

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E DE ENGENHARIA DE
ALIMENTOS

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE SECAGEM
SOBRE O ENCOLHIMENTO E PROPRIEDADES DE
TRANSPORTE EM FATIAS DE MAÇÃ**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção
do título de Mestre em Engenharia Química.
Curso de Pós-graduação em Engenharia Química.
Departamento de Engenharia Química e Engenharia de
Alimentos.

Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Mara G.N. Quadri

EMERSON LÉO SCHULTZ

FLORIANÓPOLIS

1999

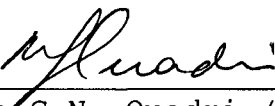
**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE SECAGEM
SOBRE O ENCOLHIMENTO E PROPRIEDADES DE
TRANSPORTE EM FATIAS DE MAÇÃ**

Por

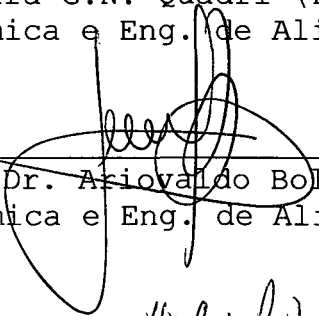
Emerson Léo Schultz

Dissertação aprovada como requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia Química no
Curso de Pós-graduação em Engenharia Química da
Universidade Federal de Santa Catarina.

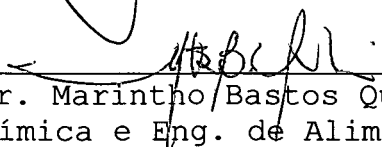
Banca examinadora:




Prof^a. Dr^a. Mara G.N. Quadri (Presidente) orientador
Depto. Eng. Química e Eng. de Alimentos - UFSC



Prof. Dr. Ariovaldo Bolzan
Depto. Eng. Química e Eng. de Alimentos - UFSC



Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri
Depto. Eng. Química e Eng. de Alimentos - UFSC



Prof. Dr. Satoshi Tobinaga
Faculdade de Eng. de Alimentos - UNICAMP

Florianópolis, 26 de março de 1999.

À todas as pessoas que,
neste país tão injusto socialmente,
não tiveram a oportunidade de estudar.

AGRADECIMENTOS

À professora Mara G. N. Quadri pela orientação e correção deste trabalho.

Ao Laboratório de Controle de Processos, do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos desta Universidade, principalmente aos Professores Ariovaldo Bolzan e Ricardo Machado e ao doutorando Marcos Marcelino Mazzuco, pela implantação da aparelhagem necessária ao controle da temperatura no secador montado durante este trabalho.

À Expectron Tecnologia Industrial Ltda. pela ajuda prestada na eliminação de ruídos da aparelhagem de medição da temperatura do ar de secagem.

Aos amigos que me incentivaram na realização de mais esta etapa do meu desenvolvimento profissional, meus agradecimentos.

Aos colegas e funcionários do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos - EQA, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

À CAPES pelo suporte financeiro através de bolsa de estudo.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xii
NOMENCLATURA.....	xiv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	04
2.1 Maçã.....	04
2.1.1 A cultivar Fuji.....	05
2.1.2 Produção nacional.....	06
2.2 Desidratação de frutas e vegetais.....	07
2.2.1 Atividade de água.....	09
2.2.2 Isotermas de sorção.....	10
2.3 Princípios da desidratação convencional.....	13
2.3.1 Condições internas e externas de secagem....	15
2.3.2 Período inicial transiente.....	16
2.3.3 Período de taxa constante.....	17
2.3.4 Período de taxa decrescente.....	18
2.3.5 Determinação do coeficiente de difusão.....	20
2.4 Mudanças indesejáveis que ocorrem durante a desidratação.....	24
2.5 Outros processos de desidratação.....	31
2.5.1 Liofilização.....	31
2.5.2 Desidratação osmótica.....	32
2.5.3 Processos que utilizam o método de <i>puffing</i> ..	33
2.5.4 Processo de secagem HTST em leite fluidizado	34

2.6 Utilização de condições variáveis de secagem	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1 Obtenção e preparo da matéria-prima.....	40
3.2 Processamento da matéria-prima.....	40
3.2.1 Pré-tratamento.....	41
3.2.2 Processos de secagem.....	42
3.3 Equipamentos utilizados na secagem.....	42
3.3.1 Secador.....	42
3.3.2 Determinação da velocidade do ar de secagem.	45
3.4 Obtenção das curvas de secagem e cinéticas de secagem.....	46
3.5 Análises.....	47
3.5.1 Sólidos solúveis.....	47
3.5.2 Teor de umidade.....	47
3.5.3 Densidade aparente.....	48
3.6 Cálculos.....	49
3.6.1 Volume durante a secagem.....	49
3.6.2 Coeficiente de difusão efetivo.....	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1 Estudos preliminares.....	51
4.2 Curvas e cinéticas de secagem.....	52
4.2.1 Efeito da espessura.....	52
4.2.2 Efeito da temperatura.....	56
4.2.3 Efeito da velocidade.....	60
4.2.4 Efeito do pré-tratamento.....	63
4.3 Cinéticas da variação da densidade e do volume durante a secagem.....	67
4.4 Densidade aparente.....	72
4.5 Coeficiente de difusão efetivo.....	74
5 CONCLUSÕES.....	85
6 SUGESTÕES.....	88
7 BIBLIOGRAFIA	90

APÊNDICE A - Determinação da umidade relativa do ar

de secagem.....	100
APÊNDICE B - Calibração do termopar.....	101
APÊNDICE C - Efeito de um pré-tratamento com MBSNa na secagem de maçãs em fatias.....	102
ANEXO A - Equações utilizadas para o cálculo da umidade absoluta e umidade relativa do ar de secagem.....	105
ANEXO B - Um aproximação geométrica para diferenciação de uma função experimental em um ponto.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Maçãs da variedade Fuji.....	05
Figura 2.2 - Isotermas de dessecção de maçãs a diferentes temperaturas (Lomauro <i>et al.</i> , 1985).....	13
Figura 2.3 - Curva de secagem.....	15
Figura 2.4 - Taxa de secagem em função da umidade, em base seca, do material.....	15
Figura 2.5 - Curva de secagem de maçãs em escala semi-logaritmica, obtida por Nieto <i>et al.</i> (1998).....	24
Figura 2.6 - Densidade aparente da maçã em função da umidade e da pressão, na desidratação a vácuo (Krokida <i>et al.</i> , 1997).....	26
Figura 2.7 - Volume específico da maçã em função da umidade e da pressão, na desidratação a vácuo (Krokida <i>et al.</i> , 1997).....	26
Figura 2.8 - Curvas de secagem de maçã a 50/70°C, 70°C e 90/70°C (Piotrowski & Lenart, 1998)...	38
Figura 2.9 - Cinéticas de secagem de maçã a 50/70°C, 70°C e 90/70°C (Piotrowski & Lenart, 1998).....	39
Figura 3.1 - Fluxograma do processamento da maçã.....	41
Figura 3.2 - Diagrama do equipamento experimental utilizado.....	44
Figura 3.3 - Temperatura do ar de secagem durante os 30 minutos iniciais de secagem de experimentos a 120/80°C e 140/80°C, a 3,0 m/s.....	44
Figura 4.1 - Curvas de secagem de fatias de maçã <i>in natura</i> experimentos a 120/80°C, 1,5 m/s,	

	nas espessuras de 2,8 mm e 5,8 mm.....	53
Figura 4.2	- Curvas de secagem das fatias de maçã, pré-tratadas com amido gelatinizado, a 80°C e 1,5 m/s, nas espessuras de 2,8 e 5,8 mm.....	53
Figura 4.3	- Cinéticas de secagem de fatias de maçã <i>in natura</i> , a 120/80°C e 1,5 m/s, para 2,8 mm e 5,8 mm de espessura.....	54
Figura 4.4	- Cinéticas de secagem de fatias de maçã, pré-tratadas com amido gelatinizado, a 80°C, 1,5 m/s, para 2,8 mm e 5,8 mm de espessura.....	55
Figura 4.5	- Curvas de secagem de maçã <i>in natura</i> a diferentes temperaturas e 3,0 m/s.....	58
Figura 4.6	- Cinéticas de secagem de maçã <i>in natura</i> a diferentes temperaturas e 3,0 m/s.....	58
Figura 4.7	- Demonstração dos períodos de secagem(80°C e 3,0 m/s).....	59
Figura 4.8	- Demonstração dos períodos de secagem(120/60°C e 120/80°C, a 3,0 m/s)..	59
Figura 4.9	- Curva de secagem a 80°C, nas velocidades de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s.....	61
Figura 4.10	- Curva de secagem a 140/80°C, nas velocidades de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s.....	61
Figura 4.11	- Cinética de secagem a 80°C, nas velocidades de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s.....	62
Figura 4.12	- Cinética de secagem a 140/80°C, nas velocidades de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s.....	62
Figura 4.13	- Influência do pré-tratamento nas curvas de secagem a 60°C e 80°C e 3,0 m/s.....	64
Figura 4.14	- Influência do pré-tratamento nas curvas de secagem a 120/60°C e 120/80°C e 3,0 m/s.....	64
Figura 4.15	- Influência do pré-tratamento na	

	cinética de secagem a 60°C e 3,0 m/s...	65
Figura 4.16 -	Influência do pré-tratamento na cinética de secagem a 80°C e 3,0 m/s...	65
Figura 4.17 -	Influência do pré-tratamento na cinética de secagem a 120/60°C e 3,0 m/s.....	66
Figura 4.18 -	Influência do pré-tratamento na cinética de secagem a 120/80°C e 3,0 m/s.....	66
Figura 4.19 -	Densidade aparente da maçã em função do tempo, na secagem a 80°C, a 3,0 m/s e 6,0 m/s, e 120/80°C, a 6,0 m/s.....	68
Figura 4.20 -	Densidade aparente da maçã em função de X/X_0 , na secagem a 80°C, a 3,0 m/s e 6,0 m/s, e 120/80°C, a 6,0 m/s.....	68
Figura 4.21 -	Volume em função do tempo, na secagem a 80°C e 120/80°C, a 6,0 m/s, e 80°C, a 3,0 m/s, sem pré-tratamento e na espessura de 5,8 mm.....	70
Figura 4.22 -	Volume em função de X/X_0 , na secagem a 80°C e 120/80°C, a 6,0 m/s, e 80°C, a 3,0 m/s, sem pré-tratamento e na espessura de 5,8 mm.....	70
Figura 4.23 -	Densidade e cinética da variação do volume em função do tempo, a 80°C, a 3,0 m/s.....	71
Figura 4.24 -	Densidade e a taxa de secagem em função do tempo, 80°C, a 3,0 m/s.....	71
Figura 4.25 -	Densidade aparente da maçã desidratada, com e sem pré-tratamento de amido (cpt e spt), a diferentes temperaturas e a 6,0 m/s.....	74
Figura 4.26 -	Curvas de secagem da maçã <i>in natura</i> , a 80°C, e velocidades do ar de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s, salientando-se os períodos utilizados para o cálculo do primeiro e do segundo D_{ef}	75
Figura 4.27 -	Curvas de secagem da maçã <i>in natura</i> , a	

	140/80°C, e velocidades do ar de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s, salientando-se os periodos utilizados para o cálculo do primeiro e do segundo D_{ef}	75
Figura 4.28 -	Densidade e $-\ln(X/X_0)$ em função do tempo, a 80°C e 3,0 m/s.....	77
Figura 4.29 -	Cinética e $-\ln(X/X_0)$ em função do tempo, a 80°C e 3,0 m/s.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Produção brasileira de maçãs, safra 97/98.....	06
Tabela 2.2 - Adaptabilidade de algumas frutas à desidratação.....	08
Tabela 2.3 - Atividade de água e crescimento de microorganismos nos alimentos.....	11
Tabela 2.4 - Coeficientes de difusão efetivo para a desidratação de maçãs com e sem pré-tratamentos (Nieto <i>et al.</i> , 1998).....	23
Tabela 4.1 - Densidade aparente (em g/ml) da maçã <i>in natura</i> desidratada a diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem.....	73
Tabela 4.2 - Densidade aparente (em g/ml) da maçã pré-tratada com amido, desidratada a diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem.....	73
Tabela 4.3 - D_{ef} , com a respectiva faixa de umidade e situação da densidade, nas seguintes condições do ar: 80°C e 3,0 m/s.....	76
Tabela 4.4 - Coeficiente de difusão efetivo dos experimentos realizados a 60, 70 e 80°C, 1,5, 3,0 e 6,0 m/s e 5,8 mm.....	79
Tabela 4.5 - Coeficiente de difusão efetivo do período de secagem HTST, nas diferentes velocidades empregadas, com e sem pré-tratamento, e na espessura de 5,8 mm....	80
Tabela 4.6 - Coeficiente de difusão efetivo do período a baixas temperaturas dos experimentos realizados com uma etapa	

	inicial de secagem HTST.....	81
Tabela 4.7 -	Constantes b , d e e da equação (4.1), para o primeiro e o segundo coeficiente de difusão efetivo, com e sem pré- tratamento de amido.....	83
Tabela 4.8 -	Valores experimentais e calculados através da equação (4.1), com os coeficientes da tabela 4.7, do primeiro e segundo coeficiente de difusão efetivo.....	84

NOMENCLATURA

120/60°C	Ensaio realizado com período HTST, com ar na temperatura de 120°C, durante 15 minutos, com posterior diminuição para 60°C.
120/80°C	Ensaio realizado com período HTST, com ar na temperatura de 120°C, durante 15 minutos, com posterior diminuição para 80°C.
140/80°C	Ensaio realizado com período HTST, com ar na temperatura de 140°C, durante 15 minutos, com posterior diminuição para 80°C.
a_w	Atividade de água.
A	Área de transferência de massa [m ²]
b	Constante [m ² /s]
C	Constante
cpt	Ensaio realizado com fatias de maçã pré-tratadas com amido gelatinizado.
d	Constante [m ² /s.°C]
Def	Coefficiente de difusão efetivo da água [m ² /s]
e	Constante [m]
F	Frequência utilizada no conversor de frequência, [Hz].
k	Constante
L ₀	Espessura inicial da amostra [m]
m	Massa [kg]
m _{am}	Massa da amostra [g]
m _s	Massa de sólido [kg]
m _T	Massa do tolueno contido no picnômetro [g]
N	Taxa de secagem [1/h]

p_w	Pressão de vapor de água de um alimento [atm]
p_w^0	Pressão de vapor da água pura [atm]
R^2	Coefficiente de correlação
spt	Ensaio realizado com fatias de maçã <i>in natura</i> .
t	Tempo [h]
T_{bs}	Temperatura de bulbo seco do ar de secagem [°C]
UR	Umidade relativa do ar
V	Volume da amostra no tempo t de secagem [cm ³]
V_{am}	Volume da amostra [cm ³]
V_0	Volume inicial da amostra [cm ³]
V_p	Volume do picnômetro [cm ³]
V_{Tamb}	Velocidade média do ar na temperatura ambiente (bulbo seco), [m/s].
V_{Tol}	Volume do tolueno contido no picnômetro [cm ³]
V_{Ts}	Velocidade média do ar na temperatura de secagem (bulbo seco), [m/s].
V_{80}	Velocidade média do ar de secagem na temperatura de 80°C, [m/s]
X	Umidade em base seca [kg água/kg matéria seca]
X_e	Umidade de equilíbrio [kg água/kg matéria seca]
X_m	Umidade da monocamada [kg água/kg matéria seca]
X_0	Umidade inicial [kg água/kg matéria seca]
Y	Temperatura lida no termômetro padrão [°C]
z	Direção na qual ocorre a transferência de massa [m]

Letras gregas

ρ	Densidade [g/cm ³]
ρ_{am}	Densidade da amostra [g/cm ³]
ρ_0	Densidade inicial da amostra [g/cm ³]
ρ_t	Densidade da amostra no tempo t de secagem [g/cm ³]
ρ_{Tol}	Densidade do tolueno [g/cm ³]

ρ_{Tamb} Densidade do ar na temperatura ambiente (bulbo seco),
[kg/m³].

ρ_{Ts} Densidade do ar na temperatura de secagem (bulbo
seco), [kg/m³].

RESUMO

Maçãs da variedade Fuji, cortadas em fatias, foram desidratadas em um secador convencional, com ar nas temperaturas de 60, 70 e 80°C e velocidades de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s. Diferentes combinações da imersão das fatias de maçã em amido gelatinizado e da aplicação do processo HTST (140°C ou 120°C durante 15 min), foram utilizadas como pré-tratamento. Determinaram-se as curvas e cinéticas de secagem, o coeficiente de difusão efetivo e a densidade aparente do produto. Em três experimentos, calculou-se o encolhimento (V/V_0) das fatias de maçã.

Sendo a maçã um produto higroscópico, as cinéticas de secagem não apresentaram período de taxa constante. O período de taxa decrescente dos experimentos realizados com a secagem HTST, apresentou três mudanças significativas, e somente duas mudanças foram observadas nos experimentos a temperaturas mais baixas.

O pré-tratamento com amido diminuiu a densidade aparente final do produto nos experimentos realizados à velocidade de 6,0 m/s. Já o encolhimento não apresentou diferenças significativas, para uma mesma razão de umidade (X/X_0).

Os coeficientes de difusão encontrados para os casos estudados corresponderam aos períodos de secagem decrescentes, apresentando correspondência com os diferentes comportamentos encontrados para a densidade aparente do produto.

ABSTRACT

Apples of Fuji variety, cut into slices, were dehydrated in a conventional dryer, using air at the temperatures of 60°C, 70°C e 80°C and velocities of 1,5, 3,0 and 6,0 m/s. Different combinations of immersion of the apple slices in gelatinised starch and the application of the HTST process (140°C or 120°C for 15 min) were utilised as pre-treatments. The drying curves and kinetics, the effective diffusion coefficient, and the apparent density of the product were determined. In three experiments, the shrinkage (V/V_0) of the apple slices was evaluated.

Because apple is a hygroscopic material, the drying kinetics did not show a constant rate drying period. The falling rate period in the experiments with the HTST drying showed three significant changes, and only two changes were observed in the other experiments at lower temperatures.

The pre-treatment with starch decreased the density of the final product, in the experiments realised at air velocity of 6,0 m/s. It wasn't observed significant changes of the shrinkage for the same relative moisture content (X/X_0).

The estimated diffusion coefficients were related to the falling drying periods and, they also showed a relation with the different behaviours found for the apparent density of the product.

1 INTRODUÇÃO

O estado de Santa Catarina destaca-se como o maior produtor de maçãs no Brasil, sendo que a safra ocorre entre fevereiro e maio, dependendo da variedade. A maçã, para ser comercializada fora do período de colheita, necessita ser conservada a frio, o que exige grandes investimentos. De um modo geral, pequenos e médios produtores não possuem condições financeiras para arcar com os mesmos. Portanto, a aplicação de outros métodos de conservação se faz necessária, dentre os quais destaca-se a desidratação convencional a ar, que adapta-se bem à maçã, e é considerado um dos modos mais simples e econômicos de comercializar frutas e vegetais processados (Boeing, 1998, Johnson, *et al.*, 1998; Cruz, 1990).

Na Europa e nos Estados Unidos, a indústria que utiliza processos de desidratação em alimentos, está muito desenvolvida. No Brasil, a desidratação já vem sendo empregada em escala industrial há algum tempo. Como exemplos de produtos desidratados, pode-se citar o leite em pó, café solúvel, carne seca, farinhas, entre outros. Outros alimentos incorporam estes já desidratados, como é o caso do caldo de carne e sopas instantâneas (Cruz, 1990).

A desidratação envolve a ocorrência simultânea de transferência de calor, massa e quantidade de movimento, no qual calor é transferido para o produto e umidade é removida na forma de vapor d'água para uma fase gasosa insaturada. Devido à complexidade do processo, não há uma teoria generalizada que explique o mecanismo do movimento interno de umidade (Rizvi, 1986).

Durante a desidratação com ar, podem ser observados dois períodos de secagem distintos: um período inicial de taxa constante no qual a secagem ocorre como se água pura estivesse sendo evaporada, e um período de taxa decrescente no qual o movimento de umidade é controlado pela resistência interna. Os fatores que controlam a taxa de secagem em cada período são diferentes. No período de taxa constante são a temperatura, a velocidade e a umidade relativa do ar. No período decrescente os fatores são a temperatura do ar e a espessura do alimento, enquanto a velocidade e a umidade relativa do ar não afetam a taxa de secagem (Rizvi, 1986 e Fellows, 1988).

Devido à mudança nos fatores que controlam a taxa de secagem, condições variáveis de secagem podem ser utilizadas com o objetivo de diminuir o tempo total de secagem e os custos energéticos (Mujumdar & Meon, citado por Piotrowski, 1998).

Além dos fatores descritos, o encolhimento é um dos principais fatores que depreciam o alimento durante a secagem. Ele ocorre simultaneamente à remoção de umidade, devendo, portanto, ter um efeito significativo na taxa de secagem. Um estudo do fenômeno de encolhimento torna-se, assim, importante para o melhor entendimento do processo de secagem (Rovedo *et al.*, 1995). Com a finalidade de evitar o encolhimento, a utilização de uma etapa inicial de secagem a altas temperaturas e curto tempo (HTST) em leito fluidizado tem sido empregada na desidratação de frutas e hortaliças. Essa etapa pode promover a expansão (*puffing*) de muitos materiais, além de reduzir o tempo de secagem. Os produtos obtidos possuem baixa densidade e alta taxa de reidratação (Kim & Toledo, 1987).

O objetivo da pesquisa aqui apresentada foi estudar a influência de diferentes condições do ar de secagem, da espessura e de um pré-tratamento com amido gelatinizado na

secagem de maçãs em fatias, analisando-se a curva e a cinética de secagem e a densidade aparente do produto desidratado. Um estudo também foi realizado sobre o encolhimento e o coeficiente de difusão efetivo na secagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo traz, inicialmente, a descrição da matéria prima utilizada, características e produção agrícola, além da variedade estudada. Depois, são abordados os princípios da desidratação de frutas e vegetais, as alterações que ocorrem nesses produtos durante o processamento, e os vários processos empregados.

2.1 Maçã

A evolução da macieira deve ter iniciado há 25 milhões de anos, tendo como centro de origem a região entre o Cáucaso e o leste da China. Presume-se, no entanto, que o desenvolvimento das espécies atuais tenha iniciado após o final da última era glacial, há 20.000 anos (Kreuz *et al.*, 1986).

Com cerca de 25 espécies e milhares de variedades, a maçã é a fruta mais cultivada em todo o mundo. Pertence à família das rosáceas, e à subfamília *Pomoideae*, à qual também pertence a pêra. Vários nomes são citados na nomenclatura científica para a macieira cultivada, mas *Malus domestica* é a denominação aceita pelo Código Internacional de Nomenclatura Botânica (Bender, 1986).

A maçã é um pseudo-fruto, sendo que a polpa, suculenta e comestível, é formada pelo receptáculo floral; o verdadeiro fruto encerrando as sementes está localizado no centro da fruta. A polpa possui cor que varia de amarela esbranquiçada a creme, podendo ser ácida, doce, suculenta

ou farinhenta. A cor da casca apresenta-se vermelha, verde, amarela ou com variações dessas cores (Leite *et al.*).

2.1.1 A cultivar Fuji

É originária do Japão, resultante de melhoramento genético executado pela Estação Experimental de Morioka, através do cruzamento das variedades Ralls Janet e Delicious (Figura 2.1). Foi introduzida no Brasil no final da década de 60, sendo atualmente a variedade de maçã mais produzida em Santa Catarina (Ribeiro, 1986, Kreuz, 1998).

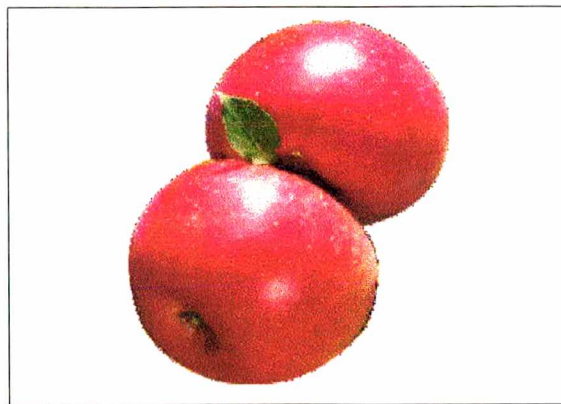


Figura 2.1 - Maçãs da variedade Fuji.

A planta da cultivar Fuji é mais exigente em frio hibernal do que as cultivares Gala e Golden Delicious, tendo uma melhor adaptação nas regiões mais frias do sul do Brasil. A floração vai desde fins de setembro à segunda quinzena de outubro, dependendo das condições climáticas do ano.

O fruto é de tamanho médio a grande, e arredondado. Nas regiões com temperaturas hibernais mais amenas, o fruto tende a ser mais achatado, assimétrico e de tamanho menor. A epiderme possui faixas vermelhas e fundo verde-amarelado, sendo lustrosa e lisa. A polpa é amarelo-clara, firme,

quebradiça, muito suculenta, com alta incidência de *water core* (mancha ou pingo de mel). É doce, relativamente ácida e com sabor excelente. A maturação é tardia, estendendo-se até a primeira quinzena de abril (Ribeiro, 1986).

2.1.2 Produção nacional

O desenvolvimento comercial da cultura da macieira iniciou-se na década de setenta, impulsionado pelo Programa de Fruticultura de Clima Temperado (PROFIT). O programa foi executado pela Secretaria da Agricultura e do Abastecimento de Santa Catarina em conjunto com o Ministério da Agricultura e a Associação de Crédito e Assistência Rural (ACARESC), a partir de 1970 (Boneti *et al.*, 1995).

Os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul são os principais produtores, sendo responsáveis por mais de 90% da produção nacional. Paraná e São Paulo são responsáveis pelo restante da produção. Na Tabela 2.1 tem-se a produção nacional da safra 97/98 (Boeing, 1998).

Tabela 2.1 - Produção brasileira de maçãs, safra 97/98.

Estado	Produção (ton.)
Santa Catarina	360.656
Rio Grande do Sul	261.657
Paraná	26.333
São Paulo	7.533
Brasil	656.179

Fonte: IBGE - Instituto Cepa/SC

2.2 Desidratação de frutas e vegetais

A água, sendo o componente dominante dos alimentos comuns, fornece o ambiente necessário para os processos biológicos, bioquímicos e biofísicos que degradam os alimentos, tornando-os inadequados para o consumo humano. Assim, a desidratação de frutas e vegetais tem por objetivo principal a conservação desses alimentos através da redução do teor de água. Essa redução deve ser efetuada até a umidade na qual a concentração de açúcares, ácidos, sais e outros componentes seja suficientemente elevada para reduzir a atividade de água, e conseqüentemente, retardar ou até inibir os processos de deterioração dos alimentos (Travaglini *et al.*, 1993).

Portanto, a desidratação aumenta a vida útil das frutas e vegetais, passando de poucos dias ou meses para vários meses, chegando, em alguns casos, até a anos. Além disso, com a redução de peso e volume, devido à remoção de água e eliminação da casca, sementes, caroço e outras partes não adequadas à alimentação humana, há uma diminuição dos custos com embalagens, transporte e armazenamento (Rizvi, 1986).

É possível desidratar praticamente todas frutas e vegetais. Na Tabela 2.2 apresenta-se a adaptabilidade de algumas frutas à desidratação.

As frutas desidratadas, em geral, transformam-se em doces de sabor extremamente acentuado e agradável, devido à concentração do açúcar natural da fruta, quando a umidade é retirada. Portanto, o grau de maturidade das frutas é fator determinante para o sabor do produto final. Desidratando-se frutas pouco maduras, obtêm-se produtos descorados, pouco saborosos e bem menos doces. Entretanto, frutas muito maduras resultam em produtos geralmente fermentados e de cor escura (Cruz, 1990).

Tabela 2.2 - Adaptabilidade de algumas frutas à desidratação.

Frutas	Adaptabilidade à desidratação
Abacaxi	Excelente
Ameixa	Boa
Banana	Boa
Caqui	Muito boa
Cereja	Excelente
Coco	Excelente
Damasco	Excelente
Figo	Excelente
Frutas cítricas	Pobre
Maçã	Excelente
Manga	Boa
Melão	Pobre
Morango	Razoável à boa
Nectarina	Excelente
Papaia	Boa
Pêra	Excelente
Pêssego	Excelente
Uva	Excelente

Fonte: Adaptado de Cruz (1990).

Quanto aos vegetais, encontram-se na literatura informações sobre a desidratação de batata, cebola, cenoura, cogumelo, tomate e outros (Afzal & Abe, 1998, Lewicki *et al.* 1998, Litvin *et al.*, 1998, Paschoaleti & Tobinaga, 1996, Romero *et al.*, 1998).

O processo de desidratação mais aplicado às frutas e vegetais é a desidratação convencional. Entretanto, outros processos como a liofilização e os métodos de *puffing*, também tem sido empregados na produção de frutas e vegetais desidratados.

Nos últimos anos, muita atenção tem sido dada à qualidade do produto final, a qual pode ser caracterizada pela aparência, cor, textura, gosto, retenção de nutrientes e outras propriedades físicas, como a densidade. Estas qualidades dependem do método e das condições de secagem, bem como dos pré-tratamentos empregados (Krokida *et al.*, 1997).

Entre os pré-tratamentos, os mais utilizados são aqueles destinados à preservação da cor natural do produto. Com esta finalidade, agentes oxidantes, como sulfitos e ácido ascórbico, tem sido empregados. A imersão de frutas e vegetais em uma solução de amido gelatinizado, é um pré-tratamento usado com a finalidade de diminuir o colapso das paredes das células do alimento enquanto a água é removida, o que melhora a qualidade do produto seco, através da diminuição do encolhimento e melhorando a reidratação (Hansmann *et al.*, 1998, Romero *et al.*, 1998).

A combinação de diferentes processos de desidratação pode ser empregada com o intuito de melhorar a qualidade do produto final e diminuir o consumo de energia. Como exemplos, têm-se: a desidratação osmótica com posterior secagem convencional; o emprego da liofilização e secagem por microondas com secagem final a vácuo ou convencional; secagem HTST em leito fluidizado com posterior secagem convencional (Sankat *et al.*, 1996, Litvin *et al.*, 1998, Luccas, 1996). Entretanto, as vantagens e desvantagens de cada processo ainda precisam ser avaliadas.

2.2.1 Atividade de água

A facilidade com que um alimento se deteriora está ligada a atividade de água, pois não é o conteúdo de água de um alimento, mas o estado no qual a água se encontra nos

alimentos (ligada ou livre) que é importante na atuação dos microorganismos (Jayaprakasha *et al.* 1997).

Além do crescimento de microorganismos, muitas reações químicas que comprometem a qualidade dos alimentos possuem influência da atividade de água. Por exemplo, as reações de escurecimento não-enzimático são intensificadas em valores de a_w entre 0,4 e 0,7, com um máximo entre 0,65 e 0,7, sendo que para valores maiores a taxa da reação diminui rapidamente. Já a atividade enzimática e o crescimento de microorganismos ocorre em altos valores de a_w : acima de 0,6 (Strumillo & Adamiec, 1996).

Valores limitantes de atividade de água, nos quais o crescimento intensivo de microorganismos inicia, são dados na Tabela 2.3.

O estado da água está relacionado à pressão de vapor de água em um alimento. Quanto maior a proporção de água livre presente, maior a pressão de vapor. A razão entre a pressão de vapor de água em um alimento (p_w) e a pressão de vapor da água pura na mesma temperatura (p_w^0) é definida como atividade de água, a qual também pode ser relacionada com a umidade relativa do ar em equilíbrio com o produto, de acordo com a equação (2.1).

$$a_w = \frac{p_w}{p_w^0} = \frac{UR}{100} \quad (2.1)$$

2.2.2 Isotermas de sorção

Isotermas de sorção representam a relação entre a atividade de água e a umidade de equilíbrio. Em alimentos, sua utilização é ampla, indo desde os cálculos do tempo de secagem, modelagem das variações que ocorrem durante a es-

Tabela 2.3 - Atividade de água e crescimento de microorganismos nos alimentos.

Faixa de a_w	Microorganismos geralmente inibidos por a_w menores	Alimentos que geralmente estão nessa faixa de a_w
0,95-1,0	<i>Pseudomonas, Bacillus Escherichia</i> , algumas leveduras	Frutas, vegetais, carne, peixe e outros alimentos pericíveis frescos e em conserva
0,91-0,95	<i>Salmonella, Lactobacillus</i> , alguns fungos, leveduras	Alguns queijos e sucos de fruta concentrados
0,87-0,91	Muitas leveduras (<i>Candida, Torulopsis</i>)	Salame, queijos secos, margarina
0,80-0,87	Maioria dos fungos, maioria das <i>Saccharomyces, Staphylococcus</i>	Maioria dos sucos de fruta concentrados, chocolate, farinha, arroz
0,75-0,80	Maioria das bactérias halofílicas	Geléia, marmelada, frutas
0,65-0,75	Fungos xerofílicos (<i>A. chevalieri</i>)	Nozes, algumas frutas secas
0,60-0,65	Leveduras osmofílicas (<i>S. rouxii</i>), alguns fungos	Frutas secas contendo 15-20% de umidade; mel, caramelo
Abaixo de 0,6	Não há proliferação de microorganismos	Alimentos com umidade inferior a 10%

Fonte: Adaptado de Rizvi (1986).

tocagem até a predição do tempo de vida útil de um alimento (Lomauro *et al.*, 1985).

A maioria das isotermas de sorção de água dos alimentos tem uma forma sigmoideal e a isoterma é dividida em três regiões. A baixas atividades de água assume-se que ocorre a

sorção física, que é seguida por uma adsorção em múltiplas camadas. Em altas atividades de água, uma condensação capilar é postulada, sendo que nessa região a isoterma tem um forte incremento e a precisão da medida de atividade de água é baixa (Lewicki, 1997).

Modelos matemáticos que descrevem as isotermas de sorção são de fundamental importância, pois com um certo número de pontos experimentais, pode-se ajustar uma isoterma teórica. Deste modo, é possível fazer a correspondência entre o teor de umidade de equilíbrio do alimento (X_e) e a atividade de água (a_w), extrapolando-se valores de difícil determinação experimental.

A equação de BET (Brunauer *et al.*, 1938) é o modelo mais conhecido e usado, fornecendo um bom ajuste de isotermas de sorção sigmoidais para valores de atividade de água até cerca de 0,3, e para alguns alimentos até 0,5. A equação é expressa da seguinte forma:

$$\frac{a_w}{(1-a_w)X_e} = \frac{1}{X_m C} + \frac{C-1}{X_m C} a_w \quad (2.2)$$

Onde: a_w = Atividade de água

X_e Umidade de equilíbrio [kg água/kg matéria seca]

X_m = Umidade da monocamada [kg água/kg matéria seca]

C = Constante

A maioria das modificações da equação de BET, com a finalidade de aumentar a sua aplicabilidade para valores de atividade de água mais elevados, a deixam muito complicada. Uma exceção é o modelo de GAB (Guggenheim - Anderson - de Boer), que devido à sua simplicidade, é muito usado na descrição e interpretação de isotermas de sorção de alimentos (Lewicki, 1997):

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{k \cdot C \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w)[1 + (C - 1)k \cdot a_w]} \quad (2.3)$$

onde C e k são constantes relacionadas à energia de interação entre as primeiras e as mais distantes moléculas adsorvidas nos sítios individuais de sorção.

Lomauro *et al.* (1985) aplicaram diferentes equações, como a de GAB, a dados de isotermas de sorção de diversos alimentos encontrados na literatura. Entre estes encontram-se dados de isotermas de dessorção da maçã nas temperaturas de 20, 40 e 60°C descritos pela isoterma de GAB (Figura 2.2).

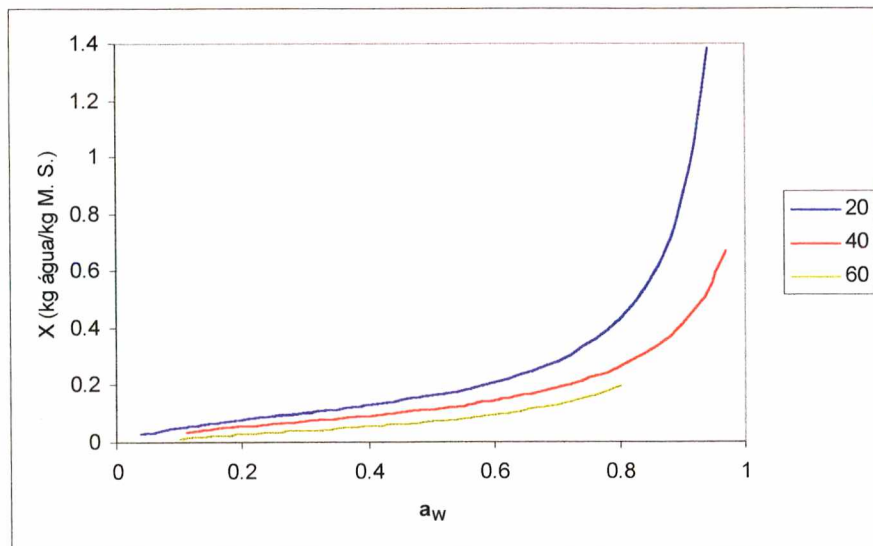


Figura 2.2 - Isotermas de dessorção de maçãs a diferentes temperaturas (Lomauro *et al.*, 1985).

2.3 Princípios da desidratação convencional

Quando ar quente escoar sobre um material úmido, calor é transferido para a superfície, evaporando a água. Vapor de água se difunde através de uma camada limite sendo

levado pela corrente de ar. Isso cria uma região de baixa pressão de vapor de água na superfície do material, e uma diferença de pressão de vapor de água é estabelecido entre o interior úmido do material e o ar seco (Fellows, 1988).

O processo de secagem é representado pela curva de secagem, a qual mostra a umidade do material em função do tempo de secagem, e pela cinética de secagem, que apresenta a taxa de secagem em função da umidade do material.

A taxa de secagem é definida como a quantidade de umidade removida do material por unidade de tempo:

$$N = -\frac{dX}{dt} \quad (2.4)$$

Onde: N = Taxa de secagem [1/h]

X = Umidade em base seca [kg água/kg matéria seca]

t = Tempo [h]

Uma curva de secagem típica, para secagem convectiva, é apresentada na Figura 2.3, enquanto na Figura 2.4 apresenta-se a curva da cinética de secagem. Estas curvas apresentam os seguintes segmentos:

- ◆ **Segmento AB**: representa um pequeno período inicial.
- ◆ **Segmento BC**: representa o período de taxa de secagem constante.
- ◆ **Segmento CE**: representa o período de taxa de secagem decrescente.

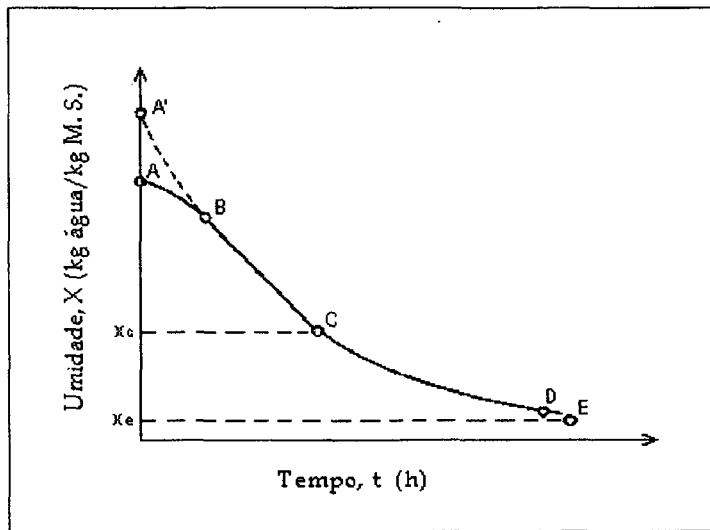


Figura 2.3 - Curva de secagem.

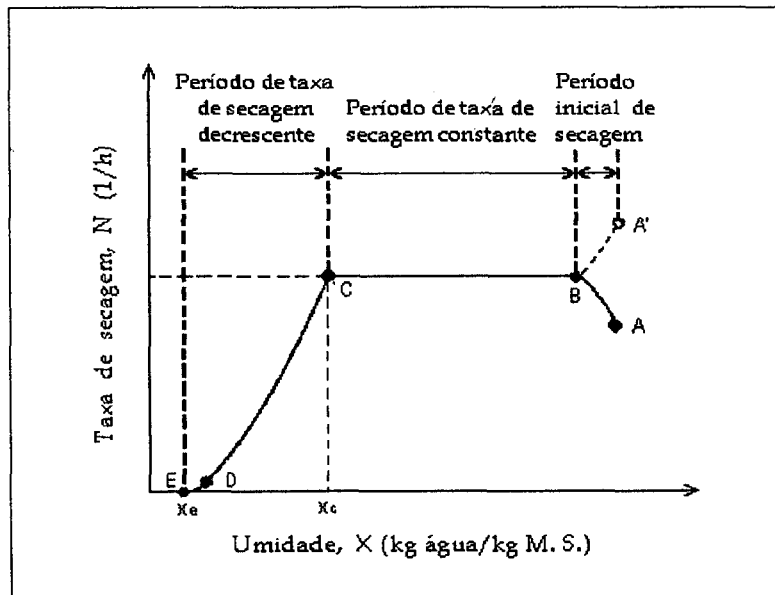


Figura 2.4 - Taxa de secagem em função da umidade, em base seca, do material.

2.3.1 Condições internas e externas de secagem

Embora a remoção de umidade por evaporação a partir da superfície para o ar ambiente, através da camada limite, seja essencial para o processo de secagem, a migração de umidade dentro do material úmido também deve ser considera-

da. Assim, as condições externas e/ou internas de secagem afetam a taxa de secagem.

Quando a resistência à transferência de massa do vapor d'água na camada limite for maior do que a resistência à migração de umidade interna, a intensidade de secagem depende principalmente das condições do ar de secagem e é praticamente independente dos parâmetros do material. Neste caso, o processo de secagem é controlado pela transferência de massa na superfície do sólido.

Quando a resistência à transferência de massa através do material é maior do que a resistência à difusão do gás na camada limite, os parâmetros do material úmido influenciam fortemente a taxa de secagem.

Há casos nos quais as resistências à transferência de massa na camada limite e no material úmido são da mesma ordem. Então, os parâmetros do material úmido e do ar de secagem devem ser considerados (Strumillo & Kudra, 1986).

2.3.2 Período inicial

No período inicial de secagem, o material e sua superfície coberta com uma camada de líquido têm uma temperatura inferior à temperatura de equilíbrio, que normalmente é igual a temperatura de bulbo úmido do ar. Como resultado, a taxa de secagem aumenta entre os pontos A e B, das Figuras 2.3 e 2.4, até que a temperatura da superfície atinja o valor de equilíbrio. Se o material tiver uma temperatura superior à de equilíbrio, o que dificilmente ocorre, o período inicial de secagem é representado pela linha tracejada A'B (Strumillo & Kudra, 1986).

2.3.3 Período de taxa constante

No período de taxa constante, a água move-se do interior do alimento para a sua superfície, na mesma taxa na qual é evaporada. Portanto, durante este período a superfície mantém-se úmida. A temperatura do material é usualmente igual à temperatura de bulbo úmido do ar. Por isso, nesse período de secagem podem ser usadas altas temperaturas do ar de secagem (Strumillo & Kudra, 1986).

A camada limite de ar ao redor do alimento age como uma barreira para a transferência de ambos, calor e vapor de água, durante a secagem. A espessura dessa camada é determinada principalmente pela velocidade do ar de secagem. Se a velocidade do ar é muito baixa, vapor d'água deixa a superfície do alimento e aumenta a umidade do ar na camada limite, causando uma redução no gradiente de pressão de vapor d'água e, conseqüentemente, na taxa de secagem. Similarmente, se a temperatura do ar de secagem diminui ou a umidade aumenta, a taxa de evaporação diminui e a secagem torna-se mais lenta.

Portanto, as três características do ar que são necessárias para uma secagem bem-sucedida neste período são (Fellows, 1988):

- ◆ Temperatura de bulbo seco relativamente alta,
- ◆ baixa umidade relativa,
- ◆ alta velocidade do ar.

O mecanismo de movimento interno de líquido e conseqüentemente a estrutura do alimento que está sendo seco, além das condições do ar de secagem, determinam a extensão do período de taxa constante. Alimentos em que o movimento de líquido é provavelmente controlado por forças de capilaridade e gravidade, costumam apresentar um período de taxa constante. Esses alimentos são chamados de não-higroscópicos. Já os alimentos em que o movimento de

líquido ocorre através do mecanismo da difusão, a água que é evaporada na superfície não é imediatamente restituída pelo movimento de líquido do interior do alimento. Por isso, esses alimentos são secos sem apresentarem o período de taxa constante e são chamados de higroscópicos. Chiang & Petersen (1986) classificaram a maçã como um material poroso e higroscópico.

Períodos de taxa constante têm sido encontrados em alimentos como batata doce, cenoura, gel agar e peixe (Suzuki *et al.*, Jason, citados por Rizvi, 1986). Em condições típicas de secagem com ar, vários alimentos apresentaram a ausência do período de taxa constante, como a maçã (Chiang & Petersen, 1986), a amora (Maskan & Gögüs, 1998), o pêssego (Hansmann *et al.*, 1998) e a banana (Travaglini *et al.*, 1993). Entretanto, mesmo os materiais não-higroscópicos não apresentam o período de taxa constante quando a secagem é controlada pelo mecanismo interno de transferência de massa.

O período de taxa constante termina quando o conteúdo de umidade crítica (X_c) é atingido (ponto C nas Figuras 2.3 e 2.4). Nesse ponto, o conteúdo de umidade do alimento não é suficiente para saturar a superfície inteira. A umidade crítica não é uma propriedade intrínseca do material, e geralmente varia com a espessura do alimento e com a taxa de secagem (McCabe & Smith, 1976).

2.3.4 Período de taxa decrescente

Após a secagem ter atingido o ponto C, tem início o período de taxa decrescente, quando a taxa de transporte de líquido para a superfície é menor do que a taxa de evaporação na superfície, tornando-a cada vez mais deficiente em água líquida. Neste período a taxa de secagem

diminui até que se aproxime de zero, quando a umidade no produto produz uma pressão de vapor próxima à de equilíbrio com o ar externo (Rizvi, 1986, Van Arsdel, 1973).

Durante o período de taxa decrescente, a cinética de secagem pode ser marcada por uma ou mais quebras, ou mudanças na inclinação. Estas mudanças representam a transição de um tipo de mecanismo de movimento interno de água para outro (Van Arsdel, 1973).

Para a secagem de maçã, Üretir *et al.* (1996) encontraram dois períodos de taxa de secagem decrescente, e outros autores (Rizvi, 1986, Fellows, 1988) também dividem este período em dois. Assim, nesta revisão apresenta-se a teoria relacionada aos dois períodos de taxa decrescente.

No primeiro período de taxa decrescente a superfície do alimento ainda está úmida, mas já apresenta regiões secas. Nas partes secas, a temperatura aumenta devido ao calor transferido pelo ar de secagem. Quando a superfície do alimento não apresenta mais áreas úmidas e a evaporação passa a ocorrer no interior do alimento, termina o primeiro período de taxa decrescente, representado pelo ponto D das Figuras 2.3 e 2.4 (Rizvi, 1986).

Durante o primeiro período de taxa decrescente, os fatores que controlam a taxa de secagem variam. Inicialmente os fatores são similares aos do período de taxa constante, mas gradualmente a taxa de transferência de massa interna torna-se o fator controlador. Esta depende principalmente da temperatura do ar e da espessura do alimento. Ela não é afetada por ambos, umidade relativa e velocidade do ar (Fellows, 1988).

Hansmann *et al.* (1998) verificaram a influência da umidade relativa na taxa de secagem, através de experimentos realizados com pêssegos, cortados ao meio, em diferentes umidades relativas (20%, 30% e 40%), em condições simuladas de fluxo contra-corrente (temperatura

inicial de 58°C e final de 67°C). Concluíram que a umidade relativa possui grande influência na taxa de secagem até uma umidade de 2 kg água/kg material seco, quando as taxas de secagem tornam-se praticamente idênticas nos três ensaios, o que pode ser atribuído ao fato da difusão, a partir dessa umidade, tornar-se a etapa limitante do processo.

Abaixo do ponto D (Figura 2.4), o processo de secagem encontra-se no segundo período de taxa decrescente. Neste período a superfície encontra-se seca e a frente de evaporação move-se para o interior do sólido. Assim, a evaporação ocorre no interior do alimento, e o vapor alcança a superfície por difusão. As forças que controlam a difusão do vapor determinarão a velocidade final de secagem, as quais são em grande parte independentes das condições externas do material.

Finalmente, a pressão de vapor do alimento iguala-se à pressão parcial de vapor no ar seco, não ocorrendo mais a secagem. O conteúdo de umidade limitante deste estágio é referido como umidade de equilíbrio (X_e), e é representado pelo ponto E nas Figuras 2.3 e 2.4 (Okada *et al.*, 1997)

2.3.5 Determinação do coeficiente de difusão

A difusão de gases, vapores e líquidos em um meio sólido poroso é um processo complexo, principalmente, devido à estrutura heterogênea do material, a qual pode interagir com os compostos que estão se difundindo. Como resultado, a difusividade de moléculas pequenas em sólidos é muito menor do que em líquidos, e isto deve afetar a taxa de vários processos químicos e físicos envolvendo transferência de massa, como a secagem.

A difusão de umidade em alimentos sólidos durante a secagem envolve a difusão molecular, fluxo capilar, difusão de Knudsen, fluxo hidrodinâmico, ou ainda, a difusão superficial. Estima-se o coeficiente de difusão efetivo durante a secagem a partir de dados experimentais, usualmente através da taxa de secagem, a temperaturas específicas (Saravacos, 1986).

A segunda lei de Fick da difusão pode ser usada para estimar o coeficiente de difusão efetivo no período de taxa decrescente. Considera-se que a temperatura no alimento, nesse período de secagem, é constante, o que torna o coeficiente de difusão da água no alimento também constante, já que este depende da temperatura (Saravacos, 1986). Assim, no caso de difusão unidirecional em coordenadas cartesianas, a equação diferencial parcial é dada por:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (2.5)$$

Onde: D_{ef} = Coeficiente de difusão efetivo da água no alimento [m^2/s]

z = Direção na qual ocorre a transferência de massa [m]

As condições iniciais e de contorno para uma placa semi-infinita são:

$$C.I.: t = 0, X(z, 0) = X_0 \quad (2.5.a)$$

$$C.C.: z = L_0, X(L, t) = X_e \text{ (na superfície)} \quad (2.5.b)$$

$$z = 0, \frac{\partial X}{\partial z} = 0 \text{ (no centro)} \quad (2.5.c)$$

Onde: X_0 = Umidade inicial [kg água/kg matéria seca]

X_e = Umidade de equilíbrio [kg água/kg matéria seca]

L_0 = Metade da espessura inicial da amostra [m]

Supondo que a umidade se distribui uniformemente e, que a resistência externa seja desprezível, a solução analítica da lei de Fick é dada na forma de uma série infinita (Crank, 1975):

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2}{4} \pi^2 \frac{D_{ef} t}{L_0^2}\right] \quad (2.6)$$

Para altos valores do número de Fourier de massa, $F_0 = D_{ef} \cdot t / L_0^2$ (Luikov, 1961), a equação (2.6) converge rapidamente e somente o primeiro termo é usado, resultando em:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{4 \cdot L_0^2}\right] \quad (2.7)$$

Assim, para o período de taxa decrescente, obtem-se uma relação linear, em coordenadas semi-logarítmicas, entre a razão de umidade $(X - X_e)/(X_0 - X_e)$ e o tempo de secagem. Isso permite o cálculo do coeficiente de difusão efetivo. O coeficiente de difusão tem sido calculado, através desse método, para a secagem de cebola, bananas pré-tratadas osmoticamente, maçãs, amoras (Lewicki et al., 1998, Sankat et al., 1996, Nieto et al., 1998, Maskan & Gögüs, 1998).

Nieto et al. (1998) desidrataram maçãs, variedade Granny Smith, cortadas na forma de uma placa regular (4 x 4 x 0,4 cm), utilizando como pré-tratamento a impregnação com soluções de glucose a pressão atmosférica e a vácuo (pressão de 60 mmHg), branqueamento através de vapor à pressão atmosférica por 1 min, ou a combinação dos dois

pré-tratamentos. A velocidade do ar de secagem utilizada foi de 16 m/s e com temperatura de bulbo seco de 60,0°C. Nestas condições eles determinaram as curvas de secagem para os diferentes pré-tratamentos utilizados e calcularam o coeficiente de difusão efetivo através da equação (2.7). Na Tabela 2.4 apresentam-se os resultados das amostras desidratadas nos diferentes pré-tratamentos utilizados e o controle (sem pré-tratamento). Amostras sem pré-tratamento e branqueadas apresentaram dois coeficientes de difusão,

Tabela 2.4 - Coeficientes de difusão efetivo para a desidratação de maçãs com e sem pré-tratamentos (Nieto et al., 1998).

Pré-tratamento	Concentração	$D_{ef} \times 10^9$ (m ² /s)
Sem	-	1,30
		2,28
Branqueamento	-	1,40
		1,75
Glicose (P _{atm})	22,0% em massa	1,05
	31,9% em massa	0,81
	39,5% em massa	0,62
Glicose (vácuo)	59,0% em massa	0,61
Branqueamento + Glicose (P _{atm})	22,0% em massa	1,05
	31,9% em massa	1,63
	39,5% em massa	0,14

caracterizados pelas retas sobrepostas às curvas de secagem mostradas na Figura 2.5. Esse comportamento foi atribuído ao encolhimento e efeitos térmicos sobre as amostras com alta umidade inicial e/ou a existência de um controle misto para o transporte de umidade no período inicial de secagem. As demais curvas da mesma figura, referem-se à secagem com o emprego da impregnação com glicose a pressão atmosférica e a vácuo como pré-tratamentos.

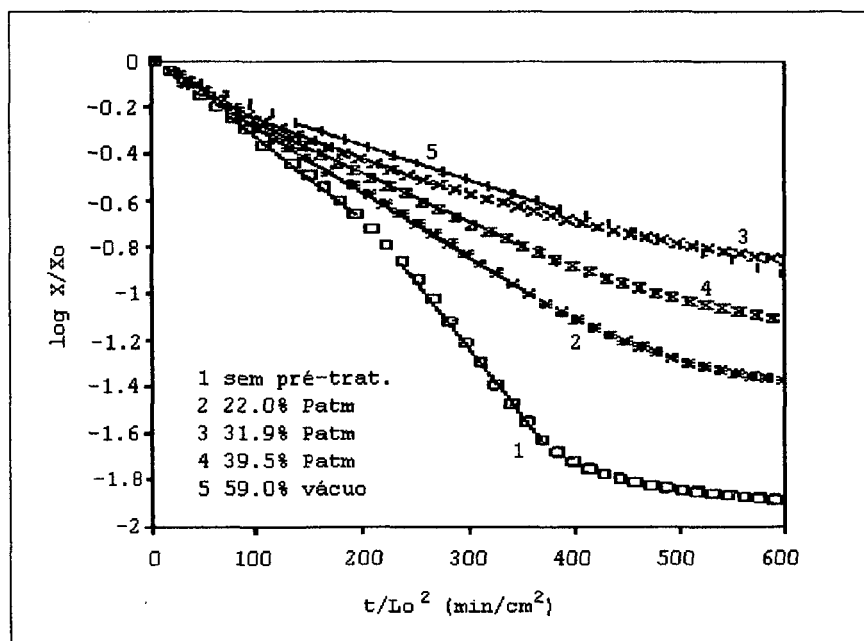


Figura 2.5 - Curvas de secagem de maçã obtidas por Nieto et al. (1998).

2.4 Mudanças indesejáveis que ocorrem durante a desidratação.

O produto, ao ser seco, sofre diferentes mudanças que, em geral, se não forem controladas, podem prejudicar a comercialização do produto obtido. Dentre as principais mudanças, pode-se citar: o encolhimento; o escurecimento; e a perda de substâncias voláteis; as quais são responsáveis

pelas alterações do odor, sabor e textura do produto durante a desidratação.

Encolhimento

O encolhimento que ocorre durante a desidratação das frutas é um dos principais fatores que prejudicam a aparência, textura e a reidratação do produto final. Normalmente a fruta seca é dura, enrugada e sem a presença de poros, tornando-se difícil de mastigar e pouco atraente para o consumidor (Luccas & Kieckbusch, 1994).

O desenvolvimento de uma estrutura porosa em frutas desidratadas melhora a textura e facilita a penetração de água durante a reidratação (Jen *et al.*, 1989). Esta última característica é particularmente importante em frutas e hortaliças que são utilizadas em sopas e refeições instantâneas, massas de bolos, entre outros.

Wang & Brennan (1995) mediram o encolhimento de batata durante a secagem com ar nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C, através de medidas das dimensões da batata durante diferentes tempos de secagem. Medidas de densidade aparente e umidade em diferentes tempos de secagem também foram feitas, e assim puderam determinar o encolhimento através de um modelo matemático. Eles verificaram que não houve diferenças significativas entre os dados experimentais de encolhimento e os calculados pelo modelo.

Krokida *et al.* (1997) modelaram matematicamente o encolhimento e a porosidade de maçãs, bananas, cenouras e batatas durante a desidratação a vácuo. O modelo baseia-se em propriedades como a umidade do material, densidade aparente e densidade da partícula (sem poros e água). Nas Figuras 2.6 e 2.7, apresentam-se os resultados obtidos para a variação da densidade aparente e do volume específico da maçã em função da umidade do material. Concluíram que no início da secagem, o tecido celular é suficientemente elás-

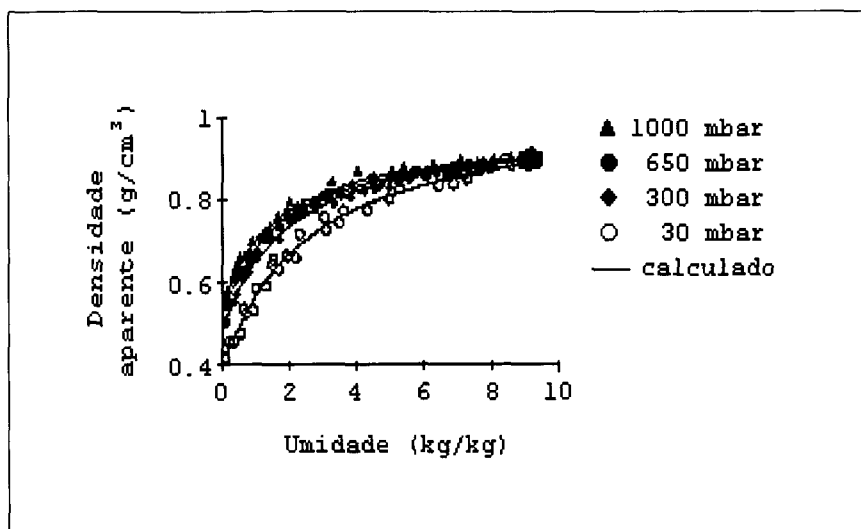


Figura 2.6 - Densidade aparente da maçã em função da umidade e da pressão, na desidratação a vácuo (Krokida et al., 1997).

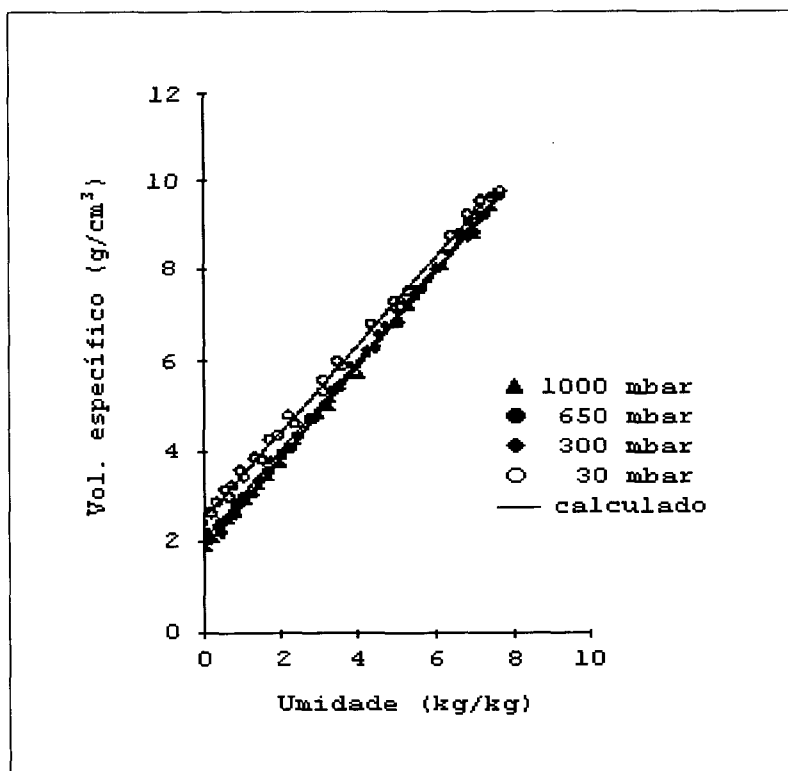


Figura 2.7 - Volume específico da maçã em função da umidade e da pressão, na desidratação a vácuo (Krokida et al., 1997).

tico para encolher no espaço deixado pela umidade evaporada. No decorrer do processo de secagem, as variações estruturais no tecido celular resultam em um esqueleto mais rígido, favorecendo o desenvolvimento da porosidade. Esse modelo foi aplicado por Krokida et al. (1998) na liofilização de frutas e vegetais.

Carneiro & Tobinaga (1996) aplicaram um modelo matemático de transferência de umidade, que leva em conta o encolhimento, a dados experimentais de secagem de filés de peixe. Verificaram que após certo período, o encolhimento é praticamente negligenciável, quando então aplicaram o modelo difusivo de Fick (equação 2.5). O erro encontrado entre os perfis de umidade experimental e calculado foi de 1,5% para o período com encolhimento e 2,1% na fase sem encolhimento.

Com a finalidade de diminuir, ou até evitar, o encolhimento, tem-se usado a infiltração de biopolímeros antes da desidratação convencional. Além disso, outros processos de desidratação, como a liofilização, *explosion puffing* e secagem a altas temperaturas e curto tempo (HTST) em leito fluidizado, ou a combinação dos mesmos com a desidratação convencional, também têm sido usados com esse objetivo.

A infiltração de biopolímeros naturais nos espaços intracelulares e dentro da parede das células de cenouras, antes da desidratação, foi pesquisada por Mudahar et al. (1991). A infiltração desses biopolímeros fortaleceria a parede celular da cenoura, além de servir como amortecedores, protegendo as células de um colapso durante o processo de desidratação. Como biopolímeros foram usados dextranas padronizadas de quatro pesos moleculares diferentes. Depois, as cenouras foram secas pelo processo HTST em leito fluidizado, seguido pela secagem convencional. Amostras pré-tratadas com a dextrana de menor

peso molecular, apresentaram razões de reidratação menores do que aquelas tratadas com dextranas de tamanho maior. A dextrana com o maior peso molecular não aumentou significativamente a razão de reidratação, quando comparada com amostras desidratadas sem a infiltração de dextranas. Os polímeros de tamanhos intermediários não afetaram a densidade das cenouras desidratadas. Através da análise microscópica, verificaram que os polímeros de tamanho pequeno foram encontrados nos espaços intercelulares e dentro das paredes celulares. Os polímeros maiores foram encontrados somente nas células danificadas, próximas à superfície.

A imersão do alimento em uma solução de amido gelatinizado também tem sido usada com a mesma finalidade, antes da desidratação convencional de tomates e da secagem HTST em leito fluidizado de bananas com posterior secagem em bandeja (Romero et al., 1998, Luccas, 1996).

Escurecimento

Outra mudança indesejável durante a desidratação é o escurecimento da fruta, que tanto pode ocorrer durante como após o processamento. O escurecimento pode ser provocado por reações enzimáticas e não enzimáticas.

O escurecimento enzimático ocorre em muitas frutas e vegetais quando certos compostos fenólicos, presentes em tecidos vegetais, sofrem oxidação para orto-quinonas, reação que é catalisada pela enzima polifenol oxidase (PPO). As quinonas então polimerizam para formar polímeros vermelhos, marrons ou pretos. A oxidação desses compostos fenólicos ocorre quando os tecidos vegetais são cortados ou danificados (Sapers & Hicks, 1989).

A prevenção do escurecimento enzimático pode ser feita através da aplicação de sulfitos (SO₂, sulfito, bisulfito, metabisulfito) ou de ácidos normalmente encontrados nos

tecidos dos vegetais, como ácido cítrico, ácido málico, ácido fosfórico, ácido ascórbico e ácido tartárico (Sapers & Hicks, 1989, Almeida & Nogueira, 1995).

Apesar dos sulfitos serem extremamente versáteis, pois além de inibirem o escurecimento enzimático também inibem o escurecimento não-enzimático, seu uso apresenta várias desvantagens, como alguns efeitos negativos na textura, o desenvolvimento de odores desagradáveis, podendo ainda causar corrosão, bem como a destruição da tiamina (vitamina B1). Além disso, a ingestão contínua de sulfitos, mesmo nos níveis comumente usados, tem produzido reações alérgicas em indivíduos sensíveis. Por isso, o uso de sulfitos foi proibido em frutas e vegetais frescos nos Estados Unidos, e para alimentos processados contendo mais de 10 ppm de SO₂ total, a presença do aditivo deve constar na embalagem (Sayavedra-Soto & Montgomery, 1986, Almeida & Nogueira, 1995).

Tratamentos térmicos, conhecidos como branqueamento, também são usados na inativação enzimática. Entretanto, esses tratamentos costumam alterar a textura e o sabor naturais da fruta. Normalmente utiliza-se o branqueamento com água quente ou vapor, ou ainda a imersão em xarope de glicose, a temperaturas próximas da sua fervura (Cruz, 1990).

O outro tipo de escurecimento que ocorre em frutas é conhecido como reação de Maillard, e ocorre tanto no processamento como no armazenamento. Consiste na reação entre aminoácidos e açúcares redutores, levando à formação de melanoidinas, que são polímeros nitrogenados de coloração escura e alto peso molecular (Cruess, 1973).

Mowlah *et al.* (1983) desidrataram bananas branqueadas, em ar quente a 60°C e 1,5 m/s, e observaram que a amostra começou a escurecer após 8 horas de secagem, quando 90% da

umidade já tinha evaporado, e que à medida que o conteúdo de umidade foi decrescendo o escurecimento foi aumentando.

Perda de compostos aromáticos voláteis

A difusão de compostos aromáticos voláteis é muito importante durante o processamento de alimentos. A perda de componentes aromáticos característicos durante a secagem de alimentos influencia diretamente a aceitabilidade do produto pelo consumidor.

Quando a água é evaporada de um alimento, carrega consigo, no mínimo, traços de cada um dos componentes voláteis do alimento fresco. Conseqüentemente, ocorre uma perda indesejável e irreversível do sabor e aroma do alimento (Van Arsdel, 1973).

Muitos compostos aromáticos dos alimentos são mais voláteis que a água, devido à combinação de alta pressão de vapor e baixa solubilidade em soluções aquosas. Por isso, altas perdas de voláteis deveriam ocorrer durante a secagem de alimentos. Entretanto, observa-se que estes componentes podem ser retidos em porcentagens relativamente altas nos alimentos secos.

Duas teorias tem sido propostas para explicar a retenção dos componentes voláteis na secagem de alimentos: (a) a teoria da difusão seletiva de Thijssen e Rulkens (Rulkens, citado por Saravacos, 1986), e (b) a teoria da retenção em uma microregião (*the microregion entrapment theory*) (Flink & Karel, citado por Saravacos, 1986).

A teoria da difusão seletiva explica a retenção pela baixa difusividade dos compostos aromáticos (D_A) em relação à difusividade da água (D_W) no alimento, durante a secagem. A razão D_A/D_W diminui rapidamente enquanto a secagem progride para conteúdos de umidade mais baixo, resultando na retenção dos compostos voláteis. Já a teoria da retenção em uma microregião assume que os voláteis são imobilizados

em uma matriz no alimento. Nesse caso, carboidratos e açúcares reteriam os componentes voláteis. A adsorção física de voláteis orgânicos sobre os componentes sólidos de um alimento não possui uma função importante na retenção do aroma, a não ser que ocorra alguma interação química entre o volátil e o substrato do alimento (Saravacos, 1986).

Assim, a perda dos componentes voláteis em um alimento depende da temperatura, da concentração e natureza dos sólidos (por exemplo, carboidratos) do alimento, além da pressão de vapor dos componentes voláteis e de sua solubilidade no vapor de água (Fellows, 1988).

2.5 Outros processos de desidratação

Com a finalidade de minimizar as mudanças anteriormente citadas nos alimentos, diferentes tratamentos prévios ou modos de secagem são propostos. Neste trabalho, são expostos, a seguir, quatro métodos que visam esse objetivo.

2.5.1 Liofilização

A liofilização é uma técnica de desidratação amplamente empregada para obter produtos secos de alta qualidade quando riscos de deterioração devido às altas e médias temperaturas são importantes. Nesse processo, o produto, que é inicialmente congelado, tem em seguida os cristais de gelo sublimados através da diminuição da pressão, formando uma estrutura porosa no alimento.

Em função das baixas temperaturas de operação, a liofilização preserva o sabor e aroma (*flavor*) do alimento

e inibe a deterioração, obtendo-se um produto de baixa densidade e fácil de ser reidratado, preservando o seu valor nutricional. Entretanto, a liofilização apresenta algumas desvantagens, como o alto custo devido às baixas taxas de secagem, e os altos custos em capital e energia devido à refrigeração e unidades de vácuo, os quais são diretamente dependentes da duração da secagem (Lombrana & Villaran, 1993).

A utilização da liofilização se estende tanto às frutas quanto aos vegetais, dentre os quais podemos citar maçãs, bananas, cenouras e batatas (Krokida et al. 1998, Nury et al., 1973).

2.5.2 Desidratação osmótica

Esse processo envolve a remoção parcial da água de alimentos, como frutas e vegetais, pela imersão em uma solução hipertônica. Dois fluxos principais e contracorrentes ocorrem simultaneamente: em função do gradiente de concentração da água e do soluto através da membrana celular semipermeável, a água difunde do alimento para a solução osmótica e o soluto é transferido da solução para o alimento. Um terceiro fenômeno envolvido, e poucas vezes considerado, é a perda de alguns sólidos naturais como açúcares, minerais, ácidos orgânicos e outros nutrientes que, embora sejam insignificantes em relação aos dois fluxos principais, podem ser importantes para a qualidade do produto (Lazarides et al., 1995, Biswal, 1991, Miguel et al., 1991).

A taxa de remoção de água depende de muitos fatores, tais como: a concentração e temperatura da solução osmótica, tempo de contato, nível de agitação na solução,

tamanho e forma do alimento, e outros (Rastogi *et al.*, 1997, Torreggiani, 1993).

Todos os solutos altamente solúveis podem ser utilizados, sozinhos ou combinados, na desidratação osmótica. A escolha dos constituintes da solução osmótica depende da capacidade de abaixamento da atividade de água (a_w), influência sobre a cor, sabor, limite de tolerância e custo. Os agentes osmóticos mais usados são os açúcares para as frutas e o cloreto de sódio para os vegetais (Miguel & Kieckbusch, 1995).

A desidratação osmótica normalmente é usada antes de outros processos como o congelamento, liofilização e secagem convencional com ar. Devido ao fato da secagem convencional com ar não produzir um produto de alta qualidade, a desidratação osmótica, como uma etapa inicial, pode ser considerada uma alternativa de custo mais baixo em relação à liofilização.

A aplicação da desidratação osmótica tem sido feita em diversas frutas e vegetais, como manga, maçã, papaia, banana, cebola, milho verde e outros (Nunes & Kieckbusch, 1998, Valdez-Fragoso *et al.*, 1998, Argaiiz *et al.*, 1994, Sankat *et al.*, 1996, Quadri *et al.*, 1996, Limaverde & Finzer, 1997)

2.5.3 Processos que utilizam o método de *puffing*

O *puffing* ou inchamento, é outro método muito utilizado para promover a formação de uma estrutura porosa em alimentos. É um método que tem apresentado bons resultados para algumas frutas e hortaliças, competindo com os produtos de alta qualidade obtidos pelo processo de liofilização.

Um processo de *puffing*, conhecido como *explosion puffing*, baseia-se na mudança de fase para expandir alimentos, como cereais, frutas e vegetais, e proteína vegetal. Nesse processo, o alimento é desidratado por métodos convencionais com ar quente e seco, até conter entre 35 e 14% de umidade, sendo posteriormente colocado em uma câmara, que é então fechada e pressurizada pelo aquecimento interno com vapor superaquecido. A água contida no alimento parcialmente desidratado é rapidamente levada a uma temperatura acima do seu ponto de ebulição na pressão atmosférica. Quando a pressão retorna de modo instantâneo à pressão atmosférica, uma fração da água transforma-se em vapor criando uma estrutura porosa. Depois, o alimento é seco por meios convencionais até atingir a umidade desejada (Payne *et al.*, 1989, Sullivan *et al.*, 1980).

O processo *explosion puffing* foi empregado com sucesso em maçãs e bananas. No caso da maçã, o processo produz maçãs desidratadas que podem ser usadas como snacks crocantes ou ingrediente para tortas e molhos. Para bananas, o processo reduziu o tempo de secagem e de reidratação devido à formação de uma estrutura mais porosa, quando comparado com bananas secas através do processo convencional (Sullivan *et al.*, 1980, Saca & Lozano, 1992).

2.5.4 Processo de secagem HTST em leite fluidizado

A taxa de remoção de umidade durante a desidratação com ar quente tem uma forte influência na forma e estrutura histológica do produto desidratado. Se a remoção de umidade é lenta, devido aos gradientes de umidade serem relativamente baixos, a taxa de encolhimento das células é uniforme em todo o alimento, o qual sofrerá uma grande redução de tamanho. O alimento seco não terá espaços

intercelulares; ele será duro e terá uma alta densidade. Entretanto, quando a secagem é rápida, particularmente no primeiro período de taxa decrescente, haverá a formação de uma rígida camada externa em certos alimentos. Como o conteúdo de umidade no interior do sólido é reduzido e o tamanho das células diminui, a rígida camada externa resiste às deformações, limitando o encolhimento total e formando espaços intercelulares. A remoção de umidade continua a ocorrer sem maiores deformações, após a formação de uma estrutura externa rígida (Jen *et al.*, 1989).

Kim & Toledo (1987) desidrataram *blueberries* através da combinação de vários métodos: (a) Secagem a altas temperaturas e curto tempo (HTST) em leito fluidizado, com posterior secagem convencional; (b) secagem HTST em leito fluidizado com posterior secagem em leito fluidizado; (c) desidratação usando apenas secagem convencional; (d) desidratação osmótica inicial, secagem HTST em leito fluidizado e finalizando com secagem em leito fluidizado; (e) desidratação osmótica inicial, secagem HTST em leito fluidizado e finalizando com secagem convencional; (f) desidratação osmótica com posterior secagem convencional. No processo HTST foi utilizado ar com velocidade de 15 m/s, e temperatura de 170°C por 8 min para amostras congeladas, ou 150°C e 4 min para amostras desidratadas osmoticamente. Na secagem convencional, o ar utilizado estava a 60°C e 4 m/s; enquanto na secagem em leito fluidizado o ar também estava a 60°C, mas com uma velocidade de 15 m/s.

Os produtos obtidos foram comparados entre si e com amostras de produtos comerciais de *blueberries* processadas através de *explosion puffing*. As amostras congeladas secas pelo processo HTST com posterior secagem convencional tiveram o menor tempo e a mais alta razão de reidratação. As amostras congeladas secas através do processo

convencional tiveram o maior tempo e a mais baixa razão de reidratação. As amostras desidratadas osmoticamente, secas através do processo HTST e posteriormente pelo processo convencional também se reidrataram rapidamente, mas a presença de açúcares, absorvidos na desidratação osmótica, reduziram a quantidade de água absorvida durante a reidratação. A desidratação osmótica evitou o encolhimento, evidenciado pelo número reduzido de amostras que couberam em um cilindro de 100 ml. Entretanto, devido ao aumento da quantidade de açúcar, a densidade era maior do que das amostras secas diretamente após congelamento.

Luccas (1996) desidratou bananas utilizando a pré-secagem HTST em leito fluidizado. As bananas, da variedade prata e com teor de sólidos solúveis entre 14 e 18 °Brix, foram pré-processadas e imersas em uma suspensão de amido de mandioca gelatinizado a 2% durante 2 minutos. Concentrações da suspensão de amido mais altas, 5 e 7%, e tempos maiores de imersão, 5 e 10 min, também foram usadas, mas não foi verificada diferença significativa no produto final. A pré-secagem HTST foi realizada nos seguintes tempos e temperaturas do ar: 110°C e 15 min, 130°C e 12 min, 150°C e 6 min, respectivamente; a velocidade do ar utilizada foi de cerca de 10 m/s, o suficiente para se obter uma boa fluidização dos pedaços de banana. Em seguida, os pedaços de banana foram secos por processo convencional em secador de bandejas durante 5,5 h com ar na temperatura de 70°C e velocidade de 1,25 m/s. Bananas não tão maduras (14 °Brix), obtiveram maior expansão de volume do que bananas mais maduras. A operação de secagem HTST em leito fluidizado na temperatura do ar de 130°C durante 12 min, produziu pedaços de banana com a menor densidade, quando comparada com as outras condições utilizadas, sendo

os mesmos crocantes, devido à estrutura porosa formada, de cor atraente e alto índice de reidratação.

2.6 Utilização de condições variáveis de secagem

A secagem é um processo que consome grande quantidade de energia devido ao calor latente de vaporização da água e a relativamente baixa eficiência dos secadores industriais. Quando utilizado impropriamente, a grande quantidade de energia consumida pode destruir ou diminuir a qualidade do produto (Strumillo & Adamiec, 1996).

Métodos para a redução do tempo total de secagem, e dos custos energéticos, podem ser criados pela determinação do efeito das condições constantes e variáveis na desidratação de um alimento. Entre os parâmetros básicos que influenciam a cinética de secagem, a temperatura e a velocidade do ar são frequentemente citados.

Piotrowski & Lenart (1998) estudaram a influência de temperaturas e velocidades constantes e variáveis do ar de secagem sobre a cinética de secagem de maçãs. Dois experimentos foram realizados variando-se a temperatura do ar após 1 hora de secagem: um com temperatura na primeira hora de secagem de 50°C e outro a 90°C, sendo após a temperatura alterada para 70°C nos dois experimentos. A variação da temperatura após a primeira hora de secagem modificou claramente o curso das curvas de secagem (Figura 2.8) e das cinéticas de secagem (Figura 2.9), sendo que, após a introdução das variações, obteve-se taxas de secagem similares para a mesma umidade nos experimentos comparados. Experimentos foram realizados introduzindo-se uma variação na velocidade do ar de secagem quando a razão de umidade (X/X_0) atingiu o valor de 0,60. As velocidades iniciais foram de 0,7 e 3 m/s e a velocidade final foi de 1,5 m/s em

ambos os experimentos. A influência do aumento ou diminuição da velocidade no primeiro estágio do processo, sobre o processo total e na curva de secagem, foi confirmada pela obtenção de uma razão de umidade no final do experimento com velocidade inicial de 3 m/s, três vezes menor que o valor obtido para o experimento com velocidade inicial de 0,7 m/s, para o mesmo tempo de secagem.

Assim, a utilização de condições variáveis de secagem, como a utilização de temperaturas mais elevadas no início da secagem, quando a temperatura do alimento ainda não atingiu a temperatura de bulbo seco do ar de secagem, podem diminuir o tempo de secagem e os custos energéticos, podendo ainda melhorar a qualidade do produto, como é o caso da aplicação do processo HTST.

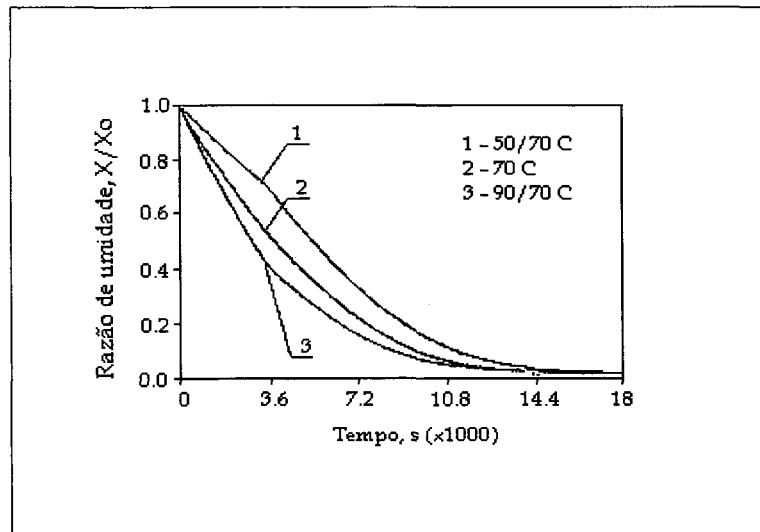


Figura 2.8 - Curvas de secagem de maçã a 50/70°C, 70°C e 90/70°C (Piotrowski & Lenart, 1998).

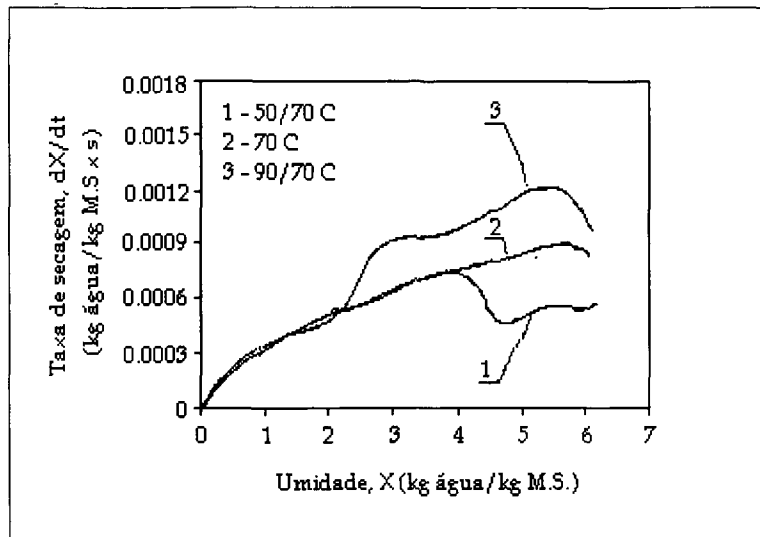


Figura 2.9 - Cinéticas de secagem de maçã a 50/70°C, 70°C e 90/70°C (Piotrowski & Lenart, 1998).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, descrevem-se os procedimentos e equipamentos utilizados para o estudo da secagem de fatias de maçã, bem como as características da matéria-prima, os métodos analíticos para a determinação da umidade, sólidos solúveis e densidade, e os cálculos do encolhimento (V/V_0) e do coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}).

3.1 Obtenção e preparo da matéria-prima

Para a realização dos experimentos foram utilizadas maçãs da variedade Fuji. As frutas foram adquiridas em supermercados locais e armazenadas em geladeira até serem processadas. As maçãs foram cortadas ao meio com uma faca, retiradas as sementes e então fatiadas através de um cortador, nas espessuras de 2,8 e 5,8 mm, e medidas com um paquímetro, marca Starrett. A faixa do teor de sólidos solúveis medida foi de 12 a 15 °Brix, determinado pelo método descrito no item 3.5.1.

3.2 Processamento da matéria-prima

Após o preparo, a matéria-prima foi, opcionalmente, submetida a um pré-tratamento com amido gelatinizado, à secagem utilizando o processo HTST (*high*

temperature and short time - alta temperatura e curto tempo) e ainda à secagem a temperaturas moderadas, ou convencional. O pré-tratamento e a secagem HTST não foram utilizados em todos os experimentos. Na Figura 3.1 apresenta-se um fluxograma dos diferentes processamentos aos quais a maçã foi submetida, até a obtenção do produto seco.

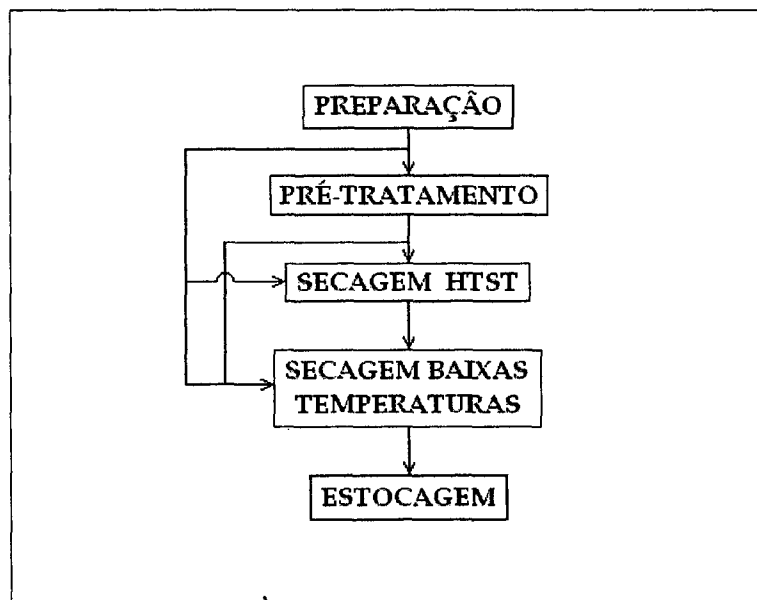


Figura 3.1 - Fluxograma do processamento da maçã.

3.2.1 Pré-tratamento

Utilizou-se como pré-tratamento uma solução de amido gelatinizado a 2% em peso. As fatias de maçã foram imersas nessa solução, à temperatura ambiente, durante 2 min. Para o preparo desta solução, amido de mandioca, comercializado na forma de polvilho doce, foi gelatinizado através do aquecimento da solução a temperaturas superiores a 70°C. A solução aquecida foi deixada em repouso à temperatura ambiente até a equalização das temperaturas (Luccas, 1996).

3.2.2 Processos de Secagem

Para realização dos experimentos, dois processos de secagem foram empregados: a) secagem convencional a temperaturas moderadas do ar de secagem; b) secagem convencional precedida do processo HTST (*high temperature and short time*), no qual utiliza-se ar a alta temperatura em um curto espaço de tempo.

Temperaturas de 120 e 140°C, durante 15 min, foram utilizadas no processo HTST, com posterior diminuição para 60 ou 80°C. Na secagem convencional, as temperaturas empregadas foram 60, 70 e 80°C. A velocidade do ar de secagem foi de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s, em ambos os processos.

3.3 Equipamentos utilizados na secagem

3.3.1 Secador

O seção de aquecimento do ar do secador é formado por um túnel de cerâmica refratária de seção quadrada de cerca de 20 x 20 cm e 1,5 m de comprimento, onde encontra-se instalado o sistema de aquecimento do ar. Este último é constituído por duas resistências independentes, com potência de cerca de 8.000 W cada uma. Elas são ligadas em fonte monofásica de 220 V, sendo que uma das resistências tem a sua tensão de entrada controlada por um variador de potência, tipo ângulo de fase, marca Varix.

Um tubo de alumínio flexível conecta a seção de aquecimento à câmara de secagem. A tubulação de alumínio é isolada com lã de vidro e recoberta com um filme de alumínio.

O ar é movimentado por um ventilador centrífugo ligado a um motor elétrico trifásico de 1 cv, marca Eberle. A

velocidade de rotação das pás do ventilador, foi modificada através de um conversor de frequência do motor elétrico, marca Fuji, modelo FVR - C9S, para a obtenção de diferentes vazões de ar.

A câmara de secagem foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC. Ela consiste de uma seção quadrada, cujas dimensões internas tem cerca de 20 x 20 cm. Com estrutura de madeira, a câmara de secagem possui um suporte para seis bandejas. As bandejas, em aço inox e com formato quadrado, foram feitas com tela de abertura de 3 mm e área em torno de 400 cm². O fluxo de ar é tangencial às bandejas, o que permite a secagem a partir de ambas as faces do produto.

A temperatura do ar de secagem foi medida por um termopar de ferro-constantan, localizado no centro da câmara de secagem, sendo conectado a um transmissor de temperatura e a um amplificador de sinal. O sinal amplificado do termopar é enviado a uma placa de aquisição de dados. Esta placa converte o sinal de analógico para digital, que então é lido e convertido para temperatura, através de um programa que contém a equação obtida na calibração do termopar (Apêndice A). Após analisar a proximidade da temperatura ao *set point*, o programa envia um sinal de 1 a 5V para o variador de potência, fazendo com que aumente ou diminua a potência da resistência e, conseqüentemente, aumentando ou diminuindo a temperatura do ar de secagem. O programa utilizado foi desenvolvido pelo Laboratório de Controle de Processos, do Depto. de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC.

Um diagrama do secador utilizado é apresentado na Figura 3.2.

Na Figura 3.3 apresenta-se a temperatura do ar em dois experimentos realizados com uma etapa de secagem HTST, um com temperatura inicial de 120°C e o outro a 140°C, ambos

com posterior diminuição para 80°C e na velocidade do ar de 3,0 m/s. O período de transição de uma temperatura a outra levou cerca de 5 min.

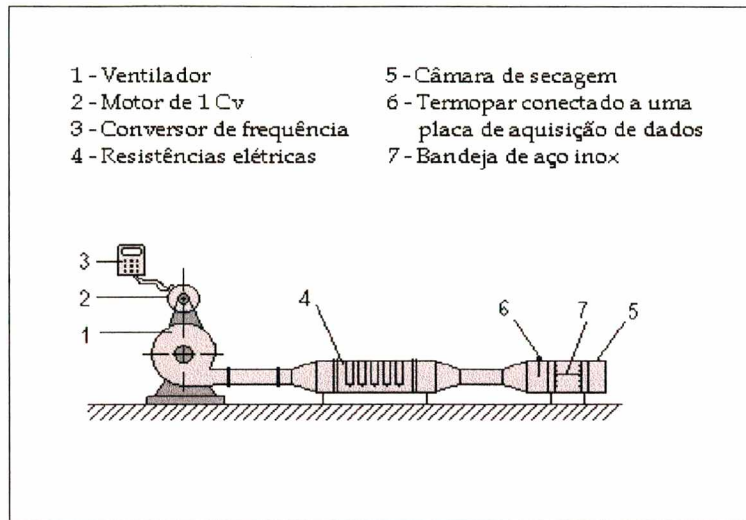


Figura 3.2 - Diagrama do equipamento experimental utilizado.

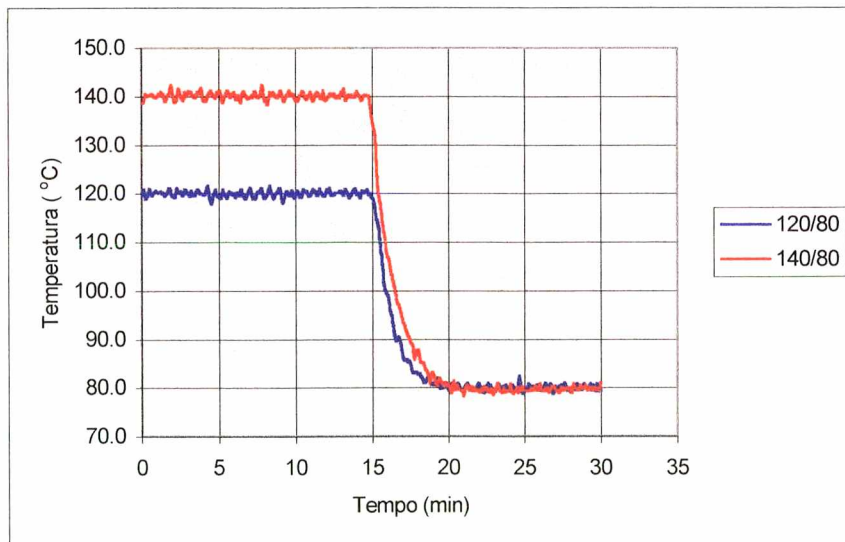


Figura 3.3 - Temperatura do ar de secagem durante os 30 minutos iniciais de secagem de experimentos a 120/80°C e 140/80°C, a 3,0 m/s.

3.3.2 Determinação da velocidade do ar de secagem

A velocidade do ar de secagem foi medida com um anemômetro de ventoinhas, da marca Lutron, modelo AM-4201. Esse anemômetro permite medir velocidades de 0,4 a 30,0 m/s, na faixa de temperatura de 0 a 50°C, com precisão de $\pm 2\%$. Medidas em 5 posições diferentes da câmara de secagem foram feitas, em temperatura ambiente, para diferentes frequências utilizadas no conversor de frequência. Uma velocidade média foi calculada para cada frequência, a qual foi ajustada para as temperaturas de bulbo seco do ar de secagem utilizadas, através de um balanço de massa em estado estacionário, apresentado na equação (3.1).

$$\rho_{T_{amb}} \cdot V_{T_{amb}} = \rho_{T_s} \cdot V_{T_s} \quad (3.1)$$

- Onde:
- $\rho_{T_{amb}}$ = Densidade do ar na temperatura ambiente (bulbo seco), [kg/m³].
 - ρ_{T_s} = Densidade do ar na temperatura de secagem (bulbo seco), [kg/m³].
 - $V_{T_{amb}}$ = Velocidade média do ar na temperatura ambiente (bulbo seco), [m/s].
 - V_{T_s} = Velocidade média do ar na temperatura de secagem (bulbo seco), [m/s].

Então, determinou-se uma equação para a velocidade em função da frequência. A título de ilustração, para a temperatura de bulbo seco do ar de secagem de 80°C, a equação (3.2) descreve a velocidade do ar em função da frequência. Com esta equação, pode-se determinar a frequência necessária para se alcançar a velocidade desejada, na referida temperatura.

$$v_{80} = 0,1095 \cdot F + 0,3561 \quad (3.2) \quad R^2 = 0,9971$$

Onde: v_{80} = Velocidade média do ar de secagem na temperatura de 80°C, [m/s]
 F = Freqüência utilizada no conversor de freqüência, [Hz].
 R^2 = Coeficiente de regressão.

3.4 Obtenção das curvas e cinéticas de secagem

As maçãs utilizadas para determinação das curvas de secagem, foram preparadas e processadas como descrito nos itens 3.1 e 3.2, colocadas em bandejas com o peso pré-determinado, e levadas à câmara de secagem. Após intervalos de tempo previamente estipulados, a bandeja foi rapidamente retirada e pesada em uma balança, marca Denver, com precisão de 0,01g. O tempo gasto na pesagem da bandeja foi em torno de 15 s.

A secagem foi realizada até que a variação de massa em intervalos de 30 minutos fosse menor que 0,10g. Então duas amostras eram utilizadas para a determinação da umidade, de acordo com o método descrito no item 3.6.2.

Com os dados de massa em função do tempo e da umidade final do produto, pode-se construir curvas de secagem.

A partir das curvas de secagem pode-se encontrar as cinéticas de secagem. Para isso foi empregado um *software* que utiliza o método da derivação geométrica, conforme é descrito no Anexo B.

3.5 Análises

Para avaliar as modificações sofridas pela maçã durante o seu processamento, análises de sólidos solúveis (°Brix), teor de umidade e densidade aparente foram feitas com amostras de maçã antes, durante e após o processamento.

3.5.1 Sólidos Solúveis

A porcentagem de sólidos solúveis presentes na maçã *in natura* é expressa pelo °Brix, e foi determinada através de um refratômetro de bancada, marca BAUSCH & LOMB. Para realização da análise, a polpa da maçã foi espremida até a obtenção do suco da fruta. A análise foi feita em triplicata para cada maçã utilizada.

3.5.2 Teor de Umidade

Em uma balança semi-analítica digital, com precisão de 0,001g, pesou-se cerca de 10 gramas, para análise da umidade inicial, e de 1 a 2 gramas de amostra, para análise da umidade final, em um pesa-filtro de vidro com tampa esmerilhada, previamente tarado. Deixou-se a amostra durante 48 h, ou até peso constante, em uma estufa de secagem com circulação forçada de ar, marca FANEM, a 75°C. As amostras foram retiradas da estufa e colocadas em dessecadores mantidos à temperatura ambiente para resfriar, e pesadas novamente. As análises de umidade foram feitas em duplicata e o resultado foi calculado a partir da média aritmética das massas iniciais e finais.

3.5.3 Densidade aparente

A densidade aparente de um material poroso é uma medida que engloba a variação de massa e volume de um material, e é definida pela razão entre a massa total do material (fase sólida + líquida + gasosa) e o seu volume total aparente.

O método utilizado na sua determinação foi o método do deslocamento de fluidos em picnômetros. Tolueno P. A. foi utilizado como fluido a ser deslocado pois apresenta as seguintes vantagens: pouca tendência em penetrar no sólido, baixa tensão superficial, pouca ação do solvente nos constituintes do sólido, alto ponto de ebulição, 110,6°C (Lide, 1994), não apresentando modificação da densidade e viscosidade quando exposto à atmosfera. Para a realização da análise foi usado um picnômetro com capacidade de 25 ml. O picnômetro foi previamente calibrado com tolueno a 20°C.

Antes de cada análise, o picnômetro foi tarado em balança com precisão de 0,001 g. Cerca de 1 a 2 gramas de amostra foram colocadas dentro do picnômetro, obtendo-se a massa da amostra. Depois disso, o volume do picnômetro foi completado com tolueno, tomando-se o máximo de cuidado para evitar a presença de bolhas de ar. O excesso de tolueno, que eventualmente possa ter escorrido na parte externa do picnômetro, foi cuidadosamente seco com papel absorvente. O picnômetro foi novamente pesado, obtendo-se a massa total da amostra e do tolueno. Como o tolueno é classificado como um produto tóxico, foi manipulado em capela utilizando-se protetor respiratório e luvas de borracha látex.

O volume da amostra foi determinado através da equação (3.4) utilizando a equação (3.3), e a densidade pela equação (3.5). As análises foram realizadas em duplicata, sendo que os resultados apresentados são a média aritmética dos valores obtidos.

$$V_{\text{Tol}} = m_{\text{Tol}} \cdot \rho_{\text{Tol}} \quad (3.3)$$

$$V_{\text{am}} = V_{\text{p}} - V_{\text{Tol}} \quad (3.4)$$

$$\rho_{\text{am}} = \frac{m_{\text{am}}}{V_{\text{am}}} \quad (3.5)$$

Onde: m_{T} = massa do tolueno contido no picnômetro, g.

ρ_{Tol} = densidade do tolueno a 20°C = 0,8669 g/cm³
(Lide, 1994).

V_{Tol} = volume do tolueno contido no picnômetro, cm³.

V_{p} = volume do picnômetro, cm³.

V_{am} = volume da amostra, cm³

m_{am} = massa da amostra, g

3.6 Cálculos

3.6.1 Volume da fatia de maçã durante a secagem

A alteração do volume, ou encolhimento, durante a secagem pode ser relacionada com a densidade e a umidade do material, através de um balanço de massa dos sólidos secos (Perez & Calvelo, citado por Wang & Brennan, 1995):

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\rho_0 (1+X)}{\rho_t (1+X_0)} \quad (3.6)$$

Onde: V = Volume da amostra no tempo t de secagem [cm³]

V_0 = Volume inicial da amostra [cm³]

ρ_0 = Densidade aparente inicial da amostra [g/cm³]

ρ_t = Densidade aparente da amostra no tempo t de secagem [g/cm³]

Em três experimentos, a densidade aparente foi medida em diferentes tempos de secagem, além da densidade aparente da maçã *in natura*. Com esses dados, e juntamente com os dados da umidade (curva de secagem, item 3.4), pode-se calcular o volume (V/V_0) em diferentes tempos de secagem através da equação (3.6).

3.6.2 Coeficiente de difusão efetivo

O logaritmo natural da razão X/X_0 foi calculado a partir dos dados da curva de secagem. Da inclinação das curvas de $\ln(X/X_0)$ em função do tempo calculou-se o coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}), de acordo com a equação (3.7), a qual foi obtida da equação (2.7), através da aplicação do logaritmo natural e da exclusão da umidade de equilíbrio (X_e). Para o cálculo do D_{ef} somente os períodos com coeficiente de regressão maior ou igual a 0,99 foram usados.

$$\ln\left(\frac{X}{X_0}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{4 \cdot L_0^2} \quad (3.7)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é apresentada a influência da espessura, temperatura, velocidade de secagem e aplicação do pré-tratamento com amido gelatinizado sobre a secagem de fatias de maçã. Observou-se também o efeito da aplicação de um processo HTST, a duas temperaturas diferentes. Sendo o alimento um material deformável, a densidade aparente do produto foi analisada, e o volume das fatias foi estimado em três condições diferentes de secagem. Também, valores de D_{ef} foram obtidos para as diferentes situações.

4.1 Estudos preliminares

Ensaio específicos para avaliação da influência de pré-tratamentos sobre a cor, sabor e textura da maçã seca foram realizados. As avaliações sensoriais foram feitas por pesquisadores e alunos do Laboratório de Processamento de Alimentos. Uma análise sensorial estatística seria de grande valia, porém devido à grande quantidade de tempo e material necessários, e não sendo este o objetivo primeiro deste trabalho, ela foi dispensada.

No primeiro ensaio as fatias de maçã, com espessura de 5,8 mm, foram imersas em xarope de glicose a 70°Brix na temperatura de 80°C durante 5 minutos. O objetivo desse pré-tratamento foi o de inativar as enzimas presentes na fruta, evitando, deste modo, o escurecimento enzimático.

Depois, as fatias de maçã osmo-branqueadas foram secas com ar na temperatura de 80°C e velocidade de 1,5 m/s.

O osmo-branqueamento produziu mudanças indesejáveis à textura da fruta, tornando-a mole e diminuindo a resistência mecânica para a secagem. Esse pré-tratamento conferiu gosto extremamente adocicado às fatias de maçã, além da perda do aroma natural da mesma.

Em um outro ensaio, as fatias de maçã com a mesma espessura foram imersas, durante 2 minutos, em uma solução de metabissulfito de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) na concentração de 0,6%, à temperatura ambiente. As maçãs foram posteriormente secas com ar a 80°C e 3,0 m/s. Após a secagem, as fatias apresentaram coloração clara, mas com sabor alterado e não muito agradável.

Como a secagem de fatias de maçã *in natura* e pré-tratadas com amido gelatinizado apresentaram apenas um leve escurecimento, deixando-as douradas, o osmo-branqueamento e o pré-tratamento com metabissulfito de sódio foram considerados dispensáveis, embora a literatura aconselhe o uso de tratamentos para evitar o escurecimento.

4.2 Curvas e cinéticas de secagem

4.2.1 Efeito da espessura

Experimentos foram feitos para avaliar o efeito da espessura sobre a curva e taxa de secagem. Utilizou-se espessuras de 2,8 mm e 5,8 mm. As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram as curvas de secagem dos experimentos realizados com um período HTST a 120°C, com posterior diminuição para 80°C, para fatias de maçã *in natura*, e a 80°C, para fatias

pré-tratadas com amido gelatinizado. A velocidade do ar utilizada em ambos os experimentos foi de 1,5 m/s.

Através das Figuras 4.1 e 4.2, observa-se que aumentando-se a espessura das fatias de maçã aumenta o tem-

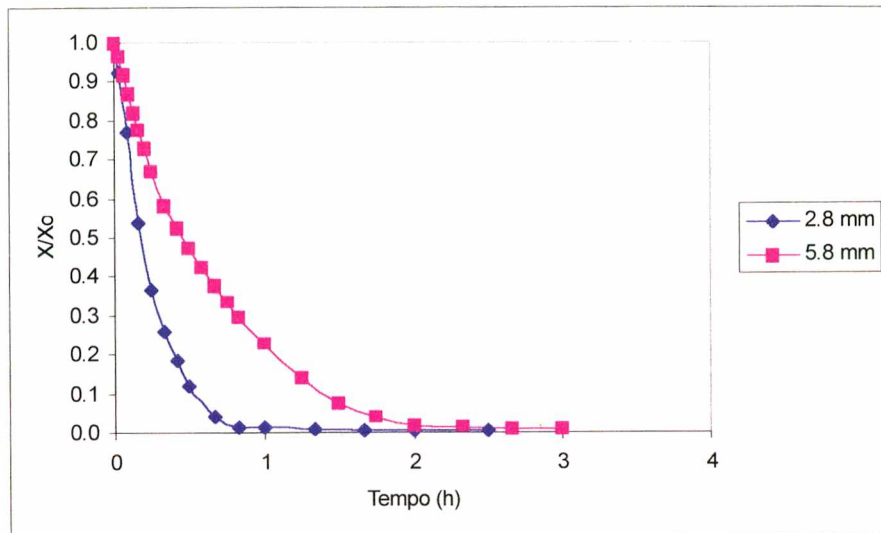


Figura 4.1 - Curvas de secagem de fatias de maçã *in natura* a 120/80°C, 1,5 m/s, nas espessuras de 2,8 mm e 5,8 mm.

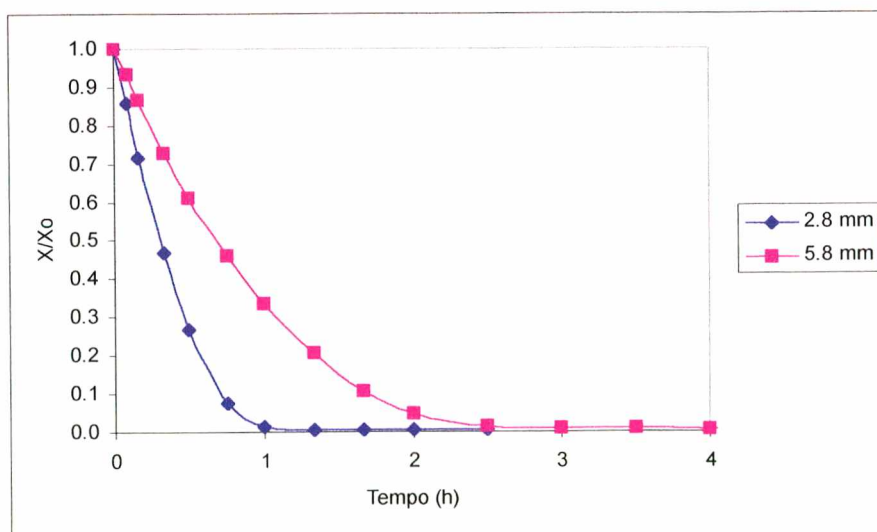


Figura 4.2 - Curvas de secagem de fatias de maçã, pré-tratadas com amido gelatinizado, a 80°C, 1,5 m/s, nas espessuras de 2,8 e 5,8 mm.

po de secagem para atingir-se a mesma umidade adimensional. Fatias de 2,8 mm necessitam cerca de 1h e 15min para atingir a umidade de 0,05 kg água/kg s.s. a 120/80°C (Figura 4.1), enquanto que fatias de 5,8 mm necessitam de 3h de secagem. Para a situação de temperatura constante e igual a 80°C, o tempo de secagem necessário para atingir o mesmo nível de umidade é de 1h e 20 min para 2,8mm e de 4h a 5,8 mm. O tempo de secagem é aumentado em cerca de 33% (1 hora) ao retirarmos o processo HTST da fatia mais espessa, enquanto que aumenta apenas 7% para a fatia de 2,8 mm. As respectivas cinéticas de secagem são mostradas nas Figuras 4.3 e 4.4.

As cinética de secagem na temperatura de 120/80°C possuem formas semelhantes, apresentando um pequeno período de aquecimento, seguido do período decrescente. Nota-se a ausência do período de taxa constante, como também foi observado por Chiang & Petersen (1986). A velocidade de secagem é bem maior para a espessura de 2,8 mm, pois nessa

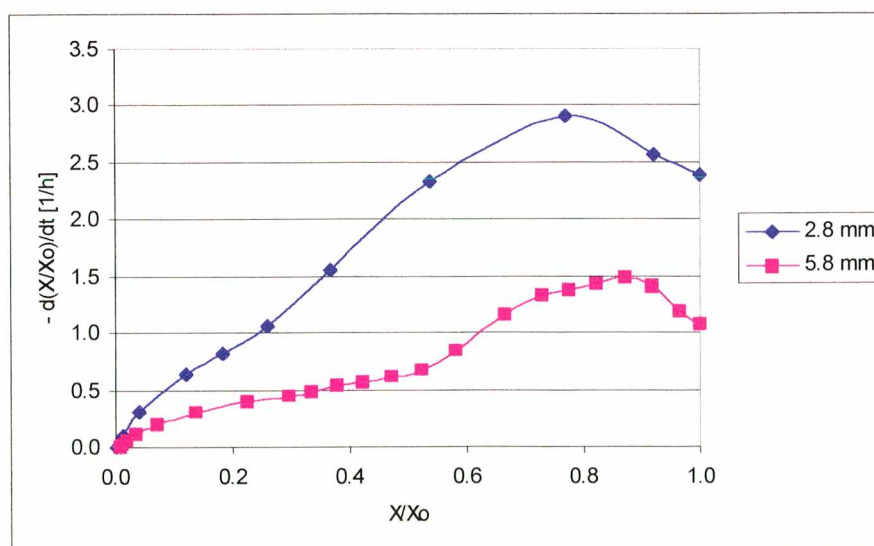


Figura 4.3 - Cinéticas de secagem de fatias de maçã *in natura*, a 120/80°C e 1,5 m/s, para 2,8 mm e 5,8 mm de espessura.

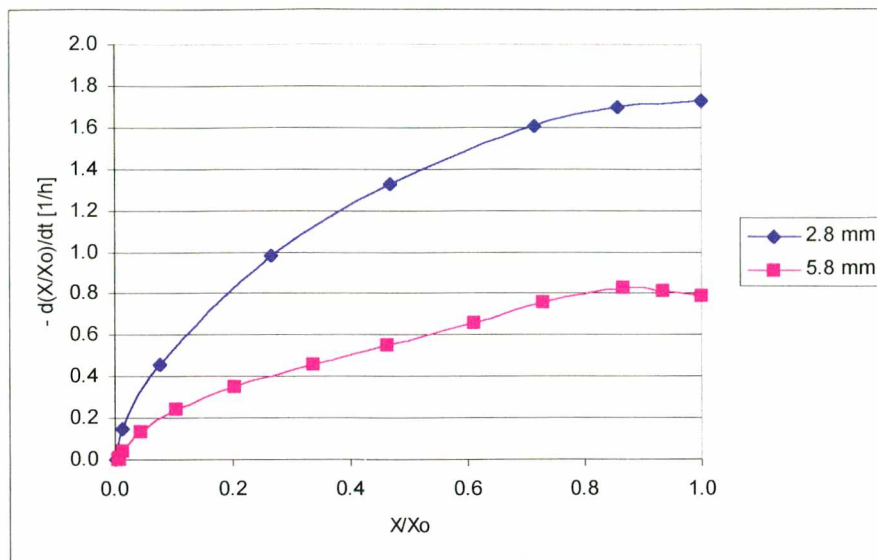


Figura 4.4 - Cinéticas de secagem de fatias de maçã, pré-tratadas com amido gelatinizado, a 80°C e 1,5 m/s, para 2,8 mm e 5,8 mm de espessura.

espessura a água deve percorrer uma distância menor para atingir a superfície do material. O período de secagem HTST termina em uma razão de umidade de 0,37 e 0,67, para as espessuras de 2,8 e 5,8 mm, respectivamente. Há dois períodos decrescentes na espessura de 2,8 mm: um primeiro período que corresponde ao período HTST; e um segundo período quando a temperatura do ar está a 80°C, o qual finaliza a secagem. Já na espessura de 5,8 mm, observa-se três períodos decrescentes, sendo que o primeiro também está no período HTST, com X/X_0 entre 0,87 e 0,73. O segundo período inicia com a mudança de temperatura, sendo que o último ponto do período HTST faz parte dele, pois o método empregado para o cálculo da derivada de qualquer ponto da cinética, também utiliza os valores dos pontos anterior e posterior. Esse período termina em X/X_0 de 0,23, ou seja, quando o processo está há algum tempo na temperatura de 80°C. O terceiro período finaliza a secagem.

A cinética de secagem a 80°C, na espessura de 2,8 mm, apresenta apenas o período decrescente, não mostrando o período de aquecimento, anteriormente observado. Isto pode ser explicado por um período de aquecimento muito rápido, difícil de ser detectado. Na espessura de 5,8 mm, um pequeno período de aquecimento se encontra presente, certamente devido à inércia térmica de uma massa maior de material, seguido de um período decrescente. Período constante de secagem também não foi verificado em nenhuma das duas espessuras.

Pode-se verificar que a taxa de secagem é fortemente afetada pela espessura, durante todo o experimento. A taxa de secagem na espessura de 2,8 mm é praticamente o dobro da taxa na espessura de 5,8 mm.

Embora uma análise sensorial, com uma equipe de julgadores treinada, não tenha sido feita, fatias de maçã desidratadas das duas espessuras empregadas, foram degustadas por algumas pessoas. A opinião predominante era de que as fatias com espessura inicial de 2,8 mm não preservaram o aroma natural da fruta como as fatias de 5,8 mm.

Decidiu-se, portanto, pela realização de ensaios posteriores somente na espessura de 5,8 mm.

4.2.2 Efeito da temperatura

O efeito da temperatura foi estudado para fatias de maçã *in natura*, com 5,8 mm de espessura, quando submetidas à secagem em velocidades do ar de 1,5 m/s, 3,0 m/s e 6,0 m/s, com as seguintes temperaturas:

1. 60, 70 e 80°C;

2. 60 e 80°C, precedidas de uma aplicação HTST a 140°C e 120°C, durante 15 min.

Na Figura 4.5, os resultados são ilustrados para a velocidade de 3,0 m/s. Nessa figura verifica-se que a perda de água foi maior nos experimentos a 80°C do que nos experimentos a 70°C e a 60°C, como esperado. As curvas nestas temperaturas apresentam formas semelhantes. A utilização de um período de secagem HTST a 120°C e 140°C aumenta, inicialmente, a perda de água quando comparado com os experimentos realizados sem esse período. Entretanto, após este pequeno intervalo de tempo, as curvas de secagem retomam um ritmo de secagem mais lento, condizente com temperaturas mais amenas, até ocorrer a sobreposição das curvas, como Piotrowski & Lenart (1998) também verificaram.

Através da Figura 4.6, onde são apresentadas as cinéticas de secagem destes experimentos, verifica-se que o experimento realizado a 60°C possui a menor velocidade durante toda a secagem. Além disso, as cinéticas de secagem dos experimentos a 60°C, 70°C e 80°C apresentam formas semelhantes, com um período inicial de aquecimento. Período constante de secagem também não foi observado em nenhum dos experimentos.

Para um melhor entendimento do período decrescente, para o experimento a 80°C e 3,0 m/s, na Figura 4.7 apresentam-se os diferentes períodos de secagem:

1. aquecimento do produto;
2. primeiro período de taxa decrescente;
3. segundo período de taxa decrescente.

Os ensaios com períodos HTST também apresentam um período inicial de aquecimento, para em seguida ter sua velocidade de secagem diminuída. Esses experimentos mostram

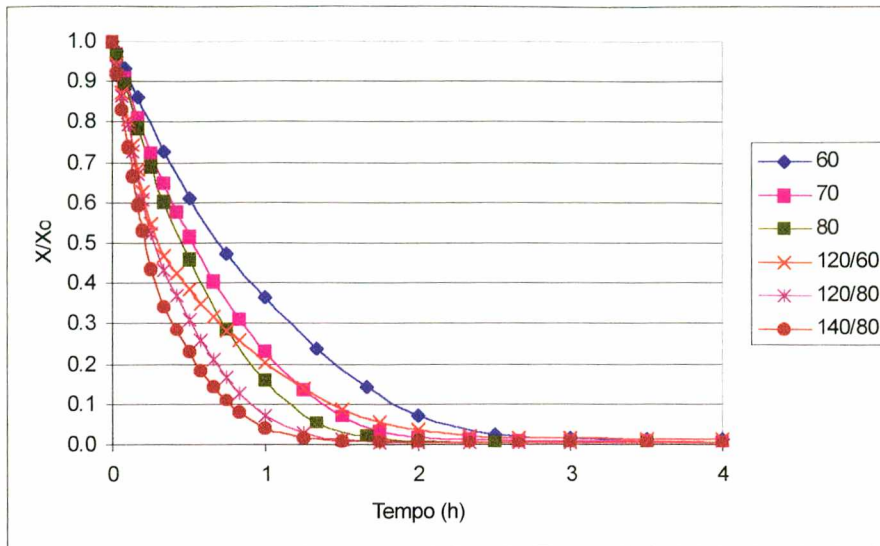


Figura 4.5 - Curvas de secagem de maçã *in natura* a diferentes temperaturas e a 3,0 m/s.

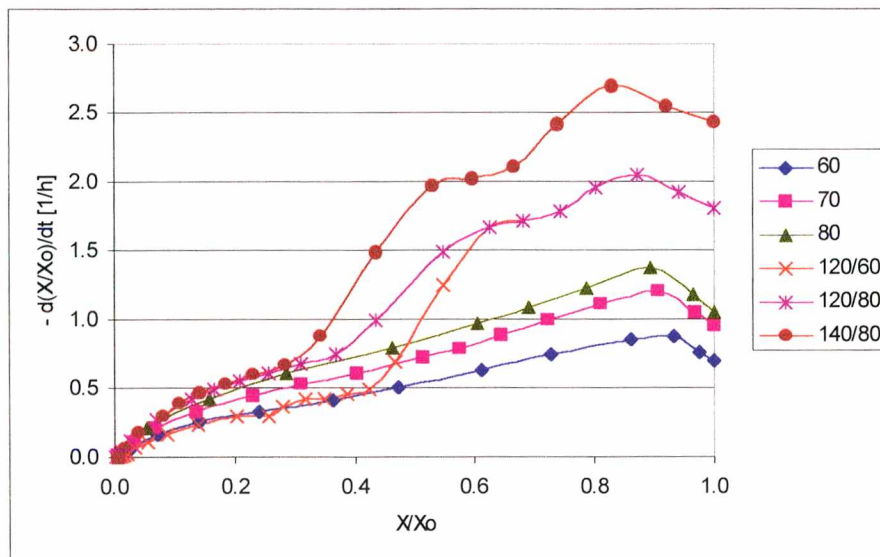


Figura 4.6 - Cinéticas de secagem de maçãs *in natura* a diferentes temperaturas e a 3,0 m/s.

três mudanças significativas nas cinéticas, marcando o início de três períodos de taxa decrescente (Figura 4.8). Uma destas mudanças ocorre durante o período HTST, sendo ela a passagem do aquecimento para a diminuição da taxa de

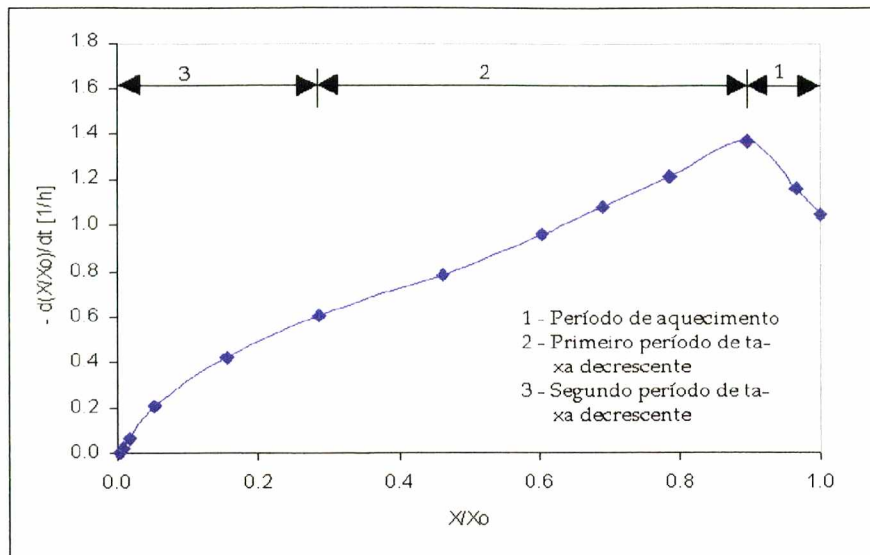


Figura 4.7 - Demonstração dos períodos de secagem (80°C e 3,0 m/s).

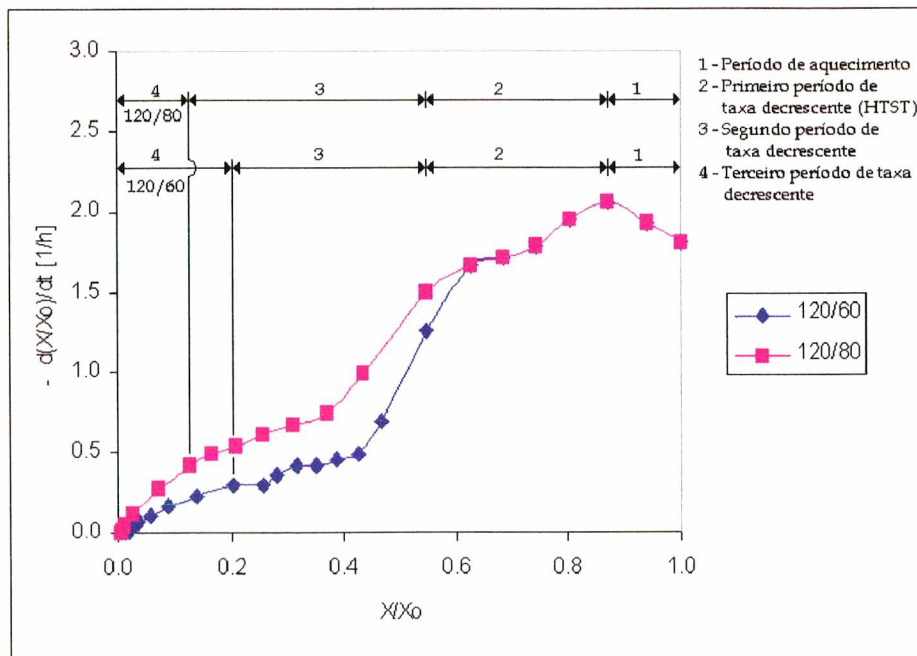


Figura 4.8 - Demonstração dos períodos de secagem (120/60°C e 120/80°C, a 3,0 m/s).

secagem (fim de 1 na Figura 4.8). Este período prolonga-se até a fim de 2. O último ponto do período HTST faz, na figura, parte de um período de transição entre as temperaturas da secagem HTST e convencional, caracterizado

por uma temperatura intermediária, entre 120°C e 60°C, por exemplo. Isto ocorre porque no cálculo da derivada, os pontos anterior e posterior a este (ou qualquer outro ponto da curva) são levados em consideração (Anexo B). Pode-se observar que as cinéticas dos experimentos com HTST, após o estabelecimento das temperaturas amenas, sobrepõem-se com aqueles realizados a temperaturas amenas durante todo o processo. O terceiro período (4) corresponde à finalização da secagem.

4.2.3 Efeito da velocidade

Os ensaios para avaliação do efeito da velocidade na secagem de maçã *in natura* foram realizados a velocidades de 1,5 m/s, 3,0 m/s e 6,0 m/s. Nas Figuras 4.9 a 4.12 é feita a comparação das curvas de secagem dos experimentos realizados nas velocidades utilizadas e suas respectivas cinéticas.

Analisando-se as Figuras 4.9 e 4.10, verifica-se que a secagem é mais rápida na maior velocidade do ar de secagem, como esperado, devido à maior transferência de calor para o alimento. O resultado disto é visto nas cinéticas de secagem (Figuras 4.11 e 4.12). Nestas cinéticas, o período inicial de aquecimento diminui à medida que a velocidade aumenta; à velocidade de 6,0 m/s ele praticamente desaparece. Com a diminuição da razão de umidade, a diferença entre as taxas de secagem nas diferentes velocidades do ar diminui.

O período HTST dos ensaios apresentados na Figura 4.12 terminam com uma razão de umidade (X/X_0) de 0,58, 0,44 e 0,33 para as velocidades de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s,

respectivamente. Pode-se observar que abaixo destes valores de X/X_0 , a taxa de secagem tem o mesmo valor para todas as velocidades do ar. Isto comprova a maior influência da velocidade do ar no início da secagem.

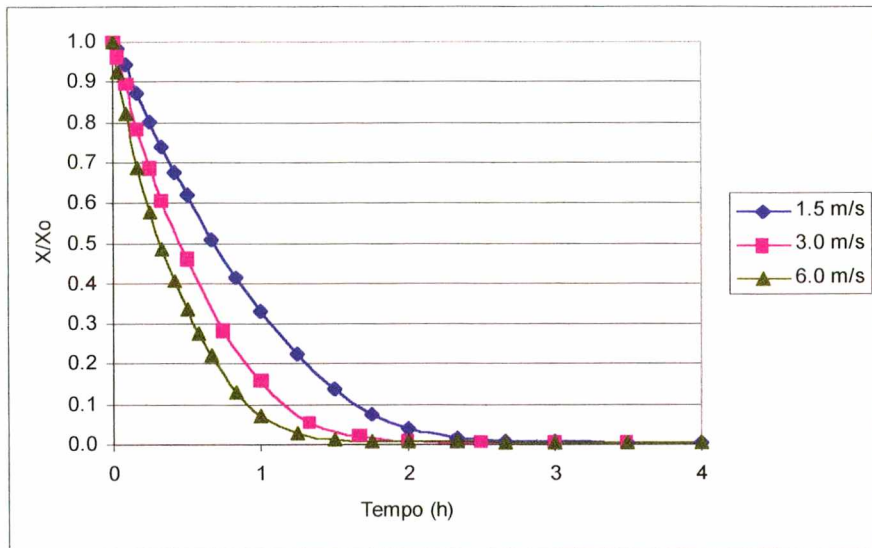


Figura 4.9 - Curvas de secagem a 80°C, nas velocidades de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s.

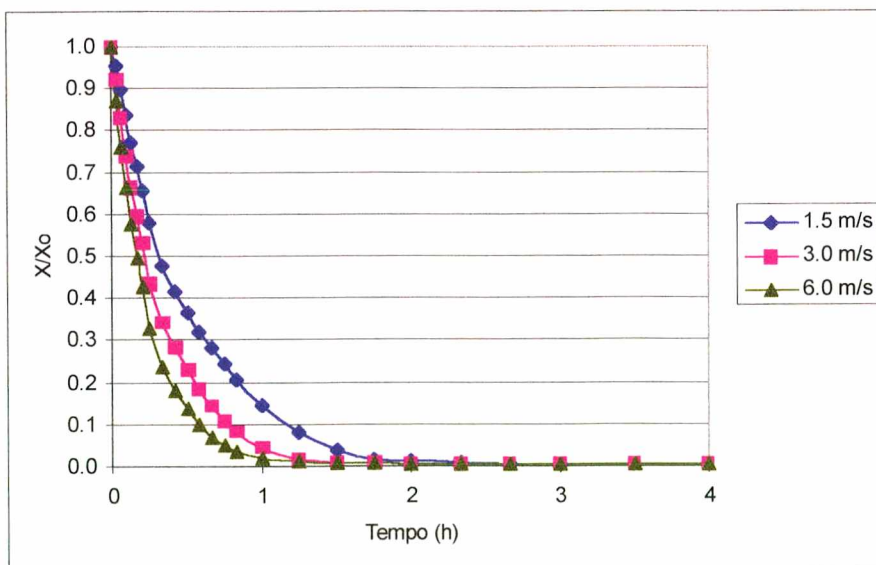


Figura 4.10 - Curvas de secagem a 140/80°C, nas velocidades de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s.

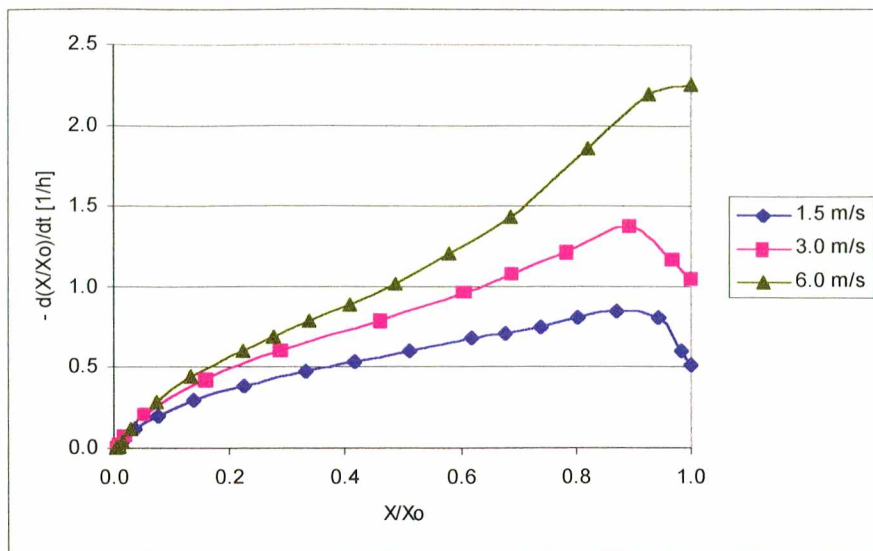


Figura 4.11 - Cinéticas de secagem a 80°C, nas velocidades de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s.

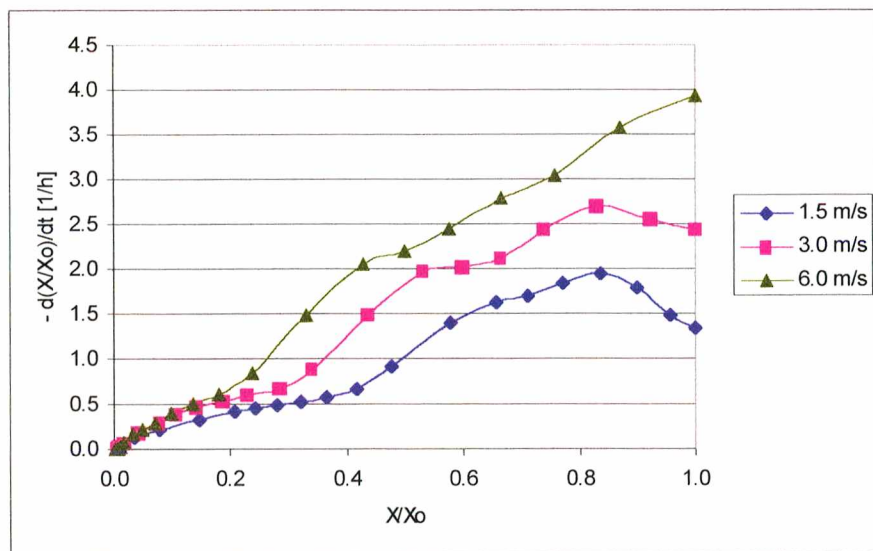


Figura 4.12 - Cinéticas de secagem a 140/80°C, nas velocidades de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s.

A taxa decrescente desses experimentos apresenta três períodos significativos para as velocidades de 1,5 e 3,0 m/s, sendo uma delas no período HTST, como já foi verificado na figura 4.6. O segundo período engloba o estabelecimento da temperatura mais amena, além da

diminuição de temperatura de 140 para 80°C. O terceiro período finaliza a secagem. A curva a 6,0 m/s apresenta uma transição mais amena do período HTST à temperatura mais baixa, além da ausência do período de aquecimento.

4.2.4 Efeito do pré-tratamento

Nesta seção é avaliado o efeito da imersão das fatias de maçã em uma solução de amido gelatinizado a 2%, durante 2 min (conforme seção 3.2.1). São apresentadas as curvas de secagem a 60°C e 80°C, com ar a 3,0 m/s (Figura 4.13), e períodos HTST a 120°C com posterior diminuição para 60°C e 80°C, a 3,0 m/s (Figura 4.14). As Figuras 4.15 a 4.18 mostram as respectivas cinéticas de secagem.

Nas figuras apresentadas, a sigla cpt (com pré-tratamento) refere-se a amostras submetidas à imersão e a sigla spt (sem pré-tratamento) a amostras *in natura*.

Analisando-se as curvas de secagem apresentadas nas Figuras 4.13 e 4.14, verifica-se que o uso do pré-tratamento aumenta o tempo de secagem quando X/X_0 atinge valores menores que 0,4. As cinéticas de secagem (Figuras 4.15 a 4.18), por sua vez, apresentam um comportamento interessante. Nas temperaturas de 60°C e 80°C, a velocidade de secagem é maior no início dos experimentos com pré-tratamento, invertendo de posição no início do período decrescente. Isso pode ser explicado pelo fato de que a camada externa de amido, para amostras pré-tratadas, seca mais rapidamente do que a camada externa das fatias de maçã, onde a água está principalmente dentro das células. Entretanto, quando seca, a camada externa de amido, e mesmo o gel que foi infiltrado nos espaços intercelulares, difi-

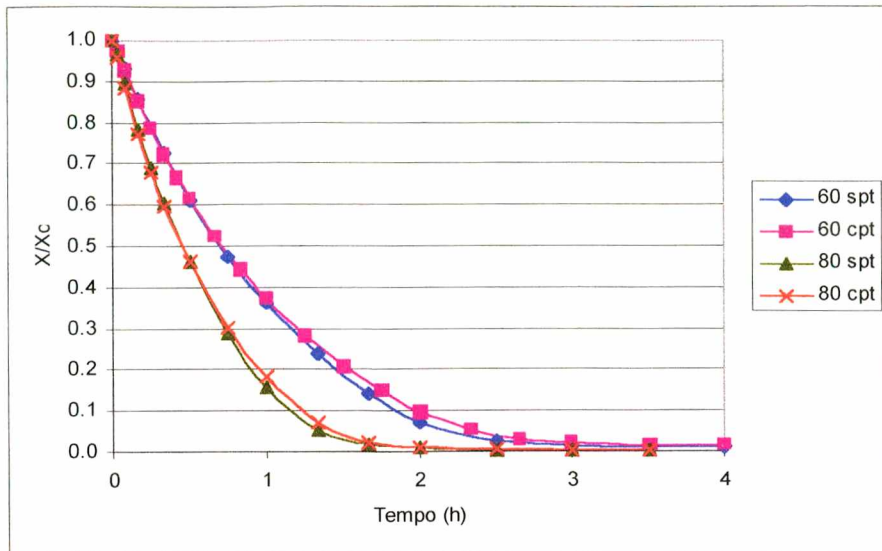


Figura 4.13 - Influência do pré-tratamento nas curvas de secagem a 60°C e 80°C e 3,0 m/s.

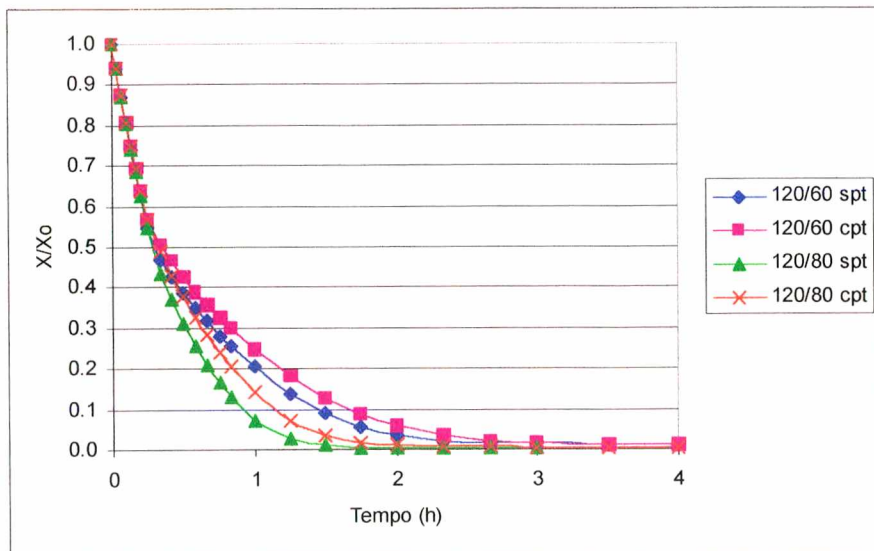


Figura 4.14 - Influência do pré-tratamento nas curvas de secagem a 120/60°C e 120/80°C e 3,0 m/s.

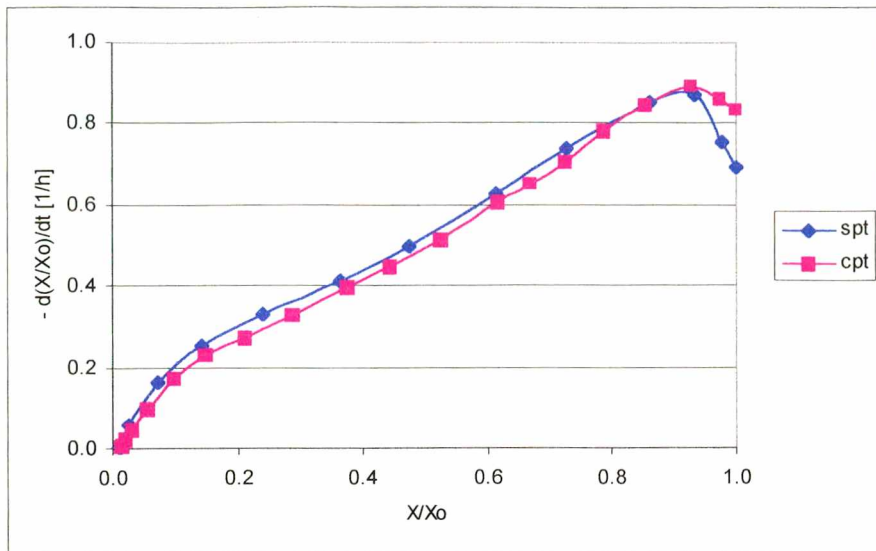


Figura 4.15 - Influência do pré-tratamento na cinética de secagem a 60°C e 3,0 m/s.

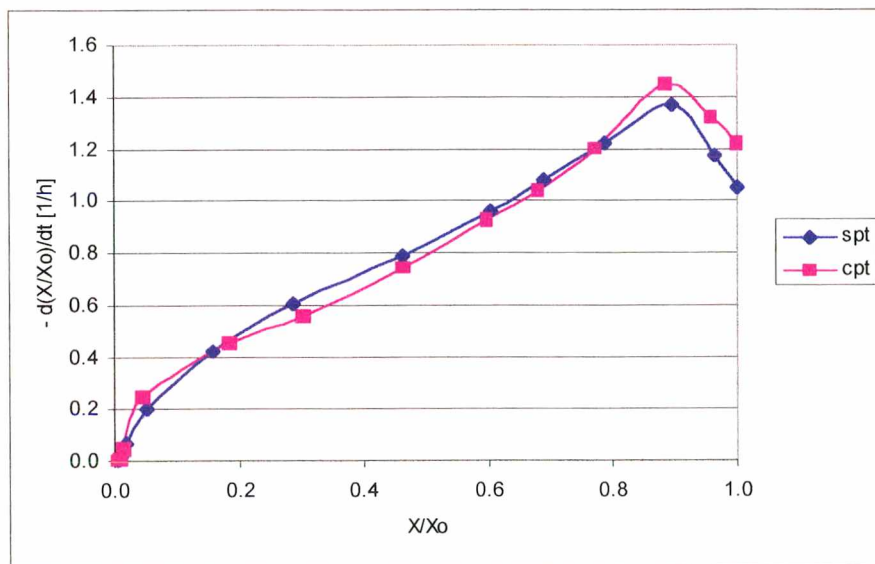


Figura 4.16 - Influência do pré-tratamento na cinética de secagem a 80°C e 3,0 m/s.

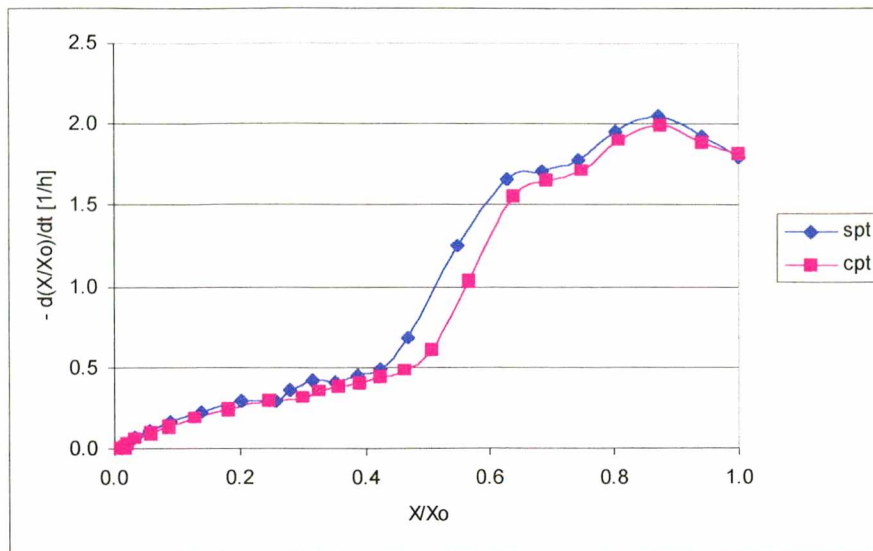


Figura 4.17 - Influência do pré-tratamento na cinética de secagem a 120/60°C e 3,0 m/s.

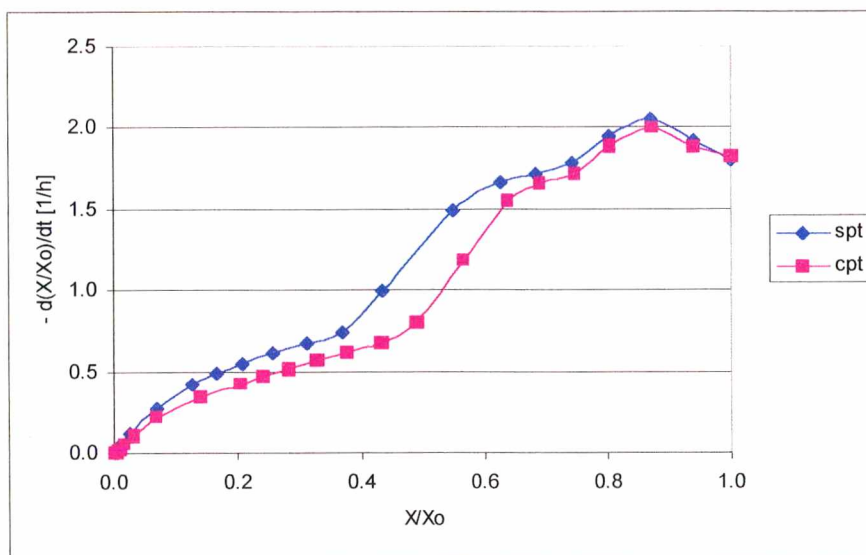


Figura 4.18 - Influência do pré-tratamento na cinética de secagem a 120/80°C e 3,0 m/s.

cultam a perda de umidade do interior do produto para o ar de secagem, diminuindo assim a velocidade de secagem.

Nas temperaturas de 120/60°C e 120/80°C, a velocidade de secagem dos experimentos sem pré-tratamento é sempre maior do que dos ensaios com pré-tratamento. Outros

experimentos realizados nas mesmas temperaturas, porém à velocidade maior (6,0 m/s), apresentaram o cruzamento entre as cinéticas, à semelhança do caso das temperaturas de 60 e 80°C.

4.3 Cinéticas da variação da densidade e do volume da maçã durante a secagem

A variação da densidade aparente das fatias de maçã *in natura* durante a secagem é ilustrada nas Figuras 4.19 e 4.20. As maçãs foram desidratadas nas condições de 80°C, a 3,0 m/s e 6,0 m/s, e a 120/80°C, a 6,0 m/s.

Analisando a figura 4.19, verifica-se que nos experimentos a 80°C a densidade oscila entre 0,85 e 0,90 g/ml durante a primeira hora de secagem, para depois diminuir. No experimento realizado na temperatura de 120/80°C, esse período inicial é mais curto, cerca de 30 minutos. Após o período inicial, a diminuição da densidade é quase linear com o tempo, para então apresentar uma pequena estagnação em todos os experimentos realizados. Pode-se observar que o aumento da velocidade do ar influi na cinética, retardando o início do período de densidade decrescente (Figura 4.20). A temperatura tem um efeito mais forte sobre o processo, o que pode ser verificado pelo período de densidade constante menor a 120/80°C. Em todos os casos estudados, as curvas determinadas são irregulares, e as inclinações, na parte decrescente, são praticamente idênticas.

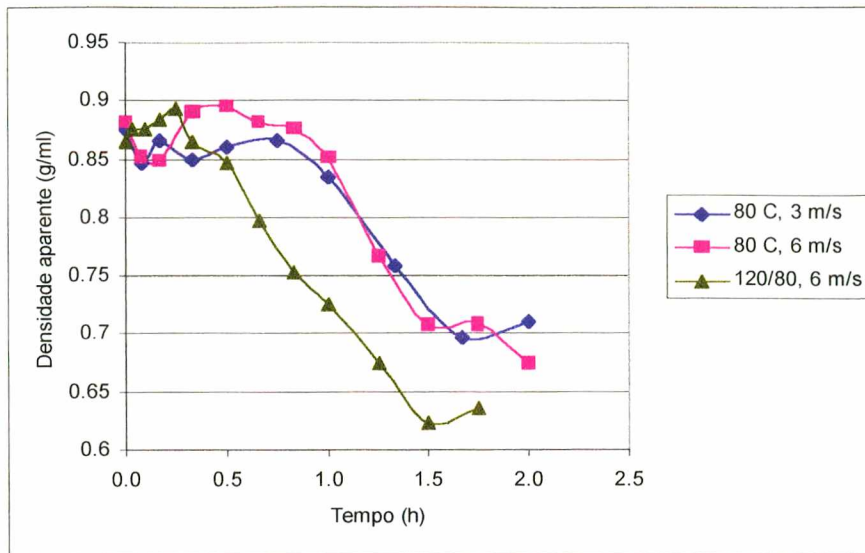


Figura 4.19 - Densidade aparente da maçã em função do tempo, na secagem a 80°C, a 3,0 m/s e 6,0 m/s, e 120/80°C, a 6,0 m/s.

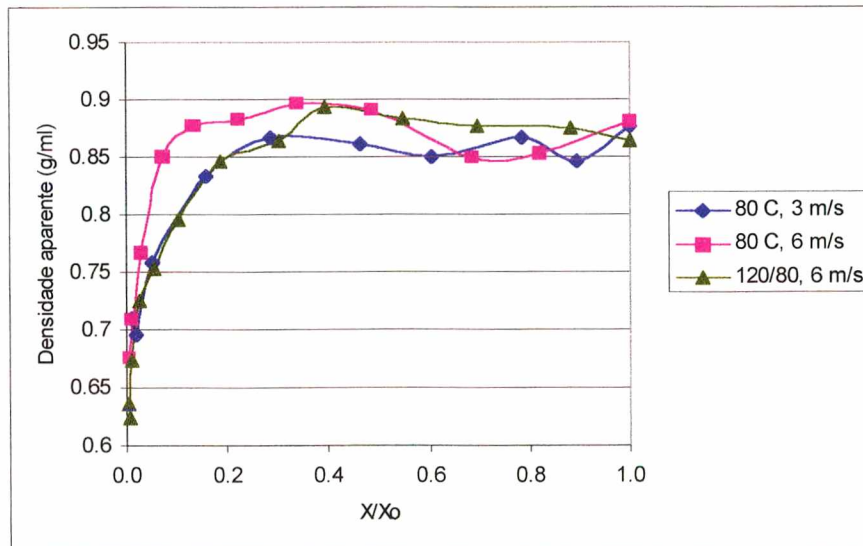


Figura 4.20 - Densidade aparente da maçã em função de X/X_0 , na secagem a 80°C, a 3,0 m/s e 6,0 m/s, e 120/80°C, a 6,0 m/s.

Através da Figura 4.20, nota-se que a densidade aparente é menor para umidades menores. Ela começa a diminuir a razões de umidade inferiores a 0,18, para os experimentos a 120/80°C, 6,0 m/s e 80°C, 3,0 m/s. O aumento

da velocidade parece manter a densidade a valores mais altos em uma faixa de umidade maior. Para o experimento realizado a 80°C e 6,0 m/s a densidade diminui quando a razão de umidade está em torno de 0,13. Verifica-se que o comportamento apresentado na Figura 4.20 é semelhante ao encontrado por Krokida *et al.* (1997) na desidratação à vácuo de maçãs (Figura 2.6).

Nestas mesmas condições foi calculada a variação de volume do produto durante a secagem, de acordo com o item 3.6.1. Nas Figuras 4.21 e 4.22 os resultados são apresentados em função do tempo de secagem e da razão de umidade, as quais mostram curvas bem comportadas. No primeiro caso, a curva possui a forma de uma exponencial negativa, e no segundo caso, a de uma reta, praticamente coincidentes para os casos estudados.

De acordo com a Figura 4.21, entre todos os casos estudados, a variação de volume inicialmente é maior a 120/80°C e menor a 80°C e 3,0 m/s. No experimento realizado a 120/80°C e 6,0 m/s, a variação de volume é observada até 50 minutos. Nos experimentos a 80°C, a 6,0 m/s a variação de volume ocorre até 1h de secagem e naquele a 3,0 m/s até 1h20min. Verifica-se, para uma mesma razão de umidade, que a razão de volume (V/V_0) (Figura 4.22) é praticamente a mesma nos três casos, sendo ligeiramente menor no período HTST do experimento realizado na temperatura inicial de 120°C.

Ao compararmos as Figuras 4.19 e 4.21, nota-se que a densidade aparente é muito mais sensível às variações que ocorrem no produto durante a secagem. Isto pode ser explicado observando-se as Figuras 4.23 e 4.24, que comparam a variação da densidade com as cinéticas de varia-

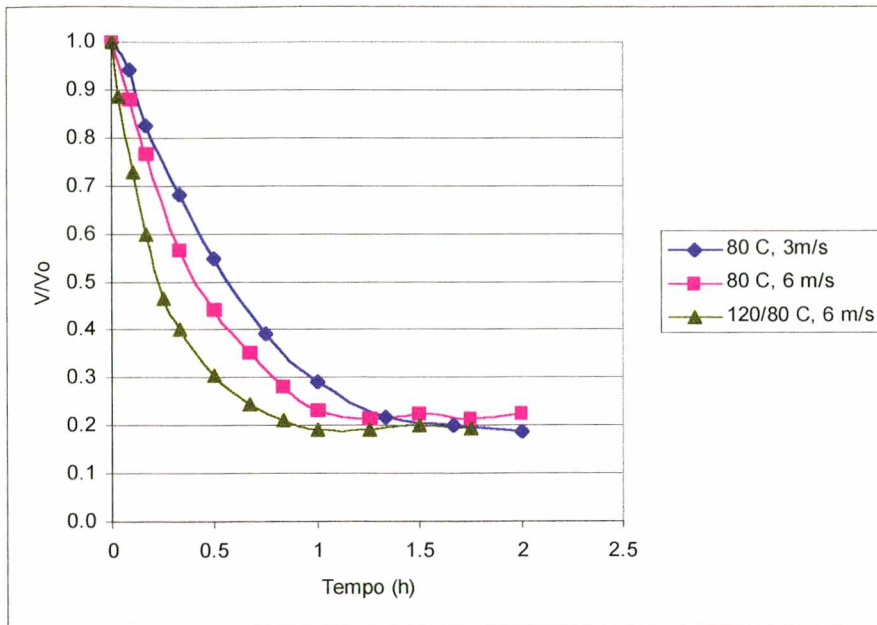


Figura 4.21 - Volume em função do tempo a 80°C e 120/80°C, a 6,0 m/s, e 80°C, a 3,0 m/s, sem pré-tratamento e na espessura de 5,8 mm.

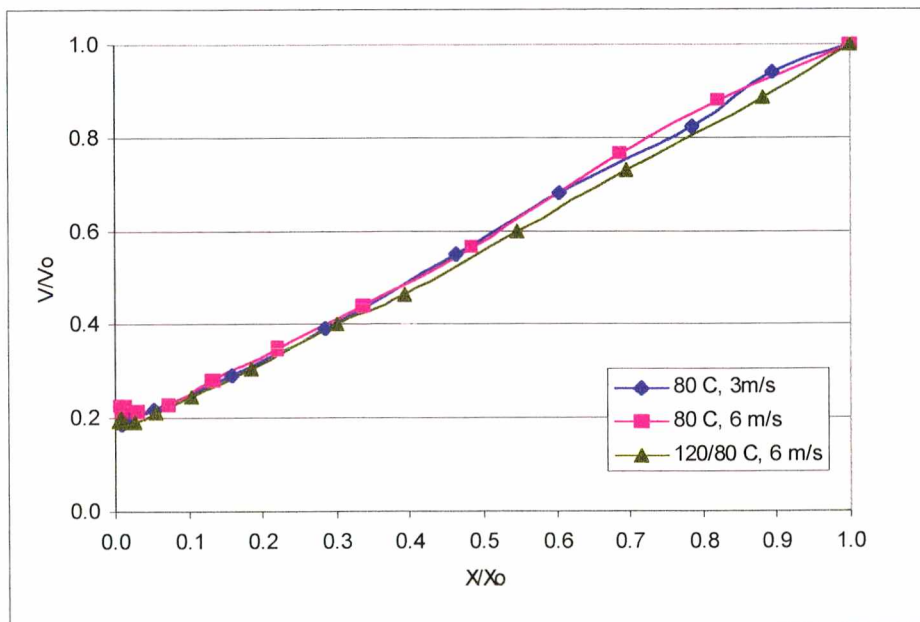


Figura 4.22 - Volume em função de X/X_0 a 80°C e 120/80°C, a 6,0 m/s, e 80°C, a 3,0 m/s, sem pré-tratamento e na espessura de 5,8 mm.

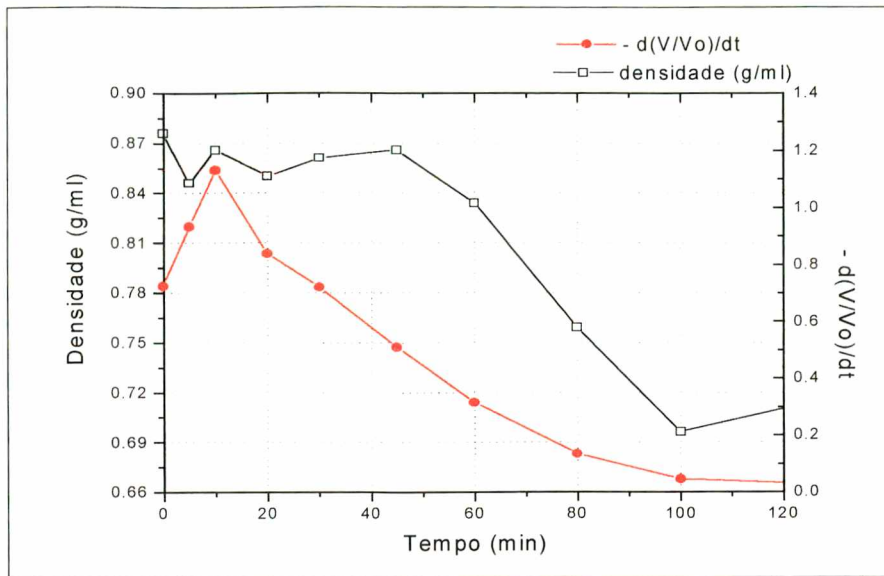


Figura 4.23 - Densidade e cinética da variação do volume em função do tempo, a 80°C, a 3,0 m/s.

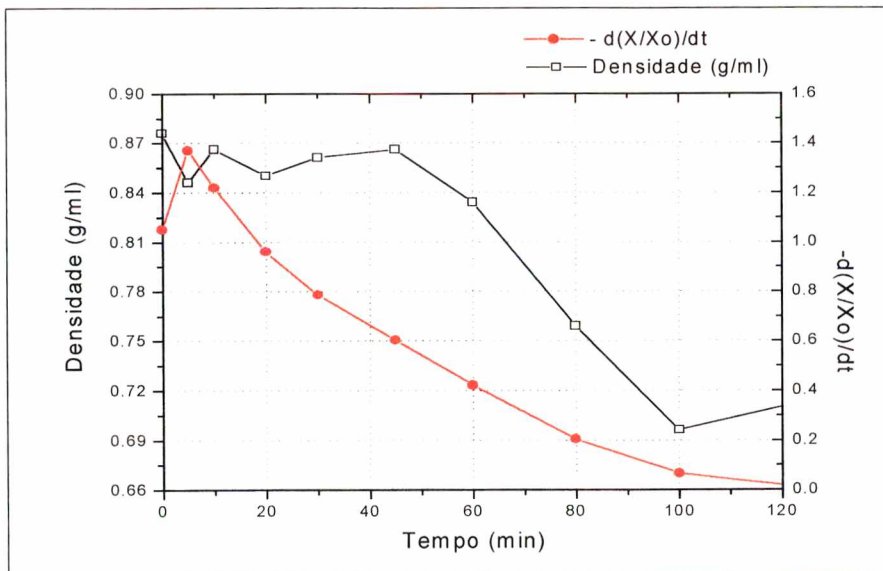


Figura 4.24 - Densidade e a taxa de secagem em função do tempo, 80°C, a 3,0 m/s.

ção da umidade e de volume (encolhimento). De acordo com a cinética de secagem (Figura 4.24), o aquecimento das fatias de maçã até a temperatura de bulbo úmido do ar ocorre nos 5 minutos iniciais. Entretanto, a variação do volume atinge um máximo aos 10 minutos de secagem (Figura 4.23), período

no qual o tecido celular amolece por causa do aquecimento e, além disso, encolhe devido à grande perda de massa. Após esse período, a evaporação torna-se mais lenta, diminuindo a velocidade de variação de massa e volume.

Nos 45 minutos iniciais de secagem, a densidade apresenta oscilações em torno de um valor médio, certamente devido ao fato das variações de volume e massa terem a mesma magnitude. Neste ponto, o valor de X/X_0 é de 0,29, correspondente a uma umidade em base seca de 1,61 kg H₂O/kg ss. Esse período corresponde ao primeiro período de taxa decrescente.

A partir de 45 minutos, inicia-se o segundo período de secagem, onde se observa que a densidade cai abruptamente, seguida de uma diminuição na variação de volume. Nesta fase, que vai até 1h40min (100 min), o produto começa a enrigecer, e a diminuição da massa de água predomina em relação à diminuição de volume. A umidade encontrada no final desta etapa é de 0,10 g H₂O/g ss ($X/X_0 = 0,02$). Após 1h40min de secagem, a variação de volume e umidade são mínimos e pode-se dizer que um pseudo equilíbrio foi atingido, sendo que a secagem, a partir deste ponto, é feita com custos energéticos elevados.

4.4 Densidade aparente

Um estudo da densidade aparente do produto final foi realizado, levando em consideração as temperaturas e velocidades do ar de secagem, além do pré-tratamento. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Pode-se verificar que as diferentes velocidades e temperaturas do ar de secagem não apresentam influência de-

Tabela 4.1 - Densidade aparente (em g/ml) da maçã *in natura* desidratada a diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem.

	60°C	70°C	80°C	120/60°C	120/80°C	140/80°C
1,5 m/s	0,718	0,675	0,691	0,718	0,674	0,633
3,0 m/s	0,674	0,778	0,645	0,782	0,721	0,668
6,0 m/s	0,836	0,696	0,788	0,817	0,700	0,747

Tabela 4.2 - Densidade aparente (em g/ml) da maçã pré-tratada com amido, desidratada a diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem.

	60°C	70°C	80°C	120/60°C	120/80°C	140/80°C
1,5 m/s	0,666	0,731	0,630	0,680	0,682	0,760
3,0 m/s	0,652	0,789	0,560	0,754	0,664	0,725
6,0 m/s	0,765	0,624	0,671	0,758	0,621	0,664

finida sobre a densidade aparente do produto. A aplicação do pré-tratamento com amido a 1,5 m/s e 3,0 m/s apresenta resultados aleatórios sobre a densidade.

No entanto, na velocidade de 6,0 m/s, observa-se uma clara diminuição da densidade aparente quando amido gelatinizado é aplicado ao produto, em todas as temperaturas estudadas (Figura 4.25). Isto leva a crer que existe uma velocidade mínima para a obtenção de uma camada rígida na superfície do produto e, conseqüentemente, de uma estrutura porosa, pois, segundo Jen *et al.* (1989), a taxa de remoção de umidade tem grande influência na estrutura do produto desidratado. Se a secagem é rápida, principalmente no período inicial, a camada externa torna-se rígida e resiste às deformações, diminuindo, assim, o encolhimento. O período inicial de secagem, que na maioria dos alimentos é o primeiro período de taxa decrescente, é influenciada pela velocidade do ar, como foi verificado nas Figuras 4.11

e 4.12. Então, para se obter uma camada externa rígida no início da secagem, velocidades relativamente altas são necessárias, além da infiltração de biopolímeros naturais, os quais aumentam a resistência da estrutura celular enquanto a água é evaporada a taxas elevadas.

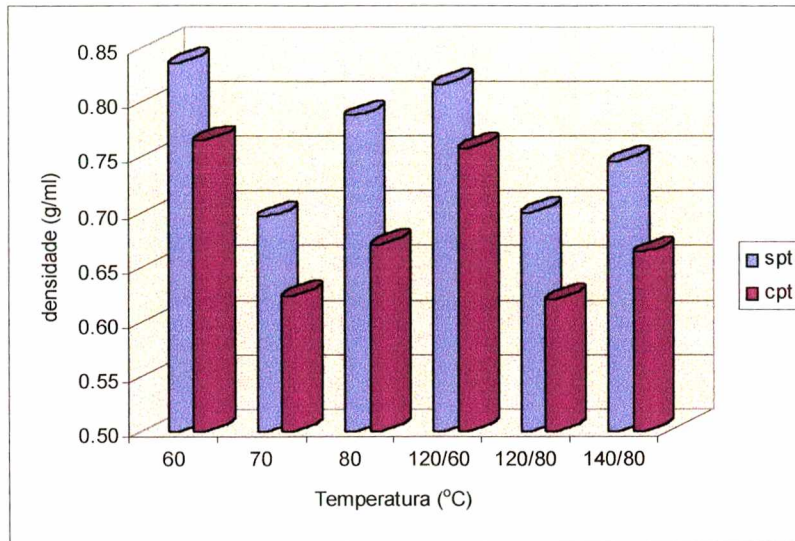


Figura 4.25 - Densidade aparente da maçã desidratada, com e sem pré-tratamento de amido (cpt e spt), a diferentes temperaturas e a 6,0 m/s.

4.5 Coeficiente de difusão efetivo

O coeficiente de difusão efetivo foi estimado a partir da equação (3.7), utilizando-se gráficos de $\ln(X/X_0)$ em função do tempo. O critério utilizado foi a adequação de uma regressão linear sobre os pontos experimentais, com parâmetros estatísticos significativos ($R^2 > 0,99$). As Figuras 4.26 e 4.27 ilustram esse procedimento para as temperaturas de 80°C e 140/80°C, nas velocidades de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s.

Verificou-se que, para a maioria dos casos estudados, dois coeficientes de difusão foram obtidos. Isto indica a

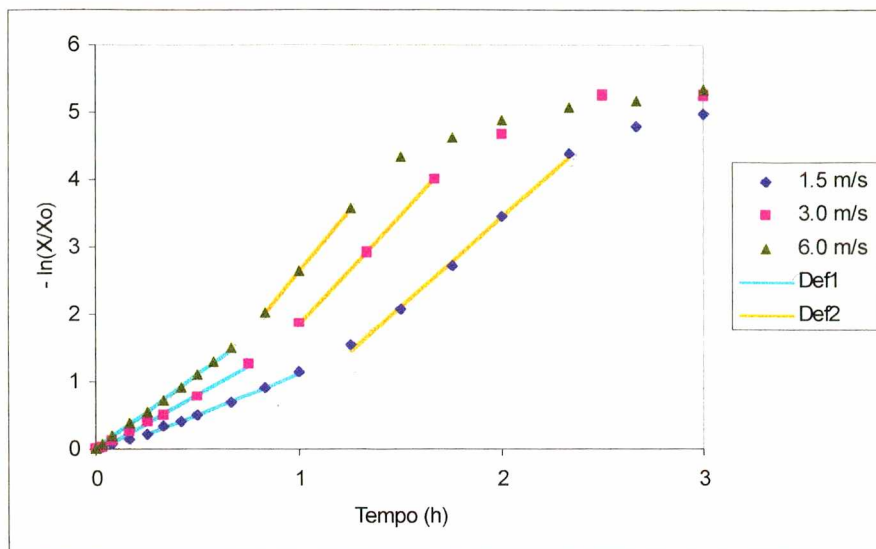


Figura 4.26 - Curvas de secagem da maçã *in natura*, a 80°C, velocidades do ar de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s, salientando-se os períodos utilizados para o cálculo do primeiro e do segundo Def.

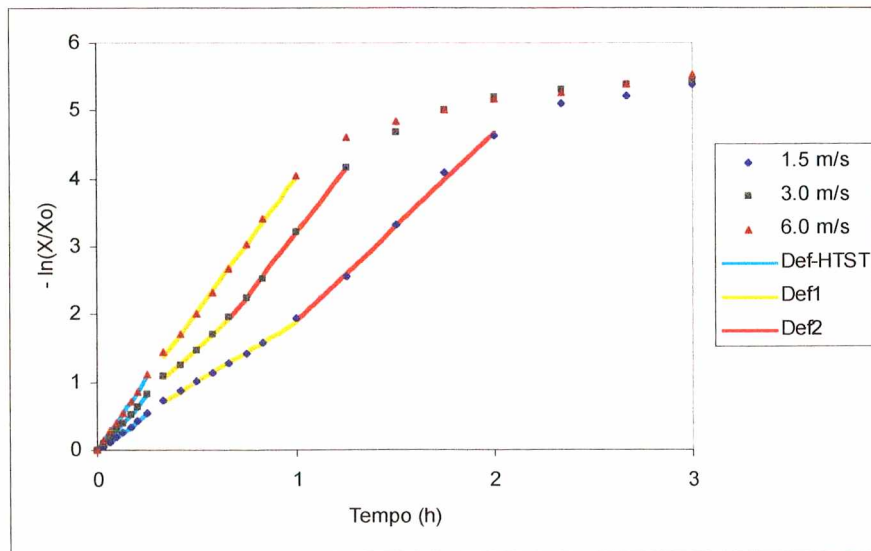


Figura 4.27 - Curvas de secagem da maçã *in natura*, a 140/80°C, e velocidades do ar de 1,5, 3,0 e 6,0 m/s, salientando-se os períodos utilizados para o cálculo do primeiro e do segundo Def.

existência de diferentes mecanismos de transferência de massa dentro do produto. Observa-se que os dois

coeficientes de difusão correspondem a diferentes razões de umidade e possuem relação com a situação da densidade aparente do produto, constante ou decrescente, como apresentado na Tabela 4.3 e na Figura 4.28. Entretanto, na Figura 4.29 verifica-se que os dois coeficientes de difusão também apresentam relação com o primeiro e segundo período de taxa decrescente.

Tabela 4.3 - D_{ef} , com a respectiva faixa de umidade e situação da densidade, nas seguintes condições do ar: 80°C e 3,0 m/s.

	Valor	$(X/X_0)_i$	$(X/X_0)_f$	X_i	X_f	Situação de ρ
D_{ef1}	$1,61 \times 10^{-9}$	0,8944	0,2857	5,0513	1,6132	constante
D_{ef2}	$3,06 \times 10^{-9}$	0,1570	0,0181	0,8864	0,1025	decrescente

Observa-se que o coeficiente de difusão é maior em valores de umidade menores, ou seja, D_{ef} é menor no início da secagem, o que também pode ser verificado nas figuras citadas. Este comportamento, aparentemente contraditório, pode ser explicado pela modificação estrutural do produto durante a secagem.

A estrutura histológica de um vegetal fresco é determinada pelo tamanho da célula, componentes intercelulares e, ainda, espessura, composição e estrutura da parede celular. Em maçãs, substâncias pécticas e ar estão presentes nos espaços intercelulares, e são responsáveis pela estrutura esponjosa desta fruta (Jen et al., 1989). O colapso desta estrutura durante a secagem pode afetar as propriedades de transporte. Assim, supõe-se que nos períodos de aquecimento e primeiro período decres-

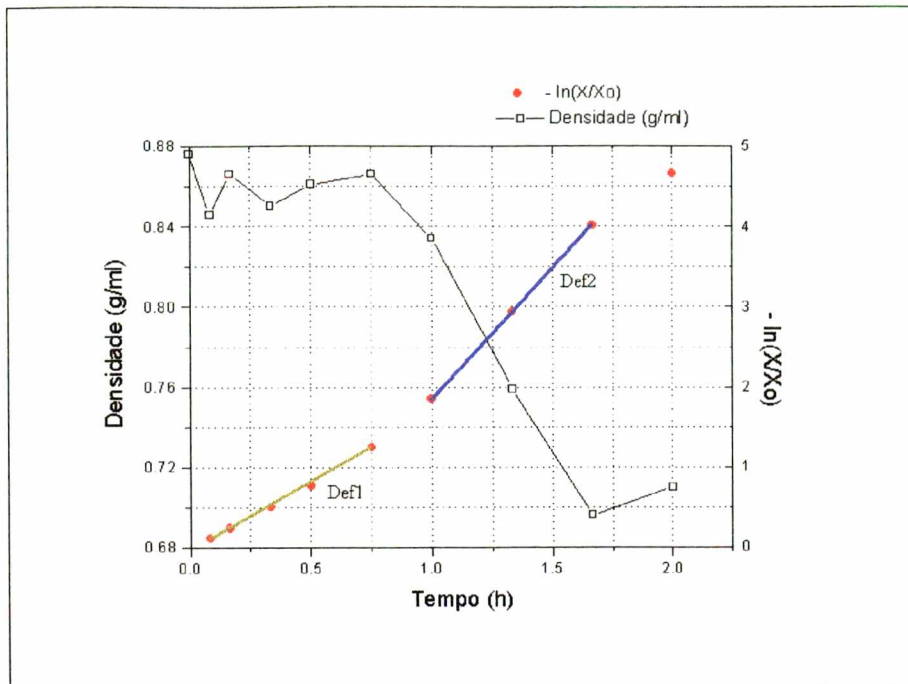


Figura 4.28 - Densidade e $-\ln(X/X_0)$ em função do tempo, a 80°C e $3,0\text{ m/s}$.

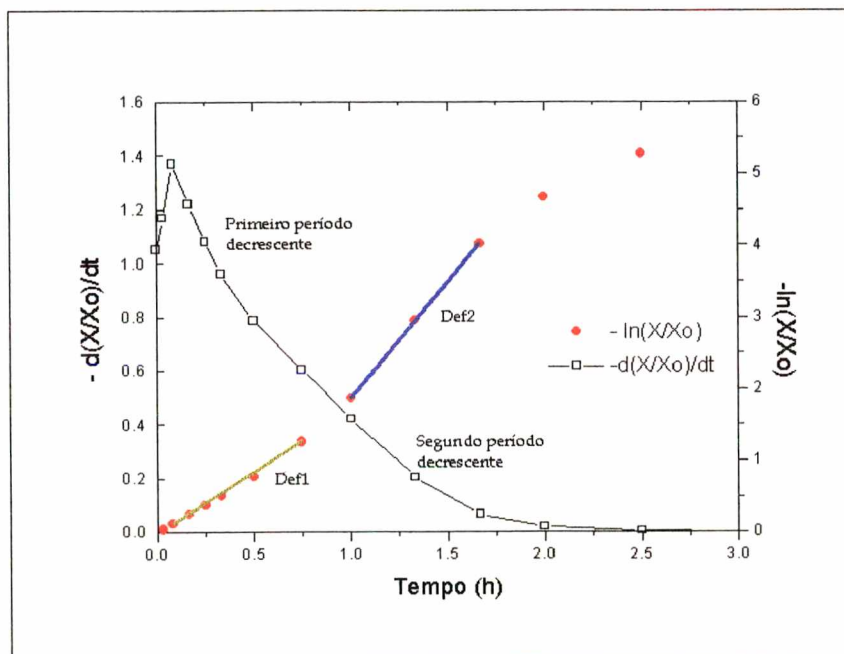


Figura 4.29 - Cinética e $-\ln(X/X_0)$ em função do tempo, a 80°C e $3,0\text{ m/s}$.

cente a estrutura celular sofra desintegração gradual. Água contida nos espaços intercelulares e retida por forças

capilares deve ser evaporada; aquela, que se localiza nos espaços intracelulares, deve vencer a resistência à transferência devido à permeabilidade seletiva oferecida pela parede celular. Neste período, que corresponde ao período de densidade constante da Figura 4.28, não existem poros, somente espaços intercelulares que diminuem enquanto a água é evaporada, provocando o encolhimento. Com o progresso da secagem as células entram em colapso, perdendo a capacidade seletiva. A resistência ao deslocamento da água ou vapor no produto, então, diminui. Além disso, grande parte dos espaços intercelulares se encontram vazios, podendo formar pequenos canais de condução de massa até a superfície. Este último comportamento corresponde ao segundo período decrescente, com densidade também decrescente, onde D_{ef} é maior que aquele encontrado no primeiro período decrescente.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos para secagem a 60°C, 70°C e 80°C. Tanto o primeiro como o segundo coeficiente de difusão, apresentam variação com a temperatura, como esperado. Entretanto, ambos os coeficientes de difusão variam também com a velocidade do ar. Uma possível explicação pode ser o fato de que a condição de equilíbrio na superfície, considerada pelo modelo (equações 2.5 a 2.7), não seja satisfatória, necessitando a utilização de uma condição convectiva. Neste caso, o D_{ef} encontrado englobaria o coeficiente de transferência de massa convectivo.

Em praticamente todos os ensaios, o emprego do pré-tratamento fez diminuir o coeficiente de difusão, pelo fato de que a camada de amido depositada sobre as fatias de maçã dificulta a perda de umidade. O mesmo ocorreu no período de secagem HTST, cujos coeficientes de difusão são apresenta-

Tabela 4.4 - Coeficiente de difusão efetivo dos experimentos realizados a 60, 70 e 80°C, 1,5, 3,0 e 6,0 m/s e 5,8 mm.

T (°C)	V (m/s)	Pré-tratamento	$D_{ef} \times 10^9$ (m ² /s)
60	1,5	Sem	0,76
			1,42
		Amido	0,82
			1,60
	3,0	Sem	0,97
			1,83
		Amido	0,95
			1,57
	6,0	Sem	1,27
			1,90
		Amido	1,21
			1,86
70	1,5	Sem	1,10
			2,13
		Amido	1,02
			2,08
	3,0	Sem	1,40
			2,51
		Amido	1,30
			2,45
	6,0	Sem	1,76
			3,01
		Amido	1,77
			2,97
80	1,5	Sem	1,11
			2,44
		Amido	1,07
			2,19
	3,0	sem	1,61
			3,06
		Amido	1,52
			2,93
	6,0	Sem	2,10
			3,54
		Amido	2,03
			3,56

dos na Tabela 4.5.

A aplicação do amido impede o colapso em alto grau da estrutura celular do produto, mantendo grande parte da integridade da membrana ao criar uma camada rígida na superfície. Deste modo, a maçã resiste mecanicamente melhor ao encolhimento, e as células mantêm um pouco da estrutura esponjosa. No entanto, a seletividade, principal responsável pela resistência à transferência de massa, se perde quando a célula morre (ou seja, perde sua capacidade vegetativa). Assim, o valor de D_{ef} no segundo período decrescente também é maior para fatias de maçã pré-tratadas. Supõe-se que a diminuição dos diferentes coeficientes de difusão na secagem quando se aplica amido ao alimento, deve-se à resistência inserida no produto pelo gel adicionado.

Tabela 4.5 - Coeficiente de difusão efetivo do período de secagem HTST, nas diferentes velocidades empregadas, com e sem pré-tratamento, e na espessura de 5,8 mm.

T (°C)	V (m/s)	Pré-tratamento	$D_{ef} \times 10^9$ (m ² /s)
120	1,5	Sem	1,68
		Amido	1,65
	3,0	Sem	2,39
		Amido	2,24
	6,0	Sem	3,42
		Amido	3,37
140	1,5	Sem	2,31
		Amido	2,06
	3,0	Sem	3,27
		Amido	2,93
	6,0	Sem	4,14
		Amido	3,91

Na Tabela 4.6 estão os coeficientes de difusão a 60 e 80°C após a secagem HTST. Um caso especial é observado: apenas um coeficiente de difusão foi encontrado na veloci-

Tabela 4.6 - Coeficiente de difusão efetivo do período a baixas temperaturas dos experimentos realizados com uma etapa inicial de secagem HTST.

T (°C)	T _{HTST} (°C)	V (m/s)	Pré-tratamento	D _{ef} x 10 ⁹ (m ² /s)			
60	120	1,5	Sem	0,87			
				1,65			
			Amido	0,87			
				1,37			
		3,0	Sem	1,18			
				1,69			
			Amido	1,00			
				1,41			
		6,0	Sem	1,83			
				1,63			
			80	120	1,5	Sem	1,34
							2,57
Amido	1,37						
	2,80						
3,0	Sem	2,29					
		3,40					
	Amido	1,64					
		2,51					
6,0	Sem	3,57					
		3,52					
	80	140	1,5	Sem	1,66		
					2,63		
Amido				1,44			
				2,59			
3,0			Sem	2,47			
				3,62			
			Amido	2,10			
				3,20			
6,0			Sem	3,75			
				3,61			

dade de 6,0 m/s, o que pode ser visualizado na Figura 4.27.

Em termos gerais, a aplicação do tratamento HTST aumenta o valor dos coeficientes de difusão a temperaturas amenas em relação àqueles desenvolvidos a temperatura constante (conforme Tabelas 4.4 e 4.6). Os experimentos a 6,0 m/s, apresentam apenas um coeficiente de difusão após o período HTST, o qual possui valor próximo do segundo coeficiente de difusão encontrado nos experimentos realizados sem a secagem HTST, nas mesmas temperaturas (60 e 80°C) e velocidades do ar.

No cálculo de D_{ef} através da equação (3.7), a exclusão de X_e não introduziu grandes erros nos resultados. Uma avaliação destes erros foi feita estimando-se X_e a partir da isoterma apresentada na Figura 2.2 e da umidade relativa do ar de secagem (Tabela A.1 do Apêndice A), para a temperatura de 60°C. O erro encontrado para o primeiro coeficiente de difusão, na velocidade de 1,5 m/s, é de cerca de 0,3%, enquanto para o segundo coeficiente o erro é de 5,4%.

Procurou-se obter equações que pudessem descrever os valores dos coeficientes de difusão encontrados em função da temperatura e velocidade do ar. Um ajuste dos resultados experimentais através de regressão múltipla, para o primeiro e segundo coeficiente de difusão, tem a seguinte forma:

$$D_{ef} = b + d \cdot T_{bs} + e \cdot v_{Ts} \quad (4.1)$$

Onde: D_{ef} = Coeficiente de difusão efetivo [m^2/s]
 T_{bs} = Temperatura de bulbo seco do ar de secagem [°C]

- v_{Ts} = Velocidade média do ar na temperatura de secagem [m/s]
 b = Constante [m^2/s]
 d = Constante [$m^2/s \cdot ^\circ C$]
 e = Constante [m]

As constantes **b**, **d** e **e** da equação (4.1) são apresentados na Tabela 4.7. Nessa tabela, verifica-se que a constante **e** da velocidade, é menor para o segundo coeficiente de difusão. Isso mostra que a influência da velocidade sobre o segundo coeficiente é menor do que sobre o primeiro.

Tabela 4.7 - Constantes b , d e e da equação (4.1), para o primeiro e o segundo coeficiente de difusão efetivo, com e sem pré-tratamento de amido.

D_{ef}	PT ¹	Constantes			R^2
		b [m^2/s]	$d \times 10^{11}$ [$m^2/s \cdot ^\circ C$]	$e \times 10^{10}$ [m]	
D_{ef_1}	Sem	$-1,36136 \times 10^{-9}$	2,61102	2,4619	0,93082
D_{ef_1}	Com	$-1,57932 \times 10^{-9}$	2,61151	2,58714	0,90401
D_{ef_2}	Sem	$-6,43233 \times 10^{-11}$	2,73114	1,03312	0,86635
D_{ef_2}	Com	$-5,73308 \times 10^{-11}$	2,73904	1,51007	0,947

¹ PT = pré-tratamento

A Tabela 4.8 mostra uma comparação entre os valores de D_{ef} obtidos experimentalmente e aqueles calculados pela equação (4.1). Verifica-se que os maiores erros, em termos percentuais, são encontrados a valores de temperatura mais baixos.

Tabela 4.8 - Valores experimentais e calculados através da equação (4.1), com os coeficientes da tabela 4.7, do primeiro e segundo coeficiente de difusão efetivo.

Def	PT ¹	T (°C)	v (m/s)	$D_{\text{ef,exp}} \times 10^9$ (m ² /s)	$D_{\text{ef,calc}} \times 10^9$ (m ² /s)	Erro (%)
1	Sem	60	1,5	0,76	0,58	24,40
1	sem	70	3,0	1,40	1,20	13,93
1	sem	80	6,0	2,10	2,20	4,98
1	sem	120	3,0	2,39	2,51	5,04
1	sem	140	6,0	4,14	3,77	8,91
1	com	60	1,5	0,82	0,38	54,19
1	com	70	3,0	1,30	1,02	21,16
1	com	80	6,0	2,03	2,06	1,58
1	com	120	3,0	2,24	2,33	4,05
1	com	140	6,0	3,91	3,63	7,18
2	sem	60	1,5	1,42	1,73	21,78
2	sem	70	3,0	2,51	2,16	14,05
2	sem	80	6,0	2,93	2,74	6,47
2	com	60	1,5	1,60	1,81	13,29
2	com	70	3,0	2,45	2,31	5,59
2	com	80	6,0	3,56	3,04	14,61

¹ PT = pré-tratamento

5 CONCLUSÕES

Durante a realização deste trabalho, estudou-se as propriedades e o comportamento de maçãs da variedade Fuji, cortadas em fatias e submetidas a um processo de secagem sob diferentes condições de operação.

As maçãs desidratadas apresentam boa aparência, com pouco escurecimento, e sabor agradável. Pré-tratamentos para evitar o escurecimento foram considerados desnecessários. A textura dos produtos obtidos é dura, mas com alguma crocância.

Nos estudos aqui apresentados, as cinéticas de secagem não apresentaram período de taxa constante, demonstrando o caráter higroscópico do material. Três parâmetros foram levados em consideração para avaliação da velocidade de secagem: espessura das fatias de maçã, temperatura e velocidade do ar.

No que diz respeito à espessura da fatia, observou-se que esta tem grande influência na velocidade de secagem. Na espessura de 5,8 mm, a velocidade é aproximadamente a metade daquela encontrada na espessura de 2,8 mm. No entanto, fatias mais espessas mostraram um sabor agradável e característico, que desaparece para fatias mais finas.

A temperaturas mais elevadas, a velocidade de secagem aumenta como seria esperado. Ensaio realizado com período HTST mostraram cinéticas com altas taxas de transferência de massa, as quais adquiriram comportamento igual ao das de temperaturas amenas, após ter cessado a aplicação HTST.

Quanto à forma, as cinéticas de secagem apresentaram dois períodos decrescentes. A aplicação do tratamento HTST acrescenta mais um período, passando este a ser o primeiro período de taxa decrescente no processo.

Verificou-se a existência de um período inicial nas cinéticas de secagem, o qual ocorre devido ao aquecimento do produto, nas velocidades do ar de 1,5 e 3,0 m/s; entretanto, este período não foi detectado a 6,0 m/s. A influência da velocidade do ar sobre a taxa de secagem foi maior no início da secagem, quando a importância da resistência externa à transferência de massa é maior.

A velocidade e a temperatura do ar de secagem não mostraram influência definida sobre a densidade aparente do produto desidratado. O pré-tratamento com amido gelatinizado diminuiu a densidade do produto final nos experimentos realizados a 6,0 m/s.

Um estudo da variação da densidade aparente durante a secagem mostrou que a mesma permanece constante, por períodos variáveis de acordo com as condições de operação, para, em seguida, diminuir. Pode-se associar este comportamento com os períodos de secagem acima citados. Ensaio que apresentam o período de aquecimento do produto, mostram diminuição da densidade neste período, explicáveis pelas magnitudes de evaporação de água e contração do produto simultâneos.

Observou-se que o volume diminui com a diminuição da umidade, não havendo diferenças significativas na variação de volume para os diferentes experimentos realizados.

Foram encontrados dois coeficientes de difusão efetivos para tratamentos de secagem convencional e três para aqueles precedidos de tratamento HTST, correspondentes aos diferentes períodos de secagem. Uma exceção foi o caso

de secagem HTST - convencional a 6,0 m/s, onde somente dois coeficientes de difusão foram encontrados. Os coeficientes de difusão variam com a temperatura e a velocidade do ar de secagem. A variação com a velocidade do ar de secagem, pode indicar que a condição de equilíbrio na superfície não é adequada, necessitando a utilização de uma condição convectiva.

De um modo geral, os coeficientes de difusão dos experimentos com pré-tratamento apresentaram valores inferiores aos experimentos sem pré-tratamento. Isto pode ser explicado pelo fato de que a camada de amido, depositada sobre o alimento, forma uma camada rígida sobre o produto, dificultando a transferência de massa. Esta dificuldade pode ser observada pela diminuição da velocidade de secagem no período de umidade intermediária.

A aplicação de HTST influi no valor dos coeficientes de difusão a temperaturas amenas. Em outras palavras, os valores dos coeficientes de difusão encontrados a 60°C e 80°C precedidos de HTST foram maiores que aqueles encontrados em ensaios desenvolvidos apenas a 60°C e 80°C.

Observou-se ainda que o coeficiente de difusão é menor no início da secagem, quando o conteúdo de umidade é maior. Atribui-se este comportamento a modificações estruturais do produto durante a secagem.

6 SUGESTÕES

Sendo a secagem de alimentos um assunto bastante complexo, muito ainda deve ser feito para melhorar a compreensão do processo. Nesta seção, damos as seguintes sugestões:

- 1 Realizar uma análise sensorial das fatias de maçã desidratadas, verificando se as maçãs apresentam uma boa textura, aparência e gosto.
- 2 Avaliar a relação entre a perda de aroma com a razão área superficial:volume do produto.
- 3 Desenvolver métodos de medida de crocância, dureza e adesividade para avaliação objetiva da qualidade, associando com a análise sensorial.
- 4 Adaptar ao secador o controle de velocidade e umidade do ar de secagem e a pesagem automatizada do material que está sendo seco, além do reciclo do ar de secagem, o qual diminui o consumo de energia.
- 5 Avaliar o coeficiente de difusão, considerando uma condição de contorno convectiva na superfície, para a equação da difusão unidirecional (2.5), e levando em consideração mais de um termo da série que compõe a solução analítica.

- 6 Medir a temperatura das fatias de maçã, para avaliar a dependência de D_{ef} com a temperatura.

- 7 Tirar micrografias e medir a a_w do produto durante a secagem, para confirmar ou refutar direção dada pela teoria usada para explicar o aumento do D_{ef} com a diminuição da umidade. Estudos histológicos podem ainda vir em auxílio à compreensão deste comportamento.

- 8 Desenvolver um modelo matemático que envolva equações de transferência de massa e calor, além de levar em consideração o encolhimento do material, e aplicar às condições de secagem utilizadas nesta pesquisa.

7 BIBLIOGRAFIA

- AFZAL, T. M., ABE, T. Diffusion in potato during far infrared radiation drying. **Journal of food engineering**, vol. 37, p. 353-365, 1998.
- ALMEIDA, M. E. M., NOGUEIRA, J. N. The control of polyphenol oxidase activity in fruits and vegetables. **Plant foods for human nutrition**, vol. 47, p. 245-256, 1995.
- ARGAIZ, A., LÓPEZ-MALO, A., PALOU, E., WELTI, J. Osmotic dehydration of papaya with corn syrup solids. **Drying technology**, vol. 12, n. 7, p. 1709-1725, 1994.
- BENDER, R. J. Botânica e fisiologia. In: **Manual da cultura da macieira**. Florianópolis: DID/EMPASC, 1986, p. 26 - 49.
- BISWAL, R. N., BOZORGMEHR, K., TOMPKINS, F. D., LIU, X. Osmotic concentration of green beans prior to freezing. **Journal of food science**, vol. 56, n. 4, p. 1008-1012, 1991.
- BOEING, G. **Novo recorde**. <http://www.agricultura.sc.gov.br>. 30 de outubro de 1998.
- BONETTI, J. I., CESA, J. D., LESSA, A. O., PETRI, J. L. **Estudo da cadeia produtiva da cultura da macieira**. São Joaquim, 1995.

- BRUNAUER, S., EMMETT, P. H., TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, vol. 60, p. 309-319, 1938.
- CARNEIRO, M. J. M., TOBINAGA, S. Modelo matemático simplificado para a secagem de pescado levando-se em conta o encolhimento. **Ciência e tecnologia de alimentos**, Campinas - SP, vol. 16, n. 3, p. 188-190, out-dez. 1996.
- CHIANG, W., PETERSEN, J. N. Experimental measurement of temperature and moisture profiles during apple drying. In: **Drying'86**. Washington: A. S. Mujundar Hemisphere, 1986, vol. 2, p. 479-486.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 1975.
- CRUESS, M. V. **Produtos industriais de frutas e hortaliças**. Ed. Edgar Blucher, 1973.
- CRUZ, G. A. **Desidratação de alimentos**. 2^a ed. São Paulo: Ed. Globo S.A., 1990.
- FELLOWS, P. **Food processing technology: principles and practice**. Published jointly by Ellis Horwood Ltd., Chichester, England and VCA Verlagsgesellschaft GmbH, Weinheim, Federal Republic of Germany; 1988.
- HANSMANN, C. F., JOUBERT, E., BRITZ, T. J. Dehydration of peaches without sulphur dioxide. **Drying technology**, vol. 16, n. 1&2, p. 101-121, 1998.
- JAYAPRAKASHA, H. M., JAYARAJ RAO, K., LORESH KUMAR, W. A. Studies on the influence of water activity (a_w) on the

- stability of foods - a critical appraisal. **Journal of food science and technology**, vol. 34, n. 4, p. 273-285, 1997.
- JEN, J. J., MUDAHAR, G. S., TOLEDO, R. T. Chemistry and processing of high quality dehydrated vegetable products. In: **Quality factors of fruits and vegetables**. Cap. 19, p. 239 - 249; Symposium n° 405, American Chemical Society, Washington, DC; 1989.
- JOHNSON, P-N. T., BRENNAN, J. G., ADDO-YOBO, F. Y. Air-drying characteristics of plantain (*Musa AAB*). **Journal of food engineering**, vol. 37, n. 2, p. 233.242, 1998.
- KIM, M. H.; TOLEDO, R. T. Effect of osmotic dehydration and high temperature fluidised bed drying on properties of dehydrated rabbiteye blueberries. **Journal of food science**, vol. 52, n 4, p. 980-984 e 989, 1987.
- KREUZ, C. L. **Maçã**. <http://www.epagri.rct-sc.br>. 1998.
- KREUZ, C. L., BENDER, R. J., BLEICHER, J. História e importância econômica da macieira. In: **Manual da cultura da macieira**. Florianópolis: DID/EMPASC, 1986, p. 13 - 25.
- KROKIDA, M. K., KARATHANOS, V. T., MAROULIS, Z. B. Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. **Journal of food engineering**, vol. 35, p. 369-380, 1998.
- KROKIDA, M. K., ZOGZAS, N. P., MAROULIS, Z. B. Modelling shrinkage and porosity during vacuum dehydration.

- International journal of food science and technology**, vol. 32, p. 445-458, 1997.
- LAZARIDES, H. N., KATSANIDIS, E., NICKOLAIDIS, A. Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. **Journal of food engineering**, vol. 25, p. 151-166, 1995.
- LEITE, R. S. S., MAIA, M. L., DO CANTO, W. L., GARCIA, A. E. B., **Produção e comercialização de maçã**. Campinas: Secretaria de Agricultura e Abastecimento/Instituto de Tecnologia de Alimentos.
- LEWICKI, P. P. The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. **International journal of food science and technology**, vol. 32, p. 553-557, 1997.
- LEWICKI, P. P., WITROWA-RAJCHERT, D. NOWAK, D. Effect of drying mode on drying kinetics of onion. **Drying technology**, vol. 16, n. 1&2, p. 59-81, 1998.
- LIDE, D. R. **Handbook of organic solvents**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1994.
- LIMAVERDE, J. R., FINZER, J. R. D. Influência da pressão osmótica na desidratação de milho verde. **Anais do XXIV ENEMP**, vol. 1, p. 243-246, 1997.
- LITVIN, S., MANNHEIM, C. H., MILTZ, J. Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying. **Journal of food engineering**, vol. 36, p. 103-111, 1998.

- LOMAURO, C. J., BAKSHI, A. S., LABUZA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: fruit, vegetable and meat products. **Lebensmittel wissenschaft und technologie**, vol. 18, p.111-117, 1985.
- LOMBRAÑA, J. I., VILLARÁN, M. C. Kinetics modelling of sublimation and vaporisation in low-temperature dehydration processes. **Journal of chemical engineering of Japan**, vol. 26, n 4, 1993.
- LUCAS, V. **Obtenção de fatias de banana desidratada crocantes através da pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado**. Campinas, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1996.
- LUCAS, V., KIECKBUSCH, T. G. Secagem de bananas a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado. **Anais do XXII ENEMP**, p. 520-527, 1994.
- LUIKOV, A. V. **Heat and mass transfer in capillary-porous bodies**. Pergamon Press, 1961.
- MASKAN, M., GÖGÜS, F. Sorption isotherms and drying characteristics of mulberry (*Morus alba*). **Journal of food engineering**, vol. 37, p. 437-449, 1998.
- MCCABE, W. L., SMITH, J. C. **Unit operations of chemical engineering**. McGraw-Hill, Inc., 1976.
- MIGUEL, M. H., KIECKBUSCH, T. G. Desidratação osmótica de frutas: influência da combinação de solutos. **Anales del**

- I Congreso Ibero-Americano de Ingeniería de Alimentos, p. 255-266, 1995.
- MIGUEL, M. H., MENEGALLI, F. C., KIECKBUSCH, T. G. Influência do soluto sobre a desidratação osmótica de manga. **IV Congreso Latinoamericano de transferencia de calor y materia - X Jornadas (chilenas) de transferencia de calor y materia**, p. 321-324, 1991.
- MOWLAH, G., TAKANO, K., KAMOI, I., OBARA, T. Water transport mechanism and some aspects of quality changes during air dehydration of bananas. **Lebensmittel wissenschaft und technologie**, vol. 16, p.103-107, 1983.
- MUDAHAR, G. S.; BUHR, J. R.; JEN, J.J. Infiltrated biopolymers effect on quality of dehydrated carrots. **Journal of food science**, vol. 57, n 2, 1991.
- NIETO, A., SALVATORI, D., CASTRO, M. A., ALZAMORA, S. M. Air drying behaviour of apples as affected by blanching and glucose impregnation. **Journal of food engineering**, vol. 36, n. 1, p. 63-79, 1998.
- NUNES, M. H. O., KIECKBUSCH, T. G. Conservação de fatias de manga por desidratação osmótica e congelamento. **Anais do XXV ENEMP**, Vol. II, p. 612-618, 1998.
- NURI, F. S., BREKKE, J. E., BOLIN, H. R. Fruits. In: VAN ARSDEL, W. B., COPLEY, M. J., MORGAN JR., A. I. **Food dehydration - drying methods and phenomena**. 2nd ed., Westport: AVI Publishing Company Inc., 1973, vol. 2, p. 158-198.

- OKADA, M., VITALI, A. A., TEIXEIRA NETO, R. O., CARVALHO, R. JARDIM, D. C. P. Fundamentos de secagem. In: AGUIRRE, J. M., GASPARINO FILHO, J. **Desidratação de frutas e hortaliças - manual técnico**. Campinas: Ital, 1997, cap. 1.
- PASCHOALETI, C. C., TOBINAGA, S. Secagem de cogumelos (*Agaricus bisporus*). **Anales del I Congreso Ibero-Americano de Ingenieria de Alimentos**. Tomio II, cap. II - Mass Transfer Processes, p. 275-279, editora Universidade de Valência, Espanha, dezembro/1996.
- PAYNE, F. A., TARADA, J. L., SAPUTRA, D. A review of puffing processes for expansion of biological products. **Journal of food engineering**, vol. 10, p. 183-187, 1989.
- PIOTROWSKI, D., LENART, A. The influence of constant and variable conditions on the drying kinetics of apples. **Drying technology**, vol. 16, n. 3-5, p. 761-778, 1998.
- QUADRI, M. G. N., QUAIST, E., QUADRI, M. B. Secagem de cebola em bandejas utilizando desidratação osmótica como pré-tratamento. **Anais do XXIV ENEMP**, vol. 1, p. 313-317, 1996.
- RASTOGI, N. K., RAGHAVARAO, K. S. M. S., NIRANJAN, K. Mass transfer during osmotic dehydration of Banana: Fickian diffusion in cylindrical configuration. **Journal of food engineering**, vol. 31, p. 423-432, 1997.
- RIBEIRO, P. A. Descrição e comportamento de algumas cultivares de macieira no sul do Brasil. In: **Manual da cultura da macieira**. Florianópolis: DID/EMPASC, 1986.

- RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A., RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1986, p. 133-214.
- ROMERO, L. M., MIGUEL, M. H., SPOGIS, N., KIECKBUSCH, T. G. Cinética de secagem de tomates em fatias pré-tratadas: resultados preliminares. **Anais do XXV ENEMP**, vol. II, p. 620-627, 1998.
- ROVEDO, C. A., SUAREZ, C., VIOLLAZ, P. E. Drying of foods: evaluation of a drying model. **Journal of food engineering**, vol. 26, p. 1-12, 1995.
- SACA, S. A., LOZANO, J. E. Explosion puffing of bananas. **International journal of food science and technology**, vol. 27, n 4, p. 419- 426, 1992.
- SANKAT, C. K., CASTAIGNE, F., MAHARAJ, R. The air drying of fresh and osmotically dehydrated banana slices. **International journal of food science and technology**, vol. 31, p. 123-135, 1996.
- SANTIN, A. P. **Estudo da secagem e da inativação de leveduras *saccharomyces cerevisiae***. Florianópolis, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Depto. de Engenharia Química, UFSC, 1996.
- SAPERS, G. M., HICKS, K. B. Inhibition of enzymatic browning in fruits and vegetables. In: **Quality factors of fruits and vegetables**. Cap. 3, p. 29 - 43; Symposium nº 405, American Chemical Society, Washington, DC; 1989.

- SARAVACOS, G. D. Mass transfer properties of foods. In: RAO, M. A., RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1986, p. 89-132.
- SAYAVEDRA-SOTO, L. A., MONTGOMERY, M. W. Inhibition of polyphenoloxidase by sulfite. **Journal of food science**, vol. 51, n. 6, p. 1531-1536, 1986
- STRUMILLO, C., ADAMIEC, J. Energy and quality aspects of food drying. **Drying technology**, vol. 14, n. 2, p. 423-448, 1996.
- STRUMILLO, C., KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- SULLIVAN, J. F., CRAIG JR., J. C., KONSTANCE, R. P., EGOVILLE, M. J., ACETO, N. C. Continuous explosion-puffing of apples. **Journal of food science**, vol. 45, p. 1550-1555 e 1558, 1980.
- TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. **Food research international**, vol. 26, p.59-68, 1993
- TRAVAGLINI, D. A., NETO, M. P., BLEINROTH, E. W., LEITÃO, M. F. F. **Banana-passa - princípios de secagem, conservação e produção industrial**. Campinas: ITAL/Rede de Núcleos de Informação Tecnológica, 1993.
- ÜRETİR, G., ÖZILGEN, M., KATNAS, S. Effects of velocity and temperature of air on the drying rate constants of apple cubes. **Journal of food engineering**, vol. 30, p. 339-350, 1996.

VALDEZ-FRAGOSO, A., WELTI-CHANES, J., GIROUX, F. Properties of a sucrose solution reused in osmotic dehydration. **Drying technology**, vol. 16, n. 7, p. 1429-1445.

VAN ARSDEL, W. B. Drying phenomena. In: VAN ARSDEL, W. B., COPLEY, M. J., MORGAN JR., A. I. **Food dehydration - drying methods and phenomena**. 2nd ed., Westport: AVI Publishing Company Inc., 1973, vol. 1, p. 22-57.

WANG, N., BRENNAN, J. G. Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. **Journal of food engineering**, vol. 24, p. 61-76, 1995.

**APÊNDICE A - Determinação da umidade relativa
do ar de secagem**

Um psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido foi utilizado para determinar as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar de secagem, antes de ser aquecido pelas resistências elétricas. Com essas temperaturas, calculou-se a umidade absoluta do ar de secagem através das equações (A.7), (A.9) e (A.10) do anexo A. A umidade relativa do ar de secagem foi determinada através da equação (A.11), também do anexo A, e empregando-se a umidade absoluta anteriormente determinada e a temperatura de bulbo seco do ar já aquecido.

A Tabela A.1 apresenta os valores da umidade relativa do ar de secagem, para as diferentes temperaturas de bulbo seco utilizadas, sendo que os valores apresentados são médias das umidades relativas de todos experimentos realizados na mesma temperatura de bulbo seco.

**Tabela A.1 - Umidade relativa do ar
nos experimentos realizados.**

T_{bs} (°C)	UR (%)	DP
60	10,7	1,3
70	7,1	0,4
80	4,6	0,7
120	1,1	0,2
140	0,6	0,1

APÊNDICE B - Calibração do termopar

A calibração do termopar de ferro-constantan (tipo J) utilizado para medir a temperatura do ar dentro da câmara de secagem, foi feita através de um banho de óleo, aquecido por meio de resistências elétricas. O termopar e um termômetro padrão foram imersos no óleo até uma profundidade de 4 cm. O sinal amplificado do termopar foi lido através do *software* de controle em diferentes temperaturas, de modo que toda faixa de temperatura utilizada pelo termopar foi analisada.

A expressão obtida para calibração do termopar é apresentada na equação (B.1).

$$Y = 76,113 \cdot S - 80,262 \quad (B.1) \quad R^2 = 0,9996$$

onde:

Y = temperatura lida no termômetro padrão (°C)

S = sinal amplificado da voltagem obtida do termopar (V)

R² = coeficiente de regressão.

APÊNDICE C - Efeito de um pré-tratamento com MBSNa na secagem de maçãs em fatias

Um experimento foi realizado utilizando como pré-tratamento, a imersão em uma solução de metabissulfito de sódio (MBSNa) a 0,6%, durante 2 min. Esse experimento foi realizado na temperatura do ar de 80°C e velocidade de 3,0 m/s, e espessura da fatia de maçã de 5,8 mm. Na Figura C.1 tem-se a curva de secagem desse experimento e a comparação com o experimento realizado nas mesmas condições, mas sem pré-tratamento, enquanto na Figura C.2 tem-se a cinética de secagem.

Analisando-se a Figura C.1 verifica-se que não há, aparentemente, diferença entre as curvas de secagem dos experimentos realizados com e sem o pré-tratamento com MBSNa. Na Figura C.2, pode-se verificar que a velocidade de secagem é ligeiramente superior no início da secagem para o experimento com MBSNa. Mas após esse período, os dois experimentos possuem praticamente a mesma velocidade. Essa maior velocidade inicial deve-se ao fato de que a superfície das fatias de maçã, após a imersão na solução de MBSNa, está mais úmida que a superfície das fatias de maçã que não foram pré-tratadas.

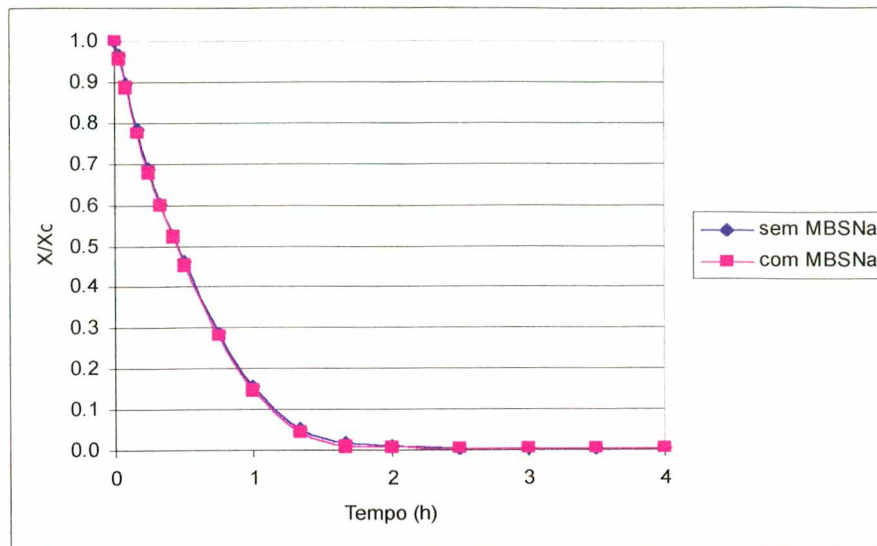


Figura C.1 - Curvas de secagem de fatias de maçã *in natura* e pré-tratadas com MBSNa a 80°C e 3,0 m/s, e espessura de 5,8 mm.

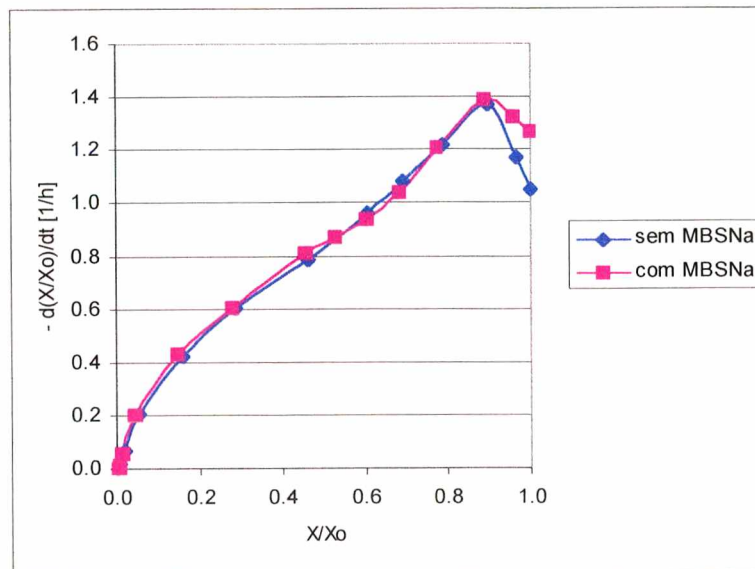


Figura C.2 - Cinéticas de secagem de fatias de maçã *in natura* e pré-tratadas com MBSNa a 80°C e 3,0 m/s, e espessura de 5,8 mm.

O pré-tratamento com MBSNa teve efeito direto na cor das fatias de maçã desidratadas, pois o produto não

apresentou escurecimento. Entretanto, a aplicação prévia de MBSNa forneceu um gosto desagradável ao produto desidratado.

ANEXO A - Equações utilizadas para o cálculo da umidade absoluta e umidade relativa do ar de secagem

A.1 Umidade absoluta (UA)

A umidade absoluta do ar em base seca é dada pela seguinte equação:

$$UA = \frac{m_v}{m_{as}} \quad (A.1)$$

onde m_v é a massa de vapor de água (g);

m_{as} é a massa de ar seco (g).

A pressão do ar é igual a soma das pressões parciais dos seus componentes. Considerando-se que o ar é basicamente composto por oxigênio, nitrogênio e vapor de água, tem-se:

$$P = p_{O_2} + p_{N_2} + p_v \quad (A.2)$$

onde:

P = pressão barométrica local (Pa)

p_{O_2} = pressão parcial de O_2 (Pa)

p_{N_2} = pressão parcial de N_2 (Pa)

p_v = Pressão de vapor de água no ar (Pa)

Considerando-se que a soma das pressões parciais do O_2 e N_2 fornece a pressão parcial do ar seco, obtêm-se:

$$P = p_{as} + p_v \quad (A.3)$$

onde:

p_{as} = pressão parcial do ar seco (Pa)

Pela lei dos gases ideais tem-se:

$$p_{as} \cdot V_{as} = R_{as} \cdot T_{abs} \quad (A.4)$$

onde V_{as} = volume específico do ar seco, definido como sendo o volume ocupado pela mistura por unidade de massa do ar seco (m^3/kg);

T_{abs} = temperatura absoluta da mistura (K)

R_{as} = constante dos gases para o ar seco

R_{as} pode ser calculado através da seguinte equação:

$$R_{as} = \frac{R}{M_{as}} = \frac{8314}{28.966} = 287 \frac{J}{kg \cdot K}$$

onde R é a constante universal dos gases.

$$p_v \cdot V_v = R_v \cdot T_{abs} \quad (A.5)$$

onde V_v = volume específico do vapor de água, definido como sendo o volume ocupado pela mistura por unidade de massa de vapor de água (m^3/kg);

R_v é a constante dos gases para o vapor de água.

R_v pode ser calculado através da seguinte equação:

$$R_v = \frac{R}{M_v} = \frac{8314}{18} = 462 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Dividindo-se as equações (A.4) e (A.5), obtêm-se:

$$\frac{p_{as}}{p_v} \cdot UA = 0.622 \quad (\text{A.6})$$

Combinando-se as equações (A.6) e (A.3):

$$UA = 0.622 \cdot \left(\frac{p_v}{P - p_v} \right) \quad (\text{A.7})$$

Para o cálculo de p_v , tem-se:

$$p_v = p_{vu} - \frac{h' \cdot (T_{bs} - T_{bu}) \cdot R \cdot (T_{bs} + 273.15)}{h'_D \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot h_{fg}} \quad (\text{A.8})$$

onde h' é o coeficiente de troca térmica entre o ar-água

h'_D é o coeficiente de transferência de massa entre
ar-água

h_{fg} é o calor latente de vaporização por kg de água
evaporada

$M_{\text{H}_2\text{O}}$ é a massa molecular da água = 18 kg/kgmol

sendo:

$$\frac{h'}{h'_D} = \rho_{ar} \cdot C_{ar} \cdot \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3}$$

ρ_{ar} é a densidade do ar = 1.1774 kg/m³

C_{ar} é o calor específico do ar seco = 1005.7 J/kg.°C

Sc é o número de Schmidt = 0,60 para o sistema ar-água

Pr é o número de Prandtl = 0.708

Os valores das variáveis anteriores foram tomadas na temperatura mais próxima possível da T_{bs} medida durante os experimentos, o que fornece um valor médio de 23°C. Assim, tem-se:

$$\frac{h'}{h_D} = 1060.40 \text{ J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

Mas

$$h_{fg} = 2.5 \cdot 10^6 - 2.39 \cdot 10^3 \cdot T_{orv} \quad \text{para } 0 \leq T_{orv} \leq 65^\circ\text{C}$$

Como a $T_{orv} \cong 20^\circ\text{C}$ (média das T_{bu} medidas durante os experimentos), obtêm-se $h_{fg} = 2452200 \text{ J/Kg}$.

Com esses valores, a equação (A.8) torna-se:

$$P_v = P_{vu} - 0.175 \cdot (T_{bs} - T_{bu}) \cdot (T_{bs} + 273.15) \quad (\text{A.9})$$

Sendo que P_{vu} é a pressão de vapor de saturação na T_{bu} , que é dada por:

$$P_{vu} = \exp \left[60.43 - \frac{6834.27}{T_{bu} + 273.15} - 5.17 \cdot \ln(T_{bu} + 273.15) \right] \quad (\text{A.10})$$

com P_{vu} em Pascal e T_{bs} e T_{bu} em °C

Na equação (A.7) tem-se $P \cong P_{atm}$ pois a pressão manométrica é muito pequena.

A.2 Umidade relativa (UR)

Tendo-se UA e T_{bs} no ponto da amostragem, obtêm-se

$$UR = \frac{p_v}{p_{vs}}$$

onde p_{vs} é a pressão de vapor de saturação na T_{bs} , dada por:

$$p_{vs} = \exp \left[60.43 - \frac{6834.27}{T_{bs} + 273.15} - 5.17 \cdot \ln(T_{bs} + 273.15) \right]$$

Da equação (A.7) resulta:

$$p_v = \frac{UA \cdot P}{0.622 + UA}$$

Assim,

$$UR = \frac{UA \cdot P \cdot 100}{(0.622 + UA) \cdot p_{vs}} \quad (A.11)$$

O desenvolvimento matemático aqui descrito foi retirado de Santin (1996).

ANEXO B - Uma aproximação geométrica para diferenciação de uma função experimental em um ponto.

Para o desenvolvimento desse método, assume-se que existe um arco de círculo $y(x)$ passando por três pontos A (x_A, y_A) , B (x_B, y_B) e C (x_C, y_C) , o qual é ilustrado na Figura B.1.

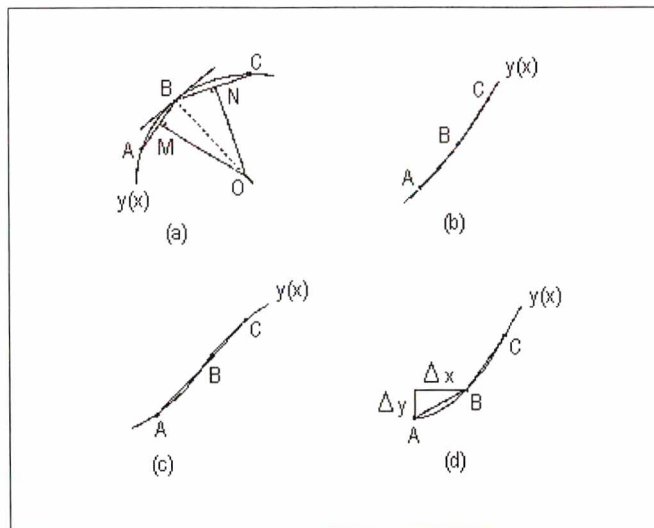


Figura B.1 - Ilustração para o método de diferenciação geométrica no ponto B: (a) caso geral; (b) em uma reta; (c) em um ponto de inflexão; (d) começando no ponto A.

Para determinar-se a inclinação da tangente a B, inicia-se através das equações das retas AB e BC, as quais estão na Tabela B.1:

TABELA B.1: Equações das retas AB e BC.

Reta	Equação	Inclinação	Intersecção
AB	$y = m_{AB}x + n_{AB}$	$m_{AB} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}$	$n_{AB} = \frac{y_A x_B - y_B x_A}{x_B - x_A}$
BC	$y = m_{BC}x + n_{BC}$	$m_{BC} = \frac{y_C - y_B}{x_C - x_B}$	$n_{BC} = \frac{y_B x_C - y_C x_B}{x_C - x_B}$

Sejam $M(x_M, y_M)$ e $N(x_N, y_N)$ os pontos médios de AB e BC, respectivamente. As retas MO e NO devem ser traçadas perpendiculares respectivamente com AB e BC em seus pontos médios. As equações para MO e NO estão na Tabela B.2:

TABELA B.2: Equações das retas MO e NO.

Reta	Equação	Inclinação	Intersecção
MO	$y = m_{MO}x + n_{MO}$	$m_{MO} = \frac{1}{m_{AB}} = \frac{x_A - x_B}{y_B - y_A}$	$n_{MO} = y_M - m_{MO}x_M$ $n_{MO} = \left(\frac{y_A + y_B}{2}\right) - m_{MO}\left(\frac{x_A + x_B}{2}\right)$
NO	$y = m_{NO}x + n_{NO}$	$m_{NO} = \frac{1}{m_{BC}} = \frac{x_B - x_C}{y_C - y_B}$	$n_{NO} = y_N - m_{NO}x_N$ $n_{NO} = \left(\frac{y_B + y_C}{2}\right) - m_{NO}\left(\frac{x_B + x_C}{2}\right)$

As coordenadas da intersecção dessas duas linhas perpendiculares no ponto O (x_O, y_O) podem ser determinadas pelas equações das retas MO e NO:

$$x_O = \frac{n_{NO} - n_{MO}}{m_{MO} - m_{NO}}$$

$$y_O = m_{MO}x_O + n_{MO} = m_{NO}x_O + n_{NO}$$

A equação da reta OB é

$$y = m_{OB}x + n_{OB}$$

cuja inclinação é dada por

$$m_{OB} = \frac{y_B - y_O}{x_B - x_O}$$

A inclinação da tangente de $y(x)$ ao ponto B é:

$$\left. \frac{dy(x)}{dx} \right|_{x=x_B} = -\frac{1}{m_{OB}} = \frac{x_O - x_B}{y_B - y_O} \quad (\text{B.1})$$

Os caso particulares para serem considerados são os seguintes:

(a) se as inclinações de AB e BC são aproximadamente iguais (Fig. B.1b), onde $m_{AB} \cong m_{BC}$, a aproximação usada é,

$$\left. \frac{dy(x)}{dx} \right|_{x=x_B} \cong \frac{m_{AB} + m_{BC}}{2} \quad (\text{B.2})$$

(b) se B é o ponto de inflexão (Fig. B.1c), a aproximação pela equação (B.2) pode também ser usada.

(c) Para o caso de ponto de partida ou ponto final (Fig. B.1d), a derivada pode ser aproximada por:

$$\left. \frac{dy(x)}{dx} \right|_{x=x_A} \cong \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (\text{B.3})$$

O método apresentado foi desenvolvido por Leduy & Zajic (citado por Santin, 1996). O cálculo das equações (B.1),

(B.2) e (B.3) para um conjunto de pontos experimentais (x_i, y_i) foi implementado em um *software*, desenvolvido em Visual Basic, pelo prof. Marinho Bastos Quadri. A interface gráfica do *software* é apresentada na Figura B.2.

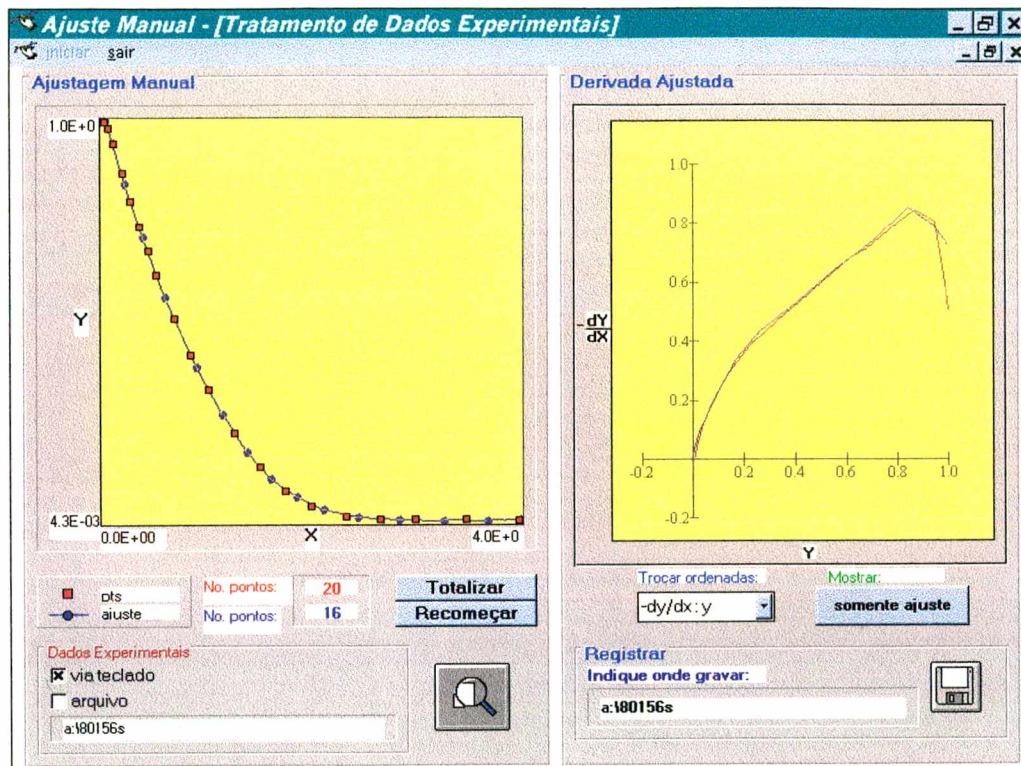


Figura B.2 - Interface gráfica do programa que possui implementado as equações (B.1), (B.2) e (B.3).