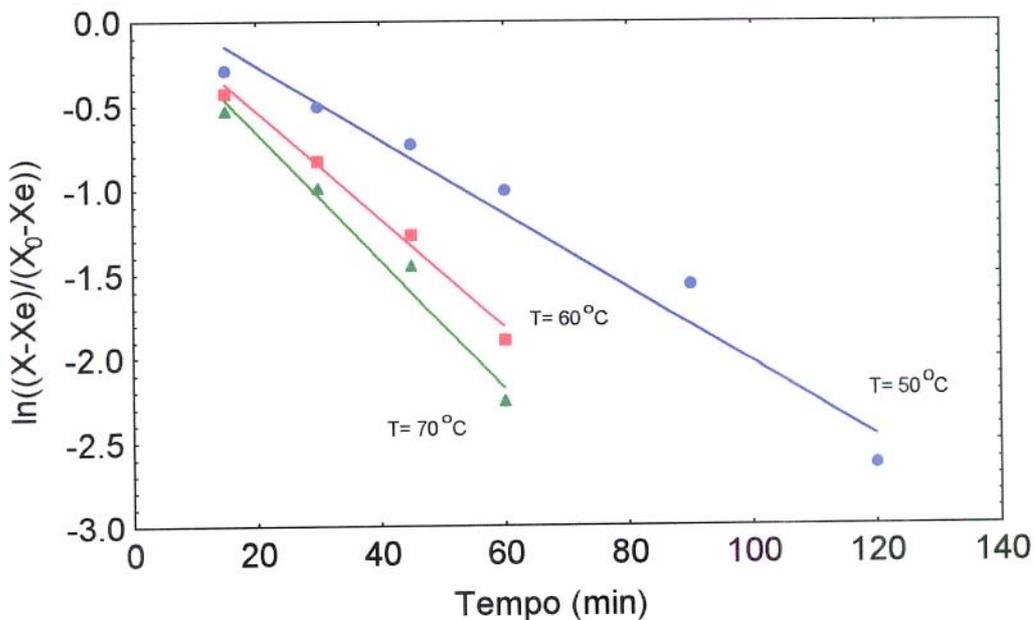


Figura 4.17- Ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem do tomate cereja *in natura* pelo modelo difusional simplificado ( $v=0,75$  m/s)

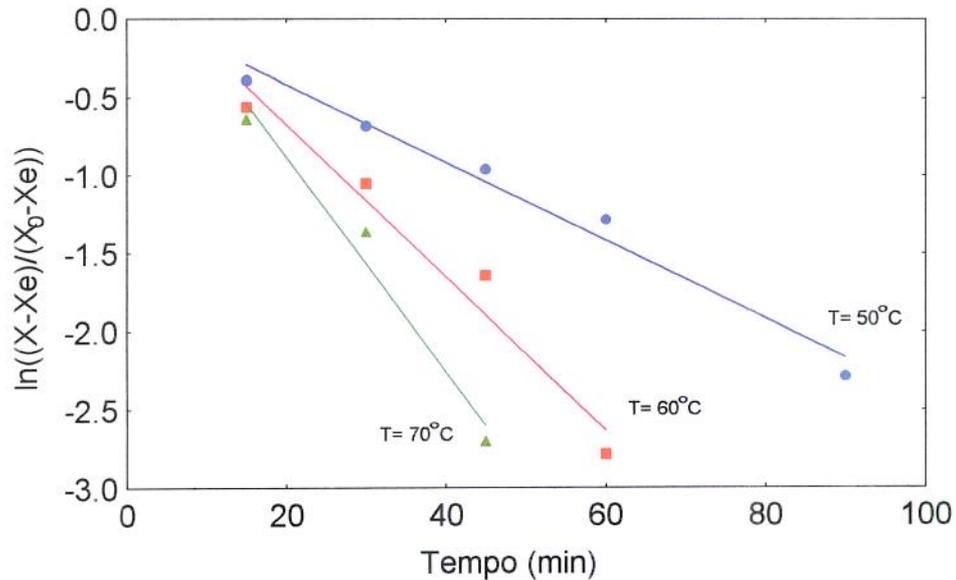


Figura 4.18- Ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem do tomate cereja *in natura* pelo modelo difusional simplificado ( $v=2,60\text{m/s}$ )

**Tabela 4.9-** Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional para o tomate cereja *in natura*

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Velocidade do ar ( $\text{m/s}$ )	$D_{ef}$ ( $10^{11}\text{m}^2/\text{s}$ )	$R^2$	E(%)
50	0,75	3,010	0,983	16,409
	2,60	3,421	0,989	16,409
60	0,75	4,379	0,994	10,183
	2,60	6,705	0,979	13,872
70	0,75	5,200	0,989	7,833
	2,60	9,442	0,985	11,801

Os dados experimentais também foram ajustados utilizando-se a equação de Page (2.30), através de regressão não linear, obtendo-se os parâmetros ( $G$  e  $J$ ), coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e erro

médio relativo (E%) para cada condição estudada. Estes valores encontram-se na Tabela 4.10.

**Tabela 4.10-** Parâmetros da equação de Page, coeficiente de correlação e erro médio relativo para as temperaturas e velocidades do ar de secagem

Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	$G (10^2)$	$J$	$R^2$	E(%)
50	0,75	0,020	1,045	0,997	10,964
	2,6	0,050	0,956	0,997	8,681
60	0,75	0,030	1,066	0,999	4,021
	2,6	0,040	1,068	0,998	14,595
70	0,75	0,060	0,998	0,999	7,493
	2,6	0,014	1,234	0,999	11,565

Pode-se observar que a equação de Page obteve um bom ajuste, podendo ser utilizado para a predição da cinética de secagem do tomate cereja nas condições experimentais utilizadas. As curvas de secagem preditas pela equação de Page são apresentadas nas Figuras 4.19 a 4.21.

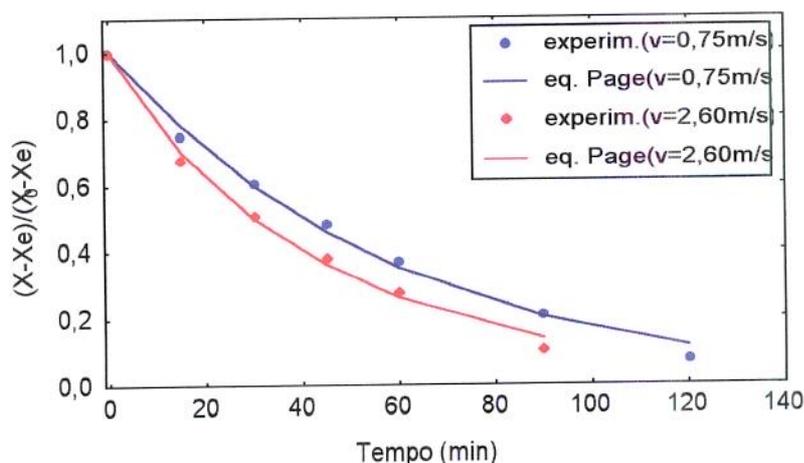


Figura 4.19- Curva de secagem do tomate cereja *in natura* ajustada pela equação de Page para a temperatura de 50°C

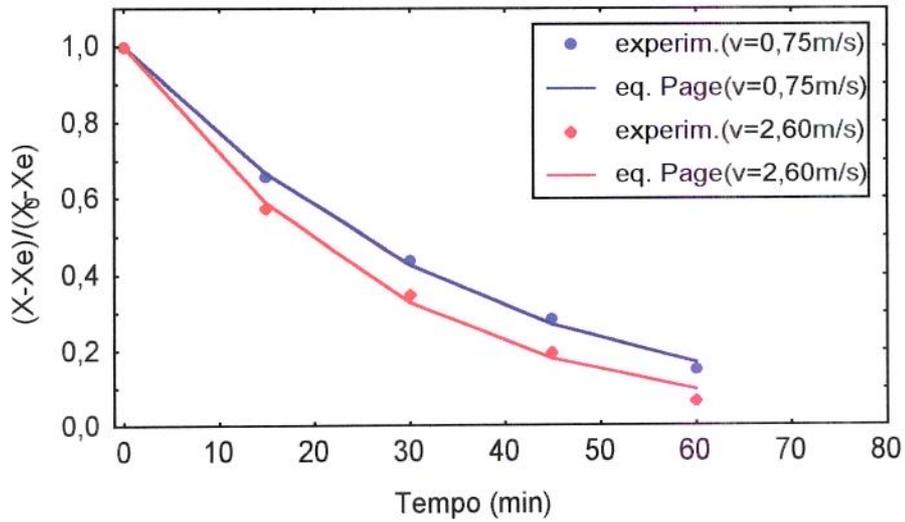


Figura 4.20- Curva de secagem do tomate cereja *in natura* ajustada pela equação de Page para a temperatura de 60°C

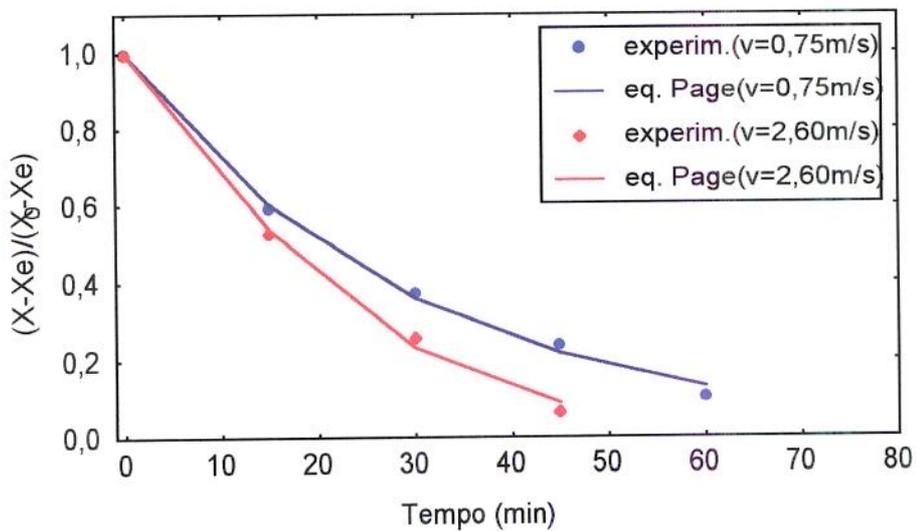


Figura 4.21- Curva de secagem do tomate cereja *in natura* ajustada pela equação de Page para a temperatura de 70°C

#### 4.4.2. Tomate cereja desidratado osmoticamente

A cinética de secagem do tomate cereja desidratado osmoticamente ocorreu nas condições descritas na Tabela 4.11. Para a fruta desidratada osmoticamente foi levantada a isoterma de dessorção somente a 50°C, partindo-se do princípio de que não houve dependência da temperatura na isoterma de dessorção da fruta *in natura*. Os valores de umidade de equilíbrio ( $X_e$ ) foram determinados usando a equação de Halsey, que representou melhor os dados experimentais de dessorção, aplicando os valores dos parâmetros conforme a Tabela 4.7.

**Tabela 4.11-** Valores de umidade relativa do ar de secagem para as diferentes condições de temperatura e de velocidade para o tomate desidratado osmoticamente

Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	Umidade relativa (%)
50	0,75	37
	2,60	42
60	0,75	29
	2,60	34
70	0,75	28
	2,60	31

As Figuras 4.22 e 4.23, 4.24 a 4.26 mostram o efeito da temperatura e da velocidade do ar na cinética de secagem de tomate cereja desidratado, respectivamente.

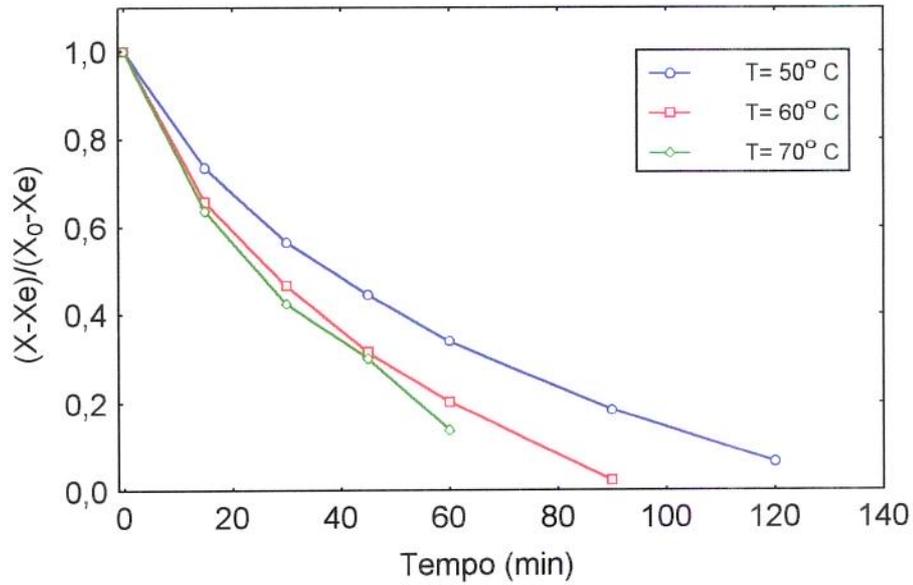


Figura 4.22- Efeito da temperatura na secagem de tomate cereja desidratado osmoticamente ( $v = 0,75 \text{ m/s}$ )

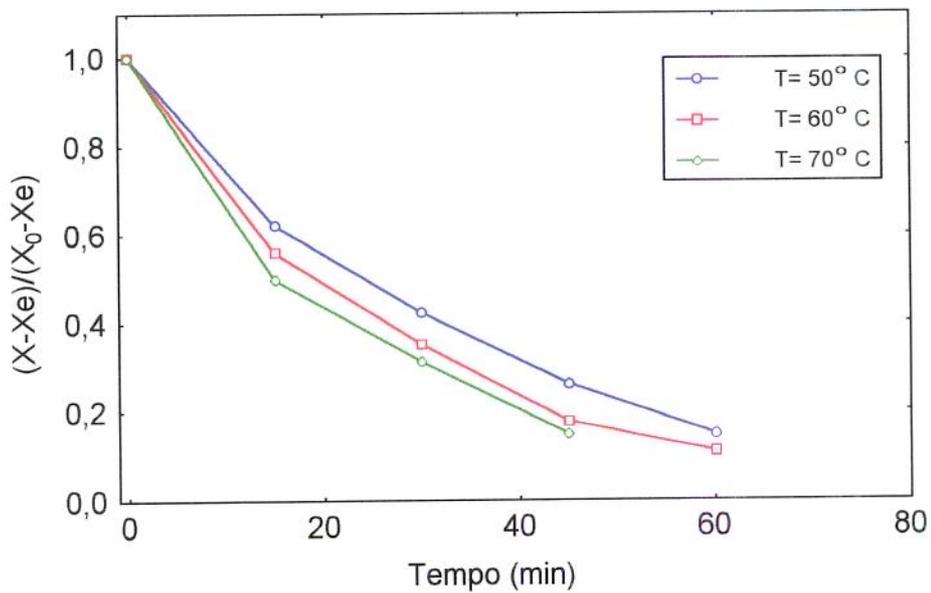


Figura 4.23- Efeito da temperatura na secagem de tomate cereja desidratado osmoticamente ( $v = 2,60 \text{ m/s}$ )

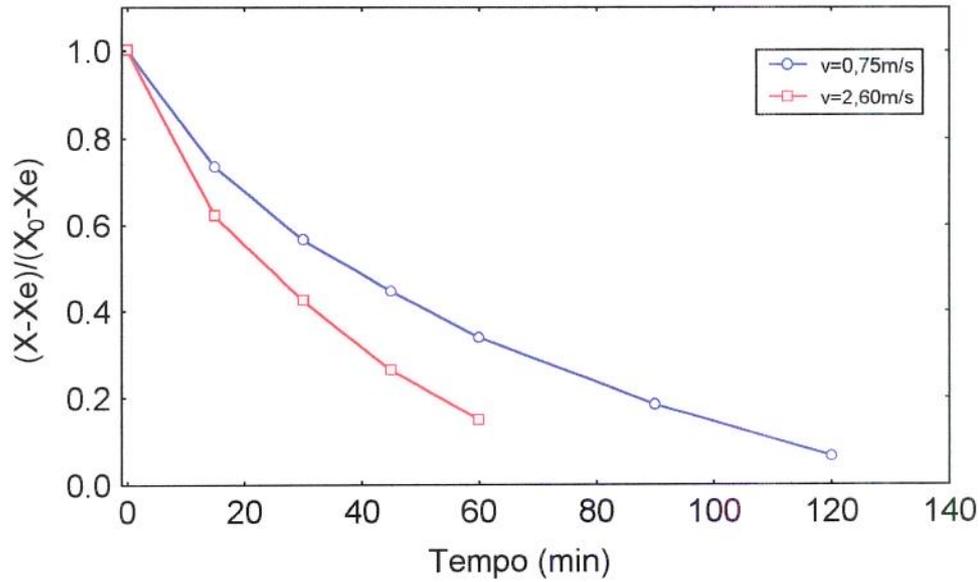


Figura 4.24- Efeito da velocidade do ar de secagem de tomate cereja desidratado (T= 50°C)

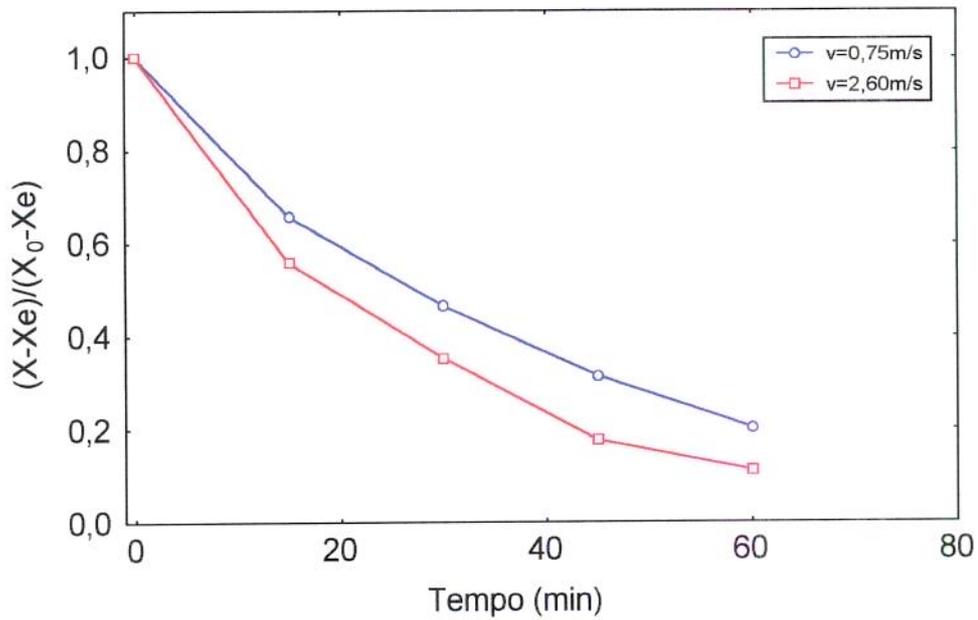


Figura 4.25- Efeito da velocidade do ar de secagem de tomate cereja desidratado (T= 60°C)

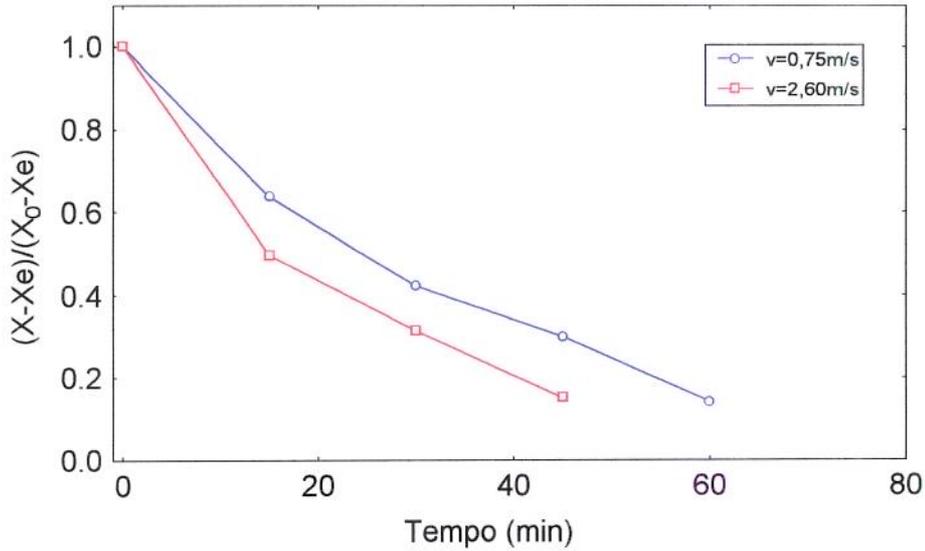


Figura 4.26- Efeito da velocidade do ar de secagem de tomate cereja desidratado ( $T=70^{\circ}\text{C}$ )

Como para o tomate *in natura*, nota-se que o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem provoca maiores taxas de remoção de umidade do produto.

Para o estudo da cinética da fruta desidratada nas três temperaturas (50, 60 e  $70^{\circ}\text{C}$ ) e duas velocidades propostas (0,75 m/s e 2,60 m/s), o modelo difusional simplificado e a equação de Page foram correlacionados aos dados experimentais. Para o modelo difusional simplificado, considerou-se a amostra como placa plana infinita, com uma espessura média de 1,8 mm. A difusividade efetiva foi obtida pela regressão linear do  $\ln\left(\frac{X-X_e}{X_0-X_e}\right)$  em função do tempo (Figuras 4.27 e 4.28). Os valores encontrados estão na Tabela 4.12, assim como os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) e os erros médio relativos (E%). Analisando-se os resultados, percebe-se que os valores da difusividade efetiva aumentam com o acréscimo da temperatura e da velocidade do ar de secagem.

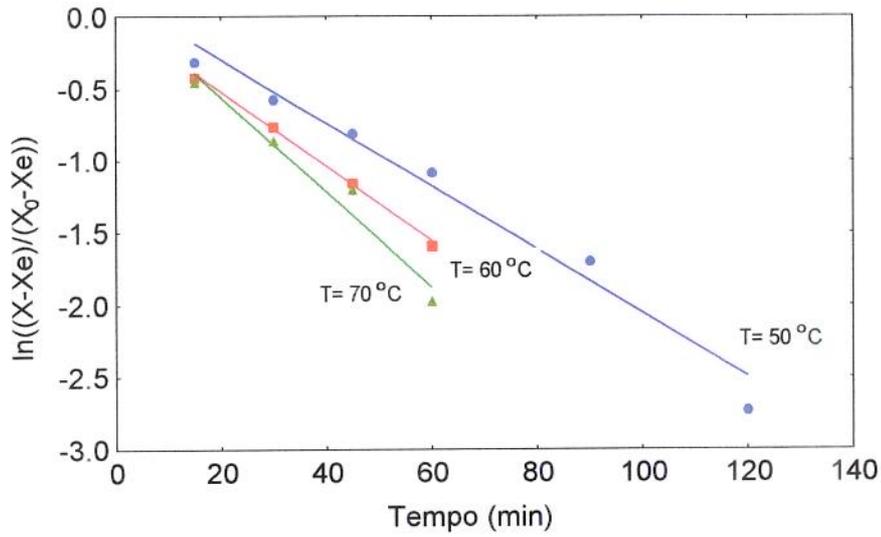


Figura 4.27- Ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem do tomate cereja desidratado osmoticamente pelo modelo difusional simplificado ( $v=0,75$  m/s)

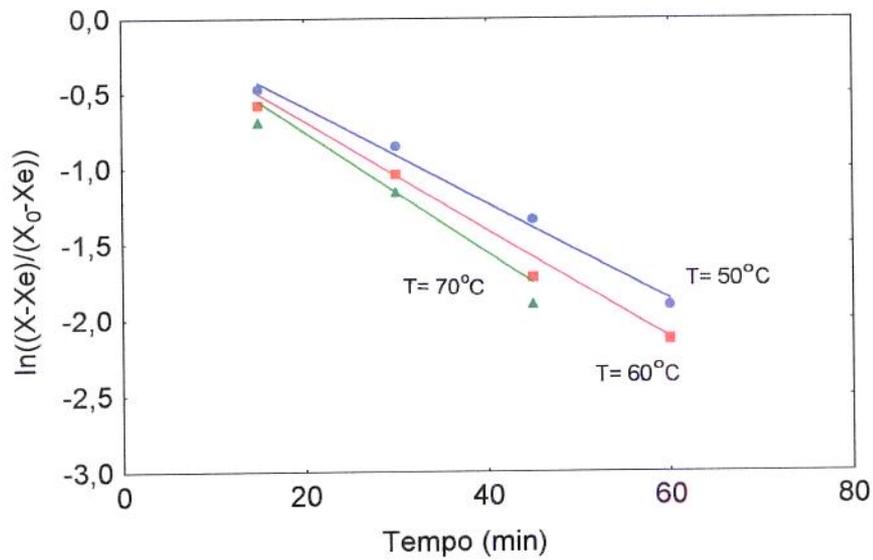


Figura 4.28- Ajuste dos dados experimentais da cinética de secagem do tomate cereja desidratado osmoticamente pelo modelo difusional simplificado ( $v=2,60$  m/s)

**Tabela 4.12-** Valores da difusividade efetiva estimada pelo modelo difusional para o tomate cereja *in natura*

Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)	$D_{ef}$ ( $10^{11}m^2/s$ )	$R^2$	E(%)
50	0,75	3,010	0,988	13,181
	2,60	4,379	0,996	5,439
60	0,75	3,558	0,999	2,654
	2,60	4,926	0,995	6,305
70	0,75	4,516	0,982	9,022
	2,60	5,473	0,981	9,584

Em relação à equação de Page, os parâmetros obtidos através da regressão não linear, os erros médio relativos (E%) e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) encontram-se na Tabela 4.13. As Figuras 4.29 a 4.31 apresentam as curvas de secagem preditas pelo modelo.

**Tabela 4.13** Parâmetros da equação de Page, coeficiente de correlação e erro médio relativo para as temperaturas e velocidades do ar de secagem

Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	$G(10^2)$	$J$	$R^2$	E(%)
50	0,75	0,060	0,916	0,997	15,286
	2,60	0,080	0,936	0,999	4,942
60	0,75	0,090	0,905	0,999	3,109
	2,60	0,051	1,035	0,999	6,803
70	0,75	0,070	0,939	0,997	8,760
	2,60	0,190	0,869	0,997	4,472

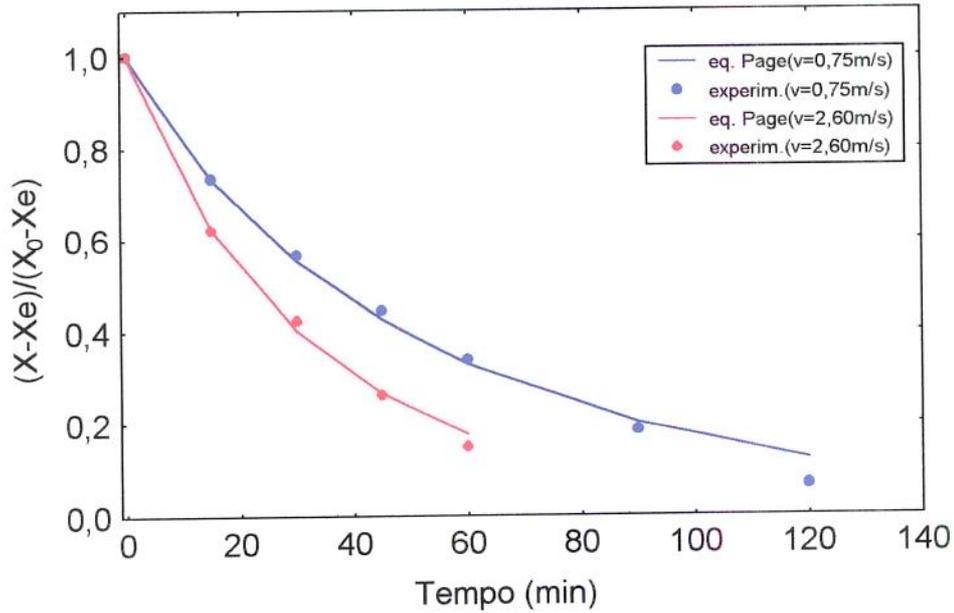


Figura 4.29. - Curva de secagem do tomate cereja desidratado ajustada pela equação de Page para a temperatura de 50°C

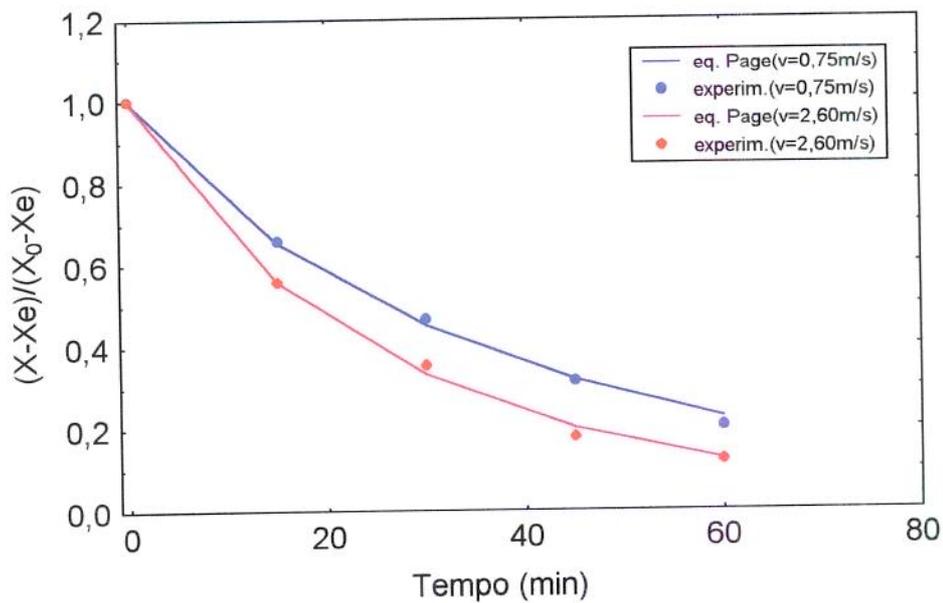


Figura 4.30 - Curva de secagem do tomate cereja desidratado ajustada pela equação de Page para a temperatura de 60°C

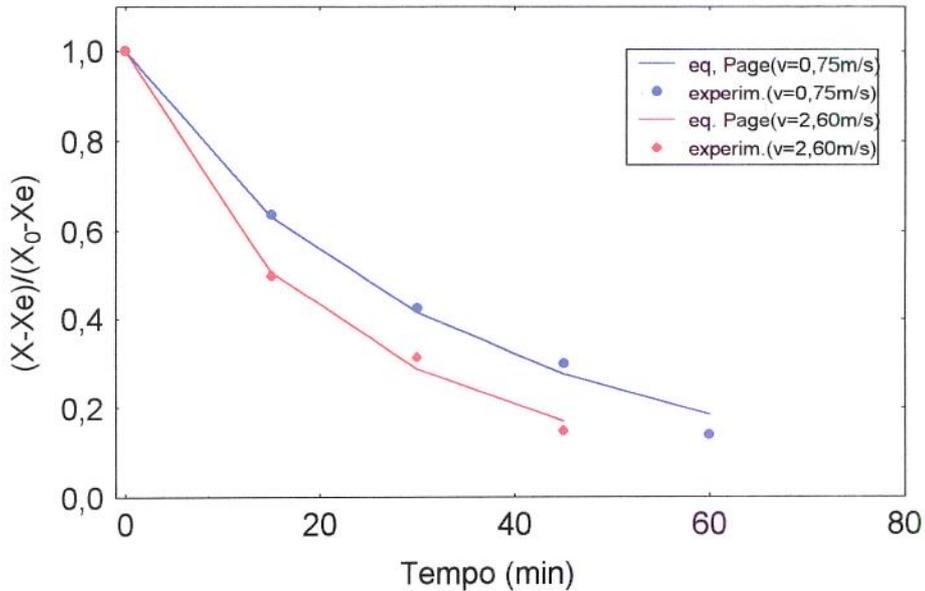


Figura 4.31 - Curva de secagem do tomate cereja desidratado ajustada pela equação de Page para a temperatura de 70 °C

A equação de Page obteve um bom ajuste aos dados experimentais de secagem do tomate cereja desidratado osmoticamente com solução de NaCl 10% p/p, assim como foi para a fruta *in natura*, exceto para a condição 50 °C, 0,75 m/s, onde o erro é maior que 10%.

Nas Figuras 4.32 e 4.33 pode-se analisar o efeito do tratamento osmótico na cinética de secagem para as três temperaturas e duas velocidades do ar de secagem utilizadas.

Para as três temperaturas e duas velocidades do ar de secagem estudadas, observa-se que o tratamento osmótico com solução de NaCl (10% p/p) favoreceu o processo de secagem na temperatura de 50 °C e velocidade de 2,60 m/s. Nessa condição o tratamento osmótico diminuiu o tempo e aumentou a taxa de secagem do produto e também a difusividade efetiva (Tabela 4.14). Para a temperatura de

50°C, mas com uma velocidade mais baixa (0,75 m/s), observa-se que o tratamento osmótico favoreceu muito pouco à taxa de secagem. Nas condições restantes estudadas, 60 e 70°C em ambas velocidades de 0,75 e 2,60 m/s, o tratamento osmótico não diminuiu o tempo de secagem. As taxas de secagem são menores, conforme pode-se analisar através dos dados apresentados na Tabela 4.14. Observa-se que os valores de difusividade efetiva, para o produto tratado osmoticamente com solução de NaCl 10% p/p, são menores, indicando um processo de difusão de água menos favorecido.

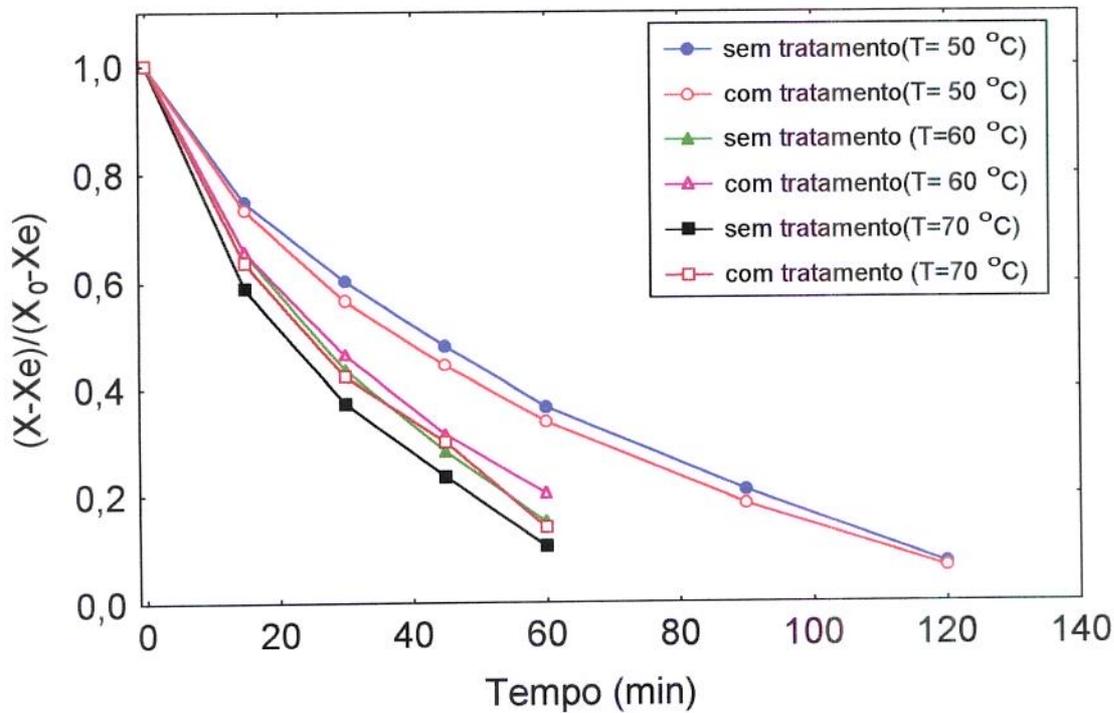


Figura 4.32 - Influência da temperatura do ar na cinética de secagem de tomate cereja com e sem tratamento osmótico para a velocidade do ar de secagem de 0,75m/s

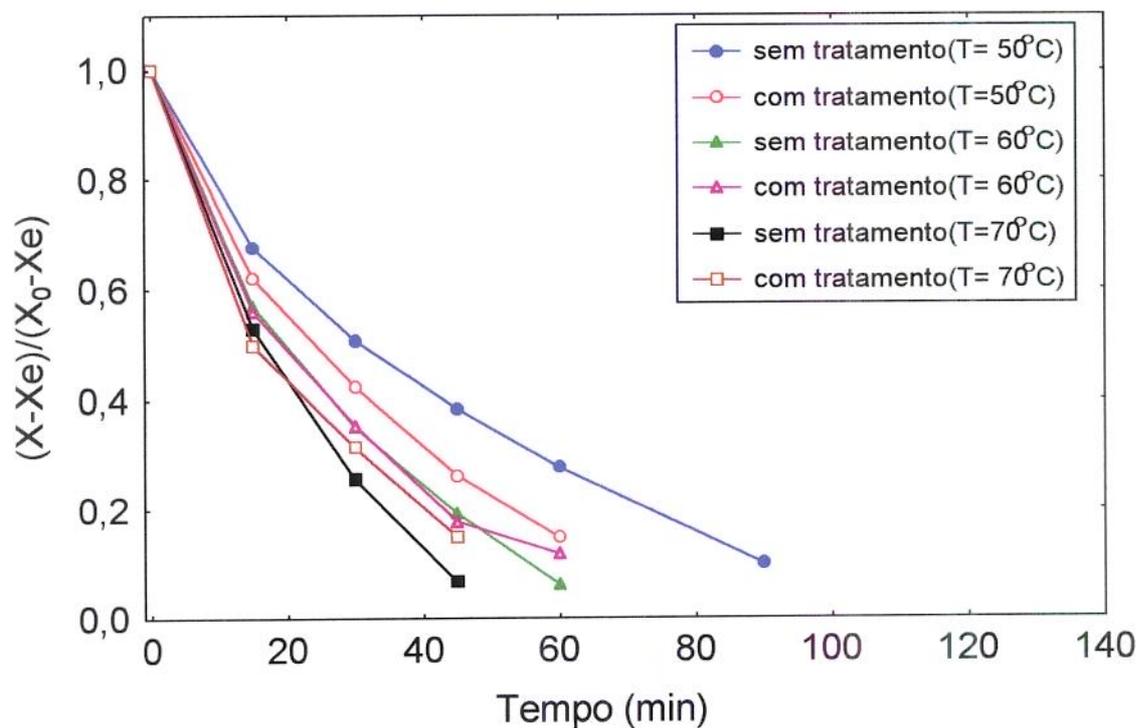


Figura 4.33- Influência da temperatura do ar na cinética de secagem de tomate cereja com e sem tratamento osmótico para a velocidade de 2,60m/s

**Tabela 4.14-** Valores de difusividade efetiva para o tomate cereja com e sem tratamento osmótico

$v$ (m/s)	T (°C)	$D_{ef}$ ( $10^{11}m^2/s$ )	
		sem tratamento	com tratamento
0,75	50	3,010	3,010
	60	4,379	3,558
	70	5,200	4,516
2,60	50	3,421	4,379
	60	6,705	4,926
	70	9,442	5,473

Muitos pesquisadores afirmam que a qualidade do produto seco, como cor e textura, pode ser melhorada ou preservada utilizando-se a desidratação osmótica como pré-tratamento (HAWKES e FLINK, 1978; LERICI et al., 1985). Para o tomate cereja estudado, notou-se que a fruta que sofreu pré-tratamento osmótico prévio em todas as condições de secagem apresentou redução do encolhimento e melhor conservação da cor que o tomate cereja seco sem pré-tratamento, o que pode ser observado pela Figura 4.34. Também foi verificado que o produto desidratado seco apresentou-se mais macio e flexível, concordando com estudos feitos por LENART (1996), trabalhando com a secagem de maçãs desidratadas osmoticamente.

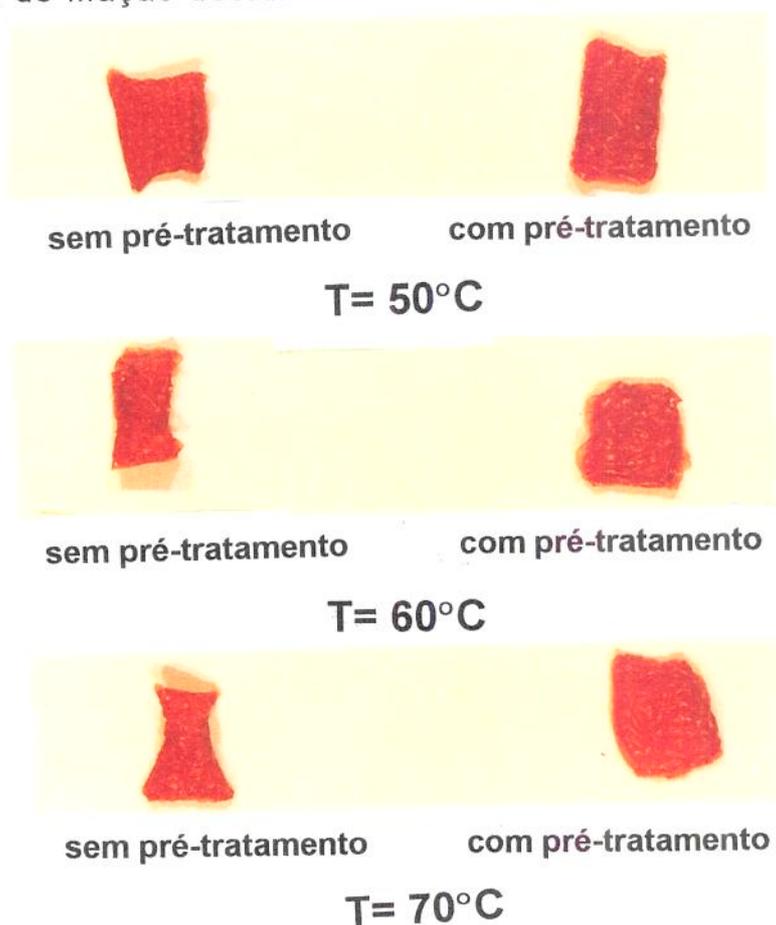


Figura 4.34- Tomate cereja seco com e sem pré-tratamento

#### 4.4.2. Caracterização do produto final

Em relação à caracterização do produto final, as Tabelas 4.15 e 4.16 mostram a variação do teor de ácido ascórbico e da densidade, respectivamente.

**Tabela 4.15-** Variação do conteúdo de ácido ascórbico do tomate cereja seco

Temperatura (°C)	Conteúdo de ácido ascórbico (mg/100g MS)	
	sem pré-tratamento	com pré-tratamento
50	450,19	404,14
60	445,03	389,00
70	442,06	385,24

A maior contribuição do tomate para a dieta humana é o ácido ascórbico. Comparando os dados obtidos na Tabela 4.15 com o do tomate cereja *in natura*, que foi de 560,54 mg/100g massa seca (Tabela 4.1), verifica-se que a secagem reduziu o conteúdo de ácido ascórbico no tomate cereja. OJIMELUKWE (1994), trabalhando com secagem de tomate também obteve uma redução no conteúdo deste ácido. Na Tabela 4.15, observa-se também que as amostras que sofreram pré-tratamento apresentaram maior perda de ácido ascórbico, ou seja, menor conteúdo deste ácido em relação a fruta que não passou pela etapa do tratamento osmótico. Nota-se também, que o conteúdo de ácido ascórbico do produto processado diminui com o aumento de temperatura, concordando com estudos feitos por OJIMELUKWE (1994). Isto pode ter ocorrido devido à solubilidade do ácido ascórbico em água durante o processo de desidratação osmótica, à sua sensibilidade a temperatura e ao fato deste ser facilmente oxidável (LABUZA, 1973; TATUM et al., 1967). Conforme

dados apresentados por GOULD (1974), para variedades de tomate que não inclui o cereja, o suco desidratado tem um conteúdo médio de ácido ascórbico de 239 mg/100g. Comparando com os dados obtidos para o tomate cereja (Tabela 4.15), verifica-se que apesar das perdas ocorridas durante os processos de secagem e/ou desidratação osmótica, o conteúdo de ácido ascórbico final ainda está bem acima.

**Tabela 4.16- Variação da densidade do tomate cereja seco**

Temperatura (°C)	densidade (g/mL)	
	sem pré-tratamento	com pré-tratamento
50	1,3743	1,4083
60	1,3717	1,4765
70	1,7206	1,7896

Em relação a densidade, nota-se (Tabela 4.16) que o tomate cereja desidratado seco apresenta maiores densidades que as frutas sem pré-tratamento, o que pode ser explicado pela perda de água e incorporação de sólidos durante a desidratação osmótica com solução de sal (NaCl) 10%p/p. Com o aumento da temperatura percebe-se um acréscimo significativo nos valores da densidade, quando a temperatura aumenta de 60 para 70°C.

## 5. CONCLUSÕES

1- O tomate cereja *in natura* tem alto teor de umidade de 94,39% , com densidade em torno de 0,99 g/mL.

2- Das condições estudadas no processo osmótico e tomando-se por base o critério da desidratação osmótica ser realizada por um período de tempo pequeno, suficiente para atingir altas taxas de perda de água e ganho de soluto relativamente baixo, escolheu-se a solução de sal (NaCl) 10%p/p e o tempo de imersão de duas horas como a condição usada como pré-tratamento para a secagem.

3- As difusividades aparentes calculadas para a desidratação osmótica através do modelo proposto por AZUARA et al. (1995), adaptado para geometria esférica, forneceram valores da ordem de 1,299 a 8,654 m<sup>2</sup>/s para a água.

4- Para o ajuste das isotermas de dessorção do tomate cereja *in natura*, dos modelos estudados, o de GAB foi o que apresentou melhores resultados, enquanto o modelo de Halsey foi o que melhor descreveu o comportamento de dessorção do tomate cereja desidratado osmoticamente.

5- A equação de Page ajustou melhor os dados experimentais da cinética de secagem, podendo ser utilizado para a predição da cinética de secagem do tomate cereja com e sem pré-tratamento osmótico com solução de NaCl 10% p/p.

6- Os valores de difusividades efetiva calculados através do modelo difusional simplificado, baseado na 2ª lei de Fick, ficaram na

faixa de  $3,010 \times 10^{-11}$  a  $9,442 \times 10^{-11}$   $m^2/s$  para o tomate cereja sem pré-tratamento osmótico e de  $3,010 \times 10^{-11}$  a  $5,473 \times 10^{-11}$   $m^2/s$  para o tomate cereja com pré-tratamento osmótico com solução de sal (NaCl 10% p/p).

7- O tratamento osmótico com solução de NaCl (10% p/p) favoreceu o processo de secagem na temperatura de 50°C e velocidade do ar de secagem de 2,60 m/s, diminuindo o tempo e aumentando a taxa de secagem, e também a difusividade efetiva.

8- Para todas as condições de secagem estudadas (temperaturas do ar de secagem de 50, 60 e 70°C e velocidades de 0,75 e 2,60 m/s), o produto seco com tratamento osmótico apresentou menor encolhimento e melhor conservação da cor, além de mostrar-se mais macio e flexível.

9- Em relação a caracterização do produto final, as amostras tratadas osmoticamente (NaCl 10% p/p) apresentaram maiores perdas de ácido ascórbico e densidades mais altas após o processo de secagem, comparado ao produto sem pré-tratamento.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- ASSOCIATION OF ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). **Official methods of analysis**. 14 ed. Arlington, Virginia, 1984. 1v. (várias paginações)
- 2- AZUARA, E.; BERISTAIN, C.I.; GARCIA, H.S. Development of a mathematical model to predict kinetics of osmotic dehydration. **Journal of Food Science and Technology**, v.29, p.239-242, 1992.
- 3- BARONI, A.F.; HUBINGER, M.D. Drying of onion: effects of pretreatment on moisture transport. **Drying Technology**, v.16, n.9&10, p.2083-2094, 1998.
- 4- BENADO, A.L.; RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of water on rice as calculated from reversible and irreversible isotherms. **Journal of Food Science**, v.50, p.101-108, 1985.
- 5-BISWALL, R. N.; BOZORGMEHR, K.; TOMPKINS, F. D.; LIU, X. Osmotic concentration of green beans prior to freezing. **Journal of Food Science**, 56 (4): 1008-1012, 1991.
- 6- BOLIN, H. R. Relation of moisture to water activity in prunes and raisins. **Journal of Food Science**, v.56, n.4, p1008-1012, 1991.
- 7-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.
- 8-BORGES, S. V.; MENEGALLI, F. C. Influência da desidratação osmótica sobre a cinética de secagem de manga. **Pesq. Agrop. Bras.**, Brasília, v.29. n.4, p. 637-642, 1994.
- 9-BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C.W. **Drying cereal grains**. Westport, Cown, AVI, 1974.
- 10-BRUNAUER, S.; EMMET, T. H.; TELLER, F. Adsorption of gases in multimolecular layers. **G. Am. Chem. Soc.**, 60 (2): 309-319, 1938.
- 11-CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods: part 1 – a review. **Journal of Food Technology**, v.13, p.159-174, 1978.

- 12-CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. **Advances in Drying**, 73-102, 1983.
- 13-COHEN, J. S.; YANG, C. S. Progress in food dehydration. **Trends in Food Science and Technology**, v.6, p.20-24, 1995.
- 14-CORNEJO, F. E. P.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T. **Drying behavior in a continuous vertical annular static mixer dryer.** In: DRYING'98 – PROCEEDINGS OF THE 11<sup>th</sup> INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS'98), C.,1998, Halkidiki. Anais. p.2032-2038.
- 15-COLLIGNAN, A.; RAOULT-WACK, A. L.; THEMELIN, A. Energy study of food processing by osmotic dehydration and air drying. **Agricultural Engineering Journal**, 1 (3): 125-135, 1992.
- 16-CRANK J. **Mathematics of diffusion.** 2ed., Clarendon Press Oxford, 1975, 414p.
- 17-DINCER, I.; DOST, S. An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying. **Drying Technology**, 13 (1&2): 425-435, 1995.
- 18-ERTEKIN, F.K.; CAKALUZ, T. Osmotic dehydration of peas: influence of process variables on mass transfer. **Journal of Food Processing and Preservation**, 20:87-104, 1996.
- 19-FOLQUER, F. **El tomate: estudio de la planta y su producción comercial.** 1.ed. Buenos Aires: Editorial Hemisferio Sur, 1976. 104p.
- 20-FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. **Advances in Drying**, v.1, p.119-153, 1980.
- 21-GAL, S. Recent developments in techniques for the determination of sorption isotherms. In: DUCKWORTH, R. B. (Ed.) **Water relations of foods.** London, Academic, 1972
- 22-GARCIA DE LA CRUZ, A. Desidratação osmótica e secagem de berinjela. Campinas, 1998. 155p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos)- Universidade Estadual de Campinas.
- 23-GOULD, W.A. **Tomato production, processing and quality evaluation.** Westport: The Avi Publishing Company, 1974. 445p.

- 24-GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of Standards A. Physics and Chemistry** , v.81, n.1, p.89-96, 1977.
- 25-GUSTAFSON, R. J.; HALL, G. E. Equilibrium moisture content of shelled corn from 50 to 155 F. **Trans. ASAE**, 17(1): 120-124, 1974.
- 26-HALSEY, G. Physical adsorption on uniform surfaces. **Journal of Chemical and Physics**, v.16, n.10, p.931-937, 1948.
- 27-HAWKES, J.; FLINK, J. Osmotic concentration of fruit slices prior to freeze dehydration. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2: 265-284, 1978.
- 28-HAWLADER, M. N. A.; UDDIN M. S.; HO, J. C.; TENG A. B. W. Drying characteristics of tomatoes. **Journal of Food Engineering**, 14: 259-268, 1991.
- 29-HENDERSON, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, Michigan, v.33, n.1, p.29-32, 1952.
- 30-HOLDSWORTH, S. D. Dehydration of food products: a review. **Journal of Food Technology**, 6: 331-370, 1971.
- 31-HUBINGER, M.; MENEGALLI, F. C.; AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C. Water adsorption isotherms of guava, mango and pineapple. **Journal of Food Science**, 57 (6):1405-1407, 1992.
- 32-IGARASHI, L.; Estudo da **Desidratação Osmótica Como Método de Pré-tratamento na Obtenção de Fatias de Tomate Desidratadas**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1998. (Exame de Qualificação, Faculdade de Engenharia Química).
- 33-IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. Equilibrium moisture contents of air dried beef dependence on drying temperature. **Journal of Food Technology**, v.11, p.565-573, 1976.
- 34-IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. **Handbook of food isotherms: water sorption parameters for food components**. New York: Academic Press, 1982. p.1-10.
- 35-ISLAM, M. N.; FLINK, L. N. Dehydration of potato II – Osmotic concentration and its effect on air drying behavior. **Journal of Food Technology**, v.17, n.3, p.387-403, 1982.

- 36-JASON, A. C. A study of evaporation and diffusion process in the drying of fish muscle. In: **Fundamentals Aspects of the dehydration of Foodstuffs**. The Society of Chemical Industry, New York, 1958.
- 37-KALWAR, M. I.; KUDRA, T.; RAGHAVAN, G. S. V.; MUJUMDAR, A. S. Drying of grains in a drafted two dimensional spouted bed. **Journal of Food Process and Engineering**, v.13, p.321-332, 1991.
- 38-KAUR-SAWHNEY, R.; APPLEWITE, P. B.; GALSTON, A. W. Formation in vitro of ripe tomato fruits from thin layer explants of flower pedicels. **Journal of Fruits and Nuts**, 18 (3): 191-199, 1996.
- 39-KING, C. J. Rates of moisture sorption and desorption in porous dried foodstuffs. **Food Technology**, 22: 165-171, 1968.
- 40-KIRANOUDIS, C T.; MAROULIS, Z. B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D. Equilibrium moisture content of some vegetables. **Journal of Food Engineering**, 20: 55-74, 1993.
- 41-LABUZA, T. P. Sorption phenomena in foods. **Food Technology**, 22 (3): 263-272, 1968.
- 42-LABUZA, T. P. Effect of dehydration and storage on nutrient retention in foods. **Journal of Food Technology**, v.27, n.5, p.20-25, 1973.
- 43-LABUZA, T. P.; KAAANANA, A.; CHEN, J. Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. **Journal of Food Science**, v.50, p.388-391, 1985.
- 44-LANGMUIR, I. The adsorption of gases and plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of American Chemistry Society**, v.46, p.1361-1403, 1918.
- 45-LENART, A. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. **Drying Technology**, 14 (2), 391-413, 1996.
- 46-LERICI, C. R.; PINNAVAIA, G.; DALLA ROSA, M.; BARTOLUCCI, L. Osmotic dehydration of fruits: Influence of osmotic agents on drying behavior and product quality. **Journal of Food Science**, 50: 1217, 1985.

- 47-LEWIS, W. K. The rate of drying of solids materials. **The Journal of Industrial and Eng. Chem.**, 13 (5): 427-432, 1921.
- 48-LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S.; LABUZA, T. P. Moisture transfer properties of dry and semimoist food. **Journal of Food Science**, 50:397-400, 1985.
- 49- MAROULIS, Z.B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D. Application of the GAB model to moisture sorption isotherms for dried foods. **Journal of Food Engineering**, v.7, p.63, 1988.
- 50-MAZZA, G. Dehydration of carrots: effects of drying treatments on moisture transport and product quality. **Journal of Food Technology**, v.18, n.3, p.113-123, 1983.
- 51-MIGUEL, M. H.; KIECKBUSCH, T. G. Desidratação osmótica de frutas: Influência da combinação de solutos. In: ANALES DEL I CONGRESO IBERO-AMERICANO DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS. Campinas, 1995. v.2, p.255-266
- 52-MINAMI, K; HAAG, H. P. **O tomateiro**. 2.ed. Campinas: Fundação Cargill, 1980. 397p.
- 53-MOY, J. H.; LAU, N. B. H.; DOLLAR, A. M. Effect of sucrose and acids on osmotic-dehydration of tropical fruits. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2:131-135, 1978.
- 54-NAGAI, H. Tomate. In: FURLANI, A. M. C; VIÉGAS, G. P (Ed.) **O melhoramento de plantas no Instituto Agrônomo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1993. p.301-313.
- 55-NONNECKE, I. L. **Vegetable production**. 1.ed. New York: Avi book, 1989.p. 200-229
- 56-NUCCI, M. C. C.; MURR, F. E. X. Influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem na qualidade do gengibre seco. Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1995. 45p. (trabalho de iniciação científica).
- 57-OJIMELUKWE,P.C. Effects of processing on ascorbic acid retention and sensory characteristics of tomato products. **Journal of Food Science**, v.3, n.3, p.247-248, 1994.

- 58-OLORUNDA, A.O.; AWORH, O.C.; ONUOHA, C.N. Upgrading quality of dried tomato: effects of drying methods, conditions and pre-drying treatments. **Journal of Science Food Agriculture**, v.52, p.447-454, 1990.
- 59-PAGOTTO, J. M. Tomate (*Lycopersicon esculentum*). In: COORDENADORIA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL (Ed.). Campinas: Instituto Agronômico, 1986. p.435-439
- 60-PERRY'S Chemical Engineer Handbook. 6ed., New York: McGraw-Hill, 1984 (várias paginações).
- 61- PETRO-TURZA, M. Flavour of tomato and tomato products. **Food Ver. Int.**, v.2, p.309-351, 1987.
- 62-PICHA, D. H. Sugar and organic acid content of cherry tomato fruit at different ripening stages. **Hort Science**, v.22, n.1, p.94-96, 1987.
- 63-PONTING, J. D.; WALTERS, G. G.; FORREY, R. R.; JACKSON, R.; STANLEY, W. L.. Osmotic dehydration of fruits. **Food Technology**, 20 (10),:125-128, 1966.
- 64-RANGANNA, S. **Manual of analysis of fruit and vegetables products**. New Delhi: Mc-Graw Hill Publishing Company, 1977. 634p.
- 65-RAOULT-WACK, A. L. Recent advances in the osmotic dehydration of foods. **Trends in Food Science and Technology**, vol.5, p. 255-260, 1994.
- 66-RAOULT-WACK, A. L.; LAFONT, F.; RIOS, G.; GUILBERT, S. Osmotic dehydration: study of mass transfer in terms of engineering properties. In: MUJUNDAR, A. S.; ROQUES, M. A. **Drying of Solids**. New York: Hemisphere Publishing Company, 1989. p. 487-495.
- 67-RAOULT-WACK, A. L.; RIOS, G.; SAUREL, R.; GIROUX, F.; GUILBERT, S. Modeling of dewatering and impregnation soaking process (osmotic dehydration). **Food Research International**, 27: 207-209, 1994.
- 68-RASTOGI, N. K.; RAGHAVARAO, K. S. M. S. Effect of temperature and concentration on osmotic dehydration of coconut. **Food Science and Technology-Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, 27: 564-567, 1994.

- 69-RIZVI, S. S. H. Thermodynamics properties of food in dehydration. In: RAO, M. A; RIZVI, S. S. H. (Ed.) **Engineering Properties of Food**. New York: Academic Press, 1986. p.265-279.
- 70-SANJINÉZ-ARGADOÑA, E.J. Desidratação osmótica de goiaba por imersão e secagem. Campinas, 1999. 102p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos)- Universidade Estadual de Campinas.
- 71-SARAVACOS, G.D.; TSIOURVAS, D.A.; TSAMI, E. Effect of temperature on the water adsorption isotherms of sultana raisins. **Journal of Food Science**, v.51, p.381, 1986.
- 72-SHERWOOD, T. K. The drying of solids II. **Industrial and Engineering Chemistry**, 21 (10): 976-980, 1929.
- 73- SHI, J.X.; LE MAGUER, M.; WANG, S.L.; LIPTAY, A. Application of osmotic treatment in tomato processing- effect of skin treatments on mass transfer in osmotic dehydration of tomatoes. **Food Research International**, v.30, n.9, p.669-674, 1997.
- 74-TATUM, J.H.; SHAW, P.E.; BONNY, R.E. Some compounds formed during non-enzymic browning of orange powder. **Journal of Food Agric. Chem.**, v.15, p,773-775, 1967.
- 75-TEIXEIRO NETO, R. O.; QUAST, D. G. Isotermas de adsorção de umidade em alimentos. **Coletânea do Instituto de Tecnologia de Alimentos**, v.8, p.141-197, 1977.
- 75-TREYBAL, R. E. Drying. In: Mass transfer operations. New York, McGraw-Hill, 1963. p.569-575.
- 76-VAGENAS, G. K.; MARINOS-KOURIS, D.; SARAVACOS, G. D. An analysis of mass transfer in air-drying of foods. **Drying Technology**, 8 (2): 323-342, 1990.
- 77-VALENTINI, S. R. T.; PARK, K. J.; GOMES, R. <sup>a</sup> R.; TORO, L. F. A.; VENTRUCCI, G. Determinação das isotermas de sorção e propriedades físicas de canola (*Brassica napus*). **Coletânea do Instituto de Tecnologia de Alimentos**, v.27, n.1-2, p.101-109, 1997.

- 78-van der BERG, C. Description of water activity of foods for engineering purposes by Mckenna, Elsevier Applied Science, v.1, p. 311-321, 1984.
- 79-VIAL, C.; GUILBERT, S.; CUQ, J. L. Osmotic dehydration of kiwi fruits: influence of process variables on the color and ascorbic acid content. **Science des Aliments**, 11 (1): 63-84, 1991.
- 80-VIDEV, K.; TANCHEV, S.; SHARMA, R. C.; JOSHI, V. K. Effect of sugar syrup concentration and temperature on the rate of osmotic dehydration of apples. **Journal of Food Science and Technology**, 27 (5): 307-308, 1990.
- 81-WOLF, W.; SPIESS, W. E. L.; JUNG, G. **Sorption isotherms and water activity of food material**. London: Elsevier Science Publishing Co., 1985.
- 82-YAMAGUSHI, M. **World vegetables: principles, production and nutritive values**. Chichester: Ellis Horwood Limited, 1983.p.292-298
- 83-YANG, D. C.; LE MAGUER, M. Osmotic dehydration of strawberries in a batch recirculation system. **Journal of Food Quality**, 15: 387-397, 1992.
- 84-YOSHIDA, C. M. P. **Cinética de secagem do milho superdoce**. Campinas, 1997. 149p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- 85-YOUNG, J. H.; NELSON, G. L. Theory of hysteresis between sorption and desorption isotherms in biological materials. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.10, n.2, p.260-263, 1976.
- 86-YOUNG, J. H. Sorption and desorption equilibrium moisture content isotherms of virginia type peanuts. **Transactions of the ASAE**, Oklahoma State University Atillwater, Oklahoma, 1974.
- 87-ZHANG, X. W.; LIU, X.; GU, D. X.; ZHOU, W.; WANG, R.L., LIU, P. Desorption isotherms of some vegetables. **Journal of Science Food and Agriculture**, 70, 303-306, 1996.

## APÊNDICE

**Tabela A.1-** Dados das curvas de secagem de tomate cereja *in natura* na temperatura de 50°C e velocidades de 0,75 e 2,60 m/s

t (min)	v= 0,75 m/s		v= 2,60 m/s	
	X	$(X - X_e)/(X_o - X_e)$	X	$(X - X_e)/(X_o - X_e)$
0	0,967	1	0,927	1
15	0,766	0,748	0,683	0,677
30	0,648	0,603	0,555	0,507
45	0,550	0,481	0,460	0,383
60	0,457	0,365	0,381	0,273
90	0,331	0,209	0,248	0,102
120	0,220	0,072	-	-

**Tabela A.2-** Dados das curvas de secagem de tomate cereja *in natura* na temperatura de 60°C e velocidades de 0,75 e 2,60 m/s

t (min)	v= 0,75 m/s		v= 2,60 m/s	
	X	$(X - X_e)/(X_o - X_e)$	X	$(X - X_e)/(X_o - X_e)$
0	0,930	1	0,935	1
15	0,665	0,656	0,560	0,570
30	0,497	0,436	0,428	0,350
45	0,378	0,281	0,305	0,193
60	0,277	0,150	0,203	0,062

**Tabela A.3** Dados das curvas de secagem de tomate cereja *in natura* na temperatura de 70°C e velocidades de 0,75 e 2,60 m/s

t (min)	v= 0,75 m/s		v= 2,60 m/s	
	X	$(X - X_e)/(X_o - X_e)$	X	$(X - X_e)/(X_o - X_e)$
0	0,931	1	0,931	1
15	0,609	0,589	0,562	0,528
30	0,439	0,373	0,349	0,256
45	0,331	0,235	0,202	0,067
60	0,229	0,105	-	-

**Tabela A.4-** Dados da curva de secagem do tomate cereja desidratado osmoticamente na temperatura de 50°C

t (min)	v= 0,75 m/s		v= 2,60 m/s	
	X	$(X - X_e)/(X_o - X_e)$	X	$(X - X_e)/(X_o - X_e)$
0	0,922	1	0,894	1
15	0,699	0,734	0,590	0,621
30	0,557	0,566	0,432	0,424
45	0,454	0,444	0,302	0,262
60	0,365	0,338	0,210	0,148
90	0,235	0,183	-	-
120	0,136	0,649	-	-

**Tabela A.5-** Dados da curva de secagem do tomate cereja desidratado osmoticamente na temperatura de 60°C

t (min)	v= 0,75 m/s		v= 2,60 m/s	
	X	$(X - X_e)/(X_o - X_e)$	X	$(X - X_e)/(X_o - X_e)$
0	0,905	1	0,908	1
15	0,618	0,657	0,541	0,559
30	0,457	0,465	0,299	0,353
45	0,330	0,314	0,224	0,177
60	0,237	0,203	0,137	0,118

**Tabela A.6-** Dados da curva de secagem do tomate cereja desidratado osmoticamente na temperatura de 70°C

t (min)	v= 0,75 m/s		v= 2,60 m/s	
	X	$(X - X_e)/(X_o - X_e)$	X	$(X - X_e)/(X_o - X_e)$
0	0,909	1	0,912	1
15	0,603	0,637	0,490	0,498
30	0,423	0,423	0,335	0,314
45	0,290	0,300	0,196	0,149
60	0,184	0,139	-	-