

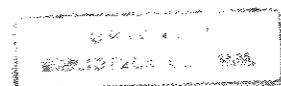
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE TERMOFLUIDODINÂMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**SECAGEM DE FATIAS DE BANANA EM LEITO VIBRO-
FLUIDIZADO A ALTAS TEMPERATURAS POR CURTO
TEMPO**

*Autora: Carla Sant'Anna Bechtluft Cardoso
Orientador: Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch*

**Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia Química como parte dos
Requisitos exigidos para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Química**

**Campinas - São Paulo - Brasil
Setembro - 1998**



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	C179s
V. Ex.	
TOMBO BC/	35509
PROG.	395/98
C <input type="checkbox"/>	D <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	22/10/98
N.º CPD	

CM-00117577-5

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

C179s Cardoso, Carla Sant'Anna Bechtluft
Secagem de fatias de banana em leito vibro-
fluidizado a altas temperaturas por curto tempo. /
Carla Sant'Anna Bechtluft Cardoso.--Campinas, SP:
[s.n.], 1998.

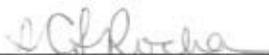
Orientador: Theo Guenter Kieckbusch
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

I. Banana. 2. Secagem. 3. Fluidização. 4.
Vibração. I. Kieckbusch, Theo Guenter. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Química. III. Título.

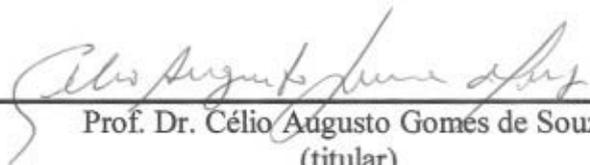
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 21 DE
SETEMBRO DE 1998, PELA BANCA EXAMINADORA CONSTITUÍDA PELOS
PROFESSORES DOUTORES.



Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch
(Orientador)



Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha
(titular)



Prof. Dr. Célio Augusto Gomes de Souza
(titular)

Esta versão corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, defendida pela Engenheira Química Carla Sant'Anna Bechtluft Cardoso, e aprovada pela Comissão Julgadora em 21 de Setembro de 1998.



Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch
(Orientador)

Ofereço este trabalho aos meus pais pelo
incentivo, e ao meu esposo pela
compreensão e pelo companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch pela orientação segura e pela amizade constituída durante a realização deste trabalho.

Ao meu esposo Marcílio Monteiro Cardoso pela ajuda na realização dos experimentos.

À Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP e aos seus funcionários pela colaboração.

À Universidade Federal do Pará pela oportunidade e concessão da bolsa de estudos.

Ao Programa de Bolsas CAPES – PICDT pelo apoio financeiro.

Ao amigo Nicolas Spogis pela colaboração na construção do equipamento.

Aos funcionários da oficina pelo apoio na manutenção do equipamento.

À todos os amigos que colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

NOMENCLATURA.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	2
1.1. ASPECTOS GERAIS.....	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1. DESIDRATAÇÃO DE FRUTAS.....	7
2.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA.....	8
2.3. BANANA E SUA DESIDRATAÇÃO.....	10
2.4. CINÉTICA DE SECAGEM.....	15
2.5. QUALIDADE DE FRUTAS DESIDRATADAS.....	20
2.6. <i>PUFFING</i>	24
2.7. SECAGEM HTST EM LEITO FLUIDIZADO.....	26
2.8. SOLUÇÕES INFILTRANTES.....	27
CAPÍTULO 3 – LEITO VIBRO-FLUIDIZADO (LVF).....	29
3. LEITO VIBRO-FLUIDIZADO (LVF).....	30
CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1. MATÉRIA-PRIMA.....	37
4.2. PRÉ-TRATAMENTO.....	38
4.2.1. BANHO COM SOLUÇÕES INFILTRANTES.....	38
4.2.2. IMERSÃO EM AGENTES PRESERVANTES.....	39
4.2.3. TIPOS DE PRÉ-TRATAMENTOS.....	39
4.3. AFERIÇÃO DOS TERMOPARES.....	40

4.4. OPERAÇÃO DE SECAGEM.....	41
4.4.1. MÉTODO DE SECAGEM UTILIZADO.....	41
4.4.2. EQUIPAMENTO.....	41
4.4.2.1. SECADOR DE LEITO VIBRO-FLUIDIZADO E DE BANDEJAS.....	41
4.5. ANÁLISES QUÍMICAS.....	46
4.5.1. SÓLIDOS SOLÚVEIS (°BRIX).....	46
4.5.2. TEOR DE UMIDADE.....	46
4.6. CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO.....	46
4.6.1. DENSIDADE REAL.....	46
4.6.2. REIDRATAÇÃO (ABSORÇÃO DE ÁGUA).....	47
4.6.3. COR.....	48
4.7. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	48
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
5.1. ENSAIOS PRELIMINARES.....	51
5.1.1. ESTADO DE MATURAÇÃO.....	51
5.1.2. TEMPERATURA DE SECAGEM.....	52
5.1.3. VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM.....	52
5.1.4. TEMPO DE SECAGEM HTST EM LVF.....	52
5.1.5. FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO.....	53
5.1.6. PRÉ-TRATAMENTO.....	53
5.2. ENSAIOS COMPLETOS.....	54
5.2.1. EFEITO SOBRE A CINÉTICA DE SECAGEM HTST.....	57
5.2.2. EFEITO SOBRE A CINÉTICA DE SECAGEM DO 2º ESTÁGIO.....	65
5.2.3. EFEITO SOBRE A DENSIDADE REAL.....	67
5.2.4. EFEITO SOBRE A COR.....	70
5.2.5. EFEITO SOBRE A REIDRATAÇÃO.....	73

5.2.6. EFEITO DO PRÉ-TRATAMENTO NA ESTABILIDADE DAS FATIAS DE BANANA-PRATA DESIDRATADAS.....	76
5.3. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	76
5.3.1. CINÉTICA DE SECAGEM EM LEITO VIBRO- FLUIDIZADO.....	76
5.3.2. CINÉTICA DE SECAGEM FINAL EM SECADOR DE BANDEJAS (2º ESTÁGIO).....	79
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	84
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	85
6.1. CONCLUSÕES.....	85
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
APÊNDICE A - AJUSTE LINEAR DA SECAGEM HTST.....	98
AJUSTE LINEAR DA SECAGEM HTST.....	99

NOMENCLATURA

A	amplitude de vibração, m
c	constante da equação 3.6
C ₁	parâmetro da equação 2.7
C ₂	parâmetro da equação 2.7
C _p	calor específico médio do ar de secagem, Kcal/Kg°C
D	coeficiente de difusão da água, m ² /s
d _p	diâmetro da partícula, m
f	freqüência de vibração, Hz
H	umidade absoluta, kg água/kg ar seco
J	parâmetro dependente de Γ (para $\Gamma < 4,5$; j = 1 e para $\Gamma > 4,5$; j = 2)
k	constante da cinética de secagem
K ₁	parâmetro da equação 2.7
K ₂	parâmetro da equação 2.7
k'	fator de colisão [0-1]
L	espessura da amostra, m
m _p	massa da partícula, g
m _s	massa do sólido, g
P	pressão atual, kPa
r	espessura da placa, m
s	teor de matéria seca na amostra desidratada (massa de amostra desidratada – massa de água da amostra desidratada)
T	temperatura, °C
t	tempo de secagem, min
v	velocidade do ar, m/s
V _s	volume do sólido, cm ³
w	freqüência angular, s ⁻¹
W	teor de umidade local, Kg água/ Kg sólido seco
X _f	teor de umidade da amostra seca, % bu
X _i	teor de umidade da amostra antes da secagem, % bu

LETRAS GREGAS:

ρ	densidade real, g/cm ³
ρ_f	densidade do gás, Kg/m ³
ρ_g	densidade do gás, Kg/m ³
β_i e γ_i	constantes das equações 2.8 e 2.9
ρ_p	densidade da partícula, Kg/m ³
ΔT	diferença de temperatura do ar de secagem, entre após e antes da resistência elétrica de aquecimento ser ligada, °C
ϑ_g	viscosidade, p

ÍNDICES:

o	inicial
e	de equilíbrio
f	final
g	gás
mf	mínima fluidização
mvf	mínima vibro-fluidização
p	partícula
s	sólido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Áreas de aplicação industrial de equipamento vibrado.....	3
Figura 2.1 – Curva típica de secagem.....	9
Figura 3.1 – Circulação de partículas em LV ou LVF.....	32
Figura 4.1 – Seção Longitudinal da Banana.....	37
Figura 4.2 – Esquema do Secador de LVF e de bandejas.....	42
Figura 4.3 – Foto dos Secadores de LVF e de Bandejas.....	43
Figura 4.4 – Esquema do sistema de vibração.....	45
Figura 4.5 – Fluxograma do processo.....	48
Figura 5.1 – Fatias de banana sem pré-tratamento submetidas à secagem HTST à 150°C com ar à velocidade de 2,0 m/s.....	55
Figura 5.2 – Fatias de banana pré-tratadas com PEG – 1000, submetidas à secagem HTST à 150°C com ar à velocidade de 2,0 m/s.....	55
Figura 5.3 – Fatias de banana pré-tratadas com Polvilho azedo, submetidas à secagem HTST à 150°C com ar à velocidade de 2,0 m/s.....	56
Figura 5.4 – Fatias de banana pré-tratadas com Polvilho doce, submetidas à secagem HTST à 150°C com ar à velocidade de 2,0 m/s.....	56
Figura 5.5 – Efeito da temperatura na cinética de secagem em leito se vibração de banana (10°Brix) sem pré-tratamento submetidas às condições: (a) $v = 1,0$ m/s; (b) $v = 2,0$ m/s.....	58
Figura 5.6 – Efeito da velocidade do ar na cinética de secagem em leito estático de banana (10°Brix) sem pré-tratamento submetidas às condições: (a) $T = 130^{\circ}\text{C}$; (b) $T = 150^{\circ}\text{C}$	59
Figura 5.7 – Efeito da velocidade do ar na cinética de secagem em leito sem vibração de banana (10°Brix) pré-tratadas, submetidas à secagem à temperatura de 150°C.....	60
Figura 5.8 – Efeito da temperatura na cinética de secagem em leito sem vibração de banana (10°Brix) com ar a velocidade de $v = 1,0$ m/s.....	61

Figura 5.9 – Efeito da temperatura na cinética de secagem em leito sem vibração de banana (10°Brix) com ar a velocidade de $v = 2,0$ m/s.....	61
Figura 5.10 – Efeito da vibração na secagem de banana (10°Brix) sem pré-tratamento submetida à temperatura de 130°C.....	62
Figura 5.11 – Efeito da vibração na secagem de banana (10°Brix) sem pré-tratamento submetida à temperatura de 150°C.....	63
Figura 5.12 – Efeito da vibração na secagem de fatias de banana (10°Brix) a 130°C e velocidade do ar de 1,0 m/s.....	63
Figura 5.13 – Efeito da vibração na secagem de fatias de banana (10°Brix) a 130°C e velocidade do ar de 2,0 m/s.....	64
Figura 5.14 – Efeito da vibração na secagem de fatias de banana (10°Brix) a 150°C e velocidade do ar de 1,0 m/s.....	64
Figura 5.15 – Efeito da vibração na secagem de fatias de banana (10°Brix) a 150°C e velocidade do ar de 2,0 m/s.....	65
Figura 5.16 – Efeito das variáveis de operação sobre a cinética de secagem do 2° estágio de fatias de banana (10°Brix) sem pré-tratamento: (a) secagem HTST 130°C, 1,0 m/s; (b) secagem HTST 130°, 2,0 m/s.....	66
Figura 5.17 – Efeito das variáveis de operação sobre a cinética de secagem do 2° estágio de fatias de banana pré-tratadas com PEG – 1000: (a) secagem HTST 130°C, 1,0 m/s; (b) secagem HTST 150°, 1,0 m/s; (c) secagem HTST 130°C, 2,0 m/s; (d) secagem HTST 150°, 2,0 m/s.....	67
Figura 5.18 – Efeito das condições de operação na secagem HTST sobre a densidade real do produto final (2° estágio).....	69
Figura 5.19 – Efeito das condições de operação na secagem HTST sobre a cor do produto final (2° estágio).....	72
Figura 5.20- Efeito da temperatura ar na % absorção de água de fatias de banana pré-tratadas com PEG (P.M. 1000 g/mol) submetidas às condições HTST: (a) 2,0 m/s – 10,1 Hz; (b) 1,0 m/s – 10,1 Hz	74

Figura 5.21- Regressão linear da curva de cinética de secagem final de fatias de banana sem pré-tratamento, submetidas às condições de pré-secagem HTST em LVF: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.....	79
Figura 5.22- Regressão linear da curva de cinética de secagem final de fatias de banana sem pré-tratamento, submetidas às condições de pré-secagem HTST em LVF: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.....	80
Figura 5.23- Regressão linear da curva de cinética de secagem final de fatias de banana pré-tratadas com PEG – 1000, submetidas às condições de pré-secagem HTST em LVF: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 2,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.....	80
Figura 5.24- Regressão linear da curva de cinética de secagem final de fatias de banana pré-tratadas com PEG – 1000, submetidas às condições de pré-secagem HTST em LVF: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 1,0 m/s.....	81
Figura 5.25- Regressão linear da curva de cinética de secagem final de fatias de banana pré-tratadas com PEG – 1000, submetidas às condições de pré-secagem HTST em LVF: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 2,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.....	81
Figura 5.26- Regressão linear da curva de cinética de secagem final de fatias de banana pré-tratadas com PEG – 1000, submetidas às condições de pré-secagem HTST em LVF: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 1,0 m/s.....	82
Figura A.1- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com PEG (P.M. 1000 g/mol) submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.....	99
Figura A.2- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com PEG (P.M. 1000 g/mol) submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.....	99

Figura A.3- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com PEG (P.M. 1000 g/mol) submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.....	100
Figura A.4- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com PEG (P.M. 1000 g/mol) submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (ab) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.....	100
Figura A.5- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho azedo) submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.....	100
Figura A.6- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho azedo) submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.....	101
Figura A.7- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho azedo) submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.....	101
Figura A.8- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho azedo) submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.....	101
Figura A.9- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho doce) submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.....	102
Figura A.10- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho doce) submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.....	102

Figura A.11- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho doce) submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.....	102
Figura A.12- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho doce) submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.....	103
Figura A.13- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana sem pré-tratamento submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.....	103
Figura A.14- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana sem pré-tratamento submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.....	103
Figura A.15- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana sem pré-tratamento submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.....	104
Figura A.16- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana sem pré-tratamento submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Mudanças Químicas em bananas silvestres durante o amadurecimento.....	11
Tabela 4.1 – Tipos de pré-tratamentos.....	39
Tabela 4.2 – Valores obtidos nos ensaios de aferição dos termopares.....	40
Tabela 4.3 – Equações de correção da temperatura e coeficientes de correlação.....	41
Tabela 4.4 – Valores de frequência de acordo com a posição no variador eletrônico.....	46
Tabela 5.1 – Valores do teor de umidade (base úmida) de fatias de banana-prata (10°Brix) desidratadas.....	66
Tabela 5.2 – Valores de densidade real de fatias de banana-prata (10°Brix) desidratadas.....	68
Tabela 5.3 - Valores de cor de fatias de banana-prata (10°Brix) desidratadas.	71
Tabela 5.4 - Valores de %água absorvida na reidratação de fatias de banana-prata (10°Brix) sem pré-tratamento e desidratadas.....	74
Tabela 5.5 - Valores de %água absorvida na reidratação de fatias de banana-prata (10°Brix) pré-tratadas com PEG e desidratadas..	75
Tabela 5.6 - Valores de %água absorvida na reidratação de fatias de banana-prata (10°Brix) pré-tratadas com amido (polvilho azedo) e desidratadas.....	75
Tabela 5.7 - Valores de %água absorvida na reidratação de fatias de banana-prata (10°Brix) pré-tratadas com amido (polvilho doce) e desidratadas.....	75
Tabela 5.8 – Valores das constantes A e B, do erro e do desvio padrão obtidos a partir da regressão linear das curvas de cinética de secagem HTST em LVF, com nível de confiança de 95%.....	78
Tabela 5.9 - Constantes A e B, e parâmetros estatísticos do modelo difusional aplicado à cinética de secagem final de fatias de banana, com nível de confiança de 95%. ($Y=A+BX$).....	83

CARDOSO, C. S. B. *Secagem de Fatias de Banana em Leito Vibro-fluidizado a altas Temperaturas por Curto Tempo*. Campinas - SP: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 104p. Tese (Mestrado)

RESUMO

Desenvolveu-se um processo de secagem de banana-prata em Leito Vibro-Fluidizado visando a produção de bananas desidratadas com propriedades organolépticas e funcionais adequadas ao consumo na forma de *snacks*. Rodelas de 1 centímetro de espessura seccionadas em quatro partes iguais foram pré-tratadas por imersão em soluções apropriadas para o fortalecimento da estrutura celular e então submetidas a um fluxo de ar a altas temperaturas (130 e 150°C) e curto tempo (13 e 8 minutos, respectivamente) em uma etapa de pré-secagem HTST, proporcionando a rápida formação de uma camada externa rígida e impermeável, que auxiliou na expansão do produto. Após a pré-secagem, o produto foi seco até um teor de umidade próximo ao teor de umidade de equilíbrio, em um Secador de Bandejas à temperatura de 70°C, com uma velocidade de ar de 3,0 m/s. O produto foi caracterizado pela densidade real, teor de umidade, cor e reidratação com o objetivo de verificar quais as melhores condições de processo. Em todos os ensaios, a vibração melhorou as taxas de transferência de calor, gerando um produto mais expandido e conseqüentemente com maior grau de hidratação. A vibração também auxiliou na preservação da cor. A cinética de secagem mostrou uma taxa constante na secagem HTST, e seguiu a Lei de Fick no 2º estágio da secagem. O pré-tratamento recomendado é uma imersão por trinta minutos em uma solução de PEG (P.M. 1000g/mol) na concentração de 2% com 0,5% de metabissulfito de sódio. As condições de secagem que tiveram efeito mais positivo sobre o produto foram, temperatura de 150°C, velocidade do ar de 1,0m/s, tempo de exposição de 8 minutos e frequência de vibração de 10,1 Hz. O produto final assim obtido apresentou coloração clara, boa expansão, baixa densidade real, alta capacidade de absorção de água e teor de umidade na faixa de 4% e exigiu menor consumo de energia do que na secagem em leito fluidizado convencional.

Palavras-chave: banana, HTST, *puffing*, secagem, leito vibro-fluidizado

ABSTRACT

A vibro-fluidized bed drying process for banana pieces was developed, in order to produce dehydrated products with improved organoleptic and functional properties, adequate for the use as snacks. Banana slices in form of discs, 1,0 cm – thick, sectioned in four equal parts were pretreated by immersion in appropriated solutions, to strengthen the cellular structure, and exposed to a flow of air at high temperature (130° and 150° C) for a short time (13 and 8 min, respectively) as a HTST drying step, creating a rigid and impermeable surface layer, that enhanced the expansion of the product. The product was then transferred to a 2nd stage (tray) dryer, and dried close to the equilibrium moisture content, with air at 70°C and 3 m/s velocity. The product was characterized by its density, moisture content, color and rehydration rate, in order to evaluate the best process conditions. The vibration improved the heat transfer rates, inducing product expansion and, as a consequence, higher rehydration degree. The vibration also assisted in color preservation. A constant drying rate was found for the HTST drying and Fick's 2nd law fitted well the 2nd stage drying data. The recommended pretreatment is an immersion of the banana pieces during 30 min, in a 2% aqueous PEG – 1000 solution containing 0.5% sodium metabisulfite. The best drying conditions were: drying air temperature, 150°C; drying air velocity, 1.0 m/s; time of contact, 8 min and vibration frequency of 10.1 Hz. The product obtained showed light color, good expansion, low density, high water absorption capacity and moisture content close to 4%. The vibrated process required lower energy consumption compare to conventional fluidized-bed drying.

Keywords: banana, HTST, puffing, drying, vibro-fluidized-bed

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.INTRODUÇÃO

1.1. ASPECTOS GERAIS

Dados estatísticos da *Food and Agriculture Organization* da ONU (FAO), apontam o Brasil como o maior produtor mundial de bananas com 6 milhões de toneladas anuais. Desse total, 1,8 milhões destinam-se ao consumo *in natura*, 0,48 milhões são industrializados e 0,12 milhões são exportados. Sobram 3,6 milhões de toneladas que são desperdiçadas devido, principalmente, às más condições de produção, colheita e comercialização, tornando a banana a fruta campeã do desperdício agrícola do país (POIANI e BORGES, 1997).

O desempenho da produção de banana no Brasil, entre 1970 e 1992, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foi crescente. A produção de 1970 era de 493.000 toneladas de cachos de banana e em 1992, 562.000 toneladas. Isto, reforça a importância da bananicultura para a economia brasileira. Na produção brasileira, o Estado de São Paulo é o segundo maior produtor, depois do estado da Bahia (TANADA, 1996).

Apesar da grande produção de banana no Brasil, a quantidade de banana que é processada é muito pequena, devido à competição com a fruta fresca. Os produtos que vêm sendo industrializados são: purê, néctar, frutas em calda, produtos desidratados, doces em massa e geléia. No entanto, essa produção é insignificante diante da matéria-prima total disponível. Além do excesso de produção, a banana apresenta um problema em seu processo de industrialização: o rápido escurecimento logo após o descascamento, devido à existência da enzima polifenol oxidase. O processo convencional para inativação dessa enzima é o tratamento térmico, que precisa ser intenso, devido à alta resistência dessa enzima ao calor (TANADA, 1996).

Um dos procedimentos mais importantes de preservação de alimentos por diminuição de sua atividade de água é a desidratação ou secagem. Considerando que a maioria dos vegetais está constituída em grande parte por água, um processo de secagem pode significar consideráveis economias no transporte, no manejo e na estocagem do

produto, além de prover um efetivo método de prolongamento de sua vida útil. O interesse em alimento desidratado tem crescido paralelamente com o aumento da demanda de consumo de alimentos prontos (OGIHARA, 1989).

A preservação dos alimentos pela remoção de água permite a redução do crescimento microbiano e previne o desenvolvimento da maioria das reações bioquímicas de deterioração que ocorre na presença de umidade. Assim, a secagem constitui-se num processo altamente viável de se evitar desperdícios, no caso de excesso de produção.

Para a secagem de materiais sensíveis à oxidação tais como alimentos e fármacos, o uso de uma grande quantidade de ar por prolongado período é indesejável por promover a oxidação e desnaturação. Neste aspecto, o Leito Vibro-Fluidizado (LVF), que exalta a fluidibilidade do leito através da adição de vibração ao leito, é considerado como um dos tipos mais úteis de equipamento de secagem e está em uso prático em processos de secagem (SUZUKI et al., 1980c).

O uso de técnicas vibracionais em várias operações de processamento físico na indústria estão tabulados na Figura 1.1, que representa um resumo estatístico das especificações dos equipamentos de 60 companhias de produção de maquinário vibracional (MUJUMDAR e ERDÉSZ, 1988).

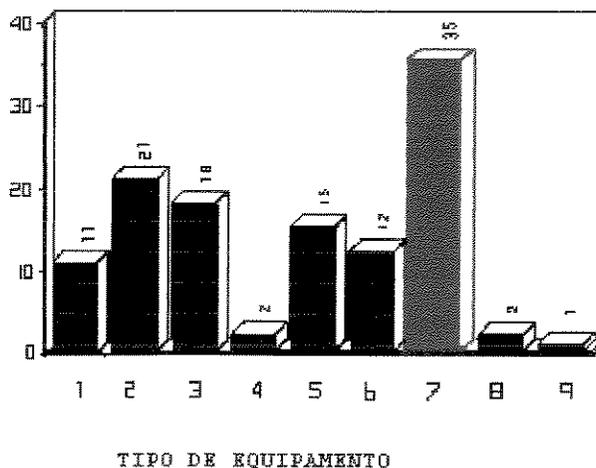


Figura 1.1 – Áreas de aplicação industrial de equipamento vibrado (Mujumdar e Erdész, 1988).

As operações realizadas em equipamentos vibrados são agrupadas em 3 principais áreas: mecânica, térmica e de reação química. O histograma mostra que SECADORES são feitos por 35 companhias das 60 amostradas para o estudo (MUJUMDAR e ERDÉSZ, 1988).

LUCAS (1996) realizou um trabalho de pré-secagem de bananas em leito fluidizado a altas temperaturas por curto tempo. Obteve um produto de ótima aparência, expandido, crocante e com boas características de reidratação. A operação, entretanto, exigiu grande consumo de ar para promover a fluidização (na realidade uma suspensão), além de ter sido prejudicado pela aderência do material nas paredes do secador.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir dos resultados de LUCAS (1996), este trabalho objetiva melhorar o processo de secagem e, conseqüentemente, a qualidade do produto final, com o desenvolvimento de um secador de leito vibro-fluidizado, impondo uma vibração vertical à base de um leito fluidizado convencional. Assim pretende-se diminuir a vazão de ar necessária, o tempo de secagem e ampliar sua aplicação a produtos que normalmente não fluidizam.

O trabalho possibilitará a avaliação da interação entre fatores experimentais (combinações de variáveis de processo) sobre as respostas do processo.

Em cada etapa do processo, as variáveis e/ou interações mais importantes serão selecionadas de acordo com sua influência quantitativa sobre as respostas. Assim, será possível identificar os parâmetros ótimos para a secagem de fatias de banana em leito vibro-fluidizado a altas temperaturas por curto tempo.

A pesquisa aqui proposta representa uma continuidade natural de trabalhos realizados na Área de Engenharia de Processos, associando, agora, os excelentes resultados obtidos, em termos de qualidade do produto, com a tese de mestrado de LUCAS (1996) com o conhecimento adquirido em vários trabalhos usando vibração,

citando-se FINZER e KIECKBUSCH (1992) e as teses: FINZER (1984), FINZER (1989), OGIHARA (1989) e SOUZA (1997).

No CAPÍTULO 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica que enfatiza os aspectos da vibração e qualidade de frutas desidratadas. No CAPÍTULO 3 dá-se ênfase especial ao Leite Vibro-fluidizado. O CAPÍTULO 4 descreve o desenvolvimento do equipamento e de métodos experimentais.

Os resultados obtidos estão apresentados e discutidos no CAPÍTULO 5. No CAPÍTULO 6 serão descritas algumas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. DESIDRATAÇÃO DE FRUTAS

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 apropriadas, 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, em termos qualitativos, não são eficazes e os produtos finais encolhem, tornando-se duros e difíceis de se mastigar. Um método conhecido de se evitar parte dessas alterações é a liofilização, que, entretanto, é um processo lento e muito caro comparado com outras técnicas de secagem, sendo aplicado apenas em produtos de alto valor agregado.

Uma forma alternativa de desidratar alimentos, mantendo certo controle sobre as alterações de textura é o *explosion-puffing*. Com essa técnica o produto é aquecido a altas temperaturas e sob pressão. A secagem inicial por vaporização *flash* ocorre quando a pressão é reduzida. *Explosion-puffing* tem sido bastante utilizado para algumas frutas e hortaliças, originando produtos de boa qualidade, por causa da porosidade obtida durante a desidratação. A secagem é acelerada, comparada com a secagem a ar quente normal, resultando na economia de pelo menos 40% no tempo de secagem. A mudança instantânea na pressão que ocorre quando parte da água é vaporizada não danifica o material (a matriz) e nem mesmo rompe células; este fato é confirmado a partir da observação microscópica da textura desses alimentos reidratados (SULLIVAN e CRAIG, 1984; LUCCAS, 1996).

Um trabalho sobre um processo contínuo de *explosion-puffing* de batata foi realizado por SULLIVAN et al. (1977). Os autores concluíram que o sistema oferece um produto com boas características de reidratação, aroma, cor e textura.

SULLIVAN et al. (1980) estudaram o processo de *explosion-puffing* de maçã e concluíram que o processo reduziu em 44% o consumo de vapor em relação à secagem convencional. Esta redução pode ser atribuída à diminuição do tempo de secagem em 2,1 vezes em relação à secagem convencional.

Outro tipo de remoção de umidade bastante utilizado em frutas e hortaliças é a desidratação osmótica, onde o material é imerso em uma solução hipertônica de sal ou açúcares, ocorrendo transferência seletiva de água através das membranas das células, provocada pela alta pressão osmótica da solução. Esse método é aplicado com o objetivo de obter produtos com teor intermediário de umidade e, também, para melhorar suas propriedades organolépticas, minimizando o encolhimento e reduzindo o consumo de energia.

2.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

A desidratação envolve simultaneamente a transferência de calor e massa. O calor penetra no produto e a umidade é removida na forma de vapor d'água.

Durante a desidratação convencional ocorrem dois processos : 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. São eles: 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.

Para obter produtos desidratados de alta qualidade, a desidratação deve ocorrer de forma rápida. Quatro fatores principais afetam a taxa e o tempo total de secagem : propriedades do produto, arranjo geométrico em relação à transferência de calor; propriedades físicas da secagem e características do equipamento (HOLDSWORTH, 1971; Somogyi e Luh, 1986 apud JAYARAMAN e GUPTA, 1992).

Em processos de secagem, podem existir dois períodos: no primeiro, a taxa de secagem é constante e no segundo, há um decréscimo desta taxa. O teor de umidade no período de transição (teor de umidade crítico, X_c) é característico de cada material para dadas condições de secagem (MOWLAH et al., 1983).

O comportamento de secagem pode ser representado pela Figura 2.1

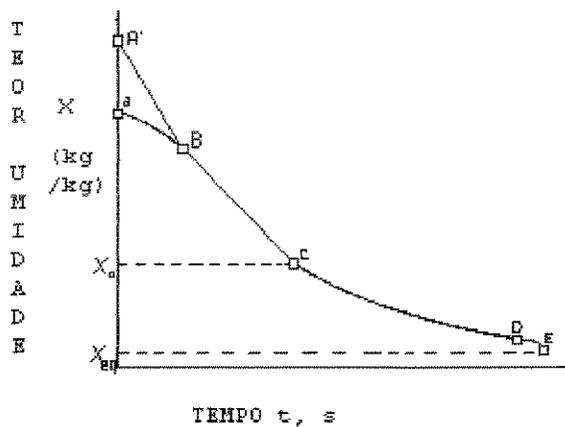


Figura 2.1 – Curva típica de secagem

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. Neste período a água se difunde para a superfície do material de acordo com a velocidade de evaporação, e geralmente a temperatura do material é a de bulbo úmido do ar de secagem. TRAVAGLINI et al.(1993), classificam a banana como um sólido não-poroso, onde a umidade está intimamente presa à estrutura, e o período de taxa constante de secagem não chega a ser detectado, como na maioria dos alimentos, devido à higroscopicidade dos mesmos.

Quando o produto alcança a umidade crítica (X_c), a taxa de secagem começa a decrescer, e tem-se então o 1º período de taxa decrescente (segmento CD). No ponto B, a superfície do sólido não está mais saturada, e a taxa de secagem diminui com o decréscimo do teor de umidade. No ponto C, o filme de umidade superficial já evaporou, e com o decréscimo no teor de umidade, a taxa de secagem é controlada pela taxa de

movimento de umidade através do sólido. O segmento CD representa condições de quando a taxa de secagem é largamente independente das condições externas do sólido.

Em muitos processos de secagem de alimentos, a região de taxa de secagem constante não é observada. Períodos de taxa decrescente são indicativos de um controle da resistência interna à transferência de calor e massa e ocorre quando a água superficial não mais existe e a água a ser evaporada vem do interior. Durante o período de secagem à taxa decrescente a superfície do produto não se encontra coberta por uma camada fina (filme) de água, porque a resistência interna ao transporte de água se torna maior que a resistência externa. À medida em que o conteúdo de água decresce abaixo do teor de umidade crítico, surge um gradiente de umidade no interior do produto e sua temperatura se eleva acima da temperatura de bulbo úmido. Neste caso, as taxas de secagem são afetadas pela estrutura, tal como endurecimento e variação de volume e a umidade deve ser transportada para a superfície (Hawlder et al., 1991 apud BARONI e HUBINGER, 1997). Este fato provoca um maior consumo de energia nos processos de secagem convencionais e, conseqüentemente, um aumento no tempo de secagem (NIJHUIS et al., 1996).

VAN ARSDEL et al. (1973) propuseram dois mecanismos de transferência de massa no primeiro estágio do período de taxa decrescente da desidratação: fluxo capilar e difusão líquida.

De acordo com SARAVACOS e CHARM (1962) a taxa de secagem no período de taxa decrescente, diminui continuamente e tempos de secagem prolongados são requeridos para alcançar conteúdos de umidade baixos, e que seguem o regime transiente de difusão do interior do sólido para a superfície de evaporação causado pelo gradiente de concentração.

2.3. BANANA E SUA DESIDRATAÇÃO

A banana é um alimento altamente energético (cerca de 100 Kcal/ 100 g de polpa), cujos carboidratos (cerca de 22%) são facilmente assimiláveis. Embora pobre em

proteínas e lipídios, seus teores superam os da maçã, pêra, cereja ou pêssego. Contém tanta vitamina C quanto a maçã, além de razoáveis quantidades de vitamina A, B1 e B2, e pequenas quantidades de D e E, e uma maior porcentagem de potássio, fósforo, cálcio e ferro do que a maçã ou a laranja (Medina, 1985 apud TANADA, 1996).

O aroma é caracterizado pela presença de componentes voláteis como aldeídos, cetonas, ésteres e álcoois (metílico, etílico e isoamílico).

Durante o amadurecimento de bananas silvestres (*Musa paradisiaca*) as mudanças químicas mais importantes são a hidrólise do amido, provocada pela enzima amilase, e o acúmulo de açúcares, provocado pela enzima invertase (FERNANDES et al., 1979). A variação na composição química está apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Mudanças Químicas em bananas silvestres durante o amadurecimento (FERNANDES et al., 1979)

Maturação	Sólidos Solúveis (%)	Acidez (ácido málico)	Amido (%)	Açúcares redutores (%)	Açúcares não-redutores (%)	Total
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
Madura	26,90	0,67	2,90	15,70	4,70	20,40
Muito madura	26,00	0,52	0,63	16,20	6,50	22,70

Ainda segundo FERNANDES et al. (1979), a banana verde apresenta baixa acidez orgânica, que aumenta no início da maturação atingindo um valor máximo quando a casca está totalmente amarela, decrescendo em seguida. O ácido que se encontra em maior quantidade na banana é o ácido málico. A banana também apresenta teores de ácidos oxálico, cítrico, acético e butírico.

As células da polpa da banana verde possuem uma rígida membrana, composta principalmente de substâncias insolúveis, conhecidas como protopectinas. Internamente encontram-se numerosos grãos sólidos de amido. Na maturação a protopectina é

parcialmente transformada pela ação de enzimas, formando pectina solúvel, o que causa o amolecimento das células da membrana (BLEINROTH, 1985).

A adstringência da banana verde é causada pelo tanino livre, presente em maior proporção na casca. Com a maturação, o teor de tanino tende a decrescer e, na variedade prata, praticamente desaparece quando está muito madura.

A umidade da polpa aumenta durante a maturação devido à absorção de água proveniente da casca, e também devido às transformações sofridas pelos carboidratos. O conteúdo de umidade da polpa da banana verde está na faixa de 67%, e da banana madura, 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.

A banana destinada à desidratação deve ser colhida no estágio de desenvolvimento correspondente a $\frac{3}{4}$ magra, ou seja, 30 e 32 mm de diâmetro para os cultivares nanica e nanição, respectivamente (MARTIN et al., 1985).

Uma das dificuldades na desidratação da banana madura reside no fato dela apresentar propriedades termoplásticas quando aquecida, aderindo ao fundo das bandejas do secador.

A literatura registra vários trabalhos sobre secagem artificial de banana, visando a produção de banana-passa, e que foram revistos por QUEIROZ (1994), e resumidos a seguir. HAENDLER (1966), entre outras recomendações, indicou algumas condições para o processo de secagem de banana em secador de bandejas, a saber: temperatura de 70°C e velocidade do ar de 3m/s.

A lei de difusão de Fick foi utilizada por MOWLAH et al. (1983) para estudar o fenômeno de transporte de umidade e determinar o tempo de secagem em experimentos

com cubos de banana. Além disso, analisou-se a ocorrência do escurecimento durante a secagem com a finalidade de investigar uma técnica adequada para produzir desidratados de boa qualidade. Concluiu-se que a transferência de umidade durante a desidratação de banana, sob as condições experimentais impostas (temperatura de bulbo seco de 60°C, temperatura de bulbo úmido de 30°C e velocidade do ar de 1,5m/s) segue o mecanismo difusional. Observaram que o escurecimento das amostras apresenta uma tendência de crescimento proporcional ao tempo de secagem; a amostra começou a escurecer após 8 horas de secagem quando 90% da umidade já havia evaporado. LEVI et al. (1980) desenvolveram um novo produto de banana, denominado de banana à umidade intermediária, por apresentar teor de umidade na faixa de 30 a 40%. Analisaram a influência do tratamento térmico e sulfitação sobre algumas características de qualidade do produto final: firmeza, velocidade de desidratação e cor.

FUSCO et al.(1991) propõem um modelo para o estudo do processo de secagem quando uma variação de volume é significativa. O modelo proposto é baseado nas seguintes suposições:

- ✓ O sistema é descrito por um sistema homogêneo com propriedades efetivas que não variam dentro do sólido.
- ✓ A secagem ocorre durante o período de taxa decrescente.
- ✓ O processo pode ser controlado pela difusão interna e as resistências externas podem ser desprezadas.

Os autores concluíram que o modelo apresenta diferenças significativas para uma placa infinita, quando comparado com a solução analítica. Para geometrias esférica e cilíndrica, podem ser encontrados erros apreciáveis no cálculo de coeficiente de difusão e tempos de secagem.

QUEIROZ (1994) desenvolveu um trabalho teórico-experimental de secagem de bananas sob diferentes condições do ar do processo, para obtenção de banana-passa. Ela utilizou o modelo de difusão líquida com coeficiente de difusão constante, enfatizando o encolhimento do produto e os efeitos convectivos do ar na superfície do material, para tratar os dados experimentais de variação de teor de umidade com o tempo de secagem. A

hipótese de que a umidade migra no estado líquido no interior da fruta pode ser baseada nas faixas de temperatura estudadas (30 a 70°C) e na existência do encolhimento do sólido durante a secagem, o que, pressupõe-se, contribui para a diminuição dos microcapilares internos.

Postulou-se que a migração de umidade no estado vapor seria insignificante, podendo ser considerada desprezível, uma vez que o teor de umidade final pretendido foi de 25%, base úmida. A análise teórica foi baseada no desenvolvimento de 4 modelos difusivos, resolvidos numericamente, utilizando-se o método explícito de diferenças finitas para geometria cilíndrica, para uma malha de 40 subdivisões na raio representativo da banana e passo de tempo de 0,001 hora. QUEIROZ (1994) verificou que o fenômeno do encolhimento melhorou a adequação do modelo, principalmente, nos períodos finais de secagem.

SANKAT et al.(1996) estudaram o comportamento de secagem de fatias de banana previamente desidratadas osmoticamente em soluções de sacarose. Eles avaliaram o efeito da velocidade do ar e da espessura das fatias na taxa de secagem à 60°C e concluíram que o aumento da velocidade do ar não provoca nenhuma influência no comportamento de secagem. Concluíram também que a banana seca muito mais lentamente comparada com outras frutas, por causa de sua composição físico-química.

No trabalho desenvolvido por LUCAS (1996), a secagem foi feita em leite fluidizado aplicando o método HTST (alta temperatura por curto tempo) e submetendo o material a pré tratamento em solução de amido e inativação enzimática (xarope de glucose ou metabissulfito de sódio). As características de padronização das amostras foram determinadas de acordo com o teor inicial de umidade, teor de amido e Brix. As variáveis de processo foram o tipo de solução infiltrante usada no pré-tratamento, sua concentração, o tempo de imersão e a temperatura do ar de secagem. A pesquisa indicou que as fatias de frutas mais verdes, com menor Brix e maior quantidade de amido presente nas células, além de proporcionarem uma melhor fluidização na câmara de secagem, resultam 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.

LUCCAS e KIECKBUSCH (1996) também concluíram que as condições ótimas de secagem HTST em leite fluidizado de fatias de banana foram temperatura de 130°C e tempo de 12 minutos. Os autores constataram que a expansão de volume pode ser consequência de um aumento na pressão interna das fatias, controlado pela evaporação da água e seu aquecimento a 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*. Além disso a alta temperatura utilizada no processo foi suficiente para inativar a peroxidase presente na fruta.

2.4. CINÉTICA DE SECAGEM

No caso de produtos com elevado teor inicial de umidade, como frutas e vegetais, os modelos de secagem baseados na equação de difusão líquida, apoiada na segunda lei de Fick, expressa em termos de gradiente de umidade, aparecem com bastante frequência na literatura, apresentando, em geral, bons resultados.

Os modelos mais simples consideram a secagem isotérmica, com difusividade constante e desprezam o fenômeno do encolhimento. O aumento da temperatura da amostra aumenta o coeficiente de difusão, mas o encolhimento e o endurecimento durante a secagem, diminuem esse coeficiente.

LEWIS (1921) foi um dos 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:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial X}{\partial x} \right) \quad (2.1)$$

onde X é o teor de umidade local, Kg água/ Kg sólido seco

D é o coeficiente de difusão da água, m^2/s

O tratamento usual dos resultados experimentais envolve a consideração de que o processo de secagem é controlado pela difusão interna em um sólido pseudo-homogêneo que não altera seu tamanho. Dessa forma, o balanço de massa microscópico pode ser analiticamente resolvido pelo método de separação de variáveis. Os dados experimentais são então plotados contra a solução teórica da segunda lei de Fick que depende da forma e dimensões do material.

VACCAREZZA et al. (1974) estudaram os efeitos da transferência de calor na secagem de alimentos e utilizaram o modelo difusional de Fick com perfil de temperatura uniforme assumindo condutividade térmica infinita.

Esse modelo difusional puro foi utilizado por MOWLAH et al. (1983) para calcular a difusividade de bananas desidratadas através da inclinação das linhas retas representadas pelo $\log\left(\frac{X - X_e}{X_o - X_e}\right)$ x tempo, de acordo com a solução em série da segunda lei de Fick para transporte unidimensional e transiente para uma placa:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 \frac{Dt}{r^2}\right] \quad (2.2)$$

na qual r é a espessura da placa, m

Em um tempo muito grande, a Equação (2.2) tem uma precisão suficiente quando apenas se considera o primeiro termo, sendo $r = 2L$:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \left[e^{-D t \left(\frac{\pi}{2L}\right)^2} \right] \quad (2.3)$$

ou:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{-\pi^2 D}{4L^2} (X - X_e) \quad (2.4)$$

quando: $\frac{X - X_e}{X_o - X_e} < 0,6$

Quando o encolhimento é considerado como um fator importante, o problema das condições de contorno pode ser resolvido pelo método das diferenças finitas (SIMAL et al., 1996).

LEWIS (1921) apresentou um modelo exponencial para descrever curvas de secagem, baseado em uma resistência efetiva à transferência de massa ($1/k$) e um potencial dado pela diferença entre a umidade média do produto (X) e sua umidade de equilíbrio com o ar de secagem (X_e):

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e) \quad (2.5)$$

$$\left(\frac{X - X_e}{X_o - X_e} \right) = \exp(-kt) \quad (2.6)$$

sendo k = constante da cinética de secagem

Segundo Sharaf-Eldeen et al. (1979), citado por RAPUSAS e DRISCOLL (1995), diversos pesquisadores determinaram que o modelo exponencial com dois termos tem melhor resultado aos ajustes para a secagem de materiais biológicos:

$$\left(\frac{X - X_e}{X_o - X_e} \right) = C_1 \exp(-K_1 t) + C_2 \exp(-K_2 t) \quad (2.7)$$

Onde C_1 , C_2 , K_1 , K_2 são parâmetros da equação. As constantes K_i podem ser determinadas sem referência ao tamanho ou encolhimento do material a ser seco, o que é

uma vantagem para partículas de alimentos que não podem ser especificados com precisão, ou onde ocorrem grandes mudanças na geometria do produto. A influência das variáveis experimentais de secagem, sobre os parâmetros, C e K, pode ser correlacionada, usando expressões pertinentes.

PAGE (1949), propôs a inclusão de um expoente de ajuste n no termo tempo, para ampliar a validade do modelo de LEWIS:

$$\left(\frac{X - X_e}{X_o - X_e} \right) = \exp(-kt)^n \quad (2.8)$$

RAMESCH E RAO (1996) estudaram a secagem de arroz cozido em leito vibro fluidizado e aplicaram a equação de Page para modelar o processo, obtendo bons resultados.

ROVEDO et al. (1995) apresentaram um modelo para prever a cinética de secagem de fatias de batata em secador convencional, com base nas relações fundamentais de transferência de calor e massa e no equilíbrio termodinâmico. Eles concluíram, baseados em comparações de dados experimentais com as predições do modelo, que o modelo apresenta confiabilidade para teores de umidade abaixo de 40%, base seca.

Um modelo para prever a temperatura de alimentos durante a desidratação foi proposto por ALZAMORA et al. (1979). Os autores obtiveram resultados satisfatórios para experimentos com abacate, batata, maçã e cenoura. Uma das vantagens do modelo consiste na sua simplicidade por apresentar solução analítica, dispensando métodos computacionais. A predição da temperatura durante a secagem requer o conhecimento da taxa de secagem e da difusividade térmica.

Segundo QUEIROZ (1994), outros autores ao utilizarem a equação da difusão, investigaram a dependência da difusividade com a temperatura (Suarez, Viollaz e Chirife, 1980; Steffe e Singh, 1980; Mulet et al., 1983; Berna et al., 1990); ou com o teor de umidade (Silva e Nebra, 1988); com a temperatura e o teor de umidade (Igbeka, 1982);

com a temperatura, a umidade relativa e a velocidade (Yusheng e Poulsen, 1988) ou, ainda, com a temperatura e °Brix (Conway et al., 1983). Nos últimos anos, os autores têm enfatizado a importância de se considerar o fenômeno do encolhimento do produto durante a secagem, somente com a hipótese de difusividade constante (Vagenas e Marinos-Kouris, 1991b; Suarez e Viollaz, 1991) ou combinam a variação da difusividade e o fenômeno do encolhimento, em distintos níveis de complexidade (Misra e Young, 1980; Fioreze, 1986; Mulet, Berna e Rossello, 1989; Parti e Dugmanics, 1990; Vagenas e Marinos-Kouris, 1991c).

Henry (1948) apud MAZZA e LEMAGUER (1980) propôs um modelo matemático que demonstra a interação que ocorre durante a transferência simultânea de umidade e calor. De acordo com este modelo o transporte de umidade é assumido ocorrer somente na fase vapor, e a interação entre a transferência de calor e massa é realizada com a suposição que a concentração de vapor d'água é, durante todos os momentos do processo, uma função linear de teor de umidade e temperatura. Neste modelo, a capilaridade e a histerese são desprezados.

O modelo proposto por Krischer (1963), apud MAZZA e LEMAGUER (1980) é baseado nas equações diferenciais de transferência de calor e massa que combina a transferência simultânea de água por forças capilares e vapor por difusão, em série, em paralelo ou em combinações em série e em paralelo.

A transferência de massa depende da velocidade de difusão da umidade interna para a superfície. No caso de contração, a distância de difusão diminui, de modo que a umidade no centro do sólido alcança a superfície mais facilmente, e a umidade das outras partes alcançam o equilíbrio mais rápido (BALABAN, 1989).

A consideração de não contração em modelos de transferência simultânea de calor e massa pode causar diferenças significativas entre os valores reais de temperatura e gradientes de umidade e os resultados preditos pelo modelo. Os fatores que afetam a magnitude desta diferença incluem o nível máximo de contração, coeficiente de transferência de calor e massa na superfície, e valores de outros parâmetros de transporte

tais como coeficiente de difusão e condutividade térmica. Um método fácil de incorporar a redução de volume no modelo é usar o método de diferenças finitas centrais com grade variável (BALABAN, 1989).

Os resultados apresentados por FUSCO et al. (1991) mostram para uma placa infinita uma diferença significativa entre o tratamento convencional dos dados experimentais usando a solução analítica e o modelo de redução de volume. Para os casos de geometrias esférica e cilíndrica, sempre quando existe um pequeno desvio entre ambas as soluções, um erro apreciável pode ser encontrado no cálculo dos coeficientes de difusão e tempos de secagem.

Na pesquisa aqui proposta, ocorre o fenômeno inverso, isto é, expansão durante a secagem. De acordo com BALABAN (1989), a transferência de massa deveria ser prejudicada pelo aumento das dimensões do produto, mas as alterações estruturais (formação de vacúolos de vapor) certamente compensarão a resistência adicional. Não se encontrou na literatura, modelo matemático para a secagem de alimentos que incluísse expansão no processo difusivo, embora um trabalho completo sobre expansão de milho de pipoca possa servir como guia (SCHWARTZBERG et al., 1994). A expansão na secagem de gotas no *spray-dryer* foi muito bem investigada por GRENWALD e KING (1982), sobretudo com relação a perda de aromas. LUCCAS (1996) aplicou o modelo das duas resistências de BRUNELLO e NASCIMENTO (1979) para correlacionar seus dados de secagem de banana expandida, e obteve bons ajustes. Esse modelo, entretanto, é empírico e os parâmetros de ajuste perdem seu significado físico no caso da expansão.

2.5. QUALIDADE DE FRUTAS DESIDRATADAS

Os principais fatores de qualidade de frutas desidratadas são: cor, sabor, aroma, textura, capacidade de reidratação, propriedades estruturais (porosidade, vitrificação, aderência), aparência, características nutricionais e estabilidade microbiológica (KARATHANOS et al., 1996).

A descoloração devido ao escurecimento, às vezes, é atribuída à limitação do uso de procedimentos específicos para desidratação de frutas e vegetais.

As reações químicas que resultam, por exemplo, em perda de nutrientes ou escurecimento, são controladas pelo teor de água e a relação temperatura-tempo. Na secagem com ar, a perda de aromas é principalmente controlada pelo comprimento do período de atividade de água constante na superfície e é conseqüentemente dependente do desenvolvimento de gradientes de concentração de água (THIJSSSEN, 1979).

No caso de frutas desidratadas, dois tipos de reações de escurecimento podem ocorrer durante e após o processamento: enzimático e não-enzimático.

O escurecimento enzimático é atribuído principalmente à atividade enzimática residual. A peroxidase é uma das enzimas mais termoestáveis, possuindo a capacidade de regenerar-se. A sua atividade é relativamente fácil de determinar experimentalmente e, por isso, ela se tornou útil como um índice do grau de branqueamento. (OGIHARA, 1989).

Segundo MONTGOMERY e SGARBIERI (1975), a atividade da polifenol oxidase na banana é mais concentrada no interior da polpa e no tecido adjacente às sementes imaturas. Verificaram também que, durante o período de maturação, de um modo geral, a atividade enzimática decresce na polpa e aumenta na casca.

O estudo da inativação da polifenol oxidase proveniente da banana foi realizado por GALEAZZI e SGARBIERI (1981). Eles concluíram que a enzima foi completamente inativada a 95°C após 5 minutos de exposição.

SILVA e NOGUEIRA (1983a), estudando o efeito do calor na atividade do polifenol oxidase em diversas frutas e hortaliças, concluíram que a enzima da banana sofreu total inativação quando submetida a 90°C por 2 minutos.

O efeito do SO₂ na inibição da polifenol oxidase de algumas frutas e hortaliças também foi estudado por SILVA e NOGUEIRA (1983b). Os autores observaram que a

polifenol oxidase da banana apresentou maior resistência à inibição, mas o uso de metabissulfito de potássio a 0,2% inibiu 91,1% da atividade desta enzima. Os autores, utilizando ácido ascórbico na concentração de 1,0%, verificaram que a polifenol oxidase da banana mostrou total resistência a este tratamento.

BREKKE e ALLEN (1967) estudaram o efeito do tratamento com SO_2 antes da secagem de bananas. Estudaram também a estabilidade do produto por um ano a 13, 24 e 38°C. Os autores concluíram que o pré-tratamento com bissulfito em bananas melhora a estabilidade do produto final.

Em seu trabalho de tese, ALMEIDA (1991), concluiu que os tratamentos eficazes para a prevenção ou diminuição do escurecimento da banana foram:

- ✓ ácido ascórbico (0,1%)+metabissulfito de sódio (0,05%)
- ✓ ácido ascórbico (0,1%)+metabissulfito de sódio (0,05%)+calor (70°C/2min)
- ✓ ácido ascórbico (0,1%)+ácido cítrico (0,2%)+metabissulfito de sódio (0,05%)
- ✓ ácido ascórbico (0,1%)+ácido cítrico (0,2%)+metabissulfito de sódio(0,05%)+calor (70°C/2min)
- ✓ ácido ascórbico (0,1%)+ácido cítrico (0,2%)+calor (70°C/2min)
- ✓ ácido ascórbico (0,1%)+ácido cítrico (0,2%)+EDTA (ácido etilenodiamintetracético) (30ppm)+calor(70°C/2min)

ALAM-ZEB et al. (1995) estudaram o efeito do pré-tratamento com glucose, frutose e sucrose-glucose na qualidade de banana *chips*. Eles usaram soluções de glucose (40°brix), frutose (30°brix) e uma mistura de sucrose-glucose 7:3 (40°brix) a temperatura ambiente por 24, 48 e 72 horas; adicionadas de solução 0,2% de metabissulfito de potássio, antes da secagem a 70°C. Os autores concluíram que o produto preparado com sucrose-glucose apresentou qualidade superior em relação à cor, aroma e paladar.

Na preparação de banana *chips*, Adeva et al. (1968) apud CROWTHER (1979) sugeriu a imersão da banana em solução 500 ppm de metabissulfito de sódio por 15 minutos. CROWTHER (1979), no pré-tratamento de fatias de banana para fritura, submeteu as fatias de banana à imersão em uma solução 500 ppm de metabissulfito de

sódio por uma hora, seguida de imersão das fatias em água fervente por 30 segundos e resfriamento em água gelada por 5 segundos. Após o tratamento, as fatias foram submetidas à secagem a 70°C por 4 horas até umidade final de 2,5%; e, então, fritas em óleo hidrogenado à 200°C.

O escurecimento não-enzimático, conhecido como Reação de Maillard, consiste na reação entre aminoácidos e açúcares redutores, que leva à formação de compostos escuros de alto peso molecular, melanoidinas ou melaninas. Estas reações ocorrem, principalmente, durante o armazenamento (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 do que a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem.

A boa qualidade de frutas desidratadas está intimamente ligada ao grau de maturidade do material. Em termos de definições estruturais e químicas, as frutas para secagem devem ter atingido o estágio em que elas estejam firmes e sem danos na parte externa para evitar o possível escurecimento.

Na desidratação, o branqueamento térmico serve para inativar as enzimas e prevenir ou retardar o desenvolvimento de odores, *off-flavors* e escurecimento indesejáveis durante a secagem ou estocagem, e também para cozer parcialmente os tecidos e tornar a membrana celular mais permeável à transferência de umidade. A taxa de secagem é aumentada, uma secagem mais rápida e completa é obtida, e a textura é melhorada (OGIHARA, 1989).

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 as torna crocantes. A crocância é uma propriedade organoléptica caracterizada por várias fraturas sucessivas do produto quando mastigado. De acordo com KATZ e LABUZA(1981), a crocância é uma característica de saliência textural para produtos tipo *snack*, e sua perda é devida à absorção de umidade, provocando a rejeição pelos consumidores. A água afeta a textura de alimentos secos tipo *snack* através do amaciamento e plastificação da matriz protéica que altera a resistência mecânica do produto. Um melhor método para estabilizar as condições críticas de umidade para aceitabilidade textural é estudar os sistemas tipo *snack* como uma função da atividade de água.

LOZANO et al (1983) determinaram a crocância, porosidade e densidade de vários produtos desidratados pelo método *puffing*, utilizando correlações existentes e concluíram que a faixa de atividade de água não aceitável sensorialmente é 0,35 - 0,50. É nesta faixa onde ocorrem transformações do estado amorfo para o cristalino em sistemas de alimentos com açúcar simples e inicia a mobilização dos constituintes solúveis do alimento (KATZ e LABUZA, 1981).

2.6. PUFFING

De acordo com PAYNE et al. (1989), *puffing* envolve o desprendimento ou expansão de um gás no interior do produto, ambos para gerar uma nova 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 comumente utilizado. Isto se deve à grande variação de volume associada à mudança de fase (LUCCAS, 1996).

Produtos submetidos ao *puffing* também podem ser produzidos em leite fluidizado, por exemplo usando o processo descrito por Brow et al., (1972) apud SHILTON e NIRANJAN (1993). Neste processo, o alimento é pré-seco até aproximadamente 40% de

umidade à 90°C, e imediatamente seguido pelo aquecimento rápido à 125°C por 2-3 minutos.

O *puffing* ocorre quando uma pele dura mas flexível, formada a temperaturas mais baixas, é rompida pelo aumento da pressão interna a temperaturas mais altas. O *puffing* é acompanhado pelo aumento espontâneo no volume da partícula, e um decréscimo correspondente na densidade (SHILTON e NIRANJAN, 1993).

O *puffing* pode ser atingido mais facilmente em temperaturas mais altas devido à gelatinização do amido e à dispersão de suas moléculas, o que promove menor resistência à expansão. Temperaturas altas e baixa vazão de gás, dificultam a difusão interna e há um aumento da pressão interna, provocando a expansão do material (HSIEH et al., 1989).

O processo mais conhecido que utiliza esse método é o *explosion-puffing* ou despressurização. Ele é um passo operacional integrado à desidratação por ar quente até teores de umidade de 15-35% e que cria poros na estrutura do produto.

Essa reestruturação acelera a secagem, modificando ou eliminando o mecanismo de difusão controlador da secagem, pois, após a despressurização, ocorre uma vaporização *flash* da água superaquecida que é convertida instantaneamente em vapor gerando a estrutura porosa.

O produto submetido ao processo de *explosion-puffing* apresenta baixos valores de densidade aparente, boa reidratação e excelentes propriedades sensoriais. A redução da densidade do produto final depende da mobilidade da umidade no material e da taxa de secagem (ACHANTA e OKOS, 1996). A mobilidade da água no material é facilitada pela estrutura porosa formada no interior do produto, e a impermeabilização da superfície é a única resistência à essa migração.

Na secagem de alimentos e outros materiais sensíveis ao calor (termolábeis), é necessário que o teor de umidade e a temperatura final do produto sejam restritas dentro de uma faixa limitada de valores. Isto significa que o tempo de residência do produto no

secador deve ser tão uniforme e pequeno quanto possível; o que pode ser alcançado em um leito vibro-fluidizado.

SACA e LOZANO (1992), aplicaram o processo de *explosion-puffing* em bananas para reduzir o tempo de secagem e reidratação e obter um produto de alta qualidade. Esse objetivo foi alcançado devido à estrutura porosa formada na banana. O escurecimento enzimático das amostras de banana foi minimizado pela imersão em uma solução a 1% de bissulfito de sódio seguido de um branqueamento em água fervente por 5 minutos.

2.7. SECAGEM HTST 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, a remoção da umidade é lenta e o encolhimento das células é uniforme por todo o sólido;
- ✓ se o potencial de secagem é alto, a remoção de umidade é rápida e há formação de uma rígida camada externa, que limita o encolhimento.

JAYARAMAN e GUPTA (1992) estudaram o processo de secagem HTST em leito fluidizado de diversas hortaliças (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 do 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. Eles obtiveram produtos com expansão de volume, boa reidratação e excelente textura.

O efeito da desidratação osmótica e da secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado nas propriedades de *blueberries* desidratadas foi verificado por KIM e TOLEDO (1987). Os autores compararam os resultados com amostras secas por *explosion-puffing* e secagem convencional (temperatura de 60°C e velocidade do ar de 4 m/s). O processo HTST a 170 °C / 8 minutos promoveu boa expansão do produto, que apresentou menor densidade aparente e maior taxa de reidratação do que o produto do

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

MUDAHAR et al. (1991) pesquisaram a infiltração de biopolímeros (pectina e polidextrose, 1:5) em cenouras e batatas. Após o pré-tratamento, os vegetais foram desidratados em leito fluidizado (temperatura de 70°C e velocidade do ar de 4m/s) até um conteúdo de umidade menor que 5%. Os produtos desidratados apresentaram boa cor, alta taxa de reidratação e baixa densidade aparente.

O pré-tratamento de frutas e hortaliças com uma suspensão de amido de mandioca a 2% gelatinizado foi estudado por Bobic et al. (1988) apud LUCAS (1996). Os autores concluíram que o amido depositado na superfície do material ajudou na formação de uma camada impermeável promovendo a expansão do material. Há a formação de uma estrutura porosa, aumento da quantidade de água absorvida e diminuição do tempo de reidratação.

A expansão e desidratação de cubos de maçã pré-tratados com xarope de milho, maltodextrina-pectina e amido, a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado foram estudadas por TORREGIANI e TOLEDO (1990). A imersão na suspensão de amido foi comprovado ser o pré-tratamento mais eficiente na expansão dos cubos de maçã, reforçando a hipótese de BOBIC et al. (1988).

2.8. SOLUÇÕES INFILTRANTES

O pré-tratamento de frutas com soluções infiltrantes é 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 o estrutura celular e prevenindo o colapso total durante a reidratação.

A integridade das células e dos espaços intercelulares no produto seco garantem a boa qualidade dos produtos desidratados reconstituídos, durante a absorção de água.

Os espaços intercelulares permitem a ação capilar para succionar a água para dentro das células durante o processo de reidratação. A água pode difundir através da parede da célula e para dentro da célula, restabelecendo o turgor.

LUCAS (1996) utilizou várias soluções infiltrantes em seu trabalho de secagem de banana e não observou diferenças significativas do comportamento entre as amostras que sofreram ou não pré-tratamento. As soluções usadas foram: sacarose (20 a 50%); xarope de glucose (70^oBrix); glicerol (20%); sacarose 30% contendo 2% de CMC; sacarose 30% contendo 2% de pectina com baixo teor de metoxilação; e sacarose 40% contendo 20% de glicerol.

Vários pré-tratamentos para fortalecer a estrutura celular de frutas e hortaliças são citados por LUCAS (1996): adição de sais de cálcio (Shimazu e Sterling, 1961); controle de atividade de enzimas pectínicas (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.

CAPÍTULO 3 – LEITO VIBRO-FLUIDIZADO (LVF)

3. LEITO VIBRO-FLUIDIZADO (LVF)

Em sua essência, secadores de leito vibro-fluidizado consistem de um leito fluidizado tradicional ao qual se aplica uma vibração mecânica para melhorar as características de transporte.

O estado vibro-fluidizado ocorre no leito, quando a força gravitacional atuando sobre a partícula é exatamente equilibrada pela soma da força de arraste do gás e pela componente vertical da força vibracional. Assim, do equilíbrio de forças:

$$m_p g = f \left(\frac{\pi d_p^2}{4} \right) \frac{\rho_f}{2} v_{mf}^2 \quad (3.1)$$

$$m_p g = f \left(\frac{\pi d_p^2}{4} \right) \frac{\rho_f}{2} v_{mf}^2 + m_p A w^2 \quad (3.2)$$

$$v_{mf}^2 = \frac{m_p g \left(1 - \frac{A w^2}{g} \right)}{f \left(\frac{\pi d_p^2}{4} \right) \left(\frac{\rho_f}{2} \right)} \quad (3.3)$$

$$v_{mf}^2 = \frac{m_p g}{f \left(\frac{\pi d_p^2}{4} \right) \left(\frac{\rho_f}{2} \right)} \quad (3.4)$$

então:

$$v_{mf}^2 = v_{mf}^2 \left(1 - \frac{A w^2}{g} \right) \quad (3.5)$$

onde A é a amplitude de vibração, m
 w é a frequência angular, s^{-1}
 f é a frequência de vibração, Hz
 d_p é o diâmetro da partícula, cm
 ρ_f é a densidade do gás, Kg/m^3

A partir da Equação (3.5), conclui-se que a vibração atua no sentido de reduzir a velocidade mínima de fluidização. Entretanto, na prática a extensão desta redução é menor do que prevê esta relação, devido ao amortecimento de vibração pela influência da altura do leito (FINZER e KIECKBUSCH, 1992; RINGER e MUJUMDAR, 1983-84).

De acordo com o valor assumido pelo adimensional de taxa de aceleração ($\Gamma = Aw^2/g$) e pela v_{mf} (velocidade mínima de fluidização); os leitos podem ser classificados como: (FINZER e KIECKBUSCH, 1992)

- ✓ leito vibrado, para $\Gamma > 1$; sem escoamento de ar;
- ✓ leito compacto, para $\Gamma < 1$; sem escoamento de ar;
- ✓ leito vibro fluidizado, para $\Gamma > 1$; $v_{ar} < v_{mf}$;
- ✓ leito fluidizado vibrado, para qualquer Γ ; $v_{ar} > v_{mf}$

No regime vibro-fluidizado, o ar esco a velocidades muito baixas e, por si só, não teria condições de movimentar as partículas do leito. Estas são fluidizadas devido ao efeito redutor da vibração sobre a velocidade mínima de fluidização (FINZER e KIECKBUSCH, 1992).

Bratu e Jinescu apud FINZER e KIECKBUSCH (1992) propõem a denominação de regime vibrofluidizado para $v_{mvf} < v_{ar} < v_{mf}$ onde v_{mvf} é denominada velocidade incipiente de vibro-fluidização.

Como um resultado da aplicação da vibração, as seguintes mudanças podem ser observadas em relação ao leito fluidizado convencional (WIRTH, 1995; THOMAS et al., 1988; SUZUKI et al., 1980a; SUZUKI et al., 1980b; MALHOTRA e MUJUMDAR, 1985; DONG et al., 1991; SZALZY et al., 1995):

- ✓ intensa mistura eliminando elutriação de partículas finas;
- ✓ previne aglomeração de partículas;
- ✓ diminui o atrito entre as partículas, proporcionando a possibilidade de tratamento de materiais frágeis;
- ✓ menor queda de pressão devido à reduzida quantidade de ar necessária;
- ✓ diminuição da energia devido à minimização da velocidade do gás de fluidização;
- ✓ redução da pulverização;
- ✓ controle do tempo de residência;
- ✓ possibilidade de fluidizar materiais coesivos, adesivos e pastosos.

Alguns desses aspectos serão comentados a seguir.

A secagem em leitos vibratórios é apropriada para processamento de materiais em que a vazão de ar é governada pela exigência de fluidização, não pelo calor requerido na secagem, ou quando vazões elevadas de ar não são recomendadas para processamento de materiais facilmente oxidáveis (Pakowski et al., 1984 apud FINZER e KIECKBUSCH, 1992).

De acordo com STRUMILLO et al. (1980), a circulação de partículas (Figura 3.1) tem grande efeito, não apenas na cinética de secagem, mas sobretudo na uniformidade desse processo em todo o leito, evitando-se assim a sobre-secagem.

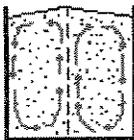


Figura 3.1 – Circulação de partículas em LV ou LVF

O efeito da vibração é significativo para a prevenção da canalização do leito e formação de bolhas, exceto no período inicial da operação de secagem (MORI et al., 1986).

A queda de pressão em um leito fluidizado é menor do que a de um leito não vibrado. Ela diminui com o aumento da frequência de vibração e amplitude (GUPTA e MUJUMDAR, 1980).

A vibração também tem efeito significativo na promoção de uma fluidização de boa qualidade e no impedimento de coalescência de bolhas (GUPTA e MUJUMDAR, 1980).

Para eficientes transferências de calor e massa, a operação em LVF deve ser feita sob boas condições de mistura de sólidos no leito. Uma das vantagens do LVF é que a mistura de sólidos começa com muito baixas vazões de fluxos de gás e acelerações vibracionais moderadas (RÁTKAI e TÖRÖS, 1986).

Em leitos vibratórios, a vibração pode aumentar ou diminuir a porosidade do leito. Quando a aceleração vibracional é menor que a aceleração gravitacional ocorre a compactação do leito e quando é maior, a porosidade aumenta. A expansão do leito é mais dependente da amplitude de vibração do que da frequência. Para a aceleração vibracional constante, maiores fatores de expansão podem ser obtidos para maiores amplitudes e menores frequências. Dentro do ciclo vibracional, as variações da porosidade do leito são insignificantes (FINZER, 1984).

A ação vibracional reduz as zonas estagnadas e causa separação de grupos de partículas e com isso um acréscimo na taxa de remoção de umidade do sólido. O tempo de secagem é consideravelmente reduzido, quando comparado com secadores de leito estático ou rotatórios. A distribuição do tempo de residência é mais uniforme e a degradação térmica em zonas estagnadas pode ser evitada (FINZER, 1984).

O efeito da vibração pode ser considerado equivalente a um aumento da vazão do ar. Uma frequência de excitação mínima é requerida para influenciar a velocidade de secagem em presença de forças adesivas entre as partículas. Esta tendência difere segundo o tipo de material (FINZER, 1984).

ERDÉSZ (1990) resumiu características tais como queda de pressão, porosidade e velocidade mínima de fluidização de leitos fluidizados convencionais (LFC) e leitos vibro-fluidizados (LVF).

Uma correlação simples para o cálculo da velocidade incipiente de vibro-fluidização é a de Mushtayev, 1973 apud GUPTA e MUJUMDAR, 1980, expressa por:

$$v_{mf} = 6,9 \left[\frac{\rho_p}{\rho_g} \right]^{0,63} \left[\frac{1}{g_g} \right]^{0,33} d_p^{0,88} \left(1 - c \frac{Aw^2}{g} \right) \quad (3.6)$$

onde ρ_g é a densidade do gás, Kg/m³
 ρ_p é a densidade da partícula, Kg/m³
 g_g é a viscosidade cinemática, P
 c é uma constante

A redução da velocidade mínima de fluidização observada na presença de vibração é largamente explicada pela redução na porosidade se for assumida que a velocidade de mínima fluidização é proporcional a $\frac{\varepsilon_{mf}^3}{(1 - \varepsilon_{mf})}$ (BEECKMANS e CHU, 1987).

O grau da redução da velocidade de mínima fluidização devido à vibração é dependente da aceleração vibracional. A correlação proposta por Brato e Jinescu apud FINZER (1984) exprime esse grau:

$$\frac{v_{mf}}{v_{mf}} = 1 - \frac{1 + k'}{2\pi j} \frac{Aw^2}{g} \quad (3.7)$$

onde k' = fator de colisão [0-1]

j = parâmetro dependente de Γ (para $\Gamma < 4,5$; $j = 1$ e para $\Gamma > 4,5$; $j = 2$)

PAKOWSKI et al. (1984) e GUPTA e MUJUMDAR (1980) propuseram uma equação para a avaliação de v_{mvf} :

$$v_{mvf} = 0,12 \left(\frac{v_p}{\rho_g} \right)^{0,63} \left(\frac{1}{g_g} \right)^{0,33} (d_p)^{0,38} \left(1 - 0,095 \frac{Aw^2}{g} \right) \quad (3.8)$$

DONG et al. (1991), estudaram o efeito da vibração na secagem em leito vibro-fluidizado de milho, sílica gel e ácido cítrico. Eles concluíram que a vibração provoca uma diminuição significativa do teor de umidade do material, em comparação com a secagem HTST em leito fluidizado convencional.

CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATÉRIA-PRIMA

A variedade de banana usada nos experimentos foi a variedade prata (*Musa sapientum* L.), visando reproduzir os resultados de LUCAS (1996).

As frutas foram adquiridas nos mercados locais, observando-se visualmente, seu estado de maturação e uniformidade; e processadas no mesmo dia sem a necessidade de armazenamento sob refrigeração.

Os parâmetros de padronização das amostras adotadas foram:

- ✓ Comprimento (L): 10 – 14 cm
- ✓ Diâmetro (d): 3 – 4 cm
- ✓ Teor de sólidos solúveis: 9 – 18 °Brix

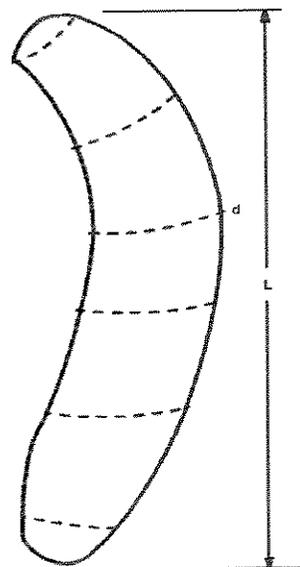


Figura 4.1 – Seção Longitudinal da Banana

Para o início dos experimentos, as frutas foram cortadas com o auxílio de uma faca inox em rodela de 1 cm de espessura, desprezando-se as extremidades. Em seguida, as fatias foram seccionadas em 4 partes iguais. Uma parte do material foi reservado para as análises químicas, e o restante seguiu a rotina de trabalho (pré-tratamento; pré-secagem; secagem final e caracterização do produto).

4.2. PRÉ-TRATAMENTO

O pré-tratamento consistiu em uma imersão de cerca de 100 g de fatias de banana em 500 ml de solução infiltrante e/ou de agentes preservativos, à temperatura ambiente, nas concentrações e tempo especificados na Tabela 4.1.

Após a imersão, as fatias de banana foram removidas por escorrimento em uma peneira plástica por 3 minutos; e o excesso foi retirado com papel absorvente.

4.2.1. BANHO COM SOLUÇÕES INFILTRANTES

As soluções utilizadas, com o objetivo de fortalecer a estrutura celular evitando o colapso durante a expansão e melhorar a qualidade visual e organoléptica do produto, foram:

- ✓ Amido (polvilho doce) - marca HIKARI
- ✓ PEG – polietilenoglicol P.M. 1000 g/mol - marca SIGMA
- ✓ Glicose P.M. 180,16 – marca SYNTH
- ✓ Açúcar (sacarose) – marca UNIÃO
- ✓ Amido (polvilho azedo) – marca HIKARI

A gelatinização do amido de mandioca (comercialmente conhecido como polvilho doce ou azedo) foi feita pelo aquecimento da suspensão até 75^oC, seguido de repouso até atingir temperatura ambiente.

4.2.2. IMERSÃO EM AGENTES PRESERVANTES

As soluções de agentes preservantes, utilizadas para evitar o escurecimento do produto e melhorar sua qualidade visual, foram:

- ✓ Metabissulfito de Sódio – marca MERCK
- ✓ Metabissulfito de Potássio – marca MERCK
- ✓ Ácido Ascórbico L(+) – marca MERCK
- ✓ Ácido Cítrico – marca MERCK
- ✓ EDTA (etilenodiaminatetracetato dissódico – P.M. 372,24g) – marca ECIBRA

4.2.3. TIPOS DE PRÉ-TRATAMENTOS

Os tipos de pré-tratamentos utilizados foram estabelecidos com base em estudos anteriores encontrados na literatura e estão descritos da Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Tipos de pré-tratamentos

SOLUÇÃO / AGENTE	CONC. (%)	TEMPO DE IMERSÃO (MIN)
Amido	2,0	30
Amido / Metabissulfito de sódio	2,0 / 1,0	30
Amido / Metabissulfito de sódio	2,0 / 0,5	30
Metabissulfito de sódio	0,5	30
Metabissulfito de sódio	1,0	30
Metabissulfito de sódio	2,0	30
PEG	2,0	30
PEG / Metabissulfito de sódio	2,0 / 0,5	30
Amido / sacarose	2,0 / 4,0	30
Amido / sacarose / metab. de sódio	2,0 / 4,0 / 1,0	30
Ácido ascórbico / amido	1,0 / 2,0	30
Polvilho azedo	2,0	30
Polvilho azedo / metab. de sódio	2,0 / 0,5	30
Ácido cítrico	1,0	30
EDTA	1,0	30
Glicose / sucrose / metab. de sódio	7:3 / 0,2	30
Sacarose / D-glucose	7:4 (40° Brix)	30
In natura	-	-

4.3. AFERIÇÃO DOS TERMOPARES

Os termopares tipo T (cobre-constantan) foram aferidos em ensaios em banho termostático contendo água destilada. Os termopares e termômetro padrão (Precision Scientific, USA) foram imersos na água até uma profundidade de 12 cm, e as medidas foram tomadas em diferentes temperaturas. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 4.2.

Para cada termopar foi realizada uma regressão linear, pelo programa Microcal Origin 3, entre os valores de temperatura lidos no indicador e no termômetro padrão. Assim, obteve-se equações matemáticas, para cada termopar, para a correção da temperatura experimental. Essas equações e seus coeficientes de correlação são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Valores obtidos nos ensaios de aferição dos termopares

Termômetro	Indicador				
	Canal	Canal	Canal	Canal	Canal
	1	2	3	4	5
25.3	29	29	28	29	29
28	31	31	29	30	30
31	33	32	32	33	33
35	35	35	36	36	36
38	38	37	38	39	40
40	43	43	45	46	46
42	43	43	46	47	47
45	45	45	48	49	49
49	47	47	51	52	51
52	49	49	53	54	54
55	51	52	57	58	58
58	55	55	60	61	62
59.4	56	56	63	64	64
63	58	59	61	66	67
65	60	61	68	70	70
70	63	63	72	73	74
74	66	66	77	78	78
76	68	68	79	81	81
78	71	72	84	85	85
82	71	72	85	86	86
85	73	74	88	89	89
90	75	76	92	93	94

Tabela 4.3 – Equações de correção da temperatura e coeficientes de correlação

Termopar (canal)	Equação de correção	Coefficiente de correlação(r^2)
1	$Y=10,79548+0,74353X$	0,99643
2	$Y=9,84159+0,76448X$	0,99612
3	$Y=1,12915+1,02133X$	0,99665
4	$Y=1,8188+1,03086X$	0,99761
5	$Y=1,6865+1,03643X$	0,99800

4.4. OPERAÇÃO DE SECAGEM

4.4.1. MÉTODO DE SECAGEM UTILIZADO

A secagem HTST no secador de LVF foi realizada em sistema de batelada, com diferentes temperaturas do ar de secagem (de 130 a 180°C), tempos de secagem (de 8 a 15 minutos) e velocidades do ar(de 0,7 a 2 m/s) .

A secagem final foi feita no secador de bandejas à temperatura de 70°C por 300 minutos, com uma velocidade de ar de 3 m/s, de acordo com HAENDLER (1966). Durante a secagem foram feitas pesagens sucessivas, para obtenção de uma curva de secagem. As pesagens foram feitas retirando-se a bandeja com a amostra do secador e anotando o peso registrado numa balança digital com duas casas decimais, marca OHAUS, modelo Precision Advanced.

4.4.2. EQUIPAMENTO

4.4.2.1. SECADOR DE LEITO VIBRO-FLUIDIZADO E DE BANDEJAS

Os secadores de LVF e de bandeja foram desenvolvidos e construídos no DTF da FEQ/UNICAMP e estão apresentados nas Figura 4.2 e 4.3.

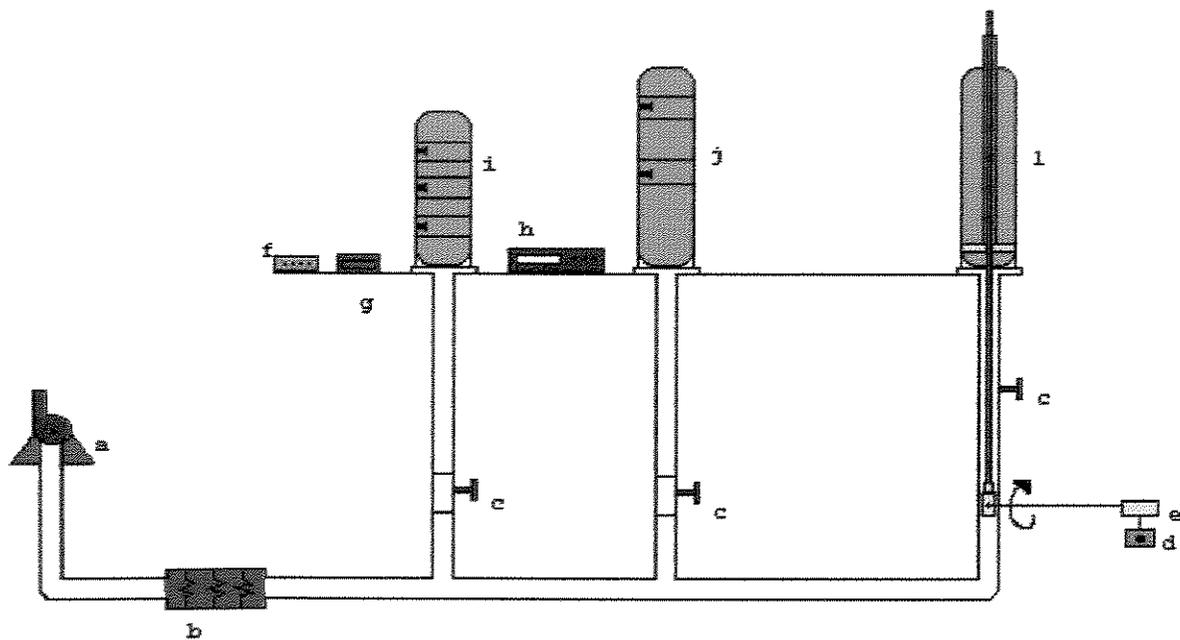


Figura 4.2 – Esquema do Secador de LVF e de bandejas

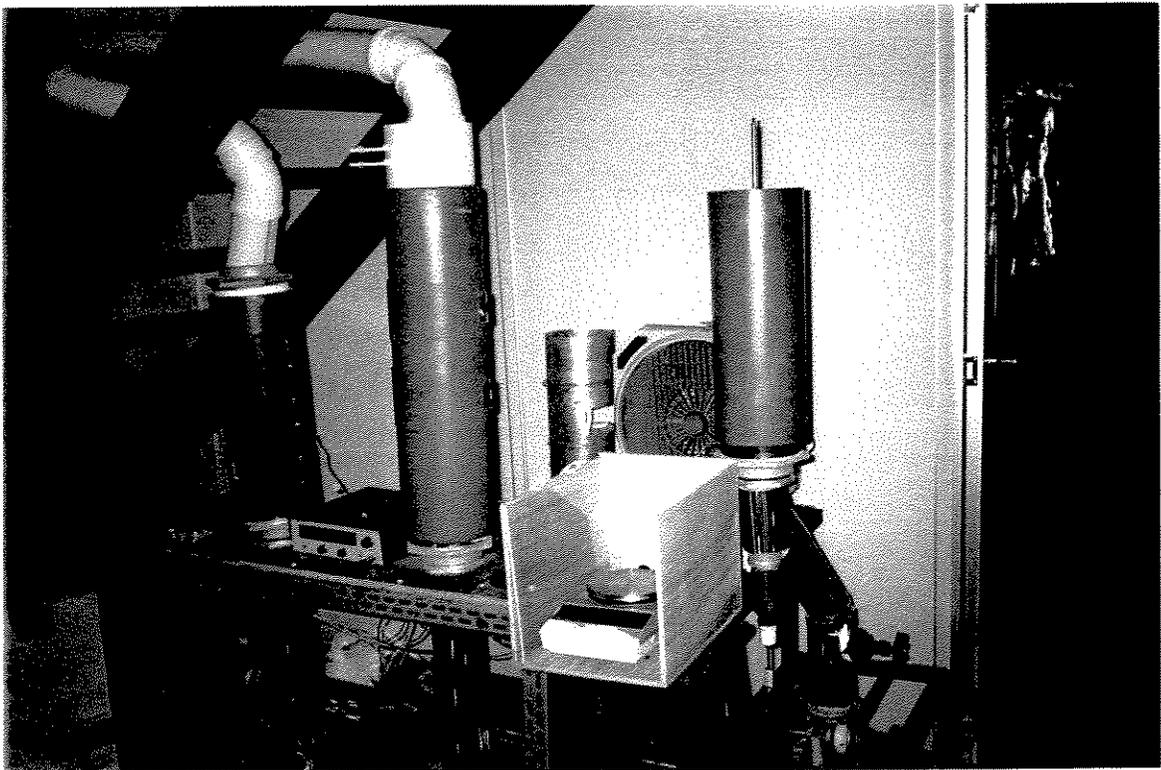
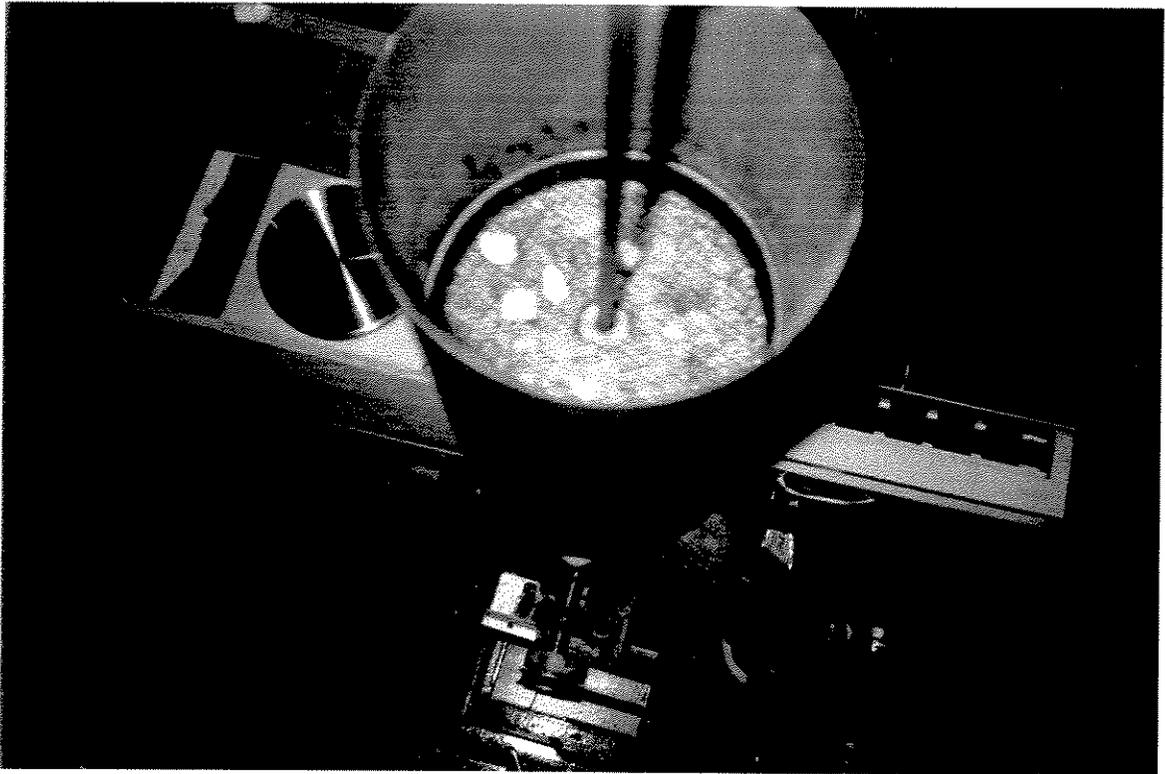


Figura 4.3 – Foto dos Secadores de LVF e de Bandejas

A câmara de secagem do LVF consiste em uma seção cilíndrica construída de chapa de ferro (diâmetro interno de 18.5 cm e altura de 50 cm) com um cone interno (diâmetro de 17 cm e altura de 25 cm), aberta na extremidade superior.

A câmara é unida ao corpo do secador por uma flange e uma união que permitem perfeito encaixe. O sistema de aquecimento é constituído por um jogo de 10 resistências de 400 W cada uma. Todo o sistema é protegido por disjuntores de 20A. As resistências podem ser ligadas em conjunto ou separadamente em 220 V, e estão dispostas da seguinte maneira:

- ✓ 1 resistência separada
- ✓ 2 resistências em paralelo, ligadas ao Variac marca AUJE.
- ✓ 3 resistências em paralelo
- ✓ 4 resistências em paralelo

A câmara de secagem do Secador de Bandejas consiste em uma seção cilíndrica construída de chapa de ferro (diâmetro interno de 18 cm e altura de 50 cm), com dois cones internos (diâmetro de 15 cm e alturas de 27 cm e 45 cm), aberta na extremidade superior e com duas portas laterais para a retirada das bandejas. Uma tubulação de PVC é acoplada na parte superior para direcionar a saída do ar quente.

As bandejas são feitas de tela de aço inoxidável com malha retangular de 5x3 mm de abertura e são sustentadas no secador pelos cones internos, garantindo, assim, a passagem de ar exclusivamente através do leito.

O dispositivo utilizado para a movimentação do ar é um ventilador centrífugo, ligado a um motor de indução trifásico de marca Eberle, modelo S112 M2/MA, com uma potência de 7,5 cv ; vazão máxima de 0,9 m³/min e rotação de 3460 rpm.

A velocidade do ar é medida, manualmente, na saída da câmara de secagem por um anemômetro marca Velocicheck – Air Velocity Meter – TSI Incorporated, modelo 8330; e corrigida pela equação:

$$v_{\text{atual}} = v_{\text{padrão}} \left(\frac{273 + T}{273 + 21,2} \right) \frac{101,4}{P} \quad (4.1)$$

onde: T = temperatura atual, °C

P = pressão real, kPa

A leitura da temperatura do ar é realizada por um registrador de temperatura da marca ROBERTSHAW, modelo T4WM, no qual estão conectados 5 termopares tipo T (cobre-constantan), colocados no centro da câmara de secagem e na parte superior.

A bandeja vibratória do LVF é feita de alumínio coberta com teflon, com 17,5 cm de diâmetro interno, com furos de 0,5 cm de diâmetro interno dispostos quadrangularmente numa distância entre centros de 0,8 cm.

O sistema de vibração é do tipo camo, com possibilidade de variação de frequência e amplitude. O equipamento é o mesmo já utilizado por FINZER (1989) e SOUZA (1997) e é mostrado na Figura 4.4.

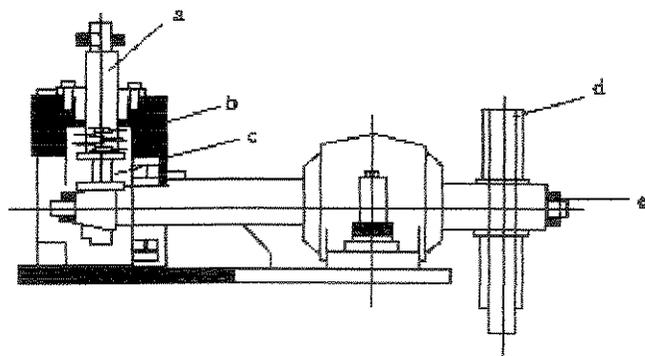


Figura 4.4 – Esquema do sistema de vibração

A frequência do mecanismo de vibração é medida em Hertz, através de um frequencímetro digital, marca ANALOG – série F8 100 A.

Foram feitas medidas de frequência utilizando a escala do variador eletrônico de 0 a 10, e obteve-se os seguintes dados:

Tabela 4.4 – Valores de frequência de acordo com a posição no variador eletrônico

Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f (Hz)	0.8	2.4	5.3	7.3	9.8	13.3	16.2	19.3	20.9	21.0

4.5. ANÁLISES QUÍMICAS

4.5.1. SÓLIDOS SOLÚVEIS (°BRIX)

A percentagem de sólidos solúveis presentes na banana *in natura* foi determinada pelo método da refratometria. O refratômetro utilizado foi da marca ATAGO, modelo Palette PR-101, com aferição de temperatura automática.

Algumas fatias de banana foram pesadas, amassadas em uma placa de Petri e diluídas numa mesma massa de água destilada. Uma parte dessa emulsão foi colocada no prisma do refratômetro. O resultado foi multiplicado por um fator para corrigir a diluição feita para facilitar a leitura. A análise foi feita em triplicata, para cada amostra preparada para o processamento, e registrou-se a média aritmética das leituras.

4.5.2. TEOR DE UMIDADE

O método consistiu em pesar aproximadamente 3 gramas de amostra em pesa-filtros, previamente tarados, e levar os pesa-filtros com amostra à estufa sem circulação de ar marca FANEM, modelo 315 SE, por 72 horas, na temperatura de 60°C. As análises foram feitas em triplicata e o resultado é a média aritmética dos mesmos.

4.6. CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO

4.6.1. DENSIDADE REAL

A densidade real foi determinada pela aplicação do método de deslocamento de fluidos em picnômetro com capacidade de 25 ml (diâmetro do bocal 1,45 cm), previamente calibrado com água destilada à 25°C.

Para a medida da densidade real da banana desidratada, foi usado Tolueno P.A. , por apresentar pouca tendência em penetrar no sólido, baixa tensão superficial, alto ponto de ebulição ($110,6 \pm 1^\circ\text{C}$), gravidade específica e viscosidade constantes quando exposto à atmosfera e por não agir como solvente dos constituintes do produto.

As análises foram feitas em triplicata e o resultado foi a média aritmética dos dados. A densidade real do produto foi calculada pela fórmula:

$$\rho = \frac{m_s}{V_s} \quad (4.2)$$

onde: ρ = densidade real, g/cm^3

m_s = massa do sólido, g

V_s = volume do sólido, cm^3

O volume da banana seca foi calculado pela diferença entre o volume calibrado do picnômetro e o volume de tolueno necessário para completar o volume do picnômetro contendo a amostra, sabendo que a densidade real do tolueno é $0,866 \text{ g/cm}^3$ a 25°C .

4.6.2. REIDRATAÇÃO (ABSORÇÃO DE ÁGUA)

A taxa de reidratação da banana desidratada foi obtida pelo método descrito por RANGANNA (1978). O método consiste na imersão do produto em água em ebulição por 10, 20 e 30 minutos; seguido de filtração à vácuo e pesagem da amostra reidratada. O volume de água absorvida durante a reidratação indica a força da resistência da estrutura celular durante a desidratação, o que evita o colapso. Os poros auxiliam a migração de água para o interior das fatias, aumentando sua absorção durante a reidratação.

A percentagem de água no material reidratado é determinada pela equação (4.3):

$$\% \text{água} = \frac{a - s}{a} \cdot 100 \quad (4.3)$$

onde: a é o peso drenado da amostra reidratada, g

s é o teor de matéria seca na amostra desidratada (massa de amostra desidratada – massa de água da amostra desidratada)

4.6.3. COR

A determinação de cor foi feita a partir do método proposto por BREKKE & ALLEN (1966). O método se baseia na extração por metanol e na leitura da absorbância a $440\text{m}\mu$ da solução corante em espectrofotômetro; usando como referência uma solução de metanol a 50%. O espectrofotômetro usado foi da marca HITACHI, modelo U2000.

As análises foram feitas em triplicata e os resultados expressos pela média aritmética dos valores, em valor de cor (absorbância/g) em base úmida.

4.7. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O desenvolvimento experimental pode ser visualizado pelo fluxograma apresentado na Figura 4.5, e detalhado a seguir.

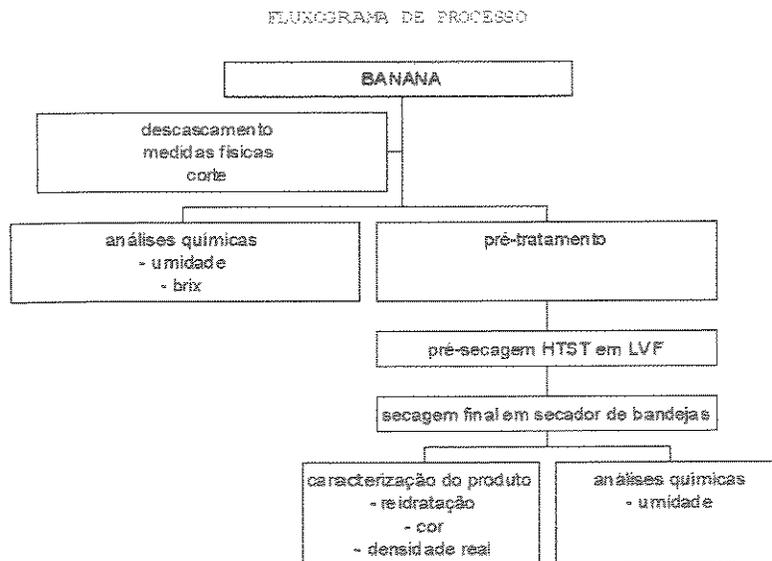


Figura 4.5 – Fluxograma do Processo

As amostras de banana foram descascadas manualmente e as medidas físicas (comprimento e diâmetro) foram obtidas utilizando-se um paquímetro. Em seguida, as amostras foram cortadas em fatias de 1 cm de espessura e seccionadas em 4 partes iguais.

Uma parte da amostra foi reservada para as análises químicas e a outra parte ($\pm 100\text{g}$) foi pré-tratada e levada à secagem.

Após a pré-secagem a altas temperaturas por curto tempo em Leito Vibro-fluidizado, o material foi transferido para o secador de bandejas para secagem final até alcançar um valor de umidade próximo da umidade de equilíbrio. Ao final do processo de secagem, o produto foi submetido às análises químicas e de caracterização.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para estabelecer as soluções do pré-tratamento que poderiam influir positivamente na qualidade do produto final e definir o estado de maturação ideal e as condições de operação para o processamento, foram realizados vários ensaios preliminares e subsequentes avaliações do produto obtido. O resultado está apresentado na Seção 5.1.

Utilizando soluções com os polímeros escolhidos nos ensaios preliminares, realizou-se uma série de ensaios de secagem, complementados com a análise de densidade real, taxas de reidratação e cor do produto obtido. Esses resultados estão apresentados e discutidos na Seção 5.2.

Na Seção 5.3 apresenta-se uma modelagem matemática das cinéticas de secagem.

5.1. ENSAIOS PRELIMINARES

5.1.1. ESTADO DE MATURAÇÃO

Para a definição do estado de maturação ideal para o processamento, foram realizados ensaios com fatias de banana-prata cujos teores de sólidos solúveis variaram de 9 a 18°Brix. Foi observado que as fatias com maior teor de amido (menor teor de sólidos solúveis) apresentaram melhores condições de operação e produtos finais com maior qualidade em termos de aparência e maior expansão.

As fatias de banana-prata mais maduras (que apresentam teor de sólidos solúveis acima de 10°Brix) se comportaram como um sólido termoplástico durante a secagem HTST em LVF, amolecendo, perdendo a forma e aderindo às superfícies do secador, impossibilitando assim a transferência das mesmas ao Secador de Bandejas, para a realização da secagem final.

Portanto, foi adotado como padrão, amostras com $10^{\circ} \pm 1,0^{\circ}$ Brix, pois o sabor adstringente se tornava muito acentuado e a dificuldade para descascar aumentava para teores de sólidos solúveis menores que esse valor, fato que interferia na qualidade sensorial do produto final.

5.1.2. TEMPERATURA DE SECAGEM

A menor temperatura de secagem foi adotada como sendo 130°C , a mesma utilizada por LUCAS (1996).

Para avaliar o limite superior de temperatura foram feitos testes em temperaturas de 150°C , 165°C e 180°C . Verificou-se que a partir de 150°C , os danos à aparência (cor e textura) do produto final eram muito grandes mesmo com curto tempo de secagem. Então, adotou-se 150°C como sendo a maior temperatura de secagem.

5.1.3. VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM

A velocidade do ar de secagem foi determinada a partir das limitações do sistema de aquecimento em cada temperatura de trabalho.

Para a temperatura de 150°C , a maior velocidade do ar de secagem alcançada foi de 2,0 m/s. Portanto, este valor foi adotado como o limite máximo, para todos os ensaios.

A menor velocidade de trabalho do ar de secagem foi adotada como sendo a metade do valor da maior velocidade, portanto, 1,0 m/s.

5.1.4. TEMPO DE SECAGEM HTST EM LVF

Para cada temperatura do ar de secagem, estabeleceu-se, com base em avaliações visuais do produto, um determinado tempo de secagem HTST em LVF, baseado no momento em que se intensifica a formação de coloração marrom na superfície das fatias.

Para a temperatura de 150°C, o tempo limite de secagem adotado foi de 8 minutos; e para a temperatura de 130°C, 13 minutos.

5.1.5. FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO

A frequência de vibração adotada foi de 10,1 Hz. Este valor foi definido com base em princípios de ressonância (valores acima de 12 Hz provocavam ressonância na bandeja vibratória) e em testes experimentais pois para valores de frequência menores que 10,0 Hz não era possível obter agitação das fatias de banana.

5.1.6. PRÉ-TRATAMENTO

A aplicação de pré-tratamento tem como objetivo fortalecer a estrutura celular através da infiltração de solutos nos espaços inter e intracelulares, e também dentro das paredes das células, prevenindo o colapso total durante a desidratação.

Como as amostras já apresentavam uma estrutura celular forte, devido ao alto teor de amido (baixo teor de sólidos solúveis), foi aplicado um pré-tratamento que consistia na imersão do produto em soluções de polímeros com o propósito de ajudar na formação de uma casca externa, colaborando para a expansão do produto.

Baseado em informações da literatura e, na conclusão de LUCAS (1996), os tipos de pré-tratamento pesquisados foram os apresentados na Tabela 4.1 do Capítulo 4 – Materiais e Métodos.

Os resultados preliminares indicaram que as soluções de pré-tratamento com maior potencial para melhorar a qualidade do produto obtido são:

- (a) PEG (P.M. 1000 g/mol) 2% + Metabissulfito de sódio 0,5% - 30 minutos
- (b) Amido (polvilho azedo) 2% + Metabissulfito de sódio 0,5% - 30 minutos
- (c) Amido (polvilho doce) 2% + Metabissulfito de sódio 0,5% - 30 minutos

A escolha desses pré-tratamentos foi baseada nas características visuais do produto final (aparência, cor e extensão da expansão) obtido a partir das pesquisas preliminares. Os produtos pré-tratados com ácido ascórbico e EDTA amoleceram muito durante a pré secagem HTST em LVF, formando uma pasta aderida sobre a superfície da bandeja vibratória. Para minimizar este efeito de aglomeração, tentou-se variar a concentração das soluções e o tempo de imersão mas não se obteve resultados satisfatórios. Os produtos pré-tratados com ácido cítrico, glucose e sacarose apresentaram uma aparência enrugada, muito dura, e uma coloração caramelizada, escura. O pré-tratamento com metabissulfito de potássio, provocou a formação de um produto claro, murcho, duro e sem forma. Observou-se, durante a secagem, que houve perda de massa das fatias de banana, o que pode ter provocado a perda da forma.

5.2. ENSAIOS COMPLETOS

Foram feitos ensaios visando quantificar o efeito da temperatura e da velocidade do ar, frequência de vibração e tipo de pré-tratamento na cinética de secagem e sobre fatores de qualidade do produto obtido.

Observou-se uma expansão do produto durante a secagem HTST, mas em praticamente todos os ensaios, no momento da transferência do material para o Secador de Bandejas, houve um colapso no volume expandido. Após duas horas de secagem no Secador de Bandejas, um pequeno escurecimento do produto era perceptível.

As fotografias nas Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 permitem um acompanhamento das transformações físicas sofridas pela banana durante a secagem HTST.

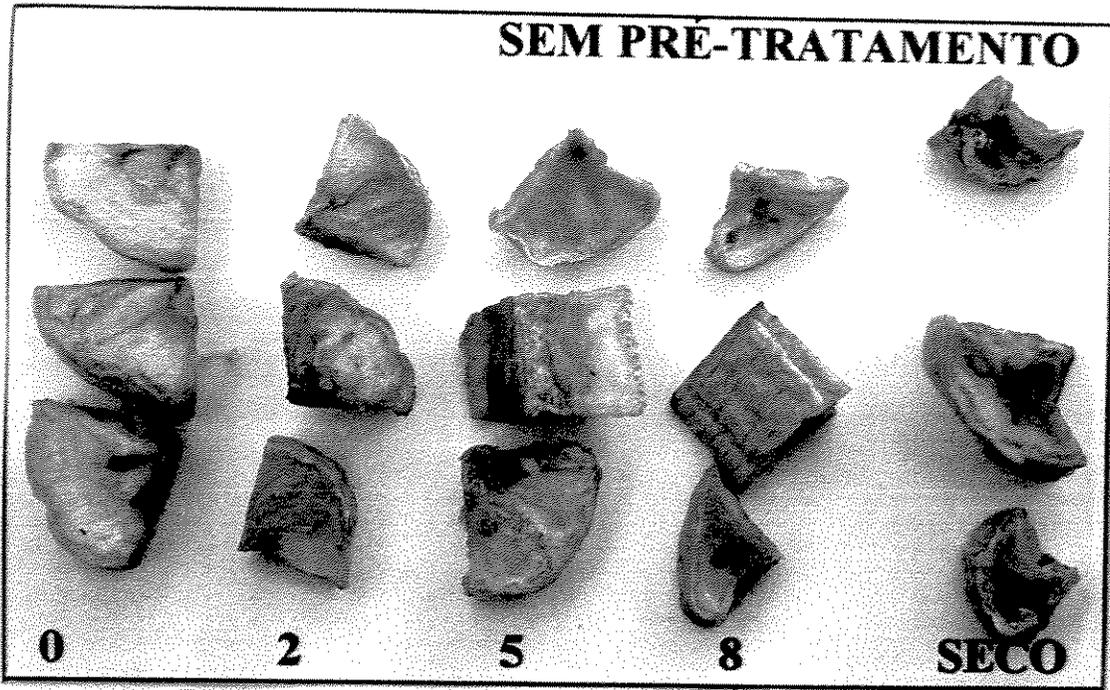


Figura 5.1 – Fatias de banana sem pré-tratamento submetidas à secagem HTST à 150°C com ar à velocidade de 2,0 m/s.

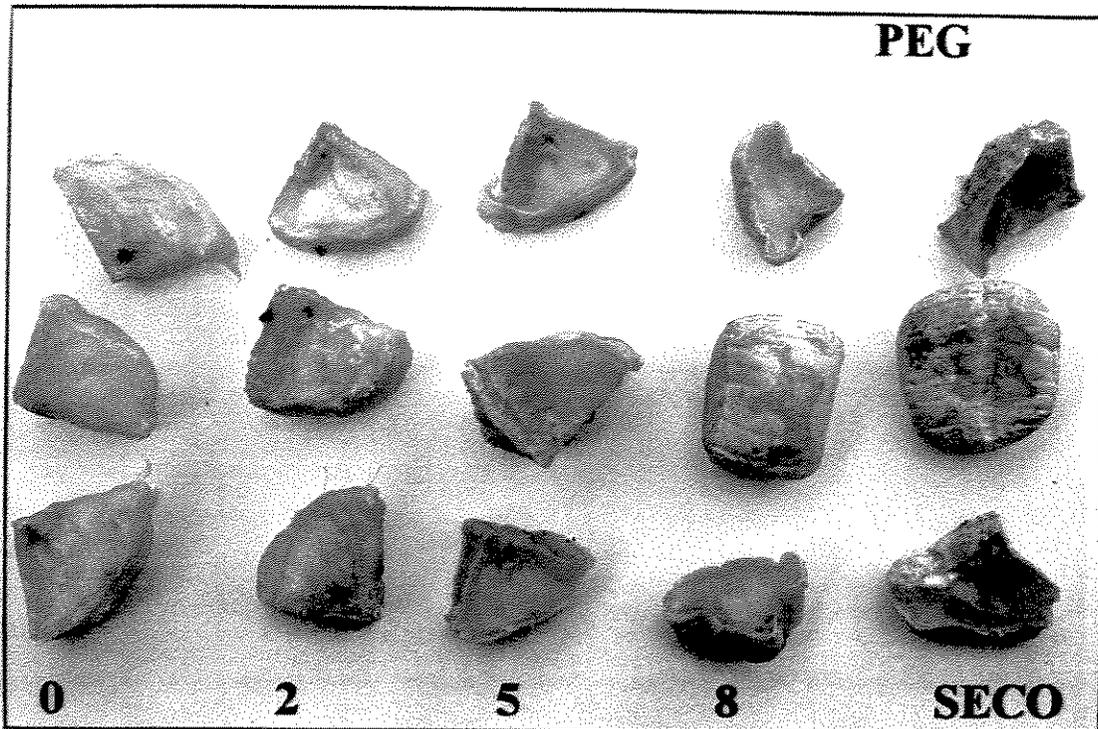


Figura 5.2 – Fatias de banana pré-tratadas com PEG – 1000, submetidas à secagem HTST à 150°C com ar à velocidade de 2,0 m/s.

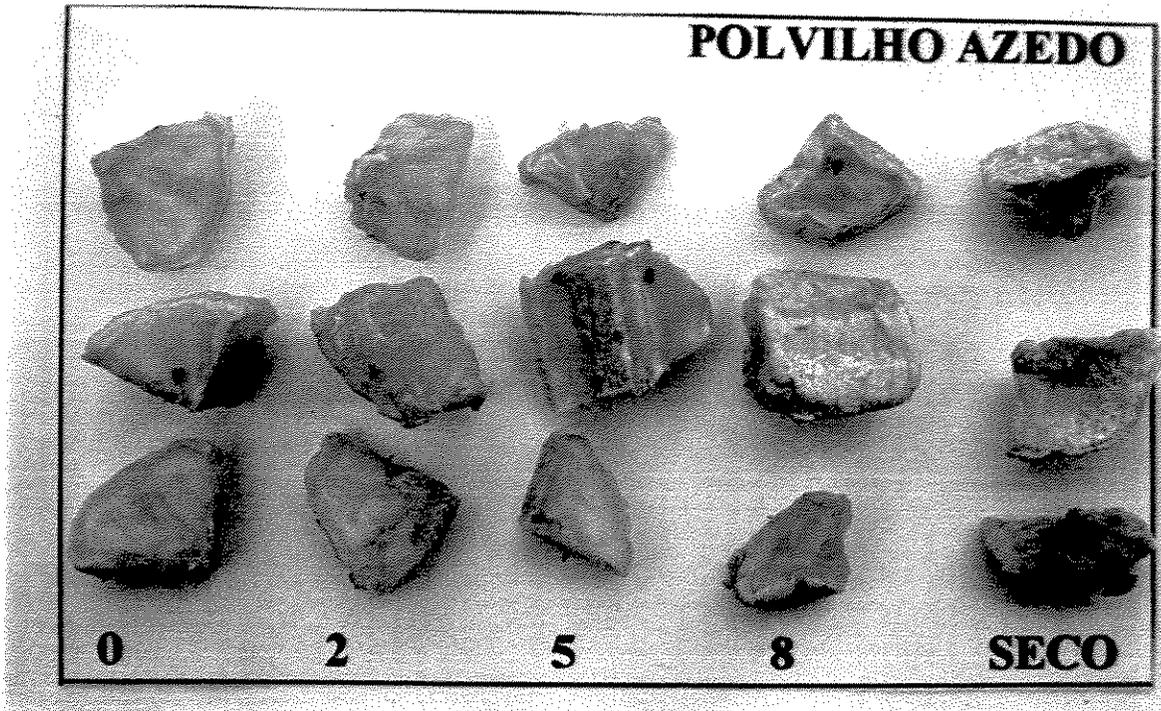


Figura 5.3 – Fatias de banana pré-tratadas com Polvilho azedo, submetidas à secagem HTST à 150°C com ar à velocidade de 2,0 m/s.

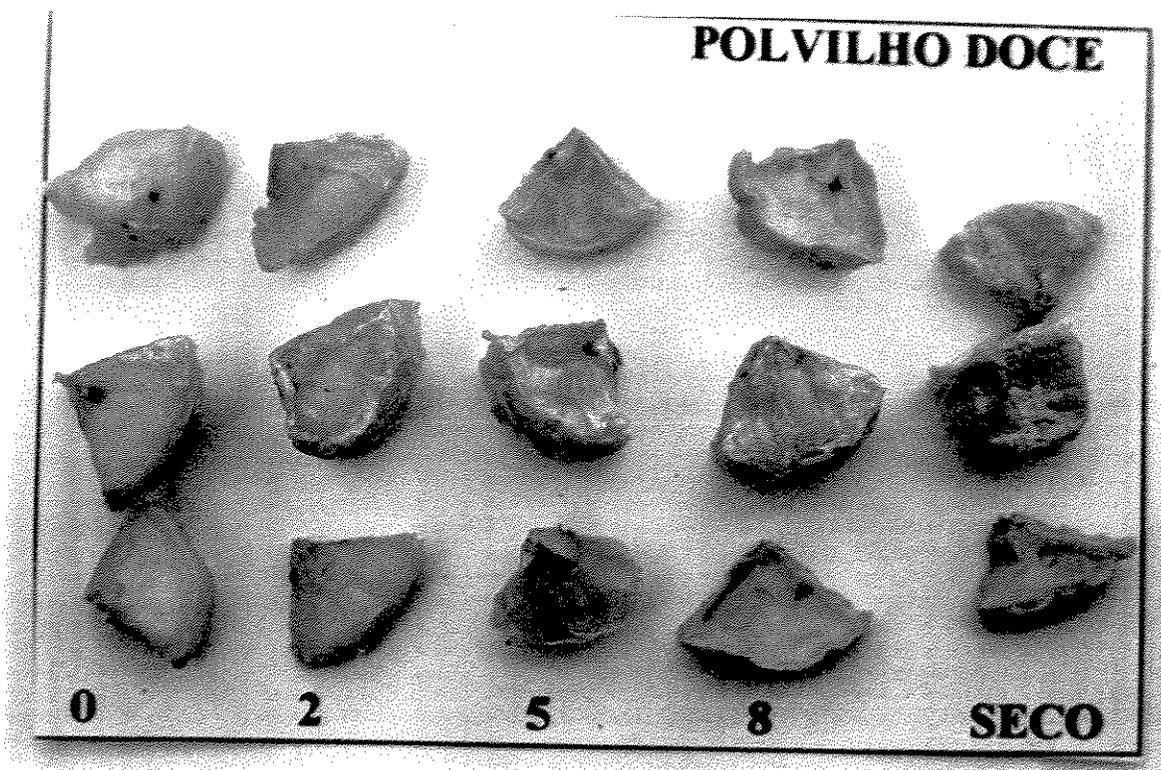


Figura 5.4 – Fatias de banana pré-tratadas com Polvilho doce, submetidas à secagem HTST à 150°C com ar à velocidade de 2,0 m/s.

Comparando-se as Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, é possível observar que o pré-tratamento com PEG – 1000 provoca uma maior expansão do produto.

A Figura 5.1 mostra claramente o escurecimento das amostras sem pré-tratamento submetidas à secagem HTST.

Na Figura 5.2, observa-se que o produto final apresenta uma forma arredondada, expandida e clara, semelhante ao produto obtido por LUCAS (1996).

Nas Figuras 5.3 e 5.4 pode-se verificar uma camada de pó branco depositada sobre a superfície de fatias pré-tratadas com amido (polvilho azedo ou doce). Essa deposição pode ter sido provocada pelo fato da banana em estudo já apresentar um alto teor de amido (baixo teor de sólidos solúveis).

5.2.1. EFEITO SOBRE A CINÉTICA DE SECAGEM HTST

O levantamento de dados para a construção das curvas de cinética de secagem foi feita em uma série de ensaios em batelada, com tempos de operação diferentes. Esta foi a forma mais conveniente encontrada, pois a retirada da bandeja vibratória contendo as amostras, se mostrou inviável devido à necessidade de rapidez das pesagens.

Amostras de aproximadamente 10g de uma mesma fruta, foram submetidas à secagem HTST em LVF por 2, 5 e 8 minutos para a temperatura de 150°C, e 4, 8 e 13 minutos para 130°C.

Temperatura e Velocidade do Ar

A Figura 5.5 apresenta curvas de perda de umidade de fatias de banana sem nenhum pré-tratamento, na secagem sem vibração, com temperaturas do ar de 130 e de 150°C. Constatou-se uma relação quase linear entre perda de umidade e tempo. As curvas obtidas para outras condições de operação estão no Apêndice A.

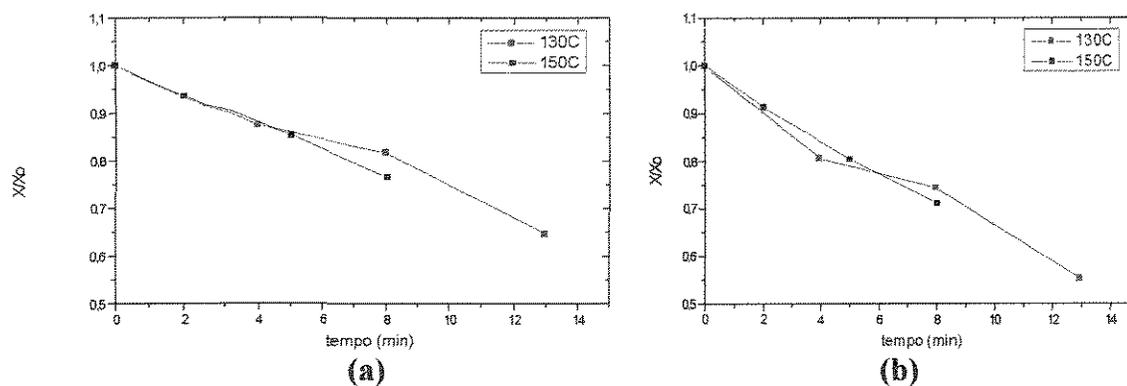


Figura 5.5 – Efeito da temperatura na cinética de secagem em leito sem vibração de banana (10°Brix) sem pré-tratamento submetidas às condições: (a) $v = 1,0$ m/s; (b) $v = 2,0$ m/s.

A pouca variação na taxa de secagem com a temperatura de operação pode ser atribuída à rápida formação de uma película seca na superfície (casca endurecida) que vai controlar a difusão de umidade.

Essas tendências entretanto, não foram observadas nos ensaios de secagem de banana realizados por LUCAS (1996). Usando banana mais madura, LUCAS (1996) observou um efeito mais definido de temperatura na secagem e obteve taxas de secagem muito mais altas, usando velocidade de ar maiores, que garantiram a fluidização do material. É pertinente observar também, que LUCAS (1996) pesou apenas as bananas (e não o conjunto bandeja e banana, como aqui) e para cada ponto da curva ele também reiniciou a secagem com novo produto.

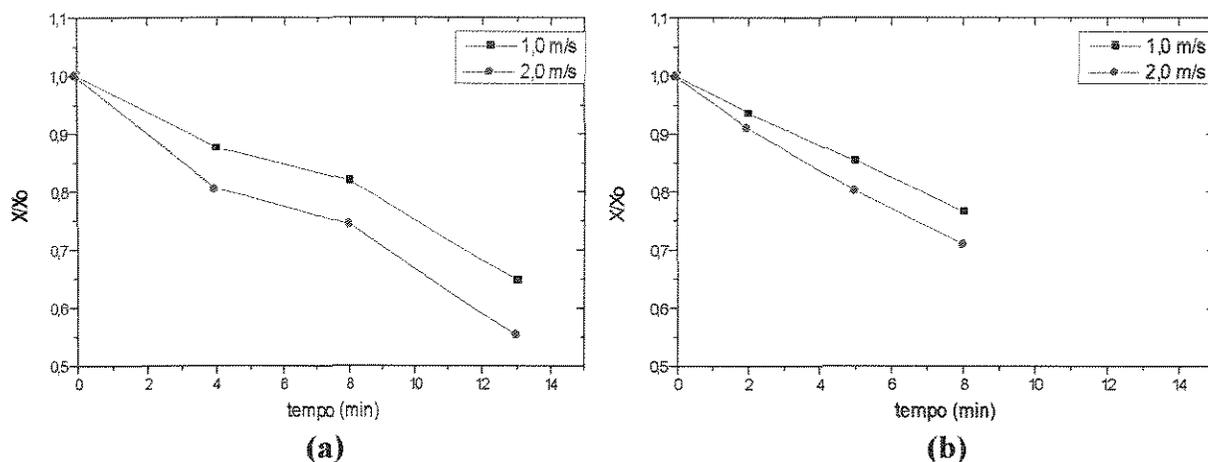


Figura 5.6 – Efeito da velocidade do ar na cinética de secagem em leito estático de banana (10°Brix) sem pré-tratamento submetidas às condições: (a) T = 130°C; (b) T = 150°C

Para uma comparação mais direta do efeito de velocidade do ar sobre a cinética de secagem de banana sem pré-tratamento, as curvas da Figura 5.5 foram repetidas na Figura 5.6. Observa-se nitidamente que a velocidade do ar tem um efeito bem definido sobre a cinética de secagem e explica porque LUCAS (1996) que usou velocidade de 10 m/s obteve taxas de secagens mais altas.

Pré-tratamento

O efeito da velocidade do ar pode ser também constatado na secagem de produtos pré-tratados. A Figura 5.7 agrupa os dados levantados na secagem com ar a 150°C. As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam as variações de umidade na secagem de fatias de banana pré-tratadas com PEG (P.M. 1000 g/mol), Polvilho azedo e Polvilho doce, assim como os pontos obtidos para banana sem pré-tratamento para duas temperaturas do ar, mantendo-se a velocidade do ar constante. Observa-se que os ensaios com o ar a 2 m/s tendem a ficar abaixo dos valores obtidos com ar a 1 m/s, mas que, de um modo geral, o pré-tratamento diminui a extensão desse efeito, aproximando os pontos experimentais.

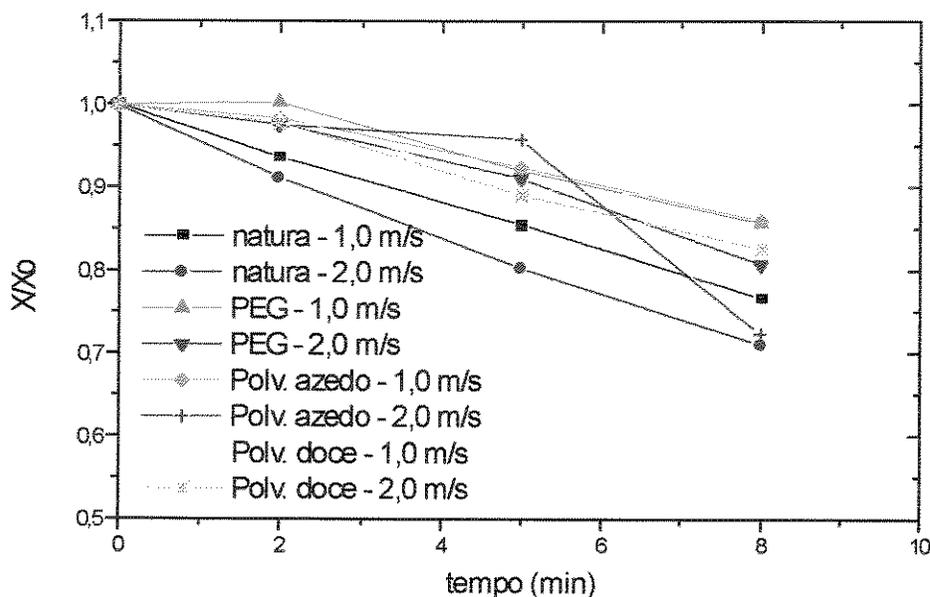


Figura 5.7 – Efeito da velocidade do ar na cinética de secagem em leito sem vibração de banana (10°Brix) pré-tratadas, submetidas à secagem à temperatura de 150°C.

A dispersão dos pontos vermelhos e pretos nas figuras não permite visualizar uma tendência definida, mas pode-se concluir que variações de temperatura de 130 a 150°C não afetam a cinética de secagem. Por outro lado, os dados nessas figuras, assim como na Figura 5.7, indicam que o pré-tratamento tem um efeito adverso sob a taxa de secagem, isto é, produtos pré-tratados têm uma taxa de secagem menor do que a da banana sem pré-tratamento. Esse fato é um indício em favor da formação de uma camada rígida na superfície, que ajudará na formação de uma estrutura rígida, expansível, mas que, em compensação, aumenta a resistência à migração de água para a superfície.

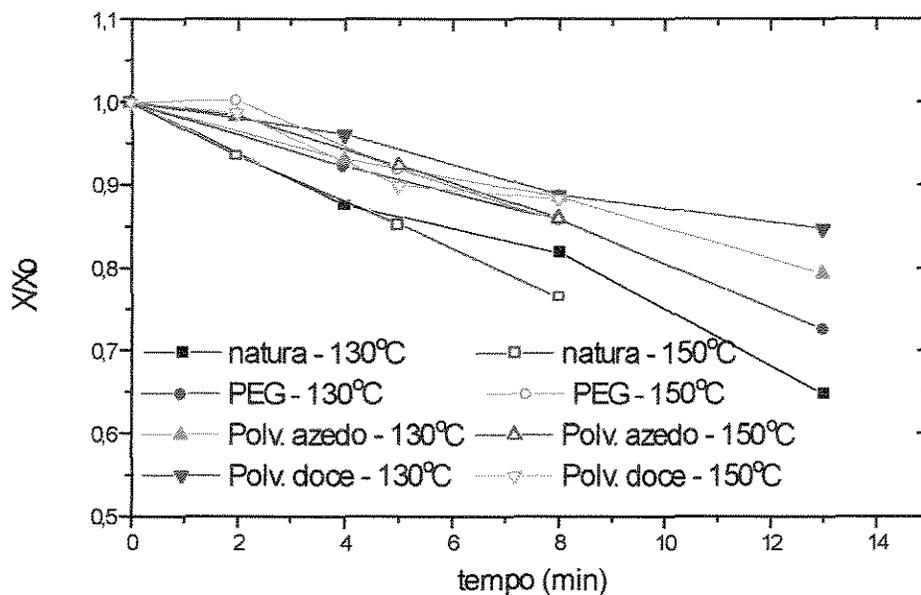


Figura 5.8 – Efeito da temperatura na cinética de secagem em leito sem vibração de banana (10°Brix) com ar a velocidade de $v = 1,0$ m/s

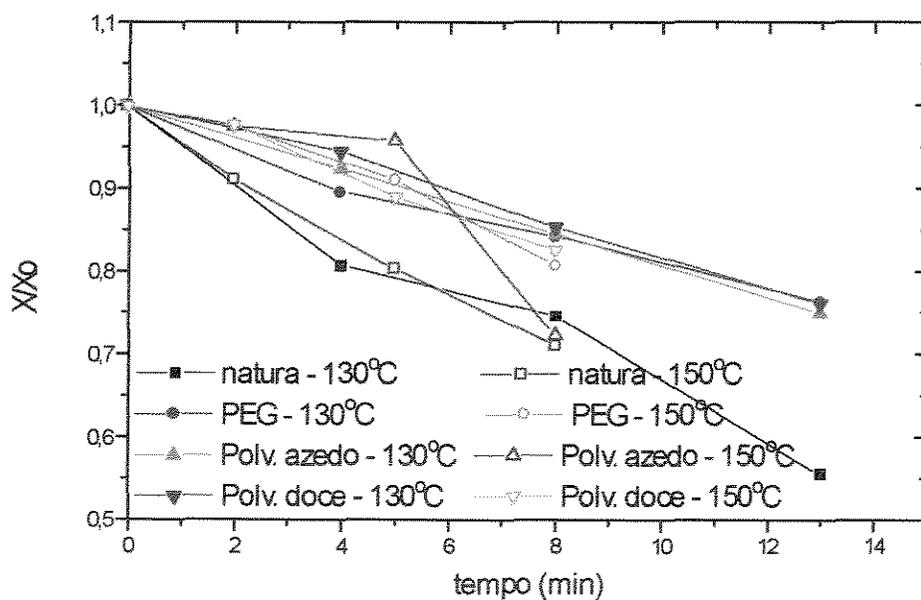


Figura 5.9 – Efeito da temperatura na cinética de secagem em leito sem vibração de banana (10°Brix) com ar a velocidade de $v = 2,0$ m/s

Vibração

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam curvas obtidas com dados de secagem HTST, usando vibração para banana sem pré-tratamento à temperatura de 130 e 150°C, respectivamente.

Observa-se que a vibração mantém a linearidade no comportamento da secagem e que, novamente, não existem tendências bem definidas, com um grau de dispersão que pode ser atribuído a variações na matéria-prima.

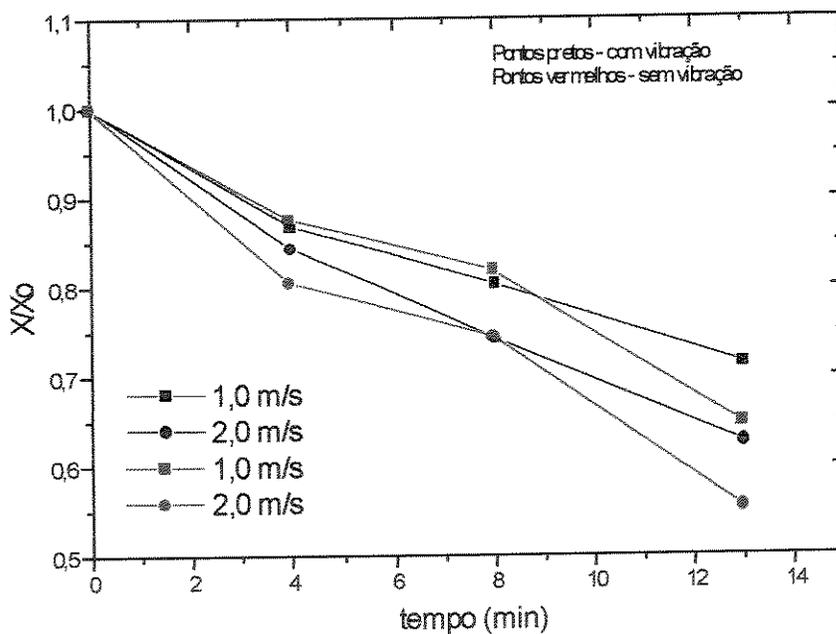


Figura 5.10 – Efeito da vibração na secagem de banana (10°Brix) sem pré-tratamento submetida à temperatura de 130°C

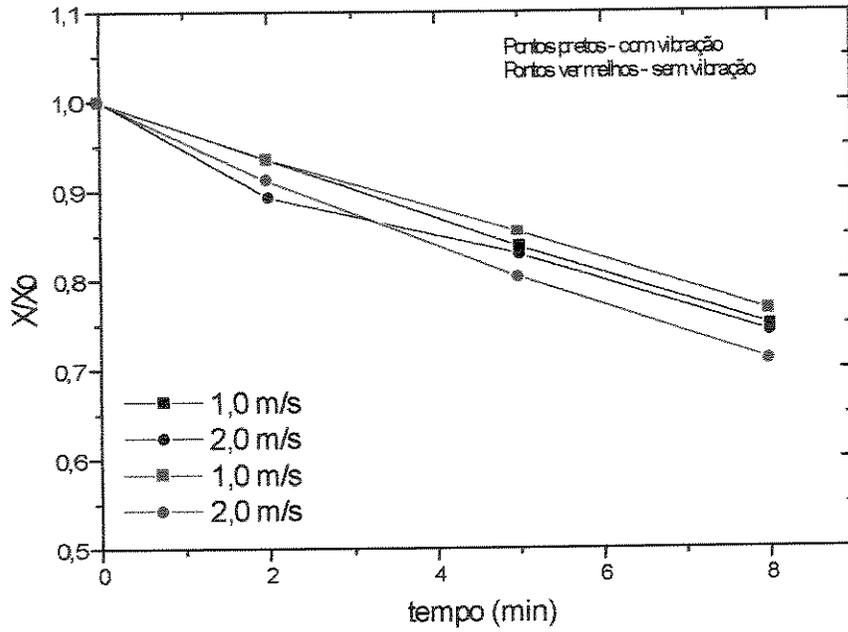


Figura 5.11– Efeito da vibração na secagem de banana (10°Brix) sem pré-tratamento submetida à temperatura de 150°C

As Figuras 5.12 a 5.15 apresentam os resultados obtidos com vibração e pré-tratamentos. Observa-se novamente que os produtos sem pré-tratamento secam mais rapidamente do que os pré-tratados e que em nenhum dos casos pode-se afirmar que a vibração auxilia a taxa de secagem.

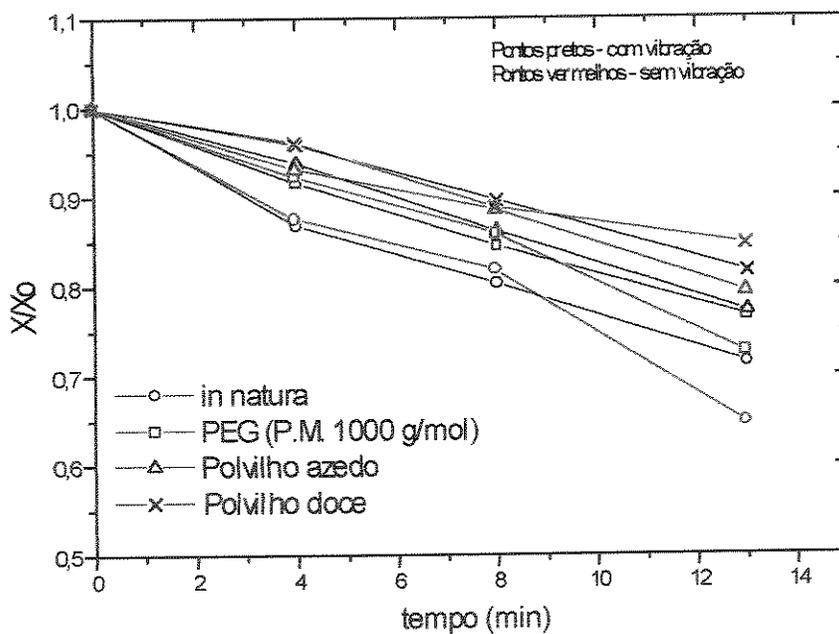


Figura 5.12 – Efeito da vibração na secagem de fatias de banana (10°Brix) a 130°C e velocidade do ar de 1,0 m/s

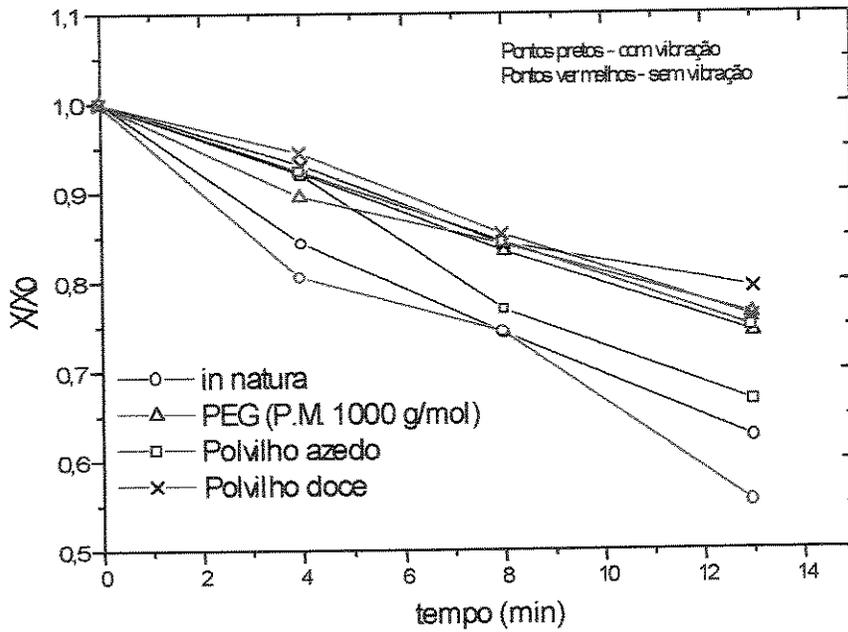


Figura 5.13 – Efeito da vibração na secagem de fatias de banana (10°Brix) a 130°C e velocidade do ar de 2,0 m/s

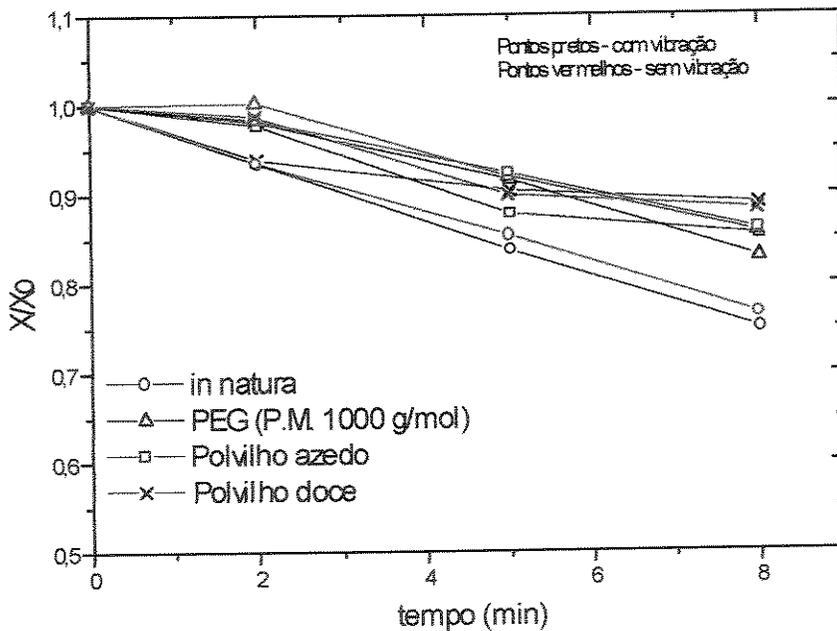


Figura 5.14 – Efeito da vibração na secagem de fatias de banana (10°Brix) a 150°C e velocidade do ar de 1,0 m/s

Essas avaliações qualitativas foram confirmadas comparando-se os parâmetros de modelo linear de secagem, conforme apresentado na Secção 5.3.

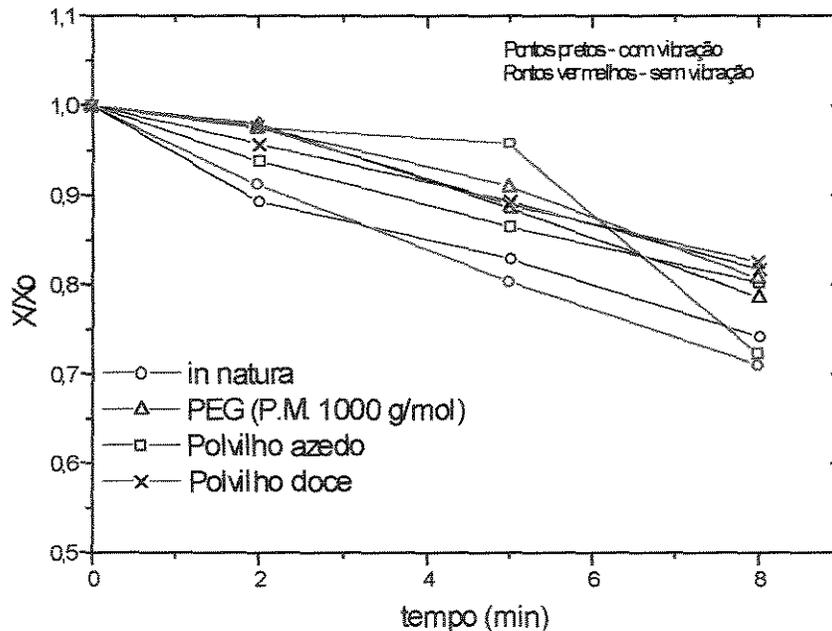


Figura 5.15– Efeito da vibração na secagem de fatias de banana (10°Brix) a 150°C e velocidade do ar de 2,0 m/s

5.2.2. EFEITO SOBRE A CINÉTICA DE SECAGEM DO 2º ESTÁGIO

A cinética da secagem no Secador de Bandejas pode ser acompanhada com maior precisão e facilidade. As bandejas foram pesadas periodicamente e a diferença de peso permitiu construir curvas com o formato exponencial típico, conforme a Figura 5.16 (banana sem pré-tratamento) e a Figura 5.17 (bananas pré-tratadas com PEG – 1000).

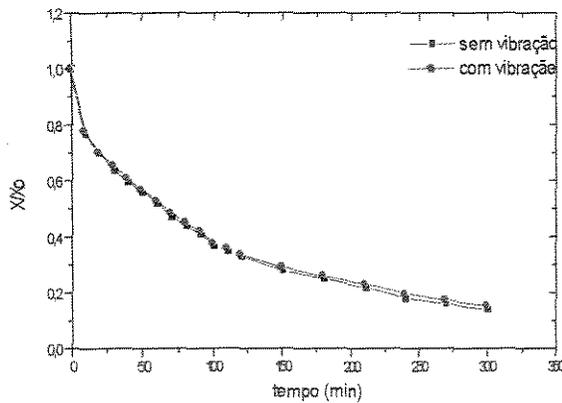
A Tabela 5.1 apresenta os valores de umidade determinadas nos produtos após a secagem HTST e após a secagem final.

Uma comparação entre as curvas das Figuras 5.16 e 5.17 indicam que, ao contrário do que aconteceu na secagem HTST, no 2º estágio os produtos pré-tratados secaram mais

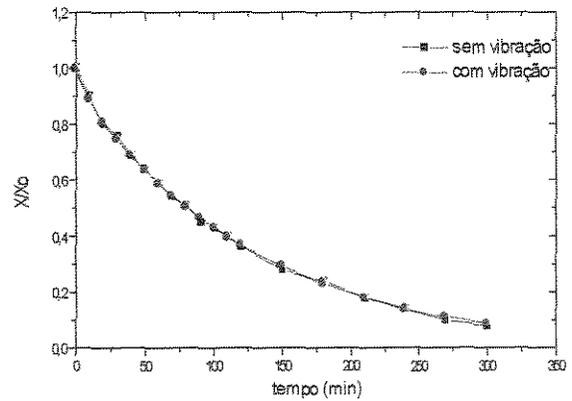
rapidamente do que a banana sem pré-tratamento. As condições de secagem em HTST entretanto, parecem não influenciar a cinética de secagem no 2º estágio.

Tabela 5.1 – Valores do teor de umidade (base úmida) de fatias de banana-prata (10ºBrix) desidratadas

T (°C)	V _{ar} (m/s)	f (Hz)	Sem pré-tratamento		PEG		Amido (polvilho azedo)		Amido (polvilho doce)	
			W _{bu(LVF)} (%)	W _{bu} (%)						
130	1,0	0,0	49,77	6,62	57,40	5,43	46,77	7,13	46,65	7,13
150	1,0	0,0	47,01	7,09	48,87	6,60	46,81	7,25	46,27	7,66
130	2,0	0,0	50,25	9,06	58,33	8,74	47,04	10,03	46,99	10,01
150	2,0	0,0	43,30	8,04	49,38	7,81	39,76	9,21	39,67	9,18
130	1,0	10,1	45,65	8,91	52,08	5,91	38,43	9,10	48,37	9,03
150	1,0	10,1	38,93	5,74	42,13	4,21	33,55	6,53	34,03	6,22
130	2,0	10,1	47,01	9,38	46,60	10,40	47,77	8,69	47,80	8,86
150	2,0	10,1	37,67	8,13	38,72	9,83	38,94	7,88	38,82	7,99



(a)



(b)

Figura 5.16 – Efeito das variáveis de operação sobre a cinética de secagem do 2º estágio de fatias de banana (10ºBrix) sem pré-tratamento: (a)secagem HTST 130°C, 1,0 m/s; (b) secagem HTST 130°C, 2,0 m/s

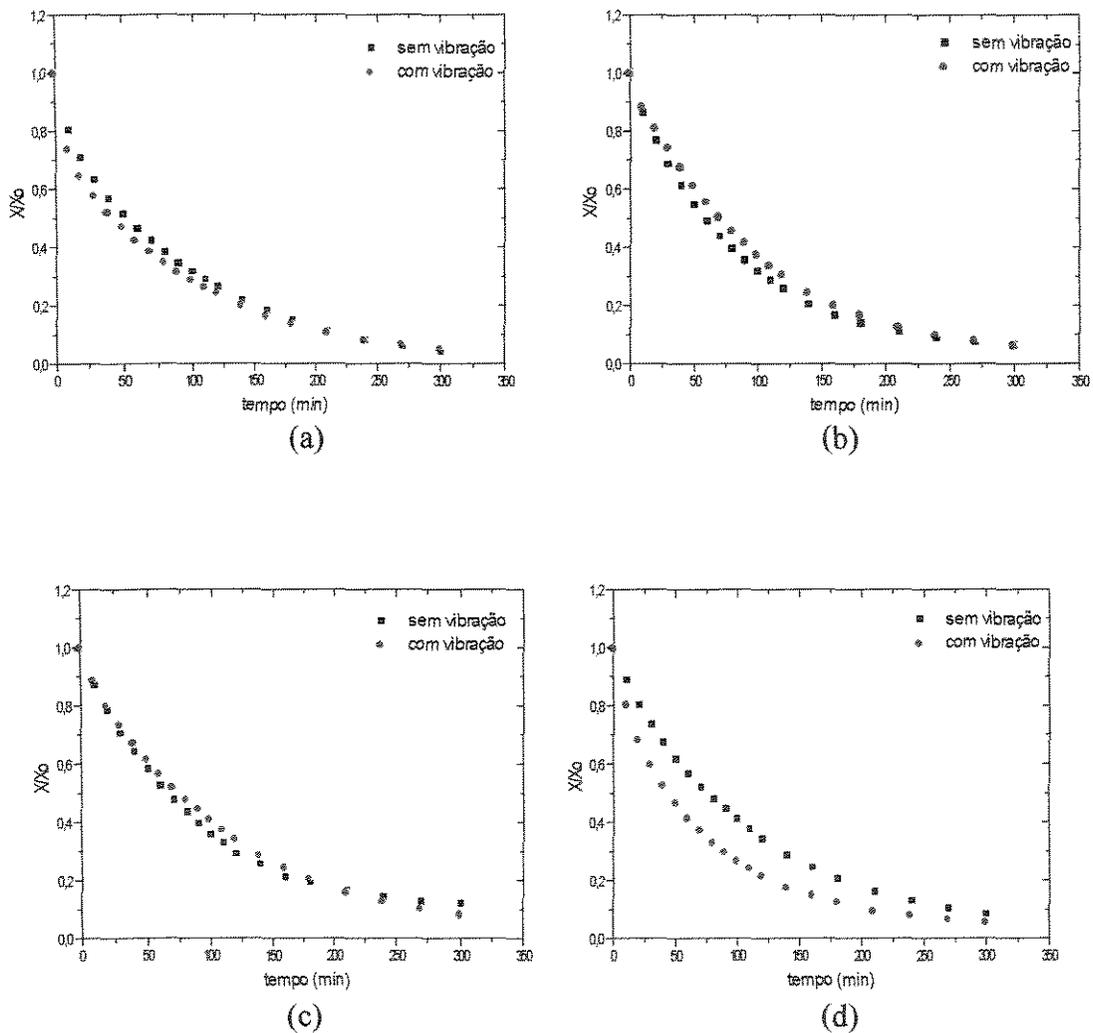


Figura 5.17 – Efeito das variáveis de operação sobre a cinética de secagem do 2º estágio de fatias de banana pré-tratadas com PEG - 1000: (a)secagem HTST 130⁰C, 1,0 m/s; (b)secagem HTST 150⁰C, 1,0 m/s; (c)secagem HTST 130⁰C, 2,0 m/s; (d)secagem HTST 150⁰C, 2,0 m/s

5.2.3. EFEITO SOBRE A DENSIDADE REAL

Foram realizados ensaios específicos para medir a densidade do produto obtido, que foi determinada com um picnômetro, após a secagem final (2º estágio). Os resultados para diferentes pré-tratamento, temperaturas, velocidades do ar e vibração estão lançados na Tabela 5.2. Para uma melhor visualização, eles estão reproduzidos em forma de blocos, na Figura 5.18.

Tabela 5.2 – Valores de densidade real de fatias de banana-prata (10°Brix) desidratadas

Temperatura de secagem (°C)	Velocidade do ar de secagem (m/s)	Frequência de vibração (Hz)	ρ (g/cm ³) sem pré-tratamento	ρ (g/cm ³) PEG	ρ (g/cm ³) Polvilho azedo	ρ (g/cm ³) Polvilho doce
130	1,0	0,0	0,7973	0,8073	0,7978	0,8050
150	1,0	0,0	0,6012	0,5997	0,6223	0,6524
130	2,0	0,0	1,0998	1,1346	1,2578	1,3203
150	2,0	0,0	0,8709	0,8714	0,9200	0,9198
130	1,0	10,1	0,7005	0,6919	0,7127	0,7415
150	1,0	10,1	0,3700	0,3691	0,5129	0,5177
130	2,0	10,1	0,6188	0,6019	0,3782	0,3673
150	2,0	10,1	0,3295	0,3281	0,3258	0,3347

Constata-se um considerável efeito das condições de operação, sobretudo a temperatura, sobre a densidade. É possível observar pela Tabela 5.2 e pela Figura 5.18, que as fatias de banana-prata submetidas à pré-secagem HTST em LVF à temperatura de 150°C apresentaram em todos os ensaios uma menor densidade real comparada com as fatias submetidas à pré-secagem à 130°C. A partir da Figura 5.18, pode-se concluir, conforme as expectativas, que durante a secagem à 150°C, houve maior formação de poros e expansão do volume das fatias de banana, o que provocou uma diminuição significativa na densidade real do produto final. Esse fato confirma o efeito *puffing* da secagem HTST, já constatado por LUCAS (1996), que, entretanto, achou densidades da ordem de 0,35 a 0,4 g/cm³, isto é, menores do que os aqui encontrados.

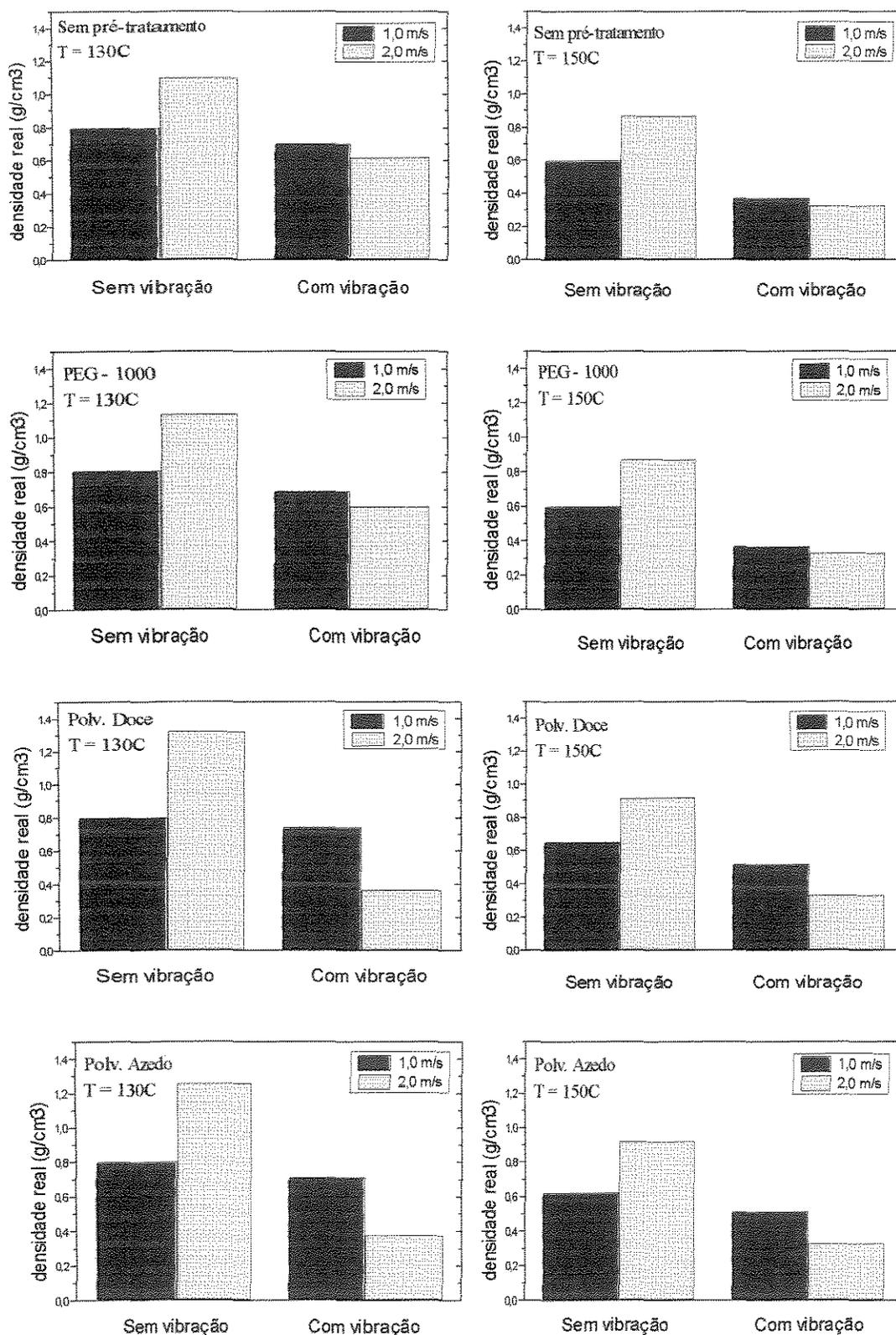


Figura 5.18 – Efeito das condições de operação na secagem HTST sobre a densidade real do produto final (2º estágio)

Os blocos da Figura 5.18 deixam evidente, que a velocidade do ar é a outra variável de operação que afeta muito a densidade do produto final. Esse fato pode explicar os melhores resultados encontrados por LUCAS (1996), que usou valores de velocidade de ordem de 10 m/s.

A conclusão mais positiva e importante deste estudo, é o efeito redutor da vibração sobre a densidade, conforme se constata pela Figura 5.18. Observa-se ainda que nos sistemas com vibração, o aumento de velocidade do ar induz a uma menor densidade. Essa tendência observada confirma que a agitação em um leito vibro-fluidizado é suave e que mesmo o maior número de choques provocados por uma maior agitação e movimentação das partículas no secador durante o estágio termoplástico de secagem não produz uma compactação na superfície do material com uma maior transferência de calor garante a expansão do produto.

A diminuição da densidade confirma a observação visual da extensão da expansão, que é maior para amostras submetidas à secagem em leito vibrado. De fato, quanto menor a densidade real, maior o volume, e portanto, maior a expansão. Por outro lado, em termos qualitativos, constatou-se que a cobertura de amido ou de polímero tiveram uma contribuição significativa na expansão do produto, uma vez que o mesmo se apresentava mais uniforme e expandido do que o produto oriundo de amostras sem pré-tratamento ou pré-tratadas com outras soluções.

5.2.4. EFEITO SOBRE A COR

A coloração do produto obtido foi analisada segundo a técnica descrita na Seção 4.6.3 e os resultados estão apresentados na Tabela 5.3 e na Figura 5.19.

A partir desses dados, verifica-se, conforme o esperado, que o aumento da temperatura de secagem provoca uma acentuação na coloração do produto final. Esta intensificação é maior para leito estático devido à aderência das fatias de banana na superfície quente da bandeja. A superfície da fatia em contato com a bandeja apresenta

uma coloração mais escura do que as outras superfícies da mesma fatia, caracterizando uma caramelização.

Tabela 5.3 - Valores de cor de fatias de banana-prata (10°Brix) desidratadas

Temperatura de secagem (°C)	Velocidade do ar de secagem (m/s)	Frequência de vibração (Hz)	Cor (abs/g) Natura	Cor (abs/g) PEG	Cor (abs/g) Polvilho azedo	Cor (abs/g) Polvilho doce
130	1,0	0,0	0,0593	0,0056	0,0505	0,0452
150	1,0	0,0	0,0999	0,0164	0,0991	0,0897
130	2,0	0,0	0,0500	0,0365	0,0398	0,0377
150	2,0	0,0	0,0819	0,0621	0,0573	0,0556
130	1,0	10,1	0,0309	0,0102	0,0253	0,0265
150	1,0	10,1	0,0376	0,0177	0,0312	0,0308
130	2,0	10,1	0,0428	0,0325	0,0200	0,0225
150	2,0	10,1	0,0401	0,0398	0,0291	0,0301

Uma outra conclusão geral, perceptível ao se examinar os blocos da Figura 5.19, é o efeito que a vibração tem, na redução do desenvolvimento da cor, pois em todos os ensaios, a cor do produto seco sob vibração foi menos intensa. Esse efeito é mais contundente nos ensaios a 150°C.

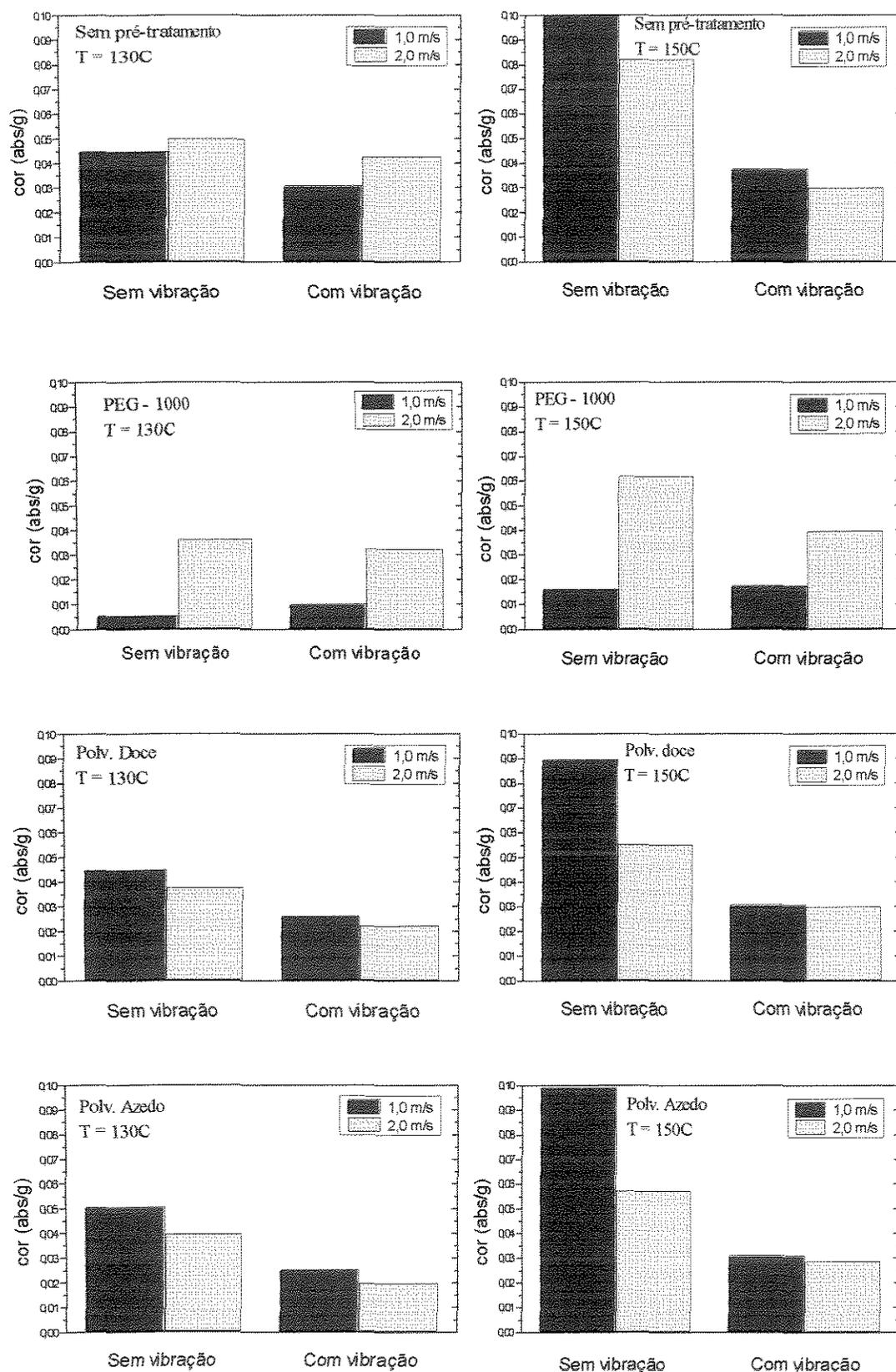


Figura 5.19 – Efeito das condições de operação na secagem HTST sobre a cor do produto final (2º estágio)

A Tabela 5.3 e a Figura 5.19 mostram claramente uma diferença notável entre a cor dos produtos finais obtidos de amostras pré-tratadas com amido (polvilho doce ou azedo) e a cor dos produtos obtidos a partir de amostras pré-tratadas com PEG, para as condições de operação em leito estático ou submetido à vibração.

Nos produtos tratados com amido, em condições de operação de velocidade do ar de 2,0 m/s, observa-se uma camada de pó branco sobre a superfície das fatias de banana desidratadas. Conclui-se, então, que esta camada interfere na análise de absorvância da cor, provocando a diminuição nos valores obtidos.

Os valores apresentados na Tabela 5.3 confirmam observações visuais, pois amostras pré-tratadas com PEG apresentaram, em ambas as condições de operação, menor escurecimento do que as amostras pré-tratadas com amido.

5.2.5. EFEITO SOBRE A REIDRATAÇÃO

A Figura 5.20 apresenta uma curva obtida com os dados de reidratação de banana desidratada, pré-tratada com PEG – 1000. A rápida reidratação, com um equilíbrio prático alcançado em menos de 10 minutos ocorreu em todas as amostras consideradas. Os valores de % de reidratação obtidos estão nas Tabelas 5.4 a 5.7.

Analisando os dados de reidratação, observa-se que há uma tendência em aumentar a % água absorvida com o aumento da temperatura de secagem HTST, independentemente do tipo de pré-tratamento aplicado nas amostras. Este aumento é mais notável em sistemas submetidos à vibração, e reflete portanto, a menor densidade do produto.

O aumento da quantidade de água absorvida pela amostra desidratada se deve à maior quantidade de poros na estrutura do produto, devido à expansão que o mesmo apresenta quando submetido à secagem HTST em LVF, como visto nos itens anteriores.

É possível observar que o pré-tratamento com PEG é mais eficiente em relação à quantidade de água absorvida pelo produto final, do que o pré-tratamento com amido (polvilho azedo ou doce), isto é, o produto pré-tratado com PEG apresentou uma taxa de reidratação maior do que os produtos pré-tratados com amido.

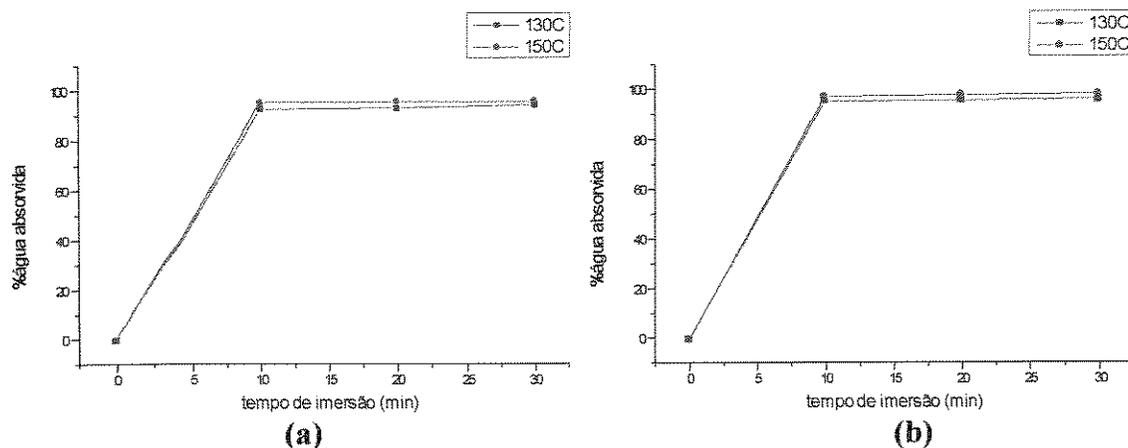


Figura 5.20- Efeito da temperatura ar na % absorção de água de fatias de banana pré-tratadas com PEG (P.M. 1000 g/mol) submetidas às condições HTST: (a) 2,0 m/s – 10,1 Hz; (b) 1,0 m/s – 10,1 Hz

Tabela 5.4 - Valores de %água absorvida na reidratação de fatias de banana-prata (10°Brix) sem pré-tratamento e desidratadas

T (°C)	V _{ar} (m/s)	f (Hz)	%água absorvida		
			10 min	20 min	30 min
130	1,0	0,0	95,03	95,27	96,01
150	1,0	0,0	96,24	97,01	97,39
130	2,0	0,0	93,04	94,02	94,56
150	2,0	0,0	92,13	93,00	93,23
130	1,0	10,1	84,56	87,36	89,57
150	1,0	10,1	90,50	90,10	90,59
130	2,0	10,1	93,20	93,98	94,00
150	2,0	10,1	95,03	95,21	96,22

Tabela 5.5 - Valores de %água absorvida na reidratação de fatias de banana-prata (10°Brix) pré-tratadas com PEG e desidratadas

T (°C)	V _{ar} (m/s)	f (Hz)	%água absorvida		
			10 min	20 min	30 min
130	1,0	0,0	96,16	97,71	97,44
150	1,0	0,0	96,20	95,90	97,39
130	2,0	0,0	93,59	94,59	95,52
150	2,0	0,0	93,62	94,08	94,93
130	1,0	10,1	95,92	95,67	96,37
150	1,0	10,1	97,41	98,62	97,97
130	2,0	10,1	93,27	92,92	94,55
150	2,0	10,1	95,61	95,72	96,03

Tabela 5.6 - Valores de %água absorvida na reidratação de fatias de banana-prata (10°Brix) pré-tratadas com amido (polvilho azedo) e desidratadas

T (°C)	V _{ar} (m/s)	f (Hz)	%água absorvida		
			10 min	20 min	30 min
130	1,0	0,0	95,24	96,18	96,36
150	1,0	0,0	96,33	96,91	97,38
130	2,0	0,0	93,16	94,11	95,03
150	2,0	0,0	92,58	93,01	93,86
130	1,0	10,1	85,27	87,85	89,03
150	1,0	10,1	90,59	90,78	90,89
130	2,0	10,1	93,63	94,30	94,33
150	2,0	10,1	95,13	95,24	96,40

Tabela 5.7 - Valores de %água absorvida na reidratação de fatias de banana-prata (10°Brix) pré-tratadas com amido (polvilho doce) e desidratadas

T (°C)	V _{ar} (m/s)	f (Hz)	%água absorvida		
			10 min	20 min	30 min
130	1,0	0,0	95,20	95,99	96,29
150	1,0	0,0	96,48	97,03	97,41
130	2,0	0,0	93,22	94,01	94,99
150	2,0	0,0	92,66	93,05	93,91
130	1,0	10,1	84,94	87,24	89,77
150	1,0	10,1	90,67	90,88	91,00
130	2,0	10,1	93,52	94,26	94,21
150	2,0	10,1	95,18	95,40	96,33

5.2.6. EFEITO DO PRÉ-TRATAMENTO NA ESTABILIDADE DAS FATIAS DE BANANA-PRATA DESIDRATADAS

Durante a realização da secagem de amostras pré-tratadas com PEG, polvilho azedo e polvilho doce e amostras sem pré-tratamento, para a obtenção de pontos para a construção das curvas de cinética de secagem HTST em LVF, foram retiradas amostras do produto e armazenadas em sacos plásticos hermeticamente fechados. Durante um mês, avaliou-se, visualmente, o processo de deterioração do produto. Observou-se que o produto obtido a partir de amostras sem pré-tratamento começou a apresentar pontos de deterioração (colônias de bolores) após uma semana de armazenado. Para as amostras pré-tratadas com amido, a deterioração iniciou após doze dias; e para as amostras pré-tratadas com PEG, após vinte dias.

5.3. MODELAGEM MATEMÁTICA

5.3.1. CINÉTICA DE SECAGEM EM LEITO VIBRO-FLUIDIZADO

Nos modelos de transferência de massa apresentados na Seção 2.4, tem-se explicitado o potencial para o transporte de umidade na forma $X-X_{eq}$, assumindo-se que a superfície do produto esteja em equilíbrio com o ar de secagem.

No processo HTST, o ar ambiente, aquecido até 130°C tem uma umidade relativa inferior a 0,08%. O ar a 150°C, tem uma umidade relativa em torno de 0,05%. De acordo com a isoterma de equilíbrio levantada por LUCAS (1996), o conteúdo de umidade de equilíbrio é menor do que 0,01 g de água/g de sólido seco. Esse valor é tão pequeno que pode ser desprezado na modelagem HTST, que envolve valores de X superiores a 0,50 g água/g de sólido seco (ver Tabela 5.1).

A partir das curvas de secagem em secador LVF, como, por exemplo, as já apresentadas nas Figuras 5.5 e 5.6, foi feito o ajuste dos pontos à modelos matemáticos já existentes na literatura e apresentados no Capítulo 2.

O melhor ajuste confirmou ser mesmo o linear, $\frac{X}{X_0} = A + Bt$.

O ajuste foi feito por meio de regressão linear utilizando-se o Microcal Origin 3. O resultado do ajuste é apresentado na Tabela 5.8 e as curvas nas Figuras A.1 até A.16, do Apêndice A.

Analisando os valores de r apresentados na Tabela 5.8, verifica-se que a regressão linear aplicada às curvas de cinética de secagem em LVF pode ser considerada adequada, confirmada pelos baixos valores de desvios padrão encontrados para a regressão.

Alguns desvios dos pontos experimentais da reta de regressão podem ser explicados por erros de leitura durante as pesagens, pela dificuldade de retirada da bandeja contendo as amostras e pelo fato de se mudar a amostra para cada ponto da curva.

Os valores de B da tabela representam o parâmetro cinético e confirmam que a banana sem pré-tratamento (valores de -0,02 a -0,035) seca mais rapidamente do que as tratadas.

Entre as bananas pré-tratadas, as médias dos valores de B decresce de PEG – 1000 a polvilho azedo e por último, polvilho doce. Pode-se sugerir as seguintes equações gerais de previsão de secagem em HTST de fatias de banana:

$$\text{Sem pré-tratamento} : \frac{X}{X_0} = 1 + 0,0297t$$

$$\text{PEG - 1000} : \frac{X}{X_0} = 1 + 0,0217t$$

$$\text{Polvilho Azedo} : \frac{X}{X_0} = 1 + 0,0197t$$

$$\text{Polvilho Doce} : \frac{X}{X_0} = 1 + 0,0177t$$

Tabela 5.8 – Valores das constantes A e B, do erro e do desvio padrão obtidos a partir da regressão linear das curvas de cinética de secagem HTST em LVF, com nível de confiança de 95%.

Amostra	Condições de operação	A	B	r	SD
Sem pré-tratamento	130°C – 0,0 Hz – 1,0 m/s	0,99854	-0,02605	-0,98967	0,02570
Sem pré-tratamento	150°C – 0,0 Hz – 1,0 m/s	0,97955	-0,02126	-0,98507	0,02531
Sem pré-tratamento	130°C – 0,0 Hz – 2,0 m/s	0,97971	-0,03253	-0,98530	0,03840
Sem pré-tratamento	150°C – 0,0 Hz – 2,0 m/s	0,97979	-0,02827	-0,99166	0,02502
Sem pré-tratamento	130°C – 10,1 Hz – 1,0 m/s	0,99766	-0,02891	-0,99963	0,00337
Sem pré-tratamento	150°C – 10,1 Hz – 1,0 m/s	0,99824	-0,03146	-0,99965	0,00355
Sem pré-tratamento	130°C – 10,1 Hz – 2,0 m/s	0,99129	-0,03584	-0,99737	0,01117
Sem pré-tratamento	150°C – 10,1 Hz – 2,0 m/s	0,98034	-0,03056	-0,98381	0,02387
PEG – 1000	130°C – 0,0 Hz – 1,0 m/s	1,00650	-0,02067	-0,99364	0,01595
PEG – 1000	150°C – 0,0 Hz – 1,0 m/s	0,99347	-0,01787	-0,99763	0,00840
PEG – 1000	130°C – 0,0 Hz – 2,0 m/s	0,9589	-0,01761	-0,98926	0,01772
PEG – 1000	150°C – 0,0 Hz – 2,0 m/s	0,99917	-0,01994	-0,99941	0,00468
PEG – 1000	130°C – 10,1 Hz – 1,0 m/s	1,01611	-0,01916	-0,97317	0,01942
PEG – 1000	150°C – 10,1 Hz – 1,0 m/s	1,01285	-0,02174	-0,98502	0,01632
PEG – 1000	130°C – 10,1 Hz – 2,0 m/s	1,01408	-0,02411	-0,98239	0,01966
PEG – 1000	150°C – 10,1 Hz – 2,0 m/s	1,01626	-0,02767	-0,98734	0,01906
Polv. Azedo	130°C – 0,0 Hz – 1,0 m/s	0,99952	-0,01545	-0,99631	0,00906
Polv. Azedo	150°C – 0,0 Hz – 1,0 m/s	1,00338	-0,01770	-0,99936	0,00432
Polv. Azedo	130°C – 0,0 Hz – 2,0 m/s	1,00027	-0,01925	-0,99997	0,00095
Polv. Azedo	150°C – 0,0 Hz – 2,0 m/s	1,00582	-0,02671	-0,99198	0,02318
Polv. Azedo	130°C – 10,1 Hz – 1,0 m/s	1,00926	-0,01788	-0,99010	0,01087
Polv. Azedo	150°C – 10,1 Hz – 1,0 m/s	1,00206	-0,01996	-0,96874	0,02190
Polv. Azedo	130°C – 10,1 Hz – 2,0 m/s	1,03490	-0,03216	-0,87922	0,07470
Polv. Azedo	150°C – 10,1 Hz – 2,0 m/s	0,99299	-0,02452	-0,99654	0,00876
Polv. Doce	130°C – 0,0 Hz – 1,0 m/s	1,00099	-0,01222	-0,98826	0,01287
Polv. Doce	150°C – 0,0 Hz – 1,0 m/s	1,00743	-0,01431	-0,9956	0,00917
Polv. Doce	130°C – 0,0 Hz – 2,0 m/s	1,00756	-0,01878	-0,99642	0,01085
Polv. Doce	150°C – 0,0 Hz – 2,0 m/s	0,99367	-0,01630	-0,98808	0,01729
Polv. Doce	130°C – 10,1 Hz – 1,0 m/s	1,00382	-0,01631	-0,95713	0,02116
Polv. Doce	150°C – 10,1 Hz – 1,0 m/s	0,98238	-0,01321	-0,93535	0,02141
Polv. Doce	130°C – 10,1 Hz – 2,0 m/s	1,00865	-0,02273	-0,99245	0,01205
Polv. Doce	150°C – 10,1 Hz – 2,0 m/s	1,00219	-0,02275	-0,99898	0,00440

5.3.2. CINÉTICA DE SECAGEM FINAL EM SECADOR DE BANDEJAS (2º ESTÁGIO)

Durante a secagem final de amostras sem pré-tratamento e pré-tratadas com PEG - 1000 em Secador de Bandejas, com ar a 70°C, foram levantados pontos para a construção de curvas de cinética de secagem. Estes pontos foram obtidos através de pesagens sucessivas da bandeja contendo as amostras, pré desidratadas em Secador LVF, durante cinco horas de secagem.

O ar ambiente aquecido a 70°C tinha uma umidade relativa em torno de 6,0%, e o teor de umidade de equilíbrio da banana-prata nestas condições é 0,03 g água/g sólido seco (LUCCAS, 1996). Esse valor foi usado para correlacionar os resultados obtidos em termos da 2ª Lei de Fick.

Quando é locado $\log (X-X_e)/(X_o-X_e)$ em função do tempo de secagem, espera-se que os dados gerem uma reta; e observando as Figuras 5.21, 5.22, 5.23, 5.24, 5.25 e 5.26, verifica-se que a regressão linear ajustou bem os pontos, portanto, pode-se dizer que o Modelo da Segunda Lei de Fick é adequado para o ajuste de pontos da secagem final de fatias de banana pré-desidratadas em secador LVF.

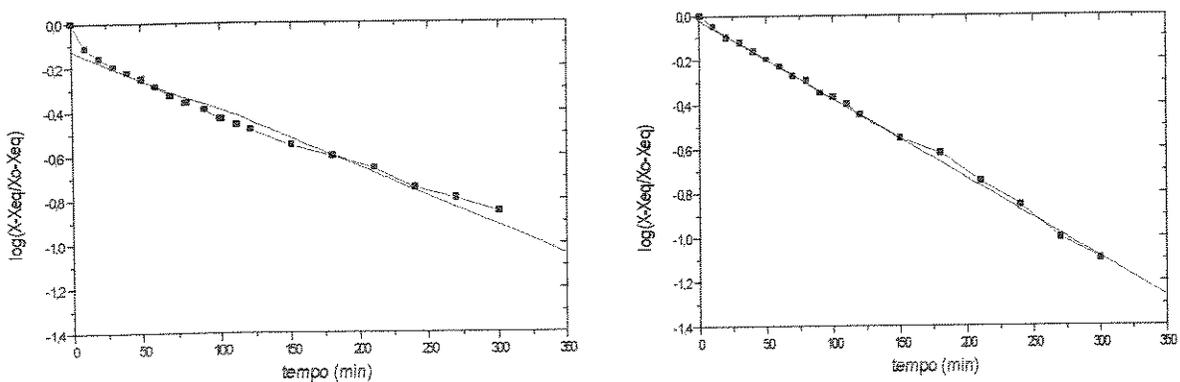


Figura 5.21- Regressão linear da curva de cinética de secagem final de fatias de banana sem pré-tratamento, submetidas às condições de pré-secagem HTST em LVF: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.

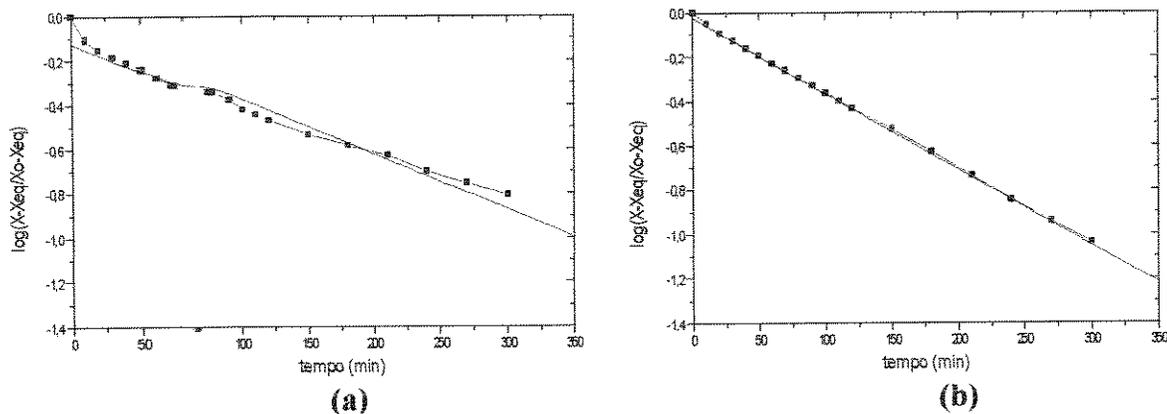


Figura 5.22- Regressão linear da curva de cinética de secagem final de fatias de banana sem pré-tratamento, submetidas às condições de pré-secagem HTST em LVF: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.

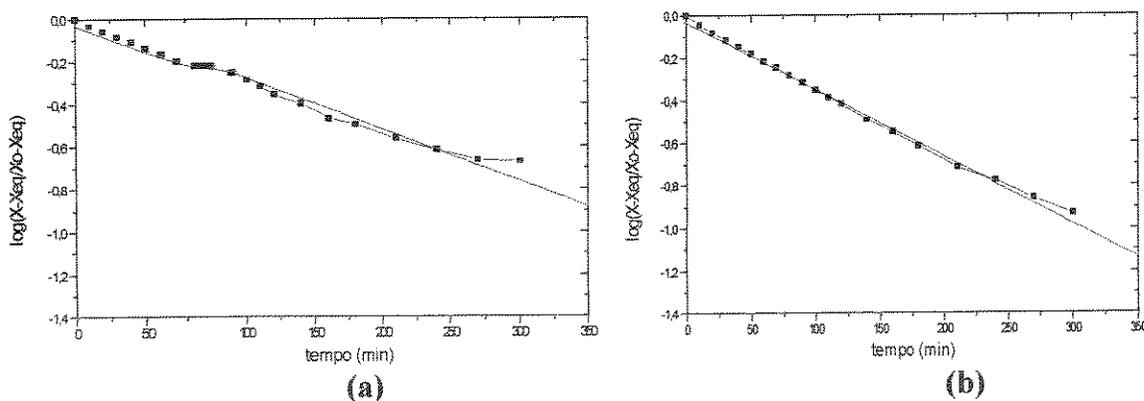


Figura 5.23- Regressão linear da curva de cinética de secagem final de fatias de banana pré-tratadas com PEG – 1000, submetidas às condições de pré-secagem HTST em LVF: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 2,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.

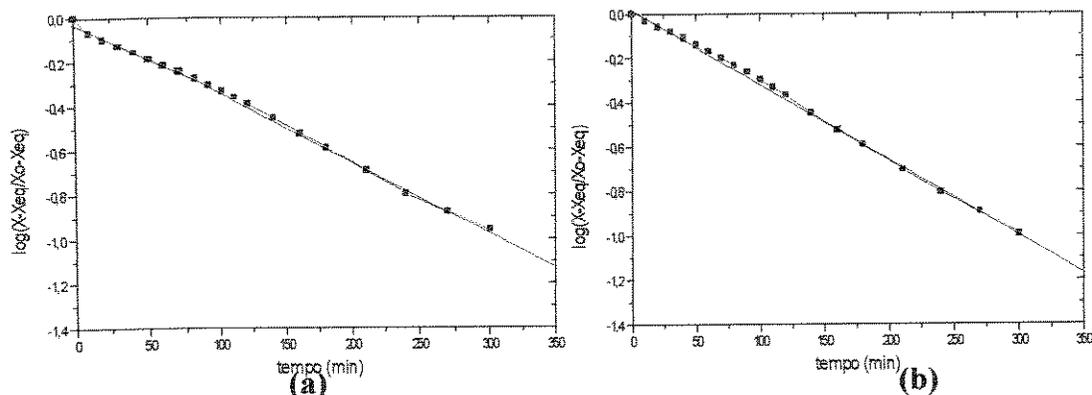


Figura 5.24- Regressão linear da curva de cinética de secagem final de fatias de banana pré-tratadas com PEG – 1000, submetidas às condições de pré-secagem HTST em LVF: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 1,0 m/s.

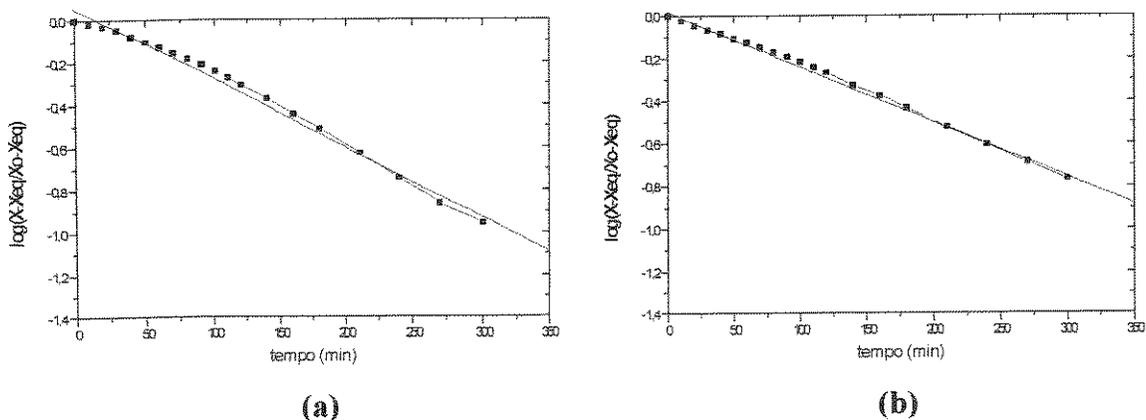


Figura 5.25- Regressão linear da curva de cinética de secagem final de fatias de banana pré-tratadas com PEG – 1000, submetidas às condições de pré-secagem HTST em LVF: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 2,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.

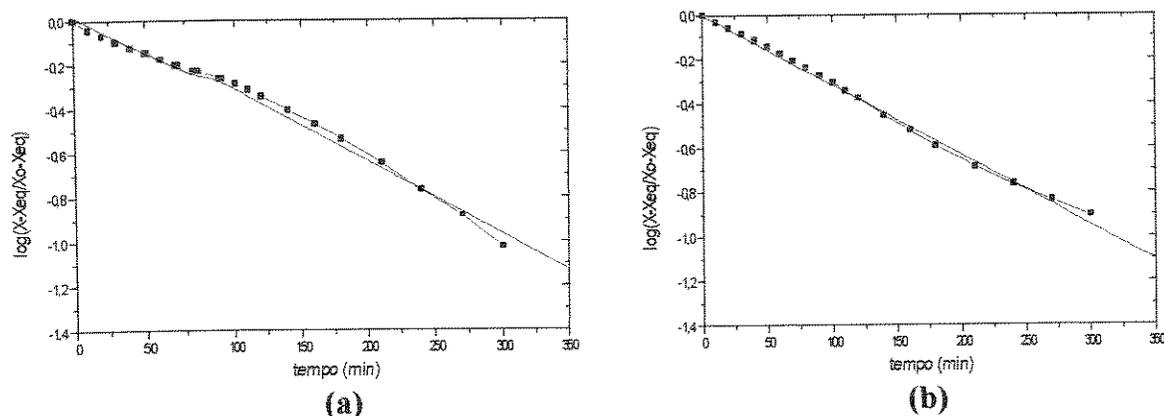


Figura 5.26– Regressão linear da curva de cinética de secagem final de fatias de banana pré-tratadas com PEG – 1000, submetidas às condições de pré-secagem HTST em LVF: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 1,0 m/s.

Na Tabela 5.9 estão apresentados os valores obtidos na regressão linear das curvas de cinética de secagem de fatias de banana sem pré-tratamento e pré-tratadas com PEG. Observa-se que o parâmetro B, que se relaciona com a difusividade, não apresenta tendências bem definidas, confirmando a pequena influência das condições de pré-secagem HTST sobre a cinética de secagem no 2º estágio.

O valor médio de B achado foi $-0,00304 \text{ min}^{-1}$.

As partículas de banana alimentadas ao Secador do 2º estágio têm um formato irregular, que como aproximação, pode ser considerado uma esfera, com um raio de cerca de 0,5 cm, e que permaneceu praticamente constante durante a secagem.

De acordo com o desenvolvimento em série da solução da 2ª Lei de Fick para uma esfera, com resistência externa à transferência de massa desprezível, o parâmetro B correspondente a $\pi^2 \frac{D}{R^2}$.

Com os dados obtidos calcula-se um $D_{\text{eff}} = 3,0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Esse valor, calculado como uma média dos resultados obtidos sob várias condições de operação, mostra uma concordância surpreendente com as difusividades calculadas por QUEIROZ (1994) para a secagem de banana.

Tabela 5.9 - Constantes A e B, e parâmetros estatísticos do modelo difusional aplicado à cinética de secagem final de fatias de banana, com nível de confiança de

95%. $\left(Y = LOG \frac{X_o - X_{eq}}{X} \right)$ onde X = t.

Amostra	Condições de operação	A	B	r	SD
Sem pré-trat	130°C – 0,0 Hz – 1,0 m/s	-0,11932	-0,00263	-0,9851	0,04250
Sem pré-trat	130°C – 0,0 Hz – 2,0 m/s	-0,11950	-0,00357	-0,99913	0,01376
Sem pré-trat	130°C – 10,1 Hz – 1,0 m/s	-0,11743	-0,00249	-0,98253	0,04361
Sem pré-trat	130°C – 10,1 Hz – 2,0 m/s	-0,01886	-0,00341	-0,99981	0,00612
PEG – 1000	130°C – 0,0 Hz – 1,0 m/s	0,02022	-0,00326	-0,99608	0,02618
PEG – 1000	150°C – 0,0 Hz – 1,0 m/s	0,00565	-0,00316	-0,99847	0,01584
PEG – 1000	130°C – 0,0 Hz – 2,0 m/s	-0,05731	-0,00326	-0,99559	0,02784
PEG – 1000	150°C – 0,0 Hz – 2,0 m/s	-0,02391	-0,00257	-0,99789	0,01514
PEG – 1000	130°C – 10,1 Hz – 1,0 m/s	-0,02243	-0,00315	-0,99941	0,00982
PEG – 1000	150°C – 10,1 Hz – 1,0 m/s	-0,02586	-0,00339	-0,99892	0,01424
PEG – 1000	130°C – 10,1 Hz – 2,0 m/s	-0,02703	-0,00242	-0,99067	0,03017
PEG – 1000	150°C – 10,1 Hz – 2,0 m/s	-0,02598	-0,00315	-0,99814	0,01738

Foram obtidas curvas de cinética de secagem para outros ensaios realizados, incluindo os ensaios pré liminares para escolha dos pré-tratamentos e condições de operação. Estas curvas também apresentaram comportamento semelhante e bom ajuste dos pontos ao modelo difusional.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1. CONCLUSÕES

A – Com relação ao desenvolvimento do sistema experimental

1. A unidade experimental construída para o LVF possibilitou estudar e quantificar o efeito de parâmetros operacionais na secagem de fatias de banana a altas temperaturas por curto tempo.
2. A vibração da placa distribuidora do ar contribuiu para a movimentação do leito.
3. A instalação permitiu uma coleta rápida de amostra para o acompanhamento de perda de umidade.

B – Com relação a fluidodinâmica do leito

4. A vibração agiliza a fluidização das fatias no leito.
5. A frequência de vibração deve ser próxima, mas inferior, à da ressonância.
6. Algumas fatias se aglomeravam na bandeja vibracional formando grupamentos de partículas.

C – Com relação à secagem

7. A secagem HTST apresentou uma correlação linear entre a perda de umidade e o tempo.
8. A temperatura e a velocidade do ar não afetaram a cinética de secagem HTST.

9. A vibração contribuiu decisivamente para a expansão do produto, obtendo-se banana desidratada, crocante, de menor densidade.
10. A vibração retardou o desenvolvimento de cor no produto.
11. Os pré-tratamentos diminuíram a taxa de secagem.
12. O pré-tratamento por imersão em uma solução de 2% de PEG – 1000 produziu os produtos de cor mais atraente.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Variar a temperatura do banho de imersão, no pré-tratamento; e verificar sua influência na cinética de secagem.
2. Variar a concentração de PEG nas soluções de pré-tratamento.
3. Variar a espessura das fatias de banana e verificar sua influência na constante de secagem. A constante de secagem deve ser inversamente proporcional à espessura do material.
4. Propor um modelo para a expansão do produto.
5. Realizar testes de análise sensorial com o produto final.

CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHANTA, S. e OKOS, M.R. Predicting the quality of dehydrated foods and biopolymers: research needs and opportunities. *Drying Technology*, v.14, n. 6, p. 1329-1368, 1996.
- ALAM-ZEB; RAFIULLAH-KHAN; HAMIDULLAH-SHAH e REHMAN-KHATTAK, E. Effect of glucose, fructose, sucrose-glucose mixture and chemical preservatives on the osmosis, water activity and shelf-stability of intermediate-moisture banana chips. *Sarhad-Journal-of-Agriculture*, v.11, n.3, p. 381-387, 1995.
- ALMEIDA, M.E.M. de. *Estudo de interações entre o emprego de compostos químicos com o tratamento térmico no controle da atividade da polifenol oxidase em frutas e hortaliças*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da USP, Universidade de São Paulo, 1991. Tese (Mestrado)
- ALZAMORA, S.M.; CHIRIFE, J. and VOILLAZ, P. A simplified model for predicting the temperatures of foods during air dehydration. *Journal of Food Technology*, v.14, p. 369- 380, 1979.
- BALABAN, M. Effect of volume change in foods on the temperature and moisture content predictions of simultaneous heat and moisture transfer models. *Journal of Food Process Engineering*, v.12, p. 67-88, 1989.
- BARONI, A. F. e HUBINGER, M.D. Drying of onion: effects of pre-treatment on moisture transport. *Proceedings of the Inter-American Drying Conference (IADC)* p. 419-426, 1997.
- BEECKMANS, J.M. and CHU, J.C.H. Solids mixing kinetics and segregation in a vibrostabilized fluid bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.65, n.8, p. 536-540, 1987.

- BLEINROTH, E.W. Matéria-prima. In.: *Banana – cultura, matéria-prima, processamento e aspectos econômicos*. Campinas: ITAL v.2 e 3, p. 133-196. (Série Frutas Tropicais), 1985.
- BREKKE, J.E.; ALLEN, L. Dehydrated bananas. *Food Technology*, v.21, p. 101-105, 1967.
- BRUNELLO, G.; NASCIMENTO, C.A.O. Drying of cereal grain: two internal resistances model. *Revista Latinoamericana Transf. Cal. Mat.*, v.3, p. 15-26, 1979.
- CRANK, J. *The Mathematics of Diffusion*, 2 ed. Claredon Press Oxford, 414p., 1975.
- CROWTHER, P.C. *The Processing of Banana Products for Food Use*. Tropical Products Institute, Fev, 1979.
- DONG, Z.X.; PAN, Y.K.; DENG, W.Y. e WEI, Z. Effect of vibration on the drying rate during the falling rate period. *Drying Technology*, v.9, n.3, p.723-733, 1991.
- ERDÉSZ, K. Hydrodynamic studies on vibrated fluidized beds. *Powder Handling & Processing*, v.2, n.4, p. 327-340, 1990.
- FENNEMA, O R. *Principles of Food Science*, New York, 1975.
- FERNANDES, K.M.; CARVALHO, V.D. de; CAL-VIDAL, J. A. Physical changes during ripening of silver bananas. *Journal of Food Science*, v. 44, p.1254-1255,1979.
- FINZER, J.R.D. e KIECKBUSCH, T.G., Secagem em sistemas com vibração. In: *Tópicos Especiais em Secagem*, vol 1, cap. 3, 89-119,UFSCar, São Carlos, 1992.
- FINZER, J.R.D. *Secagem de Fatias de Cebola em Leito Vibro-fluidizado*. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, Universidade Estadual de Campinas,1984. Tese (Mestrado)

- FINZER, J.R.D. *Desenvolvimento de um Secador de Leito Vibro-jorrado*. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 1989. Tese (Doutorado)
- FUSCO, A.J.; AVANZA, J.R.; AGUERRE, R.J. e GABITTO, J.F. A diffusional model for drying with volume change. *Drying Technology*, 9 (2): 397-417, 1991.
- GALEAZZI, M.A e SGARBIERI, V.C. Substrate specificity and inhibitor of polyphenoloxidase (PPO) from a dwarf variety of banana (*Musa canesdishi*, L.). *Journal of Food Science*, v. 46, p. 1404-1406, 1981.
- GREENWALD, C.G. e KING, C.J. The mechanism of particle expansion in spray drying of foods. *AIChE Symposium Series, Food Process Engineering* :v. 101, p. 110, 1982.
- GUPTA, R. e MUJUMDAR, A.S. Aerodynamics of a vibrated fluid bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 58, n.6, p.332-338, 1980.
- HAENDLER, L. Produits de transformation de la banane. *Fruits*, v.21, n.7, p. 329-342, 1966
- HSIEH, F.; HUFF, H.E.; PENG, I.C. e MAREK, S.W. Puffing of rice cakes as Influenced by tempering and heating conditions. *Journal of Food Science*, v.54, n.5, p.1310 - 1312, 1989.
- HAWLADER, M.N.A.; UDDIN, M.S.; HO, J.C. e TENG, A.B.W. Drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, v.14, n.4, p. 259-268, 1988.
- JAYARAMAN, K.S. e GUPTA, D.K. Dehydration of fruits and vegetables – recent developments in principles and techniques. *Drying Technology*, v.10,n.1, p. 1- 50, 1992.

- KARATHANOS, V.T.; MAROULIS, Z.B.; KOURIS, D.M. e SARAVACOS, D.G. Hygrothermal and quality properties applicable to drying. Data Sources and Measurement Techniques. *Drying Technology*, v.14, n.6, p. 1403-1418, 1996.
- KATZ, E.E. e LABUZA, T.P. Effect of water activity on the sensory crispness and mechanical deformation of snack food products. *Journal of Food Science*, v.46, p. 403-409, 1981.
- KIM, M.H. e TOLEDO, R.T. Effect of osmotic dehydration and high temperature fluidized bed drying on properties of dehydrated rabbiteye blueberries. *Journal of Food Science*, v.52, p. 4, 980-989, 1987.
- LEVI, A.; RAMIREZ-MARTINEZ, J.R. e PADUA, H. Influence of heat and sulfur dioxide treatments on some quality characteristics of intermediate-moisture banana. *Journal of Food Technology*, v.15, p. 557-566, 1980.
- LEWIS, W.K. The rate of drying of solids material. In: The Symposium on Drying. *The Journal of I. & E. Ch.*, v.13, p. 5, 427-432, 1921.
- LOZANO, J.E.; ROTSTEIN, E. e URBICAIN, M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science*, v.48, p.1497-1553, 1983.
- LUCCAS, V. *Obtenção de fatias de banana desidratada crocantes através da pré secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1996. Tese (Mestrado)
- LUCCAS, V. e KIECKBUSCH, T.G. Obtenção de fatias de banana desidratada crocantes através da pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado. *Ciência Tecnol. Aliment.*, v.16, n.3, p. 91-94, 1996.
- MALHOTRA, K. e MUJUMDAR, A.S. Flow patterns for cylinders immersed in a aerated vibrated bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.63, n.2, p. 22-28, 1985.

- MARTIN, Z.J. de; TRAVAGLINI, D.A.; OKADA, M.; QUAST, D.G. e HASHIZUME, T. Processamento: produtos, características e utilização. In: *Banana-cultura, matéria prima, processamento e aspectos econômicos*. Campinas : ITAL . Cap. III, Série Frutas Tropicais, 3, 1985.
- MAZZA, G. e LEMAGUER, M. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. *Journal of Food Technology*, v.15, p.: 181-194, 1980.
- MONTGOMERY, M.W. e SGARBIERI, V.C. Isoenzymes of banana polyphenol oxidase. *Phytochemistry*, v.14, p. 1245-1249, 1975.
- MORI, S.; YAMAMOTO, A.; IWATA, S.; MARUTA, T. e YAMADA, I. Vibro fluidization of group-C particles and its industrial applications. *AICHE Symposium Series*, v.86, n.276, p.88-94, 1986.
- MOWLAH, G.; TAKANO, K.; KAMOI, I. e OBARA, T. Water transport mechanism and some aspects of quality changes during air dehydration of bananas. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, v.16, p. 103-107, 1983.
- MUDAHAR, G.S.; BUHR, R.J. e JEN, J.J. Infiltrated biopolymers effect on quality of dehydrated carrot. *Journal of Food Science*, v.57, p. 2, 526-529, 1991.
- MUDAHAR, G.S.; TOLEDO, R.T.; FLOROS, J.D. e JEN, J.J. Optimization of carrot dehydration process using response surface methodology. *Journal of Food Science*, v.54, n.3, p. 714-719, 1989.
- MUJUMDAR, A.S. e ERDÉSZ, K. Applications of vibration techniques for drying and agglomeration in food processing. *Drying Technology*, v.6, n.2, p. 255-274, 1988.
- NIJHUIS, H.H.; TORRINGA, E.; LUYTEN, H.; RENÉ, F.; JONES, P.; FUNEBO, T. e OHLSSON, T. Research needs and opportunities in the dry conservation of fruits and vegetables. *Drying Technology*, v.14, n.6, p. 1429-1457, 1996.

- NOGUEIRA, R.I. *Processo de Secagem de Banana (Musa acuminata subgrupo Cavendish cultivar Nanica) : parâmetros ótimos na obtenção de banana-passa*. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1991. Tese (Mestrado)
- OGIHARA, L. A. *Determinação dos parâmetros de secagem de milho verde e ensaios de armazenamento*. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 1989. Tese (Mestrado)
- 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.
- PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A.S. e STRUMILLO, C. Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying processes. In: MUJUMDAR, A.S. *Advances in Drying*, Hemisphere Publishing Corporation, McGill University, Montreal, vol3, cap.7, 1984.
- PAYNE, F.A.; TARABA, J.L. e SAPUTRA, D. A review of puffing processes for expansion of biological products. *Journal of Food Engineering*, p.183-197, 1990.
- POIANI, L.M. e BORGES, M.T.M.R. Industrialização da matéria-prima banana-verde. *Anais do II Simpósio Latino Americano de Ciência de alimentos – Progresso e Ação para o Ano 2000*. N° 325. p. 117, 1997.
- QUEIROZ, M.R. de. *Estudo teórico-experimental da cinética de secagem de bananas*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1994. Tese (Doutorado)
- RAMESH, M.N. e RAO, P.N.S. Drying studies of cooked rice in a vibrofluidised bed drier. *Journal of Food Engineering*, v.27, p. 389-396, 1996.
- RANGANNA, S. *Manual of analysis of fruit and vegetable products*. Mc Graw-Hill, 1978.

- RAPUSAS, R.S. e DRISCOLL, R.H. The thin-layer drying characteristics of white onion slices. *Drying Technology*, v.13, n.8-9, p. 1905-1931, 1995.
- RÁTKAI, G. Y. e TÖRÖS, R.; Hidrodinamic model of the vibro-spouted bed - I. velocity profile in the bed. *Chemical Engineering Science*, v.41, n.5, p. 1345-1349, 1986.
- RINGER, D.U. e MUJUMDAR, A.S. Analysis of aerodynamics and heat transfer in vibro-fluidized beds. *Drying Technology*, v.2, n.4, p. 449-470, 1983-84.
- ROVEDO, C.L.; SUAREZ, C. e VIOLLAZ, P.E. Drying of foods: evaluation of a drying model. *Journal of Food Engineering*, v.26, p. 1-12, 1995.
- SACA, S.A. e LOZANO, J.E. Explosion puffing of bananas. *International Journal of Food Science and Technology*, v.27, p. 419-426, 1992.
- SANKAT, C.K.; CASTAIGNE, F. e MAHARAJ, R. The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. *International Journal of Food Science and Technology*, v.31, p. 123-135, 1996.
- SARAVACOS, G.D. e CHARM, S.E. A study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration. *Food Technology*, v.16, n.1, p. 78-81, 1962.
- SCHWARTZBERG, H.G.; WU, P.J.; NUSSINOVITCH, A. e MUGERWA, J. Determination of vapour pressure in vapour induced puffing. *AIChE Journal*, v.40, n.1, p. 160-165, 1994.
- SHILTON, N.C. e NIRANJAN, K. Fluidization and its application to food processing. *Food Structure*, v.12, p. 199-215, 1993.
- SILVA, E. e NOGUEIRA, J.N. Efeito do calor na atividade da polifenol oxidase e peroxidase em algumas frutas e hortaliças. *Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"*, v.40, p. 137-161, 1983a, Piracicaba.

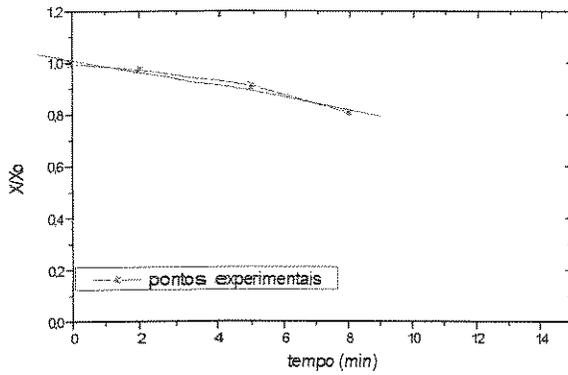
- SUZUKI, K.; MOSAKA, H.; AMAZAKI, R. e JIMBO, G. Drying characteristics of particles in a constant drying rate period in vibro-fluidized bed. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v.13, n.2, p. 117-122, 1980c.
- SZALZY, A.; ERDÉSZ, K.; ZAGROUBA, F. e ROQUES, M.A. Principles for hydrodynamical and geometrical design of vibrated bed driers. *Drying Technology*, v.13, n.5-7, p. 1249-1260, 1995.
- TANADA, P.S. *Obtenção de extrato de banana (Musa Cavendishii) isento de polifenol oxidase por ultrafiltração e concentrado por osmose inversa*. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 1996. Tese (Mestrado)
- THIJSEN, H.A.C. Optimization of process conditions during drying with regard to quality factors. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, v.12, p. 308-317, 1979.
- THOMAS, B.; LIU, Y.A.; MASON, M.O. e SQUIRES, A.M. Vibrated beds: new tools for heat transfer. *Chemical Engineering Progress*, June, 65-75, 1988.
- TOLEDO, R.T. *Fundamentals of food process engineering*, AVI. Publishing Company, Inc.: Westport, Connecticut, p.363, 1980.
- TORREGIANI, D. e TOLEDO, R.T. Simultaneous puffing and dehydration of osmotically pre-treated apples cubes in a high temperature fluidized bed (HTFB) drier. *Drying Technology*, n.1-5, 1990.
- TRAVAGLINI, D.A. ; NETO, M.P.; BLEINROTH, E.W. e 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. e CHIRIFE, J. Heat transfer effects on drying rate of food dehydration. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 52, n.10, p. 576-579, 1974.

VAN ARSDEL, W.B.; COPLEY, M.J. e MORGAN JR, A I. *Food Dehydration* 2.ed., Westport, AVI Publishing Co., v.1, cap.3 p. 22-57, 1973.

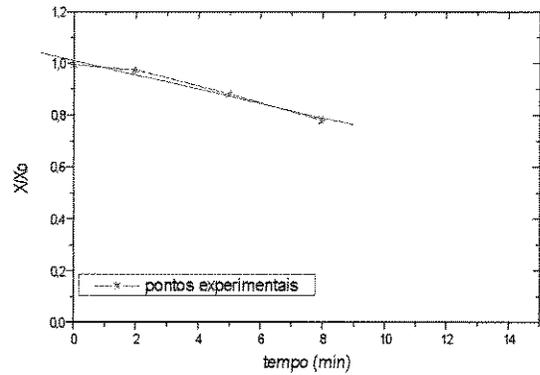
WIRTH, K.E. Heat transfer in circulating fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, v. 50, n.13, p. 2137-2151, 1995.

APÊNDICE A – AJUSTE LINEAR DA SECAGEM HTST

AJUSTE LINEAR DA SECAGEM HTST

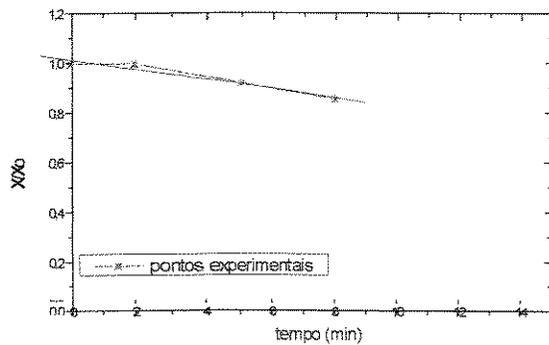


(a)

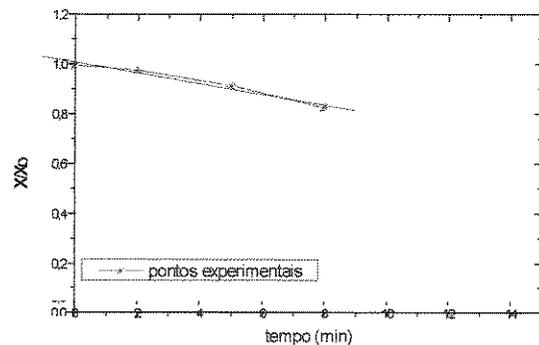


(b)

Figura A.1- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com PEG (P.M. 1000 g/mol) submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 2,0 m/s



(a)



(b)

Figura A.2- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com PEG (P.M. 1000 g/mol) submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 2,0 m/s

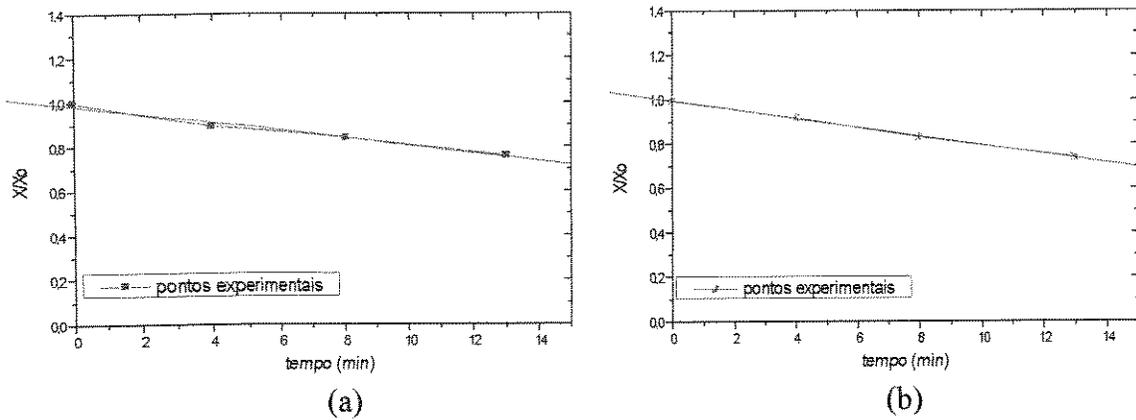


Figura A.3- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com PEG (P.M. 1000 g/mol) submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 2,0 m/s

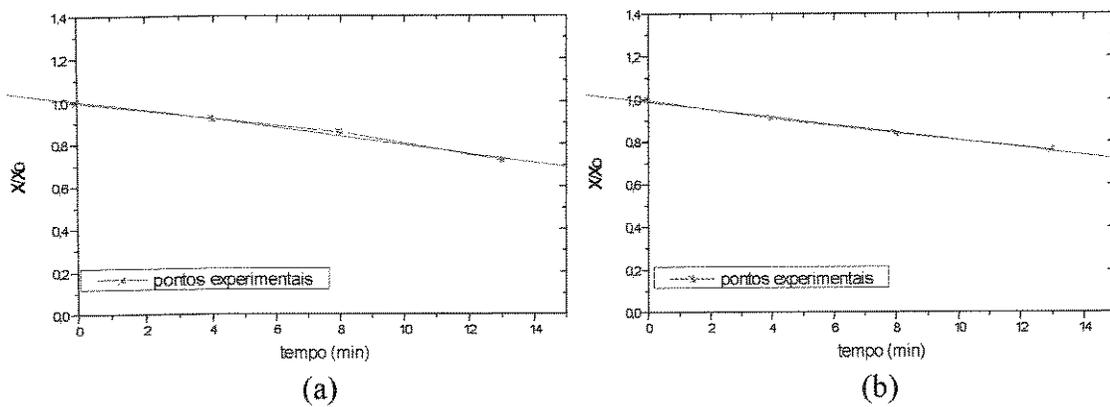


Figura A.4- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com PEG (P.M. 1000 g/mol) submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 2,0 m/s

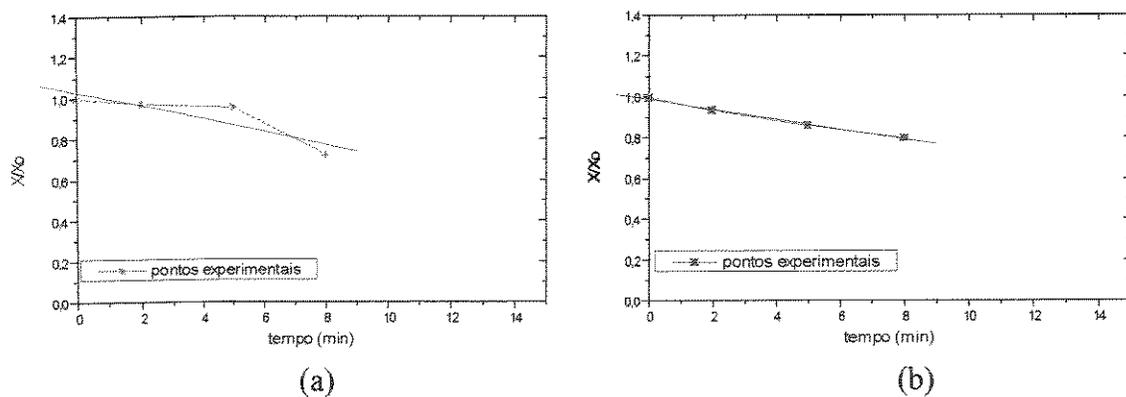
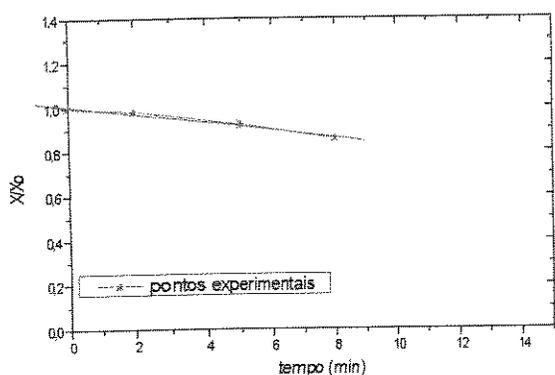
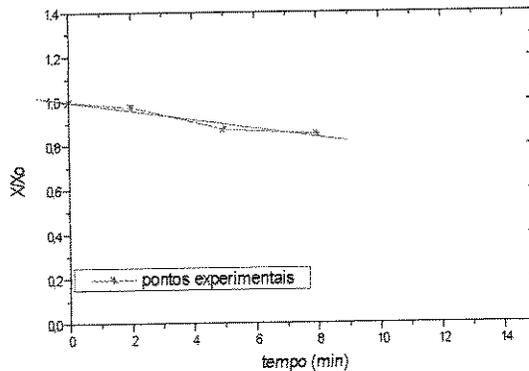


Figura A.5- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho azedo) submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 2,0 m/s

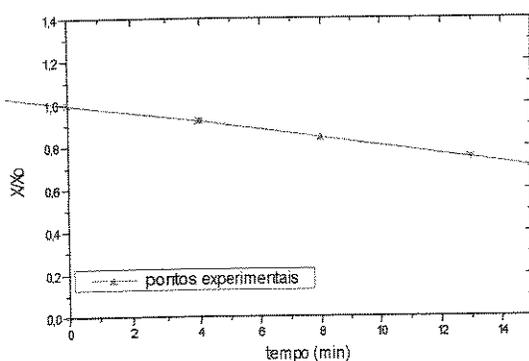


(a)

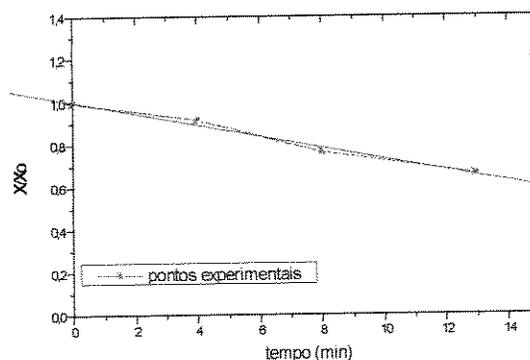


(b)

Figura A.6- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho azedo) submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 2,0 m/s

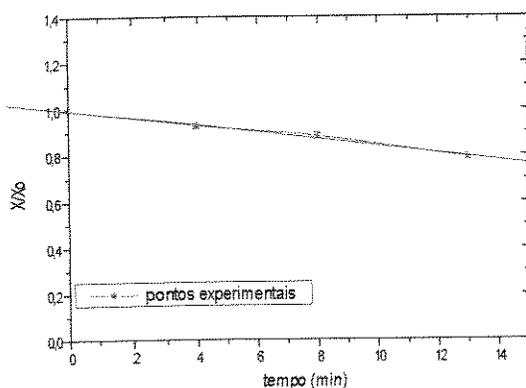


(a)

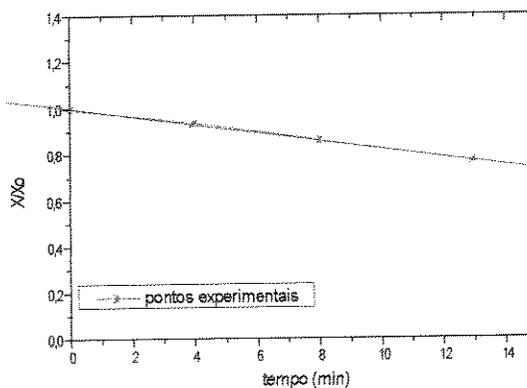


(b)

Figura A.7- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho azedo) submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 2,0 m/s



(a)



(b)

Figura A.8- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho azedo) submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.

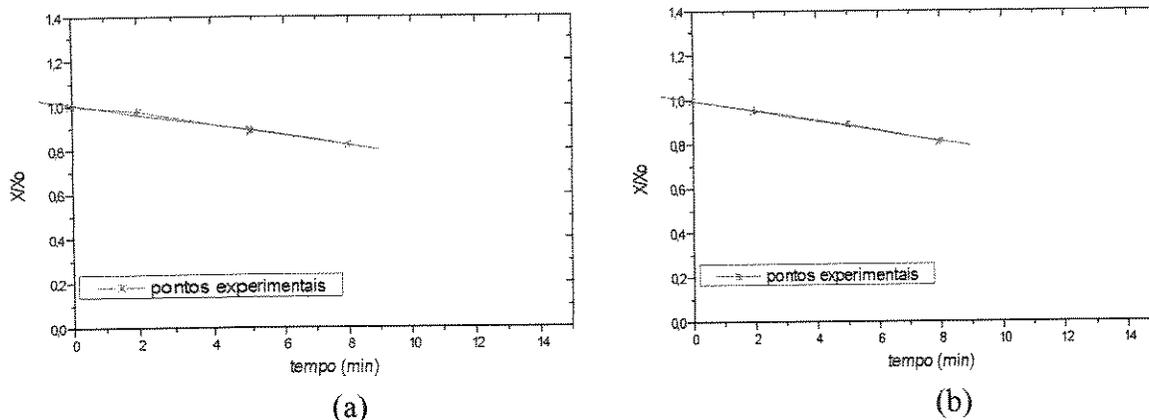


Figura A.9- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho doce) submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.

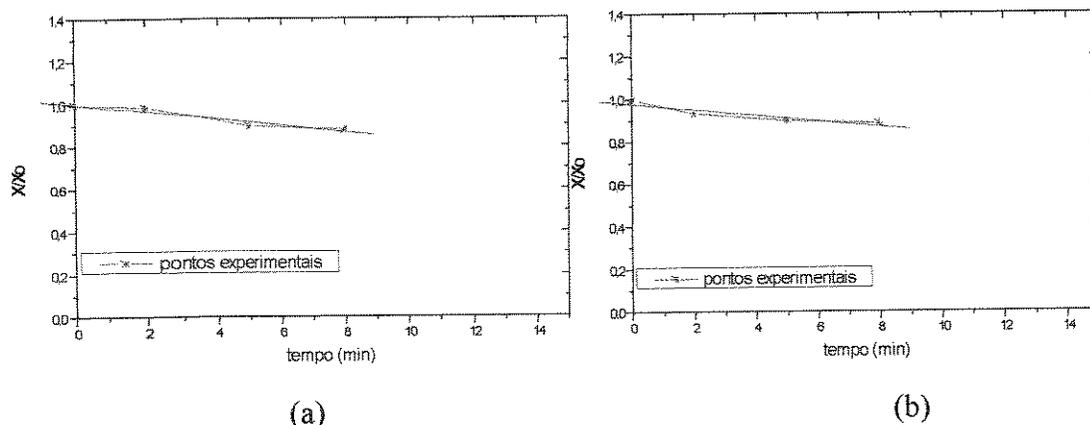


Figura A.10- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho doce) submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.

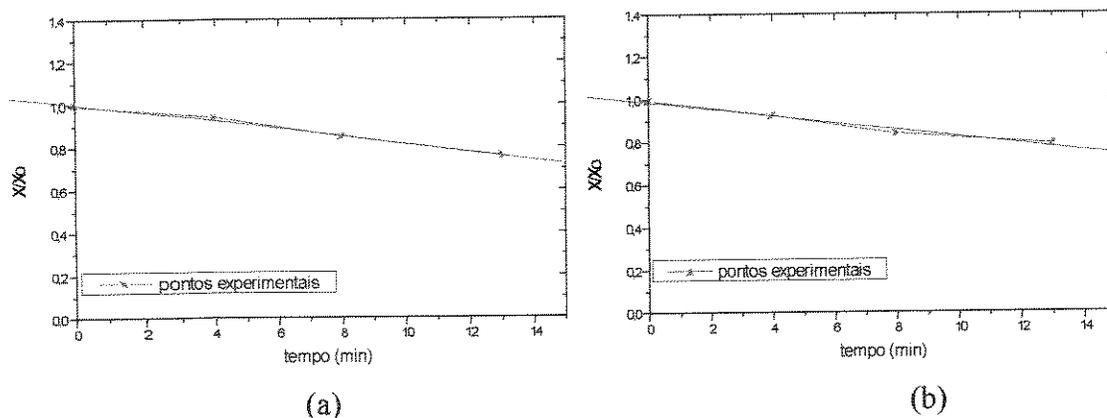


Figura A.11- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho doce) submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.

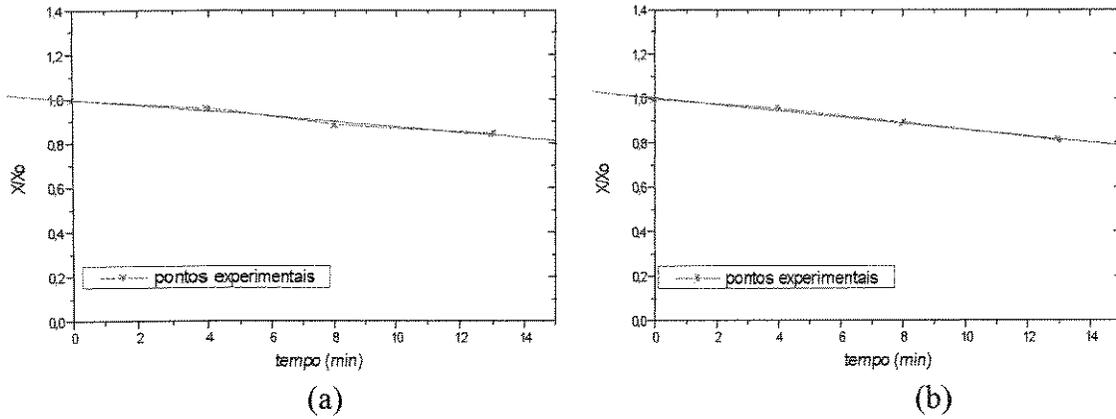


Figura A.12- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana pré-tratadas com Amido (polvilho doce) submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.

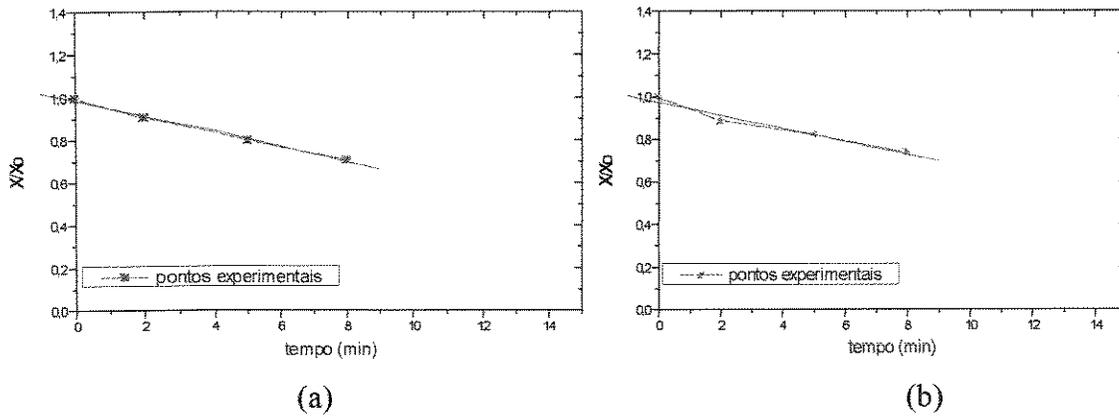


Figura A.13- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana sem pré-tratamento submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.

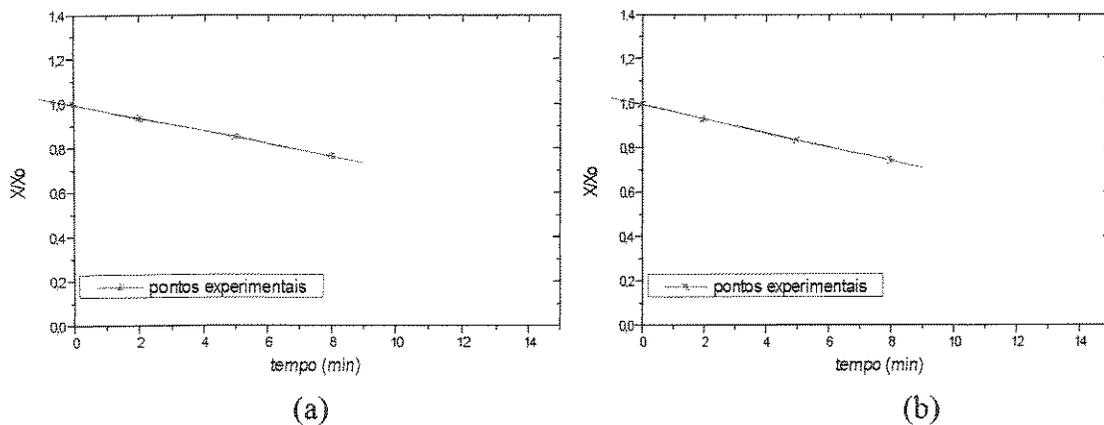
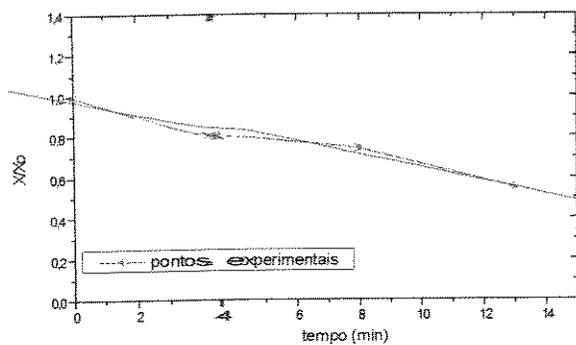
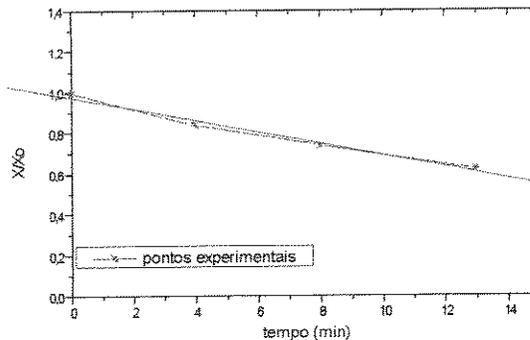


Figura A.14- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana sem pré-tratamento submetidas às condições: (a) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 150°C, 8min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.

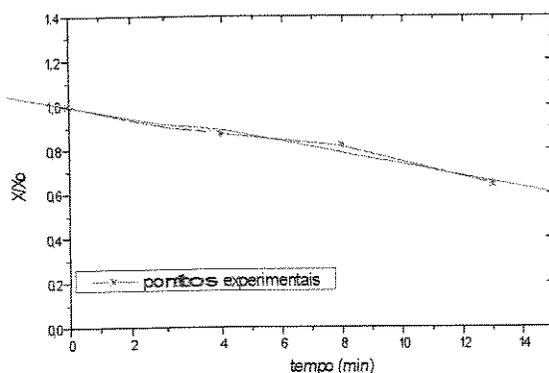


(a)

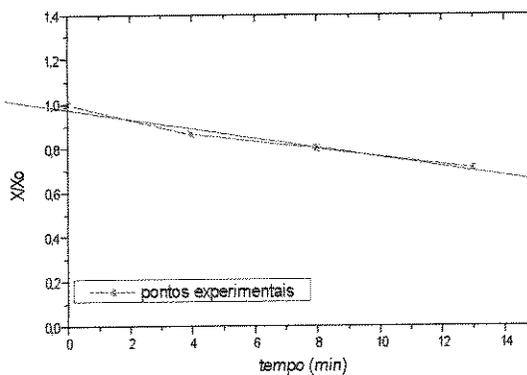


(b)

Figura A.15- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana sem pré-tratamento submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 10,1 Hz, 2,0 m/s.



(a)



(b)

Figura A.16- Cinética de secagem HTST em LVF de fatias de banana sem pré-tratamento submetidas às condições: (a) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 1,0 m/s; (b) 130°C, 13min, 0,0 Hz, 2,0 m/s.