

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO ENGENHARIA DE PROCESSOS

***OBTENÇÃO DE FATIAS DE BANANA DESIDRATADA CROCANTES ATRAVÉS DA
PRÉ-SECAGEM A ALTAS TEMPERATURAS E CURTO TEMPO EM LEITO
FLUIDIZADO***

Autor: Valdecir Luccas

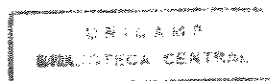
Orientador: Theo Guenter Kieckbusch

Dissertação submetida à Comissão de Pós-graduação da Faculdade
de Engenharia Química, como parte dos requisitos necessários
para obtenção do grau de mestre em Engenharia Química

96072233
Entrevista responde
a redação final da
dissertação de mestrado
defendida pela Eng.
Valdecir Luccas e aprovada
pela comissão julgadora
em 06/02/96
S.M.K.

Campinas-SP

Fevereiro de 1996



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA	T/UNICAMP
V.	L962o
E.	
T. CPD BC	27.601
PREC.	667/96
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	03/05/96
N.º CPD	

CM-00095183-6

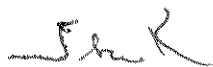
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

L962o Luccas, Valdecir
Obtenção de fatias de banana desidratada crocantes através da pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado / Valdecir Luccas.-- Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Theo Guenter Kieckbusch.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Secagem. 2. Banana. 3. Leito fluidizado.
I. Kieckbusch, Theo Guenter. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química.
III. Título.


Dissertação defendida e aprovada em 06 de Fevereiro de 1996 pela banca examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch



Prof. Dr. Alfredo de Almeida Vitali



Prof.^a Dr.^a Maria Aparecida Silva

A toda minha família e em especial
a minha esposa Silvana que, mesmo
à distância, soube compreender,
apoiar e incentivar nos momentos
mais difíceis, sempre com muito
amor, carinho e dedicação.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch pelo suporte técnico, orientação segura, apoio e dedicação com que sempre me distinguiu;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Alimentos da FEA, em especial ao Márcio Geraldo de Oliveira e à Alessandra Rodrigues da Silva pelo apoio nos trabalhos de laboratório;

À Maria Amélia Rodrigues pelas sugestões e auxílio na parte experimental, que contribuíram para a realização desse projeto de pesquisa;

Aos amigos da Faculdade de Engenharia Química pela amizade, incentivo e apoio sempre;

Ao Ministério da Educação pela concessão da bolsa de estudos (CAPES);

A todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, colaboraram para a realização do trabalho.

ÍNDICE

Nomenclatura.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
1. Introdução.....	1
2. Revisão bibliográfica.....	4
2.1. Banana.....	4
2.2. Desidratação de frutas.....	7
2.2.1. Introdução.....	7
2.2.2. Aspectos teóricos.....	8
2.2.3. Modelos matemáticos.....	10
2.3. Mudanças físico-químicas na desidratação de frutas.....	16
2.4. Frutas desidratadas de alta qualidade.....	20
3. Materiais e métodos.....	31
3.1. Matéria-prima.....	31
3.2. Pré-tratamento.....	31
3.3. Operação de secagem.....	32
3.3.1. Método de secagem utilizado.....	32
3.3.2. Equipamentos.....	32
3.3.2.1. Secador de leito fluidizado.....	32
3.3.2.2. Secador de bandejas.....	35
3.3.3. Desenvolvimento experimental.....	36
3.4. Aferição dos termopares.....	38
3.5. Análises.....	39

3.5.1. Sólidos solúveis.....	39
3.5.2. Teste qualitativo de peroxidase.....	39
3.5.3. Teor de umidade.....	40
3.5.4. Densidade real.....	40
3.5.5. Reidratação.....	42
Resultados e discussão.....	43
4.1. Definição das condições de operação.....	44
4.1.1. Estádio de maturação.....	44
4.1.2. Soluções infiltrantes.....	45
4.1.3. Pré-tratamento com amido.	46
4.1.4. Branqueamento.....	47
4.1.5. Temperatura de secagem.....	48
4.2. Dinâmica de expansão de volume durante a secagem.....	54
4.3 Inativação enzimática.....	66
4.4 Efeito da pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo (HTST) em secador de leito fluidizado na qualidade de fatias de banana prata desidratadas.....	68
4.5 Estudo cinético da secagem de banana-prata em secador de leito fluidizado e ajuste de modelos matemáticos aos dados experimentais.....	74
4.5.1. Cinética de secagem.....	74
Conclusões.....	86
Apêndice.....	89
Referências bibliográficas.....	94

NOMENCLATURA

a_w	Atividade de água do produto (eq. A-1 - Apêndice A)
C	Constante de Guggenheim (eq. A-2 - Apêndice A)
D	Coefficiente de difusão, m^2/s (eq. 2.1)
k	Constante (eq. 2.2), (eq. 2.3) e (eq. 2.4)
K	Coefficiente angular da parte inicial da curva de secagem ou taxa inicial de secagem, s^{-1} . Pode ser obtido pelas equações (eq. 2.7) e (eq. 2.8)
K	Constante (eq. A-2 - Apêndice A)
p	Pressão de vapor d'água do produto (eq. A-1 - Apêndice A)
p_o	Pressão de vapor da água pura na mesma temperatura (eq. A-1 - Apêndice A)
Pr	Pressão parcial de vapor d'água no ar de secagem, N/m^2 (eq. 2.7) e (eq. 2.8)
Prs	Pressão de vapor d'água na temperatura de bulbo seco do ar de secagem, N/m^2 (eq. 2.7)
pw	Pressão de vapor d'água na temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, N/m^2 (eq. 2.8)
R	Resistência ao transporte de massa, Ns/m^2 (eq. 2.7)
Rt	Resistência ao transporte de massa, Ns/m^2 (eq. 2.8)
S	Soma dos quadrados dos resíduos
t	Tempo de secagem
T	Temperatura, $^{\circ}C$
tr	Tempo reduzido (eq. 2.6)
UR	Umidade relativa de equilíbrio do produto, % (eq. A-1 - Apêndice A)
V_s	Volume das fatias de banana, cm^3 (eq. 3.3)
x	Teor de umidade, gramas amostra/gramas matéria seca
X	Temperatura experimental dos termopares, lida no indicador, $^{\circ}C$ (eq. 3.1) e (eq. 3.2)
xe	Teor de umidade de equilíbrio, gramas amostra/gramas matéria seca

X_m	Teor de umidade da monocamada, gramas amostra/gramas matéria seca (eq. A-2 - Apêndice A)
x_o	Teor de umidade inicial, gramas amostra/gramas matéria seca
x_r	Teor de umidade adimensional = $(x-x_e)/(x_o-x_e)$ (eq. 2.3)
Y	Temperatura corrigida dos termopares, °C (eq. 3.1) e (eq. 3.2)
ρ	Densidade real, g/cm ³ (eq. 3.3)
δ	Desvio padrão

RESUMO

Desenvolveu-se um processo em leito fluidizado visando produzir bananas desidratadas com propriedades funcionais adequadas para consumo na forma de “snacks”. Rodelas de 1 centímetro de espessura seccionadas em quatro partes iguais foram submetidas a um fluxo de ar a altas temperaturas (130 e 150 °C) e curto tempo (15 e 6 minutos) em uma etapa de pré-secagem HTST, proporcionando a rápida formação de uma camada externa rígida, que limitou o encolhimento e deformações. Temperaturas superiores a 100 °C, medidas no interior das fatias, induziram à geração de vapor d’água com expansão de volume devido ao aumento na pressão interna, formando uma estrutura porosa, “puffing”, na matriz e inativando as peroxidases presentes na fruta. A desidratação final do produto expandido foi realizada em um secador de bandejas.

Os melhores resultados foram obtidos com banana-prata com estágio de maturação entre 14 a 18 °Brix, imersas durante 2 minutos em uma suspensão de amido de mandioca gelatinizado (2 % em peso) à temperatura ambiente, e pré-desidratadas durante 12 minutos no secador de leito fluidizado que operou a 130 °C e 10 m/s. A secagem final foi realizada em um secador de bandejas durante 5,5 horas, com ar a 70 °C e 1,25 m/s. O produto final (6% de umidade) apresentou alto índice de reidratação, cor atraente, baixa densidade real e crocância. A expansão de volume, medida através da variação das densidades, mostrou ser função da temperatura do ar na pré-secagem HTST e do estágio de maturação da fruta.

As curvas de secagem foram bem correlacionadas com o modelo de Page e o modelo das Duas Resistências de Brunello.

Palavras-chave: banana, HTST, “puffing”, leito fluidizado, secagem

ABSTRACT

A fluidized-bed process was developed aiming the production of dehydrated bananas, with functional properties suitable to be consumed as snacks. Slices, 1 cm-thick, were sectioned in 4 parts and submitted to an air flow at high temperature (130° and 150°) for short times (15 and 6 minutes), as an HTST pre-treatment, enhancing case hardening, and, as a consequence, minimizing particle shrinkage and deformations. Temperatures above 100 °C, measured inside the fruit pieces induced water vapor generation that expanded the samples due to increase in internal pressure, puffing the cellular matrix and inactivating the peroxidase. The dehydration of the expanded product was finished in a tray dryer.

The best results were obtained with the “prata” variety, just mature (14° to 18° Brix), immersed for 2 minutes in a suspension of gelatinized cassava starch (2 weight %) at ambient temperature, and pre-dehydrated during 12 minutes in a fluidized-bed dryer operating with air at 130 °C and 10 m/s. The final tray-drying lasted 5,5 h, with air at 70 °C and 1,5 m/s. The product obtained (6 % moisture) showed high rehydration rates, attractive color, low true density and crispness. The volume expansion estimated through the change in density was a function of HTST temperature and of the degree of ripening of the fruit.

The drying curves correlated well with Page and Two-Resistance models.

key-words: bananas, HTST, puffing, fluidized-bed, drying

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de banana, com um volume anual de 5 a 7 milhões de toneladas (FAO, 1990). É também o país que apresenta o maior consumo per capita com cerca de 40 kg/habitante, ano (MOREIRA, 1987).

Dentre as produções frutíferas brasileiras, a banana é a que mais se destaca quanto à sua importância econômica, sendo seguida pela citricultura (MEDINA, 1985).

As maiores plantações de banana estão localizadas nos estados do Ceará, Bahia, São Paulo, Pernambuco, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Santa Catarina e os cultivares prata, pacova (uma mutação mais resistente da prata), maçã, nanica, nanicão e da terra dominam o mercado interno (FILGUEIRAS, 1990)

Nas regiões Norte e Nordeste, 70 % da produção são do cultivar prata, 20 % são do cultivar maçã e 10 % são do cultivar da terra. Nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro a produção do cultivar prata também é dominante, enquanto que São Paulo e Santa Catarina possuem grandes polos de produção de nanica e nanicão.

A banana constitui, hoje, a principal fonte de divisas para vários países, sobressaindo-se, entre eles, Equador, Costa Rica, Filipinas e Honduras. No Equador essa fruta contribui com 60 % das entradas de divisas do país. Dos 75 milhões de cachos produzidos, 62 % destinam-se à exportação, em contraste com o Brasil que, com aproximadamente 500 milhões de cachos,

exporta apenas 3 %, principalmente para a Argentina (MEDINA, 1985). Em consequência, existe uma grande disponibilidade de matéria-prima no Brasil, e a falta de um mercado garantido tende a acarretar grandes perdas.

Em face aos fatores levantados acima, fica evidente a necessidade de abrir novos mercados para a comercialização de banana, e uma das formas é sua industrialização. Mesmo que o objetivo principal do produtor seja a comercialização direta, a industrialização da fruta pode absorver grande parte dos excedentes de produção.

Dentre os produtos industrializados de banana destaca-se a banana-passa, comumente produzida a partir do cultivar nanica em um estágio de maturação bem avançado, onde a casca da fruta apresenta manchas marrons. Na maioria das vezes a secagem é realizada em secadores com circulação forçada de ar quente a 70 °C e 2,5 m/s. Nessas condições o tempo de secagem necessário para se obter uma umidade final de 20 %, em base úmida, é de aproximadamente 24 horas, para bananas inteiras (TRAVAGLINI et al., 1993).

O comércio de frutas desidratadas com baixo teor de umidade, consumidas na forma de “snacks”, ainda não é explorado no Brasil. É importante levar em consideração que para se obter esse produto com uma boa qualidade é necessário utilizar matérias-primas adequadas e métodos e condições de secagem apropriados, uma vez que ocorrem diversas alterações físico-químicas durante o processamento como encolhimento, escurecimento e perda de nutrientes e componentes voláteis. Métodos tradicionalmente aplicados para se obter frutas desidratadas com baixo teor de umidade envolvem a desidratação em secadores de bandeja e secadores de túnel, em condições moderadas de temperatura e baixa velocidade de ar. Esses métodos, entretanto, não são eficazes e os produtos finais se encolhem, tornando-se duros e difíceis de se mastigar. Um método conhecido de se evitar parte dessas alterações é a liofilização, porém é um processo lento e muito caro comparado com outras técnicas de secagem, sendo aplicado apenas em

produtos de alto valor agregado. “Explosion-puffing” também tem sido bastante utilizado para algumas frutas e hortaliças, originando produtos de boa qualidade.

O objetivo desse projeto de pesquisa foi o de produzir banana desidratada de baixo teor de umidade com propriedades funcionais superiores, através do uso de novos métodos e condições de secagem, abrindo novos mercados para a comercialização da fruta. Destaca-se ainda a utilização da banana-prata, haja visto a grande produção e falta de industrialização desse cultivar no país.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Banana

A banana é uma fruta de consumo universal, apreciada por pessoas de todas as classes e de todas as idades. Possui alto valor nutritivo e excelentes sabor e aroma. É uma das frutas mais consumidas no mundo, e nenhuma a supera em importância no comércio internacional (MEDINA, 1985).

As possibilidades de processamento da banana são múltiplas, nas formas mais variadas como purês (congelado, asséptico, acidificado e preservado quimicamente), néctar, fruta em calda, produtos desidratados (flocos, banana-passa, banana liofilizada), geléias, doces em massa (bananada) e uma série de outros produtos ou sub-produtos, dos quais alguns apresentam grande viabilidade de industrialização no Brasil (MARTIN *et al.*, 1985).

A banana sofre diversas alterações em sua estrutura e composição química durante a maturação, e o conhecimento dessas alterações é de fundamental importância no processamento e preservação. Estas mudanças estão relacionadas com a presença de uma grande variedade de enzimas na fruta. Segundo BLEINROTH (1985), são encontradas na banana: peroxidase, fenolase, catalase, amilase, polifenoloxidase, invertase, oxidase do ácido ascórbico entre outras.

A polpa da banana verde é composta por um grande número de células, cujas membranas são constituídas, principalmente, de substâncias insolúveis denominadas protopectina. Internamente encontram-se numerosos grãos sólidos de amido. A presença dessas substâncias tornam as células mais resistentes à deformações mecânicas, conferindo a elas uma sensação de firmeza.

Na maturação, a protopectina é parcialmente transformada em pectina solúvel pela ação de enzimas. Simultaneamente, o amido é convertido, pela amilase, em açúcares solúveis, que se dispersam na matéria sólida do interior das células, formando uma massa semi-sólida, causando um amolecimento das membranas das células e, conseqüentemente, tornando a banana verde e dura em macia e saborosa.

FERNANDES *et al.* (citado por BLEINROTH, 1985) realizaram estudos sobre algumas modificações químicas que ocorrem durante a maturação de banana-prata. Os resultados são mostrados na Tabela 2.1

TABELA 2.1. Transformações químicas que ocorrem durante a maturação de banana do cultivar prata (de BLEINROTH, 1985)

Maturação (escala visual)	Sólidos Solúveis (%)	Acidez (ácido málico)	Amido (%)	Açúcares		
				Redutores	Não Redutores	Totais
Muito Verde	3,40	0,25	23,30	-----	-----	-----
Verde	9,00	0,48	19,80	5,40	1,10	6,50
Amarelo-Verde	23,50	0,57	7,90	15,60	3,40	18,90
Maduro	26,90	0,67	2,90	15,70	4,70	20,40
Muito maduro	26,00	0,52	0,63	16,20	6,50	22,70

O teor de sólidos solúveis aumenta rapidamente a medida que a fruta amadurece, devido a degradação do amido em açúcares solúveis. Quando a fruta está madura, apresentando manchas marrons, esse teor de solúveis sofre uma leve diminuição. Em trabalhos feitos com banana nanica, SGARBIERI & FIGUEIREDO (1965/1966) constataram que este cultivar apresentou um estágio de maturação ótimo quando o teor de amido foi menor que 1% e os açúcares totais em torno de 15%.

A banana verde apresenta baixa acidez orgânica. Esta por sua vez aumenta no início da maturação até atingir um máximo quando a casca está totalmente amarela, para depois decrescer. O ácido que se encontra em maior quantidade na banana é o ácido málico, seguido pelos ácidos oxálico, cítrico, acético e butírico.

Informações sobre sabor, aroma, umidade e coloração de bananas são fornecidas por BLEINROTH (1985):

A adstringência na banana verde é causada pelo tanino livre, presente em maior proporção na casca do que na polpa. Com a maturação, o teor de tanino tende a decrescer e, em algumas variedades como a banana-prata, praticamente desaparece quando está muito madura.

O aroma é caracterizado pela presença de componentes voláteis como aldeídos, cetonas, ésteres e os álcoois metílico, etílico e isoamílico que, somados ao agradável sabor, tornam a banana uma fruta de alta qualidade.

A umidade da polpa aumenta durante a maturação devido à absorção de água proveniente principalmente da casca, e também devido às transformações sofridas pelos carboidratos. O conteúdo de umidade da polpa da banana verde depende da variedade, e situa-se por volta de 70 %, aumentando, depois de madura, para aproximadamente 75 %.

A cor amarela da casca deve-se à destruição da clorofila por ação enzimática, fazendo com que o caroteno e a xantofila se tornem cada vez mais evidentes com o progresso da maturação.

De acordo com BLEINROTH (1985), a banana constitui-se num alimento de alto valor energético, além de possuir vitaminas e sais minerais em quantidades apreciáveis. As vitaminas presentes na banana são a A, C, algumas do complexo B como a tiamina ou vitamina B₁, na proporção de 0,40 a 0,60 mg por 100 gramas

de matéria seca, e a riboflavina ou vitamina B₂, no teor de 0,80 a 0,90 mg, além de outras vitaminas que estão presentes em menor percentagem como a niatina.

O teor de ácido ascórbico (vitamina C) decresce durante a maturação de 0,15 a 0,20 mg por 100 gramas de matéria seca, quando a casca apresenta coloração amarelo-verde, para 0,10 a 0,11 mg à medida que vai amadurecendo e apresentando a cor amarelada, atingindo a proporção mais baixa quando a fruta apresenta manchas marrons na casca, enquanto que a vitamina A aumenta de 160-200 U.I. para 450 -500 U.I. em 100 gramas de matéria seca.

Entre os minerais presentes na banana, salientam-se: potássio (350 a 400 mg por 100 gramas de matéria seca); fósforo (25 a 35 mg); cálcio (8 a 10 mg); sódio (40 a 50 mg); magnésio (25 a 35 mg) e outros em menores quantidades como ferro, manganês, iodo, cobre, alumínio e zinco.

Com relação a proteínas, a banana apresentam um baixo teor, estando presentes, principalmente, a albumina e a globulina.

2.2. Desidratação de frutas

2.2.1. Introdução

A desidratação de frutas tem como principal objetivo a sua conservação. O processo consiste em reduzir o teor de água até um determinado nível, no qual a concentração de açúcares, ácidos, sais e outros componentes seja suficientemente alta para reduzir a atividade de água, impedindo o crescimento e a reprodução de microrganismos responsáveis pela deterioração do alimento (TRAVAGLINI *et al.*, 1993). Em consequência da retirada da umidade, haverá redução no peso e volume, minimizando custos com embalagens, transporte e estocagem.

2.2.2. Aspectos teóricos

A desidratação convencional envolve a aplicação artificial de calor para remover a água de materiais sólidos, por evaporação. A corrente de ar é o meio mais comum de transferir calor ao material, servindo também como veículo no transporte de vapor úmido, e a convecção é o principal mecanismo envolvido. Segundo TRAVAGLINI *et al.* (1993), além do baixo custo de instalação e facilidade de operação do secador, o ar quente mostra-se, até o presente momento, o mais adequado agente de secagem para frutas.

Outro tipo de desidratação bastante utilizado em frutas e hortaliças é a desidratação osmótica. Nesse método, fatias de frutas e hortaliças são imersas em uma solução hipertônica, que normalmente é açúcar ou sal, ocorrendo uma transferência simultânea de soluto e água através das membranas das células, provocada pela alta pressão osmótica da solução. Aplicações desse método incluem a produção de frutas e hortaliças com teor intermediário de umidade e diversos pré-tratamentos para melhorar as propriedades organolépticas do produto, minimizar o encolhimento e reduzir o consumo de energia quando são posteriormente desidratadas por métodos convencionais.

Durante a desidratação convencional ocorrem dois processos que podem se dar simultaneamente: transferência de calor para evaporar o líquido e transferência de massa, na forma de líquido ou vapor no interior do material, e na forma de vapor na superfície. Os fatores que governam a velocidade desses fenômenos de transferência determinam a taxa de secagem, tais como pressão de vapor d'água no material e no ar de secagem, temperatura e velocidade do ar, velocidade de difusão da água no material, espessura e superfície exposta para secagem (VAN ARSDEL, 1973).

De um modo geral, os materiais apresentam duas ou mais fases distintas de secagem, uma que ocorre a taxa de evaporação constante, e nas demais a taxa de

evaporação é decrescente. Quando um material úmido entra em contato com uma corrente de ar aquecida com velocidade, temperatura e umidade constantes, o comportamento da secagem pode ser representado pela Figura 2.1

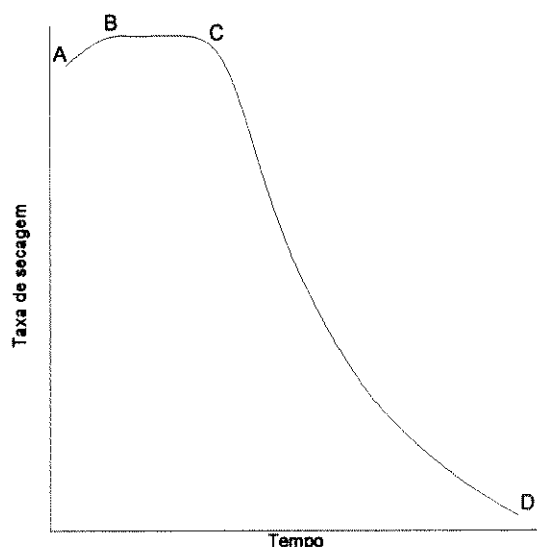


FIGURA 2.1. Curva típica da taxa de secagem.

A região correspondente ao segmento AB é um período de ajuste. O segmento BC representa a primeira fase do processo, denominado período de taxa constante de secagem, mas que na maioria dos alimentos não existe devido à grande higroscopicidade dos mesmos. TRAVAGLINI *et al.* (1993), classificam a banana como sólido não-poroso, onde a umidade está intimamente presa à estrutura, e o período de taxa constante de secagem não chega a ser detectado. Neste período, a água se difunde para a superfície do material tão rapidamente quanto possa ser evaporada, e geralmente a temperatura do material é a de bulbo úmido do ar de secagem. As taxas de transferência de calor e transferência de massa estão em equilíbrio, e a taxa de secagem é controlada pelos fatores externos.

Esse período termina quando a migração interna de água para a superfície não consegue mais compensar a taxa de evaporação da água livre na superfície. O valor da umidade nesse ponto é denominado de umidade crítica (x_c). Para condições de

secagem fixas, esse conteúdo de umidade crítica é característico de cada material e de suas dimensões (MOWLAH *et al.*, 1983).

Abaixo da umidade crítica, a taxa de secagem começa a decrescer, e a temperatura do material se aproxima da temperatura de bulbo seco de ar tendo-se o período CD, que é denominado de período de taxa decrescente de secagem, onde os processos difusivos de água no interior do material para sua superfície controlam a operação de secagem.

A secagem de materiais biológicos é caracterizada por apresentar um importante período de secagem a taxa decrescente. De acordo com SARAVACOS e CHARM (1962), a velocidade de secagem durante esse período decresce continuamente, e tempos prolongados de secagem são necessários para alcançar um conteúdo de umidade baixa. O período de taxa de secagem decrescente continua até alcançar o teor de umidade de equilíbrio.

2.2.3. Modelos matemáticos

Como a secagem de materiais alimentícios é um processo que envolve simultaneamente os mecanismos de transferência de calor e massa, deve-se partir desses princípios para se obter um modelo matemático que represente bem os dados experimentais. Entretanto, isso às vezes torna-se difícil devido à complexa estrutura do alimento e às mudanças químicas e físicas que ocorrem durante a sua desidratação, levando a uma redução na qualidade organoléptica e valor nutritivo.

Por exemplo, o encolhimento que os alimentos sofrem com a remoção de umidade durante o processo de desidratação deve ser levado em consideração nas equações de transferência de calor e massa durante a modelagem. Embora o conhecimento dessa alteração física seja essencial para o melhor entendimento da

secagem, a função desse efeito nas equações de transferência ainda não é bem conhecida para a maioria dos alimentos.

Uma aproximação empírica foi sugerida por LOZANO et al. (1983) que mediram o coeficiente de encolhimento de vários materiais alimentícios. O efeito do encolhimento na remoção de umidade de alimentos também foi analisado por MISRA & YOUNG (1980), que assumiram a difusividade como dependente da concentração. Anos mais tarde, VIOLLAZ & SUAREZ (1985) estudaram a difusão isotérmica não estacionária em placas planas porosas que encolhiam ou expandiam em função da variação de umidade, e descobriram que não é necessário assumir a difusividade como dependente da concentração para uma modelagem dos dados experimentais.

Sabe-se também que a velocidade das reações que ocorrem no interior dos alimentos é fortemente influenciada pela variação de umidade durante a desidratação. Assim, numerosos estudos têm sido realizados para representar o período à taxa decrescente de secagem através de modelos matemáticos. Isso pode ser feito de duas formas: a primeira é assumir que um determinado mecanismo de movimento de umidade prevalece no interior do material, e desenvolver modelos para representar esse mecanismo. A segunda forma é construir a curva de secagem do material e ajustar modelos já existentes a essa curva.

A teoria que tem apresentado mais aceitação é a teoria da migração de água por difusão, que se apóia exclusivamente na 2ª lei de FICK, expressa em termos de gradiente de umidade.

LEWIS (1921) e SHERWOOD (1929) foram os primeiros que fizeram referências a esta lei, interpretando a secagem como um fenômeno de difusão de água líquida. A relação fundamental é apresentada na forma geral a seguir:

$$\frac{dx}{dt} = - \nabla \cdot (D \cdot \nabla x) \quad (2.1)$$

onde:

x = teor de umidade no tempo t , base seca

t = tempo de secagem, segundos

D = coeficiente de difusão m^2/s

Assume-se volume constante, o que é uma abstração pois a água que evapora, na maioria dos casos de produtos alimentícios, é parte integrante da matriz estrutural.

Diversas soluções analíticas da equação de difusão para diferentes condições iniciais e de contorno, considerando a difusividade constante ou variando com a concentração de água, foram obtidas por CRANK (1975). Ele utilizou a difusividade aparente que engloba os diversos efeitos que possam intervir no mecanismo de migração.

Bons resultados tem sido obtidos através da utilização de modelos empíricos. O modelo exponencial ou logarítmico foi usado por LEWIS (1921) e é representado pela equação abaixo:

$$\frac{dx}{dt} = -k(x - x_e) \quad (2.2)$$

ou

$$xr = \frac{(x - x_e)}{(x_0 - x_e)} = \exp(-kt) \quad (2.3)$$

onde:

xr = teor de umidade adimensional

x_e = teor de umidade de equilíbrio, base seca

x_0 = teor de umidade inicial, base seca

Esse modelo é análogo à lei de resfriamento de Newton na transferência de calor, sendo muito utilizado para descrever a secagem de materiais agrícolas. Considera-se que a resistência à difusão ocorre, principalmente, nas camadas mais externas do material.

Levantamentos mais precisos de dados indicaram, entretanto, que a equação (2.3) não se aplica a toda a curva de secagem a taxa decrescente. Um expoente de ajuste n no termo tempo, foi proposto por PAGE (1949), para ampliar a validade do modelo para toda a curva.

$$xr = \frac{(x - xe)}{(xo - xe)} = \exp(-k t^n) \quad (2.4)$$

Onde k e n são constantes de secagem que acabam não tendo um significado físico definido, embora MISRA & BROOKER (1980) relacionem n com as condições internas do material, enquanto que k representa os efeitos das condições externas.

Uma correlação generalizada que representa as curvas de secagem correspondentes a várias temperaturas foi proposta por BRUNELLO *et al.* (1976). Obtem-se um curva de secagem única, independente da temperatura do ar e da massa do material. A correlação é denominada Modelo de Duas Resistências, onde o teor de umidade adimensional xr é plotado em função do tempo reduzido tr , dados a seguir:

$$xr = \frac{x}{xo} \quad (2.5)$$

$$tr = \frac{Kt}{xo} \quad (2.6)$$

onde:

tr = tempo reduzido

K = coeficiente angular da parte inicial da curva de secagem, ou seja, a taxa inicial de secagem.

De acordo com o modelo, substâncias solúveis presentes nos alimentos conferem uma baixa pressão de vapor no seu interior. Como durante a secagem a água sai do produto, é de se esperar que a pressão de vapor no seu exterior seja menor. Para que isso aconteça, conclui-se que na região externa a água se encontre no estado vapor, ou seja, que a evaporação se de junto à face interna da superfície, constituindo-se numa primeira resistência à secagem. Com a saída de umidade através da membrana, o soluto se concentra no lado interno agindo como uma segunda resistência ao movimento de umidade. Baseado nessas considerações, o valor de K é calculado analiticamente como segue:

$$K = \frac{1}{\{[R / (Pr_s - Pr)] + F\}} \quad (2.7)$$

onde:

Pr_s = pressão de vapor d'água na temperatura de bulbo seco do ar de secagem ,
N/m²

Pr = pressão parcial de vapor d'água no ar de secagem , N/m².

R = resistência ao transporte de massa, Ns/m²

F = fator de correção, s.

Esse modelo tem apresentado bons resultados quando aplicado a cereais com umidade inicial superior a 25 % (base seca), onde o modelo da difusão não representa bem o mecanismo de migração da água através do grão (BECKER, 1959).

Uma simplificação no modelo foi proposta por BRUNELLO & NASCIMENTO (1979).

$$K = (P_w - P_r) / R_t \quad (2.8)$$

onde:

P_w = pressão de vapor d'água na temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, N/m².

R_t = resistência ao transporte de massa, Ns/m².

Eles obtiveram bons resultados utilizando esse modelo na secagem de sorgo, milho, malte e trigo. A partir do valor de K , calculado experimentalmente, utiliza-se a equação (2.7) ou (2.8) para prever o comportamento de secagem sob outras condições.

A velocidade das transformações no interior dos alimentos também é fortemente influenciada pela temperatura durante a desidratação. O conhecimento da distribuição de temperatura como função do tempo de secagem, portanto, torna-se importante.

ALZAMORA et al. (1979) utilizaram um modelo simplificado de transferência de calor para prever a temperatura de pedaços de frutas e hortaliças durante a desidratação. A principal vantagem do modelo utilizado é a sua simplicidade, uma vez que a solução é analítica, e requer apenas o conhecimento da curva de secagem do alimento e de estimativas não muito precisas dos valores da difusividade térmica. Eles obtiveram bons resultados para abacate, maçã, batata e beterraba.

De acordo com SUN & MEUNIER (1987), os modelos difusionais podem ser classificados em duas categorias: “isotérmicos” e “com perfil de temperatura uniforme”.

No primeiro caso é assumido uma rápida transferência de calor e relativamente lenta difusão de umidade, e a secagem ocorre praticamente na temperatura de bulbo seco do ar. Essa hipótese tem sido largamente utilizada na literatura para estimar o coeficiente de difusão de umidade de vários materiais alimentícios. Em particular, a secagem de alimentos com relativamente baixo teor de umidade inicial, como sementes e grãos, tem apresentado bons resultados (BECKER & SALLANS, 1955; CHU & HUSTRULID, 1968; SUAREZ et al., 1980; LI & MOREY, 1984; TOLABA & SUAREZ, 1988). A evidência experimental da rápida aproximação da temperatura do grão para a temperatura do ar e a pequena mudança no volume do produto durante a secagem são as principais razões dos bons resultados.

Por outro lado, o modelo “com perfil de temperatura uniforme” assume uma condutividade térmica infinita do produto, de maneira que a temperatura seja uniforme através da amostra que está sendo desidratada mas varia com o tempo. Resultados obtidos por VACAREZZA et al. (1974) durante a secagem de fatias de beterraba confirmaram essa hipótese. Os pesquisadores assumiram a simplificação de condutividade térmica infinita para formular os balanços de calor e massa e resolveram numericamente as equações diferenciais resultantes.

2.3. Mudanças físico-químicas na desidratação de frutas

Segundo HOLDSWORTH (1971), a qualidade organoléptica global de um produto alimentício desidratado é influenciada pelos seguintes aspectos físico-químicos: estrutura e composição da matéria-prima, encolhimento durante a secagem, perda de nutrientes e componentes voláteis, reações de escurecimento e mudanças na textura. Exceto para a estrutura e a composição da matéria-prima, a ocorrência dessas alterações dependem, em grande parte, das condições utilizadas durante o processo de desidratação (JEN et al., 1989).

Estrutura e composição da matéria-prima e encolhimento durante a desidratação alteram a textura do produto, diminuindo a absorção de água durante a reidratação. De acordo com REEVE (1970), a textura de frutas e hortaliças está relacionada com a estrutura fisiológica, ou seja, tamanho celular, componentes intercelulares, espessura da parede celular, e com a composição da parede. As microfibrilas celulósicas formam a arquitetura básica dessas paredes celulares. Os espaços entre as microfibrilas são ocupados por substâncias que incluem, principalmente, polissacarídeos amorfos, pectina e hemicelulose. Substâncias pécticas e ar podem estar presentes na lamela média e nos espaços intracelulares. A destruição da parede celular determina as mudanças na textura de frutas e hortaliças durante o processamento.

BROWN (1977), também afirma que a textura de hortaliças depende, sobretudo, da composição das células e da resistência das paredes celulares. Quando *in natura*, o conteúdo celular exerce uma pressão interna nas paredes celulares das frutas e hortaliças, permitindo com que as células resistam às deformações mecânicas conferindo uma sensação de firmeza, denominada turgor. Durante o processo de desidratação, água intracelular é removida, aliviando o turgor, resultando no colapso das paredes celulares e no encolhimento do produto. A extensão do colapso celular depende do material, podendo ser total e irreversível nos casos de produtos cujas paredes celulares são muito frágeis. Nestes casos, durante a reidratação o produto absorve apenas uma fração da umidade original, ou seja, a umidade absorvida é somente intercelular.

Em vegetais como a cenoura, a presença de certas substâncias como amido, lignina e lipídeos nas células diminui a extensão do colapso celular (REEVE, 1943). O mesmo autor mostrou também que em produtos ricos em amido, como a batata, o carboidrato contido nas células fortalece a estrutura celular, diminuindo a extensão do colapso das células durante a desidratação.

O escurecimento de alimentos é provocado por reações complexas que ocorrem quando estes são processados. Para alguns, o escurecimento é altamente desejável, como por exemplo café torrado, produtos assados, batatas fritas tipo *chips*, porém, para outros, a ocorrência dessas reações são indesejáveis, como no caso de algumas frutas desidratadas e sucos de laranja concentrados.

No caso de frutas desidratadas, dois tipos de reações de escurecimento podem ocorrer durante e após o processamento: enzimático e não-enzimático (TRAVAGLINI *et al.*,1993). O escurecimento enzimático ocorre principalmente nas operações de preparo, quando a estrutura celular é danificada por uma ação física, como descascamento e corte, e também durante o processo de desidratação da fruta, e é causado pela ação de enzimas do grupo das polifenoloxidasas , que podem alterar a cor e o sabor do produto final.

Para que ocorra o escurecimento enzimático, três componentes devem estar presentes: enzima, substrato e oxigênio. Normalmente os substratos naturais se encontram separados da polifenoloxidase em tecidos intactos, e o escurecimento não ocorre. A partir do momento em que a estrutura celular é danificada, ocorrerá um rápido escurecimento devido à oxidação enzimática de compostos fenólicos presentes para ortoquinonas que, por sua vez, polimerizam-se rapidamente para formar pigmentos escuros. As enzimas atuam apenas no início da reação ao passo que as reações que seguem não são enzimáticas (FENNEMA, 1976).

O segundo tipo de reação de escurecimento que ocorre em frutas é conhecido como reação de Maillard, e ocorre tanto no processamento como no armazenamento. Consiste na reação entre aminoácidos e açúcares redutores, levando à formação de compostos escuros de alto peso molecular; as melanoidinas ou melaninas (FENNEMA, 1976).

De acordo com MUDAHAR *et al.* (1989), o escurecimento não-enzimático ocorre principalmente na etapa final de secagem, quando o conteúdo de

umidade é baixo e a temperatura do material é maior que a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem.

MOWLAH *et al.* (1983) desidrataram bananas branqueadas, em ar quente a 60 °C e 1,5 m/s , e observaram que a amostra começou a escurecer após 8 horas de secagem quando 90 % da umidade já tinha evaporado, e que à medida que o conteúdo de umidade foi decrescendo o escurecimento foi aumentando.

Diversos recursos são utilizados para evitar ou minimizar essas reações: tratamentos térmicos para a inativação de enzimas é um meio bastante efetivo, principalmente nas fase de preparo da fruta. No entanto, a aplicação do método físico depende das características da matéria-prima. No caso específico da banana, essa prática não é recomendada devido a alterações irreversíveis e indesejáveis à textura da polpa, diminuindo a qualidade do produto final (TRAVAGLINI *et al.*, 1993). O método químico também é bastante utilizado, através do uso de agentes inibidores dessas reações, tais como os ácidos ascórbico e cítrico ou sulfitos. O SO₂ ou anidrido sulfuroso tem ação inibidora em ambos os tipos de reações. BARNETT (citado por TRAVAGLINI *et al.*, 1993) afirma que a inibição da polifenoloxidase, pelo uso de sulfitos, ocorre devido à ação do ion sulfito (SO₃⁻²) nas pontes de dissulfito da proteína, rompendo as ligações e perdendo-se a proteína interligada.

Quando frutas são processadas termicamente, poderá haver alterações nas propriedades organolépticas e no valor nutritivo. O sabor está relacionado ao seu aroma que é produzido por um grande número de compostos, relativamente voláteis, presentes nas frutas. Entre eles, podemos citar hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, ésteres, cetonas e outros. Muitos desses compostos podem se perder, tanto no processamento como no armazenamento, alterando as características organolépticas da fruta. Este problema pode ser parcialmente resolvido, utilizando-se baixas temperaturas de processamento, embalagens eficientes ou pelo uso de aromas artificiais. Segundo JEN (1989), grande parte das vitaminas presentes em

frutas se perdem durante o processamento. Uma prática muito comum hoje em dia, é a reposição dos nutrientes perdidos para enriquecer o valor nutritivo dos produtos processados. Desta forma, muitas frutas processadas podem conter mais nutrientes do que *in natura*. Esses produtos adicionados não são considerados como aditivos, pois segundo o FAO, aditivo é definido como: "substância não-nutritiva adicionada intencionalmente ao alimento, geralmente em quantidades pequenas, para melhorar a aparência, sabor, textura e propriedades de armazenamento".

2.4. Frutas desidratadas de alta qualidade

Um dos principais problemas que ocorrem durante a desidratação de frutas é o encolhimento, que prejudica a sua aparência, textura e reidratação. Normalmente a fruta seca é dura, enrugada e sem a presença de poros, tornando-se difícil de mastigar e pouco atraente ao consumidor.

A presença de uma estrutura porosa em frutas desidratadas com baixo teor de umidade é altamente desejável, pois a torna crocante. A crocância é uma propriedade organoléptica caracterizada por várias fraturas sucessivas do produto quando mastigado (TORREGGIANI & TOLEDO, 1990).

Outra vantagem é a facilidade de absorção de água durante a reidratação. Essa característica é particularmente importante para frutas e hortaliças que são utilizadas em produtos de conveniência como ingredientes para sopas e refeições instantâneas, massas de bolos e panetones.

A obtenção de uma estrutura porosa em frutas e hortaliças desidratadas tem sido explorada por diversos pesquisadores. Um processo tradicionalmente utilizado para atingir esse objetivo é a liofilização ou "Freeze-Drying", que demonstrou ser um método superior de desidratação para uma grande variedade de frutas. Neste processo de secagem ocorrem basicamente duas etapas: a fruta *in*

natura é primeiro congelada e em seguida é desidratada, sob condições de baixa pressão, até atingir um conteúdo de umidade por volta de 2 %. A umidade é removida por sublimação, ou seja, converte-se diretamente de gelo para vapor, deixando espaços vazios no interior do produto.

Esse processo tem sido utilizado, com sucesso, em frutas como cerejas, morangos e “blueberries” (ANÔNIMO, 1982) e bananas (VAN ARSDEL et al., 1973). Para o caso específico de bananas, os autores afirmam que a fruta desidratada possui excelente qualidade, com uma estrutura porosa e que se reconstitui rapidamente durante a reidratação.

Além de propiciar a formação de uma matriz porosa no produto, a liofilização apresenta outras vantagens como alta retenção de flavours, máxima retenção de nutrientes e poucas alterações na forma, cor e aparência do produto final. Por outro lado, esse processo de secagem apresenta algumas desvantagens como por exemplo alto capital de investimento inicial, alto custo de processamento e a necessidade de embalagens especiais para evitar a oxidação e ganho de umidade do produto final.

Por tudo isso que foi mencionado acima a aplicação comercial da liofilização, em vários países, se limita a alguns alimentos de alto valor agregado como café, cogumelos, camarões, ingredientes para sopas, suco de laranja e algumas frutas e hortaliças exóticas.

O “puffing” e a extrusão são outros métodos muito utilizados para promover a formação de uma estrutura porosa em alimentos ou em outros tipos de produtos.

“Puffing” é um método que ao longo do tempo tem apresentado bons resultados para algumas frutas e hortaliças, competindo com os produtos de alta qualidade, porém caros, obtidos a partir da liofilização. De acordo com PAYNE et al. (1989), “puffing” envolve o desprendimento ou expansão de um gás no interior

do produto, ambos para gerar uma estrutura interna ou para expandir ou romper uma estrutura já existente.

Existem diferentes formas de se proporcionar um “puffing” em produtos alimentícios, que variam de acordo com o método responsável pela evolução do gás no interior do produto. A mudança de fase é o método mais efetivo e mais comumente utilizado. Isto se deve à grande variação de volume associada à mudança de fase.

Exemplos de aplicação desse método em produtos alimentícios incluem: cereais matinais (CLARK, 1986); frutas e hortaliças (SULLIVAN & CRAIG , 1984); e proteína vegetal texturizada (HARPER, 1981).

O processo mais conhecido que utiliza esse método é o “explosion-puffing” ou despressurização, apresentado por SULLIVAN et al. (1965) . Nesse processo, o produto, parcialmente desidratado por métodos convencionais entre 15 e 30 % de umidade, é colocado dentro de uma câmara, que por sua vez é fechada e pressurizada pelo aquecimento interno com vapor superaquecido ou externo através de chama. Com o aumento da pressão, a água contida no alimento atinge uma temperatura em torno de 100 °C. Em seguida a câmara é subitamente aberta ocorrendo uma vaporização “flash” da água superaquecida que é convertida instantaneamente em vapor gerando uma estrutura porosa no produto, que retorna ao secador convencional para secagem final até umidade desejada.

Exemplos de frutas e hortaliças que sofreram esse processo incluem aipo (SULLIVAN & CORDING, 1969); batata e cenoura (SULLIVAN et al., 1977, 1980, 1983); maçã (SULLIVAN et al., 1980); “blueberry” (SULLIVAN et al., 1982); cebola, pimentão, beterraba, inhame, pera, abacaxi e morango (KOZEMPEL et al., 1989). Baixos valores de densidade aparente, boa reidratação e excelentes propriedades sensoriais foram características dos produtos desidratados.

Entretanto, nem todo alimento pode ser desidratado, com sucesso, por esse processo. De acordo com KOZEMPEL et al. (1989), produtos como o feijão, uva-passa, amendoim e côco não se expandiram durante a desidratação. No caso de grãos como trigo, centeio e arroz, foram necessárias pressões muito elevadas, acima da capacidade do sistema.

“Explosion-puffing” também foi utilizado por SACA & LOZANO (1992) para desidratar bananas. O objetivo do trabalho foi o de reduzir o tempo de secagem e manter uma boa qualidade do produto final, quando comparado com o processo de secagem convencional em ar quente na temperatura de 70 °C, velocidade de 3,6 m/s e umidade relativa de 35%. O processo envolveu as seguintes etapas: preparo da matéria-prima; branqueamento; secagem inicial com ar quente nas mesmas condições descritas acima até um teor de umidade entre 27 a 38 % ; etapa de equilíbrio de temperatura e umidade; “explosion-puffing”; secagem final com ar quente nas mesmas condições usadas na secagem inicial até uma umidade igual ou inferior a 4%. Temperatura de 152 a 160 °C e pressão interna de 0,8 a 1,0 Kg/cm² foram condições utilizadas na operação de “explosion-puffing”. Foram realizados testes comparativos de densidade, porosidade, reidratação e também visual através de fotografias tiradas em microscópio dos produtos desidratados pelos dois processos: convencional e “explosion-puffing”. Os resultados mostraram que o processo “puffing” reduziu o tempo de secagem e reidratação devido aos poros formados.

Uma relação entre a pressão do processo de “explosion-puffing” e o teor de umidade do produto foi estudado por SULLIVAN and CRAIG (1984). Eles afirmam que essa relação depende do produto. Por exemplo, batata com um teor de umidade de 25 % requer uma pressão de aproximadamente 450 Kpa, enquanto que maçãs com 20 % de umidade requerem apenas 100 Kpa. Pressões acima desses valores podem provocar uma desintegração dos produtos, enquanto que pressões inferiores diminuem a extensão da expansão. Por outro lado, valores

diferentes de umidade do produto sob essas pressões também podem resultar numa desintegração ou ainda torrar o produto.

Além de água, que é normalmente evaporada do material promovendo o “puffing”, a literatura fornece referências de outras substâncias que são infiltradas no material, o qual é posteriormente submetido à condições de evaporação “flash”. Essas substâncias incluem dióxido de carbono, amônia e freon.

POPPER et al. (citado por PAYNE et al., 1989) patenteou um processo para expandir a estrutura interna de frutas, onde cubos de aproximadamente 1 centímetro de aresta, parcialmente desidratados, foram imersos em dióxido de carbono líquido durante 0,5 a 6 horas a uma pressão que variou de 60 a 68 atm. Em seguida foi realizada uma descompressão que se deu em três etapas. Bons resultados foram obtidos com esse método.

A aplicação dessa técnica a outros produtos que não sejam alimentos incluem celulose e tabaco, tendo-se usado amônia (DALE & MOREIRA, 1982) e freon (FREDRICKSON, 1981), respectivamente.

Como forma alternativa de expansão com gases, o CO₂ pode ser obtido por reação química no interior do alimento, como por exemplo nas fermentações (MATZ, 1972).

A extrusão é um outro processo utilizado para expandir produtos alimentícios, sendo aplicada, principalmente, a produtos a base de amido. Neste processo a massa aquecida dentro do extrusor é feita escoar, por meio de uma rosca sem fim, de uma região de alta pressão para uma região à pressão quase que atmosférica, ocasionando o “puffing” no material. A forma final do produto depende do formato dos moldes localizados na saída do equipamento. Este processo é utilizado em muitas indústrias, como por exemplo na produção de “snacks” e ração para cães. Entretanto, a obtenção de produtos de boa qualidade

depende de algumas variáveis tais como temperatura interna do extrusor, teor de umidade do produto, velocidade de alimentação e velocidade da rosca (CHINNASWAMY & HANNA, 1987). Esses pesquisadores fizeram uma otimização dessas variáveis para se obter uma máxima expansão do produto.

2.5. Processo de secagem HTST (High Temperature Short Time) em Leito Fluidizado

De acordo com TOLEDO (1980), a velocidade de remoção de umidade durante o processo de desidratação com ar quente tem forte influência sobre a forma e estrutura histológica do produto final: se o potencial de secagem é baixo, de tal forma que a remoção de umidade seja lenta, o encolhimento das células será uniforme por todo o sólido, que sofrerá uma redução de tamanho. Poderá não haver a formação de poros, obtendo-se um produto final duro e com alta densidade real. Por outro lado, se o potencial de secagem for alto, proporcionando uma rápida remoção de umidade, principalmente no início da secagem, haverá a formação rápida de uma rígida camada externa. A medida que a água é removida do interior do material e o tamanho das células torna-se menor, a rígida camada externa resiste às deformações, limitando o encolhimento e formando espaços intercelulares. Mesmo com a estrutura externa rígida, a remoção de umidade continua ocorrendo sem deformações adicionais.

A velocidade de secagem é afetada por quatro fatores principais: propriedades do material, tamanho e geometria do material, propriedades físicas do meio ambiente e características do equipamento de secagem (SOMOGVI & LUH, 1986).

A secagem HTST em leito fluidizado foi estudada por JAYARAMAN & DAS GUPTA (1992). Nesse processo, o material é cortado em pequenos pedaços e fluidizado com ar quente em uma câmara de secagem a altas temperaturas durante

um curto tempo, proporcionando uma alta taxa de secagem. Eles utilizaram diversas hortaliças, como: batata, cenoura, inhame, batata-doce e ervilhas verdes. As condições de secagem utilizadas foram temperaturas de 160 a 180 °C, tempo de 8 minutos e velocidade de ar de 7,6 m/s. A secagem final foi realizada em secadores convencionais com ar quente sob temperaturas que variavam de 60 a 70 °C. O processo HTST promoveu a expansão de volume das hortaliças e diminuiu o tempo de secagem. Excelente textura e boa reidratação foram características dos produtos desidratados por esse método.

Segundo os autores, o alto conteúdo inicial de amido presente nas hortaliças foi fundamental para ocorrer a expansão, originando um produto satisfatoriamente poroso, o qual manteve essa estrutura durante secagem final.

A formação de poros só é possível se a estrutura celular é forte o suficiente para resistir às tensões, no momento em que água está sendo removida na desidratação (KIM & TOLEDO 1987 ; BOBIC *et al.*, 1988 ; MUDAHAR *et al.*, 1989).

No caso das frutas que possuem alto teor de água, como por exemplo a maçã, a falta de suporte sólido nas paredes celulares requerem cuidados especiais para se obter um produto poroso.

KIM & TOLEDO (1987) verificaram o efeito da desidratação osmótica e da secagem a altas temperaturas e curto tempo (HTST) em leite fluidizado, nas propriedades de “blueberries” desidratadas, e compararam os resultados com amostras secas por outros métodos como “explosion-puffing” e secagem convencional com ar quente a 60 °C e 4 m/s. O processo HTST a 170 °C durante 8 minutos reduziu o tempo de secagem, comparado ao método convencional, e simultaneamente promoveu a expansão do produto. O produto seco apresentou menor densidade aparente e maior taxa de reidratação comparado com amostras desidratadas pelo processo de “explosion-puffing”. As amostras que

foram previamente desidratadas osmoticamente e depois secas pelo processo HTST a 150 °C durante 4 minutos, também se reidrataram rapidamente, porém a presença de açúcares, absorvidos do xarope, reduziu a quantidade de água absorvida.

Eles observaram também que a desidratação osmótica ajudou a prevenir o encolhimento, que foi evidenciado pela baixa densidade aparente.

Diversos outros pré-tratamentos para fortalecer a estrutura celular de frutas e hortaliças e, conseqüentemente, prevenir contra um colapso total das células durante a desidratação são citados na literatura: adição de sais de cálcio (SHIMAZU & STERLING, 1961); controle de atividade de enzimas pectídicas (BOURNE, 1987); adição de óleos polihídricos (SAVAGE, 1967). Esses pré-tratamentos resultam em produtos de textura firme na reidratação mas interferem na absorção de umidade, aumentando o tempo de reidratação e diminuindo a quantidade de água absorvida.

MUDAHAR *et al.* (1989 e 1991) pesquisaram a infiltração de biopolímeros naturais nos espaços intracelulares e dentro das paredes das células de cenouras e batatas, respectivamente, antes da secagem a altas temperaturas e curto tempo HTST em leito fluidizado. Esses biopolímeros iriam fortalecer as paredes celulares além de servir como amortecedores, protegendo as células de um colapso durante o processo de desidratação. Os vegetais foram cortados na forma de cubos e foram branqueados em água quente contendo uma mistura de pectina e polidextrose na razão de 1:5. Após este pré-tratamento, os cubos dos vegetais foram primeiro desidratados em leito fluidizado a altas temperaturas e curto tempo, e posteriormente secos em secador de túnel a 70 °C e 4 m/s até um conteúdo de umidade menor que 5 %. Concentração de biopolímeros, tempo de branqueamento e tempo e temperatura de secagem no secador de leito fluidizado foram otimizados utilizando-se o método de análise de superfície de resposta. Boa cor, alta razão de reidratação e baixa densidade aparente foram características

dos produtos desidratados. Eles afirmam ainda que a estrutura celular da fruta ou hortaliça e a combinação certa de biopolímeros são fatores decisivos no sucesso do pré-tratamento.

A influência do peso molecular e tamanho dos biopolímeros na penetração em tecidos vegetais foram estudados por MUDAHAR *et al.* (1991). Dextrana foi tingida com o corante azul brilhante remazol, para exames microscópicos. Os cubos de cenoura de 1 cm de aresta foram branqueados durante 12 minutos em água quente contendo 1,4 % de dextrana colorida de diferentes pesos moleculares. Após o branqueamento os cubos foram desidratados em leito fluidizado a 150 °C durante 12,5 minutos, condições ótimas obtidas no trabalho anterior, seguida de secagem a 70 °C em secador de túnel até nível de umidade menor que 5 %. Verificou-se que polímeros de pequeno tamanho foram encontrados dentro dos espaços intercelulares e das paredes das células. Grandes polímeros foram encontrados somente nas células danificadas próximas da superfície do tecido. Além disso, dextrana de menor peso molecular produziu cenouras desidratadas de melhor qualidade com alta razão de reidratação, maior retenção de caroteno e alta capacidade de manutenção de água, comparada com as outras dextranas utilizadas. Portanto um estudo prévio sobre a extensão dos espaços intercelulares e o tamanho dos biopolímeros é importante na aplicação desse pré-tratamento.

O pré-tratamento com uma suspensão de amido de mandioca gelatinizado a 2 % em frutas e hortaliças, antes da secagem a altas temperaturas e curto tempo HTST em leito fluidizado, foram estudados por BOBIC *et al.* (1988). O amido é depositado na superfície do material formando uma camada homogênea que rapidamente endurece quando é aquecido a altas temperaturas. O vapor d'água formado dentro do material é parcialmente impedido de escapar pela rígida camada de amido impermeável, expandindo o material. Haverá a formação de uma estrutura porosa, aumentando a quantidade de água absorvida e diminuindo o tempo durante a reidratação.

Mais recentemente, TORREGGIANI & TOLEDO (1990) pesquisaram a expansão e desidratação de cubos de maçãs pré-tratados, a altas temperaturas e curto tempo HTST em leito fluidizado. Os pré-tratamentos pesquisados foram:

- (a) Osmo-desidratação em xarope de milho 70 °Brix a 25 °C durante 24 horas.
- (b) Osmo-desidratação durante 24 horas em xarope de milho 70 °Brix contendo 3 % de biopolímeros (maltodextrina-pectina 9:1) a 25 °C em pressão atmosférica, ou em xarope de milho 40 °Brix contendo os biopolímeros em vácuo de 25 mmHg de pressão absoluta por 24 horas a 25 °C.
- (c) Desidratação parcial em secador de túnel durante 20 a 40 minutos.
- (d) Imersão durante 2 minutos em uma suspensão de amido de mandioca gelatinizado a 2 %, à temperatura ambiente.

Antes dos pré-tratamentos todas as amostras foram branqueadas em xarope de milho 70 °Brix durante 5 minutos a 80 °C (LERICI *et al.*, 1986).

A imersão na suspensão de amido de mandioca gelatinizado foi comprovado ser o pré-tratamento mais eficiente na expansão dos cubos de maçãs, reforçando a hipótese de BOBIC *et al.*(1988). Eles verificaram que a maior expansão, com menor índice de escurecimento, foi obtida pelas amostras pré-tratadas com amido que foram submetidas à secagem em leito fluidizado a 155 °C durante 12 minutos e posteriormente em secador de túnel a 80 °C até conteúdo de umidade menor que 5 %.

Fatores que induzem à crocância e sua manutenção em produtos desidratados foram analisados por KATZ & LABUZA (1981). O conteúdo de umidade é o fator

de controle dessa propriedade, e, de uma forma geral, recomenda-se manter o produto com uma umidade residual inferior à umidade da monocamada de BET. Os autores, entretanto, não conseguiram uma correlação geral para os produtos estudados, e concluíram que a atividade de água crítica, acima da qual o alimento seria organolepticamente inaceitável, variava de 0,35 a 0,50.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Matéria-prima

Para a realização dos experimentos, utilizou-se bananas variedade prata (*Musa sapientum* L.). As frutas foram adquiridas nos supermercados locais ou no CEASA-Campinas, e processadas no mesmo dia sem a necessidade de armazenamento em câmaras de refrigeração.

A geometria da fruta (comprimento e diâmetro) e o teor de sólidos solúveis (°Brix) foram adotados como parâmetros de padronização das amostras. A faixa de °Brix utilizada foi de 14 a 18, onde a polpa apresenta textura firme e sabor levemente adocicado.

Após descascadas manualmente, as bananas foram cortadas em rodela de 1 cm de espessura, desprezando-se as extremidades. Essa operação foi realizada utilizando-se uma faca de aço inoxidável. As rodela foram então seccionadas em quatro partes iguais, seguindo-se os raios principais, obtendo-se assim fatias menores na forma de 1/4 de rodela.

3.2. Pré-tratamento

O pré-tratamento consistiu em uma imersão das fatias de banana-prata durante 2 minutos em uma suspensão de amido de mandioca gelatinizado a 2% em peso, à temperatura ambiente. O amido de mandioca, comercializado na forma de polvilho doce, foi gelatinizado através do aquecimento da suspensão até 75 °C.

A suspensão aquecida foi deixada em repouso à temperatura ambiente até se obter a equalização das temperaturas.

Para cada ensaio realizado, 100 gramas de fatias de banana-prata eram imersas em 500 ml da suspensão de amido durante 2 minutos, e então removidas por escorrimento em uma peneira de plástico.

3.3. Operação de secagem

3.3.1. Método de secagem utilizado

O método de secagem envolveu uma pré-secagem a altas temperaturas durante um curto tempo, HTST (High Temperature Short Time) em um secador de leito fluidizado. Após a pré-secagem as amostras foram imediatamente levadas a um secador de bandejas que operou com ar a 1,25 m/s e 70 °C. A secagem foi realizada em um sistema em batelada, utilizando-se 100 gramas de banana para cada ensaio.

3.3.2. Equipamentos

3.3.2.1. Secador de leito fluidizado

O secador de leito fluidizado foi desenvolvido e construído no Departamento de Engenharia de Alimentos (DEA) da UNICAMP, e está esquematizado na Figura 3.1

A câmara de secagem, mostrada na parte superior esquerda da Figura, é isolada termicamente e consiste de uma seção cilíndrica construída de metal, com 8,5 cm de diâmetro e 19 cm de altura, aberta na extremidade superior e

perfurada na base. Uma expansão cônica acima da câmara impede o arraste das fatias de banana-prata, por diminuir a velocidade de ar necessária para a fluidização, evitando com que as mesmas sejam lançadas para fora.

A câmara é unida ao corpo do secador por meio de uma cinta de borracha que permite perfeito encaixe e possibilidade de remoção rápida. O corpo do secador é formado por uma tubulação de cimento-amianto com diâmetro interno de 15 cm, constituído de um tubo horizontal de 2 metros e um tubo vertical de 0,5 metros. O elo de ligação entre os dois tubos é uma curva de 90°, também de cimento amianto, fixa ao tubo vertical e unida ao horizontal por meio de flanges de ferro vedadas com uma placa de amianto agrafitada. A construção permite a manutenção das resistências elétricas, que estão localizadas no interior do tubo horizontal. O sistema de resistências é constituído por três resistências independentes, ligadas em paralelo, duas das quais são ligadas diretamente em fonte de 220V e a terceira é ligada à fonte de 110V, passando antes por um variador de tensão (VARIAC) de marca POWERSTAT modelo 116B (120V-10A). Todo o sistema é protegido por disjuntores de 20A.

O dispositivo utilizado para a movimentação do ar é um ventilador centrífugo, ligado a um motor elétrico trifásico de marca ARNO, com uma potência de 2 CV e rotação de 3500 rpm.

A velocidade do ar é medida, manualmente, na entrada da câmara de secagem por um anemômetro de ventoinhas de marca VEB DRESDEN modelo 8060, e controlado por uma placa deslizante adaptada no bocal do ventilador.

Um termopar tipo J (ferro-constantan) é colocado no centro do tubo vertical, logo abaixo da câmara de secagem, e conectado a um registrador de temperatura de marca DIGI-SENSE, onde o controle da temperatura do ar é realizado através do VARIAC.

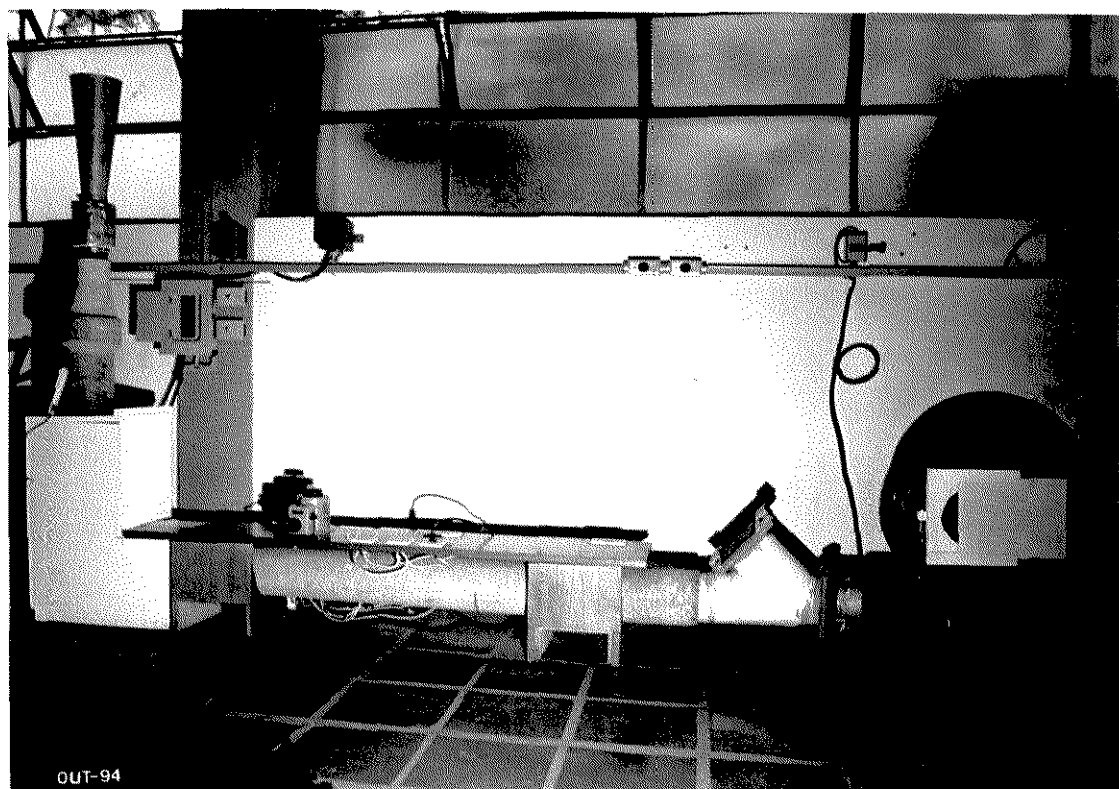


FIGURA 3.1. Secador de leito fluidizado.

Na realidade, leito fluidizado é um termo inadequado para descrever o comportamento fluido-dinâmico das fatias de banana-prata, uma vez que as mesmas permanecem suspensas, em regime diluído, movimentando-se intensa e individualmente na câmara de secagem. Essa, entretanto, é a notação usada nas referências citadas e será mantida aqui.

3.3.2.2. Secador de bandejas

Os detalhes de construção e montagem do secador de bandejas utilizado nos experimentos são apresentados a seguir:

O equipamento é constituído por uma cabine vertical de madeira com oito portas individuais, onde são colocadas as bandejas contendo o material a secar. As bandejas são sustentadas no secador devido à presença de rebarbas nas extremidades superior e inferior das mesmas, garantindo, assim, a passagem de ar exclusivamente através do leito. O fundo da bandeja é feito de tela de aço inoxidável com malha quadrada de 1,2 mm de abertura.

A movimentação do ar é feita por um ventilador centrífugo, ligado a um motor elétrico trifásico de marca ASTEN, com uma potência de 2,0 CV e rotação de 3460 rpm. O ar passa pelo interior de uma tubulação de cimento amianto, sendo aquecido por um sistema de resistências elétricas localizado próximo à base da cabine, consistindo de 4 resistências elétricas independentes ligadas em paralelo, sendo 2 ligadas em fonte de 220V e 2 ligadas em fonte de 110V. Uma das resistências ligadas à fonte de 110V passa antes por um variador de tensão, (VARIAC) de marca TECHNIPOWER modelo W5MT3 (120V-5A).

A cabine de madeira possui orifícios que permitem a instalação de termopares imediatamente antes e após cada bandeja, possibilitando a leitura das temperaturas de entrada e saída do ar de secagem, respectivamente. A velocidade do ar é medida no interior da cabine onde estão localizadas as bandejas.

Os aparelhos utilizados para medir a velocidade e temperatura do ar de secagem e suas formas de controle são iguais às descritas para o secador de leito fluidizado.

O secador de bandeja está esquematizado na Figura 3.2



FIGURA 3.2. Secador de Bandejas

3.3.3. Desenvolvimento experimental

Antes da realização de cada ensaio, ambos os secadores, o de leito fluidizado e o secador de bandejas, foram ligados para entrarem em regime nas condições

desejadas. A velocidade de ar utilizada no secador de leito fluidizado foi em torno de 10 m/s, suficiente para se obter uma boa fluidização do material.

A umidade relativa do ar foi determinada a partir das temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco registradas por um psicrômetro de marca IOPE modelo SPG 5.

As amostras, 100 gramas de fatias de banana-prata pré-tratadas com a suspensão de amido de mandioca gelatinizado, eram alimentadas na câmara de secagem manualmente, sendo despejadas pela abertura superior do cone, e começando a fluidizar imediatamente. Apesar da facilidade de aderência do material, entre si e com as paredes, em consequência da cobertura de amido gelatinizado depositado na superfície, a fluidização foi perfeita, pois a camada externa seca muito rápido a altas temperaturas. A quantidade de material utilizado foi suficiente para formar apenas uma camada no fundo da câmara de secagem. O controle manual de temperatura foi feito continuamente através do VARIAC, a fim de se evitar variações superiores 1 °C.

No caso das bananas mais maduras, com teor de sólidos solúveis próximo de 18 °Brix, algumas fatias às vezes aderiam à superfície da câmara de secagem, sendo necessário o uso de uma bagueta de vidro para soltá-las.

A pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado promoveu a expansão das fatias de banana-prata, que foram transferidas imediatamente para o secador de bandejas para secagem final até alcançar um valor de umidade próximo da umidade de equilíbrio. Para fins de comparação secou-se amostras usando apenas o secador de bandejas, durante 6 horas.

Como complementação, uma isoterma de equilíbrio foi levantada experimentalmente a 25 °C utilizando soluções salinas. Os valores encontrados foram ajustados pela equação de GAB (Guggenhen-Anderson-de Boer). Maiores detalhes são apresentados no Apêndice A.

Antes, durante ou depois da operação de secagem foram feitas as seguintes determinações: sólidos solúveis (°Brix), teste qualitativo de peroxidase, teor de umidade, densidade real e taxa de reidratação. Ensaios de armazenamento foram conduzidos com amostras com e sem a pré-secagem, colocados em potes de vidro herméticamente fechados e conservados à temperatura de 25 °C na ausência de luz, durante 6 meses.

Não foi feita uma avaliação estatística de aceitação do produto pelo consumidor devido à limitação de amostras. A avaliação sensorial se limitou a uma degustação do produto por dois ou três indivíduos, em testes não-comparativos, além de uma análise visual.

3.4. Aferição dos termopares

Para realizar a aferição dos termopares ferro-constantan utilizados nos ensaios utilizou-se um banho contendo óleo de silicone, com aquecimento por meio de resistências elétricas. Os termopares, juntamente com o termômetro padrão (Precision Scientific, USA), foram imersos no óleo até uma profundidade de 4 centímetros, e as medidas foram tomadas em diferentes temperaturas, de tal forma que se cobrisse toda faixa de utilização dos termopares nos ensaios.

Para cada termopar, foi realizado uma regressão linear entre os seus valores de temperatura lidos no indicador e os valores lidos no termômetro padrão, obtendo-se uma equação matemática que permitisse a correção da temperatura experimental. Em todos os casos o coeficiente de correlação foi muito próximo de 1, com variação apenas na quinta casa decimal. Essas equações são apresentadas a seguir:

$$Ya = 1,5137 + 0.9857X \quad (3.1)$$

$$Yb = 0,9516 + 0,9749X \quad (3.2)$$

Onde:

X = temperatura experimental lida no indicador.

Y = temperatura corrigida.

a = termopar ferro-constantan utilizado para medir a temperatura do ar de secagem.

b = termopar ferro-constantan utilizado para medir a temperatura interna das fatias de banana-prata.

3.5. Análises

3.5.1. Sólidos solúveis

A percentagem de sólidos solúveis presentes na banana *in natura* é expressa pelo °Brix, e foi determinada utilizando-se um refratômetro de bancada, marca KARL ZEISS, modelo ABBE, aferido para a temperatura de 20 °C. Uma fatia de banana-prata foi colocada em uma Placa de Petri e amassada, com o auxílio de um garfo, até a obtenção de uma pasta semi-sólida. Parte dessa pasta foi envolvida por um pedaço de algodão e espremida com os dedos para se obter o suco da fruta. Repetiu-se a análise para várias bananas da mesma penca e para diferentes regiões da mesma fruta, fazendo-se a média aritmética das leituras obtidas.

3.5.2. Teste qualitativo de peroxidase

A peroxidase é utilizada como um indicador da efetividade de um tratamento térmico por ser muito resistente à inativação por calor. Se ocorrer a destruição da peroxidase, garante-se que todas as outras enzimas também foram inativadas.

Foram realizados testes qualitativos nas fatias de banana-prata logo após a pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo HTST em leite fluidizado. As

fatias foram cortadas ao meio e colocadas em uma Placa de Petri. Adicionou-se, à superfície exposta, 3 gotas de uma solução de guaiacol 0,2 % em etanol 50 %, e em seguida adicionou-se 3 gotas de peróxido de hidrogênio 0,1M. A formação de coloração marron (Tetraguaiacol) caracteriza um indicativo de teste positivo (FENNEMA, 1976).

3.5.3. Teor de umidade

Em uma balança analítica digital de marca SARTORIUS modelo A200S com precisão de 0,0001g, pesou-se de 1,0 a 2,0 gramas de amostra em um pesa-filtro de vidro com tampa esmerilhada, previamente tarado, e deixou-se durante 48 horas em uma estufa a vácuo de marca FANEM, que operava com temperatura de 70 °C e vácuo de 25 polegadas de mercúrio. O tempo foi suficiente para se obter peso constante. No caso de banana-prata *in natura* ou após a pré-secagem em secador de leito fluidizado, devido ao alto conteúdo de umidade, preferiu-se pré-secar as amostras em estufa de secagem e esterilização com circulação forçada de ar, marca FANEM modelo 320-SE, a 50 °C, durante 24 horas. A secagem final era feita novamente em estufa a vácuo nas mesmas condições descritas anteriormente. As amostras foram retiradas da estufa e colocadas em dessecadores mantidos em sala à temperatura de 25 °C até a equalização das temperaturas, e então pesadas novamente. As análises de umidade sempre foram feitas em triplicata e o resultado é a média aritmética dos três valores.

3.5.4. Densidade real

A densidade real é uma medida representativa da expansão de volume, e foi determinada utilizando-se o método do deslocamento de fluidos em picnômetros. Utilizou-se um picnômetro com capacidade de 25 ml, cujo diâmetro da boca era de

1,45 cm, suficiente para se realizar a análise da fatia inteira sem a necessidade de cortá-la em pedaços. O picnômetro foi previamente calibrado com água destilada a 25 °C. O fluido utilizado para medida de densidade foi o Tolueno P.A., pois apresenta as seguintes vantagens: pouca tendência em penetrar no sólido ; baixa tensão superficial; pouca ação do solvente nos constituintes do sólido; alto ponto de ebulição ($110,06 \pm 1^\circ\text{C}$); não muda a sua gravidade específica e viscosidade quando exposto à atmosfera.

Antes de cada análise, o picnômetro foi tarado em balança analítica. Colocou-se de 1,0 a 1,5 gramas de amostra dentro do picnômetro, obtendo-se a massa do picnômetro e amostra. Em seguida, o volume do picnômetro foi completado com tolueno até a marca de aferição previamente calibrada com água destilada, sempre tomando-se o máximo de cuidado para evitar a presença de bolhas de ar . O excesso de tolueno que escorria na parte externa do picnômetro foi cuidadosamente seco com papel absorvente. O picnômetro foi então novamente pesado em balança analítica, obtendo-se a massa total do picnômetro, da amostra e do tolueno. Por medida de segurança, utilizou-se um protetor respiratório e luvas de borracha látex, por ser o tolueno classificado como um produto químico tóxico.

De posse desses dados, foi possível calcular a densidade real das fatias de banana-prata:

$$\rho = \frac{ms}{Vs} \quad (3.3)$$

onde:

ms = massa do sólido, g

Vs = volume do sólido, cm^3

O volume das fatias de banana-prata foi determinado da seguinte forma: Sabendo-se a densidade real do tolueno, $0,866 \text{ g/cm}^3$ a 25 °C, e a massa de sólido

colocada dentro do picnômetro, determinou-se o volume do tolueno necessário para completar o picnômetro até a marca de aferição. Esse valor foi subtraído do volume real do picnômetro previamente estabelecido por meio da calibração com água, encontrando desta forma, o volume real do sólido contido dentro do picnômetro. As análises foram realizadas em triplicata e os resultados é uma media aritmética dos três valores.

3.5.5. Reidratação

A reidratação ou capacidade de absorção de água das fatias de banana-prata desidratadas foi determinada pela imersão em água em ebulição. Escolheu-se esse método por ser mais eficiente do que o uso de água à temperatura ambiente, conforme comprovado experimentalmente em ensaios preliminares, além de ser recomendado por KIM & TOLEDO (1987) . O procedimento utilizado é descrito a seguir : um becker de 1000 ml contendo 500 ml de água destilada foi aquecido em bico de Bunsen. No momento em que a água entrou em ebulição, deu-se início à análise. Amostras, previamente pesadas em balança analítica, em quantidade de 1,5 a 2,0 gramas, foram imersas na água durante diferentes tempos: 5, 10, 15 e 20 minutos. Retiradas da água, as amostras foram levemente enxugadas em papel absorvente e novamente pesadas. A percentagem de absorção de água foi determinada pela equação abaixo:

$$\% \text{ absorção de água} = \frac{mf - mi}{mi} \times 100 \quad (3.4)$$

onde:

mi = massa inicial das fatias de banana desidratadas, g

mf = massa final das fatias de banana desidratadas após a imersão, g.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar o funcionamento do equipamento durante o desenvolvimento da câmara de secagem e dos controles de temperatura e vazão do ar, assim como para obter uma familiarização com o projeto, foram feitos ensaios utilizando cubos de maçãs de diferentes variedades (Golden Delicious, Red Delicious, Fuji e Gala). Os resultados obtidos foram semelhantes aos descritos por TORREGGIANI & TOLEDO (1990), confirmando-se assim a operacionalidade do sistema.

Em seguida foram feitos ensaios exploratórios com três variedades de banana (nanica, maçã e prata). A variedade prata mostrou ser a mais adequada por apresentar uma polpa mais consistente, com maior resistência mecânica durante a secagem.

Vários ensaios preliminares foram então realizados com a banana-prata, alguns com avaliações essencialmente visuais e sensoriais, os quais nos permitiram obter o estágio de maturação ideal para processamento, verificar a influência de diferentes pré-tratamentos na qualidade da fruta desidratada e encontrar as melhores condições de secagem.

Apresenta-se inicialmente, alguns resultados obtidos com esses ensaios.

4.1. Definição das condições de operação

4.1.1. Estádio de maturação

Na tentativa de se definir um estágio de maturação ideal para o processamento, foram realizados ensaios com fatias de banana-prata, cuja percentagem de sólidos solúveis variou de 12 a 23 °Brix. Inicialmente, utilizou-se as condições de secagem HTST em leito fluidizado mencionadas por TORREGGIANI & TOLEDO (1990), na secagem de maçãs, ou seja, temperatura de secagem de 155 °C e tempo de 12 minutos, e uma velocidade suficiente para se ter uma boa fluidização. A secagem final foi realizada em secador de bandejas a 70 °C durante 5 horas.

Observou-se, visualmente, que frutas mais verdes, menor Brix e maior quantidade de amido presente nas células, além de proporcionarem uma melhor fluidização das fatias na câmara de secagem, resultaram em um produto com maior expansão. Esse resultado demonstra a importância do teor inicial de amido presente na fruta, que fortalece a estrutura celular evitando o colapso total das células durante a desidratação.

O estágio de maturação ideal escolhido para processamento foi o do produto na faixa de 14 a 18 °Brix. Abaixo de 14 °Brix fica evidente a dificuldade de descascar a banana, além da fruta apresentar sabor adstringente. Acima de 18 °Brix o material se comporta como um sólido termoplástico durante a secagem, em virtude do amolecimento da polpa, dificultando a fluidização e inviabilizando a secagem.

Bananas com estágio de maturação nessa faixa de °Brix dão origem a produtos desidratados com baixo teor de umidade crocantes e com sabor agradável.

Foi possível observar também, que a cor da casca do fruto não é um parâmetro confiável de padronização para banana-prata, sendo mais garantido, como primeira estimativa, a textura e o sabor. Nessa faixa, a textura é firme e o sabor é levemente adocicado.

4.1.2. Soluções infiltrantes

O pré-tratamento de frutas com soluções infiltrantes tem sido muito utilizado, como uma forma de enriquecer a estrutura celular. A fruta é imersa na solução durante tempo suficiente para que ocorra, teoricamente, a infiltração nos espaços inter e intracelulares e também dentro das paredes das células, fortalecendo a estrutura celular e prevenindo o colapso total durante a desidratação. Esse pré-tratamento foi utilizado em fatias de banana-prata de diferentes estádios de maturação, com atenção especial para aquelas mais maduras, acima de 18 °Brix, cuja estrutura celular é frágil.

Baseado em informações da literatura, as soluções infiltrantes pesquisadas foram: sacarose em concentrações que variaram de 20 a 50 %, xarope de glucose 70 °Brix, glicerol 20 %, solução de sacarose a 30 % contendo 2 % de carboximetilcelulose (CMC), solução de sacarose a 30 % contendo 2 % de pectina com baixo teor de metoxilação (BTM) e solução de sacarose a 40 % contendo 20 % de glicerol. Os tempos de imersão variaram de 1 a 5 horas. As amostras foram então submetidas ao processo de secagem nas mesmas condições mencionadas anteriormente.

Não foram observadas diferenças significativas de comportamento entre as amostras que sofreram ou não o pré-tratamento. A secagem das fatias de banana-prata mais maduras, acima de 18 °Brix, foi novamente inviabilizada pela péssima fluidização .

A estrutura celular da fruta é, provavelmente, o fator determinante no sucesso desse pré-tratamento. A banana é classificada como um sólido não-poroso, e pode ter dificultado a penetração dessas soluções nos espaços inter e intracelulares, bem como nas paredes celulares da fruta. Uma outra hipótese é a de que não foi encontrada a solução infiltrante ideal para o caso de banana-prata.

4.1.3. Pré-tratamento com amido

Foi estudada a influência da cobertura de amido nas fatias de banana-prata para auxiliar na expansão de volume durante a pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado. Amostras com estágio de maturação de 14 a 18 °Brix foram imersas durante 2, 5 e 10 minutos em diferentes suspensões de amido de mandioca gelatinizado nas concentrações de 2, 5 e 7 %, e em seguida submetidas a secagem nas mesmas condições descritas anteriormente. Para fins comparativos, foi realizado também o ensaio com amostras sem a cobertura de amido.

Constatou-se que a cobertura de amido tem uma contribuição significativa na expansão do produto, uma vez que as fatias de banana-prata desidratadas são mais uniformes e apresentam maior expansão. No entanto, observou-se que a expansão é mais influenciada pelo teor inicial de amido presente na fruta do que pela cobertura na superfície, já que para fatias de banana mais maduras, com °Brix próximo de 18, o tratamento não foi tão eficiente.

Não foram observados diferenças representativas no produto final quanto à influência da concentração da suspensão de amido e o tempo de imersão. Adotou-se por motivos de economia e tempo, a menor concentração e o menor tempo estudados: 2% e 2 minutos, respectivamente.

A influência do pré-tratamento com amido nas propriedades organolépticas do produto final mostrou ser irrelevante, uma vez que o gosto do amido nas fatias de banana-prata desidratadas foi imperceptível.

4.1.4. Branqueamento

As fatias de banana-prata foram osmo-branqueadas em xarope de glucose 70 °Brix durante 5 minutos a 80 °C , com o objetivo de inativar as enzimas presentes na fruta . Esse mesmo tratamento foi utilizado, com sucesso, por TORREGGIANI & TOLEDO (1990) no osmo-branqueamento de fatias de maçãs onde a fruta, ao mesmo tempo, perdeu água e teve suas enzimas inativadas pelo calor, evitando o escurecimento enzimático. Em seguida as fatias de banana branqueadas foram submetidas às mesmas condições de secagem descritas anteriormente.

Os resultados mostraram que o branqueamento físico provocou modificações indesejáveis à textura da fruta, tornando-a mole e sem resistência mecânica para a secagem em leito fluidizado. Resultados semelhantes foram obtidos com outros tipos de branqueamento físico como em vapor de água e em água em ebulição.

Foi realizado também o branqueamento químico, através da imersão das fatias de banana em metabissulfito de sódio na concentração de 0.1 % à temperatura ambiente. Não houve alterações na textura e as bananas desidratadas, com e sem a pré-secagem, apresentaram coloração clara. Entretanto, o tratamento químico também mostrou ser dispensável, uma vez que ensaios posteriores indicaram que a secagem HTST em leito fluidizado é suficiente para inativar as enzimas presentes nas fatias de banana-prata de tamanho padronizado de 1/4 de rodela. Tal fato foi verificado através de testes qualitativos de peroxidase nas amostras que sofreram a pré-secagem HTST. Não houve a formação de coloração

marrom na superfície das fatias, que indicaria a presença de peroxidase, ao contrário dos testes realizados na banana *in natura*.

Portanto, embora a literatura aconselhe tratamentos térmicos prévios à secagem, estes foram julgados dispensáveis quando o material sofre a pré-secagem HTST em leito fluidizado.

4.1.5. Temperatura de secagem

Depois de definir o estágio de maturação ideal para processamento, 14 a 18 °Brix, e adotar como único pré-tratamento a imersão das fatias de banana-prata durante 2 minutos em uma suspensão de amido de mandioca gelatinizado na concentração de 2 % à temperatura ambiente, foram realizados ensaios para verificar a influência da temperatura de secagem HTST em leito fluidizado na expansão de volume das fatias de banana-prata.

A velocidade de ar utilizada foi em torno de 10 m/s, o suficiente para se obter uma boa fluidização das fatias, e o tempo de secagem foi limitado, a cada temperatura, devido ao risco de um escurecimento do produto.

A secagem final foi realizada em um secador de bandejas durante 5,5 horas, com ar a 70 °C e 1,25 m/s. Foram realizadas análises quantitativas de densidade real e teor de umidade do produto final.

As condições de secagem HTST em leito fluidizado são mostradas na Tabela 4.1.

TABELA 4.1. Condições de secagem HTST em secador de leito fluidizado para fatias de banana-prata

Condições de secagem	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
(a)	110	15
(b)	130	12
(c)	150	6

Os resultados das medidas experimentais realizadas com o produto final são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

TABELA 4.2. Influência da temperatura de secagem HTST na densidade real de fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix. Valores medidos após secagem final, em bandejas.

Condições de secagem	Densidade (g/cm ³)	Teor de umidade (b.u.) %
(a)	0.7121	8,52
(b)	0.3521	5,64
(c)	0.4212	7,13

TABELA 4.3. Influência da temperatura de secagem HTST na densidade real de fatias de banana-prata com estágio de maturação de 18 Brix. Valores medidos após secagem final, em bandejas.

Condições de secagem	Densidade (g/cm ³)	Teor de umidade (b.u.) %
(a)	0.7265	8,17
(b)	0.4514	5,73
(c)	0.5575	8,12

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram fotografias das fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix.

Elas representam o efeito de 15, 12 e 6 minutos de secagem HTST em secador de leito fluidizado nas temperaturas do ar de 110, 130 e 150 °C respectivamente, seguido da secagem final em secador de bandejas a 70 °C durante 5,5 horas.

A Figura 4.4 mostra a fotografia de fatias de banana-prata com estágio de maturação de 18 °Brix desidratadas a 130 °C durante 12 minutos seguido da secagem final em secador de bandejas nas mesmas condições descritas anteriormente.

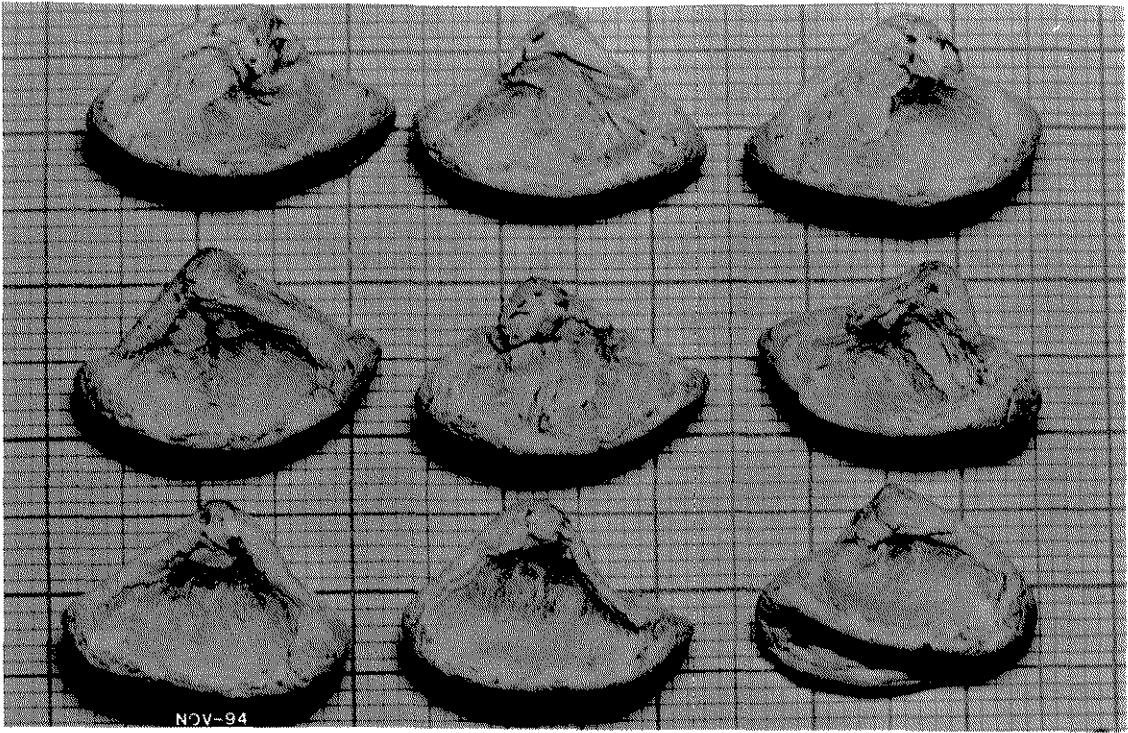


FIGURA 4.1. Efeito de 15 minutos de secagem HTST a 110 °C em fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix. Fotografia do produto seco

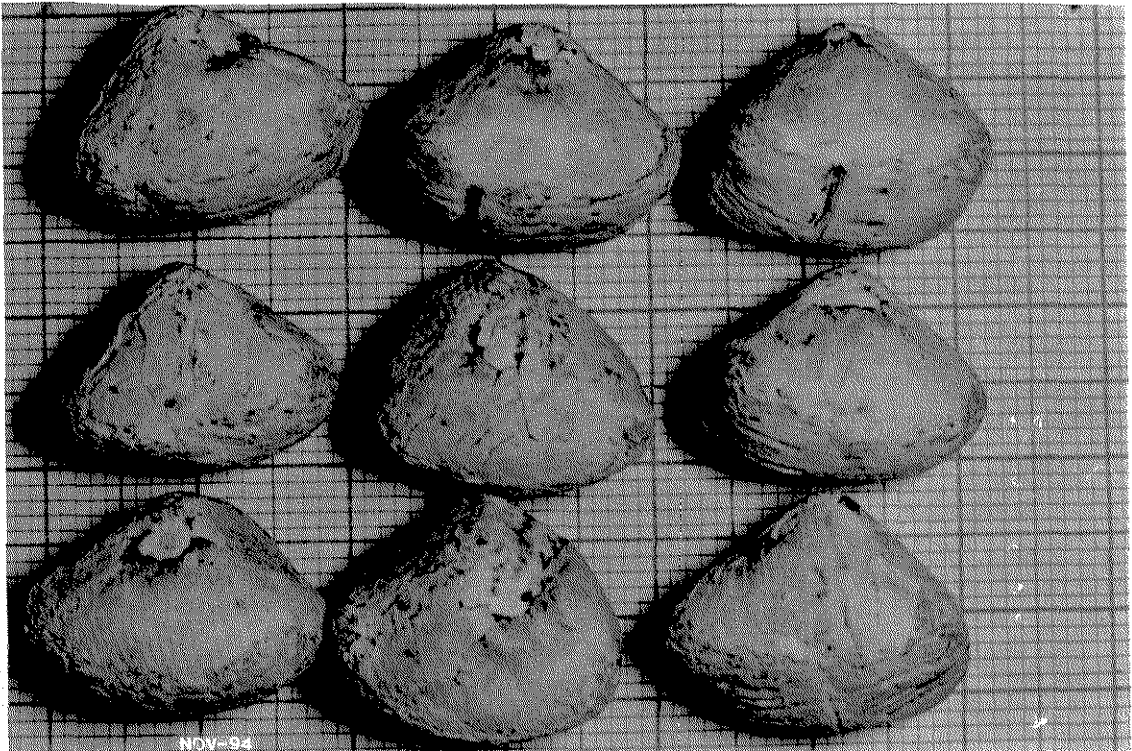


FIGURA 4.2. Efeito de 12 minutos de secagem HTST a 130 °C em fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix. Fotografia do produto seco.

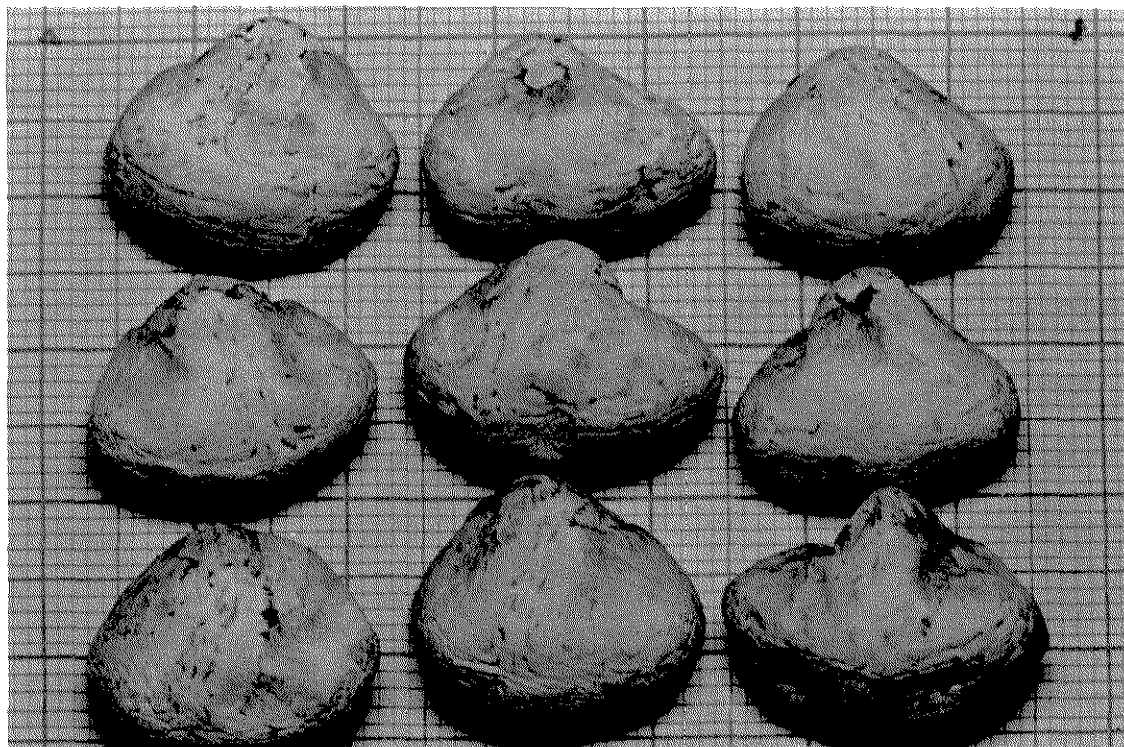


FIGURA 4.3. Efeito de 6 minutos de secagem HTST a 150 °C em fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix. Fotografia do produto seco.



FIGURA 4.4. Efeito de 12 minutos de secagem HTST a 130 °C em fatias de banana-prata com estágio de maturação de 18 °Brix. Fotografia do produto seco.

Observa-se, pelas Tabelas 4.2 e 4.3, que as fatias de banana mais verdes, 14 °Brix, quando submetidas às mesmas condições de secagem HTST em secador de leito fluidizado, apresentam valores mais baixos de densidade real, comparados com fatias de banana mais maduras, de 18 °Brix.

A importância do teor inicial de amido na fruta é novamente evidenciada e mostra ser um pré-requisito indispensável para o sucesso da pré-secagem HTST na expansão de volume da banana.

As fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix que sofreram a pré-secagem HTST em secador de leito fluidizado durante 12 minutos a 130 °C, foram as que apresentaram valores mais baixos de densidade real e, portanto, maior expansão de volume. Na Figura 4.2 observa-se as fatias arredondadas sem sinais de encolhimento.

Para o mesmo estágio de maturação, com ar a 150 °C observou-se que o produto se expandiu de forma semelhante ao desidratado a 130 °C, na etapa de pré-secagem HTST em leito fluidizado, porém sofreu um leve encolhimento durante a secagem final em secador de bandejas, como pode ser visto na Figura 4.3. O tempo de secagem, 6 minutos, foi o limite para se obter um produto de coloração clara. Em ambos os casos, os produtos desidratados apresentaram boas propriedades organolépticas, entre elas, crocância devido a estrutura porosa que se formou.

Já no tratamento a 110 °C, conforme se constata pela Figura 4.1, não se observou expansão. Pelo contrário, as fatias se encolheram durante a pré-secagem HTST em leito fluidizado, e continuaram encolhendo durante a secagem final em secador de bandejas. Não houve a formação de uma estrutura porosa no produto final, que ficou mais duro e difícil de mastigar. Esse encolhimento sugere que o calor transmitido ao produto não deve ter sido suficiente para promover um efetivo aumento de pressão interna.

A Figura 4.4 mostra o efeito de 12 minutos de secagem HTST a 130 °C em fatias de banana-prata com estágio de maturação de 18 °Brix. Observa-se que, apesar da presença de espaços vazios no produto final, não houve uma expansão de volume representativa nas fatias, quando comparadas com aquelas mostradas na Figura 4.2 que sofreram o mesmo processo de secagem.

As bananas com estágio de maturação de 14 °Brix apresentaram uma coloração final mais esbranquiçada do que as bananas com estágio de maturação de 18 °Brix. Isto está relacionado com a maior quantidade de amido presente inicialmente na fruta mais verde e uma tendência mais forte a reações de Maillard nas bananas mais maduras, devido à maior quantidade de açúcares.

4.2. Dinâmica de expansão de volume durante a secagem

A variação da temperatura no interior de frutas e hortaliças durante o processo de desidratação com ar quente tem sido estudada por diversos pesquisadores.

De acordo com VACAREZZA et al. (1974), a temperatura aumenta no início da secagem aproximando-se da temperatura de bulbo seco do ar. Entretanto, a diferença entre a temperatura do material e a temperatura do ar torna-se desprezível somente quando a maior parte da água inicial do alimento foi evaporada.

ALZAMORA et al. (1979) desidrataram fatias de abacate de 9,3 milímetros de espessura com ar quente a 57 °C, e constataram que o gradiente de temperatura interno era muito pequeno após um longo tempo de secagem, com uma diferença máxima de 2 °C entre o centro e a superfície da fatia. Por outro lado, WOLF & BIMBENET (1986) encontraram diferenças de temperatura entre o centro e a superfície de cubos de cenoura de até 20 °C. Diferenças de temperatura por volta de

10 a 15 °C entre o centro e a superfície de fatias de maçãs foram também medidas por CHIANG & PETERSON (1986).

Com o objetivo de melhor entender o mecanismo de expansão de volume, foi determinada a temperatura no interior das fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix durante o transcorrer da secagem HTST em secador de leito fluidizado. Para fins comparativos, determinou-se também a temperatura no interior das fatias durante uma desidratação em secador de bandejas.

Neste experimento, foram realizados ensaios com três temperaturas diferentes do ar de secagem em leito fluidizado: 110, 130 e 150 °C. Dois procedimentos diferentes foram utilizados para medir a temperatura no interior das fatias:

No primeiro, uma amostra contendo 100 gramas de fatias de banana-prata pré-tratadas com amido foi alimentada na câmara de secagem que já operava em regime à temperatura desejada. O processo de secagem foi contínuo, mas durante intervalos definidos de tempo recolhia-se algumas fatias de dentro da câmara, por meio de uma concha previamente aquecida, e determinava-se a temperatura no seu interior utilizando um fio termopar de ferro-constantan que era manualmente introduzido dentro das fatias, o mais próximo possível do centro. A leitura da temperatura era feita por um indicador de marca DIGI-SENSE, e se definia em cerca de 3 segundos após a amostragem. Observou-se que essa temperatura se mantinha por um período de mais ou menos 5 segundos, garantindo dessa maneira que o valor lido correspondia muito próximo ao valor real na fatia dentro da câmara.

No segundo procedimento, o mesmo termopar utilizado anteriormente foi adaptado através de um orifício na parte lateral da expansão cônica, numa região bem próxima à junção com a câmara de secagem, de tal forma que o elemento sensor ficasse bem no centro. Uma fatia de banana-prata pré-tratada com amido foi então espetada na ponta do termopar e em seguida, com o secador de leito fluidizado já operando nas condições desejadas, a expansão cônica foi rapidamente

conectada à câmara de secagem, obtendo-se assim uma medida contínua da temperatura.

Apesar da alta velocidade do ar, a textura firme da fruta fez com a fatia permanecesse fixa ao termopar. Além disso, a flexibilidade do fio dentro da câmara originou uma leve movimentação da fatia de banana, simulando uma fluidização e,consequentemente, fazendo com que o processo se aproximasse mais da real condição de secagem em leito fluidizado.

Mesmo com a introdução do termopar no interior da fatia, originando um pequeno orifício na sua superfície, houve uma expansão de volume uma vez que a rápida secagem do amido formou uma cobertura homogênea por toda a sua extensão. O aumento de volume, no entanto, foi inferior ao produto desidratado pela forma tradicional.

Os resultados apresentados pelos dois procedimentos de medida, contínuo e descontínuo, foram bem parecidos e uma média desses valores nas diferentes temperaturas do ar e em diferentes tempos de secagem, são mostrados na Tabela 4.4.

A Figura 4.5 mostra curvas que representam a variação das temperaturas no interior das fatias nas diferentes temperaturas durante a secagem HTST em leito fluidizado.

TABELA 4.4. Variação de temperatura no interior de fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix durante a secagem HTST em secador de leito fluidizado com ar a 10 m/s e temperaturas de 110 130 e 150 °C

Tempo de secagem (min)	Temperatura interna das fatias (°C)		
	Tar = 110 °C	Tar = 130 °C	Tar = 150 °C
0,00	27,00	27,00	27,00
1.00	46,90	63,60	67,70
3.00	77,70	99,00	101,30
5.00	88,20	100,20	103,50
8.00	92,30	102,80	110,20
10.00	93,80	104,70	115,40
12.00	94,80	106,50	119,00
15.00	95,70	108,80	122,40
18.00	96,40	111,90	125,00
20,00	96,80	113,90	126,40

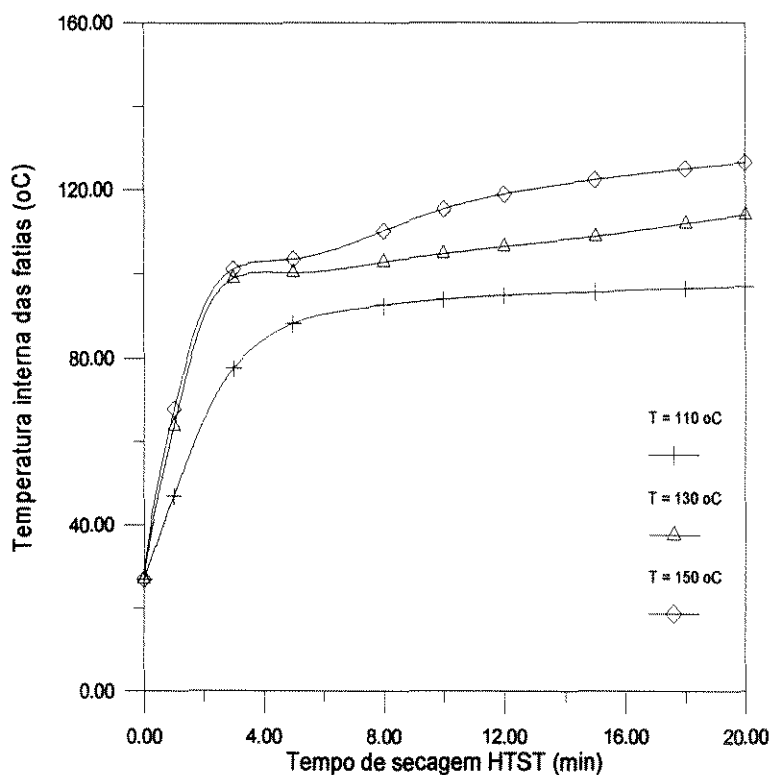


FIGURA 4.5. Variação de temperatura no interior de fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix durante a secagem HTST em secador de leito fluidizado com ar a 10 m/s e temperaturas de 110 130 e 150 °C

Para o caso da secagem convencional em secador de bandejas, novamente foram utilizados dois procedimentos diferentes de medida: no procedimento descontínuo uma quantidade suficiente de amostra pré-tratada com amido foi colocada na bandeja, e esta levada ao secador que operava em regime com ar a 70 °C e 1,25 m/s. O processo de secagem foi contínuo, mas durante intervalos definidos de tempo, a porta do secador era aberta e o termopar era manualmente introduzido no interior da fatia, o mais próximo possível do centro. O termopar e o indicador foram os mesmos utilizados no secador de leito fluidizado.

No procedimento contínuo, as portas do secador permaneceram fechadas durante o processo, e a medida das temperaturas no interior da fatia de banana-prata pré-tratada com amido, localizada dentro da bandeja, foi feita mediante a passagem do fio termopar através de um orifício lateral do secador. O termopar utilizado foi o mesmo do procedimento anterior. Os resultados das duas medidas também coincidiram e uma média é apresentada na Tabela 4.5 e Figura 4.6

TABELA 4.5. Valores da variação de temperatura no interior de fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix durante a desidratação em secador de bandejas com ar a 70 °C e 1,25 m/s

Tempo de secagem (min)	Temperatura interna das fatias (°C)
0,00	27,00
5,00	36,90
10,00	41,80
15,00	49,50
20,00	54,30
25,00	56,40
30,00	57,50
40,00	59,20
50,00	59,70
60,00	60,70
90,00	62,70
120,00	64,20
150,00	65,30

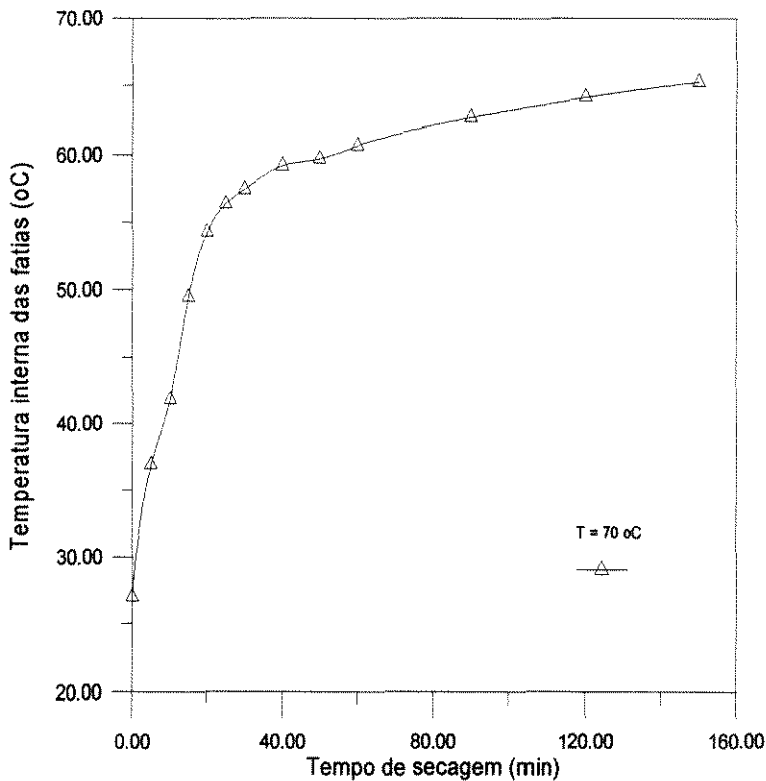


FIGURA 4.6. Curva de variação da temperatura no interior de fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix durante a desidratação em secador de bandejas com ar a 70 °C e 1,25 m/s

Para um melhor acompanhamento do fenômeno a 130 °C, as Figuras 4.7 a 4.12 mostram fotografias das fatias de banana-prata *in natura* de 14 °Brix submetidas à secagem HTST em leito fluidizado durante 0,5 , 3 , 5 , 10 e 12 minutos, respectivamente. Ao contrário das fotografias das Figuras 4.1 a 4.4, elas representam o produto assim que saiu do leito fluidizado, antes da secagem final em secador de bandejas.

A Figura 4.13 mostra uma fotografia tirada em microscópio de uma fatia de banana-prata seccionada, permitindo ver a cobertura formada pelo amido

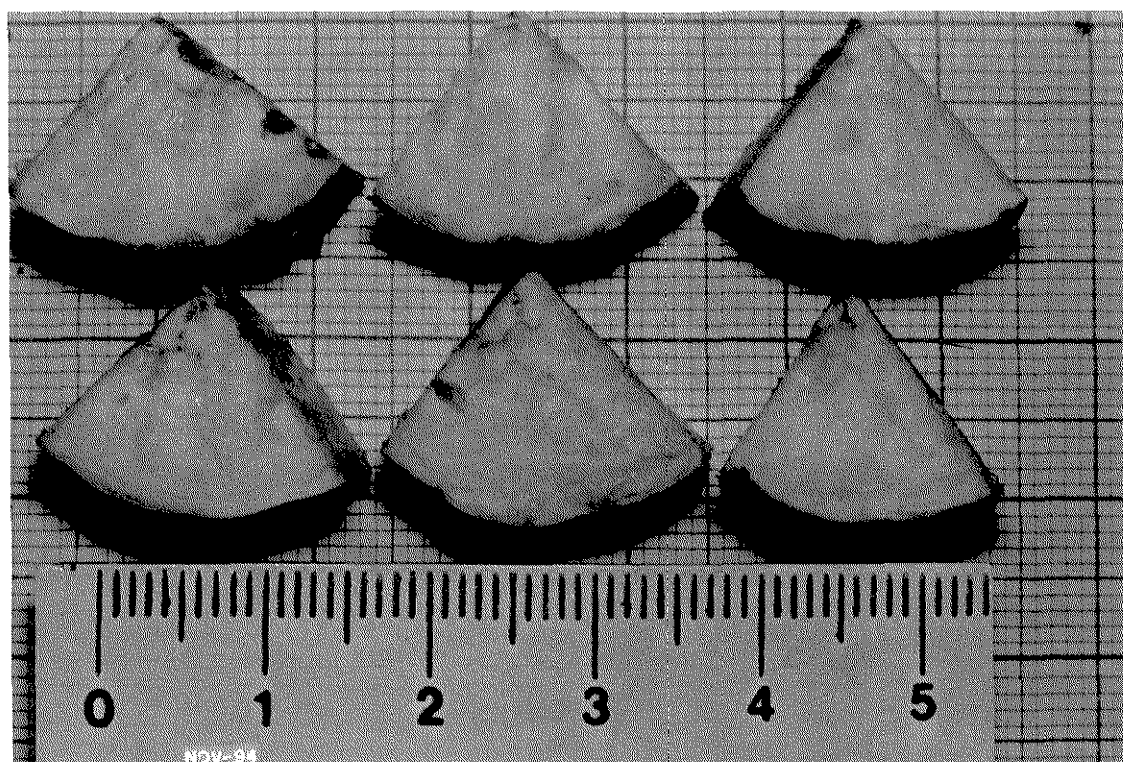


FIGURA 4.7. Fatias de banana-prata *in natura* com estágio de maturação de 14 °Brix

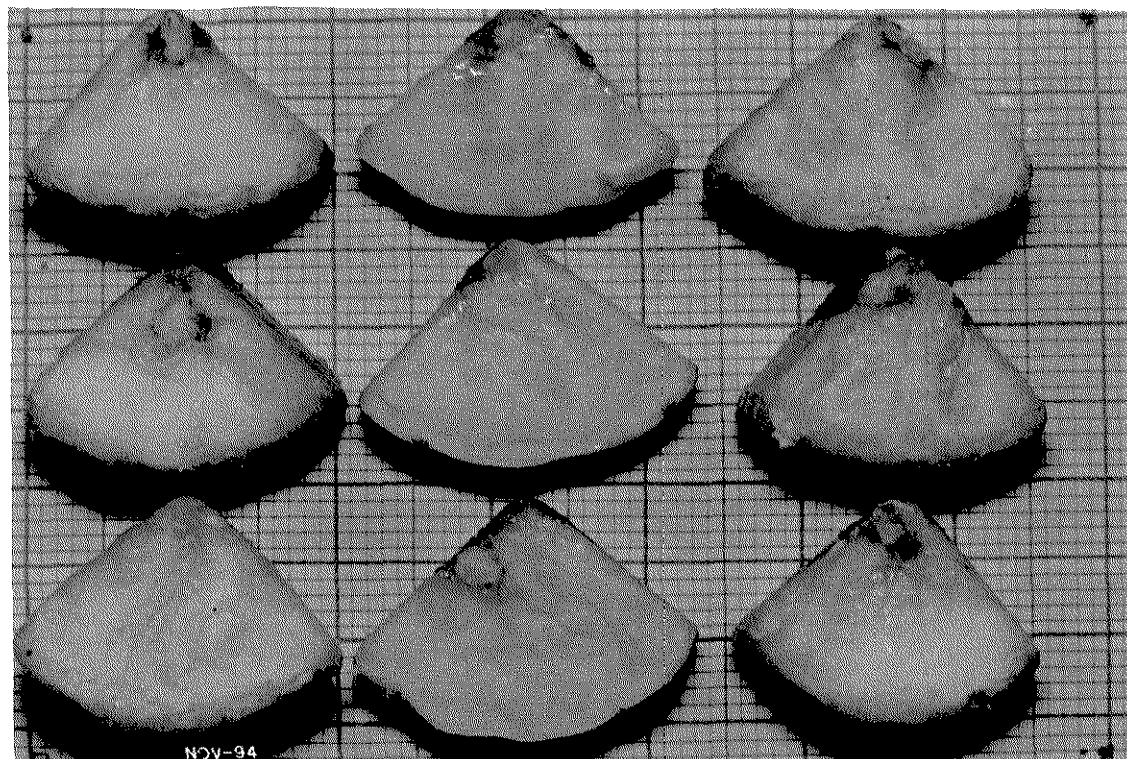


FIGURA 4.8. Efeito de 0,5 minutos de secagem HTST em secador de leito fluidizado a 130 °C em fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix

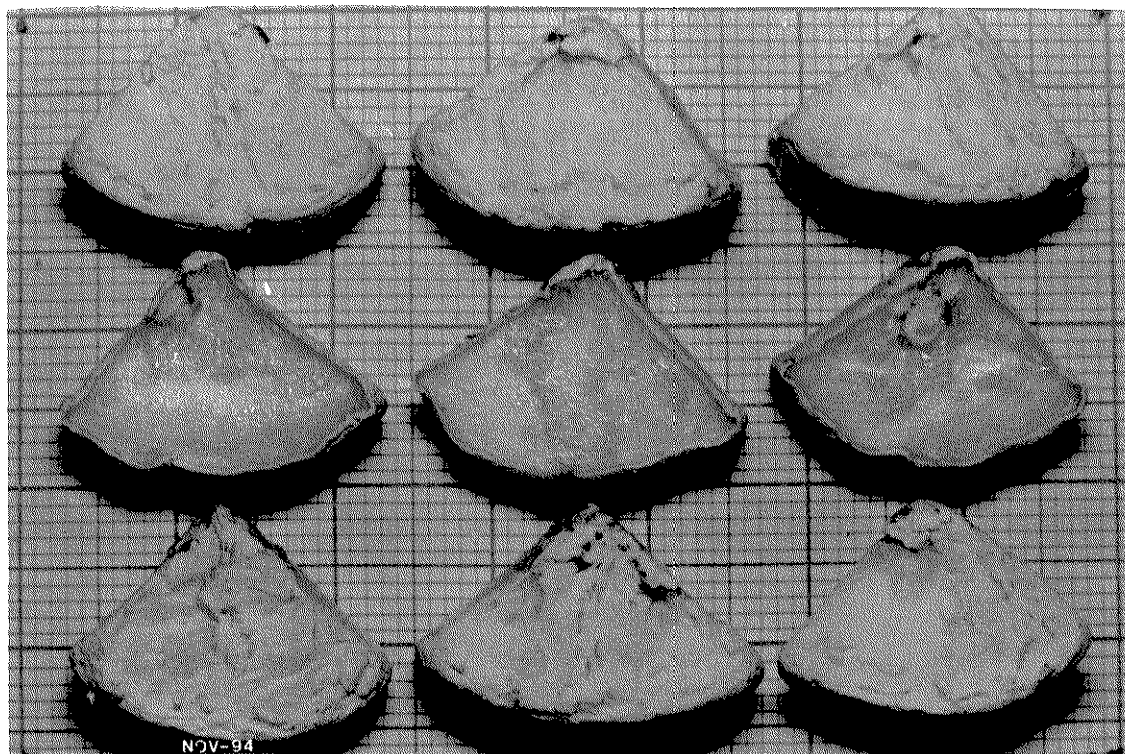


FIGURA 4.9. Efeito de 3 minutos de secagem HTST em secador de leito fluidizado a 130 °C em fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix

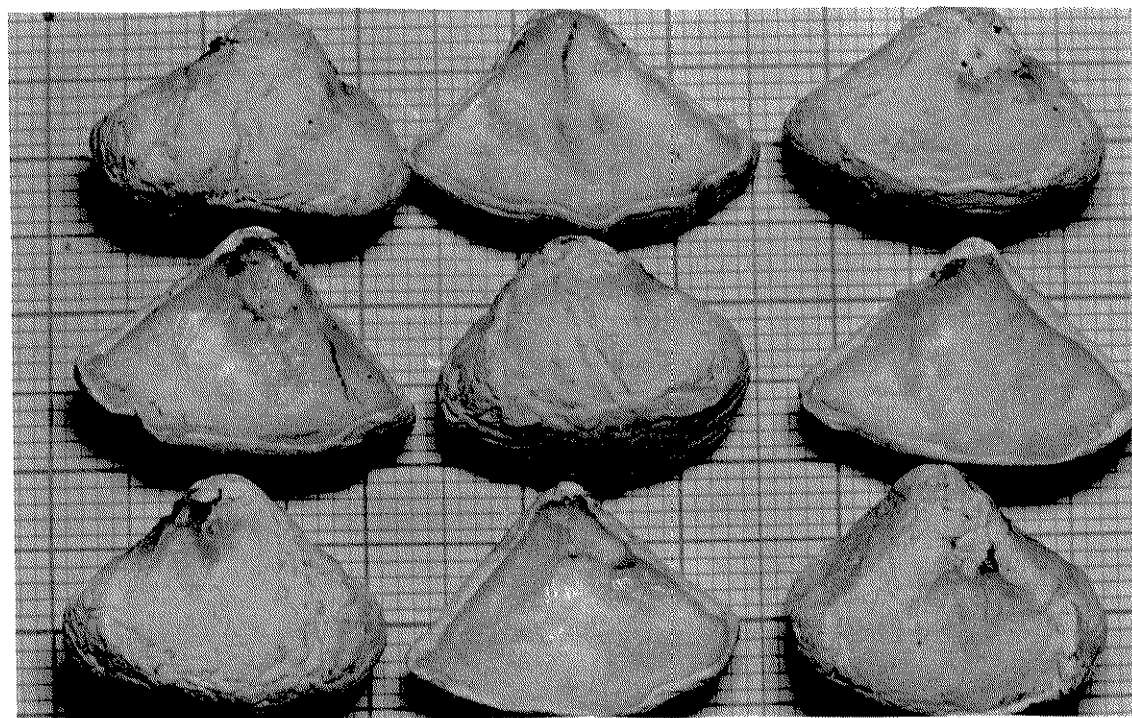


FIGURA 4.10. Efeito de 5 minutos de secagem HTST em secador de leito fluidizado a 130 °C em fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix

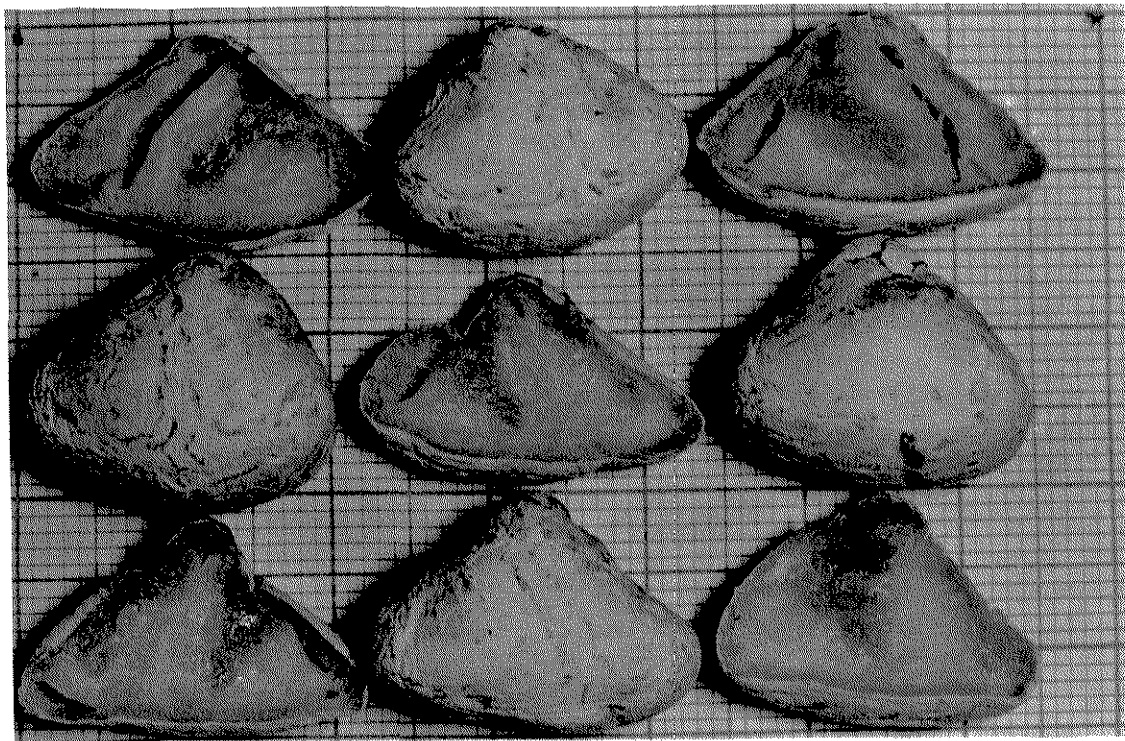


FIGURA 4.11. Efeito de 10 minutos de secagem HTST em secador de leito fluidizado a 130 °C em fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix

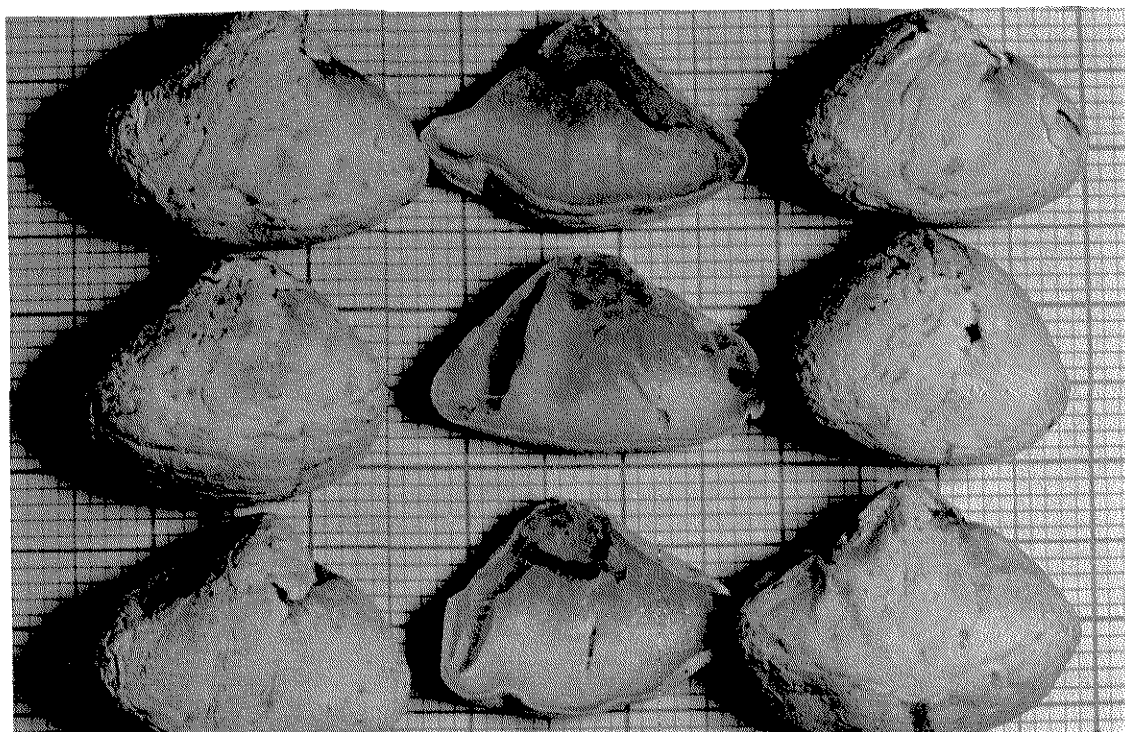


FIGURA 4.12. Efeito de 12 minutos de secagem HTST em secador de leito fluidizado a 130 °C em fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix

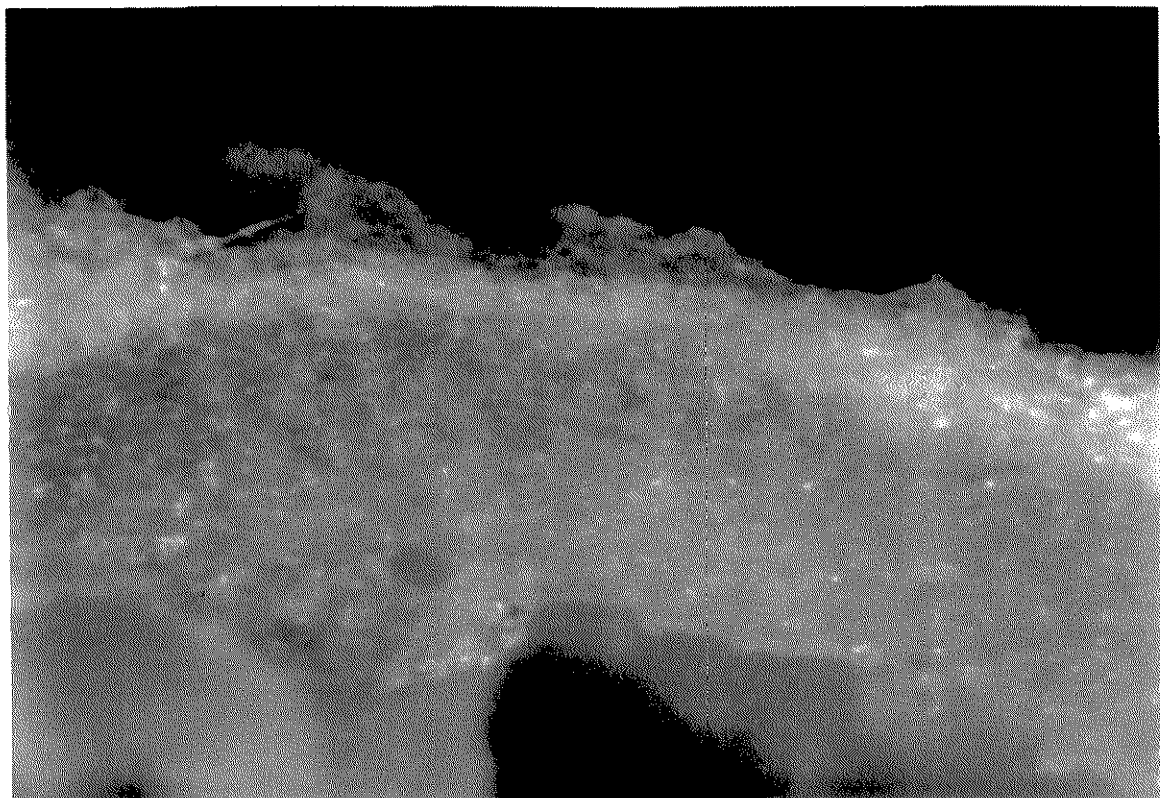


FIGURA 4.13. Fotografia de uma fatia seccionada de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix que foi submetida a secagem HTST em leito fluidizado a 130 °C durante 12 minutos, obtida em microscópio com escala de ampliação de 90 vezes

Analisando a variação da temperatura no interior das fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix , mostrados na Figura 4.5, constata-se que todas as curvas apresentam a mesma tendência, ou seja, no início da secagem HTST a temperatura interna das fatias aumenta rapidamente, para depois subir mais lentamente, atingindo, após 20 minutos de secagem, 96,8 , 113,9 e 126,4°C, nas temperaturas de 110, 130 e 150 °C, respectivamente.

O formato da curva entretanto, é diferente para a secagem com ar a 110 °C, comparado com a secagem a 130 e 150 °C. Com ar a 110 °C a curva é mais suave, enquanto que com ar a 130 e 150 °C ela sofre deflexões quando a temperatura do produto atinge cerca de 100 °C.

As curvas apresentam um pequeno patamar que se estende por mais de 4 minutos, no qual a temperatura do produto sobe apenas 3 °C. Neste período, considerável fração do calor que a fatia recebeu deve ter sido consumido na vaporização da umidade, aumentando a pressão interna do produto. Após cerca de 6 minutos de tratamento, as curvas de temperaturas tornam a mostrar outra tendência crescente, porém menos acentuada.

Foi observado, na prática, que em todos os casos a temperatura interna da fatia continuava a subir após os 20 minutos de secagem. Devido a alta temperatura utilizada no processo, entretanto, a fatia tornava-se muito dura e apresentava uma coloração bastante escura.

Constata-se, pela Figura 4.8, que 0,5 minutos de secagem não foram suficientes para secar completamente a cobertura de amido na superfície das fatias. Isso pode ser melhor observado comparando-se as fatias seccionadas, localizadas na coluna central da fotografia, com as outras. Não houve a formação visual de uma casca na superfície, que ainda continua bastante úmida.

Já na Figura 4.9, que mostra o efeito de 3 minutos de secagem HTST em leite fluidizado, nota-se que a camada de amido já está totalmente seca. As fatias seccionadas, localizadas na linha central, mostram o seu interior bastante úmido e permitem observar nitidamente uma casca, formada pela camada externa coberta pelo amido. Neste estágio as fatias praticamente mantiveram sua geometria original, conforme comparadas com o formato das fatias de banana *in natura*, apresentadas na Figura 4.7. As faces seccionadas, entretanto, começam a sofrer um abaulamento, que, provavelmente, indica o início do processo de expansão.

Aos 5 minutos de secagem, o processo de expansão já está em andamento, conforme visto na Figura 4.10. A camada externa torna-se mais rígida e as fatias começam a adquirir uma forma arredondada. Observam-se algumas fissuras e espaços vazios no interior das fatias, que vão se acentuando com o decorrer do

processo de secagem. Isso pode ser visto nas Figuras 4.11 e 4.12. Depois de 12 minutos de secagem a fatia expandida praticamente mantém sua forma externa arredondada, que persiste durante a secagem final em secador de bandejas. Neste estágio de secagem, a cobertura externa formada pelo amido pode ser melhor visualizada com a ajuda de um microscópio, cuja fotografia é mostrada na Figura 4.13. A camada branca na superfície da fatia representa a cobertura de amido e mostra ser bastante compacta, podendo, realmente, dificultar a saída de vapor de água formado no interior das fatias e, conseqüentemente, auxiliar na sua expansão. Constata-se também a presença de poros ou espaços vazios no seu interior, que auxiliam na migração de umidade aumentando a absorção de água durante a reidratação.

Nota-se que a 130 °C a expansão de volume se iniciou entre 3 e 5 minutos de tratamento, um período de tempo que corresponde ao patamar de formação de vapor, da Figura 4.5. No processo que usa ar a 150 °C, observou-se que a expansão se inicia a um tempo menor, o que também pode ser visto na Figura 4.5. Sabe-se que no interior de alimentos muito úmidos, a maior parte da água se encontra levemente ligada à matriz celular. Sua evaporação, portanto, necessita de apenas um pequeno excesso de temperatura acima dos valores energéticos correspondentes à pressão atmosférica de Campinas, em torno de 710 mmHg. Estas constatações confirmam que a expansão pode ser consequência de um aumento da pressão interna das fatias controlada pela evaporação da água e seu aquecimento à temperaturas superiores a 98 °C. O vapor formado é parcialmente impedido de sair pela camada semi-permeável formada pela cobertura de amido, motivo pelo qual ocorre o “puffing”.

Nos ensaios a 110 °C não houve expansão de volume e a temperatura atingida no centro das fatias foi de 96,8 °C depois de 20 minutos de secagem. Nesse caso o calor transmitido ao produto não foi suficiente para aumentar a temperatura interna da fatia acima de 98 °C e, conseqüentemente, proporcionar um efetivo aumento de pressão interna capaz de expandir o produto.

Análise semelhante pode ser feita às fatias que foram desidratadas em secador de bandejas a 70 °C. A variação de temperatura é mostrada na Figura 4.6. Nota-se que o aumento de temperatura no interior das fatias é muito lento, e a temperatura máxima obtida no centro das mesmas foi de 65,3 °C depois de 2,5 horas de secagem.

4.3. Inativação enzimática

Uma grandeza muito utilizada para representar o efeito de tratamentos térmicos em alimentos é o valor F, o qual denota a intensidade de um tratamento qualquer em termos de “minutos a uma temperatura de referência” (QUAST, 1976).

Matematicamente, F é definido como:

$$F_{T_1} = \int_0^t 10^{(T_2-T_1/Z)} dt \quad (4.1)$$

onde:

F_{T_1} = valor F, em minutos, à temperatura de referência T_1 .

T_2 = temperatura do produto a qualquer momento, podendo variar com o tempo.

t = tempo (minutos).

Z = valor Z (mesma escala de T_1 e T_2).

Para $t = 1$ minuto, a Equação (4.1) representa a Taxa Letal, isto é, o número de minutos à temperatura de referência a que corresponde um minuto à temperatura de processo.

$$\text{Taxa Letal} = 10^{(T_2-T_1/Z)} \quad (4.2)$$

Outra grandeza muito utilizada é o valor D, normalmente conhecido como tempo de redução decimal, ou seja, é o tempo necessário para reduzir o número de microrganismo a um décimo do inicial, a uma determinada temperatura. Como a morte dos microrganismos é logarítmica, o valor D também é conhecido como o tempo de aquecimento necessário para reduzir o número de sobreviventes de um ciclo logarítmico.

Os históricos das temperaturas no centro das fatias de banana apresentados na Tabela 4.4 permitem calcular a intensidade do tratamento térmico em relação à atividade enzimática. Atendo-se apenas aos valores correspondentes à secagem com ar a 130 °C, e considerando a peroxidase como sendo um indicador da efetividade do tratamento térmico por ser muito resistente à inativação por calor, o valor de F foi calculado.

Valores médios de D e Z para a peroxidase, encontrada em frutas tropicais, foram obtidos na literatura como sendo iguais a 1,5 minutos e 21 °C, respectivamente, na temperatura de referência de 80°C (RAMANUJA et al., 1988 ; RAMASWAMY & RANGANNA, 1981). Com esses dados, o valor F encontrado foi de 115,4 minutos, ou seja, o tratamento térmico aplicado nos ensaios foi equivalente ao tratamento de 115,4 minutos a 80 °C. Uma vez calculado o F, a redução do número de enzimas que tal processo pode ocasionar foi calculado pela razão F/D, que foi equivalente a 76,93, ou seja, houve uma redução de aproximadamente 77 ciclos logarítmicos.

Esses cálculos confirmam a efetividade do tratamento térmico com ar a 130 °C durante 12 minutos em leito fluidizado na inativação da peroxidase, obtida anteriormente através do teste qualitativo com guaiacol.

4.4. Efeito da pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo (HTST) em secador de leito fluidizado na qualidade de fatias de banana-prata desidratada

Com base nas informações obtidas nos testes preliminares, foram programados ensaios definitivos visando uma comparação entre a secagem convencional em secador de bandejas e o método com dois estágios , ou seja, usando o secador de leito fluidizado como uma etapa de pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo (HTST), seguido da secagem final em secador de bandejas. Foram utilizadas amostras com estágio de maturação de 14 e de 18 °Brix , e a quantidade utilizada para cada ensaio foi de 100 gramas.

Na secagem convencional em secador de bandejas, as amostras foram diretamente colocadas nas bandejas e levadas ao secador durante 6 horas, que operou com ar a 70 °C e 1,25 m/s. Na secagem em dois estágios as amostras sofreram uma pré-secagem durante 12 minutos no secador de leito fluidizado que operou com ar a 130 °C e 10 m/s. A secagem final foi realizada em secador de bandejas durante 5,5 horas nas mesmas condições descritas no primeiro método.

Em ambos os métodos, as amostras foram pré-tratadas, durante 2 minutos, com a suspensão de amido de mandioca gelatinizado na concentração de 2% à temperatura ambiente. Os produtos finais foram submetidos a análises quantitativas de densidade real, teor de umidade e reidratação.

Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.6 e 4.7 e Figuras 4.14 e 4.15, e as curvas de reidratação são apresentadas nas Figuras 4.16 a 4.19.

TABELA 4.6. Comparação entre o teor de umidade densidade real e reidratação de fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix desidratadas com e sem a pré-secagem HTST a 130°C

Método de secagem	Teor de umidade (b.u.) %	Densidade (g/cm ³)	Água absorvida (%)			
			5 min	10 min	15 min	20 min
Convencional	7,12	0.7535	0.7381	0.9903	1.3210	1.7098
Dois estágios	5,64	0.3521	1.5092	2.4576	2.8546	3.3131

TABELA 4.7. Comparação entre o teor de umidade densidade real e reidratação de fatias de banana-prata com estágio de maturação de 18 °Brix desidratada com e sem a pré-secagem HTST a 130 °C

Método de secagem	Teor de umidade (b.u.) %	Densidade (g/cm ³)	Água absorvida (%)			
			5 min	10 min	15 min	20 min
Convencional	7,31	0.8149	0.6869	0.9479	1.1937	1.2590
Dois estágios	5,73	0.4514	0.8319	1.7529	1.8350	2.1873

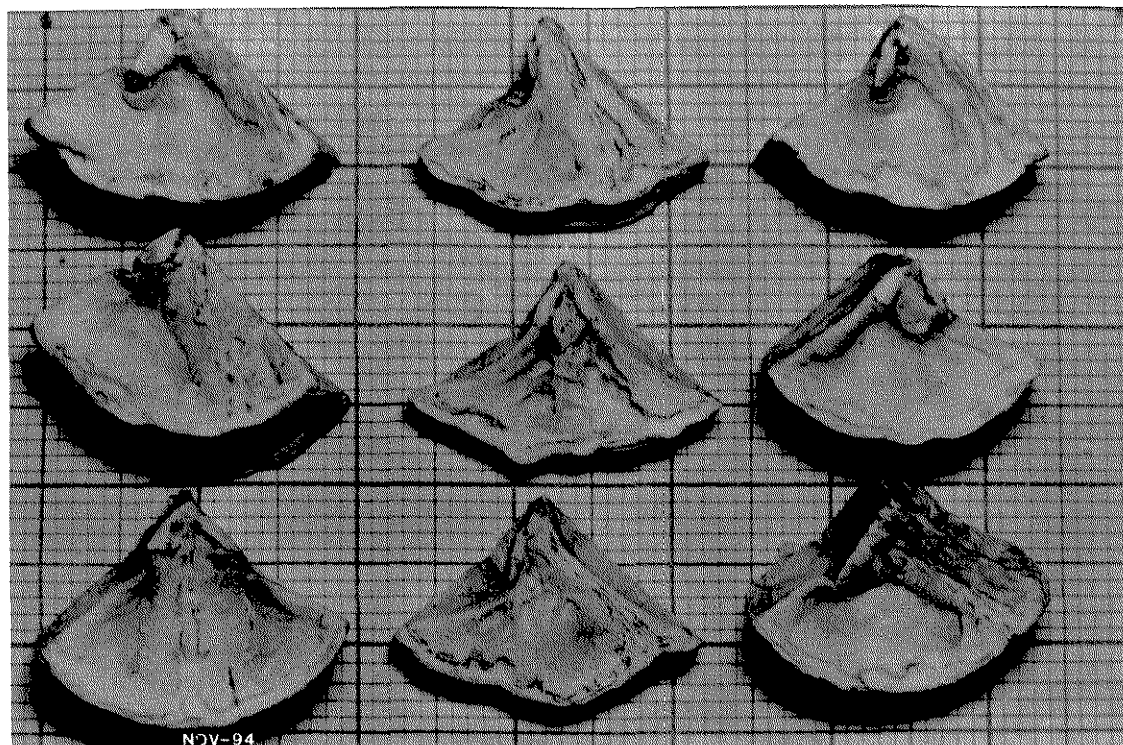


FIGURA 4.14. Fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix desidratadas pelo método convencional : secador de bandejas a 70 °C durante 6 horas.

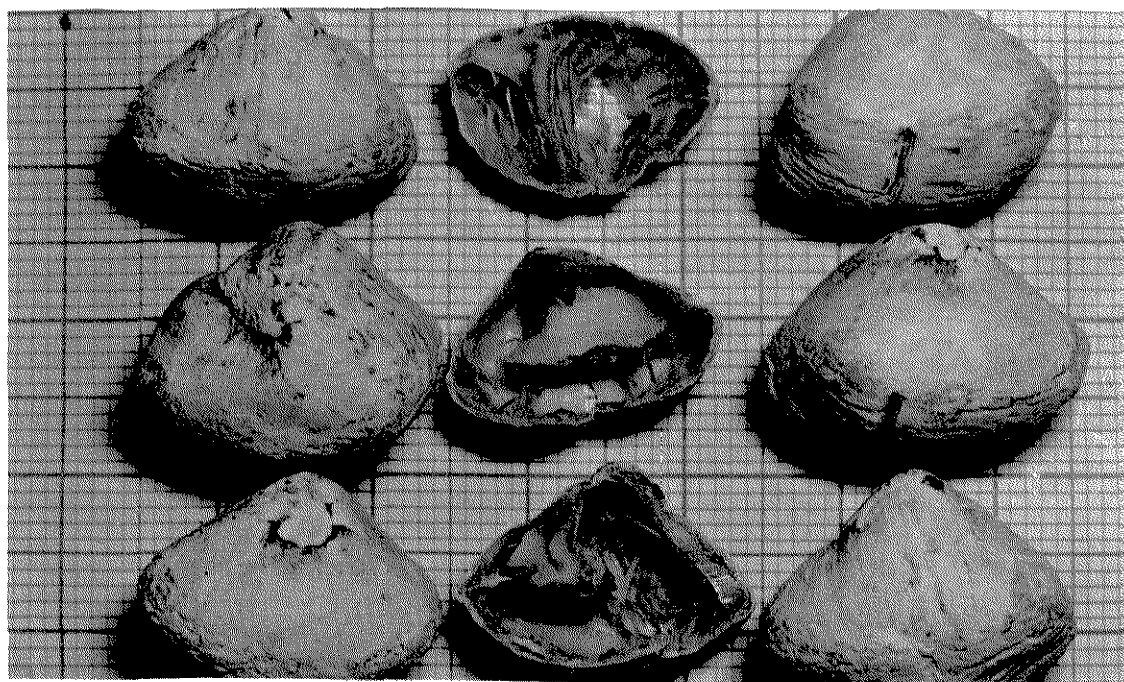


FIGURA 4.15. Fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix desidratadas pelo método a dois estágios : pré-secagem HTST em leito fluidizado a 130 °C durante 12 minutos seguido de secador de bandejas a 70 °C durante 5,5 horas.

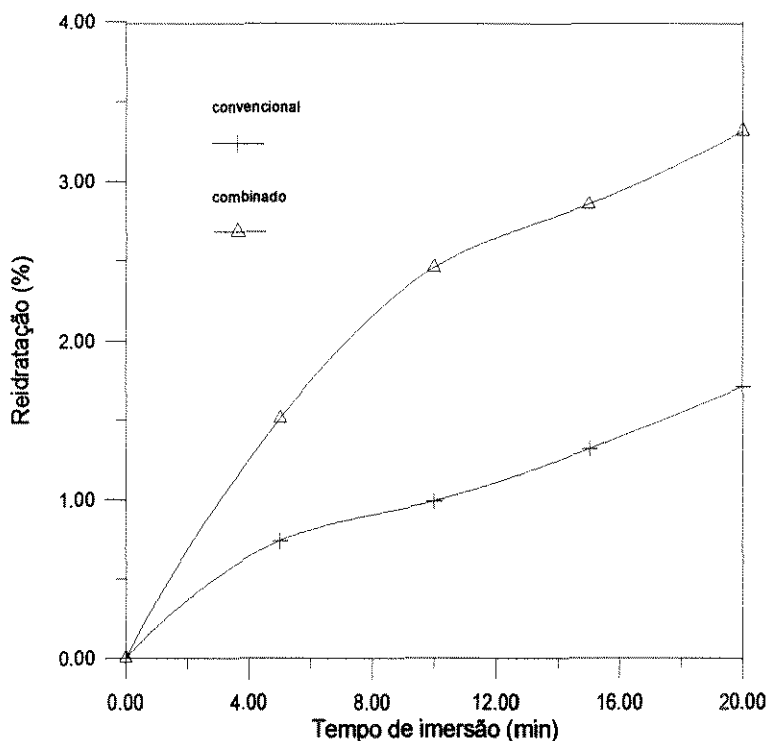


FIGURA 4.16. Curva de reidratação para fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix desidratadas com e sem a pré-secagem HTST

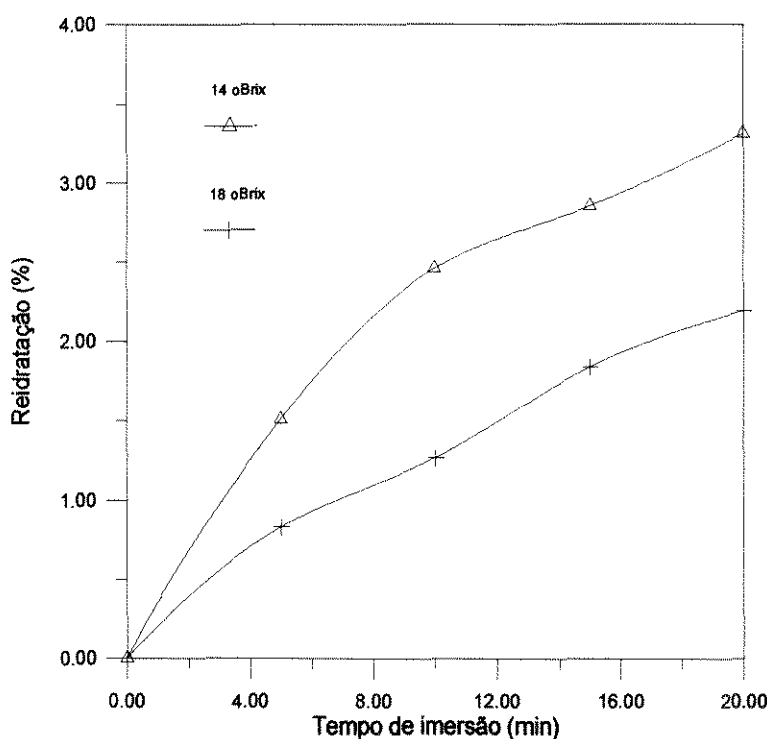


FIGURA 4.17. Curva de reidratação para fatias de banana-prata com estágio de maturação de 18 °Brix desidratadas com e sem a pré-secagem HTST

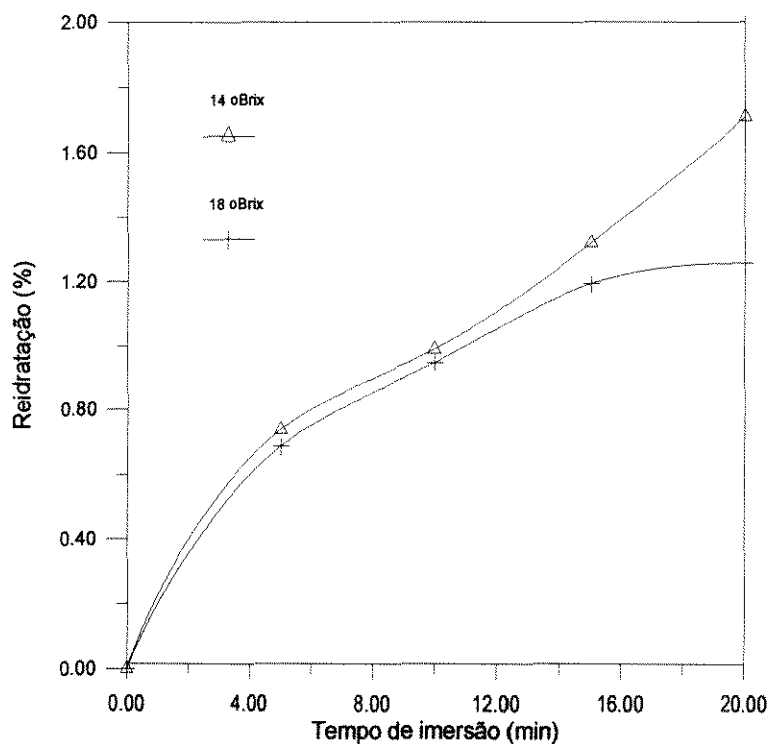


FIGURA 4.18. Comparação das curvas de reidratação para fatias de banana-prata de diferentes estádios de maturação desidratadas pelo método convencional

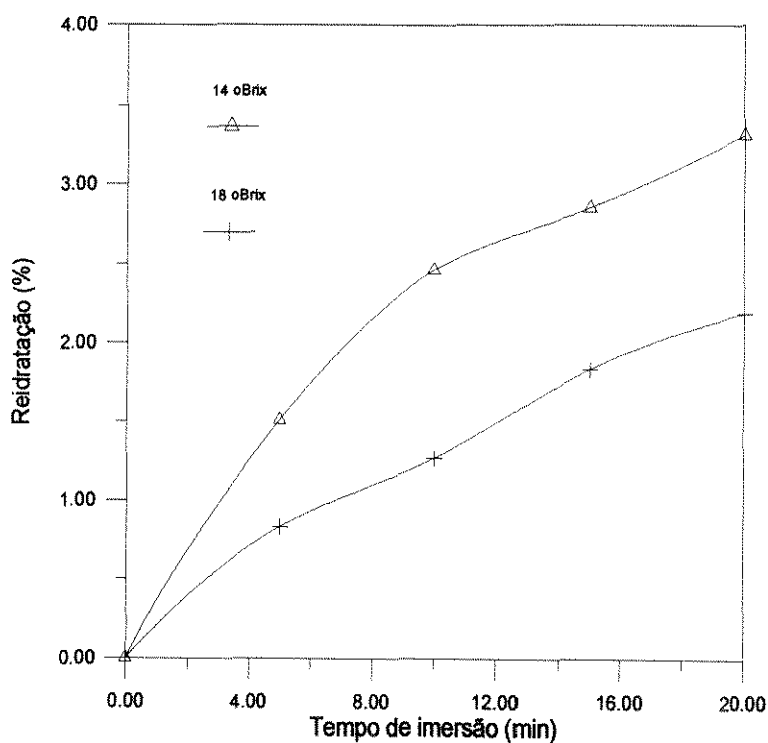


FIGURA 4.19. Comparação das curvas de reidratação para fatias de banana-prata de diferentes estádios de maturação desidratadas pelo método a dois estágios

Uma comparação entre as Figuras 4.14 e 4.15 permite observar nitidamente o efeito da pré-secagem HTST na expansão de volume das fatias de banana-prata. Na Figura 4.14, as fatias que não sofreram a pré-secagem HTST se encolheram, adquirindo uma aparência enrugada e tornando-se pouco atrativa ao consumidor. As partes seccionadas, localizadas na coluna central, mostram a estrutura interna sem espaços vazios, que torna o produto duro e difícil de mastigar. Nesse caso, a sua densidade real é alta e a capacidade de absorver água durante a reidratação é baixa, ao contrário do que acontece com as fatias que sofrem a pré-secagem HTST, como pode ser visto na Figura 4.15. Elas apresentam valores de densidade real quase que três vezes menores, em consequência da estrutura porosa formada no produto final. Esses poros auxiliam na migração de água para o interior das fatias, aumentando sua absorção durante a reidratação. A fatia expandida praticamente mantém sua forma externa, porém seu interior é mais poroso.

Análise semelhante pode ser feita para fatias de banana com estágio de maturação de 18 °Brix. No entanto a expansão de volume é menor devido à maior fragilidade da estrutura celular da fruta. Nesse caso, com e sem a pré-secagem, a densidade real é maior e a reidratação é menor, quando comparada aos valores obtidos com banana de 14 °Brix.

Na Figura 4.16, observa-se que a taxa de reidratação das fatias que sofrem a pré-secagem é maior e o teor de água reidratado é mais alto do que aquelas desidratadas pelo método convencional. A Figura 4.17 apresenta a mesma tendência, só que desta vez o volume absorvido na reidratação é menor devido a estrutura menos porosa do produto.

A influência do grau de maturação na reidratação das fatias de banana-prata desidratadas com e sem a pré-secagem também pode ser vista nas Figuras 4.18, para o método convencional, e 4.19 para o método que usa dois estágios. Em ambos os casos, as curvas apresentam a mesma tendência, ou seja, quanto menor o estágio de maturação maior será a resistência de sua estrutura celular durante a desidratação e, conseqüentemente, maior será o volume de água absorvida na reidratação.

4.5. Estudo cinético da secagem de banana-prata em secador de leito fluidizado e ajuste de modelos matemáticos aos dados experimentais

4.5.1. Cinética de secagem

Foram levantadas as curvas de secagem para o processo a altas temperaturas e curto tempo, HTST, em secador de leito fluidizado. Utilizou-se banana-prata com estágio de maturação de 14 e 18 °Brix e com aproximadamente a mesma geometria: 1 centímetro de comprimento e 3 centímetros de diâmetro, valores referidos à banana sem casca. As curvas foram levantadas nas temperaturas do ar de 110, 130 e 150 °C, e a velocidade do ar foi em torno de 10 m/s, o suficiente para se obter uma boa fluidização .

As fatias de banana-prata, pré-tratadas com a suspensão de amido de mandioca gelatinizado, foram pesadas antes e após o pré-tratamento com o objetivo de determinar a massa do recobrimento, e em seguida foram alimentadas no leito que já operava em regime.

A retirada da câmara de secagem para pesagem contínua das amostras, nos diferentes tempos de secagem mostrou ser inviável, uma vez que, por mais rápida que fosse a pesagem, acarretaria um abaixamento muito grande na temperatura de secagem, devido a alta vazão de ar utilizada para a fluidização. Pensou-se também em uma forma de manter a câmara fixa e remover apenas as amostras para serem pesadas, porém detalhes construtivos iriam atrapalhar a fluidização.

A forma mais conveniente encontrada foi realizar uma série de ensaios em batelada, com tempos de operação diferentes. Amostras de uma mesma fruta, possuindo aproximadamente a mesma massa, 15 gramas, foram desidratadas individualmente nos tempos de 0,5 , 1, 3, 5, 10 e 15 minutos. A massa final das amostras foi obtida removendo-se a câmara de secagem e transferindo o produto para uma Placa de Petri previamente tarada em uma balança semi-analítica, e as

pesagens foram realizadas rapidamente com um tempo máximo de 5 segundos, após deixar o contato com o ar aquecido, sem comprometer muito a precisão dos resultados.

Os resultados são mostrados nas Figuras 4.20 e 4.21.

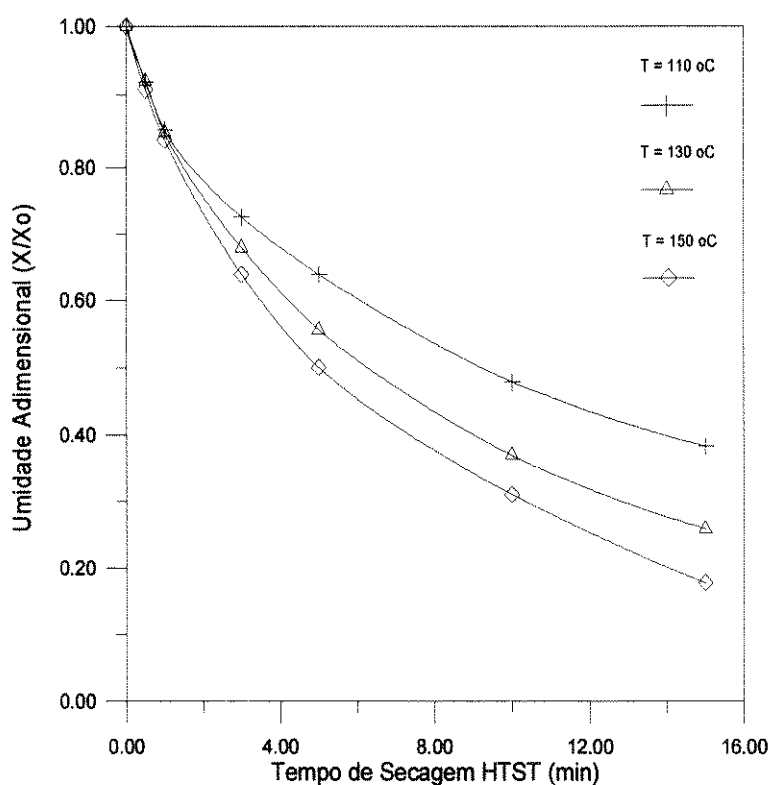


FIGURA 4.20. Curvas de secagem para fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix em secador de leito fluidizado a 110 130 e 150 °C

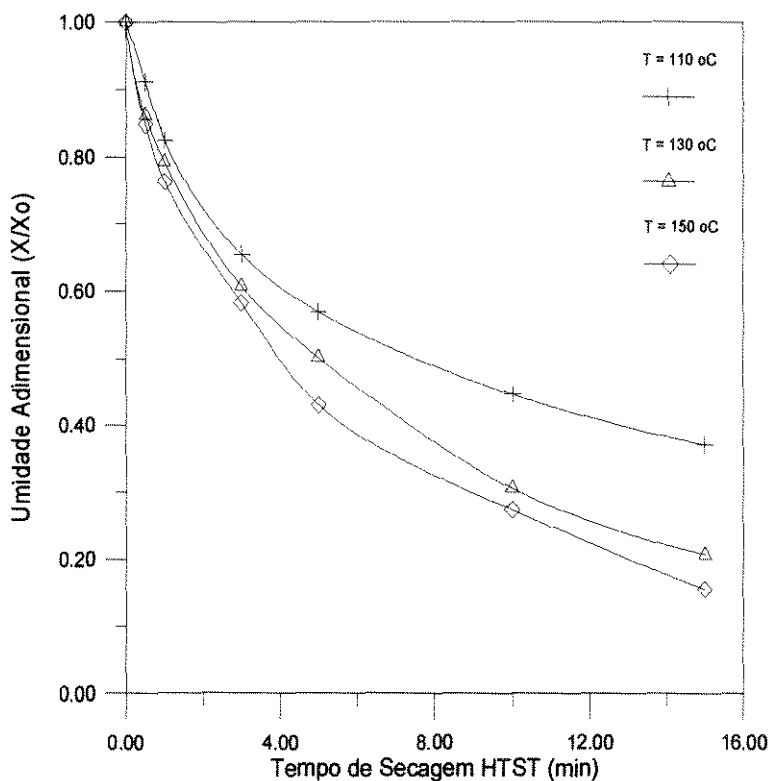


FIGURA 4.21. Curva de secagem para fatias de banana-prata com estágio de maturação de 18 °Brix em secador de leito fluidizado a 110 130 e 150 °C

Para fatias de banana-prata mais verdes, 14 °Brix, as curvas obtidas indicam uma tendência bem definida, apesar do processo ter sido realizado em uma série de batelada. A pequena dispersão observada nas curvas levantadas com fatias de banana mais maduras, 18 °Brix e temperaturas de 130 e 150 °C resultam de um início de desintegração do produto.

Uma vez determinada as curvas de secagem para as fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 e 18 °Brix em secador de leito fluidizado, partiu-se para o ajuste das curvas à modelos matemáticos já existentes na literatura.

As curvas da Figura 4.5 deixam claro que o processo não é isotérmico. Além disso, é de se esperar que a cobertura de amido, uma vez desidratada, nos primeiros

minutos de processo, atinja temperaturas próximas da do ar de secagem, o que faz com que o processo não se desenvolva a temperaturas uniformes.

Modelos que levam em conta a transferência de massa e de calor, como os de ROVEDO et al., (1995) e ALZAMORA et al., (1979), entretanto, necessitam de uma melhor caracterização das propriedades térmicas da matriz porosa formada. Procurou-se portanto, apenas um enquadramento entre os modelos mais simples existentes na literatura de secagem.

O primeiro modelo a ser testado foi o da difusão, baseado na segunda lei de Fick (Equação 2.1). De acordo com as premissas desse modelo, quando é locado $\log(x-x_e)/(x_0-x_e)$ em função do tempo de secagem, é de se esperar que os dados gerem uma reta. Segundo alguns autores, os dados podem manifestar tendências em definir duas retas, que representam a existência de duas fases durante o período de taxa decrescente, como ocorre na secagem de muitos vegetais cortados (FINZER, 1984) e na secagem de músculos de peixes (JASON, 1958).

Os gráficos correspondentes são mostrados nas Figuras 4.22 e 4.23. Para cada temperatura, foi encontrada a umidade relativa do ar de secagem a partir das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido registradas em um psicrômetro. Os valores encontrados foram 2,3 %, 1,2 % e 0,8 % nas temperaturas de 110, 130 e 150 °C respectivamente. As umidades de equilíbrio correspondentes foram determinadas mediante a utilização do modelo de GAB a 25 °C (ver apêndice A). O valor médio da umidade inicial utilizado nos cálculos foi de 69,62 % em base úmida.

Observa-se, pelas Figuras 4.22 e 4.23, que em nenhum dos dois casos, 14 e 18 °Brix, houve um comportamento previsto pelo modelo. No caso de bananas mais verdes, as curvas chegaram a manifestar uma tendência em definir duas retas, porém a primeira delas, com inclinação mais acentuada, aconteceu apenas no primeiro minuto de secagem, provavelmente em função da

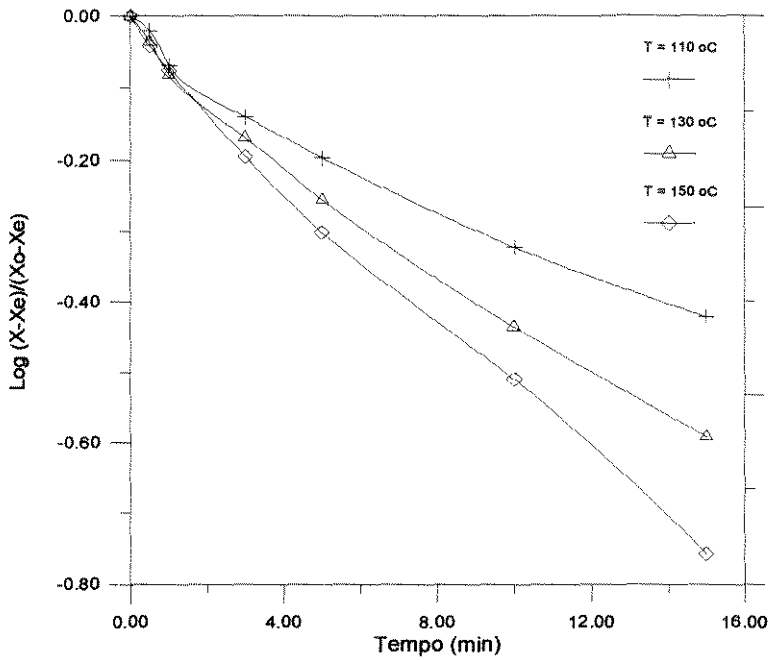


FIGURA 4.22. Curva de secagem em escala semi-logarítmica para fatias de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix nas temperaturas de 110 130 e 150 °C

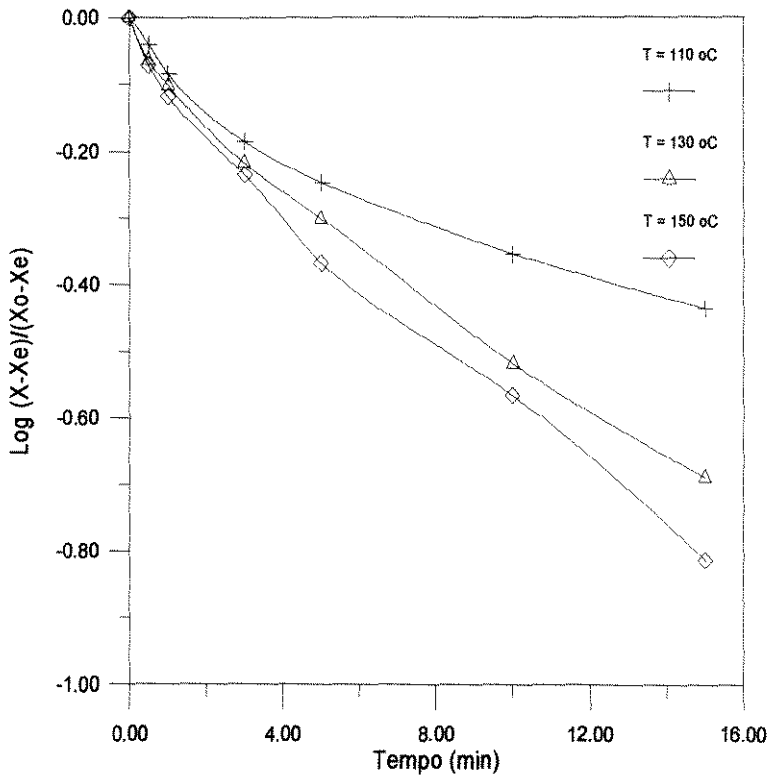


FIGURA 4.23. Curva de secagem em escala semi-logarítmica para fatias de banana-prata com estágio de maturação de 18 °Brix nas temperaturas de 110 130 e 150 °C

rápida remoção da umidade superficial das fatias de banana-prata quando expostas às condições de secagem HTST em leito fluidizado. Isso confirma que a secagem de banana-prata não pode ser representada pelo modelo de difusão de Fick isotérmica e com difusividade constante.

A tentativa seguinte foi ajustar os dados ao modelo de Page (Equação 2.4). O ajuste foi feito por meio de regressão não-linear utilizando-se o SAS (Statistical Analysis System). Foram obtidos os valores dos parâmetros K e N, bem como seus desvios padrões assintóticos (∂) e a soma dos quadrados dos resíduos (S). Os resultados são apresentados na Tabela 4.6.

TABELA 4.8. Parâmetros da Equação de Page com seus respectivos desvios padrões assintóticos (∂) e soma dos quadrados dos resíduos (S) em função da temperatura de secagem e estágio de maturação de banana-prata

°Brix	T (°C)	xe (b.s)	K (s ⁻¹)	∂K (s ⁻¹)	N	∂N	S
14	110	0.0146	0.1406	0.0124	0.7210	0.0408	0.0021
	130	0.0089	0.1697	0.0071	0.7710	0.0202	0.0006
	150	0.0064	0.1933	0.0116	0.7967	0.0303	0.00146
18	110	0.0146	0.2004	0.0172	0.6117	0.0414	0.0034
	130	0.0089	0.2306	0.0062	0.7080	0.0137	0.0004
	150	0.0064	0.2620	0.0107	0.7110	0.0219	0.0011

As Figuras 4.24 e 4.25 mostram uma comparação entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo.

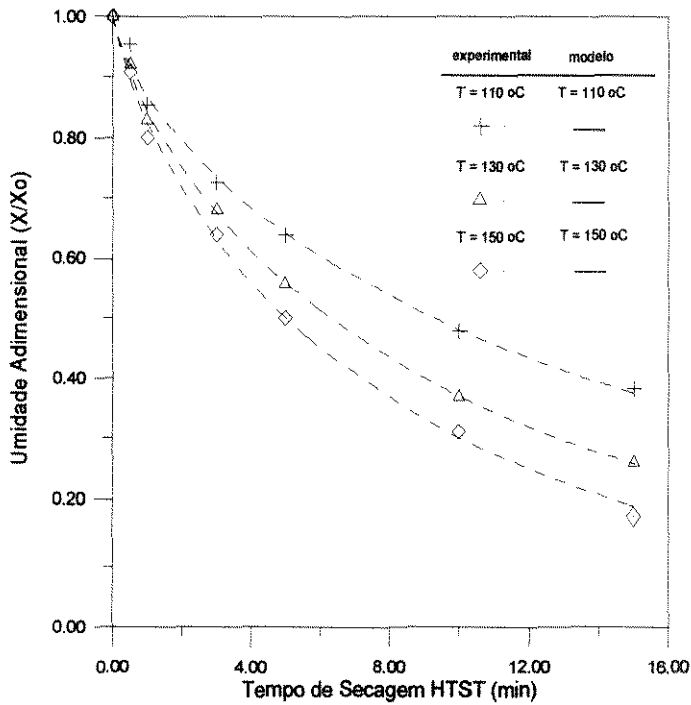


FIGURA 4.24. Curvas de secagem de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix ajustadas pelo modelo de Page

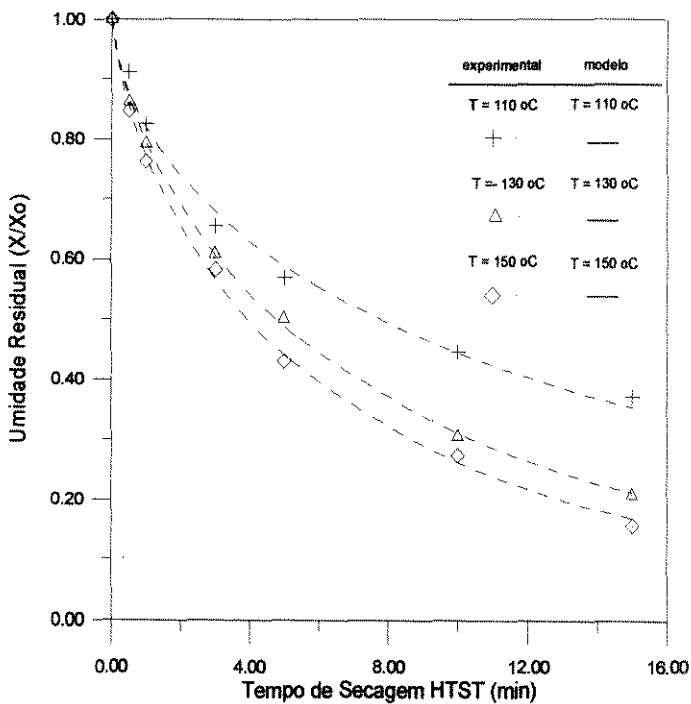


FIGURA 4.25. Curva de secagem de banana-prata com estágio de maturação de 18 °Brix ajustadas pelo modelo de Page

Observa-se pelos resultados apresentados na Tabela 4.8 que os parâmetros K e N são funções da temperatura e do estágio de maturação da fruta: quanto maior é o valor da temperatura, maior são os valores de K e N. Para banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix, os valores de K são menores comparados com frutas de 18 °Brix, enquanto que para N o comportamento é o inverso.

De acordo com MISRA & BROOKER (1980) N está relacionado com as condições internas do material, enquanto que K representa o efeito das condições externas.

O valor S representa a média dos quadrados dos resíduos e, portanto, quanto menor for este valor, melhor é o ajuste dos dados experimentais ao modelo escolhido. Constata-se pelas Figuras 4.24 e 4.25 e pelos resultados apresentados, que os menores valores de S, em ambos os estádios de maturação, correspondem à temperatura de 130 °C, ao passo que para 110 °C obteve-se os maiores valores de S.

De uma forma geral, conclui-se que o modelo de PAGE pode ser utilizado para representar a secagem de fatias de banana-prata a altas temperaturas e curto tempo (HTST) em leito fluidizado, principalmente na temperatura de 130 °C onde o ajuste foi muito bom.

O Modelo das Duas Resistências de Brunello (Equação 2.8), utilizado com sucesso para grãos, foi então testado. Nesse modelo assume-se que a evaporação da água contida no interior do grão se dá junto à face interna da membrana. Utilizou-se uma umidade e um tempo reduzidos, x_r e t_r , de tal forma que se pudesse obter uma correlação geral representando as curvas de secagem correspondentes à várias temperaturas do ar de secagem.

Os gráficos são mostrados nas Figuras 4.26 e 4.27 para 14 e 18 °Brix respectivamente.

Os valores de K foram determinados a partir das Figuras 4.20 e 4.21, como sendo o coeficiente angular da parte inicial da curva de secagem.

Como a umidade final de equilíbrio, x_e , variava pouco com a temperatura de secagem, como pode ser visto na Tabela 4.8, seu valor não foi incorporado nas definições de x_r e tr .

Uma correlação geral foi obtida a partir dos dados de secagem na sua forma reduzida para bananas de 14 e 18 °Brix, utilizando-se novamente o modelo de Page, onde a umidade de equilíbrio utilizada foi a média dos valores correspondentes às temperaturas de 110, 130 e 150 °C. Os resultados são mostrados na Tabela 4.9 e nas Figura 4.26 e 4.27.

TABELA 4.9. Parâmetros da Equação de Page com seus respectivos desvios padrões assintóticos (∂) e a soma dos quadrados dos resíduos (S) em função do estágio de maturação da banana-prata

°Brix	x_e	K	∂K	N	∂N	S
14	0.0099	0.7181	0.0113	0.7663	0.0196	0.0016
18	0.0099	0.5163	0.0105	0.7814	0.0201	0.0017

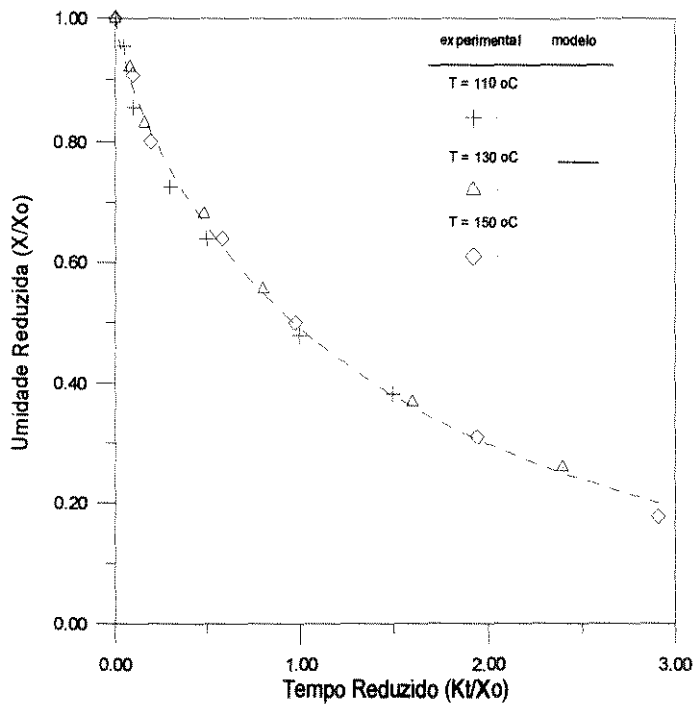


FIGURA 4.26. Correlação geral para secagem de banana-prata com estágio de maturação de 14 °Brix obtida através do ajuste das curvas ao modelo de Brunello

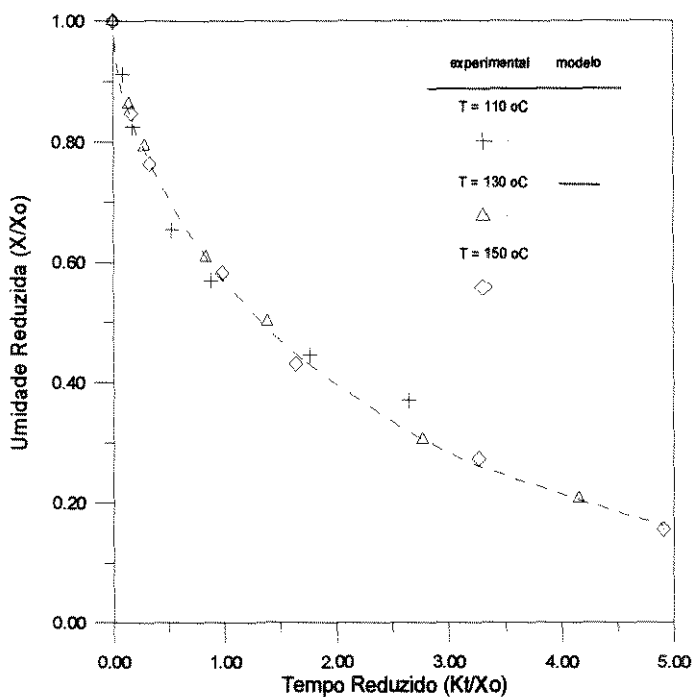


FIGURA 4.27. Correlação geral para a secagem de banana-prata com estágio de maturação de 18 °Brix obtida através do ajuste das curvas ao modelo de Brunello

Os baixos valores de S confirmam que o modelo de Brunello pode ser utilizado, com sucesso, para representar a secagem de banana-prata com estádios de maturação de 14 e 18 °Brix. As equações gerais de ajuste para os dois estádios de maturação, 14 e 18 °Brix são apresentadas a seguir:

$$k = \exp(-0,7181 t^{(0,7663)}) \quad (4.3)$$

$$k = \exp(-0,5163 t^{(0,7814)}) \quad (4.4)$$

Finalmente, na Figura 4.28 estão representados os valores de $1/K$, nas diferentes temperaturas de secagem, contra $1/(Prs-Pr)$ para ambos os estádios de maturação.

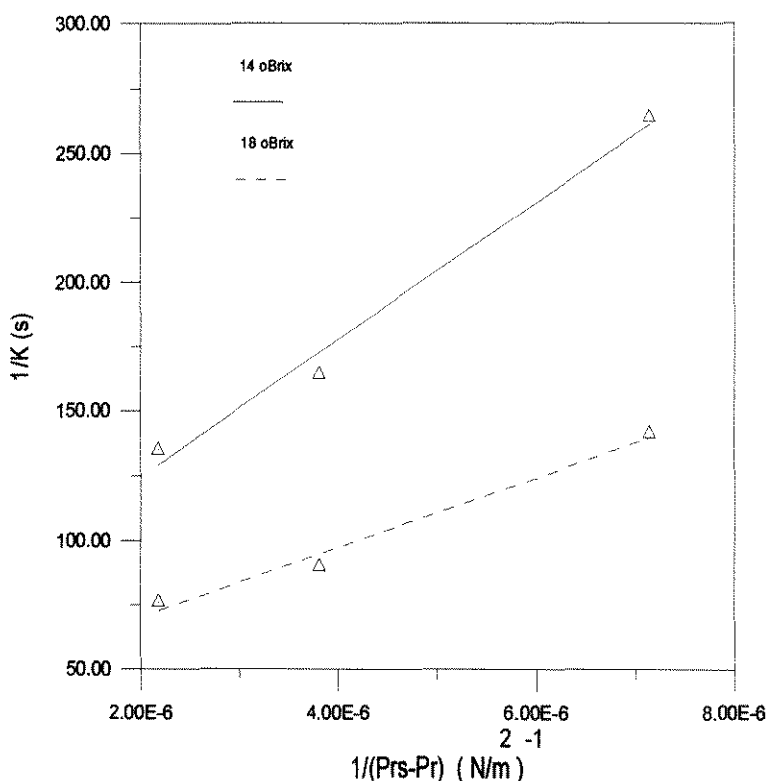


FIGURA 4.28. Variação de $1/K$ em função de $1/(Prs-Pr)$ na secagem de banana-prata com estádios de maturação de 14 e 18 °Brix

Esta figura permite encontrar o valor de K para outras condições de secagem a partir das temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco do ar. Com o valor de K e mais a umidade inicial e de equilíbrio, pode-se obter a curva de secagem a partir da correlação geral, e consequentemente os tempos de secagem.

5. CONCLUSÕES

- 1- O cultivar prata mostrou ser o mais adequada para utilização no processo de secagem HTST em secador de leito fluidizado dentre três variedade de bananas testadas, por apresentar uma polpa mais consistente oferecendo maior resistência mecânica durante a fluidização, comparada com outros cultivares no mesmo estágio de maturação.
- 2- Ficou comprovada a importância do teor inicial de amido presente na fruta, que fortalece a estrutura celular evitando o colapso das células durante a desidratação. Frutas mais verdes, ou seja, de menor Brix e maior quantidade de amido presente nas células, além de proporcionarem uma melhor fluidização dentro da câmara de secagem, resultam em um produto com maior expansão. O estágio de maturação ideal escolhido foi o do produto na faixa de 14 a 18 °Brix, por originar um “snack” crocante e com sabor agradável.
- 3- O pré-tratamento com soluções infiltrantes mostrou ser ineficiente para o caso de banana-prata. A estrutura celular da fruta é, provavelmente, o fator determinante no insucesso desse pré-tratamento, uma vez que a banana é classificada como um sólido não-poroso e, assim, dificulta a penetração dessas soluções nos espaços inter-celulares, bem como nas paredes das células. Outra hipótese é a de que não foi encontrada a solução infiltrante adequada para o caso de banana-prata.
- 4- A cobertura de amido na superfície das fatias de banana-prata tem uma contribuição significativa na expansão de volume, uma vez que o vapor formado no interior do produto é parcialmente impedido de sair pela camada semi-permeável formada pela rígida cobertura de amido, motivo pelo qual ocorre

o “puffing”. A concentração da suspensão de amido e o tempo de imersão das fatias mostrou não ter influência na expansão do produto.

- 5- Embora a literatura recomende tratamentos térmicos prévios à secagem de bananas para inativação das enzimas presentes na fruta, estes foram julgados dispensáveis nesse processo, pois a pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo HTST em secador de leito fluidizado foi suficiente para inativação da peroxidase nas amostras desidratadas de tamanho padronizado (rodela de 1 centímetro de espessura cortadas em quatro partes iguais).
- 6- Ficou comprovado a eficiência do método combinado de secagem na qualidade final do produto desidratado. A pré-secagem HTST em secador de leito fluidizado promoveu a expansão de volume das amostras, originando produtos com propriedades funcionais superiores aos desidratados pelo método convencional em secador de bandejas. No entanto, o “puffing” ocorre somente quando condições operacionais adequadas de secagem são utilizadas no processo HTST. As condições ótimas encontradas foram temperatura do ar de 130 °C, tempo de permanência na câmara de 12 minutos e velocidade do ar de 10 m/s. Nessas condições obteve-se “snacks” com boas propriedades organolépticas, entre elas, crocância devido à estrutura porosa formada, alto índice de reidratação, cor atraente e baixa densidade real. A secagem posterior em secador de bandejas durante 5,5 horas a 70 °C e 1,5 m/s manteve a estrutura expandida formada na pré-secagem e reduziu a sua umidade até o valor desejado.
- 7- A dinâmica de expansão de volume das amostras durante secagem HTST em secador de leito fluidizado nos permite concluir que em temperaturas acima de 98 °C, no interior das fatias, há um aumento da pressão interna dando-se início à expansão. Com o aumento contínuo da temperatura e evaporação da água, o vapor formado é parcialmente impedido de sair pela camada semi-permeável formada pela rígida cobertura de amido na superfície da fruta, originando o “puffing”. Com o ar de secagem a 110 °C, o calor transmitido ao produto não foi

suficiente para elevar a temperatura interna acima de 98 °C e, conseqüentemente, proporcionar um efetivo aumento de pressão interna capaz de expandir o produto.

- 8- Tanto o modelo de Page como o das Duas Resistências de Brunello podem ser utilizados para representar a secagem de fatias de banana-prata no processo a altas temperaturas e curto tempo HTST em secador de leito fluidizado, com vantagem para o último que correlaciona os dados para diferentes temperaturas de secagem.
- 9- A equação de GAB (Guggenheim - Anderson - deBoer) representou muito bem os dados da curva de equilíbrio a 25 °C.

APÊNDICE A

ISOTERMA DE ADSORÇÃO DE UMIDADE

A estabilidade biológica de um produto depende do seu teor de umidade, e pode ser relacionada com a atividade de água (a_w), que é definida para uma determinada temperatura pela seguinte equação:

$$a_w = \frac{p}{p_o} = \frac{UR}{100} \quad (A-1)$$

onde :

- a_w = atividade de água do produto
- p = pressão de vapor de água presente no produto
- p_o = pressão de vapor da água pura na mesma temperatura
- UR = umidade relativa de equilíbrio do produto (%)

Nos alimentos, a água está presente basicamente sob duas formas: ligada e livre. A água ligada está associada a grupos químicos, não sendo disponível para reações químicas e atuação como solvente. Já a água livre está disponível para movimentação, solubilização de sais e açúcares, reações químicas e crescimento microbiano.

A atividade de água de qualquer produto é sempre inferior a 1. Valores menores que 0,2 indicam que a água presente no alimento está fortemente ligada, valores entre 0,2 e 0,7 indicam que ha uma quantidade significativa de água livre e entre 0,7 e 1,0 que a maioria da água se encontra na forma livre (BROCKWAY, 1989).

No estado de equilíbrio existe uma igualdade entre a umidade relativa do ar e a atividade de água do produto, a qual passa a ser chamada de umidade relativa de

equilíbrio. Através de isothermas de sorção de umidade é possível conhecer a umidade de equilíbrio do produto, tal que garanta sua integridade biológica nas condições de tempo e umidade relativa do ar de estocagem.

Nesse trabalho foi levantada a isoterma de sorção para banana prata, na temperatura de 25 °C. As amostras, 100 gramas de fatias de banana pré-tratadas com amido de mandioca gelatinizado, foram previamente desidratadas em secador de leito fluidizado a 130 °C durante 12 minutos até um conteúdo de umidade por volta de 41 % em base úmida. Em seguida foram colocadas dentro de dessecadores com umidade relativa controlada, criada por soluções saturadas de sais, localizados em ambiente com temperatura controlada de 25 °C. Os sais utilizados foram: NaOH, LiCl, MgCl, K₂CO₃, NaBr, NaCl, KCl, e BaCl₂, e as análises foram realizadas em triplicata.

Depois que o equilíbrio foi atingido, por volta de 15 dias, o teor de umidade foi determinado. As amostras permaneceram em estufa com circulação forçada de ar durante 48 horas a 50 °C, e em seguida em estufa a vácuo durante 24 horas a 70 °C.

Uma vez determinada a isoterma de sorção, partiu-se para a tentativa de ajustar os dados à equações já disponíveis na literatura. Foram testadas as seguintes equações: BET (BRUNNAUER et al., 1983), Halsey (HALSEY, 1948), Oswin (OSWIN, 1946), Iglesias & Chirife (IGLESIAS & CHIRIFE, 1978) e GAB (MAROULIS et al., 1988).

A regressão não-linear foi realizada por dois pacotes diferentes: um de nome comercial EUREKA, que utiliza o método de passos descendentes e o outro conhecido como SAS (Statistical Analysis System). Ambos apresentaram resultados semelhantes. A equação de GAB (Guggenhen - Anderson - de Boer) foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais. Essa equação, que é uma extensão da equação de BET, é apresentada a seguir :

$$X = \frac{X_m C K a w}{(1 - K a w)(1 - K a w + C K a w)} \quad (\text{A-2})$$

Na equação apresentada, X_m é a umidade da monocamada, C é a constante de Guggenheim que relaciona as energias de interação entre a água e o alimento, e K relaciona as energias de interação entre as múltiplas camadas de água. Essa equação tem sido empregada, com sucesso, para um grande número de produtos alimentícios com atividade de água na faixa de 0,1 a 0,9.

Os resultados obtidos através do ajuste do modelo de GAB à isoterma de sorção de banana-prata na temperatura de 25 °C, utilizando o SAS, são mostrados na Tabela 1 e Figura 1

TABELA 1. Parâmetros da equação de GAB com seus respectivos desvios padrões assintóticos (∂) e a soma dos quadrados dos resíduos (S) obtidos por regressão não-linear pelo SAS, para banana-prata na temperatura de 25 °C

X_m	∂X_m	C	∂C	K	∂K	S
0,0406	0,0013	22,8552	0,0097	1,0057	0,0035	2,9E-5

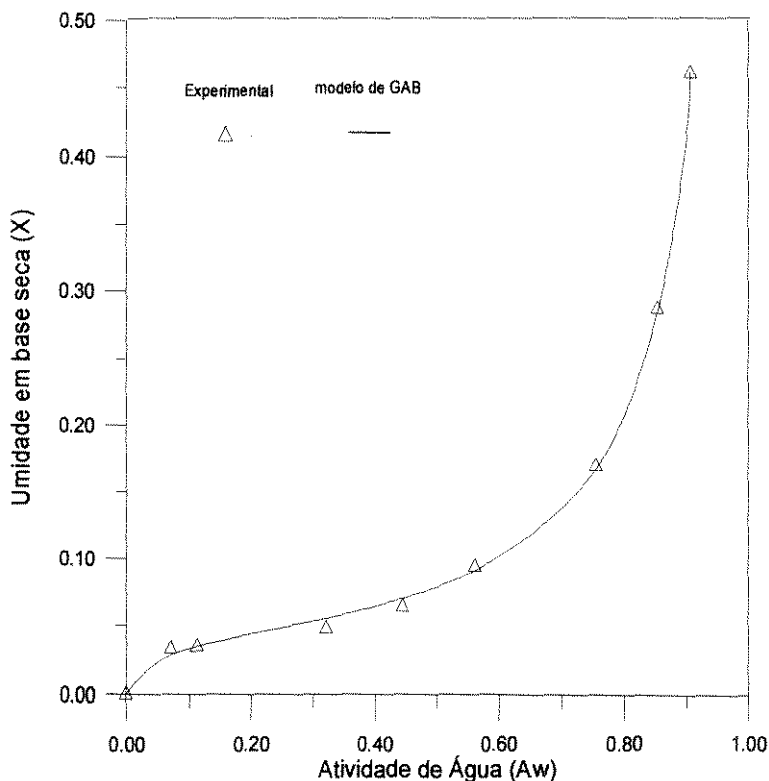


FIGURA 2. Ajuste do modelo de GAB à isoterma de sorção de banana-prata na temperatura de 25 °C

Observa-se pelo baixo valor de S apresentado na Tabela 1 e pelo bom ajuste da curva aos dados experimentais mostrados na Figura 1, que o modelo de GAB pode ser utilizado, com sucesso, para representar a isoterma de sorção para banana-prata na temperatura de 25 °C. Assim, a partir da equação obtida de GAB, é possível obter a umidade de equilíbrio para banana-prata em outras condições de umidade relativa do ar.

O valor da umidade correspondente à monocamada (no caso: 4g de água/100 g massa seca) tem sido usado como umidade crítica para manter a estabilidade durante o armazenamento (LABUZA et al., 1970). Na presente pesquisa não se atingiu esse valor limite e, no entanto, o produto desidratado contendo 5 a 6 g de água/100 g massa seca manteve suas características durante meses.

Da mesma forma, a crocância foi obtida com valores de a_w superiores aos recomendados por KATZ & LABUZA (1981). Essas avaliações entretanto, baseiam-se em um número limitado de amostras e não se explorou diferentes condições de armazenamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALZAMORA, S.M.; CHIRIFE, J.; VIOLLAZ, P.E. A simplified model for predicting the temperatures of foods during air dehydration. Journal of Food Technology, 14:4, 369-380, 1979.
- ANÔNIMO. Dehydration and Compression of Foods. Report n° 116. Advisory Board on Military Personnel Supplies, Washington, DC, 1982.
- BARNETT, D. Sulphites in foods: their chemistry and analysis. Food Technology in Australia, Sidney, 37:11, 503-505, 1985.
- BECKER, H.A.; SALLANS, H.R. A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel. Cereal Chemistry, 32, 212-216, 1955.
- BLEINROTH, E.W. Matéria-prima. In: Banana - cultura, matéria-prima, processamento e aspectos econômicos. Campinas: ITAL, 1985. Cap II, p.133-196. (Série Frutas Tropicais, 3).
- BOBIC, Z.; BAUMAN, E.; TRIPALO, B. Fluidized bed drying of fruits and vegetable particles with different pretreatments. Proc. Sixth International Drying Symposium (IDS'88), Versailles (France), 5-8, 1988.
- BOURNE, M.C. Effect of blanch temperature on kinetics of thermal softening of carrots and green beans. Journal of Food Science, 52:3, 667-690, 1987.

- BROWN, M. S. Texture of frozen fruits and vegetable. Journal of Texture Studies, 7:4, 391-404, 1977.
- BRUNELLO, G. e colab. Verificação de novo modelo aplicável à secagem de cereais: secagem de milho em leito com jorro. 1º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Paulo, Brasil, 1976.
- BRUNELLO, G.; NASCIMENTO, C.A.O. Drying of cereal grain: two internal resistances model. Revista latinoam. transf. cal. mat., 3, 15-26, 1979.
- BRUNNAUER, S.; EMMET, P.H.; TELLER, E. J. Am. Chem. Soc., 60, 309, 1983.
- CHIANG, W.C.; PETERSEN, J.N. Experimental measurement of temperature and moisture profiles during apple drying. In: Drying '86, Vol. 2, ed. A.S. Mujundar. Hemisphere, Washington, New York, London, p. 479-486, 1986.
- CHINNASWAMY, R.; HANNA, M.A. Nozzle dimension effects on the expansion of extrusion cooked corn starch. Journal of Food Science, 52:6, 1746-1747, 1987.
- CHU, S.T.; HUSTRULID, A. Numerical solution of diffusion equation. Transactions of the ASAE, 11, 705-708, 1968.
- CLARK, J.P. Texturization processes in the cereal foods industry. Food Technology, 40:3, 91-93, 1986.
- CRANK, J. The Mathematics of Diffusion. 2 ed. Claredon Press Oxford, 1975. 414p.

- DALE, B.E.; MOREIRA, M.J. A freeze-explosion technique for increasing cellulose hydrolysis. Biotechnology and Bioengineering Symposium, John Wiley, New York, n°12, 31-43, 1982.
- FAO. Production Yearbook (1990).
- FENNEMA, O. R. Principles of Food Science, part I - Food Chemistry, 286-341. 1976.
- FERNANDES, K .M. ; DE CARVALHO, V.D.; CAL-VIDAL, J. Phisical changes during ripening of Silver Bananas. Journal of Food Science, 44:4, 1254-1255, 1979.
- FILGUEIRAS, O. Banana para todos os gostos. Globo Rural Economia: 14-17, junho, 1990
- FINZER, J.R.D. Secagem de fatias de cebola em leito vibro-fluidizado. Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, 1984. 134p. Tese (Mestr) Universidade Estadual de Campinas.
- FREDRICKSON, J. Process for increasing the filling capacity of tobacco. US Pat. n° 3 524 451 (1970) Reissue n° 30693, 1981.
- HALSEY, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. The journal of chemical physics, 16:10, 931-937, 1948
- HARPER, J. M. Extrusion of foods. CRC Press, Boca Raton, FL, Vol I, 88-90, 1981.
- HOLDSWORTH, S.D. Dehydration of foods products - A review. Journal of Food Technology, 6, 331-370, 1971.

- IGLESIAS, H.A.; CHIRIFE, J. An empirical equation for fitting water sorption isotherms of fruits and related products. Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, 11:1, 12-15, 1978.
- JASON, A.C. A study of evaporation and diffusion process in the drying of fish muscle. In: Fundamentals Aspects of the Dehydration of Foodstuffs. The Society of Chemical Industry. New York. 1958. p.103-135.
- JAYARAMAN, K.S.; DAS GUPTA, D.K. Dehydration of fruits and vegetables - recent developments in principles and techniques. Drying technology, 10:1, 1-50, 1992.
- JEN, J.J.; MUDAHAR, G.S.; TOLEDO, R.T. Chemistry and processing of high quality dehydrated vegetable products. In: Quality Factors of Fruits and Vegetables, 1989, cap.19, p.240-249. Symposium n°405. American Chemical Society, Washington, DC.
- KATZ, E. E.; LABUZA, T. P. Effect of water activity on the sensory crispness and mechanical deformation of snack food products. Journal of Food Science, 46, 403-409, 1981.
- KIM, M.H.; TOLEDO, R.T. Effect of osmotic dehydration and high temperature fluidized bed drying on properties of dehydrated rabbiteye blueberries. Journal of Food Science, 52:4, 980-989, 1987.
- KOZEMPEL, M.F.; SULLIVAN, J.F.; CRAIG, J.C.; JR.; KONSTANCE, R.P. Explosion-puffing of fruits and vegetables. Journal of Food Science, 54:3, 772-773, 1989.

- LABUZA, T.P.; TANNENBAUN, S.R.; KAREL, M. Water content and stability of low-moisture and intermediate-moisture foods. Food Technology, 24:5, 543-550, 1970.
- LERICI, C.R.; MASTROCOLA, D.; PINNAVAIA, G. Esperienze di osmosi diretta ad alta temperatura per tempi brevi. Ind. Conserve, 61:3, 223-225, 1986.
- LEWIS, W.K. The rate of drying of solids material. In: The Symposium on Drying. The Journal of I. & E. Ch., 13:5, 427-432, 1921.
- LI, H.; MOREY, R.V. Thin layer drying of yellow dent corn. Transactions ASAE, 27, 581-585, 1984.
- LOZANO, J.E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. Journal of Food Science, 48:5, 1497-1553, 1983.
- MAROULIS, Z. B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D. Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. Journal of Food Engineering, 7, 63, 1988.
- MARTIN, Z.J.; TRAVAGLINI, D.A.; OKADA, M.; QUAST, D.G.; HASHIZUME, T. Processamento: produtos, características e utilização. In: Banana - cultura, matéria-prima, processamento e aspectos econômicos. Campinas: ITAL, 1985. Cap III, p.197-264. (Série Frutas Tropicais, 3).
- MATZ, S.A. Bakery Technology and Engineering. AVI, Westport, CT, pp. 35-48, 1972.

- MEDINA, J.C. Cultura. In: Banana - cultura, matéria-prima, processamento e aspectos econômicos. Campinas: ITAL, 1985. Cap. I, p.1-132. (Série Frutas Tropicais, 3).
- MISRA, M.K.; BROOKER, D.B. Thin layer and rewetting equation for shelled yellow corn. Transactions of the ASAE, 23:5, 1254-1260, 1980.
- MISRA, R.N.; YOUNG, J.H. Numerical solution of simultaneous moisture diffusion and shrinkage during soybean drying. Transactions of the ASAE, 23:5, 1277-1282, 1980.
- MOREIRA, R. S. Aspectos gerais da bananicultura In: Banana: Teoria e prática de cultivo. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 335p. Cap. I, p. 3-6.
- MOWLAH, G.; TAKANO, K.; KAMOI, I.; OBARA, T. Water transport mechanism and some aspects of quality changes during air dehydration of bananas. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, 16: 103-107, 1983.
- MUDAHAR, G.S.; BUHR, R.J.; JEN, J.J. Infiltrated biopolymers effect on quality of dehydrated carrots. Journal of Food Science, 57:2, 526-529, 1991.
- MUDAHAR, G.S.; TOLEDO, R.T.; FLOROS, J.D.; JEN, J.J. Optimization of carrot dehydration process using Response Surface Methodology. Journal of Food Science, 54:3, 714-719, 1989.
- MUDAHAR, G.S.; TOLEDO, R.T.; JEN, J.J. A response surface methodology approach to optimize potato dehydration process. Journal of Food Processing and Preservation, 14:2, 93-106, 1990.
- OSWIN, C.R. The kinetics of package life - III: The isotherm. J. Chem. Ind., 64, 419, 1946.

- PAGE, G.E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. Lafayette, Mechanical Engineering Department, 1949. Thesis (M.S.) - Purdue University, Indiana.
- PAYNE, F.A.; TARABA, J.L.; SAPUTRA, D. A review of puffing processes for expansion of biological products. Journal of Food Engineering, 183-197, 1990.
- POPPER, K.; SCHULTZ, W.G.; CAMIRAND, W.M.; HAUTALA, E.; ROBERTSON, G.H.; CRAWFORD, L.; FINKLE, B.J. Preparation of puffed fruits. Us Pat. n° 4 055 675.
- QUAST, D.G. Cálculos da intensidade de esterilização e de cozimento de alimentos Campinas : ITAL, 1976. Inst. Tecn. 10.
- RAMANUJA, M.N.; VIBHAKARA, H.S; JAYARAMAN, K.S. Studies on the occurrence, partial purification and effect of heating on peroxidase in some vegetables. Journal of Food Science and Technology, 25:4, 201-204, 1988.
- RAMASWAMY, H.S.; RANGANNA, S. Thermal inactivation of peroxidase in relation to quality of frozen cauliflower (var. Indian Snowball). Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, 14:2, 139-143, 1981.
- REEVE, R.M. Food Research, 1943, 8, 128.
- REEVE, R.M. Relationships of histological structure to texture of fresh and processed fruits and vegetable. Journal of Texture Studies, 1, 247-284, 1970.
- ROVEDO, C.O.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P.E. Drying of foods: evaluation of a drying model. Journal of Food Engineering, 26, 1-12, 1995.

- SACA, S.A.; LOZANO, J.E. Explosion-puffing of bananas. International Journal of Food Science and Technology, 27:4, 419-426, 1992.
- SARAVACOS , G.D.; CHARM, S.E. A study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration. Food Technology, 16 - I, 78-81, 1962.
- STATISTICAL ANALISYS SYSTEM (SAS) - Introductory guide, 3ed. Cary, NC: SAS Institute Inc., 1985. 99p.
- SAVAGE, J.P. U.S. Patent 3 337 349, 1967.
- SGARBIERI, V.C.; FIGUEIREDO, I.B. Transformações bioquímicas da banana nanica durante o armazenamento. Coletânea do ITAL, 1 (1), 299-322, 1965/66.
- SHERWOOD, T.K. The drying of solids: part-A. Industrial and Engineering Chemistry, 21:10, 12-16, 1929.
- SHERWOOD, T.K. The drying of solids: part-b. Industrial and Engineering Chemistry, 21:10, 976-980, 1929.
- SHIMAZU, F.; STERLING, C. Journal of Food Science, 26, 291, 1961.
- SOMOGYI, L.P.; LUH, B.S. Dehydration of fruits. In: Commercial fruit processing, 2ed., AVI publishing Company, Inc., Westport, Connecticut , 353-405, 1986.
- SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P.E.; CHIRIFE, J. Diffusional analysis of air drying of grain sorghum. Journal of Food Technology, 15:5, 523-531, 1980.

- SULLIVAN, J.F.; CRAIG, J.C.; Jr.; DEKAZOS, E.D.; LEIBY, S.M.; KONSTANCE, R.P. Dehydrated blueberries by the continuous explosion-puffing process. Journal of Food Science, 47:2, 445-448, 1982.
- SULLIVAN, J.F.; CRAIG, J.C.; Jr.; KONSTANCE, R.P.; EGOVILLE, M.J.; ACETO, N.C. Continuous explosion-puffing of apples. Journal of Food Science, 45:6, 1550-1558, 1980.
- SULLIVAN, J.F.; CRAIG, J.C.; Jr.; KONSTANCE, R.P.; EGOVILLE, M.J. Storage stability of continuous explosion puffed potatoes. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, 16:2, 76, 1983.
- SULLIVAN, J.F.; CRAIG, J.C.; Jr. The development of explosion-puffing. Food Technology, 38:2, 52-55, 131, 1984.
- SULLIVAN, J.F.; CORDING, J.; Jr.; ESKEW, R.K.; HEILAND, W.K. Superheated steam aids explosion-puffing. Food Engineering, 37:10, 116, 1965.
- SULLIVAN, J.F.; CORDING, J.; Jr. Explosion-puffed celery rehydrates efficiently. Food Engineering, 41:2, 90-93, 1969.
- SULLIVAN, J.F.; KONSTANCE, R.P.; ACETO, N.C.; HEILAND, W.K.; CRAIG, J.C.; Jr. Continuous explosion-puffing of potatoes. Journal of Food Science, 42:6, 1462-1463, 1470, 1977.
- SUN, L.M.; MEUNIER, F. A detailed model for nonisothermal sorption in porous adsorbents. Chemical Engineering Science, 42, 1585-1593, 1987.
- THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.M. Mathematical simulation of corn drying. A new model. Transactions of the ASAE, 11:4, 582-586, 1968.

- TOLABA, M.P.; SUAREZ, C. Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusional model. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, 21:2, 83-86, 1988.
- TOLABA, M.P.; VIOLLAZ, P.E.; SUAREZ, C. A mathematical model to predict the temperature of maize kernels during drying. Journal of Food Engineering, 8:1, 1-16, 1988.
- TOLEDO, R.T. Fundamentals of Food Process Engineering; AVI. Publishing Company, Inc.: Westport, Connecticut, p.363, 1980.
- TORREGGIANI, D.; TOLEDO, R.T. Simultaneous puffing and dehydration of osmotically pré-treated apples cubes in a high temperature fluidized bed (HTFB) drier. Drying Technology, 1-5, 1990.
- TRAVAGLINI, D.A.; NETO, M.P.; BLEINROTH, E.W.; LEITÃO, M.F.F. Banana-passa: princípios de secagem, conservação e produção industrial. Campinas: ITAL, 1993. 73p. (Manual técnico, 12).
- VACCAREZZA, L.M.; LOMBARDI, J.L.; CHIRIFE, J. Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. Journal of Food Technology, 9, 317-27, 1974.
- VAN ARSDEL, W.B. Drying phenomena. In: VAN ARSDEL, W.B.; COPLEY, M.J.; MORGAN JR, A.I. ed. Food dehydration 2.ed., Westport., AVI publishing Co., 1973. v.1, cap.3 p.22-57
- VIOLLAZ, P.E.; SUAREZ, C. Drying of shrinking bodies. AIChE Journal, 31:9, 1566-1568, 1985.

WOLF, E.; BIMBENET, J.J. Internal and superficial temperature of solids during drying. In: Drying '86, Vol. 1, ed. A.S. Mujundar. Hemisphere, Washington, New York, London, p. 77, 1986.