

Joel Fernando Nicoletti

**Cinética de Secagem e
Encolhimento de Fatias
de Abacaxi**



1910000979



1910000979





Universidade Estadual Paulista / São José do Rio Preto – SP

Depto. de Engenharia e Tecnologia de Alimentos

JOEL FERNANDO NICOLETI

**CINÉTICA DE SECAGEM E
ENCOLHIMENTO DE FATIAS
DE ABACAXI**



JOEL FERNANDO NICOLETI

CINÉTICA DE SECAGEM E ENCOLHIMENTO DE FATIAS DE ABACAXI



T979/01

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

Orientador: Profa. Dra. Vânia Regina Nicoletti Telis

São José do Rio Preto

Fevereiro/2001

Nicoleti, Joel Fernando

Cinética de secagem e encolhimento de fatias de abacaxi / Joel Fernando Nicoleti. – São José do Rio Preto : [s.n.], 2001.

102 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Vânia Regina Nicoletti Telis.

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

1. Cinética de desidratação – Abacaxi – Secagem convectiva. 2. Propriedades físicas – Encolhimento – Densidade aparente. 3. Reidratação. 4. Isotermas. 5. Pré-desidratação osmótica. I. Telis, Vânia Regina Nicoletti. II. Universidade Estadual Paulista. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. II. Título.

CDU – 664.85

COMISSÃO JULGADORA

Profa. Dra. Vânia Regina Nicoletti Telis

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior

Prof. Dr. José Antonio Gomes Vieira

Prof. Dr. Fabio Yamashita

Prof. Dr. Javier Telis Romero

DADOS CURRICULARES

JOEL FERNANDO NICOLETI

NASCIMENTO 31.03.1972 – SÃO JOSÉ DO RIO PRETO/SP
FILIAÇÃO Laercio Florindo Nicoletti
Elvira Bassetti Nicoletti

03/93 a 08/98 Curso de Graduação em Engenharia
Química – Universidade Federal de
Uberlândia.

03/99 a 02/01 Curso de Pós-Graduação em Engenharia e
Ciência de Alimentos, nível mestrado, na
Universidade Estadual Paulista, Câmpus
de São José do Rio Preto/SP.

À tia Alaíde

Que com toda sua qualidade humanitária , é
um exemplo das virtudes que o Homem pode
ter. Também foi muito importante e decisiva
na contribuição de minha vitória até aqui,
assim como meus pais, avós, e meus tios
Alzira (*in memorian*), Marcílio, Alberto, Laura
e Lourival.

Meus Sinceros Agradecimentos :

A DEUS, por tudo e principalmente pela saúde e entusiasmo que me conferiu.

A meus PAIS, AVÓS, TIOS, IRMÃOS e PRIMOS pela convivência construtiva e ao apoio durante estes anos.

À Prof. Dra. VÂNIA REGINA NICOLETTI TELIS pela paciência e dedicação na orientação.

Ao Prof. Dr. JAVIER TELIS-ROMERO pelas sugestões pertinentes feitas no decorrer do projeto. Pela sua participação no Exame de Qualificação, juntamente com os Profs. Drs. JOSÉ ANTONIO GOMES VIEIRA e MARIA APARECIDA MAURO, deixo aqui também, meus sinceros agradecimentos.

À ANA LÚCIA GABAS pela prontidão de suas ajudas e conselhos.

À COMISSÃO EXAMINADORA, pelas sugestões de correção da dissertação.

Ao técnico JOÃO JESUÍNO, pela montagem e manutenção de equipamentos, que foram sendo necessários durante a pesquisa.

Aos demais, TÉCNICOS e SECRETARIA do DETA/IBILCE, pelas trocas de informação e convivência nestes dois anos.

Aos meus amigos que comigo compartilharam estes anos de estudo no programa de pós-graduação, em especial à GRAZIELA, PATRÍCIA, GEISA, WANDA, AUGUSTO, RITA, MARLA, MARIA DO ROSÁRIO, SILVIA ROMEIRO e JUAN.

À FAPESP, pelo auxílio financeiro (Proc. 99/01255-3) e também pelo acompanhamento dos relatórios encaminhados.

É melhor tentar e falhar que preocupar-se e ver a vida passar. É melhor tentar ainda que em vão, sentar-se fazendo até o final. Eu prefiro na chuva caminhar, que dias tristes em casa me esconder. Prefiro ser feliz, embora louco, que em conformidade viver.

Martin Luther King

SUMÁRIO

<u>LISTA DE FIGURAS</u>	<u>III</u>
<u>LISTA DE TABELAS</u>	<u>VI</u>
<u>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS</u>	<u>VII</u>
<u>Resumo</u>	<u>IX</u>
<u>Abstract</u>	<u>X</u>
<u>1.INTRODUÇÃO</u>	<u>1</u>
<u>2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>5</u>
<u>2.1 Isotermas de Sorção</u>	<u>6</u>
<u>2.2 Fundamentos da Secagem</u>	<u>11</u>
<u>2.3 Pré-Desidratação Osmótica</u>	<u>20</u>
<u>2.4 Propriedades Físicas</u>	<u>23</u>
<u>2.5 Reidratação</u>	<u>26</u>
<u>3.MATERIAIS E MÉTODOS</u>	<u>29</u>
<u>3.1 Matéria-Prima</u>	<u>29</u>
<u>3.2 Isotermas de Sorção</u>	<u>29</u>
<u>3.3 Secador</u>	<u>31</u>
<u>3.4 Secagem em Leito Fixo</u>	<u>35</u>
<u>3.5 Desidratação Osmótica</u>	<u>36</u>
<u>3.6 Propriedades Físicas</u>	<u>37</u>

3.7 Reidratação	37
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Isotermas de Sorção	39
4.2 Cinética de secagem	42
4.3 Propriedades Físicas	56
4.3.1 Encolhimento Volumétrico	56
4.3.2 Densidade Aparente	64
4.4 Reidratação	70
5.CONCLUSÃO	72
6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curva de secagem genérica	12
Figura 3.1 – Secador convectivo	32
Figura 3.2 - Esquema de controle do secador	34
Figura 3.3 – Disposição das amostras no secador	36
Figura 4.1 – Isotermas de abacaxi a várias temperaturas	41
Figura 4.2 – Umidade adimensional versus tempo em função da temperatura do ar para amostras com e sem pré-tratamento osmótico ($V_{ar}=2,5$ m/s)	43
Figura 4.3 – Umidade adimensional versus tempo em função da temperatura fixa no ar ou na fatia para o produto <i>in natura</i> ($V_{ar}=2,5$ m/s)	45
Figura 4.4 – Taxas de secagem versus conteúdo de umidade (b.s) em função da temperatura do ar para amostras com e sem pré - tratamento osmótico. ($V_{ar}=2,5$ m/s)	48
Figura 4.5 – Taxas de secagem versus conteúdo de umidade (b.s) em função da temperatura fixa no ar ou na fatia para o produto <i>in natura</i> . ($V_{ar}=1,5$ m/s)	49
Figura 4.6 – Umidade adimensional versus tempo em função da velocidade do ar para o produto <i>in natura</i> ($T_{ar}=70^{\circ}\text{C}$, $UR_{ar}=7\%$)	50



- Figura 4.7 – Taxas de secagem versus conteúdo de umidade (b.s)
em função da velocidade do ar para o produto *in natura*
($T_{ar}=70^{\circ}\text{C}$, $UR_{ar}=7\%$) 51
- Figura 4.8 – Dependência da difusividade efetiva em função da
temperatura para várias condições de secagem. 55
- Figura 4.9 – Encolhimento volumétrico versus umidade
adimensional em função da temperatura do ar para o
produto *in natura* ($V_{ar}=2,5\text{ m/s}$) 57
- Figura 4.10 – Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional
em função da temperatura do ar para o produto *in*
naturara ($V_{ar}=1,8\text{ m/s}$) 58
- Figura 4.11 – Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional
em função da temperatura do ar para o produto *in natura*
($V_{ar}=1,5\text{ m/s}$) 58
- Figura 4.12 – Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional
em função da velocidade do ar para o produto *in natura*
($T_{ar}=40^{\circ}\text{C}$) 60
- Figura 4.13 – Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional
em função da velocidade do ar para o produto *in natura*
($T_{ar}=70^{\circ}\text{C}$) 60



- Figura 4.14 – Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional em função da temperatura para amostras com e sem pré - tratamento osmótico do ar ($V_{ar}=2,5$ m/s) 62
- Figura 4.15 – Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional em função da temperatura fixa no ar ou na fatia para o produto *in natura* ($V_{ar}=1,5$ m/s) 64
- Figura 4.16 – Densidade aparente versus umidade adimensional em função da temperatura do ar para o produto *in natura* ($V_{ar}=2,5$ m/s) 66
- Figura 4.17 – Densidade aparente versus umidade adimensional em função da temperatura do ar para o produto *in natura* ($V_{ar}=1,5$ m/s) 67
- Figura 4.18 – Densidade aparente versus umidade adimensional em função da temperatura do ar para amostras com e sem pré-tratamento osmótico ($V_{ar}=2,5$ m/s) 68
- Figura 4.19 – Densidade aparente versus umidade adimensional em função da temperatura fixa no ar ou na fatia para o produto *in natura* ($V_{ar}=1,5$ m/s) 69
- Figura 4.20 – Aparência das amostras em três estágios distintos 72



LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Conteúdo de umidade de equilíbrio para o abacaxi	39
Tabela 4.2 - Constantes da equação de GAB	41
Tabela 4.3 - Difusividade Efetiva em função da temperatura e velocidade do ar	53
Tabela 4.4 - Parâmetros correspondentes à Equação de Arrhenius	55
Tabela 4.5 - Índice de Reidratação para amostras secas a 53% (b.s) $V_{ar}=2,5$ m/s)	71



NOMECLATURA

- a - constante da eq. 2.12, adimensional
- a_w - atividade de água
- A, B, C e D - constantes da eq. 4.2, adimensional
- c - constante das equações 2.3 e 2.13, adimensional
- C - constante de Guggenheim ou de BET, adimensional
- C_o - constante da eq. 2.4, adimensional
- D_{eff} - difusividade efetiva, $[L^2 T^{-1}]$
- D_o - constante da eq. 4.1, $[L^2 T^{-1}]$
- E_a - energia de ativação, $[L^2 T^{-2}]$
- h - coeficiente convectivo de transferência de calor, $[M \theta^{-1} T^{-3}]$
- H_m - entalpia específica de sorção da 1ª camada, $[L^2 T^{-2}]$
- H_n - entalpia específica de sorção das multicamadas, $[L^2 T^{-2}]$
- k_o - constante da eq. 2.6
- K_1 - constante da equação de GAB, (eq. 2.2) adimensional
- K_2 - constante da equação 2.3, adimensional
- K_3 - constante da equação 2.4, adimensional
- K_4 - constantes das equações 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, $[T^{-1}]$
- L - espessura da fatia, $[L]$
- M - umidade adimensional $(X - X_{eq}) / (X_o - X_{eq})$, adimensional
- N_a - fluxo mássico, $[M L^{-2} T^{-1}]$
- r - constantes da equação 2.3, adimensional
- R - constante universal dos gases ($R = 0,46188 \text{ kJ/kg.K}$), $[L^2 T^{-2} \theta^{-1}]$
- t - tempo, $[T]$
- T_{bu} - temperatura de bulbo úmido, $[\theta]$
- T - temperatura $[\theta]$
- T_g - temperatura do ar ou do gás, $[\theta]$



- UR_{ar} - umidade relativa do ar
 V - volume da partícula, $[L^3]$
 V_o - volume inicial da partícula, $[L^3]$
 V_{ar} - Velocidade do ar de secagem $[L\ T^{-1}]$
 X - umidade da partícula, adimensional
 X_c - umidade crítica, adimensional
 X_o - umidade inicial da partícula, adimensional
 X_{eq} - umidade de equilíbrio da partícula, adimensional

Letras Gregas

- ΔH_{BET} - calor de sorção total do modelo de BET, $[M\ L\ T^{-2}]$
 ε - porosidade, adimensional
 κ - taxa de secagem fig.2.1 $[M\ T^{-1}]$
 λ - calor de condensação da água eq. 2.6, $[L^2T^{-2}]$
 λ - calor latente de vaporização a T_{bu} eq. 2.7, $[L^2T^{-2}]$
 ρ_{real} - densidade real da partícula, $[M\ L^{-3}]$
 ρ_{ap} - densidade aparente da partícula, $[ML^{-3}]$
 ρ_s - densidade do sólido seco, $[M\ L^{-3}]$
 ρ_w - densidade da água pura, $[M\ L^{-3}]$



RESUMO

Curvas de secagem e encolhimento de fatias de abacaxi foram determinadas em um secador de bandejas equipado com sistema de controle automático. Foram comparados os resultados de ensaios com ar de secagem a temperatura fixa e variável, estes últimos com temperatura fixa no interior do fruto. Também foi investigado o comportamento de fatias submetidas a uma pré-deidratação osmótica antes da secagem por ar quente em relação às fatias secas sem nenhum pré-tratamento. A temperatura do ar variou entre 40 e 70°C e sua velocidade entre 1,5 e 2,5 m/s. A solução analítica da 2ª Lei de Fick para placa plana infinita foi utilizada para representar as curvas de secagem experimentais, permitindo o cálculo das difusividades aparentes, cuja dependência da temperatura pôde ser bem descrita por uma equação do tipo Arrhenius. Também foram obtidas isotermas de dessorção para o produto, na faixa de 40 a 70°C e o modelo GAB ajustou-se adequadamente aos resultados experimentais. Como indicativo da qualidade do produto, foram determinadas as curvas de encolhimento volumétrico e densidade aparente em função da umidade, além do índice de reidratação do material seco. O emprego de temperatura fixa no fruto mostrou-se conveniente, com o aumento da difusividade aparente e redução do grau de encolhimento. O pré-tratamento osmótico também levou a um menor encolhimento mas resultou em menores difusividades.



ABSTRACT

Experimental air drying and shrinkage curves of pineapple slices were obtained in a tray dryer equipped with an automatic control system. Fixed air-drying temperature runs were compared with experiments carried under variable air temperature (fixed temperature inside the slices). Also the air-drying behavior of fresh and osmotically pre-treated pineapple was investigated and compared. The air velocity varied from 1.5 to 2.5 m/s and the air temperature from 40 to 70°C. The analytical solution of the second Fick's law for an infinite slab was used to calculate effective diffusion coefficients and their temperature dependence could be well represented by an Arrhenius-type equation. Dessorption isotherms were determined in the range of 40 to 70°C and the GAB model showed to be able of fitting the experimental results. As an indicative of product quality, shrinkage and apparent density versus moisture content curves were determined, as well as the dried product rehydration index. Fixing temperature inside the slices showed to be a convenient alternative to conventional constant air temperature runs, since it resulted in higher apparent diffusivities and lower shrinkage. The osmotic pre-treatment also led to lower shrinkage but resulted in lower apparent diffusivities.



A desidratação de produtos alimentícios é um processo largamente empregado com distintos propósitos: aumento da vida-de-prateleira, redução de custos de embalagem, transporte e armazenamento, modificação de atributos sensoriais e encapsulação de aromas.

Em decorrência de sua antigüidade - sua utilização é quase tão remota quanto a agricultura, quando era realizada pela simples exposição do produto ao sol - e de seu importante papel na indústria de alimentos, a secagem é uma das operações unitárias mais estudadas. Entretanto, ainda apresenta-se como uma operação complexa e pouco compreendida, principalmente no que se refere à seleção e controle das condições do processo visando a manutenção da qualidade final do produto.

É fato conhecido que a textura, a densidade, a facilidade de reidratação, a aglomeração e as propriedades mecânicas de alimentos desidratados dependem de fatores como as propriedades e características da matéria-prima, temperatura e umidade do ar de secagem, configuração do secador e distribuição do tempo de residência do produto no interior do mesmo.



No caso de frutas e hortaliças, o consumidor vem aumentando suas exigências no sentido de produtos que mantenham características o mais próximo possível do material fresco e que tragam facilidades no manuseio e preparo. Em termos industriais, isso significa o desenvolvimento de operações que minimizem os efeitos adversos do processamento. Na desidratação, em particular, implica na minimização da perda de aromas, de alterações de cor e textura, e da perda de nutrientes. Além disso, as atividades enzimática e microbiana residuais são parâmetros críticos a serem considerados.

De uma forma geral, produtos biológicos encolhem durante a secagem, e este encolhimento pode ser interessante porque reduz custos de embalagem do produto final, armazenamento e transporte. Por outro lado, alguns dos principais fatores relacionados à perda de qualidade de alimentos desidratados estão relacionados às alterações estruturais causadas pelo encolhimento durante a secagem. Dessa forma, um estudo do fenômeno do encolhimento e de outras propriedades físicas, como a densidade aparente e a porosidade, é de grande importância para a modelagem matemática e para a avaliação da influência do processo de secagem sobre a qualidade do produto. As propriedades de reidratação, dependendo do alimento, também têm grande importância para a sua boa aceitação.

O abacaxi é uma fruta muito apreciada, não só pelo seu aroma agradável e sabor refrescante (ligeiramente ácido), mas também



por suas qualidades nutricionais, pois considera-se que a fruta apresenta uma boa fonte de vitamina A (70.0 UI / 100 g), vitamina B1 (0.03 mg / 100 g), vitamina C (17 mg / 100g) entre outras, proteínas, sais minerais e carboidratos. Também é um adjuvante da digestão pela ação de sua enzima natural, a bromelina (Medina et al., 1978).

No Brasil, existem centenas de variedades de abacaxi, no entanto, são considerados comercialmente como os mais importantes os seguintes:

- Pérola
- Amarelo comum ou Boituva
- Smooth Cayenne (Havaiano)

O mais consumido no mercado interno como fruta fresca é o Pérola, graças às suas características de polpa suculenta e adocicada que atendem às preferências do brasileiro. No caso de industrialização e/ou exportação deve-se priorizar o Smooth-Cayenne que atende bem às exigências da indústria, tais como, consistência firme, coloração amarela intensa, maior acidez e formato cilíndrico, que lhe confere maior facilidade de embalagem (Savitci et al., 1996).

A produção nacional de abacaxi está concentrada principalmente no estados da Paraíba e Minas Gerais, sendo que Minas atingiu 36% da produção do país e Paraíba 24% no ano de 1994 (Savitci et al., 1996).



Considerando estes dados de produção interna, no qual Minas Gerais dispara no ranking nacional e a proximidade deste mercado junto ao local de pesquisa, e considerando também o alto teor de água da fruta fresca (em torno de 85%) que a torna altamente perecível, o objetivo do trabalho foi estudar a influência das condições de secagem sobre a qualidade de fatias de abacaxi desidratado, selecionando as condições de secagem mais adequadas à obtenção de um produto aceitável para consumo. Além disso, determinou-se a cinética de desidratação do produto em função das condições do ar de secagem.

Uma justificativa adicional é a importância econômica e social da hortifruticultura no estado de São Paulo e a necessidade de aperfeiçoamento dos processos de desidratação de frutas e hortaliças como forma de reduzir desperdícios e obter produtos de maior valor agregado.



REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As frutas e hortaliças desempenham um importante papel na dieta humana, uma vez que são fontes indispensáveis de nutrientes essenciais como vitaminas, minerais e fibras, além de serem responsáveis pela introdução de cor, sabor, aroma e variedade ao rol de alimentos disponíveis. Entretanto, devido ao seu alto teor de água (acima de 80%) são altamente perecíveis. Estima-se que em muitos países tropicais e subtropicais ocorram perdas da ordem de 40 - 50%, devido à inadequação da infra-estrutura de armazenamento à baixa temperatura.

Um dos principais objetivos da tecnologia de alimentos é a conversão de itens perecíveis em produtos estáveis, os quais poderiam ser armazenados por períodos prolongados, reduzindo perdas e tornando-os disponíveis na entressafra e/ou em lugares distantes dos pontos de produção. Diversas tecnologias têm sido aplicadas com esse fim, mas a desidratação é especialmente adequada aos países em desenvolvimento, em razão de deficiências na capacidade e distribuição das instalações de processamento térmico ou de baixa temperatura.

O interesse pela desidratação tem aumentado também em países desenvolvidos, onde as indústrias são motivadas pelo desenvolvimento de novos métodos de secagem de frutas e hortaliças que resultem em produtos com características especiais, de reconstituição instantânea,



muito valorizados em alimentos de preparo rápido. Nesses países e, mesmo nas grandes cidades e regiões mais desenvolvidas do terceiro mundo, a mudança no estilo de vida da população causou o aumento da demanda por uma grande variedade de frutas e hortaliças desidratadas que ofereçam conveniência, alta qualidade nutricional e características semelhantes às do produto fresco (o que se traduz na facilidade e rapidez de reidratação), implicando na necessidade de pesquisa básica sobre a influência das condições de secagem (temperatura, velocidade e umidade do ar) e da configuração do equipamento na qualidade do alimento (Jayraman & Das Gupta, 1992).

2.1. Isotermas de Sorção

* A isoterma é uma relação de equilíbrio que vincula o conteúdo de água de um produto alimentício com a temperatura e umidade relativa do ar circundante, sendo de fundamental importância no estudo da conservação de alimentos desidratados (Van Den Berg & Bruin, 1981). Além disso, possui inúmeras aplicações no estudo de alimentos *in natura*, no seu processamento e em produtos acabados. Incluem-se aí, entre outros, o projeto de secadores, a predição das condições finais de misturas de diversos ingredientes em alimentos formulados, o projeto de embalagens e simulação de alterações de umidade que ocorrem durante o armazenamento, além da predição da estabilidade e vida-de-prateleira dos produtos.



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

✱ As curvas de umidade de equilíbrio do sólido versus umidade relativa do ar, em temperaturas constantes, são as denominadas isotermas de sorção. As isotermas são classificadas como sendo de adsorção, caso a determinação da umidade do produto tenha sido feita ao longo de um processo de umidecimento, ou de dessorção, como no processo de secagem. Frequentemente há diferenças entre isotermas de adsorção e de dessorção do mesmo produto e em condições idênticas de determinação, fenômeno conhecido como histerese.

✱ A isoterma pode ser dividida em três regiões, dependendo do estado em que se encontra a água no alimento. A primeira região, que cobre a faixa de a_w de 0 até cerca de 0,35, representa a adsorção de um filme monomolecular de água. A segunda região, entre 0,35 - 0,60 representa a adsorção de camadas adicionais de água sobre a monocamada. Finalmente, acima de 0,60 de a_w , encontra-



se a região onde a água se condensa nos poros do material e solubiliza compostos solúveis presentes.

* Diversos modelos para descrever o comportamento das isotermas de sorção de umidade têm sido publicados, fornecendo equações cujas constantes podem ser determinadas para cada tipo de alimento estudado (Boki & Ohno, 1991).

* Um determinado modelo de isoterma pode ser considerado mais adequado do que outro, principalmente quando descreve com maior precisão o fenômeno de adsorção ou dessorção para uma ampla faixa de atividade de água. Uma outra característica importante é a possibilidade destes modelos fornecerem informações importantes acerca do fenômeno de sorção, tais como a água adsorvida na monocamada ou o calor de sorção para a primeira e para as camadas subsequentes (Iglesias & Chirife, 1983).

* Várias teorias e equações empíricas têm sido sugeridas para descrever a relação entre atividade de água e conteúdo de umidade. Algumas das equações mais utilizadas para descrever o comportamento das curvas de sorção estão relacionadas a seguir.

Equação de BET (Brunauer, Emmett e Teller): é a mais utilizada e fornece um bom ajuste para uma variedade de alimentos sobre a região de atividade de água entre 0,05 e 0,45, sendo expressa da seguinte forma (Rizvi, 1986):



$$X = \frac{X_m C a_w}{(1 - a_w)(1 + (C - 1)a_w)} \quad (2.1)$$

onde X é o teor de umidade (base seca), a_w a atividade de água, X_m o teor de umidade da monocamada (base seca) e C a constante de BET relacionada ao calor de sorção, sendo,

$$C = K_1 \exp\left(\frac{\Delta H_{BET}}{RT}\right) \quad (2.2)$$

onde K_1 é uma constante, ΔH_{BET} o calor de sorção total do modelo, R a constante universal dos gases e T a temperatura (K).

O conceito do teor de umidade da monocamada (X_m) tem sido bastante estudado em alimentos, devido à sua relação com a estabilidade química e física de alimentos desidratados.

Equação de Halsey Modificada: foi desenvolvida supondo-se que a condensação ocorre em multicamadas, assumindo que o potencial de energia da molécula varia inversamente com a distância radial (r) da superfície. Sua forma linearizada é dada por (Rizvi, 1986):

$$X = \left(\frac{K_2}{\ln c/a_w} \right)^{1/r} \quad (2.3)$$

onde K_2 , c e r são constantes do modelo modificado de Halsey.

Equação de GAB (Guggenheim-Anderson-deBoer): é um modelo de três parâmetros, fisicamente significativos, que tem sido sugerido como o modelo matemático mais versátil para a sorção de alimentos. É expressa da seguinte forma (Rizvi, 1986):

$$X = \frac{(C-1)K_3 a_w X_m}{1 + (C-1)K_3 a_w} + \frac{K_3 a_w X_m}{1 - K_3 a_w} \quad (2.4)$$

onde X_m é o conteúdo de água na camada monomolecular (base seca) e C a constante de Guggenheim, dada por:

$$C = c_0 \exp\left(\frac{(H_m - H_n)}{RT}\right) \quad (2.5)$$

onde H_m é a entalpia específica de sorção da primeira camada, H_n entalpia específica de sorção das multicamadas, R a constante universal dos gases, T a temperatura (K) e c_0 uma constante.

A constante K_3 da equação (2.4) pode ser escrita da seguinte forma:

$$K_3 = k_0 \exp\left(\frac{(\lambda - H_n)}{RT}\right) \quad (2.6)$$

Na equação (2.6), k_0 é a constante da equação, λ o calor de condensação da água pura e H_n a entalpia específica de sorção das multicamadas.

As vantagens encontradas para esta equação são a possibilidade de conhecimentos teóricos, a descrição da sorção abrangendo uma faixa de atividade de água entre 0 e 0,9, a forma matemática simples, com parâmetros que possuem significado físico e a



capacidade de descrever alguns efeitos da temperatura (Van Den Berg, 1984).

2.2. Fundamentos da Secagem

A técnica mais utilizada na produção de frutas e hortaliças desidratadas é a secagem por ar quente - onde uma batelada do material a ser seco, usualmente na forma de pequenos pedaços ou fatias, é submetida a uma corrente de ar quente paralela ou perpendicular ao leito de sólidos (Nijhuis et al., 1996).

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

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



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

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

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

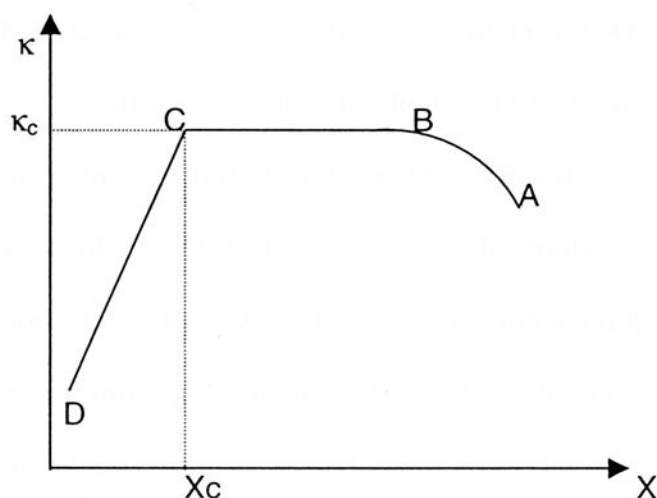


Figura 2.1. Curva de secagem genérica, onde X é a umidade em base seca (kg água/kg matéria seca), κ é a taxa de evaporação de umidade (kg água/kg matéria seca.h), X_c é a umidade crítica e κ_c a taxa crítica correspondente.

No período de secagem a taxa constante, a água evapora de acordo com o fornecimento de calor para o sólido úmido e, portanto, a transferência de calor gás-sólido controla o processo. Como todo calor transferido é convertido em calor latente, pode-se representar a taxa de secagem da seguinte forma (Crank, 1975):

$$Na = \frac{h(T_g - T_{bu})}{\lambda} \quad (2.7)$$

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

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

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

sensoriais e nutricionais do produto podem ser prejudicados devido à elevação da temperatura (Nijhuis et al., 1996).

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

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

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

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

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_{eff} \nabla X) \quad (2.8)$$



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

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

Considerando-se que o sólido seja uma placa plana com ambas as superfícies expostas ao ar de secagem, de difusividade constante, variação do volume desprezível e que o efeito do gradiente de temperatura no interior da amostra também seja desprezível, tem-se a seguinte solução analítica (Hawlder et al., 1991):

$$M = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{L^2}\right] \quad (2.9)$$

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

A maioria dos cereais (arroz, trigo, feijão, soja, etc.) apresentam uma pequena mudança de volume durante a secagem. Desta maneira, a solução analítica pode ser aplicada satisfatoriamente no estudo destes materiais. Para alimentos de alto conteúdo de umidade como a maioria das frutas (uva, caqui, abacaxi, maçã, etc.) a variação de

volume é grande e, por esta razão, as soluções analíticas não podem ser aplicadas de forma exata e devem ser consideradas como aproximações da solução real.

Alguns modelos semi-teóricos são baseados na teoria da difusão, assumindo que a resistência ocorre numa fina camada na superfície das partículas, como o modelo de Lewis, análogo à lei de resfriamento de Newton, que na sua forma integrada é comumente chamada de modelo exponencial. Este modelo estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre dada pela eq. (2.10) (Parry, 1985):

$$\frac{dX}{dt} = -K_4(X - X_{eq}) \quad (2.10)$$

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

A equação acima é normalmente utilizada na forma integrada como:

$$M = \exp(-K_4 t) \quad (2.11)$$

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

Nos modelos empíricos há duas importantes modificações do modelo exponencial na forma integrada com dois e três parâmetros que apresentam bons ajustes experimentais, sendo dadas pelas equações:

$$M = a.\exp(-K_4 t) \quad (2.12)$$

$$M = c.\exp(-K_4 t^n) \quad (2.13)$$

A equação (2.12) é similar à solução do modelo de Fick (eq. 2.9) para tempos de secagem longos, quando apenas o primeiro termo da solução em série for significativo, ou seja, $n=1$ (McCormick, 1983). Esta correlação é utilizada por muitos pesquisadores da área de secagem para determinação da difusividade efetiva a partir da constante de secagem, como observado nos trabalhos de Aguerre et al. (1982) para arroz, Tobinaga & Pinto (1992) para filés de peixes, Vaccarezza et al. (1974) para beterraba, Carbonell et al. (1986) para pimenta, Saravacos & Raouzeous (1986) para amido, Yshgeny & Poulsen (1988) para batata e Mazza & Lemaguer (1980) para cebola. A relação entre estes parâmetros é :

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

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

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

A equação (2.13) é conhecida como modelo de Page, sendo freqüentemente utilizada nos estudos da secagem de produtos agrícolas, em particular para grãos e sementes, por apresentar excelentes resultados (Parti & Dugmanics, 1990; Pathak et al., 1991). Misra & Booker (1980) compilaram dados de secagem de milho em

camada fina, de nove fontes diferentes, e os ajustaram através da Equação de Page, observando que n reflete a resistência interna à secagem, enquanto K representa os efeitos das condições externas.

Diferentes tipos de equações empíricas podem ser encontradas nas revisões feitas por Daudin (1983) e Parry (1985).

De acordo com Holdsworth (1971), os principais fatores que afetam a taxa de secagem são as propriedades físicas do produto, o arranjo geométrico do produto em relação à superfície de transferência de calor, as propriedades físicas do ambiente de secagem e a característica do equipamento de secagem.

Segundo Van Arsdel et al. (1973), dos fatores citados, o que mais influencia a taxa de secagem é a natureza da matéria prima, compreendendo constituição química e física das paredes das células. A conclusão de Vaccarezza et al. (1974), ao estudarem a secagem de beterraba, foi que a taxa de secagem é afetada principalmente pela temperatura de secagem e tamanho da partícula, e em menor grau pela velocidade do ar.

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

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



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

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

O estudo do encolhimento é de grande importância para um melhor entendimento do processo de secagem. Suarez & Viollaz (1991), analisando a secagem de batata, compararam o uso da segunda lei de Fick com difusividade constante e sem encolhimento e da lei de Fick de difusão com encolhimento, encontrando resultados diferentes. Alguns pesquisadores têm admitido que o decréscimo do volume durante a secagem seja equivalente ao volume removido de umidade (Lozano et al., 1983). Só um pequeno número de problemas de fronteira móvel admitem solução analítica, então geralmente são necessárias técnicas numéricas para a sua solução.

2.3 Pré-desidratação Osmótica

O processo de desidratação osmótica consiste na imersão de alimentos sólidos, inteiros ou em pedaços, em uma solução aquosa concentrada de sal, açúcar ou outros solutos, com alta pressão osmótica. Quando a solução extracelular apresenta uma pressão



osmótica maior que a intracelular, ocorre a remoção de água da célula com o objetivo de igualar estas pressões. Se a membrana celular do alimento fosse perfeitamente semi-permeável ou seletiva, essa seria uma barreira para a difusão do soluto até o interior das células. Porém, nos sistemas alimentícios, uma membrana perfeitamente seletiva é de ocorrência improvável devido à complexa estrutura interna do alimento, o que faz com que pelo menos parte do soluto percole até o interior das células.

A desidratação osmótica, aplicada de forma isolada, geralmente não resulta em um produto de umidade suficientemente baixa para que possa ser considerado estável em relação à vida de prateleira. Sendo assim, é interessante utilizar um processamento subsequente (em geral pelos métodos de secagem a ar quente, secagem a frio ou a vácuo) de forma a obter um produto com durabilidade aceitável.

A maioria das pesquisas recentes em relação a este tipo de pré tratamento aborda o aspecto de retenção da qualidade, já que uma de suas principais vantagens é a capacidade de minimizar os efeitos adversos dos processamentos subsequentes, principalmente no caso da secagem a ar quente.

O uso da pré-desidratação osmótica permite que o teor de umidade do produto obtido após a secagem convectiva, seja de 20 a 30% maior do que o resultante apenas da secagem a ar, o que leva a produtos de textura mais flexível e macia. Isso é possível devido aos



solutos incorporados durante o tratamento osmótico, os quais contribuem para o abaixamento da atividade de água, mesmo em umidades mais elevadas (Lenart, 1996).

Karathanos & Kostaropoulos (1995), na desidratação osmótica de maçãs com concentrações da solução de sacarose que variavam de 15 a 45%, obtiveram como resposta um produto mais desidratado à medida que a concentração da solução aumentou, para um mesmo tempo de imersão. Tais resultados também foram encontrados por Marcotte & Lemaguer (1991) e Yand & Lemaguer (1992), os quais apresentaram a seguinte explicação: quanto maior a pressão osmótica da solução (mais concentrada), maior será o gradiente de transferência de massa da fruta para a solução; tal gradiente de concentração é denominado de força motriz ou potencial de secagem.

Viberg et al. (1998) verificaram que na desidratação osmótica de morangos a perda de água sempre aumenta com o aumento da concentração de sacarose até 100%, ou seja, sacarose sólida; já o ganho de sólidos aumenta até a uma concentração de aproximadamente 80%, caindo com o uso de sacarose sólida.

Rahman & Lamb (1991) observaram que na secagem a ar de abacaxi pré-desidratado em solução osmótica com concentração entre 40-60% (m/v) e tempo de contato de 5h, as taxas de secagem durante a secagem convectiva eram sempre mais baixas quando comparadas com a fruta *in natura* e a difusividade efetiva também decaía

devido à presença do soluto infuso nas amostras. Esses mesmos pesquisadores (Rahman & Lamb, 1990), ao analisarem a difusão do açúcar pelo modelo de Magee na desidratação osmótica de abacaxi em uma solução cuja concentração variava de 60 a 70% (m/v), observaram que perda de água das amostras foi proporcional às concentrações e às temperaturas (20 a 65°C) das soluções. Já o ganho de sólidos aumentou até a temperatura de 50°C, acima da qual ocorreu um rápido declínio dos sólidos infusos nas amostras.

Nsonzi & Ramaswamy (1998), ao avaliarem a qualidade de "blueberries" pré-desidratadas e posteriormente secas em secador convectivo convencional, verificaram que a melhor condição de tratamento osmótico para a obtenção de um produto de ótima textura e coloração, era o uso de uma solução de 55°Brix a 50°C com tempo de contato de 4,5 horas.

Nieto et al. (1998), na secagem a ar de maçãs submetidas à pré-desidratação com glicose (22%, 31.9% e 39.5% em peso), também observaram que a difusividade efetiva apresentava um decréscimo com o aumento da concentração.

Na obtenção de abacaxi em pó, Uddin et al. (1990) obtiveram como resposta da desidratação osmótica que a redução do peso foi na ordem de 30% para espessura da fatia de 20 mm, e 40% para a espessura de 5 mm em 24h de contato com uma solução de 60°Brix.



Amostras de bananas com 15°Brix, pré-desidratadas em soluções de açúcar com 35, 50 e 65°Brix por 36h, foram estudadas por Sankat et al (1996). Após o pré-tratamento, as amostras atingiram uma concentração de sólidos solúveis de 26, 34 e 39°Brix, respectivamente, e em seguida foram conduzidas à secagem a ar. Os autores concluíram que as taxas de secagem diminuíram com o ganho de sólidos, porém a figura que ilustra a taxa de secagem realizada a 40°C mostra o contrário. Mais uma vez, também verificaram que a difusividade efetiva diminuía com o aumento do ganho de sólidos.

2.4 Propriedades Físicas

A simulação e modelagem matemática são freqüentemente utilizadas para otimizar os parâmetros de operação e de condições de secagem. Estes modelos matemáticos requerem valores de propriedades físicas, tais como densidade, porosidade e encolhimento volumétrico. Entretanto, estes dados são escassos na literatura e os pesquisadores são obrigados a usar suposições que levam a falhas ou imprecisão em seus estudos de simulação.

Na maioria dos modelos matemáticos para secagem de grãos, o efeito das mudanças na densidade, porosidade e encolhimento não são considerados. Esta suposição é feita por conveniência matemática, mas não é necessariamente válida para toda faixa de umidade. Por outro lado, na secagem de frutas e vegetais o encolhimento



deve ser considerado, pois ocorre uma mudança perceptível no volume durante o processamento.

Kilpatrick et al. (1955) propuseram uma relação linear do encolhimento volumétrico para uma ampla faixa de umidades, enquanto Lozzano et al., (1983) acrescentou um fator de correção para baixos níveis de umidade. Durante a secagem de alho, Madamba et al (1994) concluíram que a relação linear do encolhimento volumétrico com o conteúdo de umidade ocorre até o produto atingir 20% de umidade em base seca. Ratti (1994) estudou o encolhimento volumétrico de batatas, maçãs e cenouras com diferentes geometrias, descrevendo um modelo representado por uma ou duas retas, sendo que a intersecção entre as mesmas correspondia a uma umidade crítica.

Lozzano et al. (1983) desenvolveram um modelo empírico para a densidade aparente de frutas e vegetais em função do conteúdo de umidade. Rahman & Potluri (1990) relataram que, durante a secagem de carne de lula, obteve-se uma boa correlação com o modelo desenvolvido por Lozzano et al. (1983), enquanto Nelson (1980) e Marousis & Saravacos (1990) encontraram um modelo polinomial para ajustar os dados da densidade aparente de grãos de milho e trigo. Embora Madamba et al. (1994) tenham testado o modelo empírico proposto por Lozzano et al. (1983), os dados obtidos durante a secagem de alho se ajustaram melhor ao modelo polinomial. Uma relação linear da densidade aparente com o conteúdo de umidade foi ainda obtida para



peixe (Balaban & Pigott, 1986), ervilha (Shepherd & Bhardwaj, 1986), grão de bico (Dutta et al., 1987).

Uma equação proposta por Vagenas et al. (1990) relaciona a densidade real com o conteúdo de umidade (eq. 2.14), assumindo que a massa de sólido seco e de água são aditivos.

$$\rho_{real} = \frac{1 + X}{(1 / \rho_s) + (X / \rho_w)} \quad (2.14)$$

onde, X é a umidade (base seca), ρ_{real} é a densidade real do sólido úmido, ρ_s é a densidade real do sólido seco e ρ_w é a densidade da água pura.

A porosidade (ε) é definida como uma relação entre a densidade aparente e a densidade real, de acordo com a eq. (2.15), onde ρ_{ap} é a densidade aparente do sólido, incluindo o volume dos poros e ρ_t é dada pela eq. (2.14).

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}} \right) \quad (2.15)$$

O desenvolvimento da porosidade se deve ao encolhimento do material e é dependente da quantidade de água inicial, da composição e do tamanho do sólido e das condições operacionais (temperatura, velocidade e umidade relativa do ar) (Madamba et al., 1994). Lozzano et al. (1983) estabeleceram uma equação generalizada para a porosidade de qualquer gênero alimentício, válido para qualquer conteúdo de umidade.

2.5 Reidratação

A reidratação de um produto seco caracteriza a textura e qualidade do produto final (Gabas et al., 1999). Pode ser expressa de várias maneiras e, freqüentemente, um mesmo índice recebe nomes diferentes, de acordo com os autores (Lewicki, 1998). O índice mais comum para expressar a reidratação dos tecidos vegetais é a razão:

$$\frac{\text{Peso da amostra após a reidratação}}{\text{Peso antes da reidratação}}$$

Este índice é chamado de taxa de reidratação (Kalra et al., 1986), capacidade de reidratação (Levi et al., 1988) ou coeficiente de hidratação (Ogwal & Davis, 1994) .

Devido ao encolhimento e ao endurecimento (formação de crosta), a reidratação de produtos secos por ar quente é menos eficiente (Nijhuis et al., 1996). Pesquisadores tentam controlar este efeito adverso alterando as condições de processamento ou associando pré-tratamentos como branqueamento ou imersão do produto em soluções osmóticas antes da secagem.

Alves-Filho & Strommen (1996), ao estudarem a aplicação de bomba de calor na secagem de materiais biológicos, reidrataram maçãs, morangos e peixes comparando o tempo de imersão do produto seco, temperatura da água de reidratação (10 e 99°C), temperatura do ar de secagem (-5 a 40°C para peixes e -25 a 35°C para as frutas), forma e tamanho das amostras. Obtiveram maior porcentagem de reidratação para maiores tempos de imersão e temperaturas de secagem mais

baixas. Observaram ainda, que a taxa de reidratação dos peixes secos a -5°C aumentou quando a amostra foi reidratada em água a 10°C e, para os peixes secos a temperatura maior (30°C), a taxa se inverteu, tendo como resposta, a maior taxa de reidratação quando a reidratação se deu a 99°C .

Gabas et al. (1999) obtiveram resultados para a reidratação de uvas analisando a taxa de reidratação em função das condições do pré tratamento para remoção da película cerosa e da temperatura do ar de secagem (40 a 80°C), observando que a taxa de reidratação foi proporcional às temperaturas de secagem, com exceção dos testes realizados com pré-tratamento de maior concentração, no qual as uvas secas a 60°C tiveram a melhor capacidade de reidratação.

Tabeidie et al. (1992) verificaram que, no processo de expansão ("puffing") a 25°C de pedaços de batata com CO_2 , o conteúdo de umidade das amostras secas tem efeito significativo na taxa de reidratação do produto, sendo que a taxa de reidratação é proporcional à umidade final. Também constataram que o branqueamento e pré tratamento químico do produto aumenta a taxa de reidratação. Considerando o mesmo processo ("puffing", nas temperaturas de 19 a 35°C) para pimentões verdes, Saputra et al. (1991) tiveram como variáveis na reidratação das amostras, o tamanho da partícula, temperatura da água de reidratação, o conteúdo de umidade final do produto, a pressão do CO_2 ($5,58$ a $8,28$ MPa) e o tempo de residência



das amostras no secador. Concluíram que a reidratação ótima se deu com as partículas de menor tamanho, umidade final do produto de 65 e 100% (base seca), a pressão de CO₂ de 6,48 MPa e o maior tempo de residência no desidratador.

Especificamente em relação à desidratação de abacaxi, o número de trabalhos publicados é muito pequeno e, mesmo assim referem-se a outras modalidades de secagem, como a desidratação osmótica (Beristain et al., 1990), osmo-convectiva (Rahman & Lamb, 1991) e para obtenção de abacaxi em pó (Uddin et al., 1990). Tendo em vista a pouca disponibilidade de informações sobre o assunto em questão, acredita-se poder contribuir para a obtenção de parâmetros experimentais relevantes ao desenvolvimento de um processo de secagem de abacaxi em fatias.



MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Matéria-prima

O abacaxi (*Ananas comosus* L.) da variedade Smooth Cayenne foi obtido no mercado local, poucas horas antes do processamento. As frutas foram descascadas e cortadas em fatias de cerca de 10 mm de espessura, sendo o miolo central descartado. Foram aproveitadas apenas as fatias pertencentes à região de diâmetro uniforme da fruta. Determinou-se o grau de maturação por leitura de °Brix em refratômetro. A determinação da umidade inicial das amostras foi realizada pelo método gravimétrico em uma estufa a vácuo a 60°C por 48h. As frutas utilizadas apresentaram teor de sólidos solúveis entre 12 e 16°Brix, e umidade entre 83 e 87% (b.u.).

3.2. Isotermas de Sorção

As isotermas de sorção foram determinadas empregando o método estático gravimétrico (Spiess e Wolf, 1983), seguindo um procedimento de dessorção, na faixa de temperaturas de 40 a 70°C.

As amostras foram preparadas a partir da fruta fresca descascada e cortada em pequenos pedaços, sendo aproveitadas apenas as partes pertencentes à região de diâmetro uniforme da fruta. A



parte central de cada fatia também foi retirada. Antes de serem manipulados, os abacaxis eram deixados em contato com uma solução diluída de água sanitária para evitar contaminação.

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

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



3.3. Secador

O equipamento para os ensaios de secagem foi construído no próprio Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas/ UNESP de São José do Rio Preto - SP. Os materiais utilizados na construção são basicamente madeira, fibra de cimento amianto e aço galvanizado.

O secador, mostrado na Figura 3.1, é do tipo bandejas e consiste de três seções básicas: seção de controle da velocidade do ar, seção de aquecimento e compartimento de secagem. Além disso, é equipado com um moderno sistema de controle e aquisição de dados que faz o monitoramento das variáveis de processo, como vazão, temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Esse equipamento emprega tecnologia FIELDBUS, um sistema de comunicação digital bidirecional para interligar equipamentos "inteligentes" de campo com o sistema de controle. O software de operação, supervisão e gerenciamento do processo é o AIMAX®-WIN.

O ar é forçado através do secador por meio de um ventilador centrífugo e o controle da vazão é feito por um conversor de frequência que controla a rotação do ventilador. Um conjunto de resistências elétricas é utilizado para o aquecimento do ar de secagem, sendo controladas por um variador de tensão que permite um ajuste fino da temperatura. O compartimento de secagem consiste de uma bandeja,



disposta perpendicularmente à seção de escoamento do ar. Existe uma placa de orifício que pode ser empregada para medidas de vazão do ar e, antes do compartimento de secagem há uma “colmeia” para melhor distribuição do ar através da bandeja

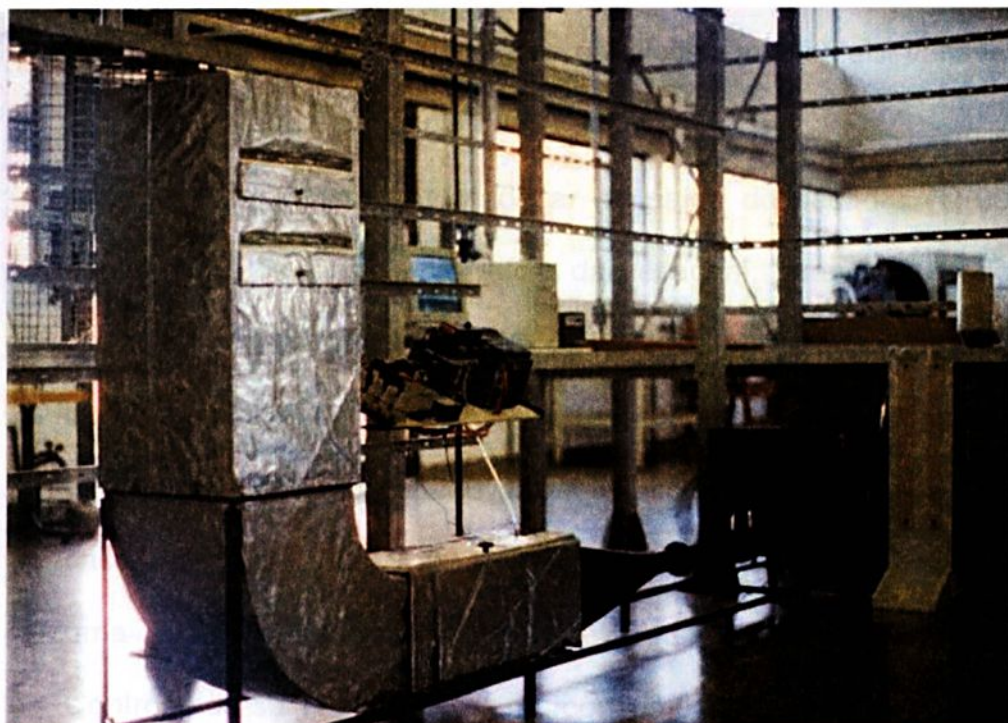
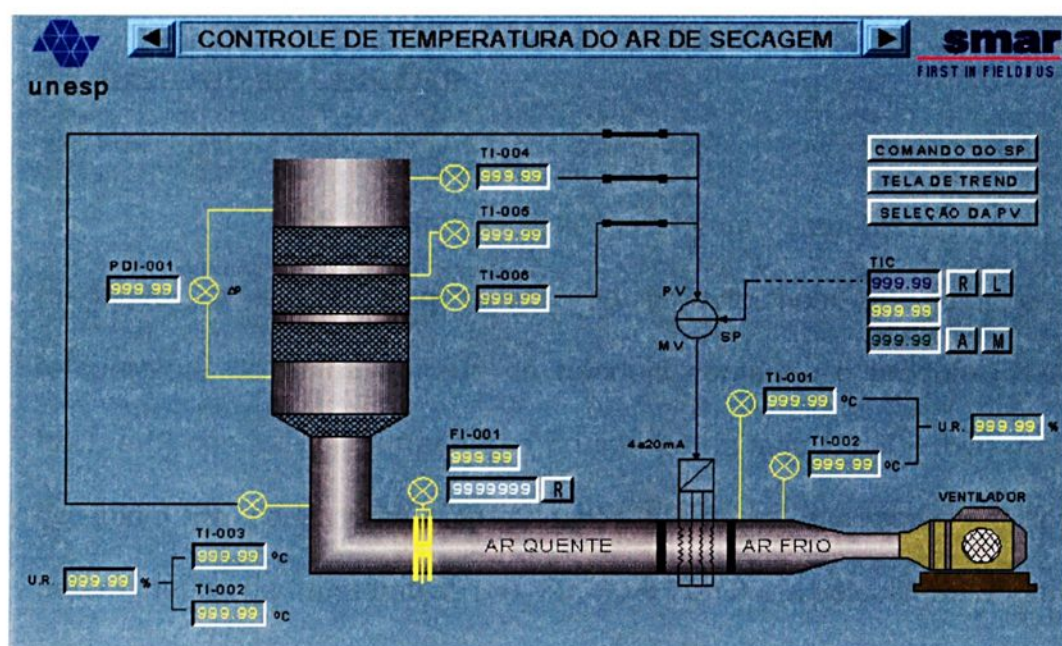


Figura 3.1. Secador convectivo.

As temperaturas são medidas por meio de termopares instalados ao longo do secador. Temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido são tomadas após a seção de aquecimento e após o compartimento de secagem e temperaturas de bulbo seco são determinadas no centro da bandeja de secagem e próximo da localização das amostras (logo abaixo, como mostra a Figura 3.3) e no ar ambiente.

A figura 3.2 apresenta a tela correspondente ao esquema de controle do secador. A secagem pode ser controlada selecionando-se a variável de processo. As formas possíveis de controle são as seguintes:

- mantendo-se a temperatura do ar de secagem (TI-003) constante durante o processo, mesmo sob condições ambientais variáveis. Este é o método mais usual de secagem.
- mantendo-se a temperatura do ar de saída do secador (TI-004) constante. Desta forma no início da secagem, quando o produto tem uma grande quantidade de umidade, a temperatura de saída do ar é bem menor que a do ar de secagem e mais próxima da temperatura de bulbo úmido do ar. Conforme a secagem avança, caso a temperatura TI-003 seja constante, o ar de saída tende a uma temperatura mais alta, que pode danificar o produto. Controlando-se TI-004 haverá um consumo de energia menor e um produto de melhor qualidade, com uma velocidade de secagem maior.
- mantendo-se a temperatura do interior do fruto (TI-006) em um valor fixo. Neste caso, a temperatura do ar será variável, seguindo a mesma tendência descrita no parágrafo acima.



- TI-001** - temperatura de bulbo seco do ar ambiente
TI-002 - temperatura de bulbo úmido do ar ambiente
TI-003 - temperatura de bulbo seco do ar de secagem
TI-004 - temperatura de bulbo seco do ar de saída do secador
TI-005 - temperatura de bulbo seco do ar próximo ao produto
TI-006 - temperatura no interior do produto
FI-001 - pressão diferencial para leitura da vazão de ar
PDI-001 - perda de carga no leito
MV - saída de 4 a 20 mA para controle do conversor elétrico estático
UR - umidade relativa do ar
TIC - variável do processo escolhida para controle do processo
COMANDO DO SP - abre tela para definição do set point
TELA DE TREND - abre a tela do histórico do processo
SELEÇÃO DA PV - abre tela para selecionar a variável de processo

Figura 3.2. Esquema de controle do secador

3.4. Secagem em Leito Fixo

Dois controles distintos foram empregados com o propósito de avaliar a qualidade do produto final: a) controle da temperatura do ar na entrada da bandeja contendo o produto (TI-003 fixa), e b) controle da temperatura no interior da fatia (TI-006 fixa). Antes do início de cada ensaio, o secador foi posto nas condições pré-determinadas de temperatura (40, 50, 60 e 70°C) e a velocidade do ar de secagem (2.5, 1.8 e 1.5 m/s) foi ajustada através de um anemômetro medindo-se diversas vezes a velocidade próximo à bandeja onde seriam alocadas as amostras. Verificou-se, por meio de testes iniciais, que esse procedimento de ajuste das velocidades levava a um erro médio de $\pm 0,03$ m/s. As amostras, duas fatias a cada ensaio, foram então postas no secador de forma paralela ao escoamento do ar, como mostra a Figura 3.3. Durante o ensaio realizou-se a pesagem periódica das fatias e a medida, com o auxílio de um paquímetro, da espessura e do diâmetro externo. O diâmetro interno permaneceu fixo ("colado") ao suporte de alumínio que sustentava a fatia na posição vertical. O tempo de residência das amostras no secador foi estabelecido de forma que as mesmas atingissem peso constante.



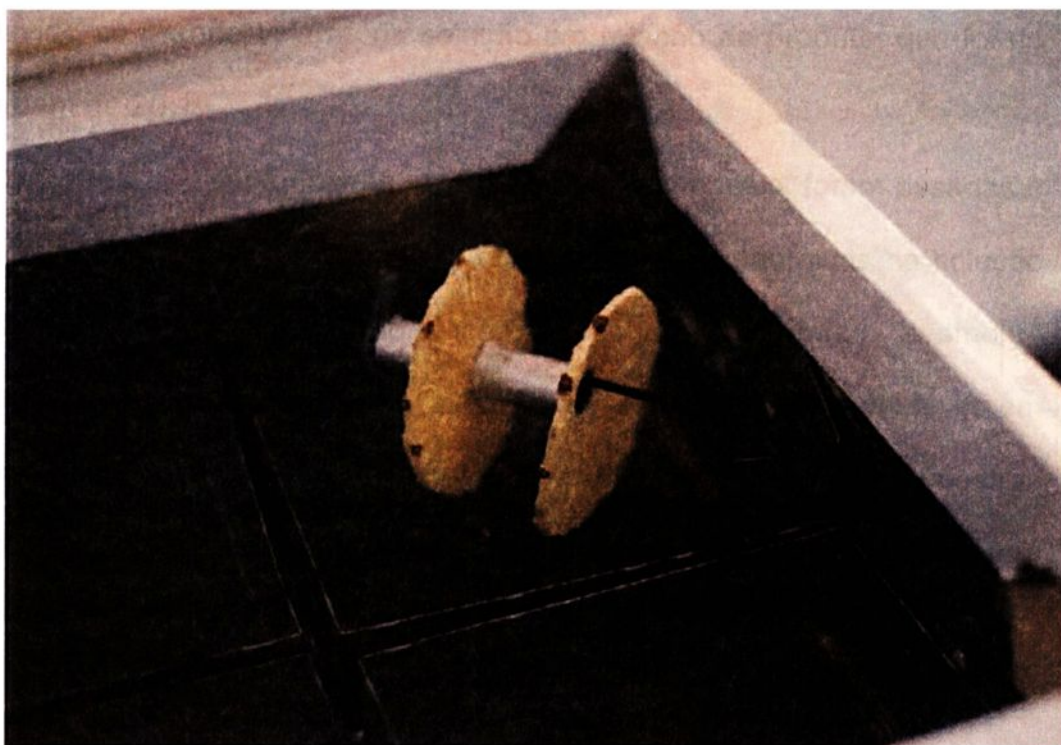


Figura 3.3. Disposição das amostras no interior do secador.

3.5. Desidratação Osmótica

Açúcar comercial refinado foi usado como agente osmótico e a solução foi preparada usando-se água destilada. O recipiente contendo a solução de sacarose foi continuamente agitado por um agitador mecânico durante as 3 horas em que as amostras foram submetidas ao pré tratamento. A temperatura (25°C) e a concentração (50°Brix) da solução foram mantidas constantes durante todo o processo

devido ao grande volume da solução em relação ao produto, que foi da ordem de 20:1.

As amostras, duas fatias a cada ensaio, foram pesadas e a espessura e o diâmetro registrados antes de submergi-las na solução osmótica. Após a pré-desidratação, essas amostras foram levemente enxaguadas para remover o excesso de solução da superfície e, em seguida, enxugadas com papel absorvente. Finalmente as amostras foram novamente pesadas, sendo a nova espessura e diâmetro registrados.

3.6. Propriedades Físicas

Curvas de encolhimento volumétrico e densidade aparente em função do conteúdo de umidade foram construídas a partir dos dados experimentais de espessura e diâmetro das fatias e sua respectiva massa.

3.7. Reidratação

Para a determinação do índice de reidratação, estabeleceu-se um conteúdo de umidade de 53% (base seca). A partir das curvas de secagem, obtidas previamente, era possível prever o tempo necessário para atingir essa umidade. Porções de



aproximadamente 5 g das amostras secas eram pesadas e postas em um béquer. Água destilada era adicionada até completar 100 ml. O béquer era, então, levado a um aquecedor e, após 5 minutos de fervura, as amostras eram retiradas da água, levemente enxugadas em papel de filtro e deixadas em repouso no ar ambiente por 10 minutos. Finalmente eram pesadas e o índice de reidratação calculado. Para cada condição de secagem, o índice de reidratação foi determinado em quatro amostras (RANGANNA, 1978).



RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Isotermas de Sorção

A Tabela 4.1 apresenta a umidade de equilíbrio em função da atividade de água para o abacaxi, na faixa de temperatura de 40 – 70°C.

Tabela 4.1 - Conteúdo de umidade de equilíbrio para o abacaxi.

Temperatura (°C)	Atividade de Água	Conteúdo de Umidade (% b. s.)	Temperatura (°C)	Atividade de Água	Conteúdo de Umidade (% b. s.)
40	0,066	0,55	50	0,059	0,48
	0,111	0,99		0,110	0,94
	0,206	2,16		0,189	1,67
	0,319	4,14		0,314	3,87
	0,432	7,11		0,432	6,21
	0,506	9,89		0,489	8,53
	0,615	15,96		0,599	13,84
	0,753	30,02		0,746	27,74
	0,820	32,54		0,809	33,87
	0,893	49,62		0,884	54,41
60	0,045	0,31	70	0,020	0,12
	0,110	0,82		0,110	0,74
	0,175	1,36		0,162	1,08
	0,307	3,26		0,294	2,77
	0,432	5,60		0,432	4,93
	0,473	7,01		0,458	5,90
	0,590	11,74		0,587	10,42
	0,740	23,58		0,739	21,29
	0,800	29,36		0,795	30,28
	0,876	54,79		0,870	56,81

Os dados experimentais foram ajustados, por meio de regressão não-linear, ao modelo de GAB. O resultado do ajuste foi satisfatório, levando a coeficientes de determinação (r^2) superiores a 0,99 em todos os casos, com exceção das regressões dos parâmetros C e K_1 versus T, que levaram a coeficientes r^2 de 0,588 e 0,870, respectivamente. Os valores das constantes do modelo de GAB são apresentados na Tabela 4.2, enquanto a Figura 4.1 mostra a influência da temperatura sobre as isotermas. Os pontos representam os dados experimentais e as linhas sólidas indicam o modelo ajustado.

A Figura 4.1 mostra que a dependência da temperatura não é muito marcante, o que se confirma pelos baixos coeficientes de determinação encontrados na regressão dos parâmetros C e K_1 em função da temperatura, de acordo com as equações (2.5) e (2.6). Resultados similares, incluídos na Figura 4.1, foram obtidos por Hubinger et al. (1992), embora as amostras utilizadas por esses autores tenham sido desidratadas por liofilização e por secagem a vácuo. Mesmo assim, é possível observar uma tendência de queda na umidade de equilíbrio à medida que a temperatura aumenta até atividades de água em torno de 0,8. De acordo com Rizvi (1986), esse comportamento pode ser atribuído a uma redução do número de sítios ativos devido a alterações físicas e químicas induzidas pela temperatura. A partir de atividades de água maiores que 0,8, essa tendência se inverte, o que pode ser explicado pela solubilização dos açúcares da fruta (Sá & Sereno, 1993). O formato



das isothermas do abacaxi é típico de alimentos com altos teores de açúcares, os quais adsorvem água em quantidades relativamente pequenas em baixas umidades relativas e em grandes quantidades quando a atividade de água é elevada (Gabas et al., 1999).

Tabela 4.2 – Constantes da equação de GAB.

Tempe- ratura (°C)	Parâmetros do modelo GAB						
	X_M % b.s.	C	C_0	$\Delta H_c =$ ($H_m - H_n$) (kJ/mol)	K_1	k_0	$\Delta H_k =$ ($\lambda - H_n$) (kJ/mol)
40	81,79	0,132	$5,26 \times 10^4$	-30,24	0,713	33,84	-9,66
50	13,19	0,526			0,899		
60	6,33	1,110			1,003		
70	6,37	0,850			1,022		

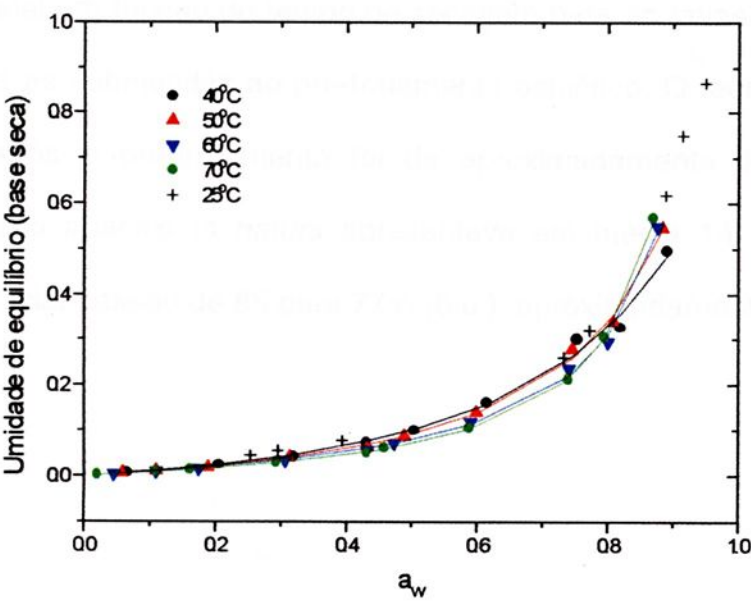


Figura 4.1. Isothermas de abacaxi a várias temperaturas. Dados a 25°C de Hubinger et al. (1992).

4.2. Cinética de Secagem

A partir dos dados obtidos experimentalmente, foram construídas curvas de secagem para condições controladas de temperatura e velocidade do ar. Os pontos experimentais foram ajustados à equação de 2ª Lei de Fick considerando-se os três primeiros termos da solução analítica para placa plana, com ambas as faces expostas ao ar de secagem, obtendo-se assim, a difusividade aparente das fatias de abacaxi para cada condição operacional. A derivação numérica das curvas de secagem experimentais permitiu a determinação das taxas de secagem em função da umidade da amostra.

A Figura 4.2 apresenta a variação da umidade adimensional em função do tempo de secagem para as fatias de abacaxi *in natura* e as submetidas ao pré-tratamento osmótico. O teor de sólidos solúveis após o pré-tratamento foi de aproximadamente 21,25 °Brix, sendo que o abacaxi *in natura* apresentava em média 14 °Brix. Já a umidade inicial passou de 85 para 77% (b.u.), aproximadamente.



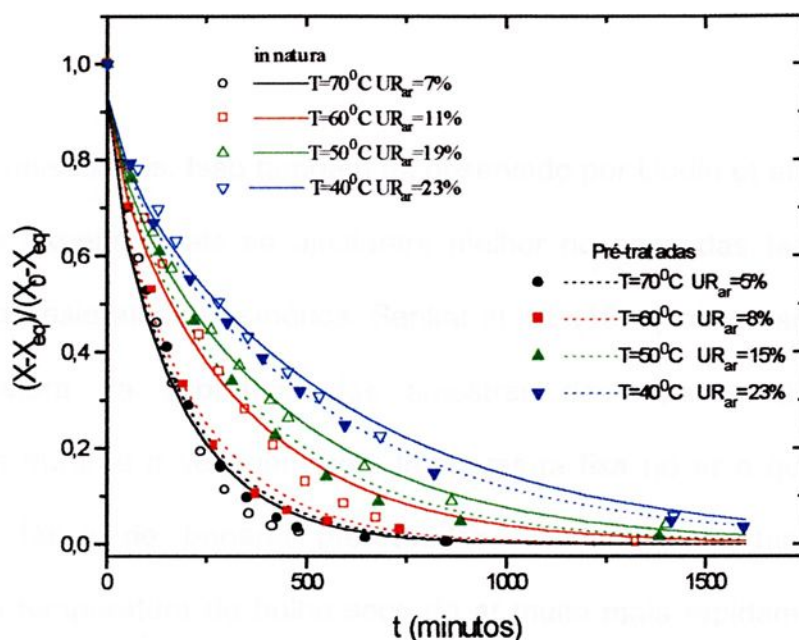


Figura 4.2. Umidade adimensional versus tempo em função da temperatura do ar para amostras com e sem pré-tratamento osmótico. $V_{ar}=2,5$ m/s.

Nota-se que para um mesmo tempo de residência do material no secador, o aumento da temperatura do ar, conduziu a uma redução mais acentuada da umidade, sendo assim, um indicativo do aumento do potencial de secagem em função da temperatura.

Devido às mudanças físicas e químicas ocorridas durante o pré-tratamento das fatias de abacaxi, foram observadas diferenças no potencial de secagem durante a secagem convectiva, ou seja, houve um aumento do potencial quando as fatias foram pré-tratadas osmoticamente, exceto para temperatura de 70°C. Essa inversão de comportamento é discutida mais adiante, junto as taxas de secagem.

Observa-se a existência de desvios consideráveis dos pontos experimentais em relação ao modelo teórico, principalmente para as fatias *in natura* secas nas maiores temperaturas e após tempos de

secagem mais longos. Isso também foi observado por Uddin et al. (1990). Os pontos experimentais se ajustaram melhor no caso das fatias que sofreram a desidratação osmótica. Sankat et. al. (1996) observaram que a temperatura da superfície das amostras de banana não eram constantes durante a secagem com temperatura fixa no ar e que, além disso, as fatias de banana pré-tratadas osmoticamente tendiam a alcançar a temperatura de bulbo seco do ar muito mais rapidamente do que as fatias *in natura*, o que pode ser resultado do menor conteúdo de umidade das mesmas. Nesse caso, as condições reais do experimento se aproximam mais da condição de processo isotérmico, que constitui uma das hipóteses assumidas para a solução analítica da 2ª lei de Fick.

O encolhimento menos acentuado das fatias pré-tratadas (Figura 4.14) é outra característica que se aproxima mais da hipótese de espessura constante assumida na solução teórica. Talvez a combinação desses fatores - menor encolhimento e maior constância da temperatura no interior do fruto - tenha feito com que os coeficientes de correlação para o ajuste da solução teórica (Tabela 4.3) fossem maiores para as fatias pré-desidratadas do que para as *in natura*.

O exposto acima é reforçado quando se observa a Figura 4.3, onde são apresentadas as curvas de secagem obtidas em ensaios com temperatura fixa na fatia. Nesse caso, o processo é realmente isotérmico (com respeito ao sólido, que é efetivamente onde se dá a

etapa limitante da transferência de massa). Além disso, como indica a Figura 4.15, o encolhimento também é menor nesse tipo de experimento.

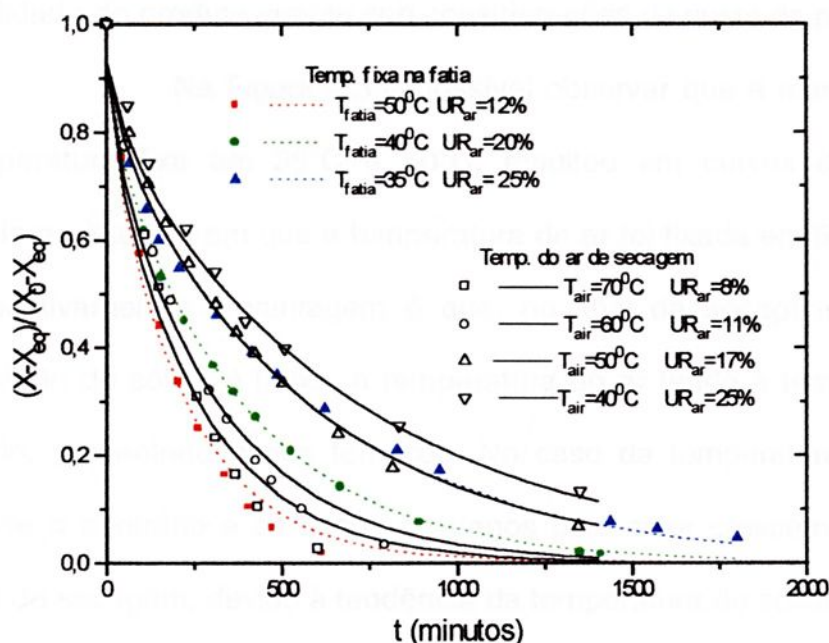


Figura 4.3. Umidade adimensional versus tempo em função da temperatura fixa no ar ou na fatia para o produto *in natura*. $V_{ar} = 1,5$ m/s.

O objetivo de utilizar uma estratégia de controle fixando a temperatura no interior do sólido é melhorar a qualidade de produtos desidratados sensíveis ao calor, ao mesmo tempo em que se reduz o tempo de secagem, uma vez que no início do processo, quando a umidade do sólido é alta, a temperatura do ar de secagem pode ser elevada, sendo gradualmente reduzida à medida em que a umidade da fruta decresce. Isto faz com que o produto esteja livre de danos

provocados pela exposição ao calor excessivo e que permaneça o menor tempo possível no secador, o que é desejável tanto sob o aspecto da qualidade do produto quanto sob considerações de custo do processo.

Na Figura 4.3 é possível observar que a manutenção da temperatura fixa em 35°C e 50°C, resultou em curvas de secagem similares às aquelas em que a temperatura do ar foi fixada em 50°C e 70°C, respectivamente. A vantagem é que, no final da secagem, quando a umidade do sólido é baixa, a temperatura do ar tende à temperatura do sólido, prevenindo danos térmicos. No caso da temperatura do ar fixa ocorre o contrário e os riscos de danos pelo calor crescem no período final de secagem, devido à tendência da temperatura do sólido aproximar-se da temperatura de bulbo seco do ar.

As Figuras 4.4 e 4.5 ilustram um rápido período de taxa decrescente nos primeiros períodos de secagem, seguido por um período de taxa decrescente mais lenta. Para as condições experimentais adotadas, a taxa de secagem constante não foi observada. Isto implica que o filme de água na superfície das amostras não existiu e que toda umidade transferida do interior para a superfície foi evaporada imediatamente (Hawlder et al., 1991). Sankat et al. (1996) registraram períodos similares na secagem de bananas, concluindo que o segundo estágio de taxa decrescente é mais lento pelo fato das amostras apresentarem um encolhimento mais acentuado a partir deste período,



tornando-se mais densas e mais rígidas. Assim a resistência ao movimento interno de umidade é aumentada.

Na Figura 4.4, observa-se que as taxas de secagem aumentaram quando as amostras foram submetidas ao pré-tratamento osmótico, exceto para a temperatura de 70°C, onde supostamente, ocorreu caramelização do açúcar na superfície das amostras, dificultando a remoção da umidade de seu interior.

Rahaman & Lamb (1991) notaram que as amostras submetidas ao pré-tratamento osmótico apresentavam taxas de secagens mais baixas quando comparadas com as frutas *in natura*, porém estes pesquisadores empregaram altas concentrações de açúcar e longo tempo de imersão da fruta na solução osmótica. Isso talvez explique esta inversão de comportamento, já que amostras com menor teor de umidade apresentam menores taxas de secagem.



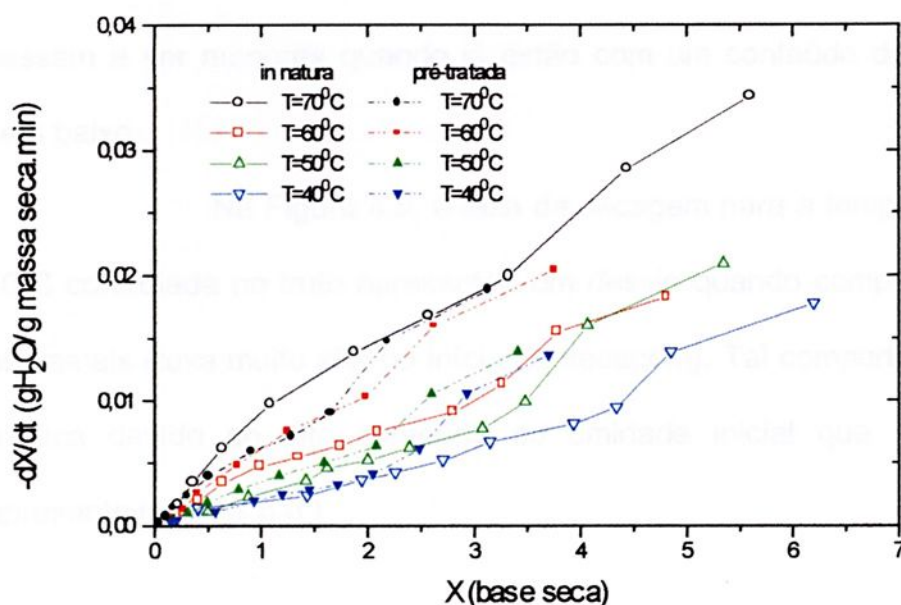


Figura 4.4. Taxas de secagem versus conteúdo de umidade (b.s.) em função da temperatura do ar para amostras com e sem pré-tratamento osmótico. $V_{ar}=2,5$ m/s.

Sankat et al. (1996) observaram que as taxas de secagem a ar são dependentes da concentração de açúcar da solução osmótica e que no início da secagem ocorre um rápido declínio da taxa com o tempo, além de um forte aumento da taxa com o ganho de sólidos durante o pré-tratamento. Após este estágio inicial da secagem ou o primeiro período de taxa decrescente, a taxa continua a decrescer, mas de maneira mais sutil, sendo que em estágios mais avançados da secagem, as diferenças entre as taxas dos produtos *in natura* e pré-tratado tornam-se cada vez menores, tendendo no final a se inverterem, ou seja, as taxas das amostras que tiveram um maior ganho de sólidos

passam a ser menores quando já estão com um conteúdo de umidade bem baixo.

Na Figura 4.5, a taxa de secagem para a temperatura de 40°C controlada no fruto apresentou um desvio quando comparada com as demais (taxa muito alta no início da secagem). Tal comportamento se explica devido ao alto conteúdo de umidade inicial que a amostra apresentava (90% b.u.).

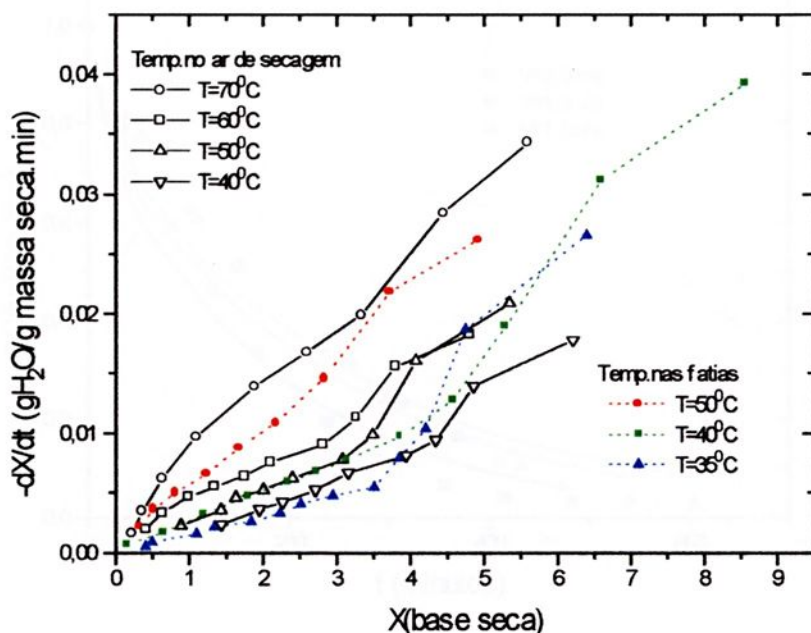


Figura 4.5. Taxas de secagem versus conteúdo de umidade (b.s.) em função da temperatura fixa no ar ou na fatia para o produto *in natura*. $V_{ar}=1,5\text{m/s}$

Quando fixou-se a temperatura do ar de secagem para observar a dependência da velocidade, as respostas foram similares às velocidades fixas. De acordo com as figuras 4.6 e 4.7 para temperatura do ar fixa a 70°C, o potencial de secagem aumentou com a elevação da velocidade do ar e, conseqüentemente, as taxas de secagem também.

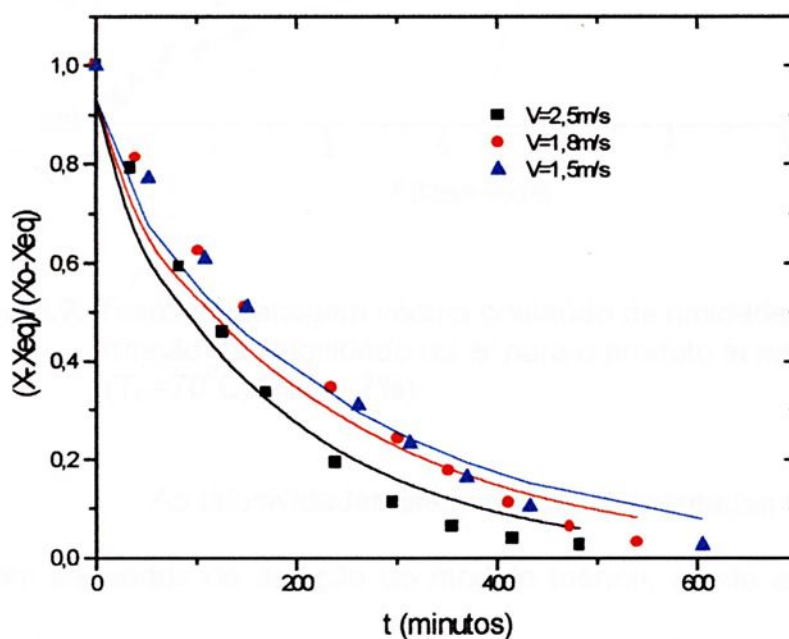


Figura 4.6. Umidade adimensional versus tempo em função da velocidade do ar para o produto *in natura* ($T_{ar} = 70^{\circ}\text{C}$, $UR_{ar} = 7\%$).



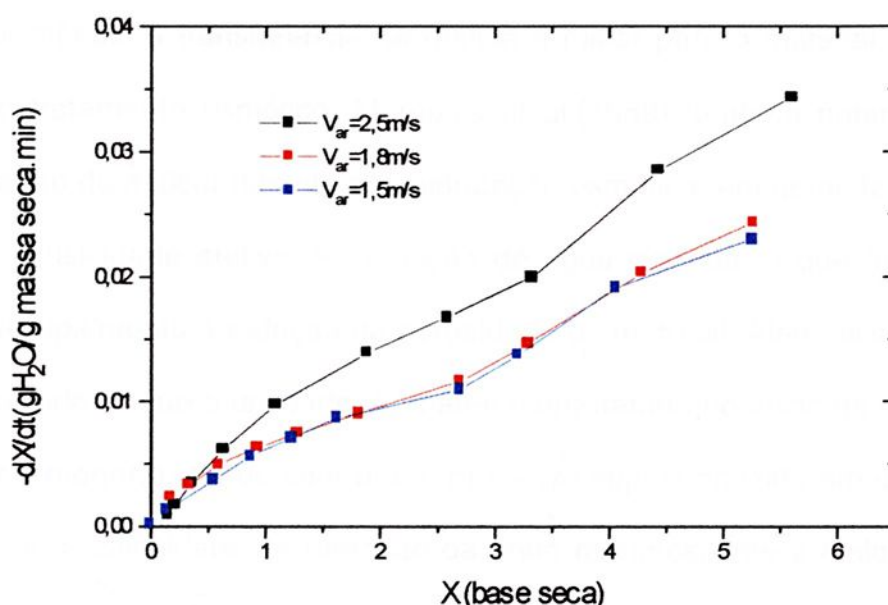


Figura 4.7. Taxas de secagem versus conteúdo de umidade (b.s.) em função da velocidade do ar para o produto *in natura* ($T_{ar}=70^{\circ}\text{C}$, $UR_{ar} = 7\%$)

As difusividades efetivas são apresentadas na Tabela 4.1 e foram baseadas na solução do modelo teórico, sendo admitida como constante durante o processo de secagem. Com o aumento da temperatura, houve também, um aumento na difusividade aparente. Uma parcela desse aumento pode ser creditada ao menor encolhimento observado nas temperaturas mais altas. Menor encolhimento implica em maior porosidade e, conseqüentemente, em maior área de transferência de massa. Como se trata de difusividade aparente, esse efeito encontra-se incluído.

A comparação da difusividade efetiva para o abacaxi *in natura* e pré-tratado, nas mesmas condições de secagem, mostrou que a resistência à transferência de massa é maior para o material submetido ao tratamento osmótico. Marousis et al.(1989) também notaram que o ganho de açúcar durante a desidratação osmótica, em geral, faz com que a difusividade efetiva de remoção de água diminua, o que foi atribuído principalmente à redução da porosidade do material. Além disso, deve-se considerar que a umidade do material pré-tratado no início da secagem a ar é menor, fazendo com que o processo seja conduzido em uma região onde a dificuldade de remoção da água remanescente é maior. Como a difusividade efetiva foi considerada constante ao longo de toda a secagem, ela representa uma média, de forma que as altas taxas iniciais observadas para o material *in natura* devem ser responsáveis por uma elevação da difusividade média. Mazza (1983) atribuiu as menores taxas de desidratação observadas em cenouras pré-tratadas osmoticamente à redução da pressão de vapor da água no produto devido aos açúcares dissolvidos, além de cogitar a recristalização da sacarose durante a secagem.



Tabela 4.3. Difusividade efetiva em função da temperatura e velocidade do ar.

Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	Difusividade Efetiva x 10 ¹⁰ (m ² /s)		
		Abacaxi <i>in natura</i>	Temperatura fixa na fatia	Abacaxi pré-tratado
70	2,5	9,17 (0,983)	-	7,00 (0,992)
	1,8	7,78 (0,982)	-	-
	1,5	6,67 (0,970)	-	-
60	2,5	6,20 (0,987)	-	5,43 (0,993)
	1,8	4,58 (0,991)	-	-
	1,5	4,32 (0,990)	-	-
50	2,5	3,63 (0,996)	-	3,27 (0,994)
	1,8	2,80 (0,994)	-	-
	1,5	2,58 (0,994)	7,75 (0,991)	-
40	2,5	2,33 (0,993)	-	2,00 (0,997)
	1,8	1,97 (0,993)	-	-
	1,5	2,05 (0,992)	4,10 (0,997)	-
35	1,5	-	2,62 (0,996)	-

A dependência da difusividade efetiva em função da temperatura pode ser representada por uma equação do tipo Arrhenius (equação 4.1), o que resulta no cálculo da energia de ativação. A Figura 4.8 e a Tabela 4.4 apresentam os resultados assim obtidos.

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (4.1)$$

onde D_0 é uma constante ajustável, E_a a energia de ativação para a secagem, R a constante universal dos gases e T a temperatura absoluta.

Considerando-se que a equação (4.1) é um modelo empírico, a magnitude da energia de ativação é uma indicação da influência da temperatura no processo. Uddin et al. (1990) obtiveram um valor de 35.5 kJ/mol para a secagem de abacaxi em uma estufa de convecção forçada. É interessante notar a alta energia de ativação calculada para os ensaios com temperatura fixa na fatia, que foi aproximadamente 60% maior que a determinada para o caso de temperatura fixa no ar, na mesma velocidade.



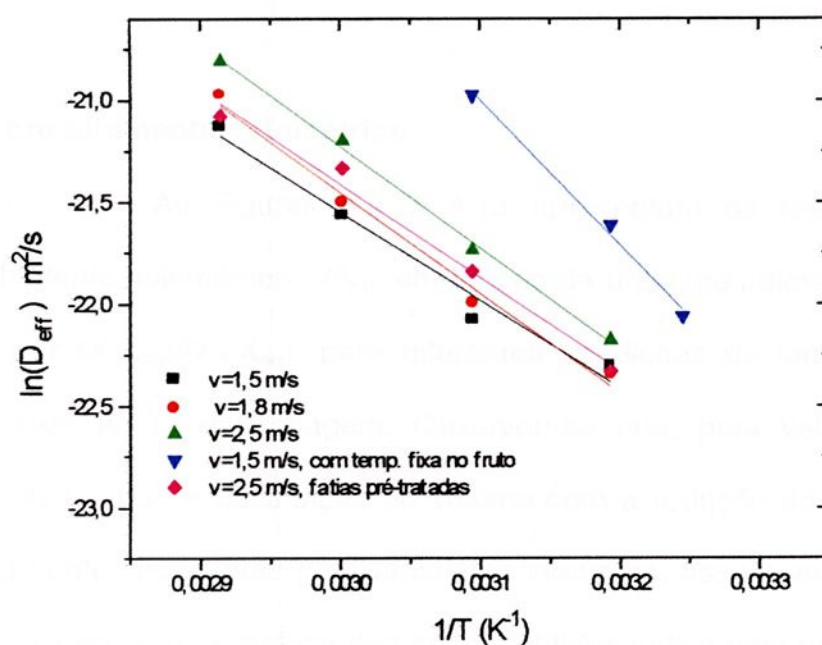


Figura 4.8. Dependência da difusividade efetiva em função da temperatura para as várias condições de secagem.

Tabela 4.4. Parâmetros correspondentes à equação (4.1).

Condição de secagem	D_0 (m^2/s)	E_a (kJ/mol)	r
<i>in natura</i> , 1.5 m/s	$1,95 \times 10^{-4}$	36,06	0,986
<i>in natura</i> , 1.8 m/s	$1,33 \times 10^{-3}$	41,10	0,994
<i>in natura</i> , 2.5 m/s	$1,89 \times 10^{-3}$	41,45	0,999
Pré-tratada, 2.5 m/s	$7,93 \times 10^{-4}$	39,55	0,993
Temp. fixa na fatia, 1.5 m/s	2,53	58,82	0,997

4.3. Propriedades Físicas

4.3.1 Encolhimento volumétrico

As Figuras 4.9 a 4.13 apresentam os resultados do encolhimento volumétrico, V/V_0 , em função da umidade adimensional, M , dada por $(X-X_{eq})/(X_0-X_{eq})$, para diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem. Observou-se que, para valores de M superiores a 0,2, a diminuição do volume com a redução da umidade é praticamente linear, mas para umidades inferiores, esse comportamento muda. A partir daí, a maioria das curvas obtidas indica uma estabilização do volume, correspondendo ao enrijecimento da amostra em umidades muito baixas. Esse comportamento já foi observado por outros autores, como Lozzano et al. (1983), Madamba et al. (1994) e Ratti (1994).

Para permitir a análise do encolhimento em função da temperatura e da velocidade do ar, optou-se por ajustar aos pontos experimentais um modelo linear, válido para a faixa de umidades (M) superiores a 0,2. Os coeficientes de correlação (r) obtidos para o ajuste do modelo linear foram superiores a 0,99 em todos os casos.

Verificou-se que existe uma interação entre os efeitos da temperatura e da velocidade do ar de secagem. Na Figura 4.9, que apresenta os resultados para a maior velocidade testada (2,5 m/s), observa-se que o encolhimento foi independente da temperatura. Já para a menor velocidade (1,5 m/s, correspondente à Figura 4.11), verifica-se

que o encolhimento foi mais intenso à medida que a temperatura de secagem diminuiu. Para a velocidade intermediária (1,8 m/s), a Figura 4.10 mostra que o encolhimento a 40°C foi maior, embora para as demais temperaturas essa tendência não esteja bem definida.

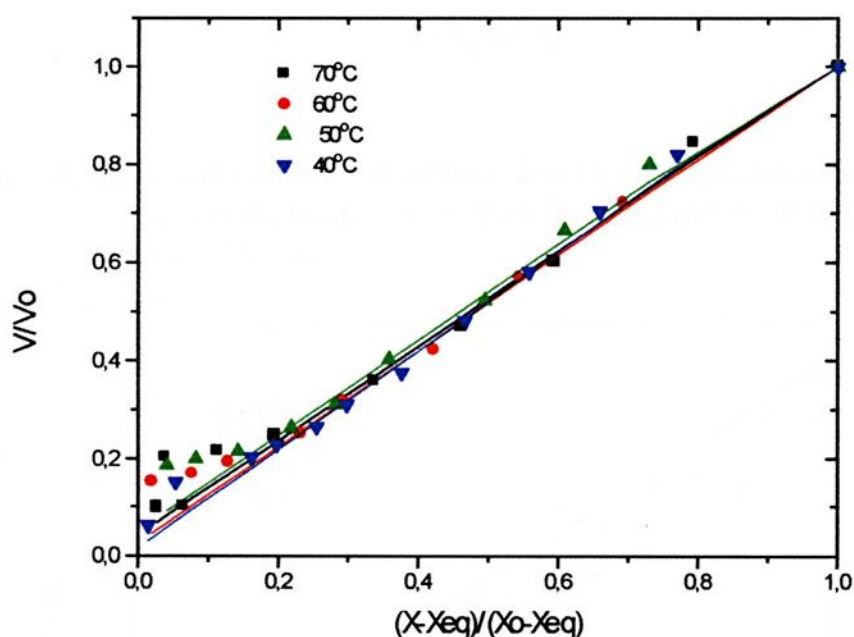


Figura 4.9. Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional em função da temperatura do ar para o produto *in natura*. ($V_{ar} = 2,5$ m/s).

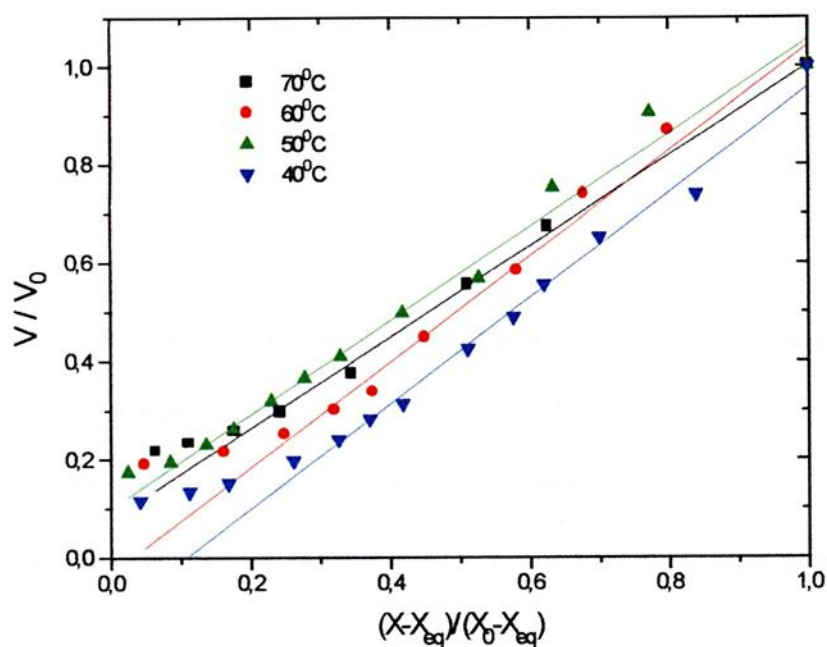


Figura 4.10. Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional em função da temperatura do ar para o produto *in natura* ($V_{ar} = 1,8$ m/s).

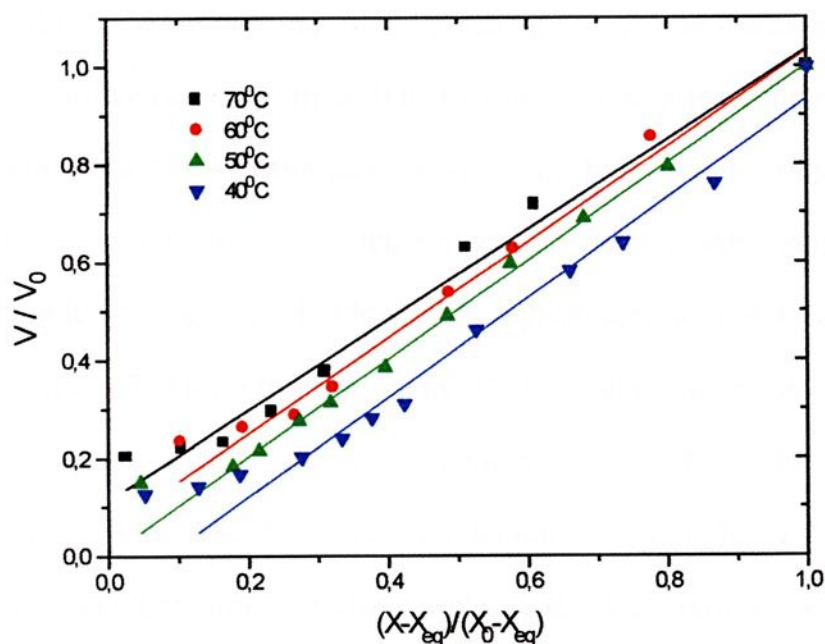


Figura 4.11. Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional em função da temperatura do ar para o produto *in natura* ($V_{ar} = 1,5$ m/s).

Graficando-se os resultados para a mesma temperatura e variando-se a velocidade (Figuras 4.12 e 4.13), observa-se que para a temperatura de 70°C a velocidade de secagem praticamente não afeta o encolhimento, enquanto que a 40°C a maior velocidade proporciona a menor redução de volume.

Esses efeitos são compatíveis com a teoria da transição vítrea (Bhandari & Howes, 1999), considerando-se que a secagem a temperaturas mais baixas expõe o material a temperaturas maiores que a ambiente por um período mais prolongado. O resultado seria que a matriz, com viscosidade mais baixa devido ao estado borrachoso (acima da temperatura de transição vítrea, T_g), teria mais tempo para se deformar. Isso acontece principalmente quando a velocidade do ar é baixa, reduzindo a difusividade efetiva e prolongando ainda mais o tempo de secagem. Em temperaturas mais altas, ou em maiores velocidades do ar, devido às altas taxas de secagem, a superfície da amostra se desidrata muito rapidamente, passando ao estado vítreo, que é caracterizado por uma estrutura mais rígida. Isso diminui a intensidade das deformações sofridas pela material.



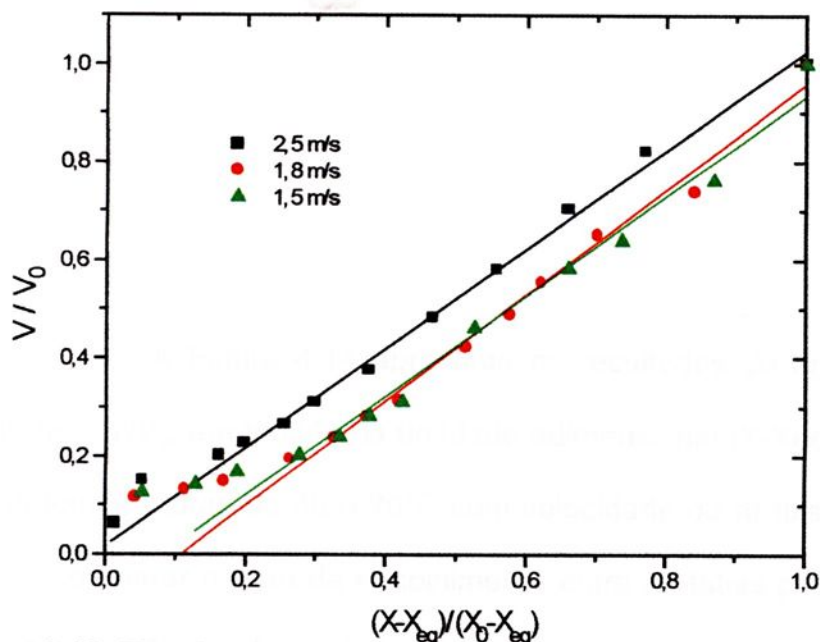


Figura 4.12. Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional em função da velocidade do ar para o produto *in natura* ($T_{ar} = 40^\circ\text{C}$).

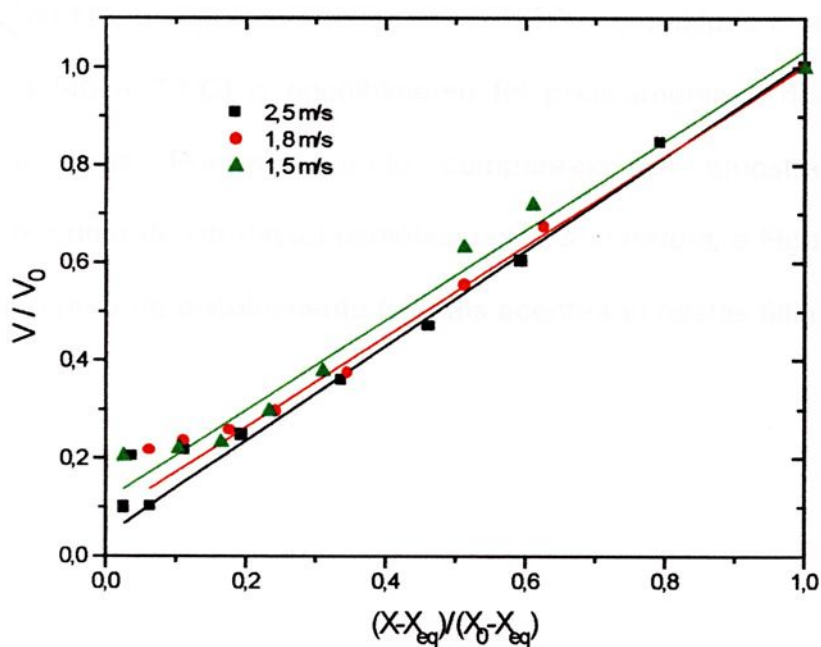


Figura 4.13. Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional em função da velocidade do ar para o produto *in natura* ($T_{ar} = 70^\circ\text{C}$).

A Figura 4.14 apresenta os resultados do encolhimento volumétrico, V/V_0 , em função da umidade adimensional $(X-X_{eq})/(X_0-X_{eq})$, para as temperaturas de 40 e 70°C com velocidade do ar fixa a 2,5 m/s. Pôde-se comparar o grau de encolhimento entre as fatias pré-tratadas e as *in natura*. Como discutido anteriormente para as fatias *in natura*, também não houve interferência significativa da temperatura no grau de encolhimento para as fatias pré-tratadas e secas na maior velocidade testada (2,5m/s), ou seja, para qualquer conteúdo de umidade e qualquer temperatura (40 a 70°C) o encolhimento foi praticamente o mesmo a velocidades altas. Porém, quando compara-se as amostras que passaram por uma desidratação osmótica com as *in natura*, a Figura 4.14 mostra que o grau de encolhimento foi mais acentuado nestas últimas.



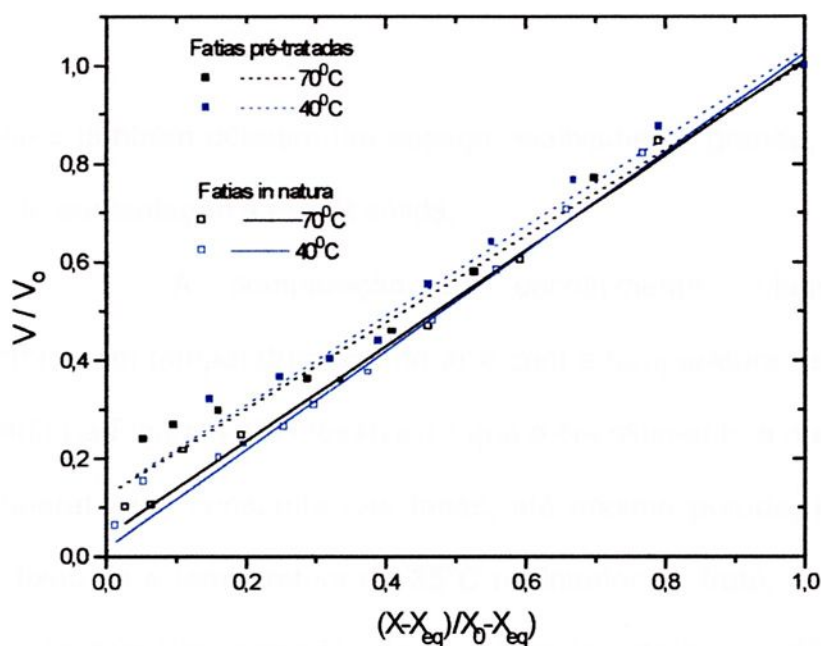


Figura 4.14. Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional em função da temperatura do ar para amostras com e sem pré-tratamento osmótico. ($V_{ar}=2,5$ m/s).

Eichler et al. (1997), estudando o encolhimento de géis hidrofílicos durante a secagem, afirmam que os açúcares adicionados à matriz podem apresentar três possíveis efeitos. O primeiro é a sua capacidade de reter água no produto. Isto é, a umidade de equilíbrio para a mesma umidade relativa do ar de secagem em amostras com maior teor de açúcar é mais elevada, resultando em um volume final maior. O segundo é o efeito plastificante do açúcar, que reflete em uma menor temperatura de transição vítrea e provoca maior encolhimento. Finalmente, há que se considerar o fato de que a presença do soluto substitui em parte a água presente no material e, sendo menor a porção de água a ser removida, menor será o encolhimento. Por outro lado, os

açúcares também ocupam um espaço relativamente grande, dando uma base de sustentação à matriz sólida.

A comparação do encolhimento volumétrico das amostras com temperatura fixa no ar e com a temperatura fixa no fruto é ilustrada na Figura 4.15. Observa-se que o encolhimento é menor quando a temperatura é constante nas fatias, até mesmo porque, nos ensaios onde fixou-se a temperatura de 35°C no interior do fruto, a temperatura do ar nos primeiros períodos de secagem era maior que 60°C , e como observado, para as maiores temperaturas em velocidades baixas o encolhimento é menor, já que a secagem das camadas superficiais do produto é rápida, tornando-o rígido e impedindo a posterior deformação. Também há que se observar que as amostras com a temperatura fixa no fruto permaneceram um menor tempo no secador para atingirem o mesmo conteúdo de umidade que as fatias com controle fixo no ar de secagem. Esse menor tempo de contato com o calor faz com que a deformação ou encolhimento seja menos acentuado.



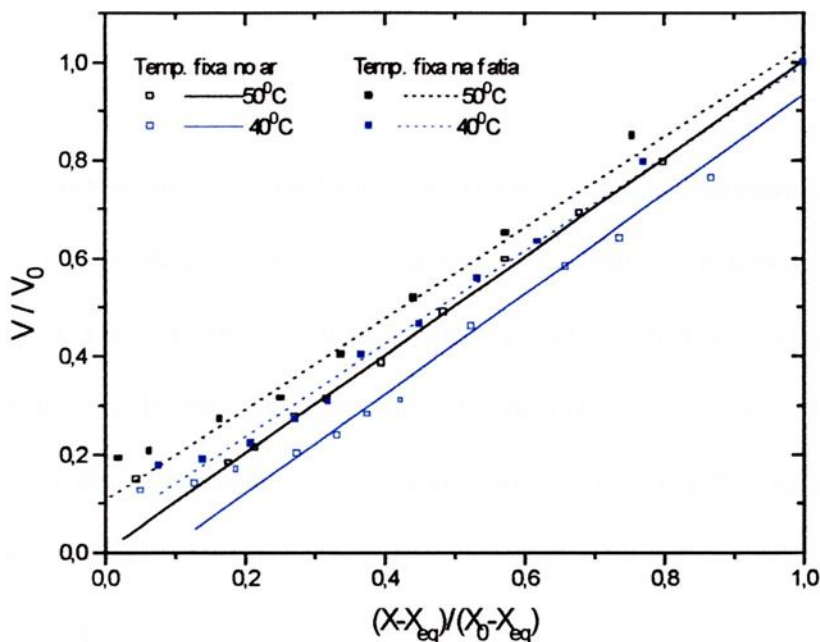


Figura 4.15. Encolhimento volumétrico versus umidade adimensional em função da temperatura fixa no ar ou na fatia para o produto *in natura*. ($V_{ar}=1,5$ m/s)

4.3.2. Densidade Aparente

As Figuras 4.16 e 4.17 ilustram os efeitos da temperatura e velocidade do ar sobre as curvas de densidade aparente versus umidade das fatias de abacaxi.

A dependência entre a densidade aparente e a umidade da amostra apresentou-se altamente não linear. Procurou-se, inicialmente ajustar modelos já apresentados na literatura, como o polinomial proposto por Madamba et al. (1994), entretanto o ajuste obtido não foi satisfatório. Testou-se, então, o modelo empírico desenvolvido por Lozano et al. (1983), dado pela eq. (4.1). Verificou-se que, embora esta equação se ajustasse melhor que o polinomial, ela ainda não reproduzia o máximo de

densidade aparente apresentado por todas as curvas experimentais. A melhor representação dessas curvas foi obtida fazendo-se uma modificação na eq. (4.1), introduzindo-se uma variável independente multiplicando o termo exponencial, de acordo com a eq. (4.2). Os coeficientes de correlação (r) obtidos com essa equação foram todos superiores a 0,95.

$$\rho_{ap} = A + B \left(\frac{X}{X_0} \right) + C \exp \left(-D \frac{X}{X_0} \right) \quad (4.1)$$

$$\rho_{ap} = A + B \left(\frac{X}{X_0} \right) + C \cdot \frac{X}{X_0} \exp \left(-D \frac{X}{X_0} \right) \quad (4.2)$$

onde, ρ_{ap} é a densidade aparente do sólido, X/X_0 é a umidade adimensional desprezando-se a umidade de equilíbrio e A, B, C e D são constantes de ajuste da equação para cada condição experimental.

Como a densidade depende diretamente do volume da amostra, a discussão apresentada no item anterior, em relação aos efeitos da temperatura e velocidade do ar também se aplica a esse parâmetro, com a ressalva de que quanto maior a densidade aparente atingida pela amostra, maior foi o seu grau de encolhimento, isto é, menor foi o volume atingido pela fatia durante o experimento. Neste caso, observa-se que, para a maior velocidade do ar (Figura 4.16), o valor máximo de densidade fica entre 1,2 e 1,3 g/cm³, não havendo muita variação em função da temperatura. Na Figura 4.17, que corresponde à menor velocidade, verifica-se que as amostras secas a temperaturas

menores que 70°C apresentaram densidades máximas em torno de 1,5 g/cm³, enquanto que aquelas secas a 70°C atingiram o máximo de 1,3 g/cm³.

A evolução da densidade aparente em função da umidade pode ser explicada da seguinte forma: no início, em umidades altas, a amostra perde massa e volume numa taxa semelhante, de modo que a densidade permanece relativamente estável; após essa fase inicial, o volume começa a diminuir mais rapidamente que a massa, fazendo com que a densidade aumente e atinja o ponto máximo; finalmente, com o enrijecimento da matriz no final da secagem, o volume fica aproximadamente constante e, como a massa continua a diminuir, a densidade decresce.

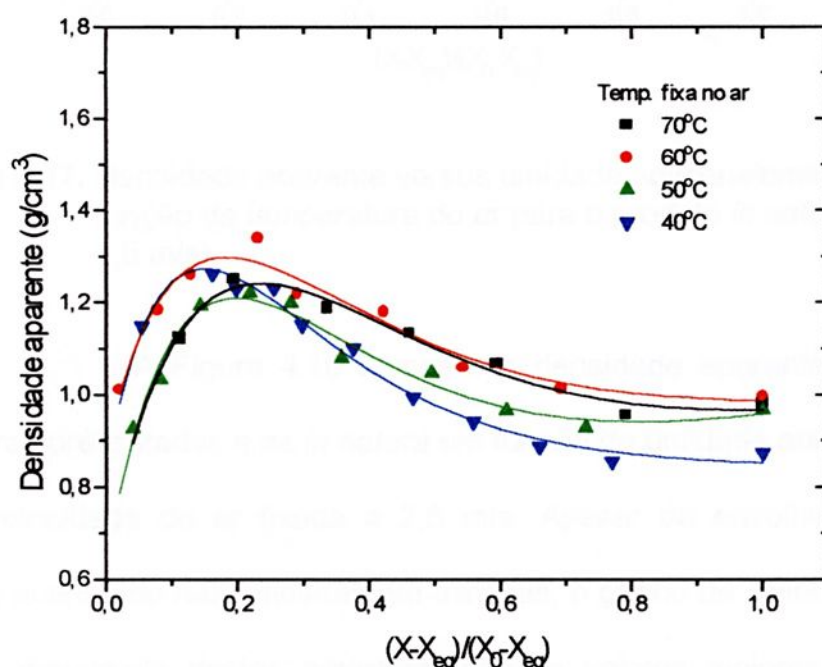


Figura 4.16. Densidade aparente versus umidade adimensional em função da temperatura do ar para o produto *in natura*. ($V_{ar} = 2,5$ m/s)

O perfil da densidade aparente no decorrer da secagem para o abacaxi mostrou-se muito semelhante ao encontrado por (Lozano et al., 1983) na secagem de batatas.

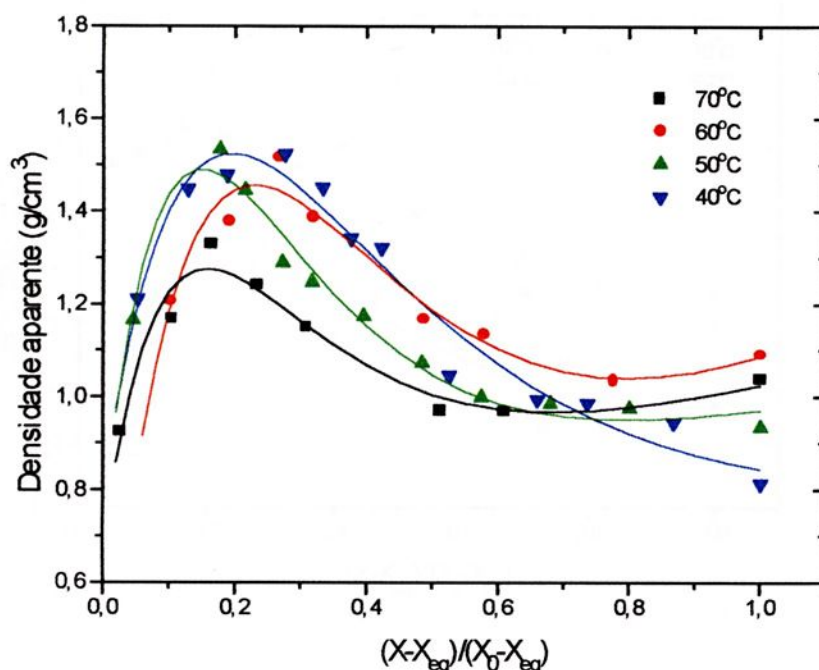


Figura 4.17. Densidade aparente versus umidade adimensional em função da temperatura do ar para o produto *in natura* ($V_{ar} = 1,5$ m/s).

A Figura 4.18 compara a densidade aparente entre as amostras pré-tratadas e as *in natura* em função da umidade adimensional com velocidade do ar fixada a 2,5 m/s. Apesar do encolhimento ser menos acentuado nas amostras pré-tratadas, o ganho de sólidos faz com que a densidade destas amostras alcance valores maiores para um mesmo conteúdo de umidade, obtendo-se como resposta, uma densidade

máxima em torno de $1,45 \text{ g/cm}^3$ contra $1,25 \text{ g/cm}^3$ para as amostras *in natura* na faixa de umidade adimensional de 0,2.

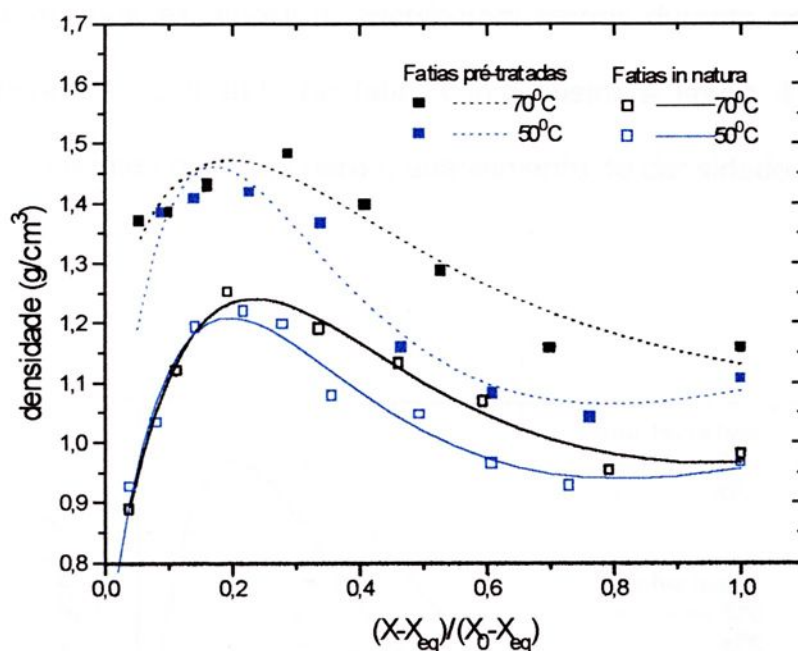


Figura 4.18. Densidade aparente versus umidade adimensional em função da temperatura do ar para amostras com e sem pré-tratamento osmótico. ($V_{ar}=2,5 \text{ m/s}$)

Observa-se que o modelo empírico ajustado à densidade aparente das fatias pré-tratadas resulta em um desvio maior dos pontos experimentais a partir da densidade máxima. A densidade a partir daí sofre um declínio menos acentuado se comparado com as amostras *in natura*, o que mais uma vez pode ser explicado pelo ganho de sólidos que deixa o produto final mais denso.

Quando se compara a evolução da densidade aparente entre os ensaios conduzidos à temperatura fixa no ar com a fixa na fatia, a figura 4.19 ilustra que esta última apresentou um produto menos denso. Uma vez que as amostras encolheram menos durante os ensaios com temperatura controlada na fatia, como ilustra a figura 4.15, este fato, supostamente contribuiu para o abaixamento da densidade aparente.

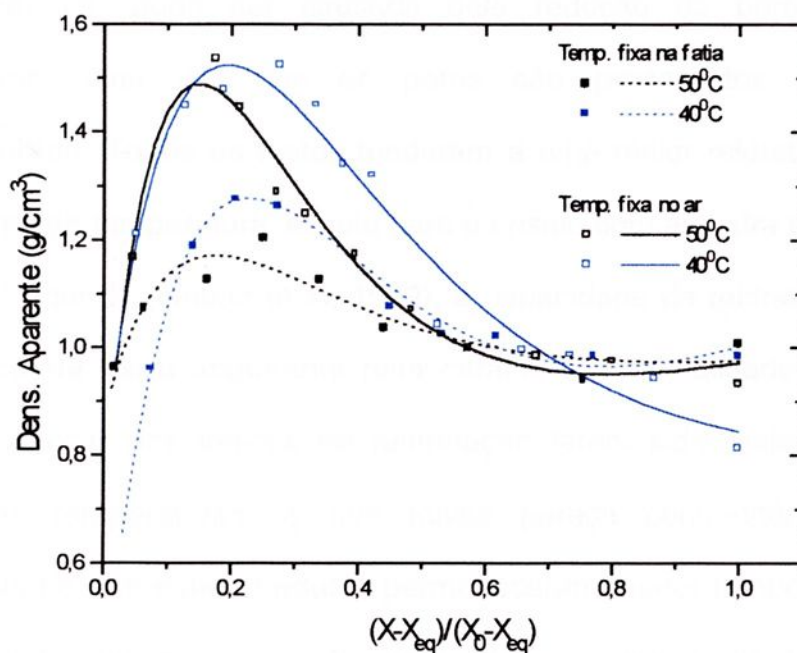


Figura 4.19. Densidade aparente versus umidade adimensional em função da temperatura fixa no ar ou na fatia para o produto *in natura*. ($V_{ar}=1,5$ m/s.)

4.4. Reidratação

O índice de reidratação das amostras secas , tanto para as *in natura* quanto as pré-tratadas, são apresentados na tabela 4.5. Observa-se que as amostras com tratamento osmótico apresentaram menores índices de reidratação. Resultados semelhantes foram obtidos por Nsonzi & Ramaswamy (1998) para “blueberries” e também por Kim & Toledo (1987). A menor capacidade de reidratação das amostras pré-desidratadas, pode ser causada pela redução da porosidade das amostras, uma vez que os poros são preenchidos pelo soluto incorporado. Todos os testes tenderam a uma maior reidratação com o aumento da temperatura, exceto para o ensaio com amostra pré-tratada a 70°C. Segundo (Gabas et al, 1999), a capacidade de reidratação é uma propriedade física importante para caracterizar a qualidade do produto seco. Apesar dos índices de reidratação terem sido maiores para as maiores temperaturas, o que talvez pareça contraditório, pode-se argumentar que estes produtos permaneceram menor tempo expostos a altas temperaturas para atingirem uma mesma umidade. Para as amostras pré-desidratadas e secas a 70°C, ocorreu uma inversão do que se observou nas fatias *in natura*. Nesse caso, como se observa na figura 4.1, não houve grande diferença entre as cinéticas de secagem para as fatias pré-desidratadas e secas a temperaturas de 60 e 70°C, ou seja, o tempo de secagem para estas duas temperaturas foi praticamente o

mesmo. Como discutido anteriormente, pode ter ocorrido a caramelização da amostra a 70°C, afetando o índice de reidratação.

Tabela 4.5: Índice de Reidratação para amostras secas a 53%(b.s)
($V_{ar}=2,5$ m/s)

Temperatura (°C)	Índice de Reidratação	
	<i>In natura</i>	Pré-tratada
70	1,68	1,425
60	1,588	1,455
50	1,46	1,373
40	1,437	1,346

Quanto a aparência de reconstituição, os testes de reidratação mostraram-se satisfatórios como apresentado na figura 4.20. Os tecidos e os espaços celulares quando reidratados, tendem a se expandirem e a deformação visível nas amostras secas dá lugar a um produto de contornos mais suaves, principalmente nas extremidades onde a deformação é mais acentuada.



Figura 4.20: Aparência das amostras em três estágios distintos.

5 CONCLUSÃO

Como esperado, o potencial de secagem aumentou com o aumento da temperatura e da velocidade do ar.

Embora as difusividades efetivas para as amostras pré-tratadas osmoticamente tenham diminuído em relação às *in natura*, que é um indicativo do aumento da resistência à remoção de umidade, foi observado uma elevação da capacidade de secagem para as fatias pré-desidratadas e conseqüentemente as taxas de secagem também tiveram um acréscimo, exceto para o ensaio conduzido a 70°C.

A comparação dos processos com temperatura fixa no ar de secagem com a fixa no fruto, mostrou que esta apresentou um melhor ajuste dos pontos experimentais ao modelo teórico baseado na 2ª Lei de Fick.

O encolhimento volumétrico não sofreu variações com a temperatura quando os ensaios foram conduzidos a velocidades altas, porém para velocidades menores, o encolhimento foi mais acentuado à medida que a temperatura decrescia. As amostras pré-desidratadas e aquelas que foram processadas com a temperatura fixa na fatia, tiveram um menor encolhimento quando comparada com as amostras *in natura* com temperatura fixa no ar.



A dependência das densidades aparentes em função da umidade mostrou-se altamente não-linear e um modelo genérico, proposto na literatura para alimentos, foi satisfatório para as fatias de abacaxi mediante uma pequena modificação.

As amostras secas *in natura* apresentaram maior capacidade de reidratação para as maiores temperaturas de processamento. Já para as amostras pré-desidratadas, ocorreu uma inversão desta tendência para a temperatura de 70°C, sendo que a melhor reidratação neste caso foi a 60°C



SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Modelagem da cinética de secagem do abacaxi considerando o encolhimento, através de solução numérica para as equações diferenciais de transferência de calor e massa.
- 2) Estudo da influência das condições de secagem sobre as propriedades reológicas (textura) do abacaxi, procurando correlacionar os resultados com dados obtidos a partir de análises sensoriais do produto.
- 3) Aprofundar os estudos sobre a cinética de secagem com temperatura fixa no produto, comparando-os com o método tradicional (temperatura fixa do ar), o que pode ser feito enfocando diversos aspectos do problema, como por exemplo: estratégias de controle, influência sobre a textura do produto, consumo energético, eficiência, etc.
- 4) Aprofundar os estudos sobre a pré-desidratação osmótica, verificando a influência da concentração e da temperatura da solução sobre as taxas de transferência de água e de sacarose durante o processo



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUERRE, F.J., SUAREZ, C. & VIOLLAZ, P.E. 1982. Drying kinetics of rough rice grain. *Journal of Food Technology*, 17: 679-686.
- ALVES-FILHO, O. & STRØMMEN, I. 1996. The application of heat pump in drying of biomaterials. *Drying Tecnology*, 14(9): 2061-2090.
- BALABAN, M. & PIGOTT, G.M. 1986. A reserch note: Shrinkage in fish muscle during drying. *Journal Food Science*, 51(2): 510-511.
- BERISTAIN, C.I., AZUARA, E., CORTES, R. & GARCIA, H.S. 1990. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. *Journal Food Science and Technology*, 25: 576-582.
- BHANDARI, B.R., HOWES, T. 1999. Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 40(1,2): 71-79.
- ✶ BOKI, K. & OHNO, S. 1991. Equilibrium isotherm equations to represent moisture sorption on starch. *Journal of Food Science*, 56(4): 1106-1110.
- CARBONELL, J., PIÑAGA, F., YUSÁ, V. & PEÑA, J.L. 1986. The dehydration of paprika with ambient and heated air and the kinetics of colour degratation during storage. *Journal of Food Science*, 5: 179-193.

- ✱ CHIRIFE, J. 1983. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: *Advances in drying*, ed. Arum S. Mujundar, Hemisphere Publishing Corporation. Washington, 73-102.
- CRANK, J. 1975 *The mathematics of diffusion*. Pergamon Press, Oxford.
- DAUDIN, J.D. 1983. *Calcul des cinétiques de séchage par látir chaud des produits biologiques solides. Sciences des Aliments*. 3(1): 1-36.
- DUTTA, S.K., NEMA, V.K. & BHARDWAJ, R.K. 1987. Physical properties of gram. *J. Ag. Engineering Res.*, 39(4):259-275.
- EICHLER, S., RAMON, O., LADYZHINSKI, I., COHEN, Y. & MIZRAHI, S. 1997. Collapse Processes in Shrinkage of Hydrophilic Gels during Dehydration. *Food Research International*. 30(9):719-726.
- GABAS, A.L., TELIS-ROMERO, J. & MENEGALLI, F. 1999. Thermodynamic models for water sorption by grape skin and pulp. *Drying Technology*, 17(4&5):961-974.
- HAWLADER, J.N.A., UDDIN, M.S., HO, J.C. & TENG, A.B.W. 1991. Drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering* 14: 25-268.
- HOLDSWORTH, S.D. 1971. Dehydration o food products. A review. *Journal of Food Technology*, 6: 331-370.
- HUBINGER, M.D., MENEGALLI, F.C., AGUERRE, R.J. & SUAREZ, C. 1992. Water vapor adsorption isotherms of guava, mango and pineapple. *Journal of Food Science*, 57(6): 1405-1407.

- IGLESIAS, H.A. & CHIRIFE, J. 1983. *Handbook of Food Isotherms: Water sorption parameters for food and food components*. Academic Press, Orlando.
- JAYARAMAN, K.S. & DAS GUPTA, D.K. 1992. Dehydration of fruits and vegetables - recent developments in principles and techniques. *Drying Technology* 10(1): 1-50.
- KALRA, C.L., BEERH, O.P., MANAN, J.K., TEOTIA, M.S. & SHARMA, T.C. 1986. Studies of the influence of cultivars on the quality of dehydrated onion. *Indian Food Packer*, 40(4):20-27.
- KARATHANOS, V.T. & KOSTAROPOULOS, A.E. 1995. Air-Drying Kinetics of Osmotically Dehydrated Fruits. *Drying Tecnology*. 13(5-7):1503-1521.
- KILPETRICK, P.W., LOWER, E. & VAN ARSDEL, W.B. 1955. Tunnel dehydrators for fruits and vegetables. *Adv. In Food Res.*, 6: 360.
- KIM, M. H. & TOLEDO, R. T. 1987. Effect of osmotic dehydration and high temperature fluidized bed drying on properties of dehydrated rabbieteye blueberries. *Journal of Food Science*. 52(4): 980-989.
- LENART, A. 1996. Osmo-convective Drying of Fruits and Vegetables: Technology and Aplication. *Drying Tecnology*. 14(2): 391-413.
- LEVI, A, BEM-SHALOM, N., PLAT, D. & REID, D.S. 1988. Effect of blanching and drying on pectin constituents and related characteristics of dehydrated peaches. *Journal of Food Science*, 53:1187-1190.



- LEWICKI, P.P. 1998. Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 36:81-87.
- LOZANO, J.E., ROTSTEIN, E. & URBICAIN, M.J. 1983. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science*, 48: 1497-1502.
- MADAMBA, P.S., DRISCOL, R.H. & BYCKLE, K.A. 1994. Shrinkage, density and porosity of garlic during drying. *Journal of Food Engineering*, 23(3):309-319.
- MARCOTTE, M., TOUPIN, C. J. & LEMAGUER, M. 1991. Mass Transfer in Cellular Tissues. Part I: The Mathematical Model. *Journal Food Engineering*. 13:199-220.
- MAROUSIS, S.N., KARATHANOS, V.T. & SARAVALCOS, G.D. (1989). Effect of sugar on the water diffusivity in hydrated granular starches. *Journal of Food Science*. 54: 1496-1500.
- MAROUSIS, S.N. & SARAVALCOS, G.D. 1990. Density and porosity in drying starch materials. *Journal Food Science*, 55(5):1367-13672.
- MAZZA, G. 1983. Dehydration of carrots. Effects of pre-drying treatments on moisture transport and product quality. *J. Food Technology*. 18:113-123.
- MAZZA, G & LEMAGUER, M. 1980. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. *Journal of Food Thechnology*, 15: 181-194.



- MC CORMICK, P.Y. 1983. Solids Drying Fundamentals. In: PERRY, R.H. & CHILTON, C.H., *Chemical Engineer's handbook*. Mc Graw-Hill Co., 5ed., Sec.20-4.
- MEDINA, J.C., BLEINROTH, E.W., DE MARTIN, Z.J., SOUZA JR., A.J., LARA, J.C.C., HASHIZUME, T., MORETTI, V.A., MARQUES, J.F. 1978. Frutas Tropicais 2 – Abacaxi. *ITAL – Instituto de Tecnologia de Alimentos*.
- MISRA, M.K. & BROOKER, D.B. 1980. Thin layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. *Transactions of the ASAE*, 23(5): 1254-1260.
- NELSON, S. O. 1980. Moisture dependent Kernel and Bulk-Density Relationships for wheat and corn. *Trans ASAE*, 23: 139-143.
- NIETO, A., SALVATORI, D., CASTRO, M.A., ALMAZORA, S.M. 1998. Air Drying Behaviour of Apples as Affected by Blanching and Glucose Impregnation. *Journal of Food Engineering*. 36:63-79.
- NIJHUIS, H.H., TORRINGA, E., LUYTEN, H., RENÉ, F., JONES, P., FUNEBO, T. & OHLSSON, T. 1996. Research needs and opportunities in the dry conservation of fruits and vegetables. *Drying Technology* 14(6): 1429-1457.
- NSONZI, F. & RAMASWAMY, H. S. 1998. Quality Evaluation of Osmo-Convective Dried Blueberries. *Drying Tecnology*. 16(3-5):705-723.
- OGWAL, M. & DAVIS, D.R. 1994. Rapid rehydration method for dried beans. *Journal of Food Science*, 59:611-612.



- PARRY, J.L. 1985. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: a review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32: 1-29.
- PARTI, M. & DUGMANICS, I. 1990. Diffusion coefficient for corn drying. *Transactions of the ASAE*, 33: 1652-1656.
- PATHAK, P.K., AGRAWAL, Y. & SINGH, B.P. 1991. Thin-layer drying model for rapessed. *Transactions of the ASAE*, 34: 2505-2508.
- RAHMAN, M. S. & LAMB, J. 1990. Osmotic Dehydration of Pineapple. *Journal Food Science Technology*, 27(3):150-152
- RAHMAN,S.M. & POTLURI,P.L. 1990. Shrinkage density of squid flesh during air drying. *Journal Food Ingeneering*,12(2):133-143.
- RAHMAN, S.M. & LAMB, J. 1991. Air drying behavior of fresh and osmotically dehydrated pineapple. *Journal Food Process Engeneering*, 14: 163-171.
- RANGANNA, S. 1978. *Manual of Analysis of Fruit and Vegetable Products*. New-Delhi: McGraw-Hill.
- RATTI, C. 1994. Shrinkage during drying of foodstuffs.*Journal of Food Engineering*, 23(1):91-105.
- RIZVI, S.S.H. 1986. Thermodynamic properties of foods in dehydration. *Engineering Properties of Foods*, (M.A. Rao e S.S.H. Rizvi, eds.) p. 155-165, Academic Press, New York.



- SÁ, M.M. & SERENO, A.M. 1993. Effect of temperature on sorption isotherms and heats of sorption of quince jam. *International Journal of Food Science and Technology*, 28:241-248.
- SANKAT, C.K., CASTAIGNE, F. & MAHARAJ, R. 1996. The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. *Int. J. Food Sci. Technology*. 51:123-135.
- SAPUTRA, D., PAYNE, F.A. & CORNELIUS, P.L. 1991. Puffing dehydrated bell peppers with carbon dioxide. *Transactions of the ASAE*, 34(92):475-480.
- SARAVACOS, G.D. & RAOUZEOS, G.S. 1986. Diffusivity of moisture in air drying of raisins. In: Drying 86, ed. Arum S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation, 2: 486-491.
- SAVITCI, L. A., GASPARINO FILHO, J., LEITE, R. S. S. F. & BLISKA, F. M. M. 1996. Packing house e mercado para abacaxi. *Boletim do CEPPA*, 14:181-204
- SHEPHERD, H. & BHARDWJ, R.K. 1986. Moisture dependent physical properties of pigeonpea. *J. Ag. Engineering Res.*,35(4):227-234.
- SPIES, W.E.L., WOLF, W.R. 1983. The results of the COST 90 project on water activity. In: ESCHER, F., HALLSTROM, B., MEFFERT, H.S., SPIESS, W.E.L., VOSS, G. (Ed.). *Physical Properties of Foods*, New York, Applied Science Publishers, p.65-87.
- SUAREZ, C. & VIOLLAZ, P.A. 1991. Shrinkage on drying behavior of potato slabs. *Journal of Food Technology*, 13: 103-104.



- TABEIDIE, Z., PAYNE, F.A., CORNELIUS, P.L. 1992. Puffing potato pieces with CO₂. *Transactions of the ASAE*, 35(6):1935-1940.
- TOBINAGA, S. & PINTO, L.A.A. 1992. Secagem de materiais fibrosos: músculos de peixes. In: *Tópicos Especiais em Secagem*, ed. J.T. Freire & D.J.M. Sartori, UFSCar, 1: 211-251.
- UDDIN, S.M., HAWLADER, M.N.A. & RAHMAN, S. 1990. Evaluation of drying characteristics of pineapple in the production of pineapple powder. *Journal Food Processing and Preservation*, 14: 375-91.
- VACAREZZA, L.J., LOMBARDI, J.L. & CHIRIFE, J. 1974. Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. *Journal of Food Technology*, 9: 317-327.
- VAGENAS, G.K., MARINOS-KOURIS, D. & SARAVACOS, G.D. 1990. An analysis of mass transfer in air-drying of foods. *Drying Technology*, 8: 323-342.
- VAN ARSDEL, W.B., COPLEY, M.J. & MORGAN, A.I.Jr. 1973. *Food Dehydration*, vols. 1 e 2, 2nd ed., AVI Publishing Co. Inc., Westport, Connecticut.
- VAN DEN BERG, C. & BRUIN, S. 1981. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In *Water activity: Influences on Food Quality*. Ed. L.B. Rockland and G.F. Stewart, Academic Press.
- VAN DEN BERG, C. 1984. Description of water activity of foods for engineering purpose by means of the G.A.B. model of sorption. In *Engineering and food*, v.1: Engineering Sciences in the Food



Industry, B.M. McKenna (Ed.). Elsevier Applied Science Publisher, London and New York.

VIBERG, U., FREULER S., GEKAS, V. & SJOHOLM, I. 1998. Osmotic Pretreatment of Strawberries and Shrinkage Effects. *Journal of Food Engineering*. 35:135-145.

YANG, D. C. & LEMAGUER, M. 1992. Mass Transfer Kinetics of Osmotic Dehydration of Mushrooms. *Journal Food Proc. Preservation*. 16: 215-231.

YUSHENY, Z. & POULSEN, K.P. 1988. Diffusion in potato drying. *Journal of Food Engineering*, 7: 249-262.



