

Juan Martin Carrizo

INFLUÊNCIA DE PRÉ-TRATAMENTOS
OSMÓTICOS NA CINÉTICA DE SECAGEM
DE PIMENTÃO UTILIZANDO UM
COLETOR SOLAR

São José do Rio Preto - SP
2002



1910001092



JUAN MARTIN CARRIZO

JUAN MARTIN CARRIZO

INFLUÊNCIA DE PRÉ-TRATAMENTOS
OSMÓTICOS NA CINÉTICA DE SECAGEM DE
PIMENTÃO UTILIZANDO UM
**INFLUÊNCIA DE PRÉ-TRATAMENTOS
OSMÓTICOS NA CINÉTICA DE SECAGEM
DE PIMENTÃO UTILIZANDO UM
COLETOR SOLAR**

Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos, apresentada à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de São José do Rio Preto, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos (Área de Concentração: Engenharia de Alimentos).



Orientador: Prof. Dr. Javier Tello Romero

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo José do Amaral Sobral

São José do Rio Preto - SP

2012



JUAN MARTIN CARRIZO

**INFLUÊNCIA DE PRÉ-TRATAMENTOS
OSMÓTICOS NA CINÉTICA DE SECAGEM DE
PIMENTÃO UTILIZANDO UM
COLETOR SOLAR**

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências,
Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de São
José do Rio Preto, para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos (Área
de Concentração: Engenharia de Alimentos)



T 1092/02

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo José do Amaral Sobral

São José do Rio Preto – SP

2002



+664.028.4
C 318 i

50703005 - Engenharia de
alimentos

JUAN MARTIN CARRIZO

INFLUÊNCIA DE PRÉ-TRATAMENTOS
OSMÓTICOS NA CINÉTICA DE SECAGEM DE
PIMENTÃO UTILIZANDO UM
COLETOR SOLAR

Carrizo, Juan Martin.

Influência de pré-tratamentos osmóticos na cinética de secagem de pimentão utilizando um coletor solar / Juan Martin Carrizo. – São José do Rio Preto : [s.n.], 2002.

100 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Javier Telis-Romero.

Co-Orientador: Paulo José do Amaral Sobral.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas.

1. Secagem solar. 2. Pimentão. 3. Coletor solar. 4. Desidratação osmótica. 5. Isotermas de sorção. 6. Engenharia de Alimentos.

I. Telis-Romero, Javier. II. Universidade Estadual Paulista. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. III. Título.

CDU - 664



JUAN MARTIN CARRIZO

JUAN MARTIN CARRIZO

**INFLUÊNCIA DE PRÉ-TRATAMENTOS
OSMÓTICOS NA CINÉTICA DE SECAGEM DE
PIMENTÃO UTILIZANDO UM
COLETOR SOLAR**

UNESP – S. J. Rio Preto/SP

Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência
de Alimentos – nível de mestrado

UNESP – S. J. Rio Preto/SP

COMISSÃO JULGADORA

TESE PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE

Presidente e Orientador

2º Examinador

3º Examinador

São José do Rio Preto, de de 2002.



DADOS CURRICULARES

JUAN MARTIN CARRIZO

NASCIMENTO	07.05.1972
FILIAÇÃO	Alberto Carrizo Graciela Mercedes Radondy de Carrizo
1991/1998	Curso de Graduação Engenharia de Alimentos UNESP – S. J. Rio Preto/SP
2000/2002	Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, nível de mestrado UNESP – S. J. Rio Preto/SP

Às meus pais Alberto e Graciela

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alivaldo Ferreira Romão pela orientação.

Ao Prof. Dr. Paulo Ibas de Azevedo Sobral pela co-orientação no decorrer deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos (DETAL) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) pela oportunidade de realização deste título.

Aos professores integrantes da banca examinadora: Dr. José Francisco Lopes Filho, Dr. André Luís Cabas, Dr. José Antonio Gomes Vieira e Dr. Fábio Yamashita pelas contribuições e sugestões apresentadas neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Vinícius Silveira Junior (DEAF/UNILAMSP) pelo empréstimo do equipamento para a realização da análise analítica.

Ao grupo de produção de células Luciana Galvão Torzari e Mariana Santana pela ajuda na coleta dos dados experimentais.

Aos técnicos João Jesuário Demilio e Newton Mayer Filho pelo auxílio na montagem dos experimentos.

A coordenação da Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Alimentos pela colaboração.

A FAPESP, processo nº 06/06735-7, pela aquisição dos materiais necessários na construção do coletor.

Aos meus pais Alberto e Graciela.



AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Javier Telis Romero pela orientação.

Ao Prof. Dr. Paulo José do Amaral Sobral, pela co-orientação no decorrer deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos (DETA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) pela oportunidade de obtenção deste título.

Aos professores integrantes da banca examinadora, Dr. José Francisco Lopes Filho, Dra. Ana Lúcia Gabas, Dr. José Antonio Gomes Vieira e Dr. Fábio Yamashita pelas correções e sugestões apresentadas neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior (DEA/FEA/UNICAMP) pelo empréstimo do piranômetro para a medição da radiação solar.

Às alunas de iniciação científica Luciana Caldo Tonzar e Marina Bernardi pela ajuda na coleta dos dados experimentais.

Aos técnicos João Jesuíno Demílio e Newton Mayer Filho pelo auxílio na montagem dos experimentos.

À coordenação de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos pela colaboração.

À FAPESP, processo nº 98/08738-7, pela aquisição dos materiais necessários na construção do coletor solar.



À Coordenadoria de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABELAS	12
NOMENCLATURA	13
RESUMO	15
ABSTRACT	16
1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. INTRODUÇÃO	20
2.2. FUNDAMENTOS DE SECAGEM	21
2.3. DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA	36
2.3.1. MECANISMO DE PROCESSO	37
2.3.2. APLICAÇÃO DE SOLA	40
2.3.3. DIFERENÇAS DE FLUIDIDADE	41
2.4. SECAGEM POR SOLA	42
2.4.1. FUNDAMENTOS	43
2.4.2. DIFERENÇAS	46
2.5. TERMODINÂMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS	50
2.5.1. TERMODINÂMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS	50
2.5.2. MODELO DE DIFUSÃO DE CALOR	52
2.5.3. MODELO DE DIFUSÃO	53
2.5.4. BALANÇO MATERIAL DE SECAGEM	57
3. MATERIAL E MÉTODOS	60
3.1. MATÉRIA-PRIMA	60
3.2. PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO	60
3.2.1. DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURA DE SECAGEM	61
3.2.2. DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURA	63
3.3. ISOTERMAS DE SECAGEM	63

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABELAS	12
NOMENCLATURA	13
RESUMO	15
ABSTRACT	16
1. INTRODUÇÃO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. INTRODUÇÃO.....	20
2.2. FUNDAMENTOS DE SECAGEM.....	21
2.3. DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA	30
2.3.1. VARIÁVEIS DE PROCESSO	33
2.3.2. ATIVIDADE DE ÁGUA	40
2.3.3. CONSIDERAÇÕES DE EQUILÍBRIO	41
2.4. SECAGEM SOLAR	43
2.4.1. ENERGIA SOLAR	44
2.4.2. COLETOR SOLAR	46
2.5. TERMODINÂMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS	50
2.5.1. CONTEÚDO DE ÁGUA DE EQUILÍBRIO.....	50
2.5.2. MODELOS EMPÍRICOS DE ISOTERMAS	52
2.5.3. MÉTODOS DE MEDIDA.....	56
2.5.4. CALOR ISOSTÉRICO DE SORÇÃO	57
3. MATERIAL E MÉTODOS	60
3.1. MATÉRIA-PRIMA	60
3.2. PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO	60
3.2.1. DETERMINAÇÃO DE CLORETO DE SÓDIO	61
3.2.2. DETERMINAÇÃO DE UMIDADE	63
3.3. ISOTERMAS DE SORÇÃO	63

3.4. SECADOR SOLAR.....	65
3.4.1. DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO APARENTE	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1. ISOTERMAS	69
4.1.1. AJUSTE DAS CURVAS DE DESSORÇÃO	73
4.1.2. CALOR ISOTÉRICO DE SORÇÃO	77
4.2. SECAGEM SOLAR	83
5. CONCLUSÕES	91
6. SUGESTÕES	92
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Curva de secagem genérica, onde X é a umidade em base seca (kg água/kg matéria seca), κ é a taxa de evaporação de umidade (kg água/kg matéria seca.h), X_c é a umidade crítica e κ_c a taxa crítica correspondente.	22
Figura 2.2: Transferência de massa.....	31
Figura 2.3: Foto explodida de um coletor solar	47
Figura 2.4: Sistema de aquecimento.....	48
Figura 3.1: Cuba de pré-tratamento osmótico.....	61
Figura 3.2: Secador Solar.....	66
Figura 4.1: Isotermas de dessorção de pimentão na temperatura de 20°C em três diferentes concentrações osmóticas de NaCl e in natura	70
Figura 4.2: Isotermas de dessorção de pimentão na temperatura de 30°C em três diferentes concentrações osmóticas de NaCl e in natura	70
Figura 4.3: Isotermas de dessorção de pimentão na temperatura de 40°C em três diferentes concentrações osmóticas de NaCl e in natura	71
Figura 4.4: Isotermas de dessorção de pimentão na temperatura de 50°C em três diferentes concentrações osmóticas de NaCl e in natura	71
Figura 4.5: Isotermas de dessorção de pimentão na temperatura de 60°C em três diferentes concentrações osmóticas de NaCl e in natura	72
Figura 4.6: Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, para pimentão in natura.....	78
Figura 4.7: Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, para pimentão tratado com solução salina de 10%.....	79
Figura 4.8: Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, para pimentão tratado com solução salina de 15%.....	79

Figura 4.9: Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, para pimentão tratado com solução salina de 20%..... 80

Figura 4.10: Influência do conteúdo de umidade no calor de sorção de pimentão in natura 81

Figura 4.11: Influência de pré-tratamentos osmóticos no calor de sorção de pimentão... 82

Figura 4.12: Influência da concentração de NaCl na secagem de pimentões vermelhos..... 86

Figura 4.13: Histórico da radiação solar ao longo dos experimentos de secagem relacionados com a Figura 4.12... 86

Figura 4.14: Histórico da temperatura no coletor solar ao longo dos experimentos de secagem relacionados com a Figura 4.12... 87

Figura 4.15: Ajuste da solução analítica da equação de difusão em experimentos de secagem solar para pimentões..... 88

Figura 4.16: Influência do pré-tratamento osmótico nos coeficientes de difusividade efetiva durante a secagem solar de pimentão..... 89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Frutas osmo-desidratadas.....	36
Tabela 2.2: Hortaliças osmo-desidratadas	37
Tabela 3.1: Experimentos para pimentão in natura e pré-tratado osmoticamente utilizando o coletor solar.....	67
Tabela 4.1: Parâmetros dos modelos de GAB, Peleg e Lewicki, e SSR, calculados pelo ajuste das isothermas de dessorção do pimentão in natura a diferentes condições de temperatura.....	74
Tabela 4.2: Parâmetros dos modelos de GAB, Peleg e Lewicki, e SSR, calculados pelo ajuste das isothermas de dessorção do pimentão tratado com uma solução osmótica de 10% de NaCl a diferentes condições de temperatura.....	75
Tabela 4.3: Parâmetros dos modelos de GAB, Peleg e Lewicki, e SSR, calculados pelo ajuste das isothermas de dessorção do pimentão tratado com uma solução osmótica de 15% de NaCl a diferentes condições de temperatura.....	76
Tabela 4.4: Parâmetros dos modelos de GAB, Peleg e Lewicki, e SSR, calculados pelo ajuste das isothermas de dessorção do pimentão tratado com uma solução osmótica de 20% de NaCl a diferentes condições de temperatura.....	77
Tabela 4.5: Parâmetros q_0 e X_0 , coeficiente de determinação (R^2) e nível de significância (P) do ajuste da equação de Tsami et al. (1990), para os dados do calor isostérico de sorção e da umidade de pimentão in natura e pré-tratado osmoticamente	83
Tabela 4.6: Condições experimentais para a secagem de pimentão in natura e pré-tratado osmoticamente utilizando um coletor solar	83
Tabela 4.7: Coeficientes de difusão determinados para pimentão in natura e pré-tratado osmoticamente utilizando um coletor solar	88

a = constante da equação (2.6)

A, B, D, E = constantes da equação (2.16)

a_w = atividade de água

C = constante de Guggenheim ou de BET, adimensional

D = difusividade, $[L^2 \theta^{-1}]$

F, G, H = constantes da equação (2.17)

f_w = fugacidade da água na solução $[F.L^{-2}]$

f_o = fugacidade da água pura $[F.L^{-2}]$

h = coeficiente de transferência de calor, $[F.L^{-1}T^{-1}\theta^{-1}]$

H_m = calor total de sorção da 1ª camada, [H]

H_n = calor total de sorção das multicamadas, [H]

K = constante da Equação de GAB, adimensional

L = espessura, [L]

M = umidade, adimensional

N_a = fluxo mássico, $[M \theta^{-1} L^{-2}]$

p = pressão de vapor de água no alimento, $[F.L^{-2}]$

p_o = pressão de vapor da água pura, $[F.L^{-2}]$

Q_{st} = calor isostérico de sorção, $[H.M^{-1}]$

q_{st} = excesso de calor isostérico de sorção, $[H.M^{-1}]$

r = raio, [M]

R = constante universal dos gases ($R = 0,46188 \text{ kJ/kgK}$), $[H.M^{-1}]$

T = temperatura absoluta, [T]

t = tempo, [θ]

V = volume da amostra, $[L^3]$

X = umidade da amostra, adimensional

X_m = teor de umidade na monocamada

Letras Gregas

λ = calor latente de vaporização da água, [FL.M⁻¹]

μ_i = potencial químico da espécie i

Sub-índices

ap = aparente

bu = bulbo úmido

eq = equilíbrio

o = inicial

w = água



RESUMO

Neste trabalho estudou-se a cinética de secagem de pimentão vermelho (*Capsicum annuum*), analisando-se a influência de pré-tratamentos osmóticos com soluções de cloreto de sódio. As concentrações utilizadas foram 10, 15 e 20% (p/p). Obtiveram-se parâmetros necessários ao projeto de secadores, como isothermas de sorção e coeficientes de difusão aparente em função do pré-tratamento osmótico. Para os ensaios de secagem utilizou-se um secador de leito fixo com coletor solar. As curvas da cinética de secagem foram bem representadas pela solução analítica da equação de difusão para uma placa plana, utilizando-se cinco termos da série, apresentando coeficientes de determinação próximos à unidade. Os valores dos coeficientes de difusão de água aparente ficaram na faixa de $0,30 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a $0,52 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. As isothermas de dessorção foram obtidas em diversas temperaturas (20, 30, 40, 50 e 60°C) e foram ajustadas com três diferentes equações: Peleg, GAB e Lewicki. O modelo de melhor ajuste aos dados experimentais foi o de Peleg. A partir das curvas de equilíbrio ajustadas por Peleg, calculou-se o calor isostérico de sorção em função do pré-tratamento osmótico dos pimentões.

ABSTRACT

Red pepper (*Capsicum annuum*) drying kinetics was studied in this work, analyzing the influence of osmotic pre-treatments with solutions of sodium chloride. The concentrations used were 10, 15, and 20% (p/p). Parameters necessary for dryers design, such as sorption isotherms and apparent diffusion coefficients as a function of the osmotic pre-treatment, were obtained. A type-cabinet (steady bed) dryer with a solar collector was used for the drying experiments. The drying kinetics curves were well represented by the analytic solution of the diffusion equation for a flat plate, with a five-term series, showing determination coefficients close to unity. The apparent water diffusion coefficients values ranged from $0,30 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and $0,52 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Desorption isotherms for different temperatures (20, 30, 40, 50 and 60°C) were obtained and fitted with three different equations, Peleg, GAB and Lewicki. Peleg was found to be the best fit for the experimental data. The isosteric heat of sorption as a function of the peppers osmotic pre-treatment was calculated from the equilibrium curves fitted by Peleg.

1. INTRODUÇÃO

Um dos procedimentos mais importantes de conservação de alimentos por diminuição de sua atividade de água (a_w) é a desidratação ou secagem. Considerando que a maioria dos produtos vegetais é constituída por mais de 80% de água, o processo de secagem implica em uma considerável redução de custos em transporte e manipulação do produto, além de prover um efetivo método de prolongamento de sua vida útil (Gabas, 1998).

O pimentão é originário da região tropical da América, incluindo México, América Central, e América do Sul. O formato e o tamanho dos frutos variam grandemente em função dos cultivares plantados. Existem frutos cônicos, quadrados e alongados, cuja coloração pode variar de verde, amarelo, vermelho, creme e até arroxeados.

As pimentas e os pimentões pertencem ao mesmo gênero. As pimentas picantes secas são utilizadas em larga escala pela população do sudoeste dos Estados Unidos e México. Uma grande quantidade de pimentões é seco para o preparo de páprica, um pó adocicado bastante utilizado na mesa e na cozinha.

O produto seco é usado como tempero e para melhorar o aspecto de diversos produtos alimentícios incluindo os enlatados. Alguns pimentões picados são parcialmente secos, misturados com sal em



quantidade suficiente para garantir a conservação, e embalados em barris para uso em vários produtos alimentícios industrializados.

Nos últimos anos, no entanto, o acesso facilitado a um grande número de produtos importados, tem aproximado o brasileiro de alimentos tradicionalmente consumidos em outros países, como os vegetais desidratados. Basicamente, o pimentão pode ser utilizado cru em saladas, podem ser recheados ou assados, ou mesmo adicionados em sua forma desidratada em sopas e ensopados.

A utilização de energia solar como fonte alternativa para secagem de produtos agrícolas e alimentares tende a se tornar cada dia mais difundida, já que os combustíveis derivados do petróleo comumente usados estão se tornando cada vez mais caros e poluem o meio ambiente, e a energia elétrica nem sempre é disponível no meio rural, assim como nos últimos tempos encontra-se deficiente.

Apesar de o uso da energia solar para aquecimento do ar na secagem de produtos alimentícios estar recebendo muita atenção nos últimos tempos, existe ainda um vazio em informações quantificadas e confiáveis sobre o desempenho dos vários tipos de coletores solares utilizados para este fim. Principalmente, em se tratando de coletores não fabricados industrialmente.

Considerando a importância econômica e social da cultura do pimentão no estado de São Paulo, e um crescente aumento do consumo de produtos desidratados pelos brasileiros, a pesquisa e o



desenvolvimento de um processo de desidratação que resulte em um produto de qualidade, com alto valor agregado, é plenamente justificável.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

O pimentão vermelho (*Capsicum annuum*) é uma hortaliça de forma e tamanho que variam amplamente em função dos cultivares plantados, cuja coloração pode ser amarela, vermelha, verde, e até mesmo púrpura. A planta é originária da região tropical da América: México, América Central e América do Sul inclusive o Brasil. As pimentas e os pimentões pertencem ao mesmo gênero.

Normalmente, os pimentões são consumidos in natura, assados, recheados ou em molhos, no entanto, alguns pimentões são secos para o preparo de páprica e outras especiarias. Os pimentões também podem ser parcialmente secos e misturados com sal para assegurar a sua conservação.

As pimentas picantes secas são utilizadas em larga escala pela população do sudoeste dos Estados Unidos e México. O produto seco é usado como tempero e para melhorar o aspecto de diversos produtos alimentícios incluindo os enlatados. De acordo com o Instituto de Economia Agrícola do Estado de São Paulo (2002), somente este estado contribuiu nas safras de 1998, 1999 e 2000 com cerca de 79,2; 82,1; e 65,3 toneladas de pimentão, respectivamente.



Em relação ao processamento, sendo um produto amplamente utilizado, ainda há um grande potencial na extensão do mercado para pickles (conservas) e para as formas secas de pimenta e pimentão.

2.2. FUNDAMENTOS DE SECAGEM

A técnica mais utilizada na produção de frutas e hortaliças desidratadas é a secagem por ar quente, onde uma batelada do material a ser seco, usualmente na forma de pequenos pedaços ou fatias, é submetida a uma corrente de ar quente paralela ou perpendicular ao leito de sólidos.

A desidratação é uma operação unitária que envolve a transferência simultânea de calor e massa. A transferência de calor, necessária para evaporação da umidade, é geralmente baseada no mecanismo de convecção. Quanto à transferência de massa, existem dois aspectos importantes a serem considerados: o transporte da água no interior do sólido a ser seco até a superfície e a remoção do vapor a partir da mesma. O processo, usualmente representado por uma curva de secagem (Figura 2.1), pode ser dividido em três fases, descritas abaixo.

1ª Fase (AB) – Aquecimento do material até a temperatura de secagem desejada: a elevação da temperatura causa um rápido aumento na taxa de secagem.



2ª Fase (BC) – Período de taxa constante: a velocidade de transferência de massa (umidade) no interior do sólido poroso é igual à velocidade de evaporação da água na superfície do mesmo.

3ª Fase (CD) – Período de taxa decrescente: a velocidade de transferência de massa no interior do sólido é menor que a taxa de evaporação na superfície, ocorre a elevação da temperatura do produto.

No estudo da secagem, depois da obtenção das curvas e da caracterização dos períodos de secagem, é interessante descrever o processo matematicamente, de forma que as equações obtidas possam ser utilizadas no próprio estudo da cinética de secagem ou em projetos de secadores.

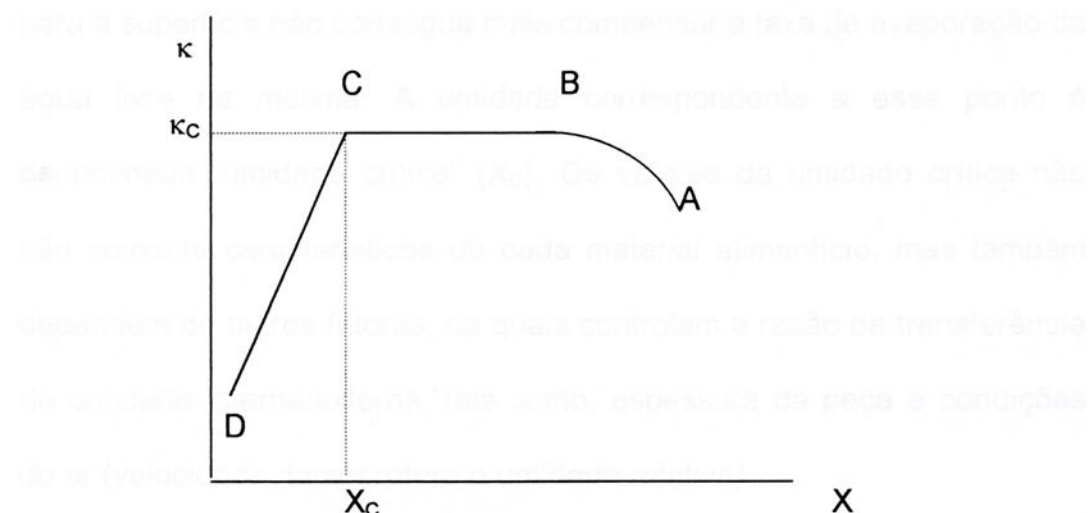


Figura 2.1. Curva de secagem genérica, onde X é a umidade em base seca (kg água/kg matéria seca), κ é a taxa de evaporação de umidade (kg água/kg matéria seca.h), X_c é a umidade crítica e κ_c a taxa crítica correspondente.

No período de secagem em taxa constante, a água evapora de acordo com o fornecimento de calor para o sólido úmido e, portanto, a transferência de calor gás-sólido controla o processo. Como todo calor transferido é convertido em calor latente, pode-se representar a taxa de secagem da seguinte forma (Nicoleti et al., 2001):

$$Na = \frac{h(T_g - T_{bu})}{\lambda} \quad (2.1)$$

onde Na é o fluxo mássico, h é o coeficiente de transferência de calor, T_g é a temperatura do ar, T_{bu} é a temperatura de bulbo úmido do ar e λ é o calor latente de vaporização da água a T_{bu} .

De acordo com Chirife (1983), o fim do período de taxa constante corresponde ao instante em que a migração interna de água para a superfície não consegue mais compensar a taxa de evaporação da água livre da mesma. A umidade correspondente a esse ponto é denominada “umidade crítica” (X_c). Os valores da umidade crítica não são somente característicos de cada material alimentício, mas também dependem de outros fatores, os quais controlam a razão da transferência de umidade interna/externa, tais como, espessura da peça e condições do ar (velocidade, temperatura e umidade relativa).

Na desidratação de frutas e hortaliças, o período de taxa decrescente é especialmente importante. Nessa fase, as partes externas do material já estão secas, enquanto o interior ainda pode conter quantidades significativas de umidade. A partir desse ponto, o processo

consome grandes quantidades de energia e os atributos físicos, sensoriais e nutricionais do produto podem ser prejudicados devido à elevação da temperatura (Nicoleti et al., 2001).

O período de taxa decrescente, segundo Chirife (1983), se inicia quando a migração interna de umidade passa a controlar o processo. Para a primeira fase do período de taxa decrescente, a migração de água ocorre principalmente por escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor, podendo estes mecanismos ocorrerem simultaneamente.

Para descrever o processo de secagem no período de taxa decrescente, utilizam-se modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos. Esses modelos são geralmente baseados no fenômeno de transferência de massa, negligenciando-se o efeito de transferência de calor.

De acordo com Daudin (1983), a teoria de migração de água por difusão pode ser escrita exclusivamente com a lei de Fick, expressa em termos do gradiente de umidade, que enfoca principalmente o estudo dos efeitos globais do fenômeno interno, não descrevendo os possíveis mecanismos de migração.

O modelo teórico utilizado para interpretar a secagem de alimentos e de produtos agrícolas é a teoria da difusão da umidade como líquido ou vapor, representada pela equação da difusão, derivada da lei de Fick (Crank, 1975):



$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_{ap} \nabla X) \quad (2.2)$$

onde X é a umidade em base seca, t é o tempo e D_{ap} é a difusividade aparente.

Como o fenômeno de migração é complexo, trabalha-se com a difusividade efetiva, que engloba todos os efeitos que podem intervir nesse fenômeno. As soluções analíticas para a equação da difusão, aplicam-se a sólidos de forma geométrica simples e constante ao longo do processo.

Considerando-se que o sólido seja uma placa plana com ambas as superfícies expostas ao ar de secagem, de difusividade constante, variação do volume desprezível e que o efeito do gradiente de temperatura no interior da amostra também seja desprezível, tem-se a seguinte solução analítica (Crank, 1975):

$$M = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[- (2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{ap} t}{L^2} \right] \quad (2.3)$$

onde M é a umidade adimensional $(X - X_{eq})/(X_0 - X_{eq})$, X é a umidade da partícula em base seca, X_{eq} é a umidade de equilíbrio em base seca, X_0 é a umidade inicial em base seca, D_{ap} é a difusividade aparente, t é o tempo e L é a espessura da amostra.

A maioria dos cereais (arroz, trigo, feijão, soja, etc.) apresentam uma pequena mudança de volume durante a secagem. Desta maneira, a solução analítica pode ser aplicada satisfatoriamente no



estudo destes materiais. Para alimentos de alto conteúdo de umidade como a maioria das frutas (uva, caqui, abacaxi, maçã, etc.) a variação de volume é grande e, por esta razão, as soluções analíticas não podem ser aplicadas de forma exata e devem ser consideradas como aproximações da solução real.

Alguns modelos semi-teóricos são baseados na teoria da difusão, assumindo que a resistência ocorre numa fina camada na superfície das partículas, como o modelo de Lewis, análogo à lei de resfriamento de Newton, que na sua forma integrada é comumente chamada de modelo exponencial. Este modelo estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre dada pela equação abaixo (Parry, 1985):

$$\frac{dX}{dt} = -K_4(X - X_{eq}) \quad (2.4)$$

onde o fator de proporcionalidade K_4 é denominado de constante de secagem, X é a umidade absoluta e X_{eq} é a umidade de equilíbrio.

A equação acima é normalmente utilizada na forma integrada como:

$$M = \exp(-K_4 t) \quad (2.5)$$

onde M é a umidade adimensional, t é o tempo e K_4 a constante de secagem.

A equação (2.5) pode ser apresentada com duas importantes modificações do modelo exponencial na forma integrada com

dois e três parâmetros, que apresentam bons ajustes experimentais, sendo dadas pelas equações:

$$M = a \cdot \exp(-K_4 t) \quad (2.6)$$

$$M = c \cdot \exp(-K_4 t^n) \quad (2.7)$$

A equação (2.6) é similar à solução do modelo de Fick (eq. 2.3) para tempos de secagem longos, quando apenas o primeiro termo da solução em série for significativo, ou seja, $m=1$ (McCormick, 1983). Esta correlação é utilizada por muitos pesquisadores da área de secagem para determinação da difusividade aparente a partir da constante de secagem, como observado nos trabalhos de Mazza & Lemaguer (1980) para cebola, Aguerre et al. (1982) para arroz, Carbonell et al. (1986) para pimenta, Saravacos & Raouzeous (1986) para amido, Yusheny & Poulsen (1988) para batata e Tobinaga & Pinto (1992) para filés de peixes. A relação entre estes parâmetros é :

$$K_4 = \frac{\pi^2 D_{ap}}{4L^2} \quad \text{para lâminas (secagem por um lado)}$$

$$K_4 = \frac{\pi^2 D_{ap}}{L^2} \quad \text{para lâminas (secagem pelos dois lados)}$$

$$K_4 = \frac{\pi^2 D_{ap}}{r^2} \quad \text{para esferas}$$

A equação (2.7) é conhecida como modelo de Page, sendo freqüentemente utilizada nos estudos da secagem de produtos



agrícolas, em particular para grãos e sementes, por apresentar excelentes resultados (Parti & Dugmanics, 1990; Pathak et al., 1991). Misra & Brooker (1980) compilaram dados de secagem de milho em camada fina, de nove fontes diferentes, e os ajustaram através da Equação de Page, observando que n reflete a resistência interna à secagem, enquanto K representa os efeitos das condições externas. Gabas (1998) estudou a influência da temperatura e pré-tratamento químico na secagem de uva da variedade Itália, ajustando a equação de Page aos dados experimentais, a qual representou satisfatoriamente as curvas de secagem. Neste estudo, os resultados mostraram uma dependência linear do parâmetro " K " da Equação de Page com a temperatura do ar de secagem e do parâmetro " n " com a concentração de oleato utilizado no pré-tratamento químico das uvas.

Segundo Van Arsdell et al. (1973), o fator que mais influencia a taxa de secagem é a natureza da matéria prima, compreendendo constituição química e física das paredes das células.

Vagenas et al. (1990), ao estudarem a secagem de alimentos, verificaram que dentre as dificuldades ou problemas encontrados durante a secagem, tem-se a complexidade da composição e estrutura do alimento e mais especificamente:

- os coeficientes de transferência de calor e massa, bem como as propriedades termodinâmicas do alimento, são funções da temperatura e



umidade, de forma que a equação diferencial resultante do novo sistema torna-se não linear e somente pode ser resolvida por métodos numéricos;

- o alimento encolhe consideravelmente, ocasionando mudanças no tamanho e forma, afetando a taxa de secagem. Alguns autores negligenciam o encolhimento considerando seus efeitos na difusividade efetiva ou aparente. Quando o encolhimento é considerado, seu efeito é reconhecido somente como decréscimo nas dimensões da amostra.

O estudo do encolhimento é de grande importância para um melhor entendimento do processo de secagem. Suarez & Viollaz (1991), analisando a secagem de batata, compararam o uso da segunda lei de Fick com difusividade constante e sem encolhimento e da lei de Fick de difusão com encolhimento, encontrando resultados diferentes. Alguns pesquisadores têm admitido que o decréscimo do volume durante a secagem seja equivalente ao volume removido de umidade (Lozano et al., 1983) e por isso, durante a secagem do produto, seu volume decresce linearmente com a umidade. Wang & Brennan (1995) observaram que o encolhimento afeta as propriedades físicas dos materiais, como a densidade e a porosidade. Durante a secagem de batata, eles verificaram algumas mudanças na estrutura deste produto (com auxílio de microscópio), assim como na densidade e porosidade. A densidade, num dado teor de umidade, decresce com o aumento da temperatura de secagem.



Apenas um pequeno número de problemas de difusão com fronteira móvel admitem solução analítica, e, geralmente são necessárias técnicas numéricas para a sua solução.

2.3 DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA

A desidratação osmótica é uma técnica muito útil para eliminação de água de frutas e vegetais, realizada pela colocação dos alimentos sólidos, inteiros ou em peças, em soluções açucaradas ou salgadas, de pressão osmótica maior que a do produto.

Em uma situação osmótica ideal uma membrana semipermeável deixaria passar as moléculas do solvente, mas não as moléculas do soluto. Em frutas e vegetais, as membranas da parede celular são unidades biológicas vivas que podem estirar-se ou dilatar-se sob a influência do crescimento e da pressão gerada no interior das células. Estas membranas celulares estão compostas principalmente de células parênquimas, que livremente permitem a passagem das moléculas do solvente mas também em menor grau a passagem de algumas moléculas do soluto. Esta difusão de soluto dependerá do peso molecular do mesmo. Este tipo de membrana pode ser classificada diferencialmente como permeável ao invés de semipermeável (Torreggiani, 1993).

Desidratação osmótica é um método que consiste em remover água de alimentos por imersão em soluções concentradas de



sal, açúcar, ácidos, etc. A desidratação osmótica é considerada um método de conservação para a obtenção de produto de grande qualidade, por meio da remoção da água, sem mudança de fase. Este processo consiste da imersão do alimento com consistência sólida, por exemplo frutas e vegetais fatiados, em soluções hipertônicas (Medina-Vivanco et al., 2002). Durante a desidratação osmótica ocorre uma troca de massa de multicorrentes, em ambas direções, como mostra a Figura 2.2.

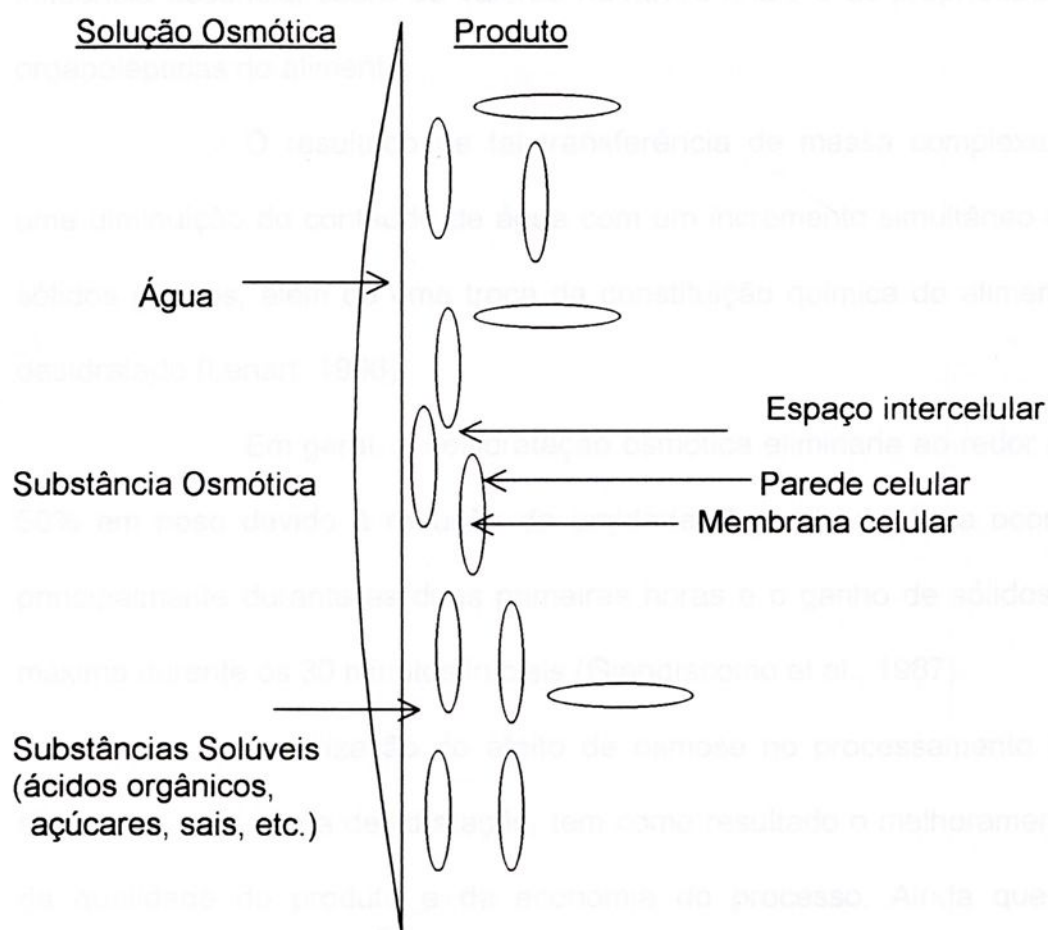


Figura 2.2. Transferência de massa

Dentre as transferências de massa que podem ocorrer nesse processo osmótico, a mais importante é o fluxo de água que difunde desde o interior da amostra até a solução. Na direção oposta se estabelece um fluxo da substância osmótica que difunde desde a solução para dentro do tecido desidratado.

O terceiro fluxo está ligado com a perda de substâncias de baixo peso molecular (açúcares, ácidos orgânicos, vitaminas, sais minerais) (Raoult-Wack et al., 1992; Raoult-Wack, 1994). Esta corrente, ainda que não significativa na transferência de massa, pode ter uma influência essencial sobre os valores nutritivos finais e as propriedades organolépticas do alimento.

O resultado de tal transferência de massa complexa é uma diminuição do conteúdo de água com um incremento simultâneo de sólidos ganhos, além de uma troca da constituição química do alimento desidratado (Lenart, 1996).

Em geral, a desidratação osmótica eliminaria ao redor de 50% em peso devido à redução da umidade. A perda de água ocorre principalmente durante as duas primeiras horas e o ganho de sólidos é máximo durante os 30 minutos iniciais (Giangiacoimo et al., 1987).

A utilização do efeito de osmose no processamento de alimentos, para a sua desidratação, tem como resultado o melhoramento da qualidade do produto e da economia do processo. Ainda que a



osmose como fenômeno é conhecido desde a antiguidade, ultimamente tem-se aumentado o interesse por este processo.

A desidratação prévia à secagem de alimentos, especialmente de vegetais, por meio de tratamento osmótico tem recebido recentemente uma maior atenção (Hough et al., 1993).

O emprego da desidratação osmótica possui as seguintes vantagens:

- 1) Reduzir a injúria térmica, evitando a influência negativa de mudanças da cor e substâncias odoríferas.
- 2) Reduzir o tempo de secagem.
- 3) Reduzir o consumo de energia em uma porcentagem de 20-30% quando comparada com a secagem por convecção.

A pré-concentração osmótica é usada não somente para diminuir o tempo de secagem com ar, mas também para melhorar a qualidade do produto. Em geral verifica-se uma textura melhor, uma maior retenção de vitaminas, um aumento do sabor e a estabilização da cor, sem necessidade de adição de sulfito (Beristain et al., 1990).

2.3.1. Variáveis de Processo

A influência das principais variáveis de processo (pré-tratamentos, temperatura, natureza e concentração das soluções de desidratação, agitação, aditivos, etc) na transferência de massa e na



qualidade do produto tem sido revisadas por Ponting et al. (1966), e mais recentemente por Raoult-Wack et al. (1992).

a) Tipo de Agente Osmótico

Os agentes osmóticos mais comumente usados são sacarose, para frutas, e cloreto de sódio, para vegetais. Outros agentes osmóticos tais como lactose, maltodextrinas, etanol, glicose, polióis, glicerina e xaropes de milho também têm sido utilizados (Biswal & LeMaguer, 1989; Lenart & Lewicki, 1988). Os solutos usados não podem ser tóxicos, custosos ou insolúveis, com a finalidade de obter-se soluções altamente concentradas, mas também não devem produzir soluções muito viscosas. Devido ao baixo peso molecular, o cloreto de sódio tem sido citado como um excelente agente osmótico (Biswal & Bozorgmehr, 1991; Hawkes & Flink, 1978). O uso do cloreto de sódio é interessante na desidratação de vegetais, entretanto seu uso para a desidratação de frutas é limitado, devido aos efeitos adversos sobre a aceitabilidade organoléptica dos produtos. Estes agentes, são usualmente chamados agentes diminuidores da atividade de água (Raoult et al., 1989).

Soluções aquosas de mistura de agentes osmóticos também têm sido usadas para a desidratação de frutas e vegetais. Hawkes & Flink (1978) combinaram sacarose com lactose, maltodextrinas e cloreto de sódio para desidratar anéis de maçã. Lenart & Flink (1984 a,b) combinaram cloreto de sódio e sacarose para desidratar cubos de



batata, e soluções de cloreto de sódio e etanol em água para a desidratação osmótica de cubos de cenoura.

b) Concentração da Solução Osmótica

A taxa de remoção de água na desidratação osmótica depende fortemente da concentração da solução desidratante. Um aumento na diferença de concentração entre as peças de fruta e a solução tem um efeito muito favorável sobre a perda de água (Conway et al., 1983), e a redução de peso aumenta com a concentração da solução (Ponting et al., 1966; Farkas & Lazar, 1969).

O uso de xaropes fortemente concentrados pode também reduzir as perdas de solutos hidrossolúveis, tal como ácido ascórbico (Vial et al., 1991), o que é possível devido à criação de uma camada periférica concentrada de soluto, que age como barreira evitando sua saída.

Nas Tabelas 2.1 e 2.2 se apresentam as formulações de soluções osmóticas mais apropriadas para diversos produtos alimentícios (Lenart, 1996).

Tabela 2.1. Frutas osmo-desidratadas (Raoult-Wack et al., 1992; Raoult-Wack, 1994):

FRUTA	SUBSTÂNCIA OSMÓTICA
Abacaxi	Sacarose 65%
Bananas	Sacarose 65% Sacarose 67-70%
Pêras	Xarope glicose-frutose 60% Xarope de amido/sacarose 70%
Maçãs	Sacarose 59% Frutose 60% Glicose 51% Xarope de amido 70% Xarope de frutose 70%
“Berries”	Sacarose 50%
Mangas	Cloreto de sódio 25%
Damasco	Xarope de amido/sacarose 70%
Ameixas	Xarope de sacarose
Cerejas	Xarope de amido/sacarose 70%

Tabela 2.2. Hortaliças osmo-desidratadas (Raoult-Wack et al., 1992; Raoult-Wack, 1994):

HORTALIÇA	SUBSTÂNCIA OSMÓTICA
Cebola	Sacarose 54% + NaCl 10%
Cenoura	Cloreto de sódio 10% Sacarose 5-60% Cloreto de sódio 10% Glicose 50% Cloreto de sódio e etanol Sacarose/cloreto de sódio 45/15 Xarope de amido 70%
Tomate	Cloreto de sódio 10%
Batata	Sacarose/cloreto de sódio 45/15
Abóbora	Sacarose 60% Xarope de amido

c) Temperatura

A influência da temperatura nos processos de desidratação osmótica dos tecidos vegetais foi revisada por Raoult-Wack et al. (1992). Frequentemente uma temperatura de 20 a 40°C é considerada ótima (Lerici et al., 1977), e numerosas experiências são conduzidas à temperatura ambiente (Lerici et al., 1985). De fato, perto de 40°C, o aumento da velocidade das reações químicas e bioquímicas pode

ter um efeito adverso sobre a qualidade do produto. Portanto, a temperatura crítica depende estreitamente da natureza da fruta. Por exemplo, temperaturas recomendadas para o processamento de damasco, pêra ou cereja, e banana ou mamão, foram de 20, 40 e 60°C respectivamente, segundo Lenart & Lewicki (1988) citado por Raoult-Wack et al., (1992). Para carnes e peixes, as temperaturas recomendadas não excederam 10°C, porém, de acordo com Favetto et al., (1981) temperaturas mais altas da ordem de 85°C, também podem ser utilizadas.

A melhor temperatura de processo depende do alimento, no caso da vagem por exemplo, uma temperatura de 40°C é considerada muito alta, e a 20°C obtêm-se melhores resultados (Biswal et al., 1991).

d) Agitação

A agitação tem uma boa influência sobre a perda de peso (especialmente para as soluções concentradas) e sobre a velocidade de troca (Ponting et al., 1966; Flink, 1975; Hawkes & Flink, 1978). Raoult et al. (1989) encontraram que a imersão e agitação têm um efeito significativo sobre a perda de água, aumentando-a, e sobre o ganho de soluto, que diminui. O efeito desfavorável sobre a perda de água, da fase de contato sem agitação foi interpretada pela existência de uma camada limite diluída ao redor da partícula (Raoult et al., 1989). A agitação garante que a solução concentrada é renovada ao redor partícula e

portanto, uma diferença favorável de concentração à transferência de massa é criada.

Em alguns casos, a agitação intermitente, ou tempos curtos de duração pode ser suficiente. Raoult et al. (1989) obtiveram velocidades de transferência de massa similares empregando um gel modelo (impregnado numa solução de sacarose de 60% p/p a 50°C) com agitação de uma hora de duração, três horas ou com agitação permanente. Eles mostraram que a agitação periódica no início do processo, determinaria a evolução completa da transferência de massa adicional.

Por outro lado, o contato das fases sólida (produto) e líquida (xarope concentrado) é também um importante limite para o desenvolvimento de processos industriais. Os produtos ($\rho = 800 \text{ kg.m}^{-3}$ em média) tendem a flutuar sobre a solução, devido à diferença de densidade com a solução ($\rho = 1300 \text{ kg.m}^{-3}$ para uma solução de sacarose de 60% p/p a 20°C). A viscosidade da solução também implica numa considerável resistência externa contra a transferência de massa, mas em geral, a fragilidade das peças é considerada uma barreira para uma agitação vigorosa.



2.3.2. Atividade de Água

A atividade de água reflete o grau em que a mesma está ligada aos componentes do material, não se encontrando disponível para as reações bioquímicas (ex. oxidação lipídica, reações enzimáticas, reações de Maillard, etc) e para o crescimento de microrganismos. A atividade de água também é a medida da tendência da água para escapar de seu meio; esta tendência é chamada de fugacidade. Em baixas pressões, como a pressão atmosférica, a fugacidade é medida experimentalmente pela pressão de vapor (Motarjemi, 1988). Assim, a atividade de água é definida como a razão entre as fugacidades da água na solução e da água pura na mesma temperatura e experimentalmente é obtida como a relação entre a pressão de vapor de água no material (p_w) e a pressão de vapor de água pura (p_o), na mesma temperatura.

$$a_w = \frac{f_w}{f_o} = \frac{p_w}{p_o} \quad (2.8)$$

A maioria dos alimentos frescos apresenta uma a_w superior a 0,98. Segundo Labuza (1980), o crescimento de bactérias que influem na deterioração, cessa em a_w abaixo de 0,92 e os fungos em a_w abaixo de 0,70. Com poucas exceções, é possível afirmar que um alimento será estável, em relação à deterioração por microrganismos, quando a_w é inferior a 0,60. As reações químicas e enzimáticas, entretanto, prosseguem mesmo em atividades de água próximas de zero.



2.3.3. Considerações de Equilíbrio

Relações de Equilíbrio

A determinação das condições de equilíbrio na desidratação osmótica de produtos alimentícios é de grande importância. A partir de seu conhecimento pode-se determinar as condições finais do processo e também, quando utilizadas nas equações de difusão, prever, como no presente caso, a concentração do sal num determinado tempo.

As variáveis geralmente utilizadas para descrever as condições de equilíbrio são o potencial químico, o coeficiente de atividade, a concentração nas diferentes fases e o coeficiente de partição de um ou mais componentes integrantes do sistema em estudo (Del Valle & Nickerson, 1967a).

Cada substância é caracterizada, sob o ponto de vista termodinâmico, por sua energia interna, que é a soma da energia de todas as moléculas e da energia das interações. A mudança de energia interna das substâncias num sistema, causada pela mudança de sua concentração, por mol, é chamada de potencial químico e é expresso pela equação:

$$\mu_i = \left. \frac{\partial U}{\partial C_i} \right|_{S, V, C_j} \quad (2.9)$$



onde μ_i é o potencial químico da espécie i , U é a energia interna; C_i é a concentração da espécie i , S é a entropia, V é o volume e C_j a concentração da espécie j .

A interação de um sistema com seus arredores ou com outro sistema se manifesta pela troca de energia, a qual ocorre até que o estado de equilíbrio é alcançado, neste estado, o potencial químico do sistema e seu entorno são iguais. Por outro lado, também de acordo com a definição termodinâmica do sistema em equilíbrio, o estado de equilíbrio é alcançado quando o potencial químico de um dos componentes é o mesmo em todas as fases presentes no sistema. Assim, para a água, tem-se que:

$$\mu_W|_{\text{solução osmótica}} = \mu_W|_{\text{líquido no alimento}} \quad (2.10)$$

onde os potenciais químicos podem ser expressos como:

$$\mu_W = RT \ln a_W + VdP + V\psi \quad (2.11)$$

onde R = constante dos gases; T = temperatura absoluta; a_w = atividade de água; V = volume; P = pressão e ψ = potencial da matriz, que inclui forças capilares, forças de adsorção e hidratação, sendo que este potencial torna-se mais importante quando a umidade é baixa.

Considerando que, no equilíbrio, não existem gradientes de pressão na desidratação osmótica e desprezando o potencial da matriz, ψ , as condições de equilíbrio serão alcançadas quando:

$$a_w|_{\text{solução osmótica}} = a_w|_{\text{líquido no alimento}} \quad (2.12)$$

2.4 SECAGEM SOLAR

A secagem pode ser feita de duas maneiras:

- Pela exposição direta aos raios solares e às condições atmosféricas do ar;
- Pelo uso de equipamentos que utilizam o ar aquecido pelo coletor solar como agente de desumidificação.

O primeiro método apresenta uma série de desvantagens, como dependência das condições climáticas, longo tempo de secagem e deterioração por insetos; já o segundo apresenta algumas vantagens sobre o anterior, como rapidez de secagem, alta capacidade, uniformidade do produto e independência das condições atmosféricas.

Os sistemas que utilizam o ar aquecido com qualquer fonte de energia, como elétrica, biomassa ou derivados do petróleo, podem ser auxiliados com coletores solares, ou usá-los como fonte exclusiva de aquecimento, pois representam uma economia de energia a um custo relativamente barato, devido aos materiais empregados na sua construção.

A utilização de energia solar como fonte alternativa para secagem de produtos agrícolas e alimentares tende a se tornar cada dia mais difundida, já que os combustíveis derivados do petróleo comumente usados estão se tornando cada vez mais caros e poluem o meio ambiente, e a energia elétrica nem sempre é disponível no meio rural, além disso, nos últimos tempos, estão ocorrendo problemas de fornecimento.

2.4.1 Energia Solar

A energia solar é uma fonte inesgotável e gratuita de energia, que pode representar uma solução para parte dos problemas de escassez de energia que abala o mundo. Nos países subdesenvolvidos, como o Brasil, esta fonte de energia deve ser aproveitada ao máximo. Normalmente, esses países apresentam elevadas extensões territoriais e estão situados em zonas tropicais, ou seja, dispõem de alta incidência de radiação, o que torna viável o desenvolvimento de tecnologias capazes de transformar a energia solar em energia térmica, elétrica, química, mecânica etc.

As aplicações mais difundidas da tecnologia solar referem-se à conversão da radiação solar em energia térmica, e em energia elétrica. Podemos citar:

Aquecimento de água;

Secagem de produtos agrícolas;

Geração de vapor;

Refrigeração;

Conversão fotovoltaica: bombeamentos, iluminação, refrigeração, etc.

O Sol é uma imensa fornalha cuja temperatura alcança em seu interior, aproximadamente quinze milhões de graus centígrados. Na superfície, sua temperatura é bem menor, de aproximadamente 6000°C . Em tamanho, o Sol é 110 vezes maior do que a Terra, e consome por segundo 4,2 milhões de toneladas de combustível nuclear, sendo considerada uma fonte de energia inesgotável. A terra recebe a energia do sol que alcança a soma de 178 trilhões de quilowatts (Mahendra et al., 1987). Pode-se dizer que o Sol envia para a terra cerca de 18 milhões de centrais elétricas da capacidade da hidroelétrica de Itaipu. Uma parte apreciável dessa energia cai sobre os oceanos, outra sobre os continentes. Dividindo-se a energia solar total recebida pela terra pela sua superfície, obtém-se a energia solar média recebida por metro quadrado da superfície terrestre, que é de $0,36 \text{ kW/m}^2$. Na verdade, a energia solar não está uniformemente distribuída sobre toda sua superfície. As regiões polares recebem muito pouca energia, enquanto que as regiões tropicais onde se encontra o Brasil, recebem mais energia solar que as regiões temperadas, onde se localiza a quase totalidade dos países desenvolvidos. Essa energia não está toda disponível. Primeiramente, deve-se considerar que a terra reflete de volta



ao Cosmo, cerca de 30% dessa energia, que fica definitivamente perdida para uso na Terra. Dos 70% restantes, 23% são armazenados na atmosfera, sobrando assim 47% como energia solar que incide diretamente sobre o solo brasileiro na forma de luz e calor. Fazendo os cálculos, obtém-se $0,17 \text{ kW/m}^2$ como energia solar direta, disponível sobre o solo brasileiro.

O sol esbanja energia sobre o Brasil, e pode-se afirmar, sem dúvida, que o Brasil é rico em potencial energético. Além disso, possui aproximadamente, 8 milhões e 500 mil quilômetros quadrados de superfície. Cerca de 1% dessa superfície, que corresponde a 85 mil quilômetros quadrados, recebe a energia solar equivalente a uma potência de 14,5 bilhões de kW.

2.4.2 Coletor Solar

O coletor solar difere do painel fotovoltaico porque utiliza a energia solar para aquecer um fluido (em geral água ou ar) e não para gerar eletricidade.

O coletor solar é o coração do sistema de aquecimento solar. Ele é o dispositivo responsável pela absorção e transferência da radiação solar para um fluido sob a forma de energia térmica. São muito utilizados no aquecimento de água de casas ou edifícios, hospitais, piscinas, secagem de grãos, para refrigeração de ambientes e processos industriais de aquecimento.



De modo geral, o coletor solar funciona recebendo radiação solar e a transfere para a placa absorvedora. O calor é então transferido para o fluido que escoa no interior de tubos que estão em contato com a superfície absorvedora.

O aspecto externo de um coletor solar (Figura 2.3) é de uma caixa retangular rasa (em geral de alumínio) com uma cobertura de vidro. Dentro desta caixa há uma serpentina (geralmente de cobre devido à sua alta condutividade térmica), por onde o fluido escoa. Em volta desta, há uma superfície também de cobre pintada de preto (placa absorvedora), para facilitar a absorção de calor. O calor absorvido pela placa absorvedora é transferido à serpentina. A água fria ao passar pelos canos se aquece.

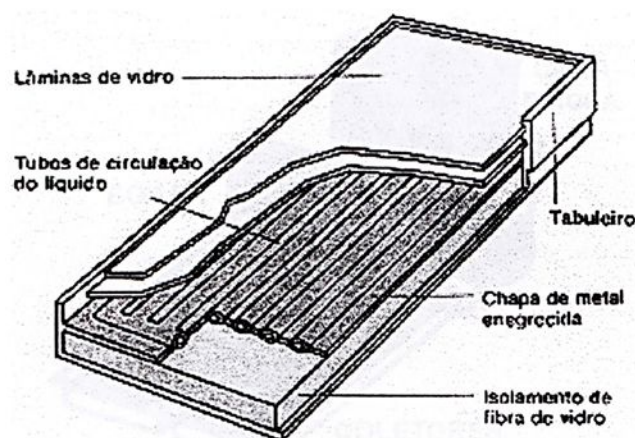


Figura 2.3 Foto explodida de um coletor solar

Ainda é necessário que se tenha um isolamento térmico na parte inferior do coletor para minimizar as perdas de calor para o

ambiente. A cobertura de vidro permite a entrada de radiação solar ao passo que evita que parte do calor da placa absorvedora se perca por convecção, pois o vidro impede a ação do vento, provocando um efeito estufa. Além disso, é importante que haja uma vedação eficiente para prevenir que umidade entre no coletor.

Além dos coletores solares, para um sistema de aquecimento completo, são necessários um reservatório térmico, um sistema de circulação de água e um sistema auxiliar de aquecimento elétrico. Em períodos encobertos prolongados, caso a temperatura da água do reservatório térmico caia muito, a resistência do sistema de aquecimento elétrico auxiliar será acionada por um termostato, de forma a fornecer energia suficiente à água armazenada. De qualquer forma, com um sistema bem dimensionado este não deverá ser um problema.

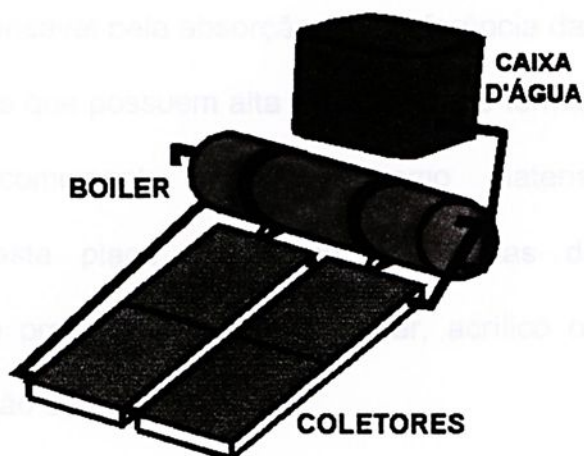


Figura 2.4 Sistema de aquecimento

Componentes de um coletor solar plano

Basicamente, um coletor pode ser dividido nas seguintes partes:

Módulo: Geralmente fabricado de alumínio, suporta e protege todos os componentes do coletor.

Cobertura: Geralmente de vidro, permite a passagem de radiação solar e reduz a perda de calor para o meio.

Vedação: é essencial para que não haja interferências externas e para que não se perca calor para o meio ambiente. Também impede a entrada de umidade, grande responsável pela acentuada e acelerada degradação de alguns dos componentes do coletor solar (tinta e isolamento). É aconselhável a utilização de silicone para se fazer a vedação entre o módulo e o vidro.

Placa absorvedora: é o componente mais importante do coletor solar plano. É responsável pela absorção e transferência da energia solar para o fluido. Metais que possuem alta condutividade térmica como alumínio e cobre são comumente utilizados como materiais absorvedores. Geralmente esta placa é pintada com tintas de cores escuras, especialmente preto, à base de poliéster, acrílico ou epoxi para uma melhor absorção de radiação solar.

Isolamento térmico: Os isolantes são materiais com condutividade térmica baixa, colocados abaixo da placa absorvedora e nas laterais de modo a minimizar as perdas por condução. Deste modo, ficam em contato direto

com o módulo, revestindo-o. Na maior parte das vezes, é utilizado lã de vidro ou rocha ou ainda espuma de poliuretano.

Dependendo da situação da instalação, os coletores podem ser verticais ou horizontais. Estes últimos são utilizados em locais onde a altura disponível para a instalação do sistema de aquecimento é reduzida.

Geralmente os coletores são montados em uma posição fixa com uma orientação pré-definida de tal forma que a absorção de radiação solar seja a melhor possível. Como o Brasil está no hemisfério sul, o coletor solar plano deve ter sua face voltada para o norte a fim de que haja um melhor aproveitamento da energia solar incidente.

2.5 TERMODINÂMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS

2.5.1 Conteúdo de água de equilíbrio

A isoterma é uma relação de equilíbrio que vincula o conteúdo de água de um produto alimentício com a temperatura e umidade relativa do ar circundante, sendo de fundamental importância no estudo da conservação de alimentos desidratados (Gabas, 1998). Além disso, possui inúmeras aplicações no estudo de alimentos "in natura", no seu processamento e em produtos acabados. Inclui-se aí, entre outros, o projeto de secadores, a predição das condições finais de misturas de diversos ingredientes em alimentos formulados, o projeto de embalagens e simulação de alterações de umidade que ocorrem durante a



estocagem, além da predição da estabilidade e vida de prateleira dos produtos.

A umidade contida em sólidos úmidos exerce uma pressão de vapor que depende da interação da água com a matriz sólida e da temperatura. Se o sólido úmido for exposto a um ambiente ventilado, com pressão parcial de vapor de água constante e menor que a pressão de vapor em equilíbrio com a umidade do sólido, esse perderá umidade para o ambiente, até igualar as pressões. Diz-se, então, que o sólido e o gás estão em equilíbrio e que a umidade do sólido é a umidade de equilíbrio para a dada condição ambiental.

As curvas obtidas ao se graficar a umidade do sólido versus a umidade relativa do ar, sob a qual o mesmo encontra-se em equilíbrio, para temperaturas constantes, são denominadas de isotermas de sorção. As isotermas são classificadas como sendo de adsorção, caso a determinação da umidade do produto tenha sido feita ao longo de um processo de umedecimento, ou de dessorção, como no processo de secagem. Frequentemente, há diferenças entre isotermas de adsorção e de dessorção para um mesmo produto e em condições idênticas de determinação, fenômeno a que se denomina histerese.

A isoterma pode ser dividida em três regiões, dependendo do estado em que se encontra a água presente no alimento. A primeira região, a qual cobre a faixa de a_w de 0 até cerca de 0,35, representa a adsorção de um filme monomolecular de água. A segunda



região, entre 0,35 e 0,60 representa a adsorção de camadas adicionais de água sobre a monocamada. Finalmente, a terceira região, acima de 0,60 de a_w , representa a região onde a água se condensa nos poros do material e solubiliza compostos solúveis presentes.

Muitos dos dados de sorção da literatura foram obtidos somente em uma temperatura, representando as condições normais de estocagem. Entretanto, propriedades de sorção através de uma extensa faixa de temperatura são essenciais para a modelagem dos processos de desidratação e reidratação, bem como a estabilidade de estocagem de alimentos desidratados.

2.5.2 Modelos Empíricos de Isotermas

Diversos modelos para descrever o comportamento das isotermas de sorção de umidade têm sido publicados, fornecendo equações cujas constantes podem ser determinadas para cada tipo de alimento estudado.

Um determinado modelo de isoterma pode ser considerado mais adequado do que outro, principalmente quando descreve com maior precisão o fenômeno de adsorção ou dessorção para uma ampla faixa de atividade de água. Uma outra característica importante é a possibilidade destes modelos fornecerem informações importantes acerca do fenômeno de sorção, tais como, a água adsorvida



na monocamada ou o calor de sorção para a primeira e para as camadas subsequêntes (Iglesias & Chirife, 1983).

Várias teorias e equações empíricas têm sido sugeridas na literatura para descrever a relação entre atividade de água e umidade. Saravacos et al. (1986), estudando o efeito da temperatura nas isothermas de adsorção de água em passas, com a utilização do método estático das soluções salinas, obtiveram uma boa interpretação dos dados experimentais. Dentre as equações utilizadas para ajustar os dados, estão as equações de Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB) e Halsey modificada.

De acordo com os resultados de Saravacos et al. (1986), o modelo de GAB descreveu bem os dados, porém, tornou-se menos satisfatório para altas temperaturas e atividades de água. A equação de Halsey se ajustou melhor aos dados experimentais numa larga faixa de temperatura e atividades de água, quando comparado ao primeiro modelo.

As equações utilizadas neste trabalho para descrever o comportamento das curvas de dessorção de umidade do pimentão, estão relacionadas a seguir:

Equação de GAB (Guggenheim-Anderson-deBoer): é um modelo de três parâmetros, fisicamente significativos, que têm sido sugerido como o

modelo matemático mais versátil para a sorção de alimentos. É expressa da seguinte forma (Rizvi, 1986):

$$X = \frac{(C-1) K a_w X_m}{1 + (C-1) K a_w} + \frac{K a_w X_m}{1 - K a_w} \quad (2.13)$$

onde:

X_m = conteúdo de água na camada monomolecular (b.s.)

C = constante de Guggenheim

$$C = c \exp\left(\frac{(H_m - H_n)}{RT}\right) \quad (2.14)$$

onde:

H_m = calor total de sorção da primeira camada

H_n = calor total de sorção das multicamadas

R = constante universal dos gases

T = temperatura (K)

K = constante da equação

$$K = k_o \exp\left(\frac{(\lambda - H_n)}{RT}\right) \quad (2.15)$$

onde:

k_o = constante da equação

λ = calor de condensação da água pura

H_n = calor total de sorção das multicamadas

As vantagens encontradas para esta equação são a viabilidade de conhecimentos teóricos, a descrição da sorção abrangendo uma faixa de atividade de água entre 0 e 0,9; a forma matemática simples, com parâmetros que possuem significado físico e a capacidade de descrever alguns efeitos da temperatura (Gabas, 1998).

Equação de Peleg: é um modelo semi-empírico, de quatro parâmetros, desenvolvido por Peleg (1993), para descrever isothermas sigmóides. O autor observou que este modelo (Eq. 2.16) se ajustou bem aos dados de sorção de umidade de equilíbrio para diferentes produtos na faixa de atividade de água de até aproximadamente 0,85 a 0,95. O erro quadrado médio para o modelo de quatro parâmetros foi muito menor que o calculado para o modelo de GAB.

$$X = Aa_w^B + Da_w^E \quad (2.16)$$

Na Equação (2.16), A, B, D, E são parâmetros empíricos, a_w é atividade de água e X é o conteúdo de umidade.

Equação de Lewicki: consiste em duas funções subtraídas uma da outra e assume dois processos que ocorrem em paralelo. O primeiro processo prevalece a atividades de água altas, e o segundo desempenha um papel importante em baixos valores de atividade de água.

$$X = \frac{F}{(1 - a_w)^G} - \frac{F}{1 + a_w^H} \quad (2.17)$$



onde: F , G , H = constantes empíricas, a_w = atividade de água e X = umidade de equilíbrio.

2.5.3 Métodos de Medida

O levantamento das relações entre a atividade de água e o teor de umidade em equilíbrio de um produto, em condições de temperatura constante, pode ser realizado através de diversos métodos, diretos e indiretos (Noreña et al., 1996). Entre os métodos diretos, destaca-se o gravimétrico, que além de fornecer informações completas da curva de sorção do produto, é de simples aplicação.

O método gravimétrico, consiste em colocar o material seco (adsorção) ou "in natura" (dessorção), em contato com diversas umidades relativas conhecidas, até atingir o equilíbrio e subsequente, determinar-se a umidade das amostras, através do método padrão recomendado para cada produto (Gabas, 1998).

As várias umidades relativas são obtidas com soluções salinas saturadas, com atividade de água entre 0,1 até 0,9, utilizando-se sais que mudam pouco sua solubilidade com a temperatura (Noreña et al., 1996).

As soluções saturadas são colocadas em pequenos potes, vedados, sob vácuo ou não. Os potes contendo as amostras são colocados em câmaras de temperatura constante (estufa de convecção forçada) ou banhos termostáticos, por um período de tempo previamente

determinado, até atingir a umidade de equilíbrio, o que é verificado pela constância de peso das amostras. O controle da temperatura deve ser rigoroso, para evitar problemas de condensação de água na amostra (Noreña et al., 1996).

Este método é amplamente utilizado, apesar de ser demorado, já que os tempos para se atingir o equilíbrio podem estar na faixa de 2 a 5 semanas. O pré-tratamento das amostras com radiação ultravioleta e o uso de solução de formalina na limpeza dos recipientes utilizados como dessecadores podem ser necessários em a_w superiores a 0,80, para evitar a deterioração da amostra (Noreña et al., 1996).

2.5.4 Calor Isostérico de Sorção

O calor isostérico de sorção (Q_{st}) é um parâmetro termodinâmico, obtido a partir de dados de equilíbrio de sorção e representa a quantidade de energia necessária para adsorver ou dessorver a água dos alimentos. Seu valor é geralmente calculado através da aplicação da equação de Clausius-Clapeyron. A equação pode ser expressa da seguinte forma (Rizvi, 1986):

$$\left. \frac{\partial \ln(p/p_0)}{\partial (1/T)} \right|_x = \left. \frac{\partial \ln(a_w)}{\partial (1/T)} \right|_x = - \frac{Q_{st} - \lambda}{R} \quad (2.18)$$

onde:

R = constante universal dos gases

T = temperatura absoluta



p = pressão de equilíbrio

p_o = pressão de vapor da água pura

λ = calor de vaporização da água pura

Integrando esta equação entre as temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente, obtém-se:

$$\ln\left(\frac{a_{w2}}{a_{w1}}\right)\bigg|_X = -\frac{q_{st}}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (2.19)$$

onde q_{st} é o excesso de calor de sorção, ou seja,

$$q_{st} = Q_{st} - \lambda \quad (2.20)$$

Para se obter estimativas precisas de q_{st} , é necessário construir isotermas de sorção a diversas temperaturas, na faixa de interesse, sendo necessárias no mínimo 2 temperaturas diferentes. Isto se deve às considerações que são feitas na aplicação da equação de Clausius-Clapeyron. Em primeiro, o calor de vaporização da água pura e o excesso de calor de sorção não devem variar com a temperatura, e, segundo, a equação é aplicada apenas quando a umidade do sistema permanece constante.

Para o caso de alimentos, que são sistemas complexos, a extrapolação para temperaturas muito altas, invalidaria as considerações acima, devido a mudanças irreversíveis nas propriedades da água do sistema (Rizvi, 1986). De acordo com Zhang et al. (1996) que estudaram

isotermas de dessorção de umidade de alguns vegetais nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C, o calor isostérico de sorção pode ser usado para estimar a energia requerida no processo de desidratação de alimentos.

Para Tsami et al. (1990) o conhecimento da dependência do calor de sorção da água em função da umidade é essencial no estudo de vários processos envolvendo alimentos, podendo ser usado para estimar as necessidades energéticas do processo de secagem, além de fornecer dados importantes sobre o estado da água nos produtos alimentícios.

Quando se grafica a isósteres de sorção como o logaritmo natural da atividade de água contra o inverso da temperatura absoluta, para determinados valores de umidade da amostra, obtém-se o coeficiente angular correspondente à $-q_{st}/R$ (Zhang et al., 1996). Desta forma, pode-se calcular o valor de q_{st} .

Tsami et al. (1990) utilizaram a seguinte relação exponencial empírica entre o calor de sorção e a umidade para algumas frutas secas, proposta na seguinte forma:

$$q_{st} = q_o \exp(-X_{eq}/X_o) \quad (2.21)$$

onde:

q_o = calor isostérico de sorção da primeira molécula de água

X_{eq} = umidade de equilíbrio

X_o = umidade característica do material alimentício

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATÉRIA-PRIMA

Pimentões vermelhos da variedade Magali foram obtidos no mercado local, a poucas horas antes do processamento. As hortaliças foram cortadas em fatias de cerca de 4 mm de espessura e aproveitadas apenas aquelas pertencentes à região uniforme da hortaliça. Determinou-se o grau de maturação por leitura de °Brix em refratômetro. A determinação da umidade inicial das amostras foi realizada pelo método gravimétrico em uma estufa a vácuo a 60°C por 48h. As hortaliças utilizadas apresentaram teor de sólidos solúveis entre 4,1 e 2,3°Brix e umidade entre 91,2 e 90,4% (b.u.).

Figura 3.1. Cubo de pré-tratamento osmótico

3.2 PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

Como agente osmótico foram utilizadas soluções de cloreto de sódio preparadas com água destilada nas concentrações de 10, 15 e 20 gramas de cloreto de sódio/100 gramas de solução. O recipiente contendo 40 litros da solução salina foi continuamente agitado por um agitador mecânico, durante as 24 horas em que 6 kg de amostras foram submetidas ao pré-tratamento (Figura 3.1). A temperatura de aproximadamente 32°C foi mantida constante durante todo o processo.

provém que as amostras entraram em equilíbrio.



Figura 3.1. Cuba de pré-tratamento osmótico.

3.2.1 Determinação de cloreto de sódio

O cloreto de sódio foi determinado pelo método de titulação direta, em triplicata, recomendado por Mohr (Medina Vivanco, 1998). O teor de NaCl foi determinado na forma de cloretos por titulação com solução de nitrato de prata. Esta determinação foi realizada 24 horas após o tratamento osmótico, verificando-se através de experimentos prévios que as amostras entraram em equilíbrio.

Os cloretos são determinados após sua dissolução em água, sendo posteriormente precipitados através da titulação com uma solução de AgNO_3 utilizando-se K_2CrO_4 como indicador. Enquanto houver cloretos em solução ocorre a formação de cloreto de prata que se precipita na forma de um sal branco, quando todo o cloreto é esgotado começa a ocorrer a formação de cromato de prata que se precipita como um sal de cor vermelho tijolo. O ponto de viragem ocorre, então quando a solução se torna levemente avermelhada.

Os reagentes utilizados foram:

Solução A: 23,8 g de acetato de zinco e 3 ml de ácido acético glacial diluídos em água destilada até 100 ml.

Solução B: 10,6 g de ferrocianeto de potássio dissolvidos em 100ml de água destilada.

O acetato de zinco e ferrocianeto de potássio só são solúveis em água quente e não devem ser pesados em papel alumínio.

Para a determinação do cloreto de sódio, pesou-se 2,5 g de amostra (devidamente triturada), colocando-a em seguida em balão volumétrico de 100 ml com aproximadamente 80 ml de água destilada, adicionou-se 2 ml da solução A e agitou-se por 5 minutos em banho fervente, a seguir, adicionou-se 2 ml da solução B e agitou-se por 15 minutos em banho. O volume foi aferido (100ml) com a solução fria. Agitou-se o balão e filtrou-se uma quantidade de solução até que a mesma estivesse límpida, desta foi retirada uma alíquota de 100 ml com



pipeta volumétrica para ser posteriormente titulada com AgNO_3 0,1N usando 1 ml de K_2CrO_4 como indicador.

O teor de cloreto de sódio (1g de NaCl /100g de amostra) foi calculado como:

$$\text{teor de NaCl} = \frac{\text{ml}((\text{AgNO}_3) \times N(\text{AgNO}_3) \times \text{mEq}(\text{NaCl}) \times 100 \times 100)}{\text{peso da amostra} \times 10}$$

3.2.2 Determinação de umidade

A determinação da umidade foi baseada no método gravimétrico, com secagem em estufa a vácuo com injeção de ar seco, a 60°C por 48 horas. Os sólidos totais foram determinados por diferença. As análises foram realizadas sempre em duplicata. Esta determinação foi realizada 24 horas após o tratamento osmótico

3.3 ISOTERMAS DE SORÇÃO

As isotermas de sorção foram determinadas empregando-se o método estático gravimétrico (Gabas, 1998), com um procedimento de dessorção na faixa de temperatura de 20° a 60°C .

As amostras foram preparadas a partir da hortaliça fresca cortada em pequenos pedaços com e sem pré-tratamento osmótico, sendo aproveitadas apenas as partes pertencentes à região uniforme da fruta. Antes de serem manipulados, os pimentões foram deixados em



contato com uma solução diluída de água sanitária para evitar contaminação.

Dez soluções salinas saturadas foram preparadas, correspondendo à faixa de atividade de água de 0,02 a 0,89. As soluções foram distribuídas em potes individuais, com capacidade para apenas uma amostra, havendo três potes para cada umidade relativa (amostras em triplicata). Cada pote possuía em seu interior um suporte de acrílico, sobre o qual foi colocado o recipiente contendo a amostra.

Antes do uso, os potes e os tripés de acrílico foram desinfetados passando-se um algodão embebido em água sanitária comercial. As soluções salinas foram colocadas nos potes até uma altura de cerca de 1 cm a partir do fundo, sendo adicionadas 3 gotas de formol em cada pote, de forma a evitar a deterioração das amostras por estarem em condições de alta umidade. As amostras, de peso inicial conhecido, foram então, sobrepostas ao tripé, os potes fechados hermeticamente e colocados em uma câmara de temperatura controlada. O tempo necessário para o equilíbrio foi de 4 a 5 semanas, com base em uma variação de peso das amostras inferior a 0,1% (0,001g/g sólido). O conteúdo de umidade de equilíbrio foi determinado em estufa a vácuo a 60°C por 48 horas.



3.4 SECADOR SOLAR

O equipamento para os ensaios de secagem foi construído no próprio Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas/UNESP de São José do Rio Preto – SP com recursos do projeto Fapesp, Proc. número 1998/08738-7. Os materiais utilizados na construção foram basicamente madeira, fibra de cimento amianto e aço galvanizado.

O secador, mostrado na Figura 3.2, é do tipo bandejas e consiste de três seções básicas: exaustor de ar, coletor solar e compartimento de secagem. Além disso, é equipado com uma estação meteorológica/sistema de aquisição de dados obtida com recursos do recursos do projeto Fapesp, Proc. número 1998/08738-7 que faz o monitoramento das variáveis de processo, como radiação solar, temperatura e velocidade do ar ambiente, umidade relativa, e uma adaptação na câmara de secagem para medidas de temperatura e velocidade do ar interna. Além disso, instalou-se também um piranômetro, cuja saída foi conectada a um registrador.





Figura 3.2. Secador Solar.

O ar foi forçado através do secador por meio de um exaustor. Um coletor solar de área útil igual a $0,896 \text{ m}^2$, foi utilizado para o aquecimento do ar de secagem. O compartimento de secagem consistiu de quatro bandejas, subdivididas em quatro seções paralelas, com fundo de tela metálica, dispostas perpendicularmente à seção de escoamento do ar. Utilizou-se um anemômetro de ventoinha para medir a vazão do ar e, antes do compartimento de secagem havia uma “colméia” para melhor distribuição do ar através da bandeja.

As temperaturas foram medidas por meio de termopares instalados ao longo do secador. Temperaturas de bulbo seco e bulbo

úmido foram tomadas após a seção de aquecimento e do compartimento de secagem e temperaturas de bulbo seco foram determinadas no centro da bandeja de secagem e próximo da localização das amostras.

A Tabela 3.1 apresenta os experimentos realizados utilizando o coletor solar.

Tabela 3.1. Experimentos para pimentão in natura e pré-tratado osmoticamente utilizando o coletor solar.

Ensaio	Temperatura	Concentração de sal	Relação ($V_{\text{Pimentão}}/V_{\text{Solução}}$)
1	32	20	1/3
2	32	15	
3	32	10	
4	32	20	1/4
5	32	15	
6	32	10	
7	32	20	1/5
8	32	15	
9	32	10	
10		0	in natura

3.4.1 Determinação dos coeficientes de difusão aparente

Os coeficientes de difusão de água no pimentão foram calculados através da solução analítica da equação de difusão desenvolvida por Crank (1975), considerando-se a geometria de placa plana infinita, transferência de massa unidirecional e resistência externa à transferência de massa desprezível. A solução foi dada anteriormente pela equação (2.3), descrita abaixo:

$$M = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[- (2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{ap} t}{L^2} \right] \quad (2.3)$$

onde M é a umidade adimensional $(X - X_{eq})/(X_0 - X_{eq})$, X é a umidade da partícula em base seca, X_{eq} é a umidade de equilíbrio em base seca, X_0 é a umidade inicial em base seca, D_{ap} é a difusividade aparente, t é o tempo e L é a espessura da amostra.

A espessura da placa foi obtida pela média de 10 medidas realizadas com um paquímetro antes e após a desidratação.

Neste trabalho, a solução analítica foi utilizada para ajuste dos dados experimentais, considerando-se os cinco primeiros termos da série, utilizando-se para tanto o software Statistica 5.0.



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ISOTERMAS

As curvas de sorção foram construídas graficando-se as diferentes atividades de água dos sais com os quais as amostras foram colocadas em contato, em função de suas respectivas umidades (em base seca). Para cada ponto da isoterma, ou seja, para cada tipo de sal, foram preparadas três amostras, sendo utilizada a média das umidades encontradas.

As isotermas foram obtidas em cinco diferentes temperaturas, 20°, 30°, 40°, 50° e 60°C, seguindo um processo de dessorção, isto é, as amostras tratadas osmoticamente e também as sem tratamento osmótico foram diretamente submetidas a diferentes umidades relativas. Os dados relacionados às curvas de dessorção, encontram-se graficados nas Figuras 4.1 a 4.5.

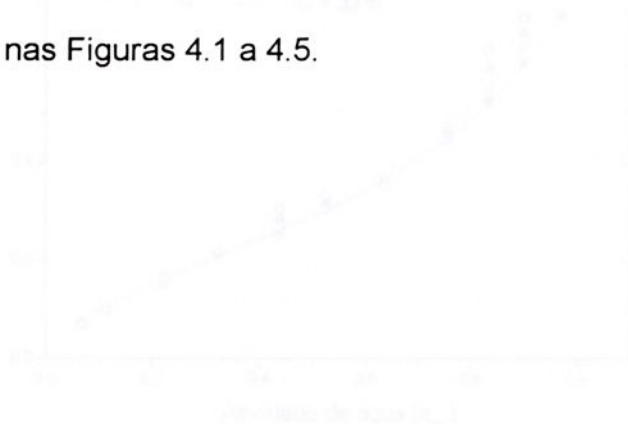


Figura 4.1 Isoterma de dessorção de pimentão na temperatura de 20°C em três diferentes concentrações osmóticas de NaCl e in natura.

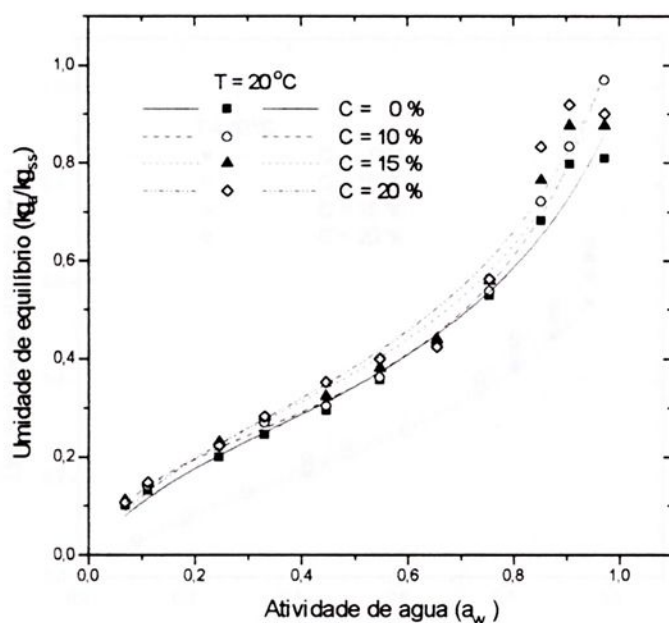


Figura 4.1 Isotermas de dessorção de pimentão na temperatura de 20°C em três diferentes concentrações osmóticas de NaCl e in natura.

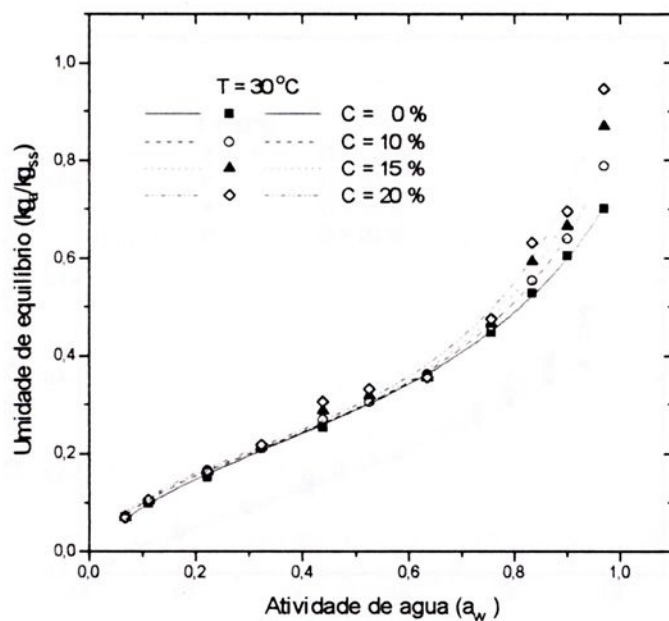


Figura 4.2 Isotermas de dessorção de pimentão na temperatura de 30°C em três diferentes concentrações osmóticas de NaCl e in natura.

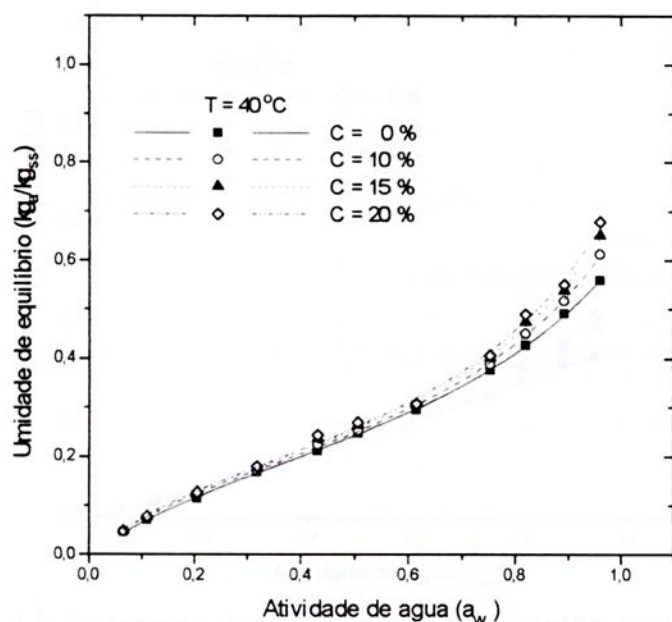


Figura 4.3 Isotermas de dessecção de pimentão na temperatura de 40°C em três diferentes concentrações osmóticas de NaCl e in natura.

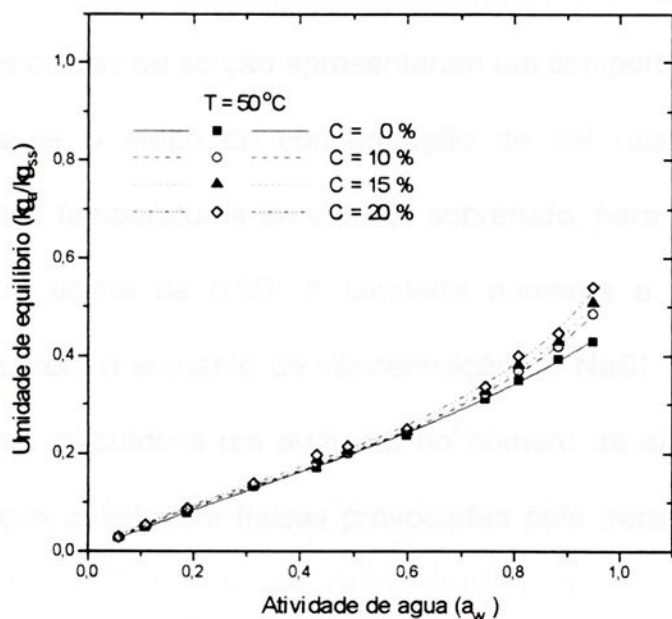


Figura 4.4 Isotermas de dessecção de pimentão na temperatura de 50°C em três diferentes concentrações osmóticas de NaCl e in natura.

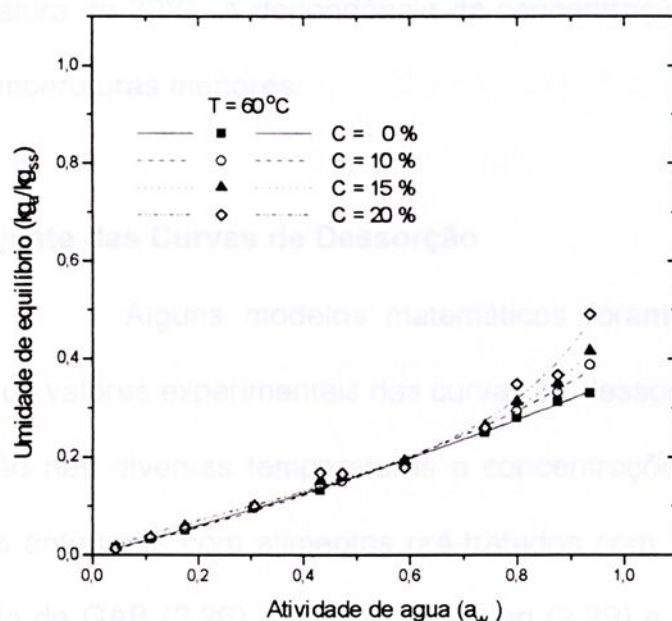


Figura 4.5 Isotermas de dessorção de pimentão na temperatura de 60°C em três diferentes concentrações osmóticas de NaCl e in natura.

Pode-se observar que de acordo com a classificação de BET, as curvas de sorção apresentaram um comportamento de curva tipo II. Nota-se o efeito da concentração de sal nas isotermas para as diferentes temperaturas de estudo, sobretudo, para valores de atividade de água acima de 0,60. A umidade aumenta a uma dada umidade relativa, com o aumento da concentração de NaCl. Este comportamento pode ser atribuído a um aumento no número de sítios ativos, devido a mudanças químicas e físicas provocadas pelo tratamento osmótico com NaCl.

Para valores de atividade de água menores que 0,60 observa-se pouca dependência da concentração com exceção à

temperatura de 20°C. A dependência da concentração é mais acentuada para temperaturas menores.

4.1.1 Ajuste das Curvas de Dessorção

Alguns modelos matemáticos foram selecionados para ajustar os valores experimentais das curvas de dessorção de equilíbrio do pimentão nas diversas temperaturas e concentrações, baseando-se em estudos anteriores com alimentos pré-tratados com soluções osmóticas: equação de GAB (2.26); equação de Peleg (2.29) e equação de Lewicki (2.30). A escolha do modelo foi realizada, baseando-se no menor somatório do quadrado dos resíduos dado pela equação (4.1).

$$SSR = \frac{\sqrt{\sum ((X_e - X_p) / X_e)^2}}{N} \quad (4.1)$$

onde X_e e X_p são os dados de umidade de equilíbrio experimental e predito pelo modelo e N é o número total de pontos.

Os parâmetros calculados a partir desses modelos e os valores de SSR, encontram-se nas Tabelas 4.1 a 4.4 para isotermas de dessorção de pimentão. A partir dos resultados obtidos para o ajuste das isotermas, pôde-se concluir que o modelo de melhor ajuste aos dados experimentais foi o de Peleg. A equação de Lewicki não se ajustou tão bem aos dados experimentais quando comparada às demais equações, como pode ser observado quantitativamente nas Tabelas 4.2 e 4.3. Isso

ocorreu em toda a faixa de temperatura e concentração estudada. Dessa forma, a equação de Peleg foi utilizada neste trabalho para ajustar as curvas de dessecção de umidade do pimentão.

Tabela 4.1 Parâmetros dos modelos de GAB, Peleg e Lewicki, e SSR*, calculados pelo ajuste das isotermas de dessecção do pimentão in natura a diferentes condições de temperatura.

Modelo	T (°C)	Parâmetros do Modelo**			SSR	
		X _m	C	K		
GAB	20	0,278	0,714	7,064	2,8607	
	30	0,233	0,710	7,150	0,9545	
	40	0,227	0,362	5,066	0,4753	
	50	0,275	0,541	3,074	2,4070	
	60	1,479	0,202	0,960	1,3157	
		A	B	D	E	SSR
Peleg	20	0,340	0,436	0,553	2,855	1,3030
	30	0,441	0,686	0,311	4,586	0,5654
	40	0,405	0,793	0,200	4,618	0,2930
	50	0,356	0,899	0,110	3,577	0,6011
	60	0,235	0,918	0,127	1,834	0,9288
		F	G	H	SSR	
Lewicki	20	0,978	0,091	1,144	6,6304	
	30	0,755	0,108	1,035	3,6727	
	40	0,658	0,099	1,120	3,2117	
	50	0,601	0,074	1,264	3,8615	
	60	0,530	0,054	1,408	3,3940	

*somatório do quadrado dos resíduos

**todos os ajustes apresentaram níveis de significância menores que 5%.



Tabela 4.2 Parâmetros dos modelos de GAB, Peleg e Lewicki, e SSR*, calculados pelo ajuste das isotermas de dessorção do pimentão tratado com uma solução osmótica de 10% de NaCl a diferentes condições de temperatura.

Modelo	T (°C)	Parâmetros do Modelo**			SSR	
		X _m	C	K		
GAB	20	0,234	0,791	12,376	1,136	
	30	0,212	0,763	8,897	0,615	
	40	0,209	0,709	5,886	0,690	
	50	0,203	0,667	4,024	2,759	
	60	0,170	0,670	3,179	1,688	
		A	B	D	E	SSR
Peleg	20	0,436	0,501	0,628	4,563	1,162
	30	0,462	0,689	0,399	5,830	0,409
	40	0,425	0,793	0,250	5,649	0,587
	50	0,170	5,492	0,375	0,897	0,557
	60	0,141	5,819	0,309	0,982	0,838
		F	G	H	SSR	
Lewicki	20	0,811	0,156	0,904	4,274	
	30	0,700	0,144	0,960	2,743	
	40	0,634	0,124	1,067	2,441	
	50	0,543	0,119	1,185	3,166	
	60	0,416	0,138	1,270	1,608	

*somatório do quadrado dos resíduos

**todos os ajustes apresentaram níveis de significância menores que 5%.

Tabela 4.3 Parâmetros dos modelos de GAB, Peleg e Lewicki, e SSR*, calculados pelo ajuste das isotermas de dessorção do pimentão tratado com uma solução osmótica de 15% de NaCl a diferentes condições de temperatura.

Modelo	T (°C)	Parâmetros do Modelo**			SSR	
		X _m	C	K		
GAB	20	0,284	0,730	8,584	2,537	
	30	0,203	0,794	9,589	1,706	
	40	0,210	0,725	6,077	1,095	
	50	0,196	0,689	4,205	2,761	
	60	0,166	0,695	3,366	2,248	
		A	B	D	E	SSR
Peleg	20	0,390	0,439	0,594	3,173	2,097
	30	0,487	0,716	0,479	6,896	1,054
	40	0,278	6,104	0,445	0,801	0,724
	50	0,190	6,044	0,385	0,905	0,722
	60	0,164	6,355	0,325	0,987	1,057
		F	G	H	SSR	
Lewicki	20	1,021	0,099	1,075	6,228	
	30	0,670	0,172	0,934	2,426	
	40	0,639	0,134	1,057	2,245	
	50	0,536	0,130	1,171	3,112	
	60	0,418	0,152	1,251	1,565	

*somatório do quadrado dos resíduos

**todos os ajustes apresentaram níveis de significância menores que 5%.

4.1.2 Calor isotérmico de sorção

O calor isotérmico de sorção é calculado a partir das isotermas, que por sua vez é determinada a partir das isotermas.

Tabela 4.4 Parâmetros dos modelos de GAB, Peleg e Lewicki, e SSR*, calculados pelo ajuste das isotermas de dessorção do pimentão tratado com uma solução osmótica de 20% de NaCl a diferentes condições de temperatura.

Modelo	T (°C)	Parâmetros do Modelo**			SSR	
GAB		X _m	C	K		
	20	0,306	0,724	7,095	3,435	
	30	0,202	0,813	10,077	2,461	
	40	0,207	0,739	6,272	1,517	
	50	0,194	0,708	4,388	2,765	
	60	0,129	0,799	4,482	5,857	
Peleg		A	B	D	E	SSR
	20	0,400	0,456	0,629	3,144	2,879
	30	0,553	7,504	0,510	0,730	1,603
	40	0,456	0,808	0,304	6,516	0,942
	50	0,216	6,524	0,402	0,910	0,965
	60	0,338	1,004	0,299	8,750	2,864
Lewicki		F	G	H	SSR	
	20	1,110	0,091	1,175	7,292	
	30	0,663	0,191	0,916	2,447	
	40	0,634	0,144	1,046	2,095	
	50	0,538	0,142	1,157	3,120	
	60	0,342	0,242	1,130	2,477	

*somatório do quadrado dos resíduos

**todos os ajustes apresentaram níveis de significância menores que 5%.

4.1.2 Calor Isostérico de Sorção

O calor isostérico de sorção é calculado a partir das isosteres, que por sua vez é determinada a partir das isotermas.



As Figuras 4.6 a 4.9, contém dados de atividade de água em função da temperatura, na forma de isosteres. Nota-se nessas figuras, a influência da temperatura nas curvas, ou seja, para baixos teores de umidade, a atividade de água aumentou com o aumento da temperatura.

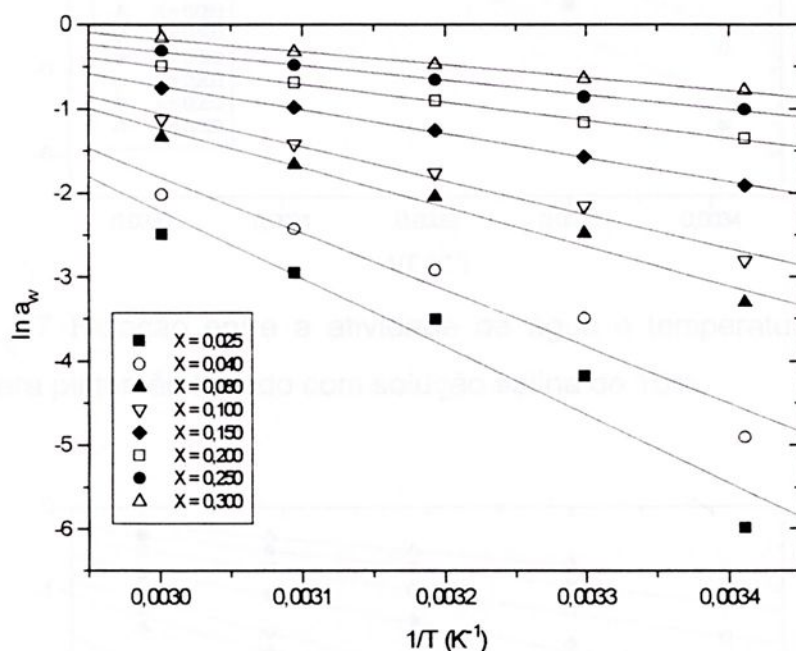


Figura 4.6 Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, para pimentão in natura.

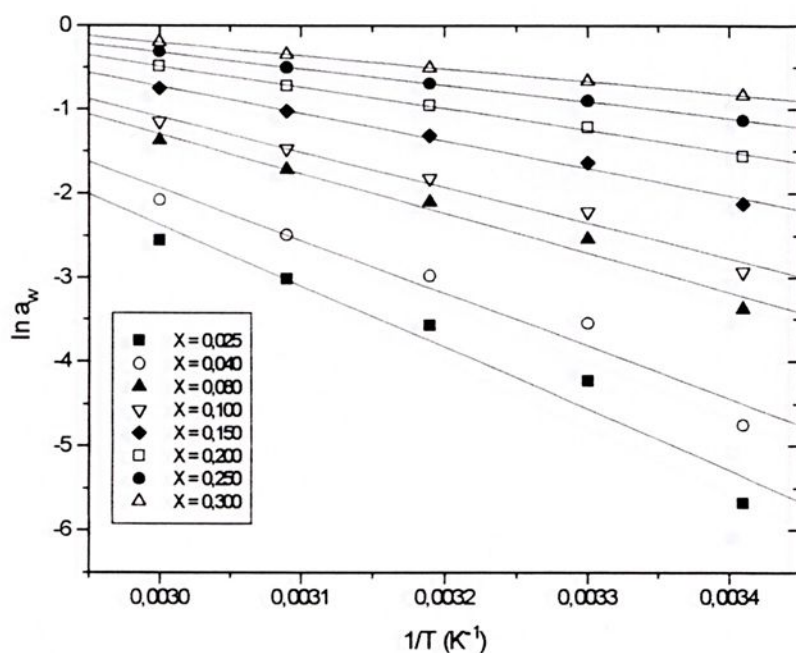


Figura 4.7 Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, para pimentão tratado com solução salina de 10%.

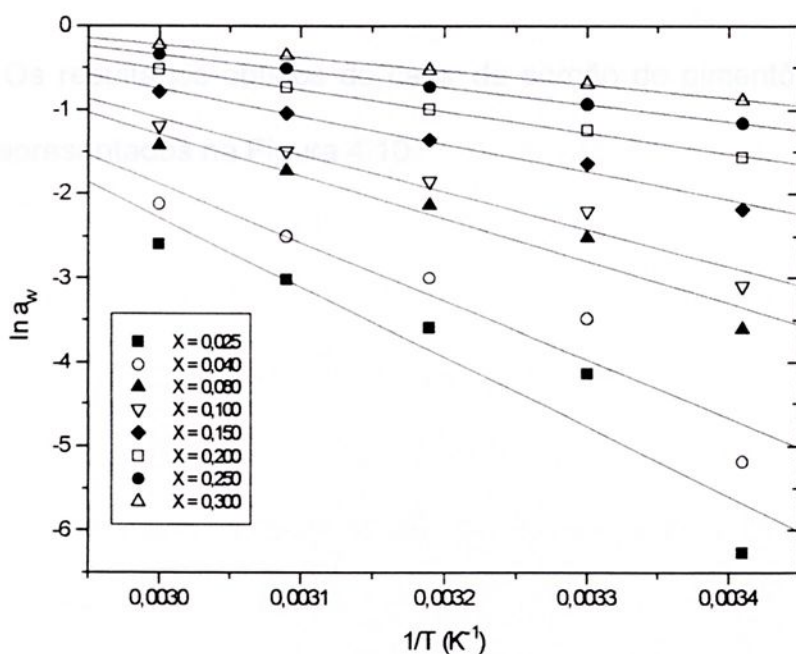


Figura 4.8 Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, para pimentão tratado com solução salina de 15%.

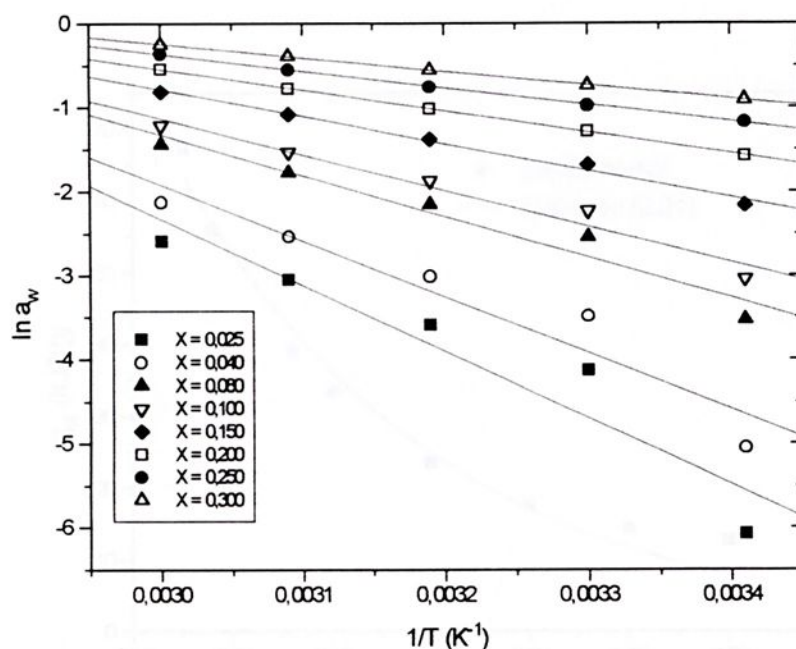


Figura 4.9 Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, para pimentão tratado com solução salina de 20%.

Os resultados obtidos do calor de sorção de pimentões in natura estão apresentados na Figura 4.10.

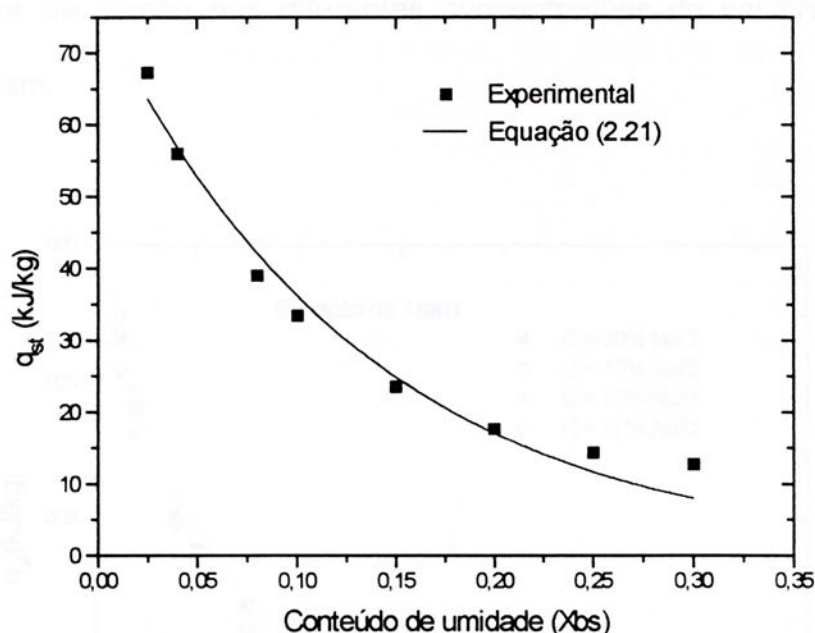


Figura 4.10 Influência do conteúdo de umidade no calor de sorção de pimentão in natura.

Observa-se que o calor isostérico de sorção decresce com o aumento da umidade do produto. Este comportamento pode ser explicado considerando-se que, inicialmente a sorção ocorre no sítio disponível mais ativo, dando origem a uma alta energia de interação (Mazza & Lemaguer, 1978). Porém, ao longo do processo, a disponibilidade dos sítios de sorção decresce e o valor do calor total de sorção tende ao da água pura.

A Figura 4.11 apresenta a influência da concentração de NaCl no calor de sorção de pimentão. Observa-se uma pequena influência do pré-tratamento osmótico no calor de sorção em baixos

teores de umidade. Acima da umidade de 0,3 em base seca, os valores de calor de sorção nas diferentes concentrações de sal praticamente coincidem.

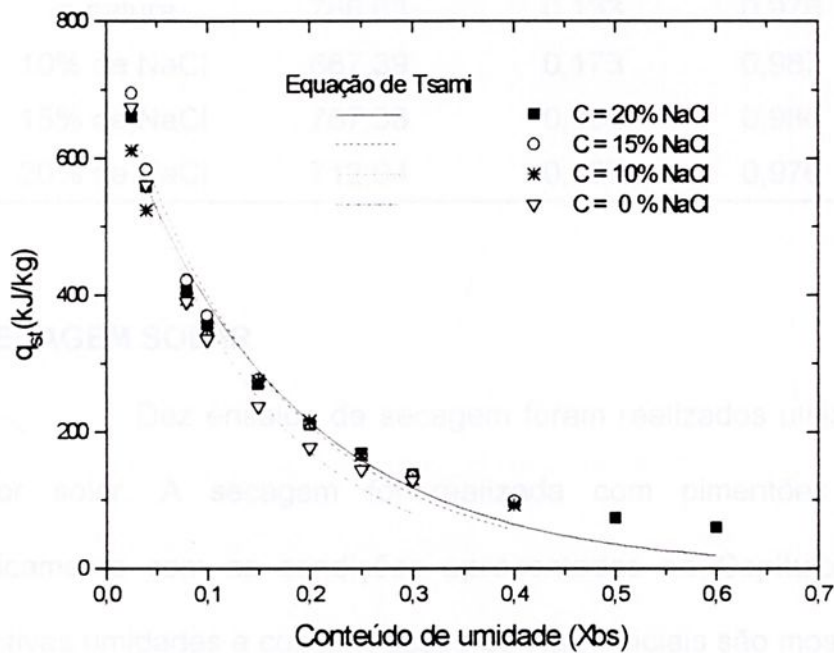


Figura 4.11 Influência de pré-tratamentos osmóticos no calor de sorção de pimentão.

Os dados experimentais do calor isostérico de sorção para o pimentão in natura ou pré-tratado osmoticamente em função do teor de umidade, foram ajustados através da equação exponencial empírica (2.34) aplicada por Tsami et al. (1990), com parâmetros q_0 e X_0 . Os resultados deste ajuste estão descritos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Parâmetros q_0 e X_0 , coeficiente de determinação (R^2) e nível de significância (P) do ajuste da equação de Tsami et al. (1990), para os dados do calor isostérico de sorção e da umidade de pimentão in natura e pré-tratado osmoticamente.

Pimentão	q_0	X_0	R^2
in natura	768,63	0,133	0,978
10% de NaCl	667,39	0,173	0,987
15% de NaCl	767,38	0,154	0,980
20% de NaCl	712,04	0,167	0,976

4.2. SECAGEM SOLAR

Dez ensaios de secagem foram realizados utilizando um secador solar. A secagem foi realizada com pimentões tratados osmoticamente com as condições apresentadas no Capítulo 3, e as respectivas umidades e concentrações de NaCl iniciais são mostradas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Condições experimentais para a secagem de pimentão in natura e pré-tratado osmoticamente utilizando um coletor solar.

Temperatura	Concentração	Relação ($V_{Placa}/V_{Solução}$)	X_0 (b.u.)	C_0 NaCl-pimentão (g/g)
32	20	1/3	0,768	0,101
32	15	1/3	0,773	0,083
32	10	1/3	0,783	0,072
32	20	1/4	0,775	0,105
32	15	1/4	0,769	0,087
32	10	1/4	0,781	0,075
32	20	1/5	0,752	0,104
32	15	1/5	0,767	0,089
32	10	1/5	0,779	0,076
in natura			0,907	0,000

A concentração inicial nos experimentos de secagem solar foi determinada após atingir o equilíbrio na desidratação osmótica (aproximadamente 3 horas).

Estudou-se a cinética de secagem de pimentão, utilizando um coletor solar em camada fina, analisando-se a influência dos pré-tratamentos osmóticos.

Nota-se nos resultados encontrados que não houve o período de secagem a taxa constante bem definido, ocorrendo somente o período decrescente. Isto demonstra que a difusão é provavelmente o mecanismo físico que governa o movimento de umidade desta hortaliça, ou seja, a velocidade de secagem é controlada pela velocidade de difusão do líquido através do sólido, desprezando-se a resistência externa.

De acordo com Keey (1975), a ausência do período constante de secagem, pode ter ocorrido por causa da natureza da umidade, pois mesmo havendo umidade superficial livre, a água estava na forma de suspensão de células e de solução, apresentando uma pressão de vapor abaixo da pressão de vapor da água pura.

A Figura 4.12 apresenta a influência do pré-tratamento osmótico na cinética de secagem solar, relacionado-a com a concentração inicial de NaCl. Observa-se que a concentração inicial de sal afeta a difusão de água no pimentão, onde a maior quantidade de sal aplicada para o tratamento osmótico acarretou numa menor difusão de

água. Isto se torna verdadeiro, considerando que as condições obtidas nos experimentos de secagem solar foram bem semelhantes, como pode ser visto nas Figuras 4.13 e 4.14, que mostram o histórico de radiação solar e temperatura no coletor durante os experimentos, respectivamente. A radiação solar média e temperatura média do coletor ao longo da secagem com as diferentes concentrações iniciais de NaCl, utilizadas na Figura 4.12, são apresentadas a seguir:

$$C_{o \text{ NaCl-pimentão}} = 0,101$$

$$\text{Radiação Térmica Média} = 0,243 \text{ kW/m}^2$$

$$\text{Temperatura Média no Coletor} = 34,2^\circ\text{C}$$

$$C_{o \text{ NaCl-pimentão}} = 0,083$$

$$\text{Radiação Térmica Média} = 0,248 \text{ kW/m}^2$$

$$\text{Temperatura Média no Coletor} = 33,5^\circ\text{C}$$

$$C_{o \text{ NaCl-pimentão}} = 0,072$$

$$\text{Radiação Térmica Média} = 0,253 \text{ kW/m}^2$$

$$\text{Temperatura Média no Coletor} = 35,8^\circ\text{C}$$

Figura 4.13 Histórico da radiação solar ao longo dos experimentos de secagem realizados com a Figura 4.12

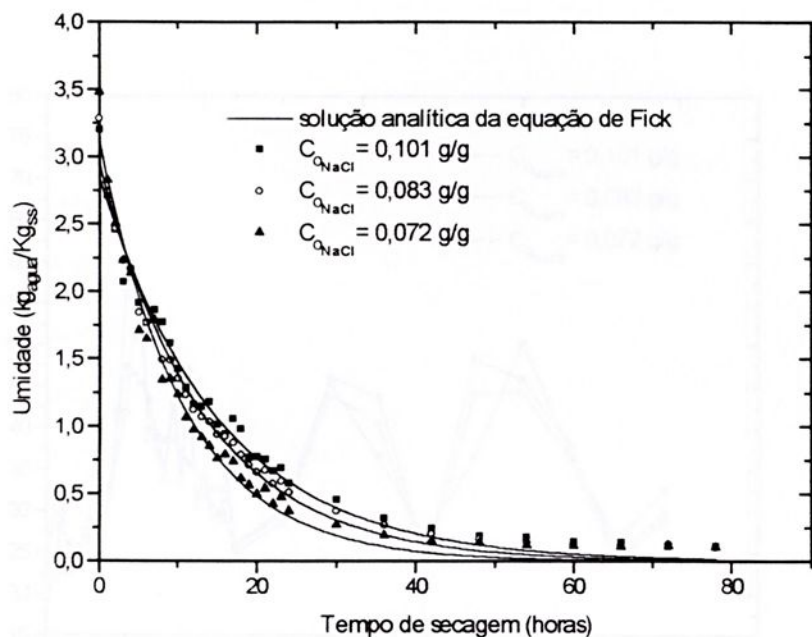


Figura 4.12 Influência da concentração de NaCl na secagem de pimentões vermelhos.

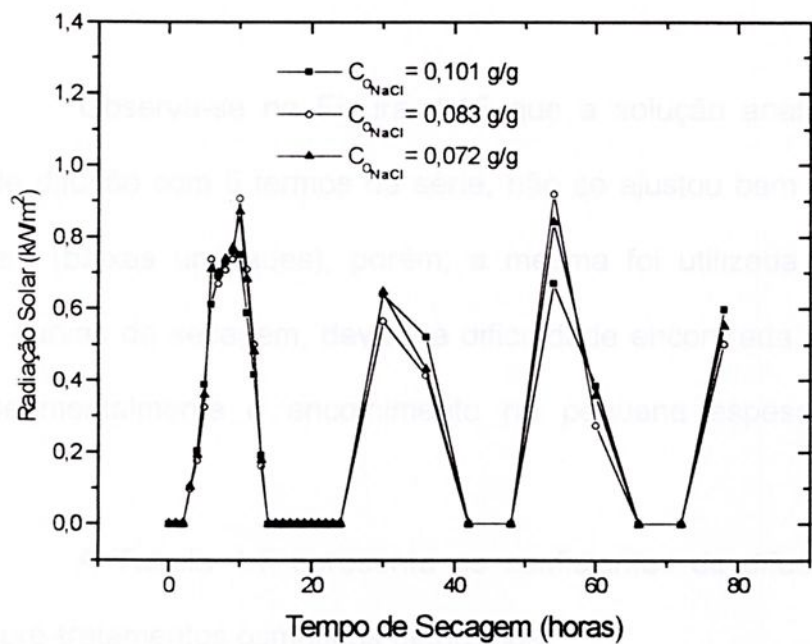


Figura 4.13 Histórico da radiação solar ao longo dos experimentos de secagem relacionados com a Figura 4.12.

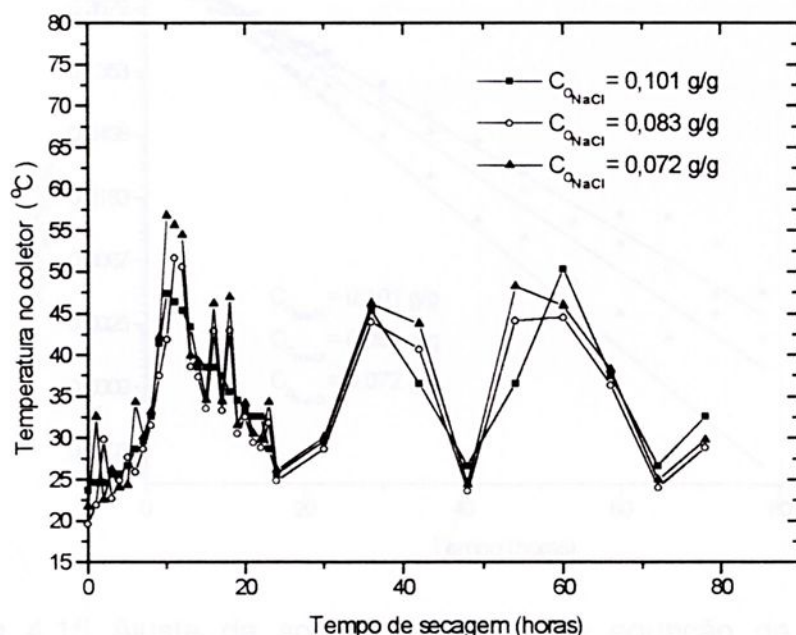


Figura 4.14 Histórico da temperatura no coletor solar ao longo dos experimentos de secagem relacionados com a Figura 4.12.

Observa-se na Figura 4.15 que a solução analítica da equação de difusão com 5 termos da série, não se ajustou bem no final da secagem (baixas umidades), porém, a mesma foi utilizada para o ajuste das curvas de secagem, devido à dificuldade encontrada para se medir experimentalmente o encolhimento na pequena espessura da amostra.

A Tabela 4.7 apresenta os coeficientes de difusão nos diferentes pré-tratamentos osmóticos estudados.

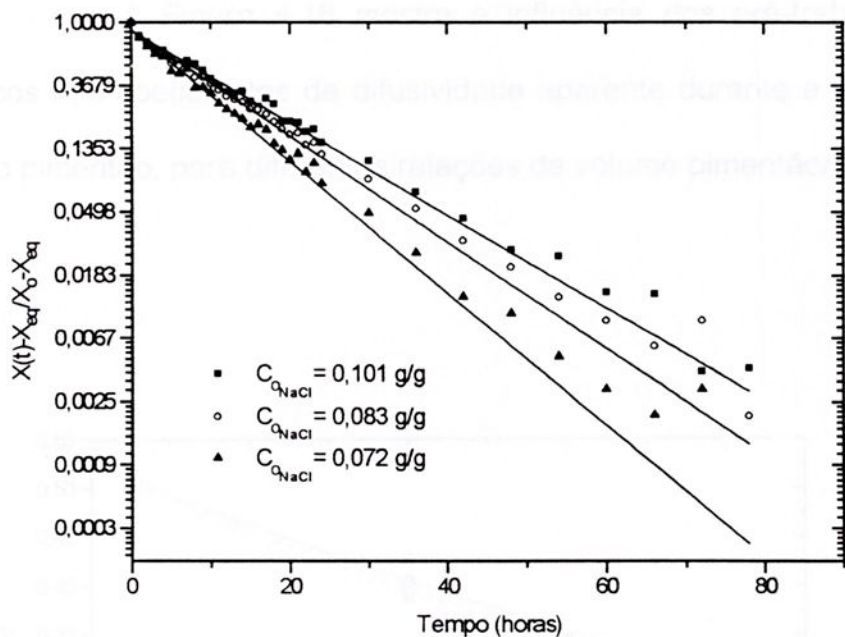


Figura 4.15 Ajuste da solução analítica da equação de difusão em experimentos de secagem solar para pimentões.

Tabela 4.7 Coeficientes de difusão determinados para pimentão in natura e pré-tratado osmoticamente utilizando um coletor solar.

Temperatura	Concentração	Relação ($V_{Placa}/V_{Solução}$)	$D_{ap} \times 10^{10}$ (m^2/s)
32	20	1/3	0,304
32	15	1/3	0,344
32	10	1/3	0,427
32	20	1/4	0,298
32	15	1/4	0,338
32	10	1/4	0,405
32	20	1/5	0,301
32	15	1/5	0,320
32	10	1/5	0,389
in natura			0,523

A Figura 4.16 mostra a influência dos pré-tratamentos osmóticos nos coeficientes de difusividade aparente durante a secagem solar do pimentão, para diferentes relações de volume pimentão/solução.

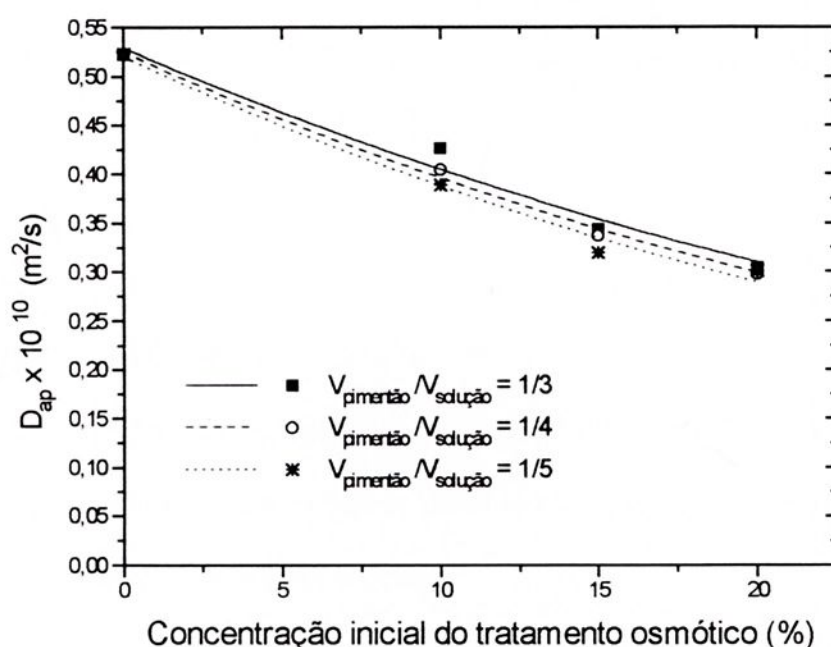


Figura 4.16 Influência do pré-tratamento osmótico nos coeficientes de difusividade aparente durante a secagem solar de pimentão.

Pode ser observado na Figura 4.16 que o aumento da concentração de sal, utilizado como pré-tratamento osmótico para a secagem solar de pimentão, provocou uma diminuição no coeficiente de difusividade aparente. Dessa forma, comparando-se as amostras de pimentão in natura, com o pré-tratado com 20% de NaCl, houve um

decréscimo no coeficiente de difusão de aproximadamente 57%. Não foram observadas diferenças no coeficiente de difusão do pimentão in natura e com 20% de NaCl para as três relações de volume estudadas.



5. CONCLUSÕES

1. As curvas de sorção apresentaram um comportamento de curva tipo II, de acordo com a classificação de BET.
2. A influência de concentração de sal nos pimentões se manifestou principalmente em atividades de água acima de 0,60.
3. A equação de Peleg foi a que melhor descreveu os dados das isotermas de sorção do pimentão vermelho.
4. Observou-se uma pequena influência do pré-tratamento osmótico no calor de sorção em baixos teores de umidade. Acima de 0,3 a influência foi praticamente nula.
5. Os calores de sorção em função da umidade se ajustaram satisfatoriamente ao modelo de Tsami, obtendo-se coeficientes de determinação entre 0,97 e 0,99.
6. A cinética de secagem de pimentões foi ajustada satisfatoriamente pela solução analítica da equação de difusão para uma placa plana, obtendo-se coeficientes de determinação próximos da unidade.
7. Os valores de difusividade aparente de água no pimentão, sofreram uma forte influência da concentração inicial de cloreto de sódio. O aumento da concentração inicial deste sal, acarretou numa diminuição da difusividade aparente deste produto.

6. SUGESTÕES

Mediante os resultados, conclusões e desenvolvimento deste trabalho, novas investigações mostram-se interessantes para ampliar a compreensão de outros fenômenos envolvendo a desidratação de pimentão. Portanto, têm-se as seguintes sugestões:

1. Determinação experimental do coeficiente de difusão de sal e água no tratamento osmótico utilizando a solução da equação de difusão para volumes limitados.
2. Determinação experimental de isotermas de sorção e cinética de secagem solar para pimentão verde.
3. Utilizar coletores solares mais eficientes.
4. Determinação da cinética de encolhimento de pimentão vermelho.
5. Determinação dos coeficientes de difusão aparente considerando o encolhimento do pimentão.



7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AGUERRE, R.J., SUAREZ, C., VIOLLAZ, P.E. Drying kinetics of rough rice grain. Journal of Food Technology, 17, 679-686, 1982.
- BERISTAIN, C.I., AZUARA, E., CORTÉS, R., GARCIA, H.S. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. International Journal of Food Science and Technology, 25, 576-582, 1990.
- BISWAL, R.N., BOZORGMEHR, K. Mass transfer in mixed solute osmotic dehydration of apple rings. American Society of Agricultural Engineers, v. 35 (1), 257-262, 1992.
- BISWAL, R.N., LE MAGUER M. Mass transfer in plant materials in contact with aqueous solutions of ethanol and sodium chloride: Equilibrium data. Journal of Food Process Engineering, 11, 159-176, 1989.
- BISWAL, 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.
- CARBONELL, J.V., PIÑAGA, F., YUSÁ, V., PEÑA, J.L. The dehydration of paprika with ambient and heated air and the kinetics of color degradation during storage. Journal of Food Science, 5, 179-193, 1986.
- CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: Advances in Drying, ed. Arum S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation. Washington, 73-102, 1983.
- CONWAY, J., CASTAIGNE, G., VOYAN X. Mass transfer considerations in the osmotic dehydration of apples. Can. Inst. Food Sc. Technol. J., 16, 1, 25-29, 1983.

- CRANK, J. The Mathematics of Diffusion, 2nd ed., 414 p., Clarendon Press, Oxford, 1975.
- DAUDIN, J.D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. Sciences des Aliments, 3(1), 1-36, 1983.
- DEL VALLE, F.R., NICKERSON, J.T. Studies on salting and drying of fish. II: Dynamic aspects of the salting of fish, Journal of Food Science, 32, 218-224, 1967.
- FARKAS, D.F., LAZAR, M.E. Osmotic dehydration of apple pieces: Effect of temperature and syrup concentration on rates. Food Technology, 23, p.688-690, 1969.
- FAVETO, G., CHIRIFE, J., BARTHOLOMAI, G.B. A study of water activity lowering in meat during immersion-cooking in sodium chloride-glycerol solution. I Equilibrium considerations and diffusional analysis of solute uptake. Journal of Food Technology, 16, 609-619, 1981.
- FLINK, J.M. Process conditions for improved flavor quality of freeze dried foods. J. Agr. Food Chemistry, 23, 1019-1026, 1975.
- GABAS, A.L. Secagem de Uva Itália em Leito Fixo, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 137p., 1998.
- GIANGIACOMO, R., TORREGGIANI, D., ABBO E. Osmotic dehydration of fruit pp. Part I. Sugars exchange between fruit and extracting syrups. J. Food Proc. Pres., 11, 9, 183-195, 1987.
- HAWKES, J., FLINK, J.M. Osmotic concentration of fruit slices prior to freeze dehydration. Journal of Food Processing and Preservation, 2, 265-284, 1978.



- HOUGH, G., CHIRIFE, J., MARINI, C.A. Simple model of osmotic dehydration of appels. Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie, 26, 151-156, 1983.
- IGLESIAS, H.A., CHIRIFE, J. Handbook of Food Isotherms: Water sorption parameters for food and food components. Academic Press, Orlando, 1983.
- INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA DO ESTADO DE SÃO PAULO – Comunicação Pessoal, Janeiro/2002.
- LABUZA, T.P. The effect of water activity on kinetics of food deterioration. Food Technology, 39, n.4, p.36-41, 1980.
- LENART, A., FLINK, J.M. Osmotic concentration of potato. I. Criteria for the end-point of the osmosis process. J. Food Technol., 19, 45-63, 1984a.
- LENART, A. & FLINK, J.M. Osmotic concentration of potato. II. Spatial distribution of the osmotic effect. J. Food Technol., 19, 65-89, 1984b.
- LENART, A., LEWICKI, P.P. Energy consumption during osmotic and convective drying of plant tissue. Acta Alimentaria Polonica, XIV, 1, 65-72, 1988.
- LENART, A. Osmo-Convective drying of fruits and vegetables. Technology and application. Drying Technology, 14(2), 391-413, 1996.
- LERICI, C.R., PEPE, M., PINNAVAIA, G. La disidratazione dlla fruta mediante osmosi. Industria Conserve, 52, 125-129, 1977.
- LERICI, C.R., PINNAVAIA, G., DALLA ROSA, M., BARTOLUCCI, L. Osmotic dehydration of fruit: influence of osmotic agents on drying behavior and product quality, Journal of Food Science, 50, 1217-1226, 1985.



- LOZANO, J.E., ROTSTEIN, E., URBICAIN, M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. Journal of Food Science, 48, 1497-1502, 1983.
- MAZZA, G., LEMAGUER, M. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. Journal of Food Technology, 15181-194, 1980.
- MC CORMICK, P.Y. Solids drying fundamentals. In: Perry, R.H. and Chilton, C.H. Chemical Engineer's Handbook. Mc Grow-Hill Co. 5ed., sec. 20-4, 1983.
- MEDINA-VIVANCO, M.L. Estudo da Difusão de Cloreto de Sódio no Filé de Tilápia (*Oreochromis o. niloticus*) utilizando Volumes Limitados de Salmoura. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 103p., 1998.
- MEDINA-VIVANCO, M.L., SOBRAL, P.J.A., HUBINGER, M.D. Osmotic dehydration of Tilapia fillets in small volumes of ternary solutions. Chemical Engineering Journal, 86(1-2), 199-205, 2002.
- MISRA, M.K., BROOKER, D.B. Thin layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. Transactions of the ASAE, 23(5), 1254-1260, 1980.
- MOTRAJEMI, Y. A Study of Some Physical Properties of Water in Foodstuffs, PhD Thesis, Department of Food Engineering, Lund University, Lund Sweden, 1998.
- NICOLETI, J.F., TELIS-ROMERO, J., TELIS, V.R.N. Air-Drying of Fresh and Osmotically Pre-Treated Pineapple Slices: Fixed Air Temperature Versus Fixed Slice Temperature Drying Kinetics, Drying Technology, 19(9), 2175-2191, 2001.



- NOREÑA, C.Z., HUBINGER, M.D., MENEGALLI, F.C. Técnicas básicas de determinação de atividade de água: uma revisão. Bol. SBCTA, 30: 91-96, 1996.
- PARRY, J.L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: A review, Journal of Agricultural Engineering Researches, 32, 1-29, 1985.
- PARTI, M., DUGMANICS, I. Diffusion coefficient for corn drying. Transactions of the ASAE, 33(5), 1652-1656, 1990.
- PATHAK, P.K., AGRAWAL, Y., SINGH, B.P. Thin-layer drying model for rapeseed. Transactions of the ASAE, 34(6), 2505-2508, 1991.
- PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. Journal of Food Process Engineering, 16, 21-27, 1993.
- PONTING, J.D., WATTERS, G.G., FORREY, R.R., JACKSON, R., STANLEY, W.L. Osmotic dehydration of fruits. Food Technology, 125-128, 1966.
- RAOULT-WACK, A.L. Recent Advances in the Osmotic Dehydration of Food, Trends in Food Science and Technology, 5, 255-260, 1994.
- RAOULT-WACK, A.L., LAFONT, J., RIOS, G., GUILBERT, S. Osmotic dehydration: Study of mass transfer in terms of engineering properties. In: '*Drying 89*', Hemisphere Publishing Corporation, N.Y., A. S. Mujumdar and M. Roques ed., 487-495, 1989.
- RAOULT-WACK, A.L., LENART, A., GUILBERT, S. Recent Advances in Dewatering Through in Concentrated Solutions ("Osmotic Dehydration"). In Drying of Solids, A.S. Mujumdar ed. International Science Publisher, New York, 21-51, 1992.

- RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of foods in dehydration, In: Engineering Properties of Foods, (M.A. Rao and S.S.H. Rizvi, eds.), Academic Press, New York, 1986.
- SARAVACOS, G.D., RAOZEIOUS, G.S. Diffusivity of moisture in air drying or raisins. In: Drying 86, ed. Arum S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation, 2, 486-491, 1986.
- SARAVACOS, G.D., TSIOURVAS, TSAMI, E. Effect of temperature on the water adsorption isotherms of sultana raisins. Journal of Food Science, 51(2), 381-383 e 387, 1986.
- SUAREZ, C., VIOLLAZ, P.A. Shrinkage on drying behavior of potato slabs. Journal of Food Engineering, 13, 103-104, 1991.
- TOBINAGA, S., PINTO, L.A.A. Secagem de materiais fibrosos: músculos de peixes. In: Tópicos Especiais em Secagem, editado por J.T. Freire e D.J.M. Sartori, UFScar, 1, 211-251, 1992.
- TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetables processing, Food Research International, 26, 59-68, 1993.
- TSAMI, E., MAROULIS, Z.B., MARINOS-KOURIS, D., SARAVACOS, G.D. Heat of sorption of water in dried fruits. International Journal of Food Science and Technology, 25, 350-359, 1990.
- 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.
- VAN ARSDEL, W.B., COPLEY, M.J., MORGAN, A.I. Food dehydration, second edition, v.2, The AVI Publishing Company, Inc., Westport, USA, 1973.



- VIAL, C., GUILBERT, S., CUQ, J. Osmotic Dehydration of Kiwi-fruits: Influence of process variables on the color and ascorbic acid content. Sciences des Aliments, 11, 63-84, 1991.
- WANG, N., BRENNAN, J.G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. Journal of Food Engineering, 24, 61-76, 1995.
- WANG, W., SASTRY, S.K. Salt diffusion into vegetable tissue as a pretreatment for ohmic heating: Determination of parameters and mathematical model verification. Journal of Food Engineering, 20, 311-323, 1993.
- YUSHENY, Z., POULSEN, K.P. Diffusion in potato drying. Journal of Food Engineering, 7, 249-262, 1988.
- ZHANG, X., LIU, X., GU, D., ZHOU, W., WANG, R., LIU, P. Desorption isotherms of some vegetables. Journal of the Science and Food Agriculture, 70, 303-306, 1996.

Autorizo a reprodução deste trabalho.

São José do Rio Preto, 10 de julho de 2002.

JUAN MARTIN CARRIZO



