

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
LABORATÓRIO DE TECNOLOGIAS APLICADAS



**OBTENÇÃO DE BANANA NANICA (*Musa acuminata* Colla
subgrupo *Cavendish*) CROCANTE A PARTIR DE
SECAGEM A ALTA TEMPERATURA**

Por

PARECER

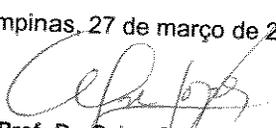
Kelly Hofsetz

Eng^a. Química – UCS (RS)

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por **Kelly Hofsetz** aprovada pela Comissão Julgadora em 27 de março de 2003.

Campinas, 27 de março de 2003.

Prof. Dr. Celso Costa Lopes
Orientador


Prof. Dr. Celso Costa Lopes
Presidente da Banca

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Campinas – SP
Março de 2003

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIDADE	Be
Nº CHAMADA	TUNICAMP
	H677e
V	EX
TOMBO BC	54237
PROC.	124103
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	RS 11,00
DATA	12/06/03
Nº CPD	

CM00185601-2

IB ID 293693

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. – UNICAMP

H677o Hofsetz, Kelly
Obtenção de banana nanica (*Musa acuminata* Colla subgrupo *Cavendish*) crocante a partir de secagem a alta temperatura / Kelly Hofsetz. – Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Celso Costa Lopes
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

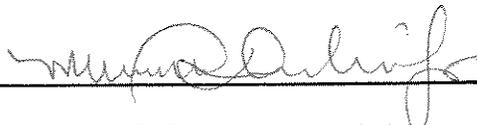
1. Banana. 2. Frutas – Secagem. 3. Alimentos - Textura.
4. Avaliação sensorial. I. Lopes, Celso Costa. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.
III. Título.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Celso Costa Lopes

(Orientador)



Prof. Drª Miriam Dupas Hubinger

(Membro)



Prof. Dr. Kil Jin Park

(Membro)

Prof. Dr. Valdecir Luccas

(Membro)

Dedico esse trabalho

A minha inesquecível mãe Eluza, essa mulher forte e extraordinária que partiu desta vida deixando uma imensa saudade.

À família maravilhosa que eu tenho e que me deu força para chegar até aqui e continuar lutando pelos meus sonhos, apesar de tudo o que passamos no último ano: meu pai Geraldo, meus irmãos Karen, Loren e Christian, minha cunhada Berenice e minha princesinha de sobrinha, Alice.

Ao Marco Antônio, por tudo o que ele representa para mim e a quem eu muito amo.

“Meu Senhor e meu Deus, peço-vos que me abençoes,

aumentando minhas terras, protegendo-me com

Tua mão, afastando de mim todo o mal

e pondo um fim a minha dor (Jabez: I Crônicas 4:9-10)”

Agradecimentos

A Deus por me presentear com esta oportunidade repleta de momentos e pessoas inesquecíveis.

À Capes, pelo financiamento da bolsa de mestrado.

Ao Professor Celso pela orientação, paciência, companheirismo, sensibilidade nos meus momentos difíceis e por ter acreditado em minha capacidade.

Aos Professores Miriam Dupas Hubinger, Kil Jin Park e Valdecir Luccas pelas correções e valiosas sugestões que só vieram enriquecer este trabalho.

Aos amigos D. Nair e Seu Alfredo, D. Cecília, minha prima-irmã Vânia e minha Vó Narciza por todas as orações, apoio e carinho com que sempre me distinguiram.

Aos amigos da turma 2001 de mestrado por enriquecerem esta etapa de minha vida.

A Priscila, Ana Carolina e Jaqueline que moram comigo e são como minhas irmãs aqui em Campinas.

A Adelina, Michelle e Danitiela, amigas da época do pensionato e cuja amizade continuou por todo esse tempo.

A Mariana Vanin e a Prof^a. Helena M. A. B. Cardello por toda a ajuda na parte da análise sensorial deste projeto.

Aos amigos de laboratório, Jaqueline e Paulo (a mesma Jackie da minha casa), pela paciência e companheirismo.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Alimentos da Unicamp.

Aos amigos e professores da Universidade de Caxias do Sul - RS, Ana Rosa Costa, Luiz A. R. Muniz, Evandro Steffani e Rejane R. Mandelli que inspiraram minha paixão pela pesquisa e pelo ensino.

Às outras três integrantes do "Quarteto Fantástico da UCS" Vivi, Nil e Adri, amigas de coração.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Alimentos da Unicamp, em especial ao Seu Aparecido.

Aos colegas dos Laboratórios de Engenharia de Processos e de Medidas Físicas do Departamento de Engenharia de Alimentos, em especial a Denise, pela ajuda na utilização dos instrumentos de análise.

A todos os amigos que fiz aqui em Campinas e aqueles que deixei no RS que torceram pelo meu êxito e cuja amizade permanecerá para sempre guardada em meu coração.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxv
Lista de Abreviaturas e Siglas	xxxiii
Nomenclatura	xxxvii
RESUMO	xli
ABSTRACT	xlili
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
2.1. Origem, produção e consumo da banana	05
2.2. Banana: histórico e botânica	06
2.3. Transformações químicas da banana no amadurecimento	07
2.3.1. Umidade	08
2.3.2. Carboidratos	08
2.3.3. Sólidos totais e solúveis	09
2.3.4. Enzimas	09
2.4. Banana desidratada	10
2.5. Princípios da secagem em alimentos	13
2.6. Descrição matemática da cinética de secagem	17
2.6.1. Período à taxa constante	18
2.6.2. Período à taxa decrescente	20
2.6.2.1. Modelos teóricos	21
2.6.2.2. Modelos semi-teóricos	23
2.6.2.3. Modelos empíricos	24
2.7. Secagem de alimentos	24
2.8. Secagem a altas temperaturas	25
2.9. Puffing	26
2.10. Secagem de banana com puffing	27
2.11. Atividade de água (a_w)	28

2.12. Crocância	28
2.13. Grau de reidratação	33
2.14. Planejamento experimental	35
3. MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1. Material	41
3.1.1. Frutas comerciais liofilizadas	41
3.1.2. Banana <i>in natura</i> :matéria-prima	42
3.1.3. Caracterização dos equipamentos	42
3.1.3.1. Secador vertical de fluxo ascendente	42
3.1.3.2. Balança analítica	44
3.1.3.3. Medidor da umidade relativa do ar atmosférico	44
3.2. Métodos	44
3.2.1. Análises realizadas nas frutas comerciais liofilizadas	44
3.2.2. Análises realizadas na banana <i>in natura</i>	44
3.2.2.1. Grau de maturação	44
3.2.2.2. Sólidos solúveis (grau Brix)	45
3.2.2.3. Conteúdo de umidade	45
3.2.2.4. Preparação da matéria-prima	46
3.2.3. Testes preliminares dos ensaios de secagem	47
3.2.3.1. Medidas de grau Brix	47
3.2.3.2. Fornecedores da matéria-prima	47
3.2.3.3. Agitação das amostras	47
3.2.3.4. Tempo e temperatura de pré-secagem	47
3.2.3.5. Tempo e temperatura da etapa HTST	48
3.2.3.6. Crocância das amostras dos testes preliminares	48
3.2.3.7. Relação entre a umidade e a atividade de água (a_w)	48
3.2.3.8. Umidade de equilíbrio a 70°C	49
3.2.4. Planejamento experimental	49
3.2.5. Caracterização do processo	51
3.2.5.1. Secagem à etapa HTST	53
3.2.5.2. Secagem à etapa HTST e a 70°C	53
3.2.6. Análises realizadas na banana desidratada	53
3.2.6.1. Atividade de água (a_w)	53
3.2.6.2. Grau de reidratação	54
3.2.6.3. Medida instrumental de textura	54
3.2.6.4. Medida sensorial de crocância	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57

4.1. Frutas comerciais liofilizadas	57
4.2. Testes preliminares dos ensaios de secagem	66
4.2.1. Medidas de grau Brix	68
4.2.2. Fornecedores da matéria-prima	68
4.2.3. Agitação das amostras	69
4.2.4. Tempo e temperatura de pré-secagem	69
4.2.5. Tempo e temperatura da etapa <i>HTST</i>	70
4.2.6. Relação entre a umidade e a atividade de água (a_w)	70
4.2.7. Umidade de equilíbrio a 70°C	73
4.2.8. Condições dos ensaios	74
4.3. Características da matéria-prima	75
4.4. Banana desidratada	76
4.4.1. Atividade de água	76
4.4.2. Grau de reidratação	77
4.4.3. Medida instrumental de textura	81
4.4.4. Medida sensorial de crocância	88
4.4.5. Cinética de secagem	95
4.4.6. Análise estatística do planejamento experimental	103
4.4.6.1. <i>Grau de reidratação</i>	104
4.4.6.2. <i>Medida instrumental de textura</i>	111
4.4.6.3. <i>Medida sensorial de crocância</i>	117
4.4.6.4. <i>Parâmetro k do modelo de Lewis para a secagem completa</i>	120
4.4.6.5. <i>Parâmetro k do modelo de Lewis para a etapa HTST</i>	125
4.4.6.6. <i>Parâmetro k do modelo de Lewis para a etapa a 70°C de todos os ensaios</i>	129
4.4.6.7. <i>Análise global do planejamento experimental</i>	129
4.5. Análises finais	130
5. CONCLUSÕES	133
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	137
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
APÊNDICE A	147
APÊNDICE B	157
APÊNDICE C	167
APÊNDICE D	177

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Escala de cores da banana nanica durante seu estágio de maturação	12
Figura 2.2	Curvas típicas de secagem de um sólido úmido	14
Figura 3.1	Secador utilizado	42
Figura 3.2	Banana in natura cortada e disposta na bandeja	46
Figura 3.3	Fluxograma do processo de secagem	52
Figura 4.1	Histograma da freqüência das notas dadas pelos provadores em relação à escala utilizada	57
Figura 4.2	Curva típica de força-deformação do abacaxi comercial liofilizado	59
Figura 4.3	Curva típica de força-deformação da banana comercial liofilizada	61
Figura 4.4	Curva típica de força-deformação da maçã comercial liofilizada	63
Figura 4.5	Relação entre a umidade final e a atividade de água de amostras de banana submetidas a uma corrente de ar a 70°C	71
Figura 4.6	Aspecto da casca da banana utilizada nos ensaios de secagem	75
Figura 4.7	Grau de reidratação versus tempo de imersão das amostras em água em ebulição	79
Figura 4.8	Curvas típicas de força-deformação de uma replicata de cada um dos oito ensaios	83
Figura 4.9	Histograma da freqüência das notas dadas pelos provadores em relação à escala utilizada	89
Figura 4.10	Porcentagem da distribuição das notas para a atitude de compra das amostras avaliadas	91

Figura 4.11	Histograma da freqüência das notas dadas pelos provadores em relação à escala utilizada, para a banana desidratada neste estudo e para a banana comercial liofilizada	94
Figura 4.12	Taxa de umidade pós-HTST versus umidade em base seca	101
Figura 4.13	Superfície de resposta para o grau de reidratação a 10 minutos	109
Figura 4.14	Curvas de nível para o grau de reidratação a 10 minutos	109
Figura 4.15	Superfície de resposta para a força máxima	115
Figura 4.16	Curvas de nível para a força máxima	117
Figura 4.17	Superfície de resposta para o parâmetro k do modelo de Lewis para a secagem completa	123
Figura 4.18	Curvas de nível para o parâmetro k do modelo de Lewis para a secagem completa	123
Figura 4.19	Superfície de resposta para o parâmetro k do modelo de Lewis para a etapa HTST	127
Figura 4.20	Curvas de nível para o parâmetro k do modelo de Lewis para a etapa HTST	127
Figura A1	Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 1 (130°C-9min)	149
Figura A2	Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 2 (150°C-9min)	149
Figura A3	Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 3 (130°C-15min)	151
Figura A4	Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 4 (150°C-15min)	151
Figura A5	Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 5 (140°C-12min(a))	153
Figura A6	Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 6 (140°C-12min(b))	153

Figura A7	Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 7 (140°C-12min(c))	155
Figura A8	Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 8 (70°C)	155
Figura B1	Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 1 (130°C-9min)	159
Figura B2	Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 2 (150°C-9min)	159
Figura B3	Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 3 (130°C-15min)	161
Figura B4	Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 4 (150°C-15min)	161
Figura B5	Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 5 (140°C-12min(a))	163
Figura B6	Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 6 (140°C-12min(b))	163
Figura B7	Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 7 (140°C-12min(c))	165
Figura B8	Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 8 (70°C-9,78 horas)	165
Figura C1	Ajuste do modelo de Lewis para a etapa HTST do ensaio 1 (130°C-9min)	169
Figura C2	Ajuste do modelo de Lewis para a etapa HTST do ensaio 2 (150°C-9min)	169
Figura C3	Ajuste do modelo de Lewis para a etapa HTST do ensaio 3 (130°C-15min)	171
Figura C4	Ajuste do modelo de Lewis para a etapa HTST do ensaio 4 (150°C-15min)	171
Figura C5	Ajuste do modelo de Lewis para a etapa HTST do ensaio 5 (140°C-12min(a))	173

Figura C6	Ajuste do modelo de para a etapa HTST do ensaio 6 (140°C-12min(b))	173
Figura C7	Ajuste do modelo de para a etapa HTST do ensaio 7 (140°C-12min(c))	175
Figura D1	Ajuste do modelo de para a etapa a 70°C do ensaio 1 (130°C-9min)	179
Figura D2	Ajuste do modelo de para a etapa a 70°C do ensaio 2 (150°C-9min)	179
Figura D3	Ajuste do modelo de para a etapa a 70°C do ensaio 3 (130°C-15min)	181
Figura D4	Ajuste do modelo de para a etapa a 70°C do ensaio 4 (150°C-15min)	181
Figura D5	Ajuste do modelo de para a etapa a 70°C do ensaio 5 (140°C-12min(a))	183
Figura D6	Ajuste do modelo de para a etapa a 70°C do ensaio 6 (140°C-12min(b))	183
Figura D7	Ajuste do modelo de para a etapa a 70°C do ensaio 7 (140°C-12min(c))	185

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição química da banana nanica, expressa em percentagem na polpa fresca, determinada no estado Maduro	09
Tabela 2.2	Escala de maturação de banana, segundo o aspecto e os teores de amido e de açúcar	11
Tabela 2.3	Tabela de Análise de Variância (ANOVA)	38
Tabela 3.1	Planejamento Experimental Fatorial 2² com três pontos centrais	50
Tabela 3.2	Valores de temperatura decodificados utilizados no planejamento fatorial 2² com três pontos centrais	50
Tabela 4.1	Médias das notas dos provadores para a aceitação das frutas desidratadas comerciais em relação à crocância ($p < 0,05$)	57
Tabela 4.2	Resultados das médias de força máxima e deformação na força máxima para cada uma das frutas comerciais liofilizadas	65
Tabela 4.3	Condições de ensaio dos testes preliminares	66
Tabela 4.4	Observações feitas ao final de cada teste preliminar	67
Tabela 4.5	Medidas de umidade relativa e temperaturas	73
Tabela 4.6	Condições da matéria-prima utilizada em cada ensaio de secagem	76
Tabela 4.7	Valores de atividade de água das amostras ao final de cada ensaio	77
Tabela 4.8	Comparação entre os graus de reidratação encontrados para as diferentes condições de ensaio	78

Tabela 4.9	Medidas de força máxima para todos os ensaios realizados	82
Tabela 4.10	Medidas de deformação na força máxima para todos os ensaios realizados	82
Tabela 4.11	Médias de aceitação das amostras de todos os ensaios em relação à crocância	88
Tabela 4.12	Médias de aceitação das amostras de todos os ensaios e da banana comercial liofilizada em relação à crocância	93
Tabela 4.13	Parâmetros cinéticos do modelo Lewis para a secagem completa	95
Tabela 4.14	Parâmetros cinéticos do modelo de Lewis para a etapa HTST	97
Tabela 4.15	Parâmetros cinéticos do modelo de Lewis para a etapa a 70°C	99
Tabela 4.16	Matriz decodificada do planejamento experimental e suas respectivas variáveis de resposta	104
Tabela 4.17	Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para o grau de reidratação a 10 minutos	105
Tabela 4.18	Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para o grau de reidratação a 5 minutos	105
Tabela 4.19	Análise de variância para o grau de reidratação a 10 minutos	106
Tabela 4.20	Análise de variância para o grau de reidratação a 5 minutos	106

Tabela 4.21 Erro relativo médio entre os valores previstos pelo modelo e os dados experimentais para o grau de reidratação a 10 minutos	107
Tabela 4.22 Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para a força máxima	111
Tabela 4.23 Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para a deformação na força máxima	112
Tabela 4.24 Análise de variância para a força máxima	112
Tabela 4.25 Análise de variância para a deformação na força máxima	113
Tabela 4.26 Erros relativos médios entre os valores previstos pelo modelo e os dados experimentais para a força máxima e a deformação na força máxima	113
Tabela 4.27 Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para as médias de aceitação das amostras de todos os ensaios	119
Tabela 4.28 Análise de variância para as médias de aceitação das amostras de todos os ensaios	119
Tabela 4.29 Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para o parâmetro k da secagem completa	120
Tabela 4.30 Análise de variância para o parâmetro k da secagem completa	120
Tabela 4.31 Erro relativo médio entre os valores previstos pelo modelo e os dados experimentais para o parâmetro k da secagem completa	121
Tabela 4.32 Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para o parâmetro k da etapa HTST	125

Tabela 4.33 Análise de variância para o parâmetro k da etapa HTST ____125

Tabela 4.34 Erro relativo médio entre os valores previstos pelo modelo e os dados experimentais para o parâmetro k da etapa HTST ____126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

bu	bulbo úmido
bs	bulbo seco
cr	crítico
X_{cr}	teor de água crítico
gH ₂ O/gms	gramas de água por gramas de matéria seca
<i>HTST</i>	<i>High Temperature and Short Time</i> (alta temperatura e curto tempo)
A.O.A.C.	Association of Official Analytical Chemists
a_w	atividade de água
min	minutos
R1	replicata 1
R2	replicata 2
R3	replicata 3
R4	replicata 4
\hat{y}	resposta do processo
b_0, b_1, b_2, b_{12}	coeficientes estimados do modelo estatístico proposto
T	variável codificada de temperatura da etapa <i>HTST</i> (°C)
tempo	variável codificada de tempo da etapa <i>HTST</i> (min)
ANOVA	Análise de Variância
R	coeficiente de correlação
R^2	coeficiente de determinação
SQ	Soma quadrática
SQ _r	Soma quadrática devido à regressão
SQ _r	Soma quadrática devido aos resíduos

SQT	Soma quadrática total
GL	Graus de liberdade
GLr	Graus de liberdade da regressão
GLR	Graus de liberdade dos resíduos
MQ	Média quadrática
MQr	Média quadrática da regressão
MQR	Média quadrática dos resíduos
D.M.S.	diferença mínima significativa
teste F	teste de Fischer
Fcal	valor calculado do teste F
Ftab	valor tabelado do teste F
GR10	grau de reidratação a 10 minutos
GR5	grau de reidratação a 5 minutos
FMAX	força máxima
DEF	deformação na força máxima
SENS	média das notas da análise sensorial
ktotal	parâmetro k do modelo de Lewis para a secagem total
kHTST	parâmetro k do modelo de Lewis para a etapa HTST
k70	parâmetro k do modelo de Lewis para a etapa a 70°C
x ₁	T (Temperatura HTST)
x ₂	tempo (tempo HTST)
x ₁ x ₂	Txtempo (chamada de interação temperatura-tempo HTST)

NOMENCLATURA

h	coeficiente de transferência de calor externo ($\text{kJ/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$)
T_g	temperatura do ar ($^\circ\text{C}$)
T_{bu}	temperatura de bulbo úmido do ar ($^\circ\text{C}$)
N_a	fluxo mássico de água (kg/h m^2)
$\lambda_{T_{bu}}$	entalpia de vaporização da água à T_{bu} (kJ/kg)
dX/dt e $\partial x/\partial t$	taxa de secagem ($\text{gH}_2\text{O} / \text{gms.h}$)
A	área de transferência de calor (m^2)
K_g	coeficiente global de transferência de massa (kg/hm^2)
P_w	pressão de vapor de água na temperatura de bulbo úmido do ar de secagem (N/ m^2)
P_{wa}	pressão parcial do vapor de água no ar de secagem (N/m^2)
D	coeficiente de difusão (m^2/s)
X^*	adimensional de umidade
X_o	umidade inicial do sólido, base seca ($\text{gH}_2\text{O} / \text{gms}$)
$X(t)$	umidade do sólido a cada tempo, base seca ($\text{gH}_2\text{O} / \text{gms}$)
X_e	umidade de equilíbrio, base seca ($\text{gH}_2\text{O} / \text{gms}$)
t	tempo de secagem (h)
r	raio ou espessura do sólido (m)

D_{ef}	difusividade efetiva (m^2/s)
k	constante de secagem do modelo de Lewis
GR	grau de reidratação (expresso em porcentagem de água absorvida)
m_i	massa inicial da amostra seca (g)
m_f	massa final da amostra seca após a imersão (g)
E	erro relativo médio (%)
m_i	valores experimentais de cada variável de resposta
m_p	valores previstos pelo modelo estatístico para cada variável de resposta
X_{bu}	umidade em base úmida (gH ₂ O/gms)
X_{bs}	umidade em base seca (gH ₂ O/gms)
$m_{água}$	massa de água (g)
m_{seca}	massa da amostra seca (g)
FMAX	força máxima (N)
DEF	deformação na força máxima (adimensional)
URar	umidade relativa do ar atmosférico (%)
URars	umidade relativa do ar de secagem (%)
Tar	temperatura do ar atmosférico (°C)

RESUMO

Este trabalho estudou o processo de obtenção de banana nanica crocante através da secagem a altas temperaturas e curto período de tempo (*HTST – High Temperature and Short Time*). O processo consistiu de um pré-tratamento a 70°C durante 5 minutos, de uma etapa à alta temperatura (130°C, 140°C e 150°C) e curto tempo (9, 12 e 15 minutos) e de uma etapa à temperatura de 70°C até atividade de água em torno de 0,320. De modo a verificar a influência da etapa *HTST* no processo, montou-se um planejamento experimental fatorial 2² com 3 pontos centrais, cujas respostas do processo foram o grau de reidratação, o parâmetro k do modelo de Lewis (para a etapa *HTST*, 70°C e secagem completa) e a crocância, avaliada por medidas sensoriais e instrumentais de textura. O planejamento experimental resultou numa matriz com as condições de ensaios de 130°C-9min, 130°C-15min, 150°C-9min, 150°C-15min e três pontos centrais a 140°C-12min. Banana crocante foi obtida com as condições de 140°C-12min e 150°C-15min de etapa *HTST*, com atividade de água de 0,345 e 0,363, respectivamente. Os resultados mostram que o melhor grau de reidratação ocorreu para os tempos de 10 e 5 minutos e que existe uma significativa relação entre a crocância e a temperatura da fase *HTST*. Não foi possível encontrar um ajuste adequado ao parâmetro k do modelo de Lewis para a etapa *HTST* e a 70°C, porque as umidades iniciais eram diferentes e promoveram grande diferença nos valores desse parâmetro. Adicionalmente, caracterizou-se a crocância de frutas comerciais liofilizadas e determinou-se a a_w . Os resultados obtidos para a banana comercial liofilizada foram comparados com os da banana desidratada obtida neste estudo. As medidas instrumentais e sensoriais mostraram que ambas foram consideradas crocantes.

ABSTRACT

We present here a study about producing crispy banana using a *HTST* (*High Temperature Short Time*) process. The process involves pretreatment of the fruit during 5 minutes at 70°C, a dry *HTST* stage (130, 140 and 150°C and 9, 12 and 15 minutes) and, finally, a dry stage at 70°C until the water activity (a_w) is near 0,300. In order to evaluate the *HTST* stage in the process, we used a factorial 2^2 design with 3 center points. The results produced by this analysis were the rehydration degree, the model parameter of Lewis k (considering either the complete process, the *HTST* stage and the dry stage at 70°C). Also, crispness was analyzed according to sensorial and instrumental measurements. This process generated a matrix containing the results of several trial runs for the following settings: 130°C-9min, 130°C-15min, 150°C-9min, 150°C-15min and 3 center points at 140°C-12min. Crispy banana was obtained only with 140°C-12min and 150°C-15min, where $a_w = 0,345$ and $a_w = 0,363$, respectively. The results show that the best rehydration degree occurs for 10 and 5 minutes. Also, there exists a relationship between the crispness (sensorial and instrumental) and the *HTST* stage. However, it was not possible to find a suitable value to the Lewis Model parameter k to *HTST* and 70°C dry stages. This is because the initial moisture of the fruits was not the same for all tests, which produced different values for k. In addition, we evaluated the crispness of commercial freeze-dried fruits and the water activity value. Finally, we compared measurements of the commercial banana with the dried banana obtained in this work. Both were considered crispy.

1. INTRODUÇÃO

O consumo e a produção de frutas desidratadas vêm crescendo nos últimos anos devido a não adição de açúcares e aditivos a sua formulação, o que lhes confere, muitas vezes, a qualificação de "natural".

A banana desidratada está entre as frutas secas mais tradicionais, cuja produção vem crescendo nos últimos anos. Como produto semi-industrializado a banana desidratada é consumida como banana-passa, podendo ser utilizada como ingrediente de bombons e de misturas de cereais "matinais" ou "em barra".

Sendo o Brasil um dos maiores produtores mundiais de banana, torna-se imprescindível a busca de alternativas econômicas para o aproveitamento do excedente de produção.

A produção de banana desidratada é uma das alternativas de aproveitamento da fruta, cujo processo é relativamente simples, constando das etapas de limpeza, seleção, descasque, branqueamento (opcional), desidratação (osmótica, secagem e/ou liofilização) e embalagem. A etapa de desidratação exige atenção especial por representar a maior demanda energética do processo e por ser responsável, em grande parte, pelas características físicas e sensoriais do produto final, como por exemplo, a crocância.

Recentemente tem sido colocada no mercado a banana crocante, desidratada por liofilização. Outra maneira de se obter a crocância na banana desidratada é a partir de secagem utilizando ar aquecido a altas temperaturas durante curto período de tempo (*HTST – High Temperature and Short Time*) na fase inicial de secagem, seguida de secagem convencional à média temperatura.

Estudos utilizando *HTST* têm se mostrado uma alternativa para reduzir o tempo total de secagem, eliminar a etapa anterior de branqueamento e propiciar melhores características sensoriais ao produto final, em especial aquelas que definem a **crocância**. Nesses estudos, mais do que a determinação das condições ótimas de processo, é necessária a ênfase na compreensão dos fenômenos de transferência de calor e massa, com a conseqüente determinação e análise dos parâmetros e propriedades relativos à operação de secagem.

Como a quantificação da **crocância** e suas sensações associadas são complexas e incompletas, muitos autores procuram relacionar esta característica com medidas instrumentais de textura, análise sensorial, registros acústicos, dureza, força necessária para romper o alimento, entre outros. Isso mostra que ainda não existe uma definição para a **crocância**, o que faz com que a compreensão da relação entre a percepção da textura do alimento e a estrutura do mesmo adquira grande importância para melhorar a compreensão desta característica.

Levando em consideração todos esses fatores, o presente trabalho estudou o processo de secagem de banana nanica a alta temperatura e curto tempo com o objetivo geral de encontrar relações entre os parâmetros cinéticos da transferência de umidade no sólido, submetido a diferentes tempos e temperaturas na etapa *HTST*, com o grau de reidratação e a **crocância** da fruta desidratada, esta avaliada por medidas instrumentais de textura e por análise sensorial.

Os objetivos específicos foram:

- ✓ Caracterizar a **crocância** de frutas comerciais (banana, abacaxi e maçã) liofilizadas, através de medidas instrumentais de textura e de análise sensorial, de modo a identificar qual o padrão de uma fruta desidratada, considerada **crocante**, colocada à venda no mercado.

- ✓ Definir um planejamento experimental visando o estudo das variáveis tempo e temperatura da etapa de secagem *HTST* no processo de obtenção de banana nanica crocante.

- ✓ Realizar ensaios de secagem com etapa *HTST* com diferentes tempos e temperaturas até atividade final próximo a 0,300, medindo ao final da secagem o grau de reidratação das amostras e caracterizando a crocância através de análise sensorial e medidas instrumentais de textura.

- ✓ Identificar valores de tempo e temperatura da etapa *HTST* capazes de promover a propriedade de crocância na banana nanica desidratada.

- ✓ Utilizar o modelo de Lewis para ajustar os dados experimentais dos ensaios de secagem, verificando a relação entre o parâmetro k deste modelo e a propriedade de crocância.

- ✓ Comparar os resultados das análises feitas na banana comercial liofilizada com os resultados obtidos para a banana desidratada neste estudo de secagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Origem, produção e consumo da banana

Embora seja originária do sul da Ásia, adaptou-se muito bem ao solo e clima do continente americano, se tornando símbolo dos países tropicais e a fruta mais popular do Brasil (CEASA-CAMPINAS, 2002).

O maior produtor mundial é a Índia, seguida pelo Brasil, Equador, Costa Rica e México. Contudo, a maior produtividade pertence à Nicarágua, com 46,8 toneladas por hectare. Entretanto, o Brasil possui a maior superfície cultivada do mundo, com cerca de 527 mil hectares (NASCIMENTO; RODRIGUES, 2003).

A banana faz parte do hábito alimentar das populações mais carentes devido a seu baixo custo e alto grau de calorias. Cem gramas de banana fornecem, em média, 87 calorias. A banana é rica em açúcares, fibras, niacina, cálcio, fósforo e, principalmente, potássio. Seus hidratos de carbono (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 à maçã, além de razoáveis quantidades de vitaminas A, B₁ e B₂ (CEASA-CAMPINAS, 2002; PRODAM, 2003).

No mundo o consumo médio anual está em 11,2 kg per capita. O Brasil é um dos maiores mercados consumidores da banana, com um consumo médio anual estimado em 30,3 kg per capita. Colhe anualmente cerca de 570 milhões de cachos, o que corresponde a um volume de 15 milhões de toneladas em uma área plantada de cerca de 527 mil hectares. Destacam-se as regiões nordeste e sudeste como as maiores produtoras nacionais, com as maiores plantações de banana localizadas nos estados do Ceará, Bahia, São Paulo, Pernambuco, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Santa Catarina. São Paulo, o terceiro

maior produtor depois da Bahia e do Pará, colhe 900 mil toneladas em 45 mil hectares, empregando mais de vinte mil pessoas. A produção está concentrada no Vale do Ribeira e Litoral Sul, destacando-se Cajati (12,7%), Miracatu (10,6%), Juquiá (9,6%), Itariri (8,4%) e Itanhaém (8,2%). A banana responde por mais de 60% do valor da produção agrícola regional, sendo sua principal atividade econômica. Além de ser a fruta mais cultivada, é a base de quase todo comércio e exportação da fruticultura brasileira. A tendência no país é aumentar a exportação, embora ainda haja espaço para o crescimento do consumo no mercado interno (CEASA-CAMPINAS, 2002; NASCIMENTO;RODRIGUES, 2003; BENASSI, 2003; FONSECA *et.al.*, 2003).

2.2.Banana: histórico e botânica

O gênero *Musa*, ao qual pertencem as bananeiras, criado por Lineu em homenagem a Antonius Musa, médico de Otávio Augusto, o primeiro imperador de Roma (63-14 a.c.), ocupa lugar de destaque dentro do conjunto de frutas consumidas pelo homem, principalmente pelo grande valor econômico de algumas cultivares produtoras de fruta (MEDINA *et al.*, 1985). A história conta que, antes mesmo do descobrimento do Brasil, tipos da fruta já serviam de alimento para os índios que habitavam este país. No entanto, as produzidas atualmente (nanica, maçã, prata, da terra e ouro) desembarcaram em solo brasileiro no século 16, trazidas possivelmente do arquipélago de São Tomé e Príncipe, no Golfo da Guiné, e das ilhas de Cabo Verde, pelas mãos de navegantes portugueses que, ao procurarem uma rota para as Índias, saborearam a banana em Guiné e determinaram que cada lugar colonizado cultivaria a fruta (NASCIMENTO;RODRIGUES, 2003).

Quanto à classificação botânica da banana, parte-se da família *Musaceae*, um membro da ordem *Scitamineae*, subdivisão *Monocotyledoneae*, que compreende três subfamílias: *Musoideae*, *Strelitzoideae* e *Heliconoideae*. A primeira compõe-se de dois gêneros: *Musa* e *Ensete*. Ao gênero *Musa*, que

abrange entre 24 a 30 espécies, é que se filiam todas as cultivares produtoras de frutos comestíveis de polpa abundante e completamente desprovidos de sementes (MEDINA *et al.*, 1985).

Medina *et al.* (1985) destacam a seção *Emusa* (ou simplesmente *Musa*), com 10 espécies de distribuição geográfica mais ampla, como a que mais interessa, pois apresenta uma considerável variabilidade, especialmente através das numerosas subespécies de *acuminata*. Por isso, das espécies desta seção, a mais importante é a *Musa acuminata* Colla, porque foi ela a origem de todas as bananeiras de frutos comestíveis, quer sozinha, quer com a participação de outra espécie desta seção, a *Musa balbisiana* Colla, originando híbridos dessas espécies. Grande parte das cultivares de banana apresenta genomas de *M. acuminata* e *M. balbisiana*, tornando-se praticamente impossível dizer qual a verdadeira espécie da banana cultivada. Para contornar este problema, foi desenvolvido um sistema chamado de grupamento genômico, caracterizado pelas letras A e B, respectivamente, oriundas de *M. acuminata* e *M. balbisiana*. Assim, a banana deve ser referida como *Musa*, seguido do "Grupo Genômico". Se em uma cultivar existem mutações interessantes, que venham constituir uma ou várias novas cultivares, para este conjunto semelhante de genótipos usa-se o termo Subgrupo. No caso da banana nanica, esta pertence ao grupo genômico AAA e subgrupo *Cavendish* de *Musa acuminata* Colla (EMBRAPA, 2003).

No Nordeste, a banana nanica é conhecida pelo nome de *baé* e, no Rio Grande do Sul, por *caterra*. Outros nomes pelos quais é conhecida no Brasil são: banana d'água, verde, anã, cambota e banana-da-china (MEDINA *et al.*, 1985; PRODAM, 2003).

2.3. Transformações químicas da banana no amadurecimento

Segundo Medina *et al.* (1985) as transformações que ocorrem na constituição da banana durante a maturação têm sido objeto de constantes

estudos nos diversos centros de pesquisa do mundo, procurando-se obter um resultado satisfatório sobre o comportamento da fruta em todo o processo, desde o transporte até a sua maturação, o que é de grande importância, tanto para o mercado de fruta fresca quanto para a indústria.

2.3.1.Umidade

Durante a maturação, a umidade da polpa aumenta ligeiramente devido às transformações que os carboidratos sofrem, e é utilizada na hidrólise do amido.

Em geral, o conteúdo de umidade da polpa da banana verde é em média 70%, que se eleva para 75% quando completamente madura (MEDINA *et al.*, 1985).

2.3.2.Carboidratos

A alteração mais perceptível em relação à maturação da banana, que ocorre na polpa, é a transformação do amido em açúcares.

A banana verde contém um alto teor de amido, que se situa em torno de 20% e, durante a maturação, são convertidos em açúcares pela ação enzimática (amilase).

Há uma diminuição dos carboidratos totais em todas as cultivares durante o amadurecimento, devido à utilização de parte da glicose na respiração .

Ocorrem variações de glicose e sacarose durante a maturação da banana entre as diferentes cultivares. A Tabela 2.1 apresenta a composição química da

banana nanica no estágio de maturação com cerca de 23°Brix (MEDINA *et al.*, 1985).

Tabela 2.1: Composição química da banana nanica, expressa em percentagem na polpa fresca, determinada no estado maduro

Composição química	(%)
Água	74,12
Amido	2,95
Glicose	13,44
Sacarose	5,72
Mat. Graxas	0,90
Mat. Protéico	1,31
Celulose	0,32
Mat. Tânicas	0,63
Cinzas	0,61

Fonte: MEDINA *et al.*, 1985

2.3.3.Sólidos totais e solúveis

Os sólidos totais da banana apresentam uma pequena redução à medida que a fruta amadurece, o que se atribui a uma absorção de água pela polpa. No entanto, os sólidos solúveis aumentam rapidamente com a maturação da fruta, devido à degradação do amido em açúcares solúveis (MEDINA *et al.*, 1985).

2.3.4.Enzimas

Na banana são encontradas as seguintes enzimas: peroxidase, fenolase, catalase, oxidases do ácido ascórbico. Medina *et al.* (1985) destacam que a atividade dessas enzimas oxidantes, que atuam durante a elaboração do produto, em conjunto com outros componentes da polpa, como os açúcares, favorecem o

escurecimento do produto industrializado, o que é um sério problema enfrentado pelas indústrias.

2.4. Banana desidratada

A banana desidratada é produzida mais comumente de banana nanica ou nanicão. Trata-se de um produto industrializado cuja produção vem crescendo anualmente, mas com volume de comercialização nacional ainda desconhecido.

Pode ser classificada entre os produtos de elevado valor alimentício, facilmente assimilável e constituindo uma fonte de energia ativa, isso devido ao seu alto teor de açúcares. Seu valor energético é aproximadamente de 310 calorias em 100g, podendo ser comparado ao das tâmaras (316 cal/100g) e ao dos figos (300 cal/100g). Geralmente as dificuldades na desidratação da banana madura residem no fato dela apresentar propriedades termoplásticas quando aquecida. O produto obtido é altamente higroscópico, pelo alto teor de açúcares que apresenta (cerca de 85%), e de difícil conservação, por ser altamente susceptível a reações enzimáticas e não-enzimáticas, quando em presença de oxigênio (MEDINA *et al.*, 1985).

O grau de maturação da banana deverá ser uniforme para todo lote a ser desidratado e recomenda-se o estágio 7 da escala apresentada na Tabela 2.2, em que os frutos se apresentam com teor máximo de açúcares e um mínimo de amido, sem, porém apresentarem manchas translúcidas e pardas na polpa, como é o caso de estágio correspondente ao nível 8, que proporciona ao produto seco um aspecto manchado e pouco atrativo (MEDINA *et al.*, 1985).

Tabela 2.2: Escala de maturação de banana, segundo o aspecto e os teores de amido e de açúcar

Estádio - Aspecto da fruta	Amido (%)	Açúcar (%)
1 – Fruta verde	21,5 – 19,5	0,1 – 2,0
2 – Fruta verde com traços amarelos	19,5 – 16,5	2,0 – 5,0
3 – Fruta mais verde que amarela	18,0 – 14,5	3,5 – 7,0
4 – Fruta mais amarela que verde	15,0 – 9,0	6,0 – 12,0
5 – Fruta amarela, extremidade verde	10,5 – 2,5	10,0 – 18,0
6 – Fruta inteiramente amarela	4,0 – 1,0	16,5 – 19,5
7 – Fruta amarela com pequenas manchas pardas	2,5 – 1,0	17,5 – 19,0
8 – Fruta amarela com grandes manchas pardas	1,5 – 1,0	18,5 – 19,0

Fonte: MEDINA *et al.*, 1985

A Figura 2.1 ilustra o aspecto da fruta até o estágio 7, indicado na Tabela 2.2.

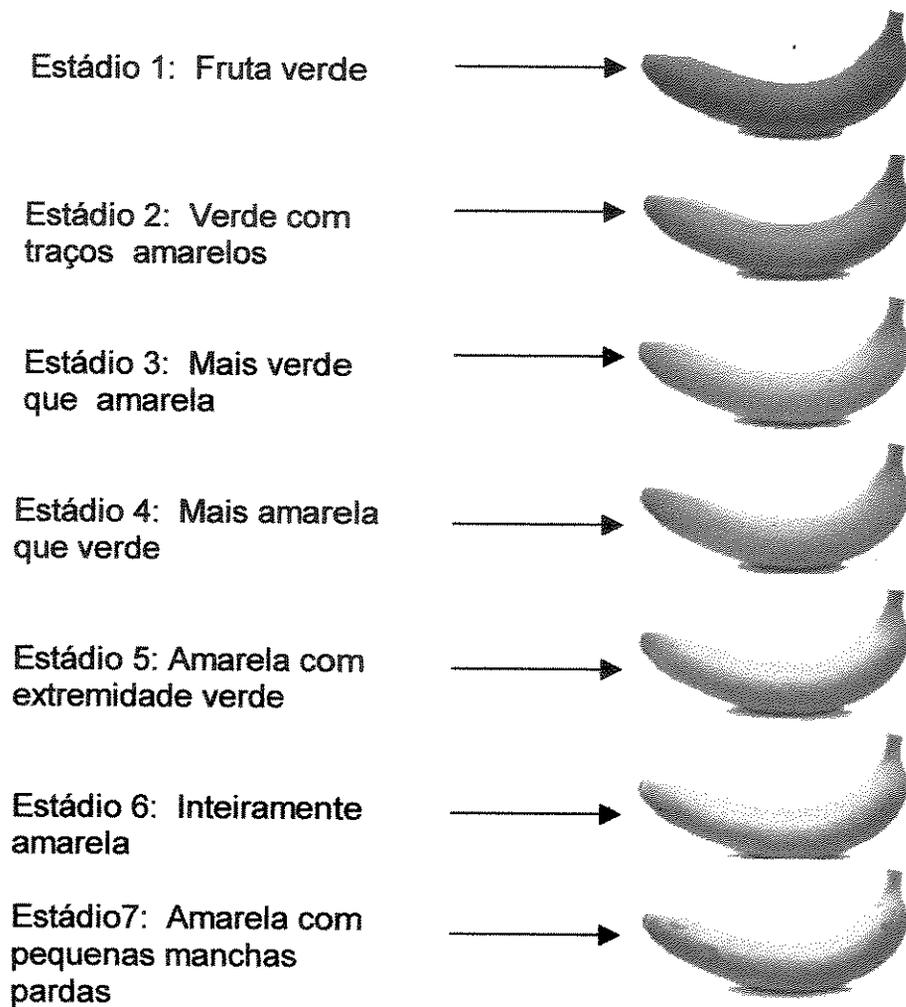


Figura 2.1: Escala de cores da casca da banana nanica durante seu estágio de maturação

Fonte: CEASA-CAMPINAS, 2002

No caso da banana, a secagem mais comumente utilizada pela indústria é efetuada em secador dotado de circulação forçada de ar quente, operando sob condições constantes de temperatura e velocidade do ar, que podem ser de 70°C e 2,5 m/s, respectivamente. As bandejas são carregadas, à razão de aproximadamente 14 Kg/m² de bandeja com bananas inteiras e de 4 Kg/m² com rodela de 8 mm de espessura. Nessas condições, o tempo de secagem para uma

umidade final de 20% em base úmida é de aproximadamente 24 horas para a banana inteira e de 5 horas para rodela (FONSECA *et. al.*, 2003).

Segundo pesquisadores do Centro de Tecnologia de Hortifrútiolas (Frutotec-Ital), nem todas as variedades de banana são adequadas à produção de passa. As mais indicadas são nanica, prata e ouro, ou seja, as de maior teor de açúcar quando maduras. Normalmente, a secagem de banana-passa é feita em estufa, com circulação de ar aquecido a 65°C entre bandejas, onde as bananas são acomodadas uma ao lado da outra, em fileiras. O tempo de secagem é de aproximadamente de 24 horas para atingir o ponto de fruta passa, com cerca de 21% a 23% de umidade. O ponto final da secagem poderá ser determinado, na prática, observando as características pela aparência, tato ou degustação. A embalagem adequada para estocar as passas de banana são sacos plásticos de polietileno, colocados em tamboretas ou caixas de papelão (AGUIRRE, 2001).

Dos produtos provenientes da industrialização da banana madura, os desidratados até um teor de umidade ao redor de 3% constituem os mais difíceis de ser obtidos e de conservar as qualidades durante o armazenamento. A embalagem para esse tipo de produto deve ser impermeável ao vapor de água e oxigênio, pois, além de higroscópico, o produto é extremamente sensível ao oxigênio, nas suas características de sabor e aroma (MEDINA *et al.*, 1985).

2.5.Princípios da secagem em alimentos

Denomina-se secagem o processo de remoção de umidade de um sólido (produto), através da evaporação da água presente no mesmo, pelo fornecimento de calor (McCORMICK *et. al.*, 1983). Dependendo do meio de aquecimento, existem várias possibilidades de secagem. Destacam-se a secagem a ar quente, a ar desumidificado, secagem por liofilização, por microondas e secagem por contato direto.

No caso de secagem utilizando ar quente, ocorre uma transferência de calor do ar para o produto sob o efeito da diferença de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor d'água existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de matéria (massa) para o ar na forma de vapor de água. Assim, a umidade do produto (X), sua temperatura (T) e a taxa de secagem (dX/dt) podem ser representados em função do tempo de secagem e geralmente caracterizam três períodos de secagem, como mostra a Figura 2.2 (PARK; BROD; ALONSO, 1999).

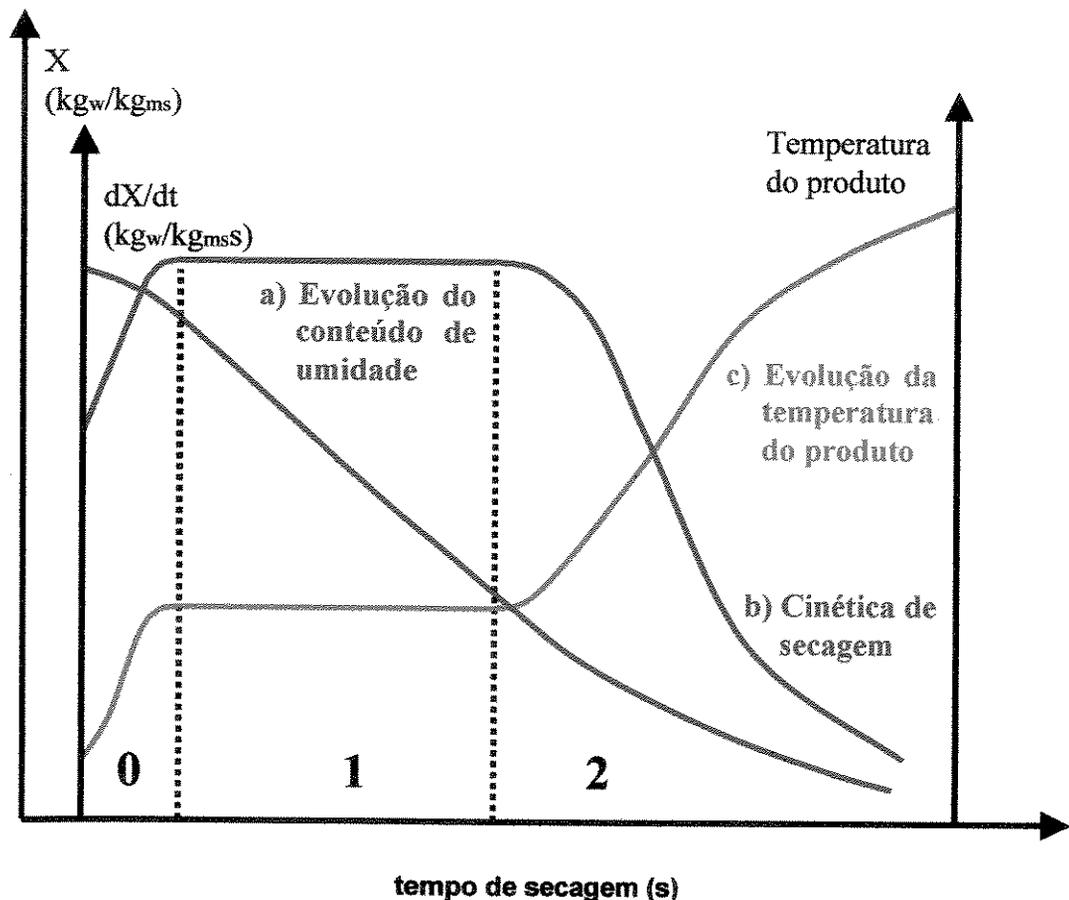


Figura 2.2: Curvas típicas de secagem de um sólido úmido

Fonte: PARK; BROD; ALONSO, 1999

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (conteúdo de umidade do produto, $X = X_{bs}$, em relação à evolução do

tempo de secagem (t)), ou seja, é a curva obtida pesando o produto durante a secagem numa determinada condição de secagem.

A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto (variação do conteúdo de umidade do produto por tempo, dX/dt , em relação à evolução do tempo (t)), isto é, esta é a curva obtida diferenciando a curva (a).

A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto (T) em relação à evolução do tempo (t)). É a curva obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem.

O **período 0** é o período de indução ou de entrada no regime operacional. No começo, o produto é geralmente mais frio do que o ar, e a pressão parcial de vapor da água na superfície do produto (p) é baixa e, por consequência, a transferência de massa e a velocidade de secagem também são baixas. O calor chegando em excesso acarreta uma elevação da temperatura do produto e provoca um aumento de pressão e da velocidade de secagem. Este fenômeno continua até que a transferência de calor compense a transferência de massa. Se a temperatura do ar for inferior àquela do produto, esta última diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio. A duração deste período é insignificante em relação ao período total de secagem.

O **período 1** é o de velocidade (taxa) constante de secagem. Durante este período, como no anterior, a quantidade de água disponível dentro do produto é bem grande e esta evapora-se como água livre. A pressão de vapor de água na superfície é constante e igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A temperatura do produto, por sua vez, é também constante e igual à temperatura de bulbo úmido, característica do fato de que as transferências de calor e de massa se compensam exatamente. A velocidade de secagem é, por conseguinte, constante. Este período continua, enquanto a migração de água do

interior até a superfície do produto seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície.

O período 2 é o de velocidade (taxa) decrescente de secagem. A partir do momento em que a água começa a ser deficiente na superfície, a velocidade de secagem diminui. Segundo Park, Brod e Alonso (1999), apesar de alguns autores definirem o valor de teor de água do produto no ponto de transição entre os períodos 1 e 2 como sendo o teor de água crítico (X_{cr}), seria conveniente denominar este ponto como o ponto de inflexão de taxa constante à taxa decrescente de secagem, pois este, longe de ser uma propriedade física do material, é um ponto que depende inclusive das condições operacionais de secagem. Durante esse período, a troca de calor não é mais compensada, conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Durante este período, o fator limitante é a migração interna de água. Esta redução da taxa (velocidade) de secagem é, às vezes, interpretada como uma diminuição da superfície molhada no período 2, mas a interpretação mais freqüente é pelo abaixamento da pressão parcial de vapor de água na superfície. No final deste período, o produto estará em equilíbrio com o ar ($X = X_e$) e a velocidade de secagem é nula (PARK; BROD; ALONSO, 1999).

Dependendo do produto que se está secando, a umidade pode movimentar-se no seu interior por mecanismos diferentes. Dentre os diversos mecanismos prováveis, tem-se (OKADA *et. al.*, 1987; STRUMILO; KUDRA, 1986; PARK; BROD; ALONSO, 1999):

- ✓ Difusão líquida: a definição deste termo foi introduzida por Lewis e assume que a taxa de transferência de umidade é proporcional ao gradiente de concentração de umidade dentro do produto

- ✓ Difusão de vapor: ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura

- ✓ Escoamento de líquido e de vapor: ocorrem devido à diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e alta temperatura. Todas estas considerações, tais como, conteúdo inicial de umidade do material, conteúdo final de umidade que o material pode chegar (umidade de equilíbrio), como a água está relacionada com a estrutura do sólido e como o transporte de água é feito do interior à superfície do sólido durante a secagem, servem para fundamentar o fenômeno de secagem

No entanto, ainda se está longe de estabelecer uma única relação teórica que possibilite generalizações para tratamentos na secagem (PARK; BROD; ALONSO, 1999).

Em geral, cada mecanismo pode predominar num dado período do processo de secagem, sendo substituído por outro no período seguinte. Os mecanismos mais comuns, ou que predominam sobre os demais, são os de difusão, para os materiais amorfos, e de capilaridade, para os porosos. Em sólidos relativamente homogêneos, como os amorfos e fibrosos, a umidade se move em direção à superfície principalmente por difusão. Na secagem, o processo por difusão acontece no período à taxa decrescente (OKADA *et. al.*, 1987).

2.6. Descrição matemática da cinética de secagem

Nos estudos de secagem é necessário descrever o processo matematicamente em termos das velocidades ou taxas de transferência de umidade em função do tempo ou da marcha de secagem, tanto para o período de taxa constante quanto para o período de taxa decrescente.

A velocidade de secagem depende, principalmente, da transferência de calor e da difusão do vapor.

2.6.1. Período à taxa constante

No período de secagem à taxa constante, são as transferências de calor e de massa na interface ar-produto que governam a secagem e fixam a velocidade de secagem. Assim, é grande a quantidade de água disponível e esta se evapora como água livre. A pressão de vapor da água na superfície é constante e igual à pressão de vapor da água pura na temperatura do produto. Esta última é também constante e aproxima-se da temperatura de bulbo úmido do ar circundante, podendo ser considerada igual a esta para efeito de representação matemática (PARK;BROD;ALONSO, 1999; OKADA *et. al.*, 1987).

Todo o calor transferido é utilizado para a evaporação da água e a taxa de secagem pode ser obtida através do balanço de energia envolvendo a transferência de calor do gás para o sólido e a evaporação da água. Logo (OKADA *et. al.*, 1987):

$$\text{calor transferido pelo ar} = \text{energia para evaporação da água} \quad [2.1]$$

Considerando-se que o sólido encontra-se à temperatura de bulbo úmido do ar, a equação 2.1 pode ser expressa como:

$$h (T_g - T_{bu}) = N_a \cdot \lambda_{T_{bu}}$$

ou

$$N_a = h (T_g - T_{bu}) / \lambda_{T_{bu}} \quad [2.2]$$

Onde:

h = coeficiente de transferência de calor externo ($\text{kJ/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$)

T_g = temperatura do ar ($^\circ\text{C}$)

T_{bu} = temperatura de bulbo úmido do ar ($^\circ\text{C}$)

N_a = fluxo mássico de água (kg/h m^2)

$\lambda_{T_{bu}}$ = entalpia de vaporização da água à T_{bu} (kJ/kg)

Quanto à taxa de secagem, esta pode ser calculada através da equação de transferência de massa ou da equação de transferência de calor:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{h.A.(T_g - T_{bu})}{\lambda_{T_{bu}}} = K_g.A.(P_w - P_{wa}) \quad [2.3]$$

Onde:

dX/dt = taxa de secagem ($\text{gH}_2\text{O} / \text{gms.h}$)

A = área de transferência de calor (m^2)

K_g = coeficiente global de transferência de massa (kg/hm^2)

P_w = pressão de vapor de água na temperatura de bulbo úmido do ar de secagem (N/m^2)

P_{wa} = pressão parcial do vapor de água no ar de secagem (N/m^2)

Keey (1975), comenta que o conceito de um período à taxa constante seguido de um ou mais períodos decrescentes pode ser considerado como a teoria clássica de secagem, entretanto, essa teoria requer um estudo mais detalhado para os diferentes tipos de material, uma vez que em vários resultados experimentais de secagem (como secagem de tijolo de barro) o período constante não foi observado.

Segundo Park, Brod e Alonso (1999), para os materiais biológicos é difícil a existência desse período, pois as condições operacionais de secagem são tais

que as resistências de transferências de massa encontram-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície ao ambiente seja bem superior à taxa de reposição de umidade do interior à superfície do material.

Na secagem de banana nanica, Nogueira (1991) observou que não ocorreu o período de taxa constante.

2.6.2. Período à taxa decrescente

Quando a quantidade de água na superfície do produto começa a diminuir, há o abaixamento progressivo da pressão parcial de vapor da água na superfície e, conseqüentemente, a velocidade de secagem também diminui, até que, ao final desse período, o produto está em equilíbrio com o ar (igualdade de pressões de vapor) e a velocidade de secagem torna-se nula (PARK; BROD; ALONSO, 1999).

Alimentos como cereais, café solúvel, concentrados protéicos e amidos, entre outros, mantêm a umidade como parte integral de sua estrutura, presa entre a estrutura fibrosa ou mesmo no interior de finos poros. Conseqüentemente, o movimento da umidade é lento e, provavelmente, ocorre por difusão do líquido através da estrutura do sólido. Para estes materiais, o período de velocidade constante é dificilmente detectado e termina com uma umidade crítica muito alta. Pelas mesmas razões, o primeiro período de velocidade decrescente também é pequeno. Desta forma, a maior parte do processo de secagem ocorre no segundo período de velocidade decrescente, sendo controlado por um mecanismo de difusão. A umidade de equilíbrio geralmente é alta, indicando que o material retém uma quantidade significativa de umidade, intimamente presa em sua estrutura. Assim, muitos dos alimentos são afetados quando se remove a umidade, isso porque a superfície do material tende a secar mais rapidamente que seu interior, provocando, caso a velocidade de secagem seja muito rápida, empenamentos ou mesmo rachaduras (OKADA *et. al.*, 1987).

No período à taxa decrescente o processo de transferência de massa é descrito matematicamente por modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos.

2.6.2.1. Modelos teóricos

O modelo teórico mais utilizado é o representado pela *Segunda Lei de Fick*, baseada exclusivamente no mecanismo de difusão de umidade como líquido ou vapor (LEWIS, 1921; SHERWOOD, 1929):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla X) \quad [2.4]$$

Onde:

D = coeficiente de difusão (m²/s)

t = tempo de secagem (h)

Diversos autores têm buscado expressões matemáticas mais consistentes com os dados experimentais e com outros fenômenos físicos envolvidos, especialmente alteração de volume, do gradiente de temperatura e do conteúdo de umidade.

Soluções analíticas para esta equação foram apresentadas por Crank (1975) para várias condições iniciais e limites variados, aplicáveis a formas geométricas simples e ainda considerando o volume constante, fluxo difusional isotérmico e coeficiente de difusão constante ou dependente do conteúdo de água.

Comentando a relação entre difusividade e concentração de umidade, Sereno e Medeiros (1990) apresentaram um modelo que considerava constante o produto da densidade aparente do material pela difusividade efetiva e observaram

que o primeiro parâmetro aumenta com a diminuição do teor de umidade, enquanto que a difusividade efetiva diminui. Os autores, secando fatias de cenoura e maçã, encontraram uma diferença entre o modelo e os dados experimentais de 1,1% para o conteúdo de umidade e de 2% para a taxa de secagem.

Nogueira (1991), estudou o processo de obtenção de banana-passa (*Musa acuminata Colla* subgrupo *Cavendish*, cultivar nanica) utilizando três temperaturas de secagem (50, 60 e 70°C) e três velocidades do ar de secagem (0,5; 1,0 e 1,5 m/s). Os dados experimentais foram ajustados usando o modelo difusional para a forma cilíndrica apresentado por Crank (1975). A solução analítica da equação de difusão foi utilizada para um estudo do número de termos suficiente a ser considerado na série de Fourier, para se obter resultados precisos. A autora concluiu que a utilização dos cinco primeiros termos da série mostrou ser suficiente e os resultados de difusividade efetiva situaram-se entre $2,62 \times 10^{-10}$ e $6,53 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ com as melhores condições de secagem de 60 e 70°C com ar a 1,5 m/s e 70°C com ar a 1,0 m/s.

Coya Honores (1995) estudou a secagem de maçã utilizando três temperaturas (60, 70 e 80°C) combinadas com diferentes velocidades de ar (0,5; 1,0 e 1,5 m/s) visando analisar o processo de secagem segundo a teoria difusional, onde um parâmetro importante a ser determinado é a difusividade efetiva. Os resultados mostraram que os parâmetros para a secagem mais rápida foram as combinações de 70°C e 80°C com 1,5 m/s de velocidade do ar de secagem e 80°C com 1,0 m/s.

Segundo alguns autores, a influência da transferência de calor pode ser desprezada e a secagem pode ser tratada como uma difusão puramente controlada pelo fenômeno de transferência de massa (CHIRIFE, 1981; SARAVACOS;CHARM, 1962; VACCAREZZA;LOMBARDI;CHIRIFE, 1974).

2.6.2.2. Modelos semi-teóricos

O principal modelo semi-teórico apresentado na bibliografia é o denominado *modelo de Lewis*, análogo à Lei de Resfriamento de Newton e que estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre, estando toda resistência ao transporte de água localizada na camada limite (LOPES, 1989; LUCCAS, 1996; GABAS, 1998). A forma desta equação caracteriza um modelo exponencial:

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt) \quad [2.5]$$

Onde:

X^* = adimensional de umidade

X_0 = umidade inicial do sólido, base seca (gH₂O / gms)

X = umidade do sólido a cada tempo, base seca (gH₂O / gms)

X_e = umidade de equilíbrio, base seca (gH₂O / gms)

t = tempo de secagem (h)

k = constante de secagem do modelo de Lewis

A constante de secagem k é válida exclusivamente no domínio experimental em que foi determinada.

O uso deste modelo simplifica os procedimentos necessários ao dimensionamento de secadores (GABAS, 1998), mas a equação 2.5 não se aplica a toda curva de secagem no período decrescente (LOPES, 1989; LUCCAS, 1996). Por esse motivo, são mais utilizadas equações empíricas com estas finalidades.

Outro modelo semi-teórico para correlacionar as curvas de secagem foi proposto por Brunello (1976) e é denominado *Modelo de duas Resistências*.

2.6.2.3. Modelos empíricos

Vários modelos empíricos foram utilizadas para descrever o período de secagem de alimentos à taxa decrescente, podendo ser considerados variações da equação 2.5. Um deles é o modelo *de Page*, utilizado por alguns autores na secagem de produtos agrícolas (GABAS, 1998).

2.7. Secagem de alimentos

A secagem é um dos métodos mais antigos de preservação de alimentos. Os primeiros alimentos secos pelos povos colonizados na América foram pedaços de maçã, uva-passa, ameixas, uvas e carne (*DRYING FOOD*, 2001). Nos anos de 1980 e 1990 os alimentos desidratados que surgiram no mercado foram os sucos em pó, sopas instantâneas, frutas e temperos (TOLEDO, 1991). Atualmente, nos mercados brasileiros, os alimentos mais comercializados são os cereais, café e leite em pó, temperos e grãos.

Recentemente, a secagem tem sido utilizada para produção de alimentos na forma de deliciosos e nutritivos *snacks* (*DRYING FOOD*, 2001). Os produtos na forma de *snacks* incluem, tradicionalmente, batata-frita, cereais matinais, nozes e frutas secas (HOLLINGSWORTH, 1995). Além disso, esses *snacks* podem ser feitos em diferentes tamanhos, texturas e formatos, resultando em produtos crocantes e saborosos, com um alto valor nutritivo (ZAMMER, 1995). Nos mercados de Campinas são comercializadas frutas desidratadas na forma de *snacks* como o abacaxi, maçã e banana liofilizados.

2.8. Secagem a altas temperaturas

Convencionalmente a secagem a ar quente de frutas e hortaliças é realizada a temperaturas entre 60° e 90°C dependendo do tipo, geometria e conteúdo de umidade do alimento, geralmente de maneira que o mesmo não apresente características indesejáveis (cor, aroma, constituintes) pelo efeito de temperaturas elevadas (MEDINA, *et al.*, 1985).

Alternativamente, vem sendo estudada a secagem parcial de frutas e hortaliças com ar quente a temperaturas elevadas e curto período de tempo. Este processo é denominado de *High Temperature and Short Time (HTST)* e seu emprego tem sido citado na bibliografia, com ou sem pré-tratamentos da matéria-prima, em leito fluidizado ou vibro-fluidizado. Como vantagens, a secagem *HTST* reduz o tempo total de secagem, apresenta efeito de inativação enzimática, promove aumento do volume do sólido (*puffing*) e sua porosidade (o que facilita a reidratação do sólido seco) e promove a característica de crocância (LUCCAS, 1996).

Kim e Toledo (1987) estudaram a secagem de *blueberries* por desidratação osmótica seguida por secagem *HTST* em leito fluidizado e somente por *HTST* em leito fluidizado com velocidade do ar de 15 m/s e temperaturas de 170°C, durante 8 minutos, e 150°C, por 4 minutos. Os autores compararam os resultados com outros obtidos pela desidratação de *blueberries* por *explosion-puffing* e por secagem convencional a ar quente (60°C e 4 minutos). O processo *HTST* promoveu uma secagem mais rápida, um produto com estrutura expandida, menor densidade aparente e maior taxa de reidratação, quando comparado com o método *explosion-puffing*. As amostras desidratadas osmoticamente seguidas por uma secagem *HTST* em leito fluidizado apresentaram uma rápida taxa de reidratação, porém em menor grau do que a secagem feita somente por *HTST*.

Jayaraman e Das Gupta (1992) utilizaram secagem *HTST* em diversas hortaliças (batata, cenoura, inhame, batata-doce e outras) cortadas em pequenos pedaços e submetidas a temperaturas de 160° a 180°C por um tempo de 8 minutos e velocidade do ar de 7,92 m/s, após o qual foram colocadas em secadores convencionais de leito fluidizado em temperaturas de 60° a 70°C. A secagem *HTST* promoveu a expansão do volume das hortaliças e uma estrutura porosa que se manteve durante a secagem convencional, apresentando boas características de reidratação e textura.

2.9.Puffing

Denomina-se *puffing* o aumento do volume de um sólido causado a partir da expansão de um gás em seu interior, de maneira a propiciar a formação de uma estrutura porosa. Existem basicamente dois métodos aplicáveis a alimentos (LUCCAS, 1996):

- a) mudança de fase da água presente no material

- b) a infiltração de substâncias líquidas no material, o qual é submetido posteriormente a condições de evaporação *flash*

Segundo esse autor, a mudança de fase é o método mais efetivo e mais utilizado, devido à grande variação de volume associada à mesma, sendo que o processo mais conhecido desse método é o *explosion-puffing*, caracterizado pelo aumento da temperatura em ambiente pressurizado seguido de despressurização rápida.

Saca e Lozano (1992) estudaram a secagem de bananas incorporando o método *explosion-puffing* no processo de secagem, de modo a comparar o tempo de secagem e de reidratação entre a secagem convencional de banana (a 70°C,

velocidade do ar de secagem de 3,6 m/s e tempo de secagem de 265 minutos) e o *explosion-puffing*, a temperaturas entre 152°C e 160°C, pressões de 0,8 a 1,0 kgf/cm² e tempo de secagem de 120 minutos. Os autores concluíram que a incorporação do *explosion-puffing* no processo de desidratação de bananas resultou numa secagem mais rápida devido à formação de uma estrutura mais porosa no alimento, com este mantendo as características de sabor, cor e textura.

Luccas (1996) obteve *puffing* em banana prata em secador fluidizado operando entre 130° e 150°C, utilizando imersão prévia em solução de amido gelatinizado, o qual foi responsável pela formação de uma barreira à migração da água interior, de maneira que esta pudesse sofrer mudança de fase com o aumento da temperatura e, assim, promover a expansão. Segundo o autor, a aplicação de pré-tratamentos no processo *HTST* tem sido estudada por muitos pesquisadores com o objetivo de fortalecer a estrutura celular e propiciar a formação de um produto poroso.

2.10. Secagem de banana com *puffing*

Luccas (1996) secou pedaços de banana da variedade prata com grau de maturação de 14 a 18° Brix, cuja polpa apresentava textura firme e sabor levemente adocicado. O autor não conseguiu promover este tipo de secagem para a banana prata madura e para a variedade nanica, uma vez que estas apresentaram polpa pouco consistente e menor resistência mecânica durante a secagem. O processo *HTST* foi realizado num leito fluidizado (110°C - 15 minutos, 130°C - 12 minutos e 150°C - 6 minutos, com ar quente a 10 m/s) seguido de secagem em secador de bandejas a 70°C por 5,5 horas. Foram avaliados os efeitos de vários pré-tratamentos no tempo de secagem e na sensação de crocância, taxa de reidratação, expansão, densidade aparente e cor do produto final. Foram determinados ainda os parâmetros relativos à cinética da secagem, segundo os modelos de *Page*, cujo ajuste foi adequado apenas para a condição

de 130°C, e o *modelo de Duas Resistências* de Brunello, que ofereceu o melhor ajuste para todas condições experimentais.

Cardoso (1998) estudou o processo de secagem de banana-prata em leite vibro-fluidizado a alta temperatura visando reproduzir os resultados de Luccas (1996). O processo constou de um pré-tratamento das amostras em soluções infiltrantes, de modo a fortalecer a estrutura celular, e de uma etapa de pré-secagem *HTST* nas temperaturas de 130°C e 150°C e tempos de 13 e 8 minutos, respectivamente. Após a etapa *HTST* o produto passou para uma secagem convencional a 70°C com velocidade do ar de 3 m/s. A melhor condição de pré-secagem foi encontrada para a temperatura de 150°C e 8 minutos de *HTST*, que forneceu um produto com boa expansão e alta capacidade de absorção de água.

2.11. Atividade de água (a_w)

Os alimentos desidratados são preservados porque a atividade de água (a_w) está num nível onde não há atividade microbológica e onde as taxas de reações químicas e bioquímicas deteriorativas estão reduzidas ao mínimo. Valores de a_w abaixo de 0,7 previnem o dano microbológico, porém, para que não aconteçam essas reações deteriorativas no alimento, é necessário que a desidratação atinja uma redução de a_w para 0,3 (TOLEDO, 1991). Além disso, valores de atividade de água na faixa de 0,3 a 0,5 marcam a transição do estado cristalino para o amorfo em sistemas alimentícios com açúcares simples. Com isso, o alimento desidratado passa a não ser aceito sensorialmente devido à perda da crocância (LABUZA; KATZ, 1981).

2.12. Crocância

Crocância é uma propriedade organoléptica caracterizada pela ocorrência de várias fraturas sucessivas no produto quando mastigado. Ela existe enquanto

um teor de umidade adequado no produto é mantido e a perda desta característica é devida à adsorção de umidade: a água afeta a textura de alimentos secos através do amaciamento e plasticização da matriz protéica, o que altera a resistência mecânica do produto (LABUZA; KATZ , 1981).

Wilkinson, Dijksterhuis e Minekus (2000) estudaram métodos instrumentais de medidas de textura e de como estes podem ser correlacionados com a medida sensorial. Os autores dizem que a compreensão da relação entre a percepção da textura do alimento e a estrutura do mesmo tem se tornado de grande importância para companhias que desejam alimentos texturalmente atraentes. A percepção da textura ocorre durante o processo dinâmico da quebra do alimento na boca e isso é afetado por processos orais, tais como produção de saliva e temperatura interna da boca. De modo a abordar esses aspectos, os autores propuseram um estudo das relações entre a estrutura do alimento e a percepção de textura combinando pesquisas sensoriais, estudos fisiológicos e pesquisas de características físico-químicas dos alimentos. Os autores concluíram que um modelo oral ou análogo às condições que a boca humana apresenta, poderia ter um papel promissor de avaliar tanto uma medida instrumental como ser uma ferramenta para melhorar estudos sobre a relação entre os processos orais e estrutura do alimento. Modelos orais poderiam integrar pesquisas nas áreas de fisiologia e físico-química da estrutura do alimento, entretanto, não poderiam ser um vínculo com a percepção de textura, pois esta só pode ser feita com medidas diretamente da boca humana.

Ao estudar o efeito que a atividade de água tem sobre a textura crocante de cereais e a resistência, Roudaut, Dacremont e Le Meste (1998) verificaram que a crocância é fortemente afetada por pequeno acréscimo de água enquanto que a resistência, definida como a força requerida para quebrar a amostra entre os dentes, só é afetada com quantidades maiores. Os autores definiram produtos crocantes como aqueles que têm uma baixa densidade na sua estrutura celular, são frágeis e geralmente produzem um ruído forte e alto quando fraturados.

Roudaut *et. al.* (2000) propuseram um trabalho de medidas mecânicas e sensoriais de cereais com baixa umidade. Para a análise instrumental os autores utilizaram um TA-XT2 *Texture Analyzer* (Stable Microsystem, Godalming UK) ajustado com geometria cilíndrica (de 3 mm de diâmetro) de face plana, com velocidade de avanço de 1 mm/s. Os autores obtiveram boas correlações entre a análise sensorial de crocância, ruptura e o parâmetro N_{SR} (número espacial de ruptura, em mm^{-1}) obtido da aplicação de um método de fratura recentemente desenvolvido para analisar a curva de força-deformação obtida a partir de um teste de penetração nas amostras. Os resultados da análise sensorial mostraram que a ausência de açúcares provoca maior perda da crocância para valores de a_w a partir de 0,31, sendo que a capacidade de quebra foi maior para as amostras sem açúcar na faixa de atividade de água estudada (de 0,22 a 0,74) e apresentou um máximo para níveis de a_w entre 0,4 e 0,6. A dureza mostrou um contínuo aumento sobre a faixa de a_w considerada. No caso das amostras com conteúdo de açúcar, a dureza foi consideravelmente menor, mostrando um aumento só a partir de $a_w = 0,61$. A extensão das respostas dos testes mecânicos (curvas força-deformação) das amostras, mostraram que há uma importante diferença entre a forma e a amplitude das curvas. Os autores concluíram, através de uma avaliação dos parâmetros instrumentais e sensoriais de amostras submetidas a diferentes a_w e conteúdo de açúcar, que existem relações entre esses dois tipos de medidas e destacam que a análise de fratura dos gráficos de força-deformação poderia ser utilizada no lugar de uma análise sensorial. Além disso, os autores observaram que um aumento no conteúdo de água alterou a textura das amostras à base de amido, de crocantes para quebradiças, enquanto que a textura das amostras à base de amido-açúcar permaneceram iguais, na mesma faixa de hidratação.

Duizer e Campanella (1998), propuseram um trabalho que alterou o processo de extrusão de cereais e suas condições de estocagem. Depois de extrudados, os produtos foram secos durante 2 horas em forno a 95°C até umidade final de 3%, 8% e 10%. Os testes de compressão foram feitos utilizando um TA-XT2 *Texture Analyzer* (Stable Microsystem, England), programado para

comprimir as amostras até 67% de sua geometria original. Para cada uma das curvas força-tempo, foram registrados a força máxima e o tempo para atingir a força máxima. Os valores de deformação foram calculados a partir de informações dos dados de força. A crocância foi medida através de análise sensorial, métodos instrumentais e registros acústicos, que foram feitos pela gravação dos sons produzidos enquanto as amostras eram mastigadas com os dentes molares. Além das características de crocância, foram avaliados sensorialmente a sonoridade, dureza e densidade. Os autores verificaram que de acordo com o painel sensorial as amostras com 3% e 8% de umidade final foram consideradas mais crocantes do que aquelas com 10%. Além disso, as amostras com 3% apresentaram significativamente menor dureza do que com 10% de umidade final. No que diz respeito à atividade de água (a_w), amostras com níveis de a_w de 0,11 e 0,22 foram significativamente mais crocantes do que aquelas com 0,33 e 0,44, ainda segundo os resultados do painel sensorial. A menor dureza foi observada para a_w de 0,11. Os autores observaram que o aumento da dureza com o aumento da a_w pode ser explicado pelo fato da água agir como um plasticizante, pois a plasticização parcial da parede celular do material aumentará a coesão da estrutura, aumentando a dureza do material extrudado. Isto se deve ao fato de que a estrutura plasticizada não desintegra facilmente, permitindo que a amostra permaneça intacta e oferecendo mais resistência à deformação. Quanto aos resultados instrumentais, a força de ruptura foi significativamente diferente tanto para o conteúdo de umidade quanto para a a_w . Amostras com 3% de umidade final necessitaram de menos força para quebrar, o mesmo ocorrendo para a_w de 0,11. Os coeficientes de correlação entre os testes sensoriais e instrumentais indicaram que a força necessária para quebrar a amostra aumenta à medida que a crocância diminui. Os autores destacaram ainda que com o aumento da a_w , os níveis de força e trabalho mecânico para quebrar a amostra aumentava e esses resultados correlacionavam mais fortemente e inversamente com a crocância. Eles concluem que o estudo comprovou tal fato, pois as amostras ficaram mais crocantes e necessitaram de menor força para quebrar à medida que a a_w e a umidade final diminuía.

Saklar, Ungan e Katnas (1999) estudaram a crocância de avelãs torradas através de um método instrumental de compressão. Os testes instrumentais foram realizados num computador em interface com um dispositivo de compressão. Os autores obtiveram curvas típicas de força-deformação cujos parâmetros analisados foram: o primeiro ponto de fratura (F1), a inclinação da curva entre o ponto inicial e o primeiro ponto de fratura (S1), a área sob a curva dessa região (W1), o segundo ponto de fratura (S2), a inclinação da curva entre o primeiro e o segundo ponto de fratura e, a área sob essa região (W2). Os testes sensoriais foram realizados através de uma Análise Descritiva Quantitativa (ADQ), cujas variáveis de resposta foram crocância e *crunchiness* (crocância percebida por ruídos sonoros do ato de mastigar e triturar o alimento). Os autores observaram que o aumento da temperatura do ar de torração, velocidade e tempo de torração faziam as amostras passarem da cor clara para a escura e os valores de todas as variáveis de respostas do teste instrumental diminuía. Isso provocou um decréscimo no conteúdo de umidade das amostras, o que levou a uma textura mais crocante e *crunchy*. O teste sensorial mostrou que os provadores diferenciaram crocância de *crunchiness*. Os autores concluíram que com o aumento da temperatura do ar de torração, da velocidade e do tempo, a crocância e *crunchy* aumentavam. Os autores observaram que a crocância (medida sensorialmente) é inversamente correlacionada com F1, S1 e W1 e é percebida pela força da mordida, pois os dentes incisivos agem como um “*probe*” de compressão. Por essa razão, o ponto de fratura inicial é significativamente correlato com a crocância. Além disso, à medida que aumenta a quantidade de pontos de fratura nas curvas (o que ocorre com amostras mais torradas), diminui a força necessária para mastigar toda a avelã. Conseqüentemente, as amostras mais torradas apresentaram menor dureza, o que aumentou a sensação da crocância. Embora *crunchiness* seja avaliada como o som percebido durante a mastigação, observar isso na boca envolve compressão entre os molares seguida pela repetição dessa força aplicada. Deste modo, os autores concluem que o som durante a mastigação deve depender da força de compressão necessária para triturar a avelã na boca.

Nesse trabalho, a propriedade crocância foi caracterizada por medidas instrumentais de textura (força máxima e deformação na força máxima), como indicado por Saklar, Ungan e Katnas (1999) e Duizer e Campanella (1999), e por análise sensorial através de um painel de provadores.

2.13. Grau de reidratação

As mudanças que ocorrem nos alimentos desidratados durante a secagem podem afetar a qualidade do produto final, principalmente nas propriedades como cor, nutrientes, sabor, textura, densidade, porosidade e capacidade de reidratação. Devido a isso, Krokida, Kiranoudis e Maroulis (1999), consideram a reidratação de alimentos secos como um processo que visa a recuperação das propriedades da matéria-prima, colocando o material em contato com água ou vapor d'água. Deste modo, a reidratação pode ser considerada uma medida da "lesão" causada pela secagem e pelos tratamentos que precedem a desidratação. Os autores estudaram quatro diferentes métodos de secagem: secagem convencional (com o ar de secagem a 70°C e 7% umidade relativa), secagem a vácuo (na temperatura de 70°C e 33 mbar), por liofilização e desidratação osmótica (a -35°C sobre condições de alto vácuo (0,04 mbar)). Após a desidratação, as amostras foram reidratadas com vapor d'água a 50°C e 80% umidade. Eles concluíram que o produto desidratado não conserva suas propriedades viscoelásticas depois da reidratação porque em todos os métodos estudados ocorreu o fenômeno de histerese, mesmo que em diferentes proporções. Assim, as amostras perderam sua elasticidade tornando-se mais viscosas, além de terem apresentado ganho de sólidos.

Saca e Lozano (1992) estudaram o grau de reidratação de bananas desidratadas por dois métodos: secagem convencional a ar quente e *explosion-puffing* seguido de uma secagem convencional, de modo a comparar a taxa de reidratação entre esses dois métodos. A reidratação consistiu na imersão de pedaços de banana, de diferentes pesos, em água em ebulição durante 5, 10, 15

e 20 minutos. Após esse tempo de imersão, as amostras foram levemente enxugadas por 30 segundos e então novamente pesadas. A incorporação do *explosion-puffing* no processo de desidratação de bananas resultou numa taxa de reidratação maior, para todos os tempos de imersão, devido à formação de uma estrutura mais porosa.

Maskan (2001) estudou o grau de reidratação de kiwi depois da secagem a ar quente (velocidade do ar de 1,29 m/s, 60°C de bulbo seco e 27°C de bulbo úmido) e por microondas (700W e 2450 MHz). Amostras previamente pesadas foram imersas durante 50 minutos em água aquecida a 50°C. Em intervalos de 10 minutos as amostras eram retiradas e escorridas sobre uma peneira por 30 segundos e rapidamente secas em papel-toalha, de modo a eliminar a água superficial e, então, eram novamente pesadas. A capacidade de reidratação foi calculada segundo a equação 2.6 apresentada a seguir. As amostras secas por microondas apresentaram capacidade de reidratação mais baixa do que a secagem a ar quente, provavelmente devido às mudanças na estrutura/textura ocasionadas pela alta temperatura, maior do que a utilizada por secagem a ar quente.

$$GR (\%) = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad [2.6]$$

Onde:

GR = grau de reidratação (% de água absorvida)

m_i = massa inicial da amostra seca (g)

m_f = massa final da amostra seca após a imersão (g)

Kim e Toledo (1987) estudaram o grau de reidratação de *blueberries* desidratadas osmoticamente seguida de etapa *HTST*, por *explosion-puffing* e por *HTST* em leito fluidizado. O ensaio consistiu na imersão de 10 g de *blueberries* em 300 mL de água em ebulição durante diferentes tempos. A taxa de reidratação foi medida de acordo com a equação 2.6. O produto seco por *HTST* em leito

fluidizado apresentou maior taxa de reidratação do que as amostras desidratadas por *explosion-puffing* e por desidratação osmótica seguida de *HTST*.

Luccas (1996) determinou o grau de reidratação de fatias de banana-prata desidratadas numa secagem convencional a 70°C e por secagem a dois estágios (*HTST* seguido de uma etapa a 70°C). A reidratação do produto final foi feita pelo método utilizado por Kim e Toledo (1987), que consta da imersão das amostras em água aquecida até a ebulição. O autor obteve um alto índice de reidratação das amostras, sendo os maiores valores encontrados para as frutas com 14°Brix utilizando secagem com dois estágios.

Cardoso (1998) mediu o grau de reidratação de fatias de banana-prata desidratadas em leito vibro-fluidizado a altas temperaturas, também utilizando a equação 2.6. A autora observou que a melhor taxa de reidratação foi encontrada para a temperatura de 150°C e 8 minutos de *HTST* e que o aumento da temperatura *HTST* provocava um aumento na absorção de água, independente do tipo de pré-tratamento aplicado nas amostras, devido à formação de um produto com estrutura mais porosa.

2.14. Planejamento experimental

As pesquisas realizadas com o objetivo de fornecer respostas sobre quais fatores experimentais devem ser controlados para que a qualidade do produto seja assegurada tomam, muitas vezes, vários meses de trabalho a um custo bastante alto em termos de salários, reagentes, análises químicas e testes físicos. Usando planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos, os pesquisadores podem extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo um mínimo de experimentos. Um dos problemas mais comuns, para quem faz experimentos, é determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre uma outra variável de interesse. Na estatística isso se traduz em descobrir como a **resposta** do processo depende dos **fatores** (variáveis) estudados. Por isso, no

planejamento de qualquer experimento, a primeira coisa a ser feita é decidir quais são os fatores e as respostas de interesse (BARROS NETO;SCARMINIO; BRUNS, 2001).

Para executar um planejamento fatorial, primeiramente deve ser especificado os níveis em que cada fator deve ser estudado, isto é, os valores dos fatores. Segundo Barros Neto, Scarminio e Bruns (2001), num planejamento fatorial completo, deve-se realizar experimentos em todas as possíveis combinações de níveis de fatores, sendo que cada um desses experimentos, em que o sistema é submetido a um conjunto de níveis definido, é um ensaio experimental. Para estudar o efeito de qualquer fator sobre uma dada resposta é necessário fazê-lo variar de nível. Assim, o fator precisa apresentar pelo menos dois níveis diferentes.

A metodologia de superfície de resposta é uma técnica de otimização baseada em planejamentos fatoriais cuja modelagem é feita ajustando-se modelos simples (lineares ou quadráticos) a respostas obtidas com planejamentos fatoriais. O principal atrativo dessa metodologia é redução do número de ensaios necessários para se avaliar a influência dos fatores sobre as respostas do processo (BARROS NETO;SCARMINIO; BRUNS, 2001).

Admitindo que a superfície de resposta na região investigada é uma função não-linear dos fatores e, considerando que uma dada resposta (\hat{y}) é influenciada pelas variáveis independentes x_1 e x_2 , a resposta pode ser estimada pela equação 2.7:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 \quad [2.7]$$

Onde b_0 , b_1 , b_2 e b_{12} são os coeficientes da regressão estimados do modelo estatístico proposto, x_1 e x_2 representam as variáveis codificadas e o subíndice 12 representa o coeficiente do modelo na interação das variáveis x_1 e x_2 .

No caso deste trabalho, as variáveis codificadas serão:

$x_1 = T$ (Temperatura *HTST*)

$x_2 = \text{tempo}$ (tempo *HTST*)

$x_1x_2 = T \times \text{tempo}$ (chamada de interação temperatura-tempo *HTST*)

Como nem sempre os coeficientes apresentados na equação 2.7 são estatisticamente significativos, deve ser realizada uma análise estatística apropriada para assegurar a validade desses coeficientes dentro de um nível de confiança estabelecido (p). O método mais usado para se avaliar numericamente a qualidade do ajuste de um modelo é a Análise de Variância (ANOVA), que consiste na avaliação do coeficiente de determinação (R^2) e do teste F, cujos resultados indicarão se o modelo proposto apresenta um grau de ajuste adequado aos dados experimentais.

O coeficiente de determinação do modelo (R^2), atinge valor máximo de 1, que só ocorrerá se não houver resíduo nenhum e, portanto, toda a variação em torno da média for explicada pela regressão. Quanto mais próximo a 1 estiver o valor deste coeficiente, melhor terá sido o ajuste do modelo às respostas observadas.

O teste de Fischer (teste F) consiste na comparação do valor obtido pelo modelo com o valor tabelado, para uma distribuição de referência. Neste teste, se o valor tabelado inferior ao calculado, não haverá relação entre as variáveis e a resposta. Caso seja maior, pode-se afirmar que o modelo é estatisticamente significativo e os dados experimentais são representados pelo modelo proposto. O valor tabelado é obtido através de tabelas de distribuição F (distribuição de referência) num determinado limite de confiança de acordo com os graus de liberdade da regressão e dos resíduos: $F_{\text{tab}(p;GL_r,GLR)}$ = valor de F tabelado (BARROS NETO;SCARMINIO; BRUNS, 2001).

A Tabela 2.3 apresenta o procedimento estatístico da Análise de Variância (ANOVA).

Tabela 2.3: Tabela de Análise de Variância (ANOVA)

Fonte de variação	SQ (Soma Quadrática)	GL (Graus de Liberdade)	MQ (Média Quadrática)	teste F
Regressão	SQr	GLr	MQr	Fcal
Resíduos	SQR	GLR	MQR	
Falta de Ajuste				
Erro Puro				
Total	SQT			

Os valores da Falta de Ajuste, do Erro Puro e o Total são dados nas tabelas de ANOVA fornecida pelos programas estatísticos utilizados. As equações 2.8 a 2.10 permitem o cálculo dos valores de regressão e dos resíduos.

$$MQ = \frac{SQ}{GL} \quad [2.8]$$

Onde:

MQ = Média quadrática

SQ = Soma quadrática

GL = Graus de liberdade

$$R^2 = \frac{SQr}{SQT} \quad [2.9]$$

Onde:

R^2 = coeficiente de determinação

SQr = Soma quadrática devido à regressão

SQT = Soma quadrática total

$$F_{cal} = \frac{MQr}{MQR} \quad [2.10]$$

Onde:

F_{cal} = valor calculado do teste F

MQr = Média quadrática da regressão

MQR = Média quadrática dos resíduos

Segundo Lomauro e Labuza (1985) o modelo de representação dos dados experimentais não será válido se o valor do erro relativo médio for superior a 10%. Dessa forma, o erro relativo médio entre o modelo obtido e os dados experimentais é calculado segundo a equação 2.11:

$$E = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|m_i - m_p|}{m_i} \quad [2.11]$$

Onde:

m_i = valores experimentais de cada variável de resposta

m_p = valores previstos pelo modelo estatístico para cada variável de resposta

3. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa teve lugar no Laboratório de Tecnologias Apropriadas (DEA-FEA-Unicamp) e contemplou quatro fases seqüenciais:

I – Caracterização da crocância de amostras comerciais de frutas liofilizadas, através de medidas instrumental e sensorial, com o objetivo de verificar a correspondência entre os resultados destas determinações e encontrar valores referenciais para as medidas de crocância da banana desidratada a altas temperaturas e curto tempo (*HTST*);

II – Testes preliminares com o secador *HTST*, utilizando banana nanica, com o intuito de determinar as condições em que seriam realizados os ensaios experimentais e os níveis de tratamento que seriam aplicados no planejamento experimental;

III – Ensaios experimentais nas condições e níveis de tratamento determinados;

IV – Tratamento e análise dos resultados.

3.1. Material

3.1.1. Frutas comerciais liofilizadas

Banana, abacaxi e maçã liofilizados foram comprados num supermercado local. A banana e o abacaxi foram provenientes do mesmo fabricante e a maçã de um fabricante diferente. Os pacotes foram mantidos fechados em temperatura ambiente até a realização dos testes.

3.1.2. Banana *in natura*: matéria-prima

A matéria-prima utilizada nos ensaios de secagem deste trabalho foi a banana nanica (*Musa acuminata* Colla subgrupo *Cavendish*) proveniente de um supermercado local. As bananas foram compradas em várias pencas em diferentes estádios de maturação e foram mantidas em ambiente arejado entre 21°C e 25°C até o momento de sua utilização.

3.1.3. Caracterização dos equipamentos

3.1.3.1. Secador vertical de fluxo ascendente

O secador vertical de fluxo ascendente foi montado no Laboratório de Tecnologias Apropriadas (DEA – FEA – Unicamp), como mostra a Figura 3.1.

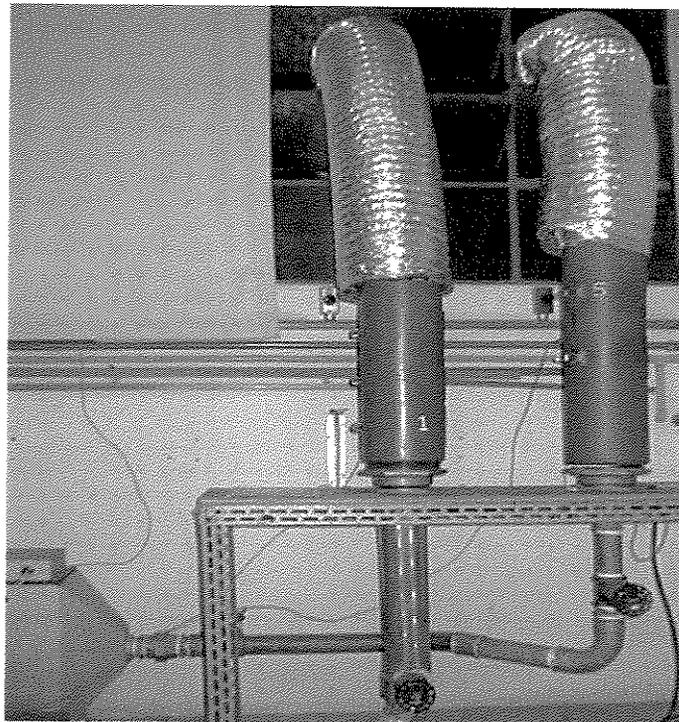


Figura 3.1: Secador utilizado

O secador apresenta duas colunas e cada uma possui um conjunto de resistências que permite o ajuste da temperatura desejada, controlada por um controlador PID. Numa das colunas o arranjo das resistências permite o alcance de altas temperaturas (até 150°C), necessárias para a etapa *HTST*. As duas colunas estão ligadas num mesmo ventilador centrífugo com potência de 2 HP. O ajuste de válvulas é independente para cada coluna e permite o controle da velocidade do ar, que passa verticalmente pelas bandejas. A velocidade do ar é monitorada por leitura de manômetro em U conectado a uma placa de orifício, sistema esse também individual para cada coluna.

A coluna que alcança as maiores temperaturas é a coluna 2 (coluna da direita da Figura 3.1), com 27.000W e capacidade para 2 bandejas. A coluna 1, coluna da esquerda, com 2.800W, tem capacidade para 3 bandejas. Ambas as colunas possuem o diâmetro interno de 17 cm.

A área de secagem das bandejas possui diâmetro de 15 cm.

A temperatura do ar no interior das colunas foi medida pelo próprio controlador, através de sensor PT-100 e a velocidade foi ajustada entre 3 e 5 m/s através de um anemômetro digital de fio quente marca Cole Parmer modelo *Tri-Sense*[®].

Os controladores foram calibrados na temperatura de *set-point* com termômetro padrão Labortherm de 50-100°C (divisão 0,2°C) e 100-200°C (divisão 1,0°C).

3.1.3.2. Balança analítica

A balança analítica utilizada para a pesagem das amostras foi uma balança Gehaka divisão 0,001 g e precisão de 0,0005 g.

3.1.3.3. Medidor da umidade relativa do ar atmosférico

Para medidas de umidade relativa do ar atmosférico, utilizou-se o termohigrômetro digital marca HOMIS modelo 823, com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 2,5\%$ umidade relativa, com sensor de temperatura PT 385 e polímero de capacitância para umidade relativa.

3.2. Métodos

3.2.1. Análises realizadas nas frutas comerciais liofilizadas

As amostras comerciais foram submetidas a medidas sensoriais, instrumentais e atividade de água, como descrito na seção de análises da banana desidratada (seção 3.2.6).

As análises instrumental e sensorial foram realizadas simultaneamente, em temperatura ambiente, com amostras retiradas dos mesmos pacotes.

3.2.2. Análises realizadas na banana *in natura*

3.2.2.1. Grau de maturação

O estágio de maturação escolhido para a banana da variedade nanica foi entre o estágio 6 e 7 indicado na Tabela 2.2. No momento de utilização da fruta

para o respectivo ensaio, fazia-se leitura em refratômetro para determinar se o grau Brix estava dentro da faixa escolhida.

3.2.2.2.Sólidos solúveis (grau Brix)

O conteúdo de sólidos presentes na banana *in natura* é expresso pelo grau Brix e este foi determinado utilizando-se um refratômetro marca PZO modelo RL3 do Laboratório de Medidas Físicas (DEA – FEA – Unicamp), com os valores lidos corrigidos para a temperatura marcada no refratômetro.

Amostras de banana foram amassadas com o auxílio de um garfo e então introduzidas em seringas sem agulhas, forradas com um pequeno chumaço de algodão na ponta. Isso feito, pressionava-se a seringa até que houvesse a saída do suco da amostra. Pequenas quantidade desse suco foram colocadas no prisma do refratômetro. Foram feitas duas leituras para cada amostra e o resultado foi o valor médio das leituras obtidas.

3.2.2.3.Conteúdo de umidade

Para determinação do conteúdo de umidade, utilizou-se o método nº 22013 A.O.A.C (1984), que consiste da pesagem de aproximadamente 1 grama de amostra em cadinhos de alumínio previamente tarados e com remoção total da água em estufa durante 2 horas. Estes foram colocados em estufa, marca FANEM, com circulação forçada de ar a 70°C durante 24 horas. Após, as amostras foram retiradas da estufa, colocadas em dessecador e novamente pesadas, para então serem transferidas a uma estufa à vácuo, marca MARCONI (MA 030/12), operando com temperatura de 70°C e 25 mmHg. As amostras foram pesadas em balança analítica digital da BEL Mark Engineering U210A, em intervalos de tempo de 24 horas até obter peso constante.

Para o cálculo da umidade em base úmida, utilizou-se a equação 3.1:

$$X_{bu} = \frac{m_{\text{água}} - m_{\text{seca}}}{m_{\text{água}}} \quad [3.1]$$

Onde:

X_{bu} = umidade em base úmida (gH₂O/g ms total inicial)

$m_{\text{água}}$ = massa de água (g)

m_{seca} = massa da amostra seca (g)

As análises do conteúdo de umidade foram feitas em triplicata com pequenas quantidades de amostra retiradas dos extremos e do centro da banana. O resultado final foi calculado como a média das três determinações.

3.2.2.4.Preparação da matéria-prima

A fruta foi cortado em rodela de 1 cm de espessura e posteriormente em quartos de rodela, chamados de replicatas, as quais foram dispostas na bandeja como mostra a Figura 3.2.

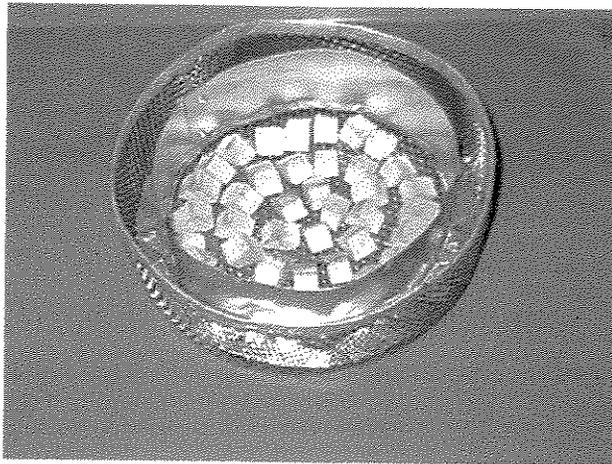


Figura 3.2: Banana *in natura* cortada e disposta na bandeja

3.2.3. Testes preliminares dos ensaios de secagem

Os testes preliminares do processo de secagem de banana a alta temperatura e curto tempo (*HTST*) deste trabalho serviram para determinação das condições dos ensaios verificando os parâmetros descritos a seguir.

3.2.3.1. Medidas de grau Brix

O grau Brix da matéria-prima foi variado de 16°Brix a 25°Brix.

3.2.3.2. Fornecedores da matéria-prima

Realizou-se testes com amostras de fornecedores diferentes.

3.2.3.3. Agitação das amostras

A amostra foi colocada na bandeja e, durante o processo na etapa *HTST*, foi agitada de modo a obter uma homogeneização e evitar que aderisse à bandeja. A agitação consistiu em segurar a bandeja com uma das mãos e, com a outra, bater levemente na lateral, de forma a verificar se as replicatas (pedaços da amostra) estavam soltas da bandeja.

Foram realizados também testes sem agitação.

3.2.3.4. Tempo e temperatura de pré-secagem

Avaliou-se o tempo e a temperatura de pré-secagem realizando-se testes com tempos variando de 2 a 60 minutos e temperaturas de 60 e 70°C.

3.2.3.5. Tempo e temperatura da etapa HTST

Os ensaios foram realizados nas temperaturas de 130°C, 140°C e 150°C em distintos tempos de duração (1 a 20 minutos), com o intuito de se encontrar três tempos de operação para esta etapa. O tempo máximo foi determinado quando ocorreu a queima da amostra.

3.2.3.6. Crocância das amostras dos testes preliminares

A crocância das amostras foi avaliada sensorialmente pelo pesquisador, assim como a existência da queima ou não do produto, avaliada pela coloração e aroma das mesmas.

3.2.3.7. Relação entre a umidade e a atividade de água (a_w)

Para esta determinação, foram realizados dois testes com 2 bandejas colocadas numa mesma coluna (uma bandeja para cada teste), com amostras obtidas do mesmo fornecedor. A coluna estava com a temperatura de *set-point* de 130°C sendo ajustada para 70°C logo que as bandejas foram colocadas no secador. Isso foi feito de modo a se verificar se enquanto a temperatura baixava dos 130°C para os 70°C as amostras obtinham *puffing*. Uma vez estabilizada a temperatura, o teste foi monitorado até que as amostras atingissem uma umidade de 2,5%, 2,0%, 1,5% e 1,0% em base úmida. Com a massa e umidade iniciais das amostras, calculou-se qual a massa final necessária em cada bandeja para que fosse atingido 2,5% de umidade. Uma vez atingido este peso, uma pequena quantidade de amostra foi retirada das bandejas e levada para medição da atividade de água. As amostras restantes foram novamente pesadas e recalculou-se qual a massa necessária para estas alcançarem 2,0% de umidade, e assim sucessivamente até chegar a 1,0% de umidade. A atividade de água foi determinada para cada umidade.

3.2.3.8.Umididade de equilíbrio a 70°C

Este ensaio foi realizado na temperatura de 70°C até a amostra atingir sua umidade de equilíbrio. Para levantar dados de cinética, a amostra foi pesada a cada 5 minutos até os 20 minutos e, a partir daí, a cada dez minutos. Com uma hora e meia de ensaio, a amostra foi pesada de meia em meia hora até completar 11 horas de secagem. Depois disso, foi pesada com 24 horas de secagem e então, em intervalos de meia em meia hora novamente, até atingir peso constante. Monitorou-se a umidade relativa do ar atmosférico e sua respectiva temperatura com o uso de um termohigrômetro.

3.2.4.Planejamento experimental

Com a finalidade de uma análise fatorial, realizou-se o processo de secagem de acordo com o planejamento experimental apresentado na Tabela 3.1. Os níveis de tempo *HTST* foram determinados após realizados os testes preliminares e estão apresentados no Capítulo 4, seção 4.2.8. Os níveis de temperatura *HTST* estão na Tabela 3.2, sendo referentes somente a fase de secagem *HTST*, uma vez que a fase de secagem convencional foi realizada sempre na temperatura de 70°C.

Tabela 3.1: Planejamento Experimental Fatorial 2^2 com três pontos centrais

Ensaio	Variáveis independentes	
	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	0	0
6	0	0
7	0	0

Tabela 3.2: Valores de temperatura decodificados utilizados no planejamento fatorial 2^2 com três pontos centrais

Níveis	Temperatura (°C)
+1	150
0	140
-1	130

OBS: Os três pontos centrais foram diferenciados pelas letras (a), (b) e (c).

Montado o planejamento, os ensaios foram realizados de acordo com este. Nos sete ensaios as amostras foram colocadas primeiramente na etapa de secagem *HTST* seguidas de uma etapa a 70°C.

Os cálculos para verificar os efeitos das variáveis do processo foram feitos através do *Software Statistica 5.0*. Os resultados aqui obtidos foram analisados mediante o teste p (grau de significância estatística), para cada um dos coeficientes obtidos do modelo. Em seguida, fez-se análise de variância do

modelo (ANOVA) de acordo com a Tabela 2.3 e calculou-se o erro relativo médio (equação 2.11).

O modelo proposto foi baseado na equação 2.7 e ficou assim especificado:

$$\text{Resposta do processo} = b_0 + b_1 * T + b_2 * \text{tempo} + b_{12} * (T * \text{tempo}) \quad [3.2]$$

Onde:

Resposta do processo = GR, FMAX, DEF, SENS, *ktotal*, *kHTST* ou *k70*

T = temperatura da etapa *HTST* (°C)

tempo = tempo da etapa *HTST* (min)

b_0 , b_1 , b_2 e b_{12} = coeficientes estimados do modelo estatístico proposto

3.2.5. Caracterização do processo

O processo aqui estudado constou de uma operação de preparação da matéria-prima e de três etapas na operação de secagem, como mostrado na Figura 3.3.

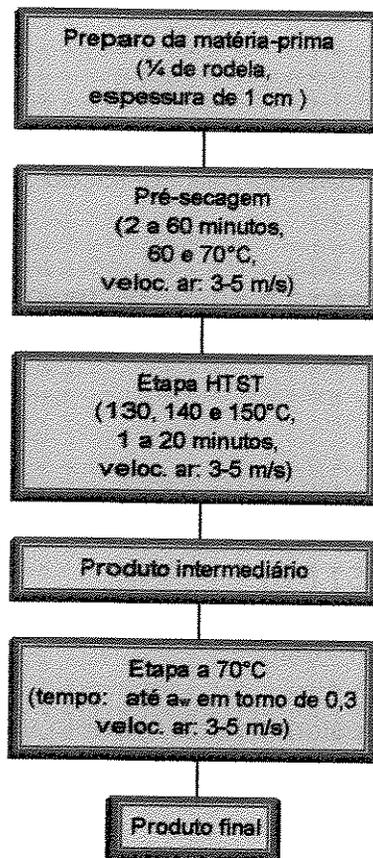


Figura 3.3: Fluxograma do processo de secagem

Determinou-se os parâmetros relativos à cinética de secagem segundo o modelo de Lewis (equação 2.5), utilizando os dados experimentais obtidos nas distintas condições de secagem. Especialmente, procurou-se estudar as condições do processo de secagem (tempo e temperatura da etapa *HTST*), de modo a verificar a influência destes na crocância do produto final.

A massa de amostra nas bandejas variou de 72 g a 98 g.

As condições de secagem estão a seguir especificadas.

3.2.5.1. Secagem à etapa HTST

Seguiu-se o procedimento descrito na seção 3.2.3.5 determinando-se o peso da amostra de minuto a minuto até o limite máximo dos tempos encontrados para cada temperatura HTST (seção 4.2.8). A secagem ocorreu com velocidade do ar em torno de 4 m/s.

3.2.5.2. Secagem à etapa HTST e a 70°C

As amostras foram submetidas à etapa HTST nas condições do planejamento experimental e, em seguida, rapidamente colocadas em secador de bandejas, já estabilizado à temperatura de 70°C e velocidade do ar de 3 m/s. As amostras foram pesadas de 10 em 10 minutos até completar uma hora de secagem e, a partir disso, de meia em meia hora até atingirem umidade em torno de 1,0% (bu).

No início e final de cada ensaio de secagem foi determinada a umidade das amostras. Ao final de cada ensaio, mediu-se a atividade de água e o grau de reidratação. Analisou-se 4 replicatas de cada ensaio em medidas instrumentais de textura e 30 replicatas em medidas sensoriais de crocância.

Realizou-se um ensaio sem a etapa HTST, com as mesmas determinações e procedimentos. Este ensaio foi chamado de Ensaio 8 (somente a 70°C).

3.2.6. Análises realizadas na banana desidratada

3.2.6.1. Atividade de água (a_w)

A atividade de água foi determinada usando o higrômetro Decagon CX-2T, a 25°C, do Laboratório de Medidas Físicas (DEA – FEA – Unicamp).

No caso das frutas comerciais liofilizadas, foram retiradas três amostras dos mesmos pacotes abertos para as análises sensorial e instrumental e mediu-se a atividade de água em triplicata. O resultado foi a média das três leituras.

Após serem retiradas do secador, as amostras de banana desidratada neste estudo foram colocadas num dessecador fechado para estabilização da temperatura. Foram feitas medidas de atividade de água para duas replicatas de cada ensaio, fazendo três leituras para cada uma delas. O resultado final foi calculado como sendo a média das leituras das duas replicatas.

3.2.6.2.Grau de reidratação

A reidratação do produto final foi determinada pela imersão em água aquecida até a ebulição, método utilizado por Kim e Toledo (1987), Saca e Lozano (1992), Luccas (1996) e Cardoso (1998). O procedimento seguiu as seguintes etapas: pedaços de banana nanica desidratadas foram previamente pesados em balança analítica em quantidade de 1,0 a 1,5 gramas e, a seguir, imersos em 500 mL de água destilada em ebulição, durante diferentes tempos (5, 10, 15 e 20 minutos). Retiradas da água, as amostras foram levemente enxugadas com papel absorvente e novamente pesadas. A percentagem de absorção de água foi calculada de acordo com a equação 2.6.

O grau de reidratação foi determinado para todos os ensaios (ensaio 1 ao ensaio 8).

3.2.6.3.Medida instrumental de textura

Os testes de medida instrumental de textura foram realizados no Laboratório de Engenharia de Processos (DEA – FEA – Unicamp), usando um TA-XT2i *Texture Analyser*. As medidas foram feitas sob compressão uniaxial com

a geometria em formato de dente a uma velocidade de deformação de 1mm/s. Os parâmetros avaliados neste teste foram a força máxima (em Newtons) e a deformação na força máxima. Os valores de deformação foram calculados pela equação a seguir:

$$DEF = \text{Ln} \left(\frac{\text{altura da amostra em cada medida de força (mm)}}{\text{altura inicial da amostra (mm)}} \right) \quad [3.3]$$

Considerando as frutas comerciais liofilizadas (maçã, abacaxi e banana), de cada pacote de abacaxi (de um total de 6 pacotes) foram realizados quinze testes de medida instrumental de textura e, de cada um de maçã e banana (de um total de 5 pacotes de cada), seis testes de textura. O resultado final de cada experimento foi calculado como sendo a média das medidas feitas para cada fruta comercial. As amostras foram comprimidas até 50% da altura original para o abacaxi e banana e 80% para a maçã.

As amostras de banana desidratada dos oito ensaios aqui estudados foram comprimidas até 50% da altura original e a análise instrumental foi medida para um grupo de quatro replicatas de cada um dos oito ensaios. O resultado final para cada ensaio foi calculado como uma média das quatro medidas.

3.2.6.4. Medida sensorial de crocância

A análise sensorial foi realizada no Laboratório de Análise Sensorial do Departamento de Nutrição (DEPAN – DEA – FEA – Unicamp) através de um teste de aceitação. Os provadores foram colocados em cabines individuais escuras, iluminadas com luz vermelha para mascarar qualquer efeito de aparência das amostras. Estas foram servidas de modo casual e de forma monádica, para evitar comparações diretas entre as mesmas. Foram usados pratos de fundo preto, codificados com número de três dígitos. Para cada amostra foi realizado um painel

sensorial com 30 provadores selecionados em função da disponibilidade e frequência no consumo de frutas secas. Os provadores avaliaram somente a crocância das amostras utilizando uma escala hedônica não estruturada de nove centímetros, ancorada nos extremos nos termos “desgostei muitíssimo” e “gostei muitíssimo”. Os dados da análise sensorial foram avaliados por ANOVA e Teste de *Tukey*, utilizando o programa estatístico SAS 12.1. Este procedimento foi utilizado tanto para as frutas comerciais liofilizadas, quanto para as amostras de banana desidratadas neste trabalho.

Adicionalmente, foi realizada também a análise de atitude de compra para cada amostra obtida neste trabalho, como proposto por Meilgaard, Civille e Carr (1987), aplicando-se escala de cinco pontos, na mesma ficha da análise de aceitação. Os resultados foram avaliados por análise de histogramas com a porcentagem da frequência de provadores que atribuíram cada conceito em relação à escala utilizada.

Para as frutas comerciais, as análises instrumental e sensorial foram realizadas simultaneamente, em temperatura ambiente, com amostras retiradas dos mesmos pacotes.

As análises instrumental e sensorial das amostras de bananas desidratadas neste trabalho foram realizadas simultaneamente, com replicatas do mesmo ensaio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Frutas comerciais liofilizadas

A Tabela 4.1 e Figura 4.1 apresentam os resultados da análise sensorial das frutas comerciais liofilizadas (abacaxi, banana e maçã).

Tabela 4.1: Médias das notas dos provadores para a aceitação das frutas desidratadas comerciais em relação à crocância ($p < 0,05$)

Amostras	Médias*
Abacaxi	6,8 ^a
Banana	6,7 ^a
Maçã	5,8 ^b
D.M.S.	0,8

*Médias marcadas com mesma letra, na mesma coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de *Tukey* ($p \leq 0,05$)

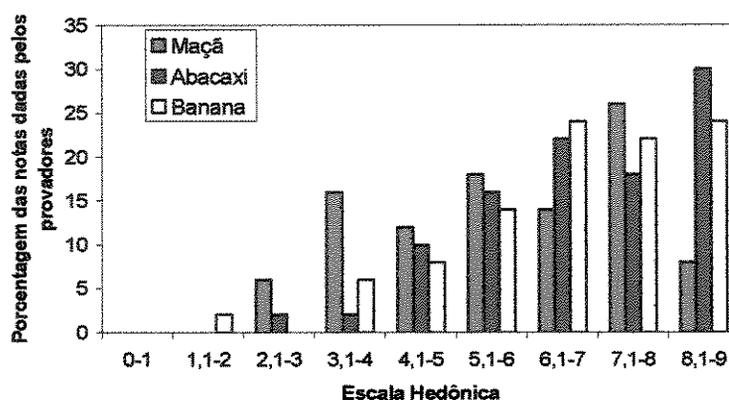


Figura 4.1: Histograma da frequência das notas dadas pelos provadores em relação à escala utilizada

Com esses dados, pode-se observar que a aceitação sensorial da crocância do abacaxi e da banana liofilizados não diferiu entre os mesmos, mas foi significativamente superior ($p < 0,05$) à da maçã. Entretanto, nos três casos a média foi superior a cinco, indicando que todos os produtos foram aceitos em relação a este atributo.

A Figura 4.2 apresenta os resultados de medida instrumental de textura para o abacaxi, sendo que a curva 2(a) é típica para cinco dos seis pacotes do produto (75 amostras) e a curva 2(b) é característica de um único pacote, com 15 amostras. Neste último caso a curva indicou um comportamento plasticizante, o que caracteriza a inexistência da crocância, conflitando com os resultados da análise sensorial. Assim, a transição do estado cristalino para o amorfo já estaria

acontecendo nas amostras desse pacote (LABUZA;KATZ, 1981). Como o procedimento na medida instrumental foi o mesmo para todos os pacotes, a diferença ocorrida entre as duas curvas provavelmente teve origem na etapa de embalagem do produto na própria fábrica. Na curva 2(a) pode-se verificar a ocorrência de vários picos entre o início da compressão até a deformação na força máxima, o que é um dos indicativos de produtos crocantes que apresentam várias fraturas antes da ruptura (SAKLAR;UNGAN;KATNAS, 1999). Esse comportamento foi observado para 84% das amostras (75 amostras, de um total de 90).

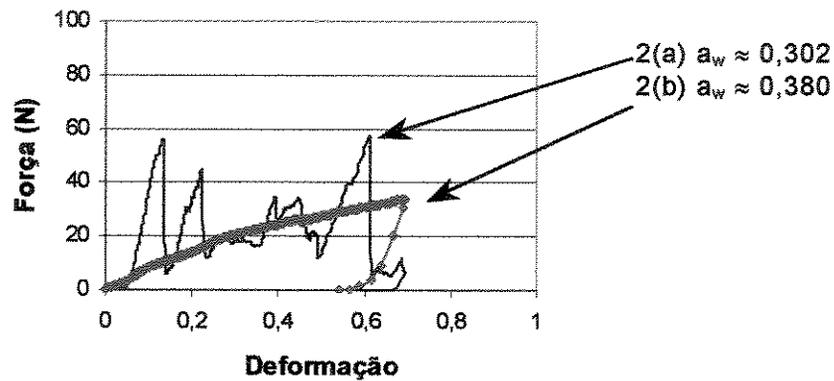


Figura 4.2: Curva típica de força-deformação do abacaxi comercial liofilizado

2(a)-Comportamento típico de amostras de cinco pacotes
2(b)-Comportamento típico de amostras de um único pacote

A Figura 4.3 apresenta os resultados obtidos para a banana, na qual também se verifica a ocorrência de vários picos entre o início da compressão até a deformação na força máxima, um dos indicativos de produtos crocantes, característica também comprovada pelo painel de provadores na análise sensorial.

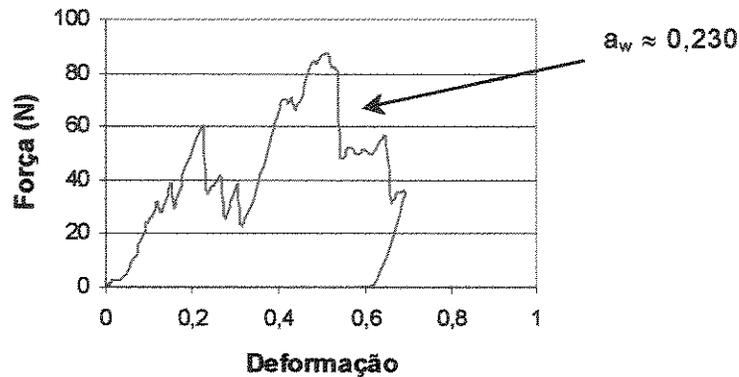


Figura 4.3: Curva típica de força-deformação da banana comercial liofilizada

A Figura 4.4 mostra os resultados da análise instrumental obtidos para a maçã, cuja curva caracteriza um comportamento plasticizante. No entanto, os provadores aceitaram esse produto como crocante, embora com uma nota inferior à do abacaxi e banana. Essa diferença entre as análises pode ter ocorrido devido à geometria da maçã que é em forma de lâmina, enquanto os outros dois apresentam espessura maior e irregular. Devido a isso, a geometria de compressão utilizada no ensaio provavelmente não foi adequada para a medida instrumental da maçã, promovendo curvas com esse comportamento. Além disso, apesar dos três produtos serem liofilizados, a banana e o abacaxi foram provenientes do mesmo fabricante e a maçã de um fabricante diferente, o que pode ocasionar algumas diferenças nas condições do processo.

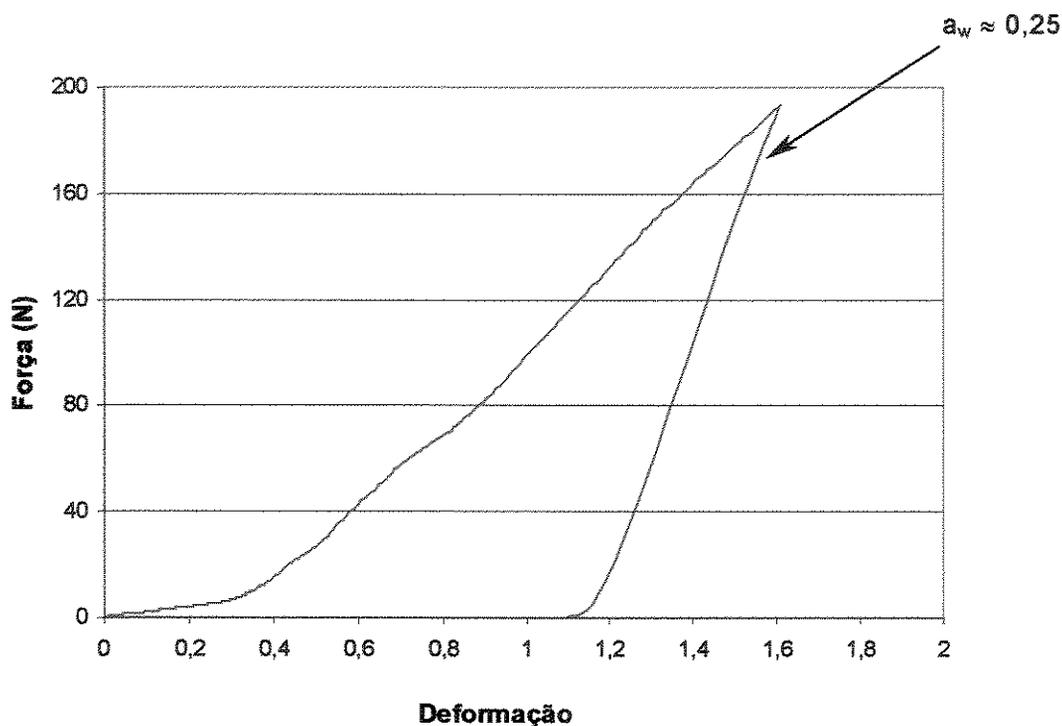


Figura 4.4: Curva típica de força-deformação da maçã comercial liofilizada

A atividade de água (a_w) do abacaxi seco apresentou amplitude de 0,302 a 0,320. Somente um pacote (curva 2 (b)) apresentou um valor bastante alto, em torno 0,380, indicativo de um produto que já está na faixa de transição do estado cristalino para o amorfo (LABUZA;KATZ, 1981), o que explica o comportamento plasticizante observado na curva 2(b) da Figura 4.2 . A atividade de água da maçã ficou entre 0,239 e 0,292 e, apesar de ser uma faixa de valores característicos de produtos crocantes e do painel sensorial ter considerado este produto como crocante, esta apresentou um comportamento plasticizante nas condições de realização do ensaio de medida instrumental de textura, provavelmente devido a sua geometria, como discutido anteriormente. Já a banana apresentou uma atividade de água entre 0,232 e 0,280, valores considerados ideais, segundo a bibliografia, para o alimento ser considerado seco e crocante, o que foi comprovado pelo painel de provadores e pelas medidas instrumentais de textura.

Outro parâmetro importante na caracterização da textura é a força máxima necessária para romper o produto, o que indica sua dureza. O abacaxi apresentou valor médio na força máxima de 35,83N, a banana de 48,27N e a maçã de 126,22N. Estes valores apresentam direta correspondência com as notas de aceitação dos provadores (Tabela 4.1) e a média destes resultados está apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados das médias de força máxima e deformação na força máxima para cada uma das frutas comerciais liofilizadas

	Média FMAX(N)	Desvio padrão FMAX	Média DEF	Desvio padrão DEF
Maçã	126,22	12,92	1,61	0,00
Abacaxi	35,83	4,77	0,41	0,12
Banana	48,27	14,13	0,53	0,06

Pela Tabela 4.2, pode-se observar que a maçã apresentou maior valor de força máxima do que o abacaxi e a banana, o que indica maior dureza do produto, ocasionando a perda da sensação de crocância (SAKLAR; UNGAN; KATNAS, 1999). Isso foi comprovado pelas notas da análise sensorial e pela curva força-deformação, que apresentou um comportamento plasticizante. Relacionando a a_w com o valor de força máxima, Duizer e Campanella (1998) concluíram que ocorre aumento da dureza com o aumento da a_w porque a água age como um plasticizante, fazendo com que o alimento perca a característica de crocância. Nesse caso, a maçã deveria ter apresentado menor dureza, o que seria indicado por um valor médio menor na força máxima, na mesma amplitude do valor médio de força máxima da banana, uma vez que ambas apresentam valores de atividade de água próximos e abaixo de 0,300.

4.2. Testes preliminares dos ensaios de secagem

De modo a obter-se um produto crocante com aroma e sabor agradáveis, os testes preliminares do processo de secagem de banana a alta temperatura e curto tempo (*HTST*) serviram para verificar as variáveis determinadas na Tabela 4.3. A Tabela 4.4 mostra os resultados das observações de todos os testes preliminares.

Tabela 4.3: Condições de ensaio dos testes preliminares

	Matéria-prima	Pré-secagem		Etapa <i>HTST</i>		Agitação
	°Brix	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	sim/não
Teste 1	21,5	70	2	150	10	sim-leve e lateral
Teste 2	22,2	70	6	150	3	sim-leve e lateral
Teste 3	20,0	70	5,5	150	10	sim-leve e lateral
Teste 4	20,0	70	4	150	2	sim-leve e lateral
Teste 5	22,2	70	5	150	8	sim-leve e lateral
Teste 6	19,6	60	8	150	9	sim-leve e lateral
Teste 7	21,7	60	5	150	2	sim-leve e lateral
Teste 8	24,0	60	20	150	11	sim-leve e lateral
Teste 9	24,0	60	40	150	10	sim-leve e lateral
Teste 10	23-24	70	60	150	10	não
Teste 11	25,0	70	60	130	10	não
Teste 12	25,0	70	60	140	10	não
Teste 13	22-23	70	30	130	10	não
Teste 14	25,7	70	30	130	10	não
Teste 15	16,0	70	5	130	10	não
Teste 16	20,7	70	5	140	12	não
Teste 17	16,0	70	5	70	600	não
Teste 18	16,0	70	5	70	600	não

Tabela 4.4: Observações ao final de cada teste preliminar

Observações do comportamento das amostras	
Teste 1	Crocantes, boa cor, sabor agradável e desprendidas da bandeja ao final de 7,5 horas de secagem.
Teste 2	Desintegração aos 3 minutos da etapa <i>HTST</i> .
Teste 3	Desintegração ao final da etapa <i>HTST</i> , porém menos que o teste 2.
Teste 4	Desintegração aos 2 minutos da etapa <i>HTST</i> .
Teste 5	Caramelização aos 8 minutos da etapa <i>HTST</i> e desintegração com 2 horas na etapa 70°C.
Teste 6	Temperatura da pré-secagem variou entre 56 e 65°C até fixar em 60°C. Grudaram na bandeja ao final de 9 minutos da etapa <i>HTST</i> .
Teste 7	Agitação de 1 em 1 minuto na pré-secagem. Desintegração aos 2 minutos da etapa <i>HTST</i> .
Teste 8	Esfericidade aos 6 minutos da etapa <i>HTST</i> , desintegrando-se e grudando na bandeja ao final desta etapa.
Teste 9	Grudaram e desintegraram na bandeja ao final da etapa <i>HTST</i> .
Teste 10	<i>Puffing</i> aos 2 minutos da etapa <i>HTST</i> e leve escurecimento aos 5 minutos. Pouco grudada ao final de 3 horas na etapa a 70°C e fáceis de tirar da bandeja, porém crocantes na superfície e moles internamente. Sabor agradável.
Teste 11	<i>Puffing</i> a 1 minuto da etapa <i>HTST</i> e escurecimento aos 6 minutos. Amostras mais grudada na bandeja e difíceis de tirar do que no teste 10. Amostras dos extremos da bandeja mais claras ao final de 3 horas na etapa a 70°C. Todas crocantes por fora e interior mole. Sabor agradável.
Teste 12	Esfericidade a 1 minuto da etapa <i>HTST</i> e <i>puffing</i> aos 2 minutos. Fáceis de tirar da bandeja, sabor agradável, crocantes por fora, mas com o interior mole ao final de 3 horas na etapa 70°C.
Teste 13	Esfericidade aos 2 minutos da etapa <i>HTST</i> , soltando água. Ao final desta etapa apresentaram boa esfericidade e leve encolhimento. Sem etapa a 70°C.
Teste 14	Esfericidade a 1 minuto da etapa <i>HTST</i> , soltando água ao ocorrer o <i>puffing</i> . Aos 3 minutos cessou a expansão, aos 7 minutos ocorreu a caramelização e, ao final da etapa <i>HTST</i> apresentaram boa cor e forma esférica. Em algumas amostras houve saída de água, mas essa não evaporou e acabou caramelizando e fazendo as amostras grudarem umas nas outras. Amostras fáceis de retirar da bandeja e sabor agradável ao final de 5,5 horas na etapa a 70°C, porém moles por dentro, apesar de apresentarem superfície crocante.
Teste 15	A 1 minuto da etapa <i>HTST</i> as amostras continuavam com a mesma aparência inicial, aos 5 minutos poucas estavam esféricas, aos 7 minutos quase todas estavam esféricas e, ao final desta etapa apresentaram pouco <i>puffing</i> e não caramelizaram. Ao final de 4 horas na etapa a 70°C apresentaram sabor desagradável, superfície externa dura (ressecada) e interna mole.
Teste 16	<i>Puffing</i> aos 3 minutos da etapa <i>HTST</i> e aos 7 minutos começaram a encolher, apresentando caramelização. Já na etapa a 70°C encolheram muito, ficando moles e achatadas. Ao final de 9 horas de secagem, apresentavam boa cor caramelo, mas com textura murcha e mole.
Teste 17	Encolheram muito, ficando moles e achatadas no início da secagem. Ao final de 10 horas apresentavam cor clara, superfície dura e ressecada e textura interior murcha e mole. Sabor desagradável, não adocicado.
Teste 18	As amostras encolheram e amoleceram no início da secagem. Ao final de 10 horas apresentavam cor clara, superfície dura e ressecada com interior murcho e mole. Sabor desagradável, não adocicado.

Uma vez que a bibliografia fornece um indicativo do estágio de maturação da banana (Tabela 2.2 e Figura 2.1, MEDINA *et al.*, 1985), foi escolhido o estágio 7 dessa escala, com a casca totalmente amarela e pequena ocorrência de manchas pardas. Entretanto, observou-se que ocorreu uma significativa variação no valor do grau Brix para uma mesma aparência da casca. Isso foi um indicativo de que a aparência da casca da banana não poderia ser utilizada para a seleção da amostra. Desse modo, passou-se a utilizar a leitura de refratômetro para esta seleção.

4.2.1. Medidas de grau Brix

A faixa de 19°Brix a 21°Brix da matéria-prima se mostrou adequada para a secagem de banana nanica, uma vez que frutas na faixa de 16°Brix a 19°Brix apresentaram sabor não adocicado, textura externa muito firme (dura) e interna mole ao final da secagem. Amostras com grau Brix mais alto, acima de 22°Brix, apresentaram alto grau de escurecimento (caramelização), textura externa crocante, porém interna muito frágil, chegando a se desintegrar durante a etapa *HTST*.

4.2.2. Fornecedores da matéria-prima

Como a matéria-prima foi comprada em mercados do distrito de Barão Geraldo, os fornecedores eram diferentes, dependentes do local escolhido. Assim, um aspecto importante é que foram observados, para um mesmo teor de grau Brix e umidade inicial, resultados distintos quando as frutas eram provenientes de fornecedores diferentes. Isso indicou a possibilidade de que outras características da banana, como a própria composição química da fruta (porcentagem de amido, sacarose, etc.), além do grau Brix e umidade, podem estar relacionadas ao *puffing* e à crocância. Desse modo, para evitar interferências no objetivo desta pesquisa, essa eventual variabilidade deveria ser

identificada ou, se possível, evitada, o que poderia ser feito assegurando a origem das frutas de um mesmo fornecedor.

4.2.3. Agitação das amostras

Verificou-se que a agitação causava a aderência das amostras na bandeja, chegando à desintegração das mesmas quando estas apresentavam valores acima de 22°Brix. Por outro lado, frutas com valores entre 19°Brix e 21°Brix, quando mantidas sem agitação, eram facilmente desprendidas da bandeja com ajuda de uma pinça ao final da secagem. Isso mostrou que a agitação das amostras durante a etapa *HTST* era desnecessária.

4.2.4. Tempo e temperatura de pré-secagem

Esta etapa propicia uma secagem superficial que faz com que a banana não fique aderida à bandeja na etapa *HTST* posterior, diminuindo o tempo de exposição da fruta na etapa *HTST*.

A partir dos testes preliminares, observou-se que a variação da temperatura de pré-secagem não provocou diferenças nas características das amostras e poderia ser mantida em 70°C, conforme utilizado por muitos autores (MEDINA *et al.*, 1985; LUCCAS, 1996; JAYARAMAN; DAS GUPTA, 1992; NOGUEIRA, 1991; SACA; LOZANO, 1992; CARDOSO, 1998; KROKIDA; KIRANOUDIS; MAROULIS, 1999).

O tempo de pré-secagem teve uma significativa influência, pois os maiores tempos desta etapa, especialmente para frutas com baixos valores de grau Brix, produziram amostras mais duras, ressecadas e não crocantes, independente da temperatura usada na etapa posterior (*HTST*). Por outro lado, os menores tempos de pré-secagem causaram grande aderência da fruta à bandeja quando houve

agitação. Na ausência de agitação, isto não ocorreu e as amostras foram facilmente desprendidas da bandeja com o auxílio de uma pinça. Logo, o tempo de pré-secagem de 5 minutos a uma temperatura de 70°C mostrou-se adequado para uma secagem superficial da amostra impedindo que esta aderisse à bandeja na etapa *HTST*.

4.2.5. Tempo e temperatura da etapa *HTST*

Nas primeiras análises verificou-se que a queima do produto ocorreu aos 20 minutos para a temperatura de 150°C. Desse modo, eliminou-se esse limite de tempo e trabalhou-se com no máximo 15 minutos na etapa *HTST*, tempo em que a amostra começava a caramelizar. Por outro lado, tempos de *HTST* inferiores a 5 minutos não propiciaram a ocorrência do *puffing*, necessário à obtenção da crocância, pois o volume da fruta obtido na etapa *HTST* rapidamente diminuía quando submetida à etapa de 70°C. Assim, descartou-se trabalhar com tempos muito baixos (menores que 5 minutos).

4.2.6. Relação entre a umidade e a atividade de água (a_w)

A banana comercial liofilizada apresentou a_w entre 0,232 e 0,280, valores considerados ideais, segundo Labuza e Katz (1981), para o alimento ser considerado seco e crocante. Desse modo, realizou-se dois testes com o objetivo de se encontrar uma relação entre a_w e umidade final para verificar qual umidade final a amostra de banana desidratada deveria atingir de maneira que sua a_w ficasse próximo a 0,300.

Estes resultados estão apresentados na Figura 4.5, com a umidade final expressa em gH₂O/gms.

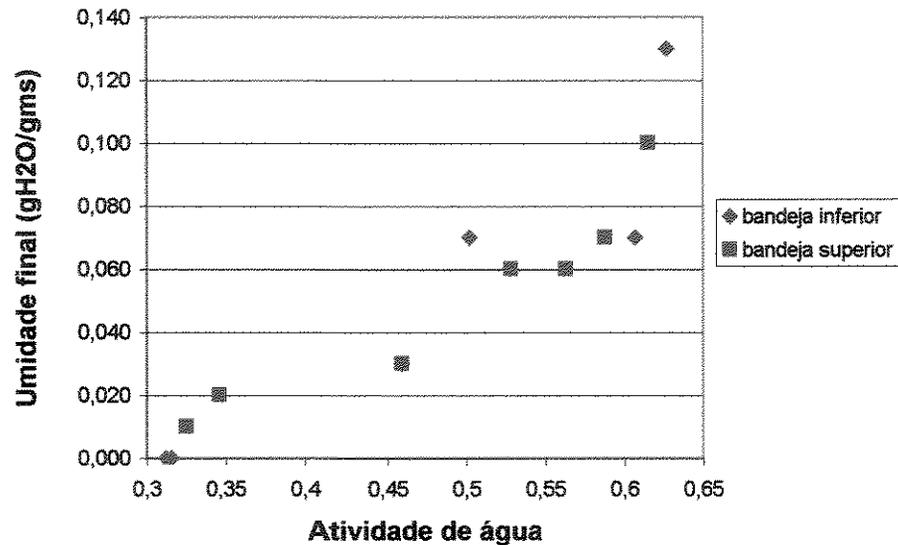


Figura 4.5: Relação entre a umidade final e a atividade de água de amostras de banana submetidas a uma corrente de ar a 70°C

Quando se ajustou a temperatura de *set-point* da coluna, que operava com a temperatura de 130°C, para 70°C, verificou-se que enquanto a temperatura baixava para o novo valor de *set-point*, as amostras obtiveram um leve *puffing*, que não foi significativo provavelmente devido ao rápido decréscimo da temperatura (em torno de 12 minutos). A secagem durou ao todo cerca de 8 horas.

É importante ressaltar que as bandejas estavam em condições de ar diferentes. Logo, a bandeja superior pode ter recebido, devido a sua localização na coluna, um ar mais úmido, porém, espera-se que estas variações estejam dentro da própria variação do ar atmosférico.

Através da Figura 4.5 observa-se que a amplitude de valores de atividade de água para a bandeja superior ficou entre 0,615 (zero de desvio padrão) e 0,325 (desvio padrão de 0,004) com umidade final de 0,1 e 0,01 gH₂O/gms, respectivamente. A bandeja inferior teve uma variação de a_w entre 0,627 (zero de

desvio padrão) e 0,312 (desvio padrão de 0,002) com suas respectivas umidades de 0,13 gH₂O/gms até muito próximo a zero. Assim, este estudo mostrou que a amostra atingiu uma atividade de água em torno de 0,320 quando sua umidade final chegou próximo a 0,01 gH₂O/gms. Este valor de umidade foi utilizado como indicativo do término de todos os ensaios.

4.2.7. Umidade de equilíbrio a 70°C

Os valores medidos de umidade relativa e temperatura do ar atmosférico, assim como os valores de umidade relativa do ar de secagem, estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Medidas de umidade relativa e temperatura

Tempo	URar (%)	Tar (°C)	URars (%)
20 min	37	34,5	6,7
2hs20min	34	34,7	6,6
5hs35min	51,5	31,3	7,4
6hs20min*	65,1	28,3	7,5
25,5horas**	62,2	28,1	7,5

*chuva

**tempo nublado

Ao final da secagem, as condições de umidade relativa do ar de secagem estavam relativamente estáveis e, a partir de 26 horas de ensaio, a amostra começou a não apresentar variação de massa, com uma tendência a atingir o equilíbrio, fato que se realizou com 30 horas de secagem. Terminada a secagem, pequenas quantidades de amostra foram pesadas e colocadas em estufa à vácuo por 24 horas para determinação da umidade de equilíbrio. A determinação dessa umidade foi feita em triplicata e obteve-se um valor médio de 0,003 gH₂O/gms.

4.2.8. Condições dos ensaios

Com os resultados de todos os teste preliminares, foi possível otimizar o modo de colocação da bandeja, a rapidez nas pesagens e suas respectivas leituras, assim como a determinação das melhores condições de operação. Com isso, os ensaios e análises obtidos nesta fase permitiram determinar as seguintes condições de processo de secagem:

- ✓ Grau Brix das amostras: 19 a 21°Brix, medido através de leitura em refratômetro

- ✓ Fornecedores: amostras provenientes de um único fornecedor que comercializa bananas com etiqueta

- ✓ Agitação das amostras: amostras sem agitação

- ✓ Tempo e temperatura da etapa de pré-secagem: 5 minutos a 70°C

- ✓ Tempo e temperatura da etapa de *HTST*: 130, 140 e 150°C e tempos de 9, 12 e 15 minutos

De acordo com o planejamento experimental da Tabela 3.1, para a variável tempo *HTST* o nível +1 corresponde a 15 minutos, o nível -1 a 9 minutos e o ponto central ficou em 12 minutos.

- ✓ Umidade final: aproximadamente 1,0% em base seca, valor que correspondeu à atividade de água em torno de 0,320, para uma secagem

de 8 horas a 70°C (tempo estimado para os ensaios que foram submetidos à etapa *HTST*)

O ensaio oito, por ser uma secagem somente a 70°C, apresentou um tempo de secagem maior para atingir a umidade final desejada. Esse tempo foi de aproximadamente 10 horas de secagem.

A Figura 4.6 ilustra a cor da casca da banana *in natura* utilizada nos ensaios de secagem.

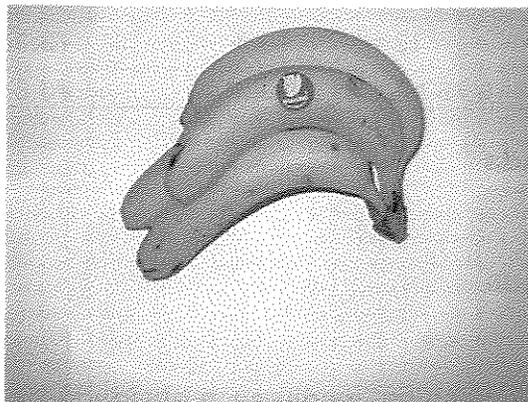


Figura 4.6: Aspecto da casca da banana utilizada nos ensaios de secagem

4.3. Características da matéria-prima

Com exceção das amostras utilizadas nos ensaios 5 e 6, cuja análise do grau Brix por refratômetro indicou que as mesmas estavam fora da faixa estabelecida, sendo necessária a compra de bananas de um outro fornecedor para estes ensaios, todas as demais (ensaios 1 a 4 e ensaio 8) foram provenientes de um mesmo fornecedor. Assim, os diferentes fornecedores foram codificados como fornecedor A e fornecedor B.

Todas as características da matéria-prima estão apresentadas na Tabela 4.6 a seguir.

Tabela 4.6: Condições da matéria-prima utilizada em cada ensaio de secagem

Ensaio	Etapa HTST		Matéria-prima		
	Temperatura (°C)	Tempo (min)	°Brix	Umidade inicial (%)	Fornecedor
1	130	9	20,2	75,0	B
2	150	9	19,1	75,0	B
3	130	15	19,1	72,0	B
4	150	15	19,8	73,6	B
5	140	12	19,0	71,0	A
6	140	12	20,6	71,0	A
7	140	12	19,3	73,1	B
8	etapa a 70°C- 9,78 horas		20,2	73,6	B

4.4. Banana desidratada

4.4.1. Atividade de água

Para cada um dos ensaios, mediu-se a atividade de água das amostras. A umidade final foi calculada partindo-se dos valores iniciais de umidade e da redução de massa. Estes resultados estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Valores de atividade de água das amostras ao final de cada ensaio

Ensaio	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Umidade final (% bu)	a_w	Desvio padrão a_w
1	130	9	1,04	0,409	0,007
2	150	9	1,02	0,394	0,007
3	130	15	1,05	0,383	0,008
4	150	15	1,05	0,363	0,001
5	140	12	1,01	0,345	0,010
6	140	12	1,00	0,345	0,012
7	140	12	1,06	0,348	0,011
8	etapa a 70°C- 9,78 horas		1,01	0,382	0,006

Verificou-se que em nenhum dos ensaios foram atingidos valores de atividade de água em torno de 0,320, como planejado, embora as umidades finais tenham sido calculadas de acordo com o valor estimado. Fazendo uma análise da Figura 4.5 pode-se verificar que uma pequena variação na umidade provoca uma grande variação na atividade de água. Provavelmente seriam necessários mais testes para determinar a relação da umidade em base seca versus atividade de água para que o valor definido fosse mais preciso.

Analisando as Tabelas 4.6 e 4.7, pode-se verificar que tanto o grau Brix quanto a diferença de fornecedor não indicaram diferenças nos resultados de atividade de água.

4.4.2. Grau de reidratação

A Tabela 4.8 apresenta os graus de reidratação encontrados para os sete ensaios do planejamento experimental e para o ensaio somente a 70°C. A Figura 4.7 ilustra o comportamento desses dados.

Tabela 4.8: Comparação entre os graus de reidratação encontrados para as diferentes condições de ensaio

GR (% água absorvida)								
Ensaio								
Tempo de imersão (min)	1 130°C 9min	2 150°C 9min	3 130°C 15min	4 150°C 15min	5 140°C 12min(a)	6 140°C 12min(b)	7 140°C 12min(c)	8 Etapa a 70°C-9,78 horas
20	156,71	160,24	169,34*	201,47*	195,70*	198,16	164,21	156,29*
15	131,10	146,61	182,89*	216,83*	198,47*	145,75**	153,20	184,69*
10	100,08	119,12	143,87	175,40	146,61	145,02**	137,24	120,39
5	59,35	68,46	102,03	145,56	113,45	113,35	113,88	91,04

* Valores a 20 minutos menores do que a 15 minutos

** Valores a 15 minutos praticamente iguais a 10 minutos

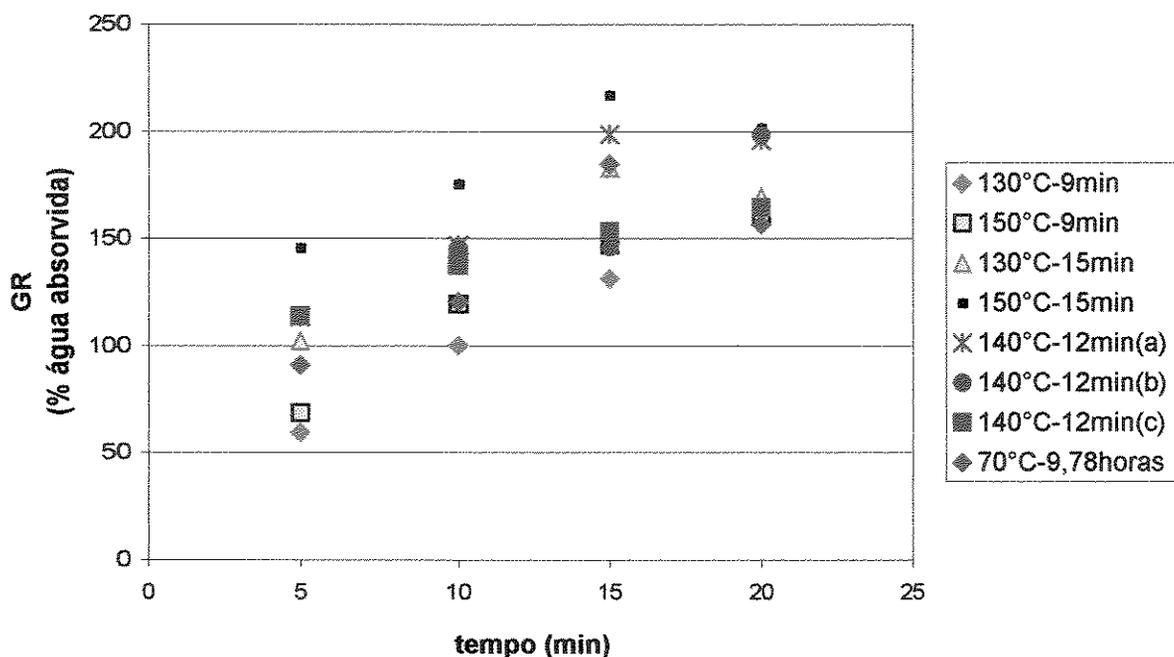


Figura 4.7: Grau de reidratação versus tempo de imersão das amostras em água em ebulição

Observando a Figura 4.7 e os valores da Tabela 4.8, pode-se verificar que as medidas de grau de reidratação aos 15 minutos, para as condições 70°C, 130°C-15min, 150°C-15min e 140°C-12min(a), foram maiores que aos 20 minutos. Isso ocorreu devido a uma perda de massa das amostras durante esses tempos em imersão, fato comprovado através de uma observação visual dos ensaios de reidratação, pois amostras em maior tempo de imersão começavam a desintegrar-se, perdendo pequenas partículas de massa na água e deixando a mesma com coloração caramelo. Na condição 140°C-12min(b) a quantidade de massa absorvida aos quinze minutos foi superior a dez minutos, mas isso não significa que a amostra não tenha perdido massa aos 15 minutos, uma vez que os valores são muito próximos. Assim, os graus de reidratação das amostras nos tempos de 10 e 5 minutos foram os que apresentaram valores mais confiáveis de

porcentagem de água absorvida, uma vez que acima desses tempos ocorreu perda de massa das amostras.

Luccas (1996) utilizou esse mesmo método para reidratar pedaços de banana prata desidratados por secagem convencional a 70°C e por secagem com dois estágios: uma etapa *HTST* seguida de uma etapa a 70°C. O autor obteve o dobro de valores de índice de reidratação para as amostras submetidas à etapa *HTST* em comparação com aquelas submetidas somente a uma secagem a 70°C.

Kim e Toledo (1987) utilizaram o mesmo método e conseguiram uma boa taxa de reidratação para *blueberries* desidratadas por *HTST* em leite fluidizado em comparação com amostras desidratadas osmoticamente seguido de secagem *HTST* em leite fluidizado.

Cardoso (1998) mediu o grau de reidratação de fatias de banana-prata desidratadas em leite vibro-fluidizado a altas temperaturas. A autora conseguiu um bom índice de reidratação para as maiores temperaturas de *HTST* (150°C) e concluiu que o aumento da temperatura *HTST* provocava um aumento na absorção de água, independente do tipo de pré-tratamento aplicado nas amostras, devido à formação de um produto com estrutura mais porosa.

Novamente, pode-se verificar que tanto o grau Brix quanto a diferença de fornecedor não indicaram diferenças nos resultados do grau de reidratação.

4.4.3. Medida instrumental de textura

Devido à limitação de quantidade de amostras, 4 replicatas de cada condição de ensaio foram utilizadas para esta análise, sendo coletadas em diferentes lugares da bandeja. Os resultados obtidos neste teste estão apresentados nas Tabela 4.9 e 4.10. As Figuras A1 até A8 do Apêndice A

ilustram o comportamento das replicatas de cada ensaio num gráfico típico de força-deformação.

Tabela 4.9: Medidas de força máxima para todos os ensaios realizados

Ensaio	T (°C)	Tempo (min)	Replicatas				Médias	Desvio Padrão
			1	2	3	4		
1	130	9	39,00	56,43	55,12	54,48	51,26	8,21
2	150	9	43,05	41,47	39,75	45,58	42,46	2,48
3	130	15	46,09	78,16	43,92	74,44	60,65	18,15
4	150	15	35,76	32,76	29,89	46,32	36,18	7,17
5	140(a)	12	53,42	74,77	29,47	58,53	54,05	18,74
6	140(b)	12	48,37	76,96	46,30	66,01	59,41	14,67
7	140(c)	12	62,33	64,39	28,88	48,08	50,92	16,39
Etapa a								
8	70°C - 9,78 horas		73,29	77,99	96,48	82,52	82,57	10,01

Tabela 4.10: Medidas de deformação na força máxima para todos os ensaios realizados

Ensaio	T (°C)	Tempo (min)	Replicatas				Médias	Desvio padrão
			1	2	3	4		
1	130	9	0,59	0,69	0,69	0,69	0,67	0,05
2	150	9	0,69	0,69	0,65	0,69	0,68	0,02
3	130	15	0,13	0,69	0,12	0,68	0,40	0,32
4	150	15	0,40	0,39	0,14	0,35	0,32	0,12
5	140(a)	12	0,43	0,69	0,34	0,68	0,53	0,18
6	140(b)	12	0,17	0,38	0,13	0,55	0,31	0,20
7	140(c)	12	0,52	0,67	0,55	0,38	0,53	0,12
Etapa a								
8	70°C - 9,78 horas		0,69	0,69	0,51	0,68	0,64	0,09

Para efeitos de comparação, construiu-se um gráfico com uma curva típica força-deformação de cada ensaio. Como critério de escolha das curvas, baseou-se nos valores de força média máxima de cada um dos ensaios e escolheu-se a curva de apresentou força máxima próxima a esse valor médio. Isso foi feito para cada ensaio separadamente. Não foi feita a média das quatro replicatas de cada ensaio porque estes apresentaram curvas muito heterogêneas (ver Apêndice A) para uma mesma condição de ensaio e a média mascararia o comportamento típico dessas curvas, que apresentam vários pontos de fratura até a deformação final. A Figura 4.8 ilustra uma curva força-deformação de cada um dos oito ensaios de secagem.

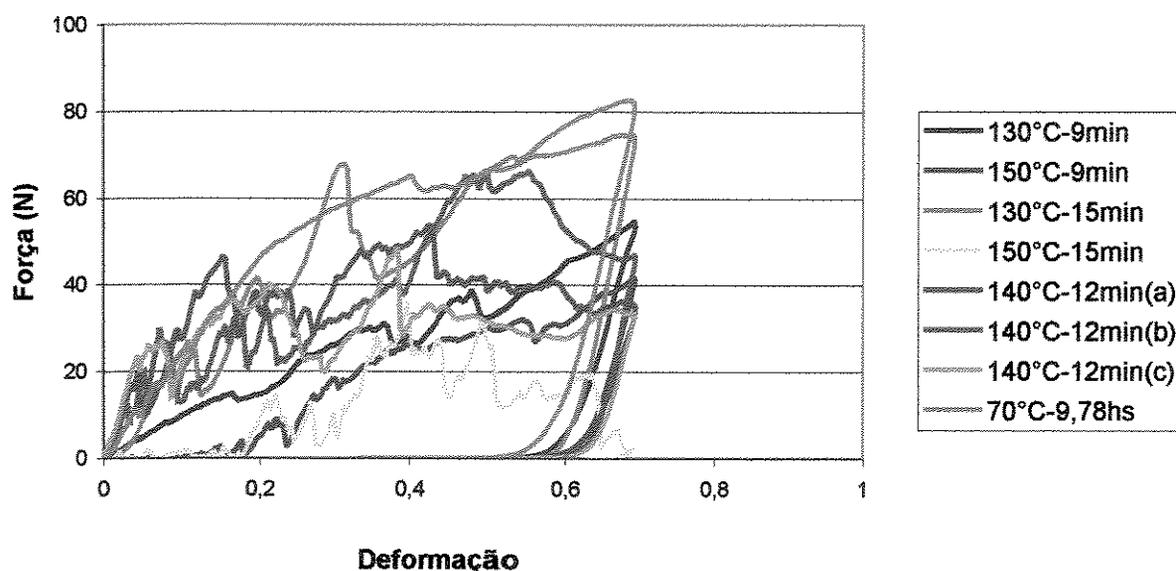


Figura 4.8: Curvas típicas de força-deformação de uma replicata de cada um dos oito ensaios

Comparando-se as curvas dos ensaios 1 (130°C-9min) e 3 (130°C-15 min) pode-se verificar que a elevação do tempo da etapa *HTST* causou maior número de picos entre o início da compressão e a deformação na força máxima, o que, segundo Saklar, Urgan e Katnas (1999), aumenta a sensação de crocância. Esse comportamento foi observado para todas as replicatas (ver Apêndice A). Por outro lado, o ensaio 1 apresentou a_w (ver valores de a_w na Tabela 4.7) de 0,409 e, o

ensaio 3 de 0,383. Segundo Duizer e Campanella (1998), o aumento da dureza com o aumento da a_w pode ser explicado pelo fato da água agir como um plasticizante, pois a plasticização parcial da parede celular do material aumentará a coesão da estrutura, aumentando a dureza do alimento. Isto se deve ao fato de que a estrutura plasticizada não desintegra facilmente, permitindo que a amostra permaneça intacta e oferecendo mais resistência à deformação. Nesse caso, o ensaio 3 apesar de apresentar menor valor de a_w e maior quantidade de pontos de fratura, apresentou maior força média necessária para romper o produto, o que indicou maior dureza. Isso deve ter ocorrido devido à heterogeneidade das replicatas, cujas medidas de força máxima foram muito diferentes.

As curvas de 150°C-9min (ensaio 2) e 150°C-15min (ensaio 4), mostram que o ensaio 2 teve maior amplitude no valor de força máxima do que o ensaio 4, o que indicou maior dureza do produto, ocasionando a perda da sensação de crocância (SAKLAR; UNGAN; KATNAS, 1999). Além disso, o ensaio 4 apresentou maior número de picos existentes até ocorrer a deformação na força máxima, um dos indicativos de alimentos crocantes, de acordo com os autores. Analisando os valores de a_w , o ensaio 2 ($a_w = 0,394$) apresentou maior atividade de água do que o ensaio 4 ($a_w = 0,363$), o que comprova as observações de Duizer e Campanella (1998). A replicata R3 da Figura A4 (Apêndice A) foi partida ao meio logo no início da compressão, por isso ocorreu uma significativa diferença de amplitude nos seus valores de deformação, em relação as outras três replicatas deste ensaio. Isso ocorreu porque a geometria de compressão, logo após romper a superfície da replicata, encontrou uma parte com grande porosidade, não sendo mais necessário aplicar força para comprimir a amostra, uma vez que não havia mais massa de amostra até o final da compressão.

Analisando as curvas com 9 minutos de *HTST* e temperaturas diferentes (ensaio 1: 130°C-9min e ensaio 2: 150°C-9min) observa-se que o aumento da temperatura promoveu um sensível aumento no número de picos de picos entre o

início da compressão e a deformação na força máxima, além de ter diminuído a força necessária para romper o produto. Como dito anteriormente, esses dois fatores são indicativos de promover a sensação de crocância. Além disso, houve um decréscimo no valor de a_w com o aumento da temperatura *HTST* ($a_w = 0,409$ para o ensaio 1 e $0,394$ para o ensaio 2), o que novamente indica que o alimento apresenta menor dureza para valores de atividade de água menores.

Quando se compara as curvas com 15 minutos de *HTST* e temperaturas diferentes (ensaio 3: 130°C -15min e ensaio 4: 150°C -15min), pode-se observar que ocorre o mesmo comportamento que para 9 minutos com temperaturas diferentes, sendo que para 15 minutos de *HTST* o aumento de temperatura promove um significativo aumento no número de picos de picos entre o início da compressão e a deformação na força máxima. Além disso, o valor da força máxima é muito menor para a temperatura de 150°C e este apresenta atividade de água menor do que o ensaio 3, de 130°C ($a_w = 0,383$ para o ensaio 3 e $0,363$ para o ensaio 4). Tudo isso colabora para que o produto seco a 150°C -15min apresente maiores indicações de crocância do que a 130°C -15min.

Logo, pode-se concluir que o aumento da temperatura e do tempo da etapa *HTST* provoca o aumento do número de picos entre o início da compressão e a deformação na força máxima, diminuindo a força necessária para romper o produto e promovendo a característica de crocância.

Nos ensaios 5, 6 e 7 (140°C -12 min(a), (b) e (c), respectivamente), observou-se que a força média teve pouca variação (54N para o ensaio 5, 59N para o ensaio 6 e 50N para o ensaio 7) e número de picos entre o início da compressão e a deformação na força máxima foi semelhante, além dos valores de a_w serem bem inferiores a todos os outros ensaios (ensaios 5 e 6: $a_w = 0,345$ e ensaio 7: $a_w = 0,348$). Tudo isso indica que nestes três ensaios foi possível a obtenção de produtos crocantes. Porém, observando os ensaios separadamente (Tabela 4.9 e Apêndice A), verifica-se que para um mesmo ensaio as replicatas

apresentaram grande variação de força média. Essas diferenças entre replicatas do mesmo ensaio podem ter sido causadas pela heterogeneidade das amostras na bandeja ao final das secagens, pois em todos os ensaios foi verificado que pedaços de amostras dispostos nas extremidades das bandejas demoravam a obter esfericidade e o conseqüente *puffing*, quando comparados com aqueles colocados na parte central da bandeja, o que resultou em replicatas crocantes por fora e moles no interior. Nestes casos, a força de ruptura foi bem maior (maior a dureza) e as replicatas apresentaram um comportamento plasticizante.

A curva do ensaio 8 (etapa a 70°C – 9,78 horas) apresentou menor número de picos e valor de força máxima bem superior aos outros ensaios. Segundo Duizer e Campanella (1998) e Saklar, Ugan e Katnas (1999), a força necessária para romper o produto aumenta com o aumento da dureza e, conseqüentemente, a sensação de crocância diminui, com a amostra apresentando um comportamento plasticizante, fato ocorrido com este ensaio, que inclusive apresentou valor de a_w próximo ao ensaio 3 (130°C-15min), cujo comportamento também foi de amostra não crocante.

Comparando os resultados aqui obtidos (Figura 4.8 e Figuras A1 até A8 do Apêndice A) com as curvas típicas força-deformação da banana comercial liofilizada (Figura 4.3), verificou-se que esta última apresenta uma força máxima média (48,27N) na mesma amplitude dos ensaios 1 (130°C-9min e força máxima média de 51,26N), ensaio 4 (150°C-15min e força máxima média de 46,32N) e 7 (140°C-12min(c) e força máxima média de 48,08N). Porém, assim como ocorrido com as replicatas destes ensaios, a fruta comercial teve grande variação entre as amostras, apresentando forças máxima variando de 13N até 75N num mesmo pacote de amostragem. Entretanto, a medida instrumental mostrou a ocorrência de vários picos entre o início da compressão e a deformação na força máxima, o que é um dos indicativos de crocância, comportamento semelhante às replicatas dos ensaios 4 (150°C-15min), 5, 6 e 7 (140°C-12min, (a), (b) e (c), respectivamente). Além disso, estes quatro ensaios foram os que apresentaram

valores de a_w (entre 0,363 e 0,345) mais próximos à banana comercial ($< 0,3$). Dessa forma, apesar dos valores de a_w da banana desidratada nesse estudo não chegarem ao valor de a_w da banana comercial liofilizada, as medidas instrumentais de textura indicaram que se obteve produtos crocantes com a_w entre 0,345 e 0,363.

Neste caso, o grau Brix e a diferença de fornecedor novamente não indicaram diferenças nos resultados de medida instrumental.

4.4.4. Medida sensorial de crocância

Os resultados desta medida estão apresentados na Tabela 4.11.

De acordo com os resultados obtidos pela Análise de Variância, houve diferença significativa na aceitação das amostras ($p \leq 0,0001$). Foi então realizado o teste de médias de *Tukey* para estabelecer a diferença mínima significativa e verificar quais amostras diferiam entre si.

Tabela 4.11: Médias de aceitação das amostras de todos os ensaios em relação à crocância

Ensaio	Médias* de aceitação em relação a crocância
4 (150°C-15min)	7,8 a
5 (140°C-12min)	7,0 a,b
6 (140°C-12min)	6,8 a,b
7 (140°C-12min)	6,6 a,b
3 (130°C-15min)	5,7 b,c
2 (150°C-9min)	4,7 c,d
1 (130°C-9min)	4,3 c,d
8 (70°C)	3,3 d
D.M.S.	1,6

*Médias marcadas com mesma letra, na mesma coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de *Tukey* ($p \leq 0,05$)

Foi possível verificar que a amostra proveniente do ensaio 4 foi a que obteve a maior média, mas, no entanto, não diferiu estatisticamente das amostras dos ensaios 5, 6 e 7.

Embora a amostra do ensaio 3 tenha obtido média acima de 5,0, ela não diferiu significativamente das amostras não aceitas. As amostras com médias abaixo de 5,0 (ensaios 1, 2 e 8) não foram aceitas pela equipe de consumidores.

A Figura 4.9 apresenta a freqüência das notas dadas pelos provadores.

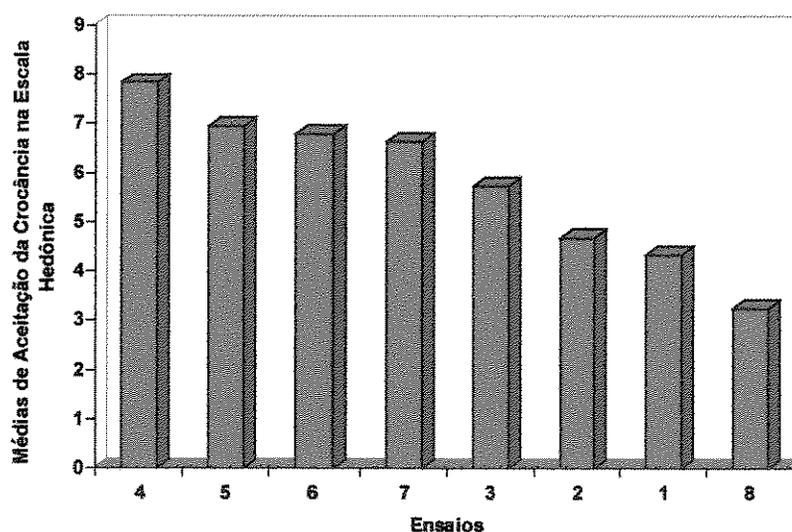


Figura 4.9: Histograma da freqüência das notas dadas pelos provadores em relação à escala utilizada

Esses resultados foram confirmados pelo teste de atitude de compra, Figura 4.10, pois as amostras dos ensaios 4 e 7 foram as que obtiveram a maior porcentagem de provadores com atitude positiva para compra do produto. Já as

amostras dos ensaios 8 e 1 foram as que apresentaram as maiores porcentagens de provadores com atitude negativa de compra.

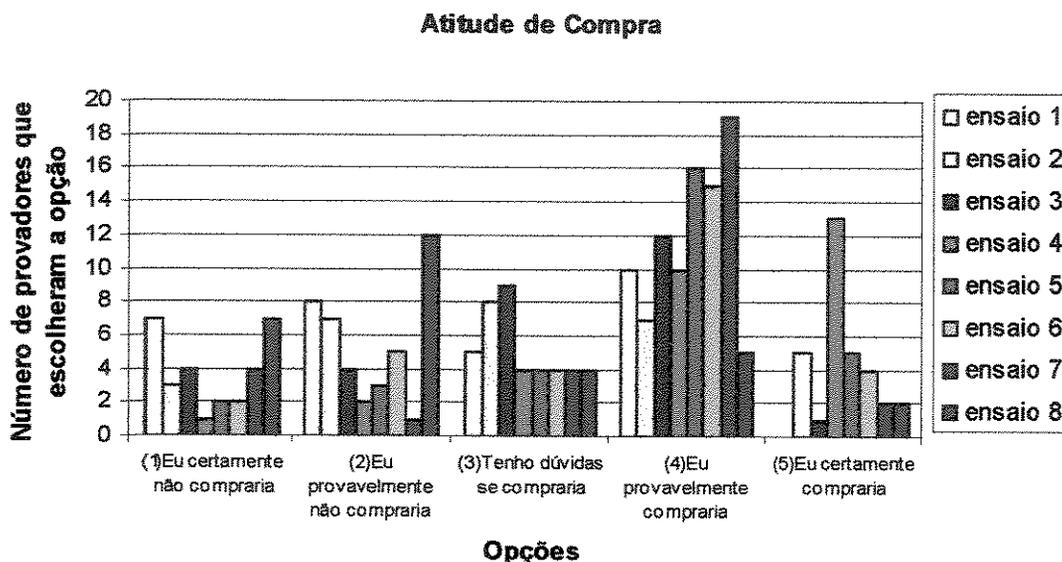


Figura 4.10: Porcentagem da distribuição das notas para a atitude de compra das amostras avaliadas

Fazendo uma comparação dos resultados da medida sensorial de crocância com as medidas instrumentais de textura, verificou-se que existe uma relação entre ambas, uma vez que as amostras consideradas mais crocantes pelo painel sensorial (ensaios 4, 5, 6, e 7, respectivamente), foram as que apresentaram maior número de picos entre o início da compressão e a deformação na força máxima, o que é indicativo de produto crocante (SAKLAR; UNGAN; KATNAS, 1999).

Os resultados da comparação entre a banana desidratada desse estudo e a banana liofilizada (comercial) estão apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Médias de aceitação das amostras de todos os ensaios e da banana comercial liofilizada em relação à crocância

Ensaio	Médias* de aceitação em relação a crocância
4 (150°C-15min)	7,8 a
5 (140°C-12min)	7,0 a,b
<i>Comercial</i>	6,9 a,b
6 (140°C-12min)	6,8 a,b
7 (140°C-12min)	6,6 a,b
3 (130°C-15min)	5,7 b,c
2 (150°C-9min)	4,7 c,d
1 (130°C-9min)	4,3 c,d
8 (70°C)	3,3 d
D.M.S.	1,6

*Médias marcadas com mesma letra, na mesma coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de *Tukey* ($p \leq 0,05$)

A Figura 4.11 ilustra a frequência de notas dadas pelos provadores.

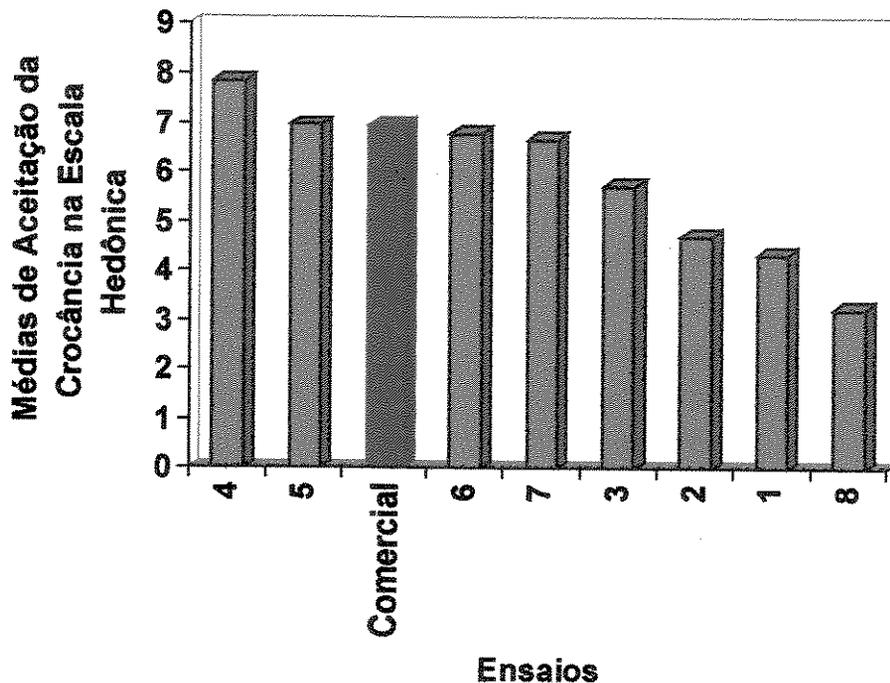


Figura 4.11: Histograma da frequência das notas dadas pelos provadores em relação à escala utilizada, para a banana desidratada neste estudo e para a banana comercial liofilizada

Pode-se verificar que a banana comercial liofilizada ficou na mesma escala de amplitude que as amostras dos ensaios 4, 5, 6 e 7, como também aconteceu na comparação das medidas instrumentais de textura. Isso pode ser um indicativo de que apesar das amostras terem apresentado um certo grau de heterogeneidade, estas atingiram um nível de secagem suficiente para apresentar a característica de crocância semelhante à banana comercial, obtendo uma aceitação sensorial tão significativa quanto esta última.

O grau Brix e a diferença de fornecedor não indicaram diferenças nos resultados da medida sensorial de crocância.

4.4.5. Cinética de secagem

Primeiramente, fez-se o ajuste de acordo com o modelo de Lewis (equação 2.5) para toda a curva de secagem. Esses valores estão apresentados na Tabela 4.13. O Apêndice B apresenta as curvas de secagem ajustadas segundo o modelo de Lewis para a secagem completa dos oito ensaios.

Tabela 4.13: Parâmetros cinéticos do modelo Lewis para a secagem completa

Ensaio		k_{total}	R^2	SQR	Umidade no tempo zero (gH ₂ O/gms)
8	Etapa a 70°C-9,78hs	1,758	0,99	0,06	2,79
1	130°C-9min	3,295	0,99	0,07	3,00
3	130°C-15min	3,660	0,99	0,05	2,58
5	140°C-12min - (a)	3,789	0,97	0,14	2,44
6	140°C-12min - (b)	3,744	0,97	0,14	2,44
7	140°C-12min - (c)	4,122	0,99	0,07	2,79
2	150°C-9min	3,845	0,98	0,09	3,00
4	150°C-15min	4,566	0,99	0,07	2,79

Como o parâmetro k está relacionado com a difusividade, com o fator geométrico e pode ser relacionado com a estrutura do material, inclusive com sua umidade, é importante salientar que para a secagem completa este parâmetro englobou dois momentos distintos de secagem: um com uma alta temperatura e curto tempo (etapa *HTST*) e outro abrangendo somente a etapa a 70°C de cada ensaio; todos os produtos saíram com valores próximos de atividade de água depois de 7 ou 8 horas de secagem.

Como maiores valores de k indicam maior facilidade de transferência de massa, ao analisar-se a Tabela 4.13, referente ao ajuste para a secagem completa, observa-se que para temperaturas iguais e tempos distintos (ensaio 1

com 130°C-9min e ensaio 3 com 130°C-15min; ensaio 2 com 150°C-9min e ensaio 4 com 150°C-15min), o valor de k apresenta um aumento com o aumento do tempo *HTST*, indicando que maior tempo de exposição na alta temperatura vai facilitar a saída de água. Os ensaios 5, 6 e 7 (140°C-12min(a), (b) e (c), respectivamente) apresentam valores de k intermediários entre 130 e 150°C. Por outro lado, o ensaio 7 apresentou valor de k muito diferente dos ensaios 5 e 6, para uma mesma condição de tempo e temperatura *HTST*. Isso pode ter ocorrido devido a uma possível diferença na composição química da matéria-prima causada pela diferença de fornecedor. O ensaio 8 (somente a 70°C) apresentou o menor valor de k dentre todos, justamente por sua temperatura ser muito baixa, indicando que foi menor a facilidade de transferência de massa.

É evidente que quanto maior a temperatura de secagem, mais rápida será a mesma e maiores serão os valores de k , porém, além disso, poderiam estar ocorrendo mudanças na matriz sólida no final da etapa *HTST*. Com o intuito de verificar o efeito da etapa *HTST* nos parâmetros cinéticos da etapa a 70°C, dividiu-se a secagem em duas etapas: uma etapa incluindo a pré-secagem e a etapa *HTST* e outra somente com a etapa a 70°C de cada ensaio.

O ajuste do modelo de Lewis foi feito para esta última etapa, pós-*HTST*, simulando que a secagem propriamente dita começava naquele instante, isto é, o tempo foi zerado a partir daquele instante e a umidade inicial da amostra foi considerada como a última medida da etapa *HTST* (umidade pós-*HTST*). O Apêndice C apresenta as curvas de ajuste do modelo de Lewis para a secagem da etapa *HTST* e a Tabela 4.14 apresenta os valores de k obtidos.

Tabela 4.14: Parâmetros cinéticos do modelo de Lewis para a etapa *HTST*

Ensaio		k_{HTST}	R^2	SQR	Umidade no tempo zero (gH ₂ O/gms)
1	130°C-9min	3,641	0,99	0,01	3,00
3	130°C-15min	3,789	0,99	0,01	2,58
5	140°C-12min - (a)	4,073	0,98	0,02	2,44
6	140°C-12min - (b)	4,022	0,98	0,02	2,44
7	140°C-12min - (c)	4,289	0,98	0,02	2,79
2	150°C-9min	4,165	0,98	0,02	3,00
4	150°C-15min	4,651	0,98	0,04	2,79

A um mesmo teor de umidade, a rigidez da matriz sólida deveria ser a mesma, isto é, a matriz sólida apresentaria a mesma tendência à redução de volume, uma vez retirada da alta temperatura. Desse modo, pela Tabela 4.14, pode-se observar que a etapa *HTST* depende da umidade inicial do processo. A umidade inicial do ensaio 1 (130°C-9min) e 2 (150°C-9min) são iguais, porém o ensaio 2 apresentou um valor de k bem superior ao ensaio 1, o que comprova que quanto maior a temperatura de secagem, maiores serão os valores de k e maior será a facilidade de transferência de umidade. O mesmo acontece para os ensaios 3 (130°C-15min) e 4 (150°C-15min), que apresentam a mesma umidade inicial e cujo ensaio 4 apresenta maior valor de k do que o ensaio 3.

As umidades iniciais dos ensaios 5, 6 e 7 (140°C-12min (a),(b) e (c), respectivamente) são muito próximas, porém os ensaios 5 e 6 apresentam umidades iniciais iguais e valores de k também muito próximos. Novamente a diferença na composição química da matéria-prima, que pode ter acontecido devido à diferença de fornecedor, parece ter influenciado nos resultados, pois o ensaio 7, apesar de apresentar umidade inicial próxima aos ensaios 5 e 6, obteve um valor de k superior a estes dois.

Comparando os ensaios 2 (150°C-9min) e 7 (140°C-12min(c)), verifica-se que o primeiro apresenta menor valor de k do que o ensaio 7. Considerando que a umidade no inicial destas duas condições era a diferente e que, portanto, a rigidez da matriz sólida deveria ser diferente, era de se esperar um maior valor de k para o ensaio 2, fato que não ocorreu. Logo, os valores de k poderiam evidenciar que a temperatura de 140°C tenha provocado uma maior porosidade ao final da etapa *HTST* do que a temperatura de 150°C, embora esta última tenha sido aplicada numa temperatura maior, mas com um tempo menor de *HTST*, ou seja, que o efeito do tempo *HTST* foi mais significativo na porosidade do que o efeito da temperatura dessa etapa.

A amostra submetida a 130°C-9min, que apresentou o menor valor de k para a etapa *HTST*, o que pode ter ocorrido pela formação de uma matriz sólida pouco rígida ao final da etapa *HTST*, devido ao alto valor de sua umidade. Esta hipótese é reforçada pelas observações visuais dos testes preliminares (Tabelas 4.3 e 4.4), pois apesar de ter conseguido uma boa esfericidade aos 9 minutos de *HTST*, quando colocada a 70°C a amostra teve seu volume consideravelmente reduzido.

Comparando-se mesmas temperaturas e tempos distintos (130°C-9min e 130°C-15min; 150°C-9min e 150°C-15min), pode-se observar que as amostras com maior tempo de exposição na etapa *HTST* (15 minutos) apresentaram maior valor de k do que aquelas submetidas a 9 minutos de *HTST*, considerando mesmas temperaturas. Porém, a umidade inicial das amostras com 9 minutos de *HTST* era maior, o que deveria resultar num k maior, fato que não aconteceu. Novamente tem-se um indicativo que a umidade inicial do processo teve maior influência no parâmetro k do que a temperatura e tempo de *HTST*.

A Tabela 4.15 apresenta os resultados dos ajustes para a etapa a 70°C e as curvas ajustadas estão no Apêndice D.

Tabela 4.15: Parâmetros cinéticos do modelo de Lewis para a etapa a 70°C

Ensaio		k70	R ²	SQR	Umidade pós-HTST (gH ₂ O/gms)
1	130°C-9min	1,397	1,00	0,01	1,20
3	130°C-15min	1,228	0,99	0,03	0,67
5	140°C-12min - (a)	0,776	1,00	0,01	0,69
6	140°C-12min - (b)	0,780	1,00	0,00	0,70
7	140°C-12min - (c)	1,231	0,99	0,06	0,68
2	150°C-9min	1,235	1,00	0,00	1,00
4	150°C-15min	1,075	0,98	0,09	0,48

Ao analisar-se somente a etapa a 70°C de todos os ensaios (Tabela 4.15), observa-se que a umidade pós-HTST (que é a umidade inicial dessa etapa) parece influenciar e mascarar um eventual efeito de *puffing* e porosidade. Analisando o ensaios 2 (150°C-9min) e 4 (150°C-15min), este último deveria apresentar uma matriz sólida mais porosa (indicada pelas medidas instrumentais e sensoriais de crocância) e mais rígida (devido ao menor valor de umidade). Logo, a expectativa seria de um k maior, entretanto, o valor de k foi menor. Isto poderia indicar que o efeito da umidade pós-HTST teria mais influência no valor deste parâmetro do que a porosidade e a rigidez da matriz sólida. O mesmo ocorre para os ensaios 1 e 3 (130°C-9min e 130°C-15min, respectivamente), cujo valor de k deveria ser maior para 15 minutos de etapa HTST, mas apresentou-se menor. Comparando os ensaios com 130°C-15min e 150°C-9min, os valores de k são muito semelhantes para valores de umidade significativamente diferentes. Assim, a expectativa era de que o valor de k para 130°C-15min fosse razoavelmente menor que para 150°C-9min. Pode-se supor que isto não tenha ocorrido, pois a influência positiva do conteúdo de umidade inicial sobre o valor de k a 150°C-9min parece ter superado a influência positiva da porosidade e rigidez da matriz sólida sobre o valor de k a 130°C-15min. Além disso, a condição 140°C-12min(c) apresenta valores de k e umidade pós-HTST muito próximos aos do ensaio 3

(130°C-15min), o que indicaria que ambos os produtos deveriam ter características finais semelhantes. Isso foi comprovado pelas notas da análise sensorial, cujos valores não diferiram significativamente entre si, (6,6 para 140°C-12min(c) e 5,7 para 130°C-15min), mas não foi verificado pelas medidas de instrumentais, cuja força máxima média foi de 50N para o primeiro e 60N para o outro. Para os outros dois ensaios a 140°C, (a) e (b), verificou-se que ambos possuem valores de k e umidades pós-*HTST* muito próximos, porém o valor de k não ficou intermediário às temperaturas de 130°C e 150°C, sendo bem inferior. A análise sensorial comprovou que ambos (ensaio 5 e 6) não apresentaram diferença significativa nas notas dadas pelos provadores (6,7 e 6,8, respectivamente), porém a força máxima média diferiu entre os dois, sendo de 58N para o ensaio 5 e 66N para o ensaio 6. Por fim, comparando o ensaio 7 (140°C-12min(c)) com os outros dois realizados nas mesmas condições de secagem (ensaio 5, 140°C-12min(a) e ensaio 6, 140°C-12min(b)), é possível observar que apesar dos valores de umidade pós-*HTST* dos três ensaios serem semelhantes (0,69; 0,70 e 0,68 gH₂O/gms, respectivamente para os ensaios 5, 6 e 7), o valor do parâmetro k do ensaio 7 é muito superior aos dos outros dois, ficando numa faixa intermediária às temperaturas de 130 e 150°C. Novamente, a diferença na composição química da matéria-prima, provavelmente causada pela diferença de fornecedor, parece ter influenciado os resultados finais dos ensaios 5, 6 e 7, submetidos a mesma condição de secagem (140°C e 12 minutos).

De modo a verificar a influência da umidade pós-*HTST*, fez-se um gráfico da taxa de umidade pela umidade em base seca, como mostra a Figura 4.12.

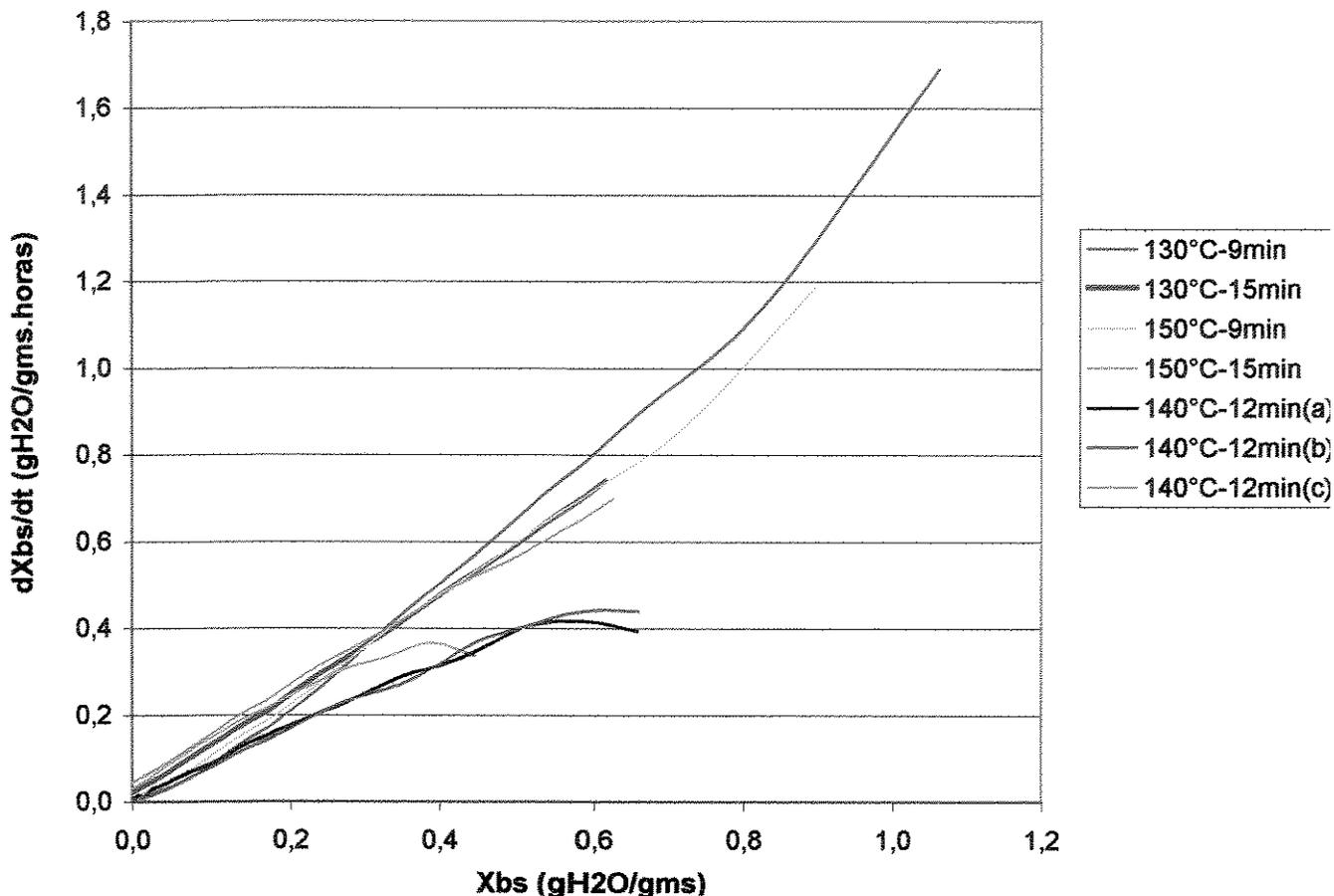


Figura 4.12: Taxa de umidade pós-HTST versus umidade em base seca

O aumento de porosidade é maior para temperaturas mais altas e tempos maiores, o que promove uma maior taxa de secagem (velocidade). Entretanto, observando a Figura 4.12, verifica-se que em teores de umidade próximos a 0,4 a taxa de secagem dos ensaios 4 (150°C-15min), 5 (140°C-12min(a)) e 6 (140°C-12min(b)) é inferior aos outros ensaios, mesmo com condições de temperaturas e tempos maiores. Além disso, os ensaios 5 e 6 apresentam taxas de secagem muito próximas entre si e bem menores do que os outros ensaios, mesmo com valores de tempo e temperatura altos. Novamente a diferença na composição da matéria-prima, provavelmente devido à diferença de fornecedor, parece interferir

no comportamento dessas duas amostras. O ensaio 1 (130°C-9min) apresenta, nesta mesma faixa de umidade, uma maior taxa de secagem em relação a todos os outros ensaios. Isso ocorreu porque este ensaio apresentou o maior valor de conteúdo inicial de umidade e manteve essa taxa alta até um valor de umidade próximo a 0,4 gH₂O/gms. Observando o comportamento das curvas para teores de umidade bem baixos (<0,2), pode-se verificar que o ensaio 1 (130°C-9min) apresenta uma queda acentuada na taxa de umidade, enquanto que os ensaios 4 (150°C-15min) e 7 (140°C-12min(c)) mostram um valor mais alto que os demais, o que é esperado, uma vez que altas temperaturas e tempos de *HTST* devem promover maior porosidade do produto com o conseqüente aumento da taxa de secagem. Essas análises reforçam o fato de que o valor do parâmetro *k* é fortemente influenciado pelo conteúdo de umidade inicial da amostras, que acaba por mascarar o efeito das variáveis tempo e temperatura *HTST*.

4.4.6. Análise do planejamento experimental

A Tabela 4.16 apresenta os valores decodificados dos níveis estudados e as respostas estudadas para cada um desses níveis. Uma vez que o grau de reidratação das replicatas das amostras apresentou perda de massa para os tempos de imersão 15 e 20 minutos, como já discutido anteriormente, a análise fatorial foi feita somente para os tempos de 5 e 10 minutos de reidratação. Em relação à força máxima e à deformação na força máxima, trabalhou-se com os valores médios das 4 replicatas de cada ensaio. O ensaio 8 não foi analisado estatisticamente, pois este foi realizado somente a 70°C, sem etapa *HTST*.

Tabela 4.16: Matriz decodificada do planejamento experimental e suas respectivas variáveis de resposta

Nº do ensaio T(°C)	GR (% água absorvida)		Médias das medidas instrumentais de textura		Análise sensorial	Parâmetro k do modelo de Lewis			
	Tempo (min)	10min	5min	FMAX(N)	DEF	Notas médias	ktotal	kHTST	k70
1 130 9		100,08	59,35	51,26	0,67	4,3	3,295	3,641	1,397
2 150 9		119,12	68,46	42,46	0,68	4,7	3,845	4,165	1,235
3 130 15		143,87	102,03	60,65	0,40	5,7	3,660	3,789	1,228
4 150 15		175,4	145,56	36,18	0,32	7,8	4,566	4,651	1,075
5 140 12		146,61	113,45	54,05	0,53	7,0	3,789	4,073	0,776
6 140 12		145,02	113,35	59,41	0,31	6,8	3,740	4,022	0,780
7 140 12		137,24	113,88	50,92	0,53	6,6	4,122	4,289	1,231

4.4.6.1. Grau de reidratação

Utilizando o *Software Statistica 5.0* obteve-se os coeficientes da regressão com seus desvios padrão e o valor de p (probabilidade de erro associada),

apresentados nas Tabelas 4.17 e 4.18 para os graus de reidratação 10 e 5 minutos, respectivamente.

Tabela 4.17: Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para o grau de reidratação a 10 minutos

Variáveis do modelo proposto	Coefficientes estimados das variáveis do modelo	Desvio padrão	p*
b₀	138,19	1,90	0,00
T	12,64	2,51	0,04
tempo	25,02	2,51	0,01

*Coeficientes estatisticamente significativos a 95% de confiança (p<0,05)

Tabela 4.18: Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para o grau de reidratação a 5 minutos

Variáveis do modelo proposto	Coefficientes estimados das variáveis do modelo	Desvio padrão	p*
b₀	102,30	0,11	0,00
T	13,16	0,14	0,00
tempo	29,25	0,14	0,00
Txtempo	8,61	0,14	0,00

*Coeficientes estatisticamente significativos a 95% de confiança (p<0,05)

Pelas tabelas, pode-se verificar que todas as variáveis foram significativas para o grau de reidratação a 5 minutos, enquanto que para 10 minutos a interação temperatura-tempo *HTST* foi estatisticamente não significativa a 95% de confiança, portanto, demonstrando pouca influência, na faixa estudada. Os parâmetros estatisticamente não significativos foram eliminados do modelo e adicionados à falta de ajuste.

A Análise de Variância (ANOVA) consiste na avaliação do coeficiente de determinação (R^2) e do teste F, para verificar se o modelo representa um grau de ajuste adequado aos dados experimentais. As Tabelas 4.19 e 4.20 mostram a Análise de Variância (ANOVA), com seus respectivos coeficientes de determinação, assim como o teste F para cada um deles.

Tabela 4.19: Análise de variância para o grau de reidratação a 10 minutos

Fonte de variação	SS	GL	MQ	Fcal
Regressão	3142,83	2,00	1571,42	30,15
Resíduos	208,50	4,00	52,12	
Falta de Ajuste	158,21	2,00	79,11	
Erro Puro	50,28	2,00	25,14	
Total	3351,33	6,00		
R^2	0,94			

$$F_{0,95; 2,4} = 6,94$$

Tabela 4.20: Análise de variância para o grau de reidratação a 5 minutos

Fonte de variação	SS	GL	MQ	Fcal
Regressão	4575,74	3,00	1525,25	6,87
Resíduos	666,13	3,00	222,04	
Falta de Ajuste	665,97	1,00	665,97	
Erro Puro	0,16	2,00	0,08	
Total	5241,87	6,00		
R^2	0,88			

$$F_{0,95; 3,3} = 9,28$$

Analisando as tabelas de Análise de Variância, verificou-se que o grau de reidratação a 10 minutos apresentou uma melhor correlação do que a 5 minutos, sendo que o teste F foi 4,35 vezes maior que seu valor tabelado, enquanto que para o grau de reidratação a 5 minutos, o teste F foi menor, o que indica um modelo não preditivo nas condições estudadas. Logo, somente o modelo a 10 minutos de reidratação poderia ser considerado válido e preditivo.

Lomauro e Labuza (1985) consideram o modelo de representação dos dados experimentais inválido se o valor do erro relativo médio for superior a 10%. De forma a analisar qual o comportamento para o grau de reidratação a 10 minutos, calculou-se o erro relativo médio através da equação 2.11. Esse valor está apresentado na Tabela 4.21.

Tabela 4.21: Erro relativo médio entre os valores previstos pelo modelo e os dados experimentais para o grau de reidratação a 10 minutos

Ensaio	Erro relativo GR10
1	0,45
2	5,62
3	4,66
4	0,26
5	5,74
6	4,71
7	0,69
Erro relativo médio	3,16

Portanto, após toda essa análise estatística, percebeu-se que para o grau de reidratação a 5 minutos não houve ajuste de um modelo, visto que o teste F mostrou valores inferiores ao tabelado. Assim, o modelo codificado válido para o grau de reidratação a 10 minutos está apresentado na equação 4.1 e a superfície de resposta, bem como as curvas de nível, estão apresentadas nas Figuras 4.13 e 4.14, respectivamente.

$$GR10 = 138,19 + 12,64 * T + 25,02 * \text{tempo} \quad [4.1]$$

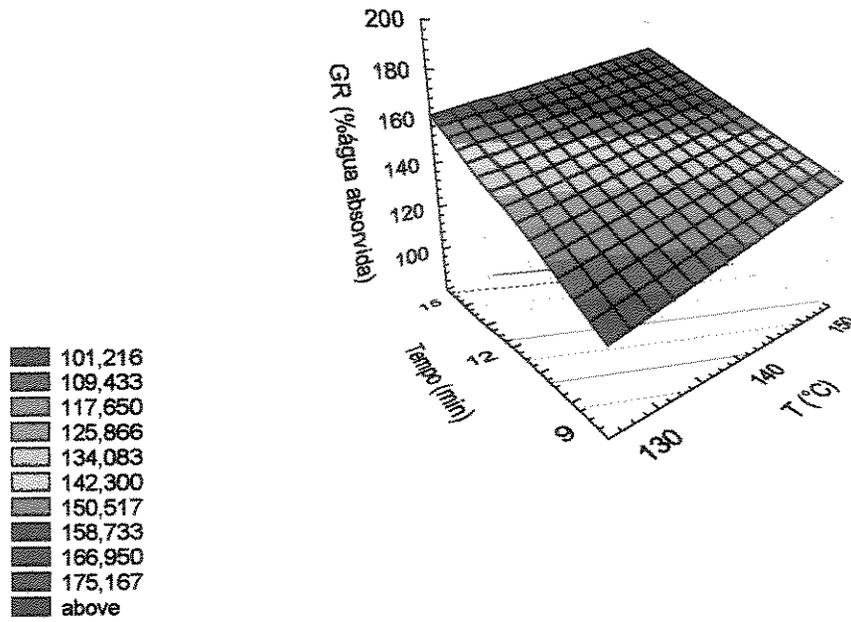


Figura 4.13: Superfície de resposta para o grau de reidratação a 10 minutos

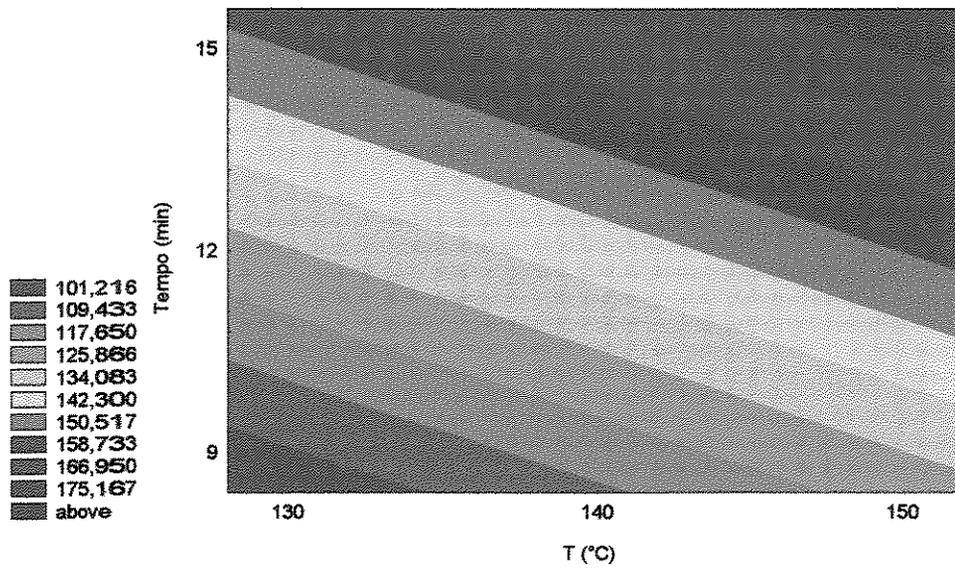


Figura 4.14: Curvas de nível para o grau de reidratação a 10 minutos

Pela análise das Figuras 4.13 e 4.14, verifica-se que temperaturas e tempos mais elevados da etapa *HTST* aumentam o grau de reidratação. Luccas (1996) estudou o comportamento de pedaços de banana prata imersos em água em ebulição e verificou que as temperaturas elevadas da fase *HTST* proporcionavam uma melhor reidratação do que amostras submetidas apenas à etapa a 70°C. Cardoso (1998) concluiu que a taxa de reidratação aumenta com o aumento da temperatura *HTST*.

4.4.6.2. Medida instrumental de textura

As Tabelas 4.22. e 4.23 apresentam os coeficientes de regressão, desvio padrão e limites de confiança para a força máxima e a deformação na força máxima, respectivamente.

Tabela 4.22: Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para a força máxima

Variáveis do modelo proposto	Coefficientes estimados das variáveis do modelo	Desvio padrão	p*
b₀	50,70	1,62	0,00
T	-8,32	2,15	0,06
Txtempo	-3,92	2,15	0,21

*Coeficientes estatisticamente significativos a 75% de confiança ($p < 0,25$)

Tabela 4.23: Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para a deformação na força máxima

Variáveis do modelo proposto	Coefficientes estimados das variáveis do modelo	Desvio padrão	p*
b_0	0,49	0,05	0,01
tempo	-0,16	0,07	0,14

*Coeficientes estatisticamente significativos a 75% de confiança ($p < 0,25$)

Pelas Tabelas 4.22 e 4.23 verificou-se que o tempo *HTST* foi estatisticamente não significativo a 75% de confiança para a força máxima e, para a deformação na força máxima, a temperatura e a interação temperatura-tempo *HTST* foram estatisticamente não significativos a 75% de confiança, portanto, esses parâmetros demonstraram pouca influência, na faixa estudada, para a força e a deformação. Esses parâmetros estatisticamente não significativos foram eliminados do modelo e adicionados à falta de ajuste.

As Tabelas 4.24 e 4.25 mostram a análise de variância (ANOVA), com seus respectivos coeficientes de determinação, assim como o teste F para cada um deles.

Tabela 4.24: Análise de variância para a força máxima

Fonte de variação	SS	GL	MQ	Fcal
Regressão	338,08	2,00	169,04	5,32
Resíduos	127,02	4,00	31,75	
Falta de Ajuste	90,13	2,00	45,07	
Erro Puro	36,89	2,00	18,44	
Total	465,10	6,00		
R^2	0,73			

$F_{0,75; 2,4} = 2,00$

Tabela 4.25: Análise de variância para a deformação na força máxima

Fonte de variação	SS	GL	MQ	Fcal
Regressão	0,10	1,00	0,10	10,97
Resíduos	0,04	5,00	0,01	
Falta de Ajuste	0,01	3,00	0,00	
Erro Puro	0,03	2,00	0,02	
Total	0,14	6,00		
R²	0,69			

$$F_{0,75; 1,5} = 1,69$$

Pela ANOVA, verificou-se que a força máxima apresentou uma melhor correlação do que a deformação, e, em ambos os casos, o teste F foi maior que seu valor tabelado (2,66 e 6,49 para força máxima e deformação, respectivamente). Assim, ambos os modelos poderiam ser considerados válidos e preditivos nas condições estudadas. Entretanto, calculou-se o erro relativo médio de acordo com Lomauro e Labuza (1985) (equação 2.11). Esses valores estão apresentados na Tabela 4.26.

Tabela 4.26: Erros relativos médios entre os valores previstos pelo modelo e os dados experimentais para a força máxima e a deformação na força máxima

Ensaio	Erro relativo FMAX	Erro relativo DEF
1	7,49	2,99
2	9,04	4,41
3	3,78	17,5
4	6,3	3,12
5	6,2	7,55
6	14,66	58,06
7	0,43	7,55
Erro relativo médio	6,84	14,45

Após essa análise estatística, percebeu-se que o único modelo válido foi o da força máxima, apresentado na equação 4.2, uma vez que a deformação apresentou erro relativo médio superior a 10%. Assim, foi gerada somente a superfície de resposta, bem como as curvas de nível (Figuras 4.15 e 4.16), para a força máxima.

$$F_{MAX} = 50,70 - 8,32 * T - 3,92 * (T * tempo) \quad [4.2]$$

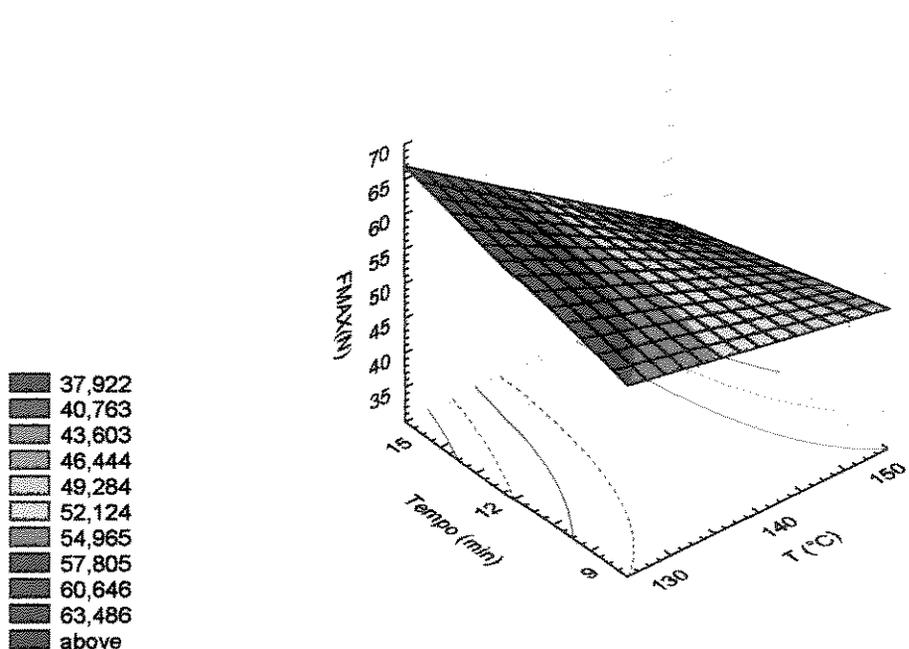


Figura 4.15: Superfície de resposta para a força máxima

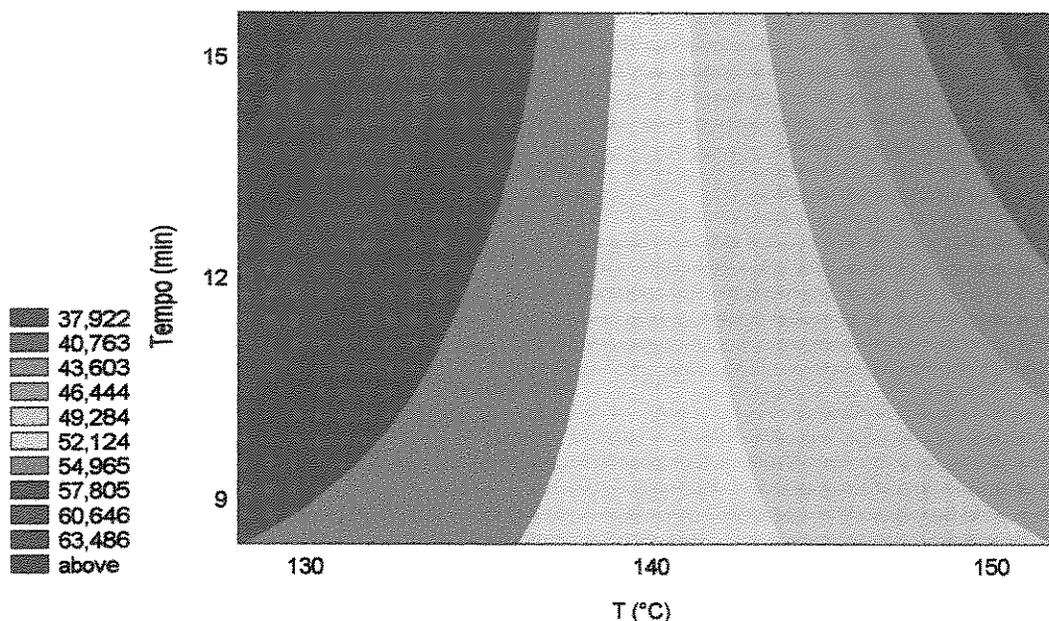


Figura 4.16: Curvas de nível para a força máxima

Analisando essas duas figuras, verifica-se que temperaturas e tempos mais elevados da etapa *HTST* fornecem valores mais baixos para a força máxima na ruptura. Segundo Duizer e Campanella (1998) e Saklar, Ungan e Katnas (1999), a diminuição da força máxima provoca um decréscimo na dureza, o que aumenta a característica de crocância. Isso foi comprovado por esses últimos autores que verificaram amostras de avelãs mais torradas apresentam menor dureza nos testes de compressão, o que aumentava a sensação da crocância.

4.4.6.3. Medida sensorial de crocância

A Tabela 4.27 apresenta os coeficientes de regressão, desvio padrão e limites de confiança para as médias de aceitação das amostras de todos os ensaios submetidas a análise sensorial. A Tabela 4.28 mostra a análise de variância (ANOVA).

Tabela 4.27: Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para as médias de aceitação das amostras de todos os ensaios

Variáveis do modelo proposto	Coefficientes estimados das variáveis do modelo	Desvio padrão	p*
b₀	6,14	0,06	0,00
T	0,62	0,08	0,02
tempo	1,13	0,08	0,00
Txtempo	0,44	0,08	0,03

*Coeficientes estatisticamente significativos a 95% de confiança ($p < 0,05$)

Tabela 4.28: Análise de variância para as médias de aceitação das amostras de todos os ensaios

Fonte de variação	SS	GL	MQ	Fcal
Regressão	7,38	3,00	2,46	3,18
Resíduos	2,32	3,00	0,77	
Falta de Ajuste	2,27	1,00	2,27	
Erro Puro	0,05	2,00	0,03	
Total	9,70	6,00		
R²	0,76			

$$F_{0,95; 3,3} = 9,28$$

Para a medida sensorial de crocância, todos os parâmetros foram estatisticamente significativos a 95% de confiança. Pela ANOVA, verificou-se que as médias de aceitação apresentaram uma boa correlação no limite de confiança a 95%, porém o teste F foi menor que seu valor tabelado. Isso indica um modelo não preditivo nas condições estudadas. Logo, não houve ajuste a um modelo para esta resposta. Porém isto não significa que as notas da análise sensorial não são válidas para as condições de teste estudadas, uma vez que observou-se uma grande

relação entre as medidas instrumentais e sensoriais, relação essa que pode não ter sido traduzida numa correlação estatística devido à heterogeneidade do comportamento das replicatas submetidas às medidas instrumentais e ao painel de provadores (medida sensorial).

4.4.6.4. Parâmetro k do modelo de Lewis para a secagem completa

As Tabelas 4.29 apresenta os coeficientes de regressão, desvio padrão e limites de confiança para o parâmetro k da secagem completa, e a Tabela 4.30 mostra análise de variância (ANOVA), com seu respectivo coeficiente de determinação, assim como o teste F.

Tabela 4.29: Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para o parâmetro k da secagem completa

Variáveis do modelo proposto	Coefficientes estimados das variáveis do modelo	Desvio padrão	p*
b_0	3,86	0,08	0,00
T	0,36	0,10	0,07
tempo	0,27	0,10	0,12

*Coeficientes estatisticamente significativos a 85% de confiança ($p < 0,15$)

Tabela 4.30: Análise de variância para o parâmetro k da secagem completa

Fonte de variação	SS	GL	MQ	Fcal
Regressão	0,82	2,00	0,41	13,62
Resíduos	0,12	4,00	0,03	
Falta de Ajuste	0,03	2,00	0,02	0,40
Erro Puro	0,09	2,00	0,04	
Total	0,95	6,00		
R^2	0,87			

$F_{0,85; 2,4} = 3,55$

Para este parâmetro, considerando a secagem completa (*HTST* e 70°C), a interação temperatura-tempo *HTST* foi estatisticamente não significativa, no intervalo de confiança a 85%, demonstrando, então, pouca influência na faixa estudada, sobre o valor de *k*. Assim, essa interação estatisticamente não significativa foi eliminada e adicionada à falta de ajuste.

Pela tabela de ANOVA, verificou-se que o coeficiente de determinação obtido foi de 0,87 e o teste *F* 3,84 vezes maior que o valor tabelado para 85% de confiança. Esses resultados confirmam que o modelo obtido é preditivo, porém, adicionalmente, calculou-se o erro relativo médio proposto por Lomauro e Labuza (1985), pela equação 2.11, cujos resultado está apresentado na Tabela 4.31.

Tabela 4.31: Erro relativo médio entre os valores previstos pelo modelo e os dados experimentais para o parâmetro *k* da secagem completa

Ensaio	Erro relativo
1	1,97
2	2,73
3	3,01
4	1,66
5	1,87
6	3,21
7	6,36
Erro relativo médio	2,97

Como o erro relativo médio está abaixo do limite indicado pelos autores, isso só vem reforçar que o modelo é realmente preditivo para as condições de processo estudadas. Assim a equação 4.3 apresenta o modelo proposto e as Figuras 4.17 e 4.18 mostram a superfície de resposta e as curvas de níveis para o parâmetro *k* do modelo de Lewis na secagem completa.

$$k_{\text{total}} = 3,86 + 0,36 \cdot T + 0,27 \cdot \text{tempo} \quad [4.3]$$

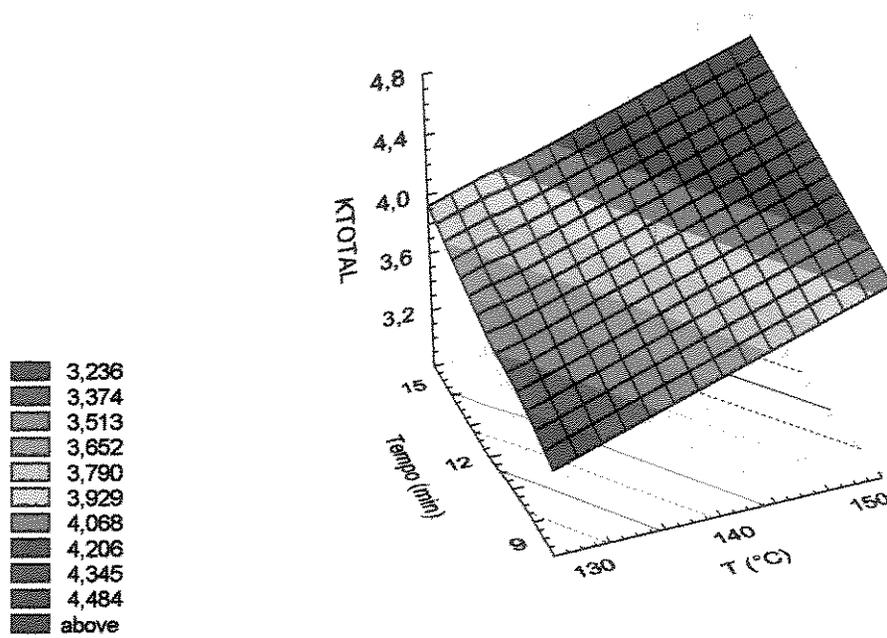


Figura 4.17: Superfície de resposta para o parâmetro k do modelo de Lewis para a secagem completa

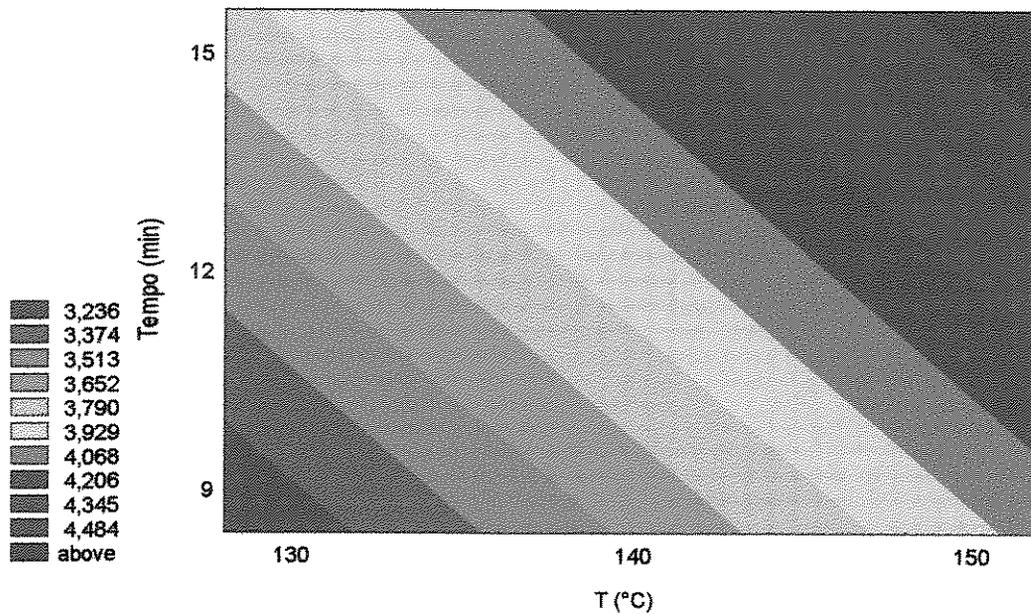


Figura 4.18: Curvas de nível para o parâmetro k do modelo de Lewis para a secagem completa

Fazendo-se uma análise dessas duas figuras, verifica-se que os maiores valores de k ocorrem para os níveis superiores de tempo e temperatura. Isso demonstra que nessas condições, será maior a facilidade de transferência de massa devido ao *puffing*.

4.4.6.5. Parâmetro k do modelo de Lewis para a etapa *HTST*

A Tabela 4.32 apresenta os coeficientes de regressão, desvio padrão e limites de confiança para o parâmetro k da etapa *HTST* e a Tabela 4.33 mostra análise de variância (ANOVA).

Tabela 4.32: Resultados do coeficiente de regressão, desvio padrão e limites de confiança para o parâmetro k da etapa *HTST*

Variáveis do modelo proposto	Coefficientes estimados das variáveis do modelo	Desvio padrão	p^*
b_0	4,09	0,05	0,00
T	0,35	0,07	0,04
tempo	0,16	0,07	0,15

*Coeficientes estatisticamente significativos a 80% de confiança ($p < 0,20$)

Tabela 4.33: Análise de variância para o parâmetro k da etapa *HTST*

Fonte de variação	SS	GL	MQ	Fcal
Regressão	0,58	2,00	0,29	15,22
Resíduos	0,08	4,00	0,02	
Falta de Ajuste	0,04	2,00	0,02	
Erro Puro	0,04	2,00	0,02	
Total	0,66	6,00		
R^2	0,88			

$F_{0,80; 2,4} = 2,77$

Neste caso, foi considerada somente a etapa *HTST* e pode-se verificar que a interação temperatura-tempo desta etapa foi estatisticamente não significativa, no intervalo de confiança a 80%, demonstrando pouca influência na faixa estudada. Assim, essa interação foi eliminada do modelo obtido e adicionada à falta de ajuste.

O coeficiente de determinação desse ajuste foi 0,88 e o teste F 5,49 vezes maior que o valor tabelado, para 80% de confiança. Esses resultados confirmam que o modelo obtido é preditivo, porém calculou-se o erro relativo médio, como apresentado na Tabela 4.35.

Tabela 4.34: Erro relativo médio entre os valores previstos pelo modelo e os dados experimentais para o parâmetro *k* da etapa *HTST*

Ensaio	Erro relativo
1	1,13
2	0,84
3	5,57
4	1,1
5	0,66
6	1,94
7	4,41
Erro relativo médio	2,23

Considerando que o erro relativo médio ficou abaixo do limite indicado pela bibliografia, que o coeficiente de determinação ficou em torno de 0,88 e que o teste F foi válido, pode-se afirmar que o modelo é realmente preditivo para as condições de processo estudadas (equação 4.4). Assim, foram geradas a superfície de resposta e as curvas de níveis para o parâmetro *k* do modelo de Lewis na etapa *HTST*, como mostrado nas Figuras 4.19 e 4.20, respectivamente.

$$k_{HTST} = 4,09 + 0,35 \cdot T + 0,16 \cdot \text{tempo} \quad [4.4]$$

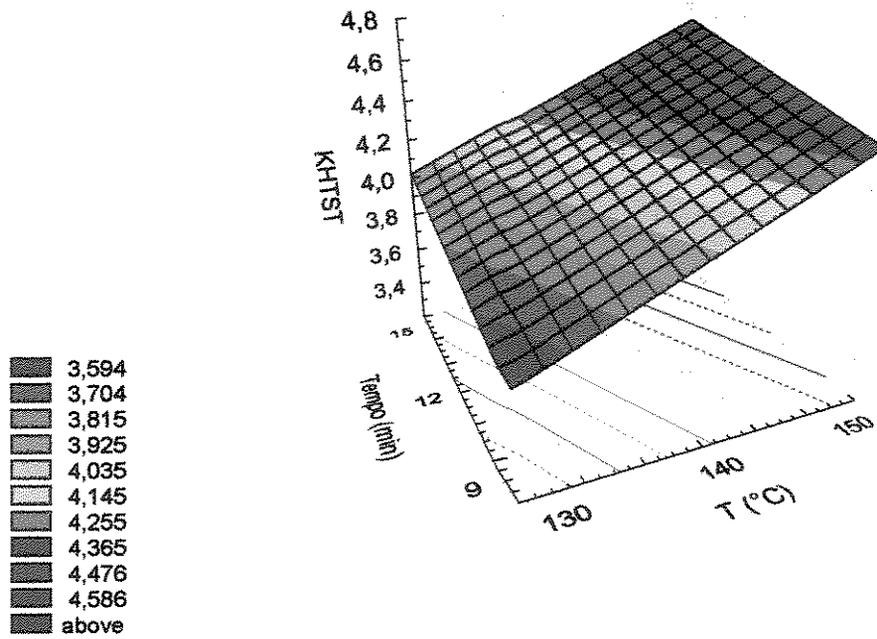


Figura 4.19: Superfície de resposta para o parâmetro k do modelo de Lewis para a etapa HTST

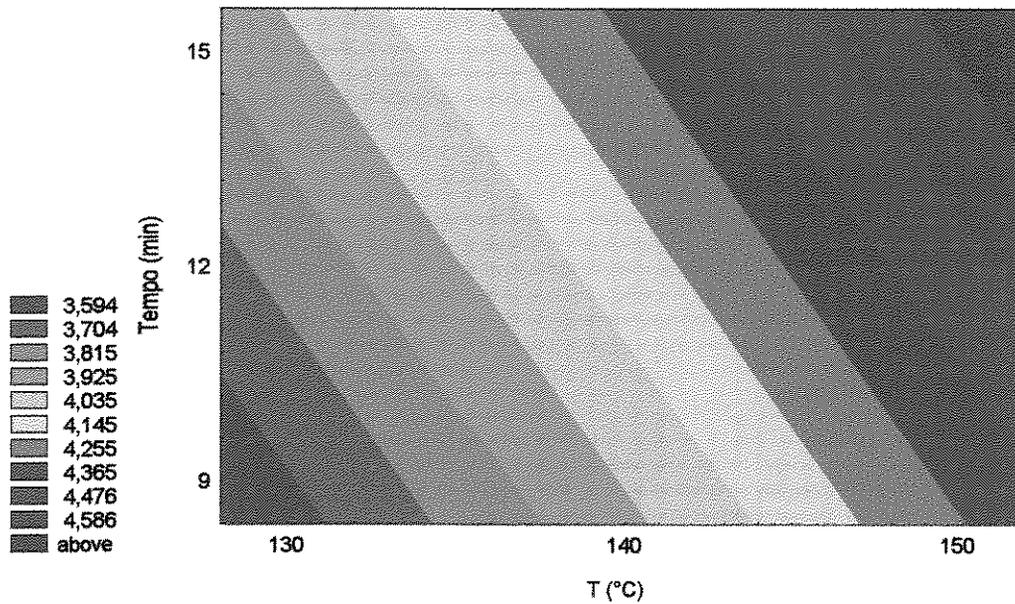


Figura 4.20: Curvas de nível para o parâmetro k do modelo de Lewis para a etapa HTST

Através de uma análise dessas duas figuras observa-se que os maiores valores de k ocorrem para os níveis superiores de tempo e temperatura *HTST*. Novamente isso demonstra que, nessas condições de processo, será maior a facilidade de transferência de massa.

4.4.6.6. Parâmetro k do modelo de Lewis para a etapa a 70°C de todos os ensaios

Não foi possível realizar uma análise estatística desse parâmetro, uma vez que as variáveis do processo não foram significativas a 75% de confiança.

4.4.6.7. Análise global do planejamento experimental

Verificou-se que a metodologia do planejamento fatorial mostrou-se adequada para avaliar o comportamento das variáveis de resposta. Porém, segundo Neto, Scarmínio e Bruns (2001), nem sempre uma regressão dada como significativa pelo teste F é útil para realizar previsões, pois pode acontecer da faixa de variação coberta pelos fatores estudados no processo ser pequena demais, fazendo com que o efeito sobre a resposta fique mascarado pela extensão do erro experimental. Devido a isso, deixou-se o estudo do planejamento experimental para o final deste trabalho, ou seja, depois de verificar a influência das variáveis do processo em todas as análises realizadas com o produto é que se procurou fazer uma confirmação da validade estatística dos principais efeitos e interações das variáveis tempo e temperatura sobre as variáveis de resposta. A análise estatística das variáveis tempo e temperatura *HTST* mostraram que estas influenciam significativamente o grau de reidratação a 10 minutos, para a força máxima, para o parâmetro k do modelo de Lewis considerando a secagem completa e considerando somente a etapa *HTST*. Porém isso não indica que as variáveis do processo não serão significativas sobre todas as outras respostas para outras condições de secagem. Portanto, seria necessário fazer um novo

planejamento, considerando todas as variações ocorridas neste primeiro, de modo a verificar a influência do tempo e da temperatura *HTST* sobre todas as variáveis do processo.

4.5. Análises finais

Considerando todos os resultados obtidos nesse estudo, foi possível verificar que apesar da tentativa de se manter somente o tempo e a temperatura da fase *HTST* como parâmetros que influenciariam o processo, outros fatores vieram a intervir no mesmo. O primeiro deles foi a dificuldade de se obter amostras de um mesmo fornecedor, uma vez que a faixa de grau Brix escolhida limitava a escolha das amostras. Em muitos dos ensaios, mediu-se o grau Brix de mais de dez amostras (dez bananas) diferentes, algumas de mesma penca, outras não, e não foi possível encontrar amostras com o valor de grau Brix desejado, sendo necessária a compra de amostras em outros lugares para que os ensaios pudessem ter início. Ao avaliar-se o parâmetro k do modelo de Lewis, obtido pelo ajuste das curvas de cinéticas de secagem, observou-se que ocorreu uma diferença nos valores de k para os ensaios 5, 6 e 7, todos nas mesmas condições de secagem (140°C-12min (a), (b) e (c), respectivamente) em todos os ajustes propostos. Isso pode ter ocorrido por uma provável diferença na composição química da matéria-prima, que pode ter sido causada pela diferença de fornecedor, influenciando os resultados obtidos. Provavelmente seria necessário repetir-se esses três ensaios de modo a verificar se bananas vindas de um mesmo fornecedor apresentariam diferenças em suas composições químicas capazes de promover diferentes resultados para os três ensaios. É importante ressaltar que as amostras dos ensaios 5 e 6 foram provenientes de um mesmo fornecedor (fornecedor A) e apresentaram comportamento semelhante para quase todas as análises.

Mesmo não alcançando valores de a_w próximos a 0,320 como era esperado, obteve-se amostras crocantes com atividade de água variando de 0,345

a 0,363, que foram os ensaios 4 (150°C-15min e $a_w = 0,363$), 5 (140°C-12min(a) e $a_w = 0,345$), 6 (140°C-12min(b) e $a_w = 0,345$) e 7 (140°C-12min(c) e $a_w = 0,363$), o que foi comprovado pela medida instrumental e pelo painel de provadores (medida sensorial). É importante salientar que estes ensaios não diferiram estatisticamente das notas sensoriais da banana comercial liofilizada, o que comprova que mesmo com a_w maior que 0,320, as amostras destes quatro ensaios foram aceitas como produtos crocantes.

A medida sensorial de crocância deve ser relacionada com pelo menos duas propriedades de medidas instrumentais: força máxima e número de picos entre o início da compressão e a deformação na força máxima, uma vez que a bibliografia fornece indicativos que à medida que aumenta a quantidade de pontos de fratura nas curvas, diminui a força necessária para romper a amostra e, conseqüentemente, esta apresenta menor dureza, o que aumenta a sensação da crocância.

Outro fator determinante do processo foi a umidade da amostra saída da etapa *HTST* (umidade pós-*HTST*) e sendo colocada na etapa a 70°C, pois em todos os ensaios esses valores de umidade foram diferentes, influenciando a análise de uma relação entre o parâmetro k (constante de secagem) do modelo de Lewis e as características de crocância, determinada pelas variáveis tempo e temperatura *HTST*.

5. CONCLUSÕES

1. A faixa de atividade de água encontrada para todas as amostras do abacaxi comercial liofilizado foi acima de 0,300, sendo que as análises sensorial e instrumental apontaram 84% as amostras, que apresentaram a_w abaixo de 0,320, como um produto seco e crocante; 16% das amostras apresentaram a_w de 0,380 e comportamento plástico pela análise instrumental. A atividade de água da banana ficou na faixa estabelecida pela bibliografia (abaixo de 0,300), o que indica um produto seco e crocante, características que foram comprovadas pelas análises instrumental e sensorial. A maçã também apresentou atividade de água de produto seco e crocante (abaixo de 0,300). A análise instrumental mostrou um comportamento plástico para a maçã, mas a análise sensorial indicou o produto como crocante, porém com uma nota inferior à banana e ao abacaxi.
2. Obteve-se produtos crocantes nas condições dos ensaios 4 (150°C-15min), 5 (140°C-12min(a)), 6 (140°C-12min(b)) e 7 (140°C-12min(c)), todos com a_w entre 0,345 e 0,363. As condições dos ensaios 1 (130°C-9min) e 2 (150°C-9min) mostraram que o tempo de 9 minutos da etapa *HTST* não foi um tempo suficiente para assegurar a crocância nessas duas temperaturas.
3. O melhor grau de reidratação ocorreu para os tempos de 10 e 5 minutos de imersão em água em ebulição.
4. Não foi possível relacionar o parâmetro k do modelo de Lewis com o tempo e a temperatura da etapa *HTST*, uma vez que as diferenças nas umidades iniciais das amostras teve maior influência nos valores de k do que as variáveis tempo e temperatura desta etapa.

5. Na medida instrumental de textura, verificou-se que para as temperaturas de 130°C e 150°C o aumento do tempo da etapa *HTST* provocou o aumento do número de picos entre o início da compressão e a deformação na força máxima, o que segundo a bibliografia é um dos fatores indicativos de crocância. Na temperatura de 140°C a 12 minutos dos três ensaios o número de picos foi semelhante, indicando que os produtos apresentavam a propriedade de crocância. A banana comercial liofilizada apresentou comportamento de medida instrumental de textura semelhante às replicatas dos ensaios 5, 6 e 7 (140°C-12 min (a), (b) e (c), respectivamente).

6. A medida sensorial de crocância apresentou melhores notas para os ensaios 4 (150°C-15min, com nota de 7,8), 5 (140°C-12min(a), com nota 6,7), 6 (140°C-12min(b), com nota 6,8) e 7 (140°C-12min(c), com nota 6,6). Esses valores tiveram uma direta relação com os resultados da medida instrumental de textura. A banana comercial liofilizada ficou na mesma escala de aceitação de crocância que as amostras desses mesmos ensaios.

7. Apesar dos valores de a_w da banana desidratada nesse estudo não chegarem ao valor de a_w da banana comercial liofilizada (<0,300), as medidas instrumentais de textura indicaram que se obteve produtos crocantes com a_w entre 0,345 e 0,363, o que comprova que mesmo com a_w maior que 0,320, as amostras foram aceitas como produtos crocantes na mesma escala de crocância de um produto colocado à venda no mercado.

8. A análise de variância do planejamento experimental mostrou-se adequada para avaliar o grau de reidratação a 10 minutos, a força máxima e o parâmetro k do modelo de Lewis para secagem completa e para a etapa *HTST*.

9. A diferença de fornecedor de matéria-prima foi um fator relevante no processo, principalmente no estudo da cinética de secagem, cujo parâmetro k do modelo de Lewis apresentou valores muito próximos para amostras de um mesmo fornecedor (ensaios 5 e 6, 140°C-12min (a) e (b), respectivamente), diferenciando-se dos demais ensaios, feitos com amostras de outro fornecedor. Apesar de não ter sido feita uma análise da composição química da banana, os valores de k são um forte indicativo de que existiu diferença entre as amostras.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. A diferença de fornecedor da matéria-prima demonstrou ser um parâmetro de grande influência no produto final. Assim, o ideal seria verificar se amostras de um mesmo fornecedor teriam variação na sua composição química.
2. Incorporar ao estudo do processo de secagem a umidade pós-*HTST*, uma vez que esta se mostrou relevante para todas as condições estudadas. Se essa umidade for um parâmetro fixo no processo, é possível verificar qual o grau de influência dessa variável. Com isso, o tempo da etapa *HTST* passaria a ser resposta do processo.
3. Otimizar o equipamento de secagem de modo que se obtenha uma secagem homogênea em toda a distribuição das amostras nas bandejas, uma vez que a heterogeneidade das mesmas (como diferença de coloração e textura final) teve grande influência nas diferenças ocorridas em todas as análises feitas para um mesmo ensaio, inclusive ocorrendo variação das replicatas de uma mesma amostra, fato verificado nas determinações analíticas e observações visuais.
4. Fazer um refinamento de planejamentos experimentais até se encontrar um que descreva melhor quais as condições de ensaio que levam a produtos com características crocantes.
5. Montar um planejamento experimental que englobe pontos axiais de modo a verificar se um ajuste para modelos de segunda ordem descreveria melhor a influência das variáveis no processo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE, J. M. Como produzir banana-passa (Frutotec-ITAL). *Jornal O Estado de São Paulo - Suplemento agrícola*, São Paulo, 22 de março de 2000. Disponível em <<http://www.estado.estadao.com.br/jornal/suplem/agri/00/03/22/agri003.html>>. Acesso em: Setembro de 2001.
- A.O.A.C. Official methods of analysis, 13ed. **Association of Official Analytical Chemists**. Washington, 1984.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. ***Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na indústria***. Campinas, SP: Editora da Unicamp, pp.85-237, 2001.
- BENASSI. Banana. Disponível em <<http://www.irmaosbenassi.com.br/cat/banana.htm>>. Grupo Irmãos Benassi: Catálogo de frutas. Acesso em: Janeiro de 2003.
- BRUNELLO, G. Verificação de novo modelo aplicável à secagem de cereais: secagem de milho em leito de jorro. In: **1º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA**. São Paulo, Brasil, 1976.
- CARDOSO, C.S.B. Secagem de fatias de banana em leito vibro-fluidizado a altas temperaturas por curto tempo. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)**. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas (SP), 1998.
- CEASA-Campinas. Padrões: Banana. Disponível em <<http://www.ceasacampinas.com.br/>>. Acesso em: Fevereiro de 2002.
- CHIRIFE, J. Fundamental of the drying mechanism during air dehydration of foods. **Advances in Drying**. 1: 73-102, 1981.

- COYA HONORES, W.J. Estudo de secagem de maçã (*Malus spp.* Variedade Golden delicious). **Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)**. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas (SP), 1995.
- CRANK, J. Diffusion in a sphere. In: CRANK, J. ***The mathematics of diffusion***. 2ed. Clarendon Press Oxford, pp. 84-98, 1975.
- DUIDZER, LM.; CAMPANELLA, O.H. Sensory, instrumental and acoustic characteristics of extruded snack food products. **Journal of Texture Studies**. 29(4): 397- 411, 1998.
- DRYING FOOD. Site da University of Illinois at Urbana-Champaign. Disponível em <<http://www.ag.uiuc.edu/~vista/html-pubs/DRYING/dryfood.html>>. Acesso em: Abril de 2001.
- EMBRAPA. Nomenclatura da banana. Disponível em<<http://www.cnpmf.embrapa.br/banana.htm#producao>>. Acesso em: Fevereiro de 2003.
- FONSECA, F.A.; MORAIS, J.C.; TEIXEIRA, J.S.; FREIRE, L.B.S.; PAVAN, V.L.B. Trabalhos Acadêmicos: Banana-passa - tecnologia de fabricação. Site da Universidade Federal de Goiás (Faculdade de Engenharia de Alimentos). Disponível em<<http://www.engalimentos.hpg.ig.com.br/trabalhos/banana-tecnologia.htm>>. Acesso em: Janeiro de 2003.
- GABAS, A. L. Secagem de Uva Itália em leito fixo. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)**. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas (SP), 1998.

- HOLLINGSWORTH, P. Snack Food. **Food Technology**. 49 (10): 58-62, 1995.
- JAYARAMAN, K.S.; DAS GUPTA, D.K. Dehydration of fruits and vegetables-recent developments in principles and techniques. **Drying Technology**. 10(1): 1-50, 1992.
- KEEY, R.B. Drying under constant external conditions. In: KEEY, R.B. **Drying, principles and practice**. 1ed. Pergamon Press, pp. 178-190, 1975.
- KIM, M.H.; TOLEDO, R.T. Effect of osmotic dehydration and high temperature fluidized bed drying on properties of dehydrated rabbiteye blueberries. **Journal of Food Science**. 52(4): 980-984, 1987.
- KROKIDA, M.K.; KIRANOUDIS, C.T.; MAROULIS, Z.B. Viscoelastic behaviour of dehydrated products during rehydration. **Journal of Food Engineering**. 40: 269-277, 1999.
- LABUZA, T.P.; KATZ, E.E. Effect of water activity on the sensory crispness and mechanical deformation of snack food products. **Journal of Food Science**. 46: 403-409, 1981.
- LEWIS, W.K. The rate of drying of solids material. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. 13(5):427-432, 1921.
- LOMAURO, C.J.; LABUZA, T.P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: fruit, vegetable and meat products. **Lebensmittel – Wissenschaft und Technologies**. V18, p. 111-117, 1985.

- LOPES, C. C. Estudo do mecanismo de quebra do grão de arroz. **Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)**. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas (SP), 1989.
- LUCAS, V. Obtenção de fatias de banana desidratada crocantes através da pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)**. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas (SP), 1996.
- MASKAN, M. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering**. 48: 177-182, 2001.
- McCORMICK, P.Y.; PORTER, H.F.; LUCAS, R.L.; WELLS, D.F. Solids drying fundamentals. In: PERRY, R.H. and CHILTON, C.H. **Chemical engineer's handbook**. McGraw Hill Book Company, 5ed., section 20:1-16, 1983.
- MEDINA, J.C.; BLEINROTH, E.W.; MARTIN, Z.J.; TRAVAGLINI, D. A.; OKADA, M.; QUAST, D.G.; HASHIZUME, T.; RENESTO, O.V.; MORETTI, V.A. **Banana: da cultura ao processamento e comercialização**. Segunda edição. Campinas(SP), ITAL: pp.1-131, 198-264, 1985.
- MEILGAARD, M.; CIVILLE, G.V.; CARR, B.T. **Sensory Evaluation Techniques**. Florida (EUA): CRC Press, 281p ,1987.
- NASCIMENTO, C.; RODRIGUES, A.P. Bem-vindo à terra das bananas. Redação do iG – Caderno I. Disponível em<<http://ultimosegundo.ig.com.br/home/cadernoi/artigo.0,2945,884164,00.html>>. Acesso em: Fevereiro de 2003.

- NOGUEIRA, R. I. Processo de secagem de banana (*Musa acuminata* subgrupo *Cavendish* cultivar Nanica): parâmetros ótimos na obtenção de banana-passa. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)**. Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas (SP), 1991.
- OKADA, M.; VITALI, A.A.; CARVALHO, R.; NETO, R.O.T.; JARDIM, D.C.P. Fundamentos sobre a secagem de sólidos. In: Travaglini, D.A.(Coord.) **Desidratação de frutas e hortaliças – manual técnico**. Campinas(SP), ITAL: pp.1-38, 1987.
- PARK, K.J.; BROD, F.P.R.; ALONSO, L.F.T. Secagem de produtos agrícolas. In: **XI SEMEAGRI – SEMANA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA DA UNICAMP**. Campinas (SP): Agrológica – Empresa Júnior de Engenharia Agrícola, pp. 41-55, 1999.
- PRODAM.Banana.Disponível em< <http://www.prodam.sp.gov.br/semab/dicas/desbanana.htm>>. Companhia de processamento de dados do município de São Paulo. Acesso em: Janeiro de 2003.
- ROUDAUT, G.; DACREMONT, C.; LE MESTE, M. Influence of water on the crispness of cereal-based foods: acoustic, mechanical and sensory studies. **Journal of Texture Studies**. 29(2): 199-213, 1998.
- ROUDAUT, G.; DACREMONT, C.; LE MESTE, M.; PAMIES, B.V.; MITCHELL, J.R. Understanding the texture of low moisture cereal products: mechanical and sensory measurements of crispness. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 80: 1679-1685, 2000.

- SACA, S.A.; LOZANO, J.E. Explosion puffing of bananas. **International Journal of Food Science and Technology**. 27(4): 419-426, 1992.
- SACLAR, S.; UNGAN, S.; KATNAS, S. Instrumental crispness and crunchiness of roasted hazelnuts and correlations with sensory assessment. **Journal of Food Science**. 64(6): 1015-1019, 1999.
- SARAVACOS, G.D.; CHARM, S.G. A study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration. **Food Technology**. 16: 78-81, 1962.
- SERENO, A.M.; MEDEIROS, G.L. Simplified model for the prediction of drying rates for foods. **Journal of Food Engineering**. 12(1): 1-11, 1990.
- SHERWOOD, T.K. The drying of solids: part A. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. 21(10): 12-16, 1929.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. Mechanism of the drying process. In: STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, applications and design**. 1ed. Gordon and Breach Science Publishers S.A., pp. 50-56, 1986.
- TOLEDO, R. T. Dehydration. In: TOLEDO, R. T. **Fundamentals of food process engineering**. 2^a edictal. Chapman & Hall: New York (NY), USA, pp. 456-506, 1991.
- VICENT, J.F.V. The quantification of crispness. **Journal of the Science of Food and Agriculture**. 78(2): 162-168, 1998.
- VACCAREZZA, L.M.; LOMBARDI, J.L.; CHIRIFE, J. Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. **Journal Food Technology**. 9: 317-327, 1974.

WILKINSON, C.; DIJKSTERHUIS, G.B.; MINEKUS, M. From Food structure to texture. **Food Science and Technology**. 11: 442-450, 2000.

ZAMMER, C.M. Gun-puffed vegetable snacks: A new way to eat your veggies. **Food Technology**. 49 (10): 64-65, 1995.

APÊNDICE A

Curvas típicas força-deformação de todas as replicatas nas condições dos ensaios 1 ao 8

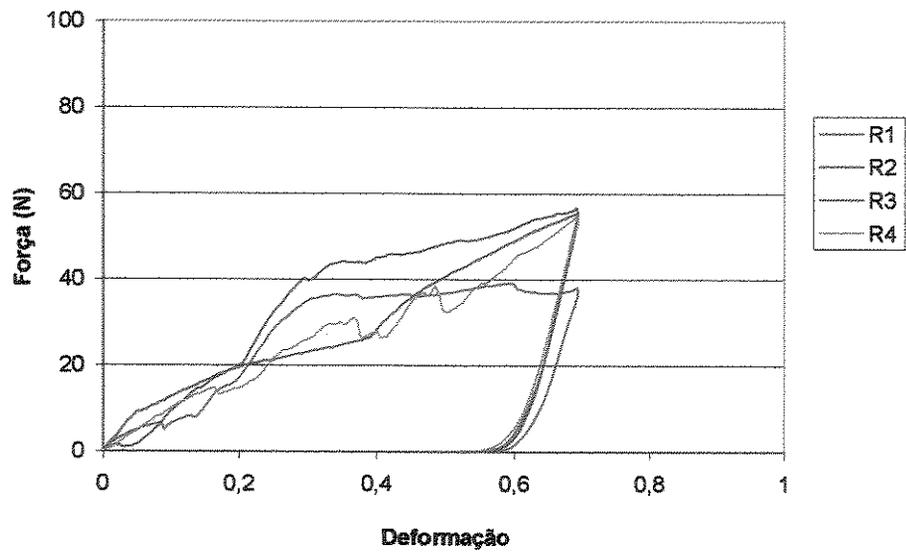


Figura A1: Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 1 (130°C-9min)

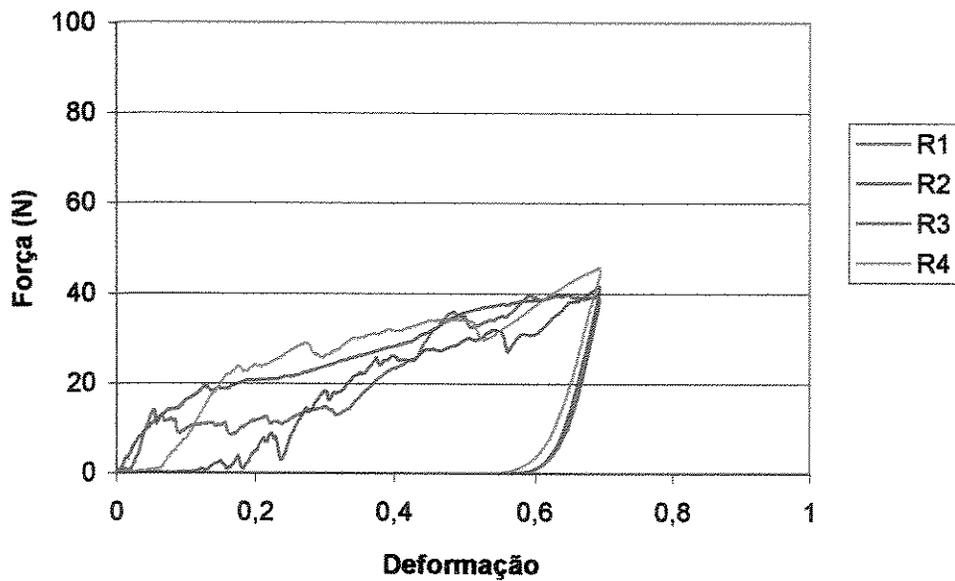


Figura A2: Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 2 (150°C-9min)

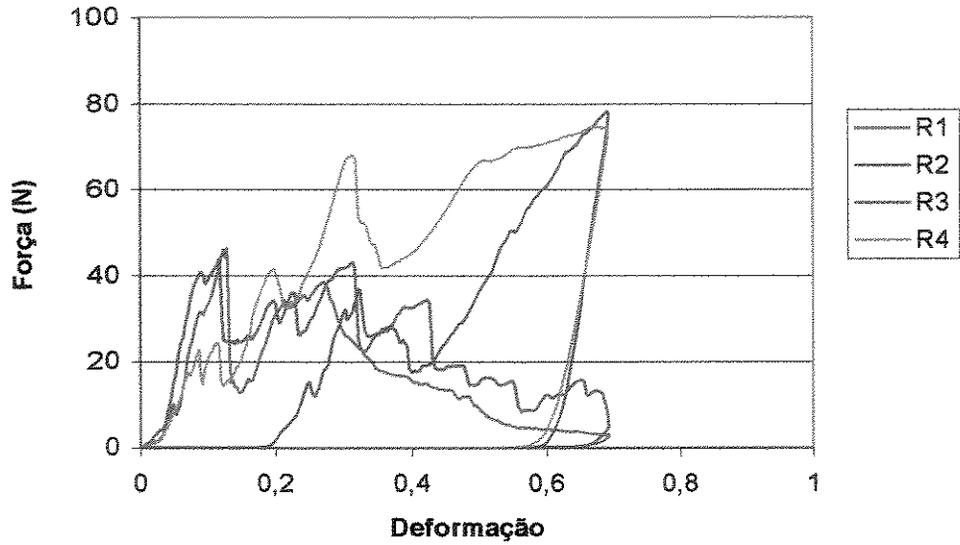


Figura A3: Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 3 (130°C-15min)

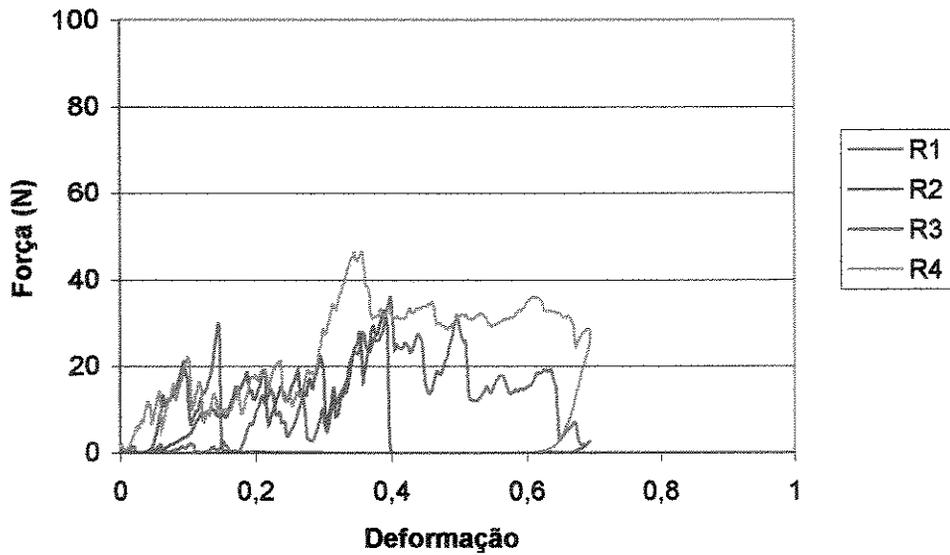


Figura A4: Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 4 (150°C-15min)

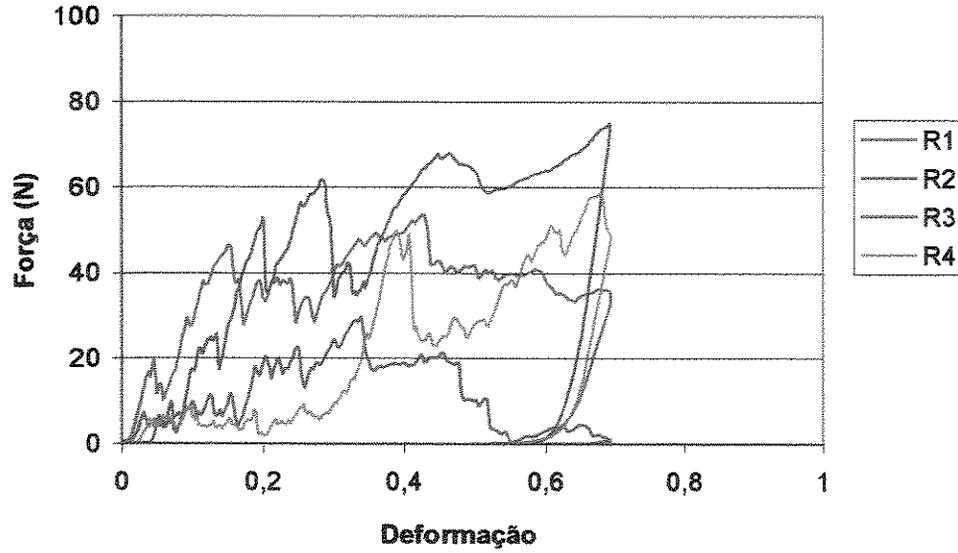


Figura A5: Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 5 (140°C-12min(a))

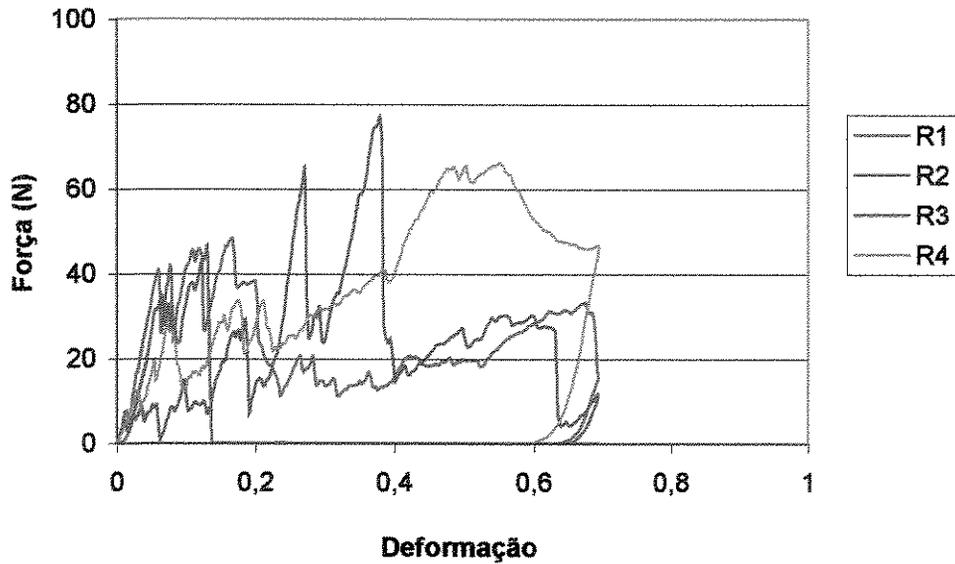


Figura A6: Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 6 (140°C-12min(b))

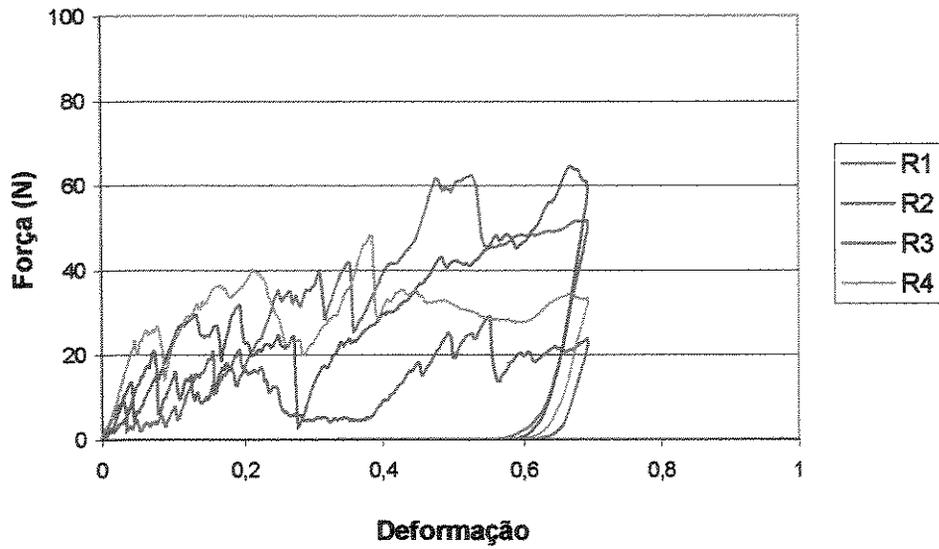


Figura A7: Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 7 (140°C-12min(c))

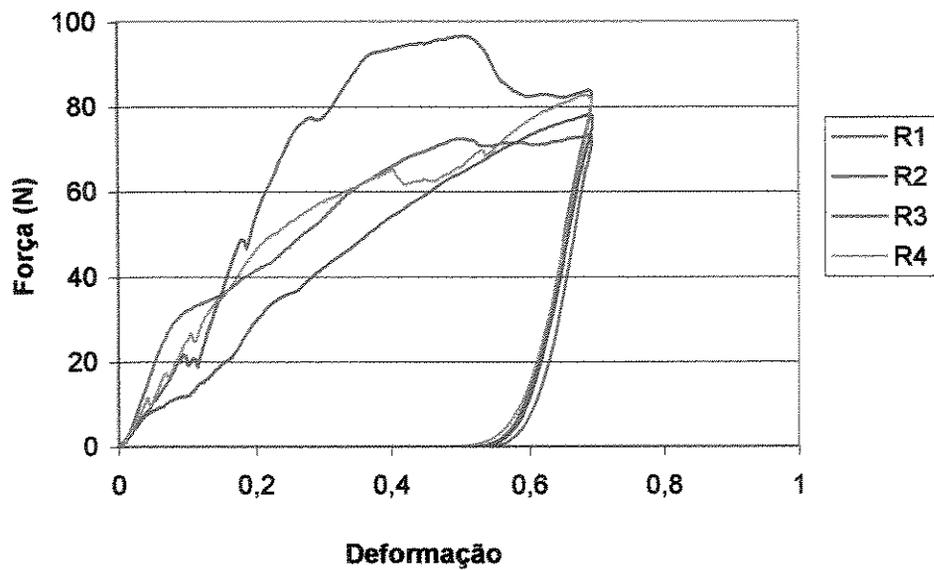


Figura A8: Curva típica força-deformação das replicatas nas condições de ensaio 8 (etapa somente a 70°C)

APÊNDICE B

**Ajuste do modelo de Lewis para os dados experimentais da
secagem completa dos ensaios 1 ao 8**

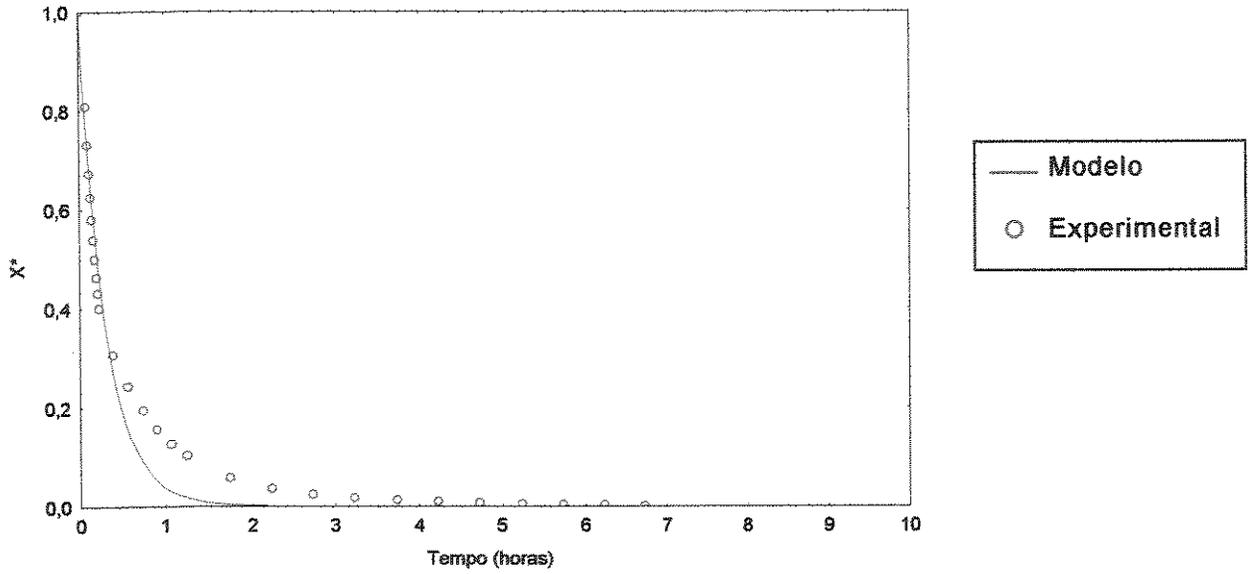


Figura B1: Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 1 (130°C-9min)

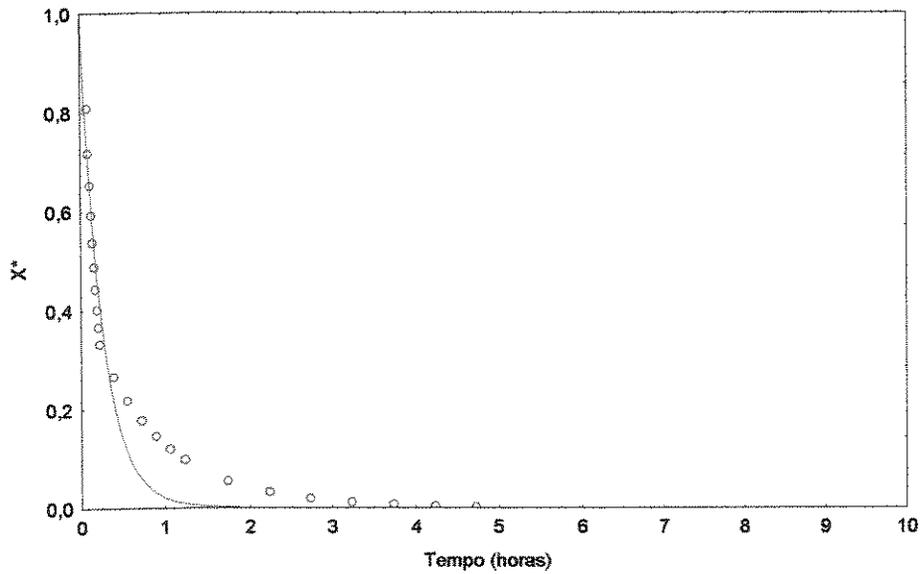


Figura B2: Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 2 (150°C-9min)

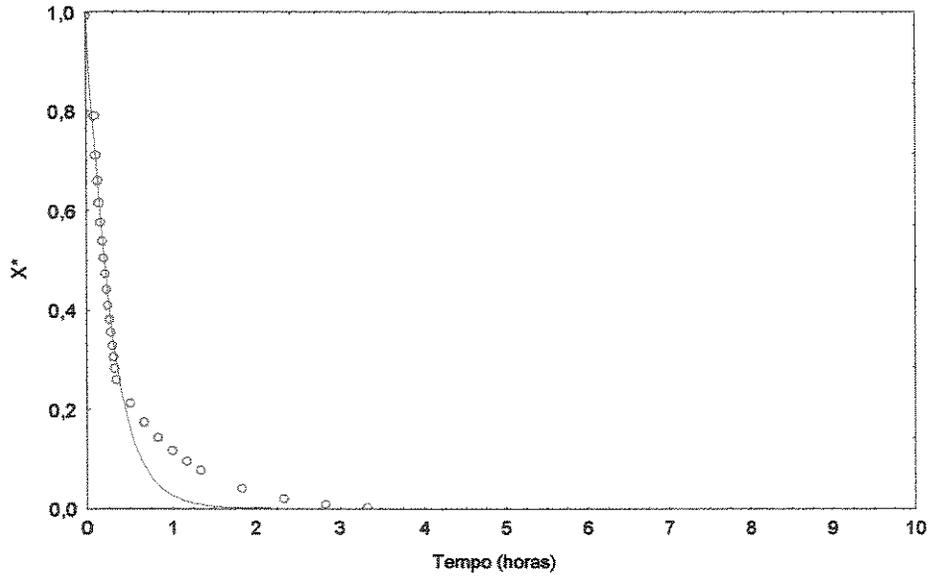


Figura B3: Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 3 (130°C-15min)

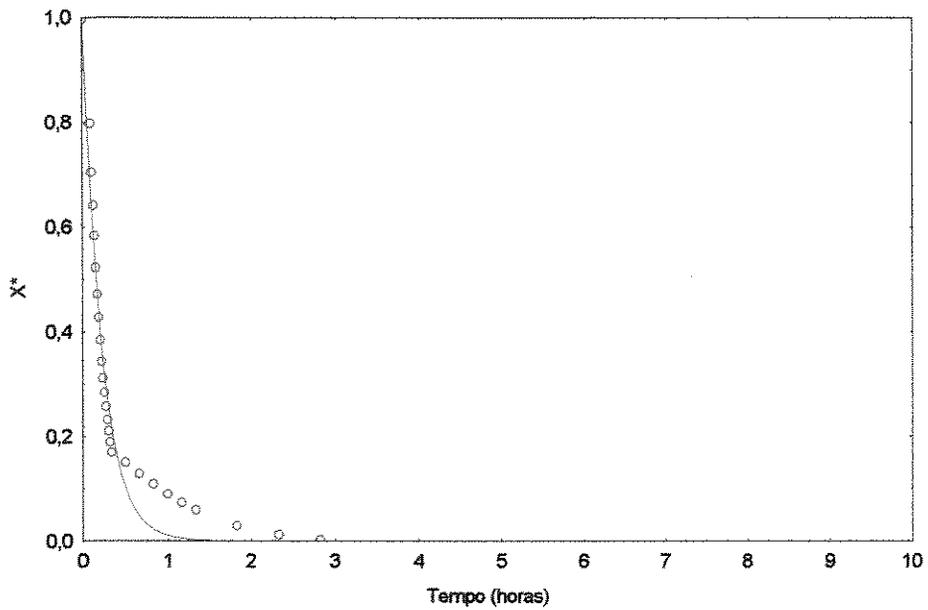


Figura B4: Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 4 (150°C-15min)

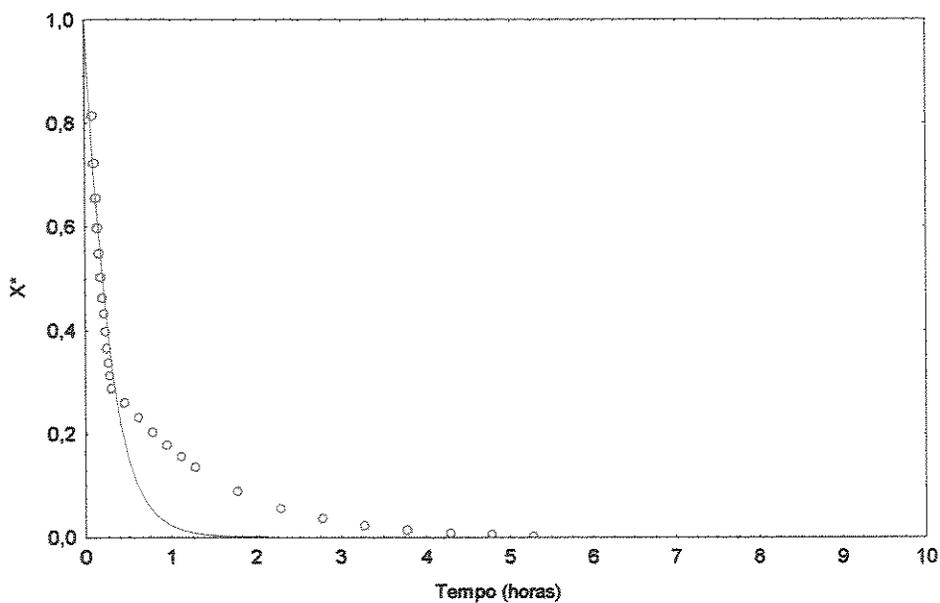


Figura B5: Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 5 (140°C-12min(a))

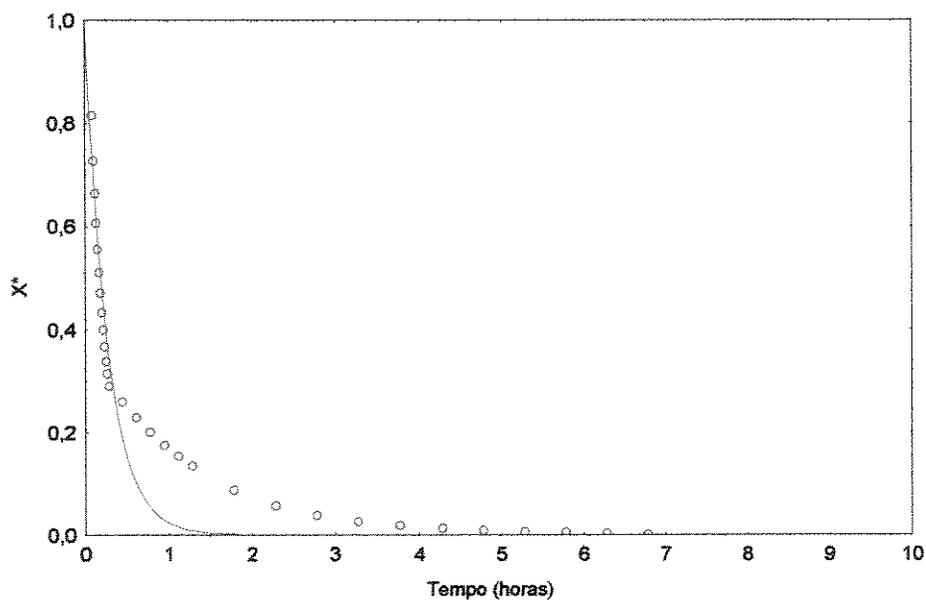


Figura B6: Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 6 (140°C-12min(b))

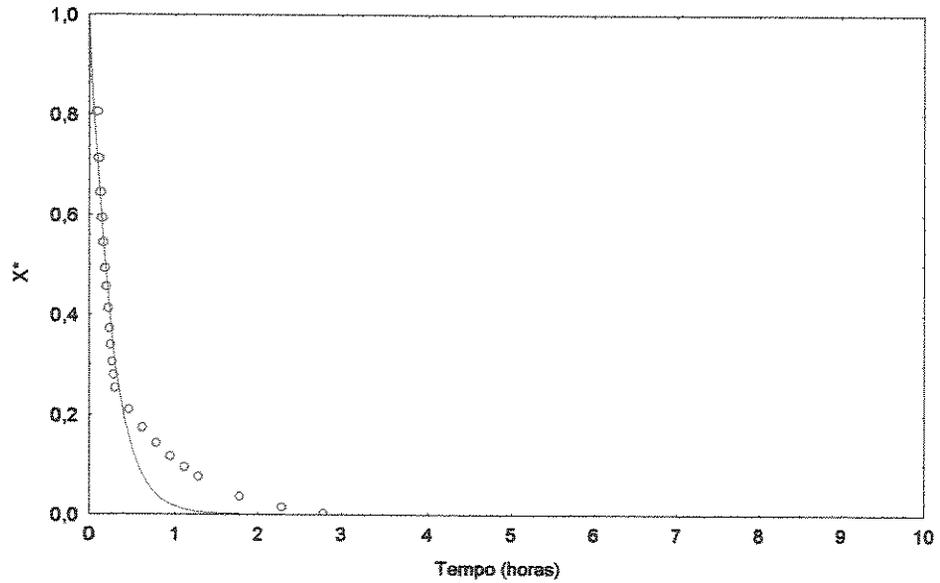


Figura B7: Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 7 (140°C-12min(c))

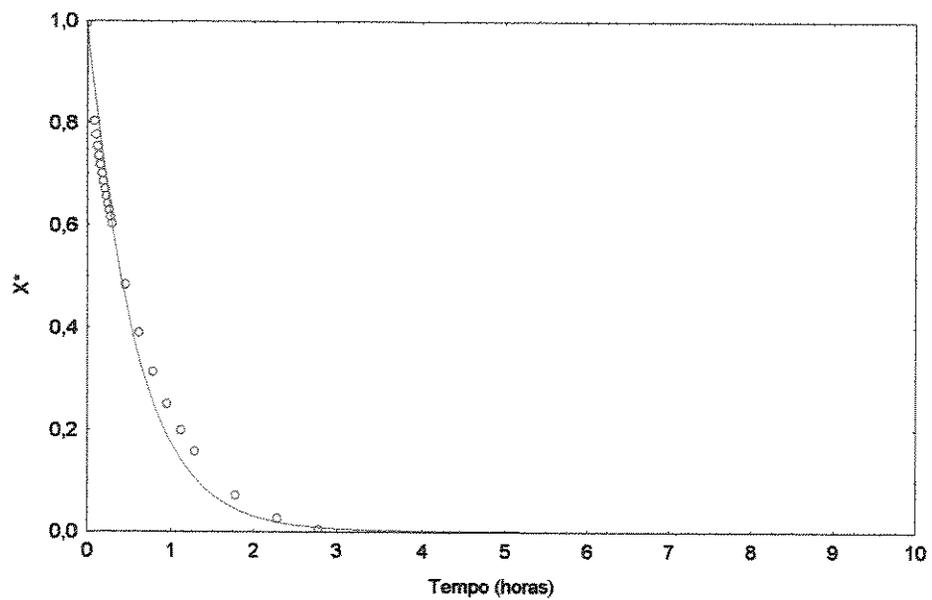


Figura B8: Ajuste do modelo de Lewis para a secagem completa do ensaio 8 (70°C-9,78 horas)

APÊNDICE C

**Ajuste do modelo de Lewis para os dados experimentais da
etapa *HTST* dos ensaios 1 ao 8**

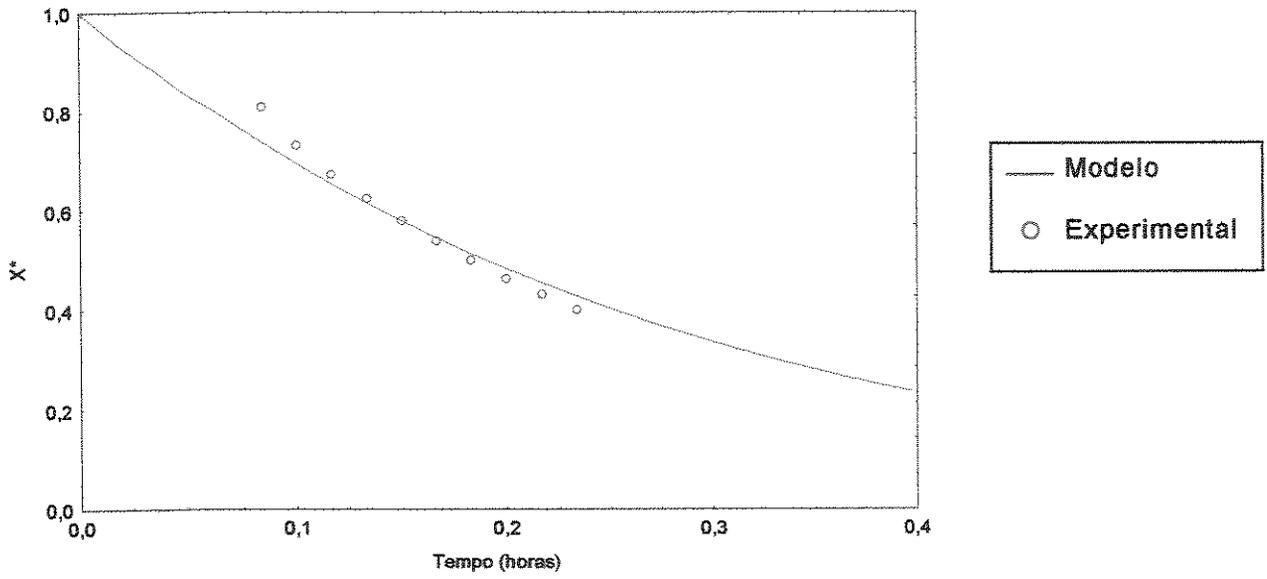


Figura C1: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa *HTST* do ensaio 1 (130°C-9min)

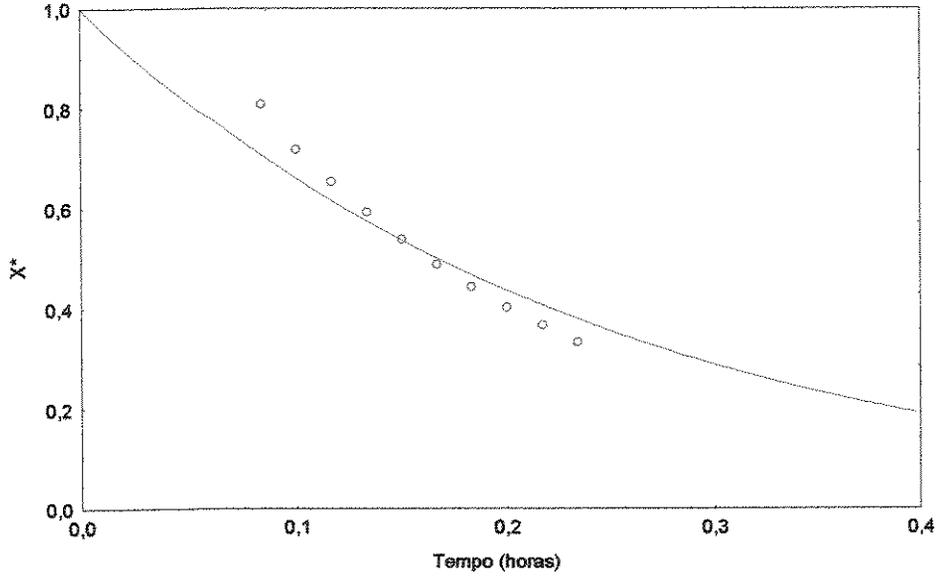


Figura C2: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa *HTST* do ensaio 2 (150°C-9min)

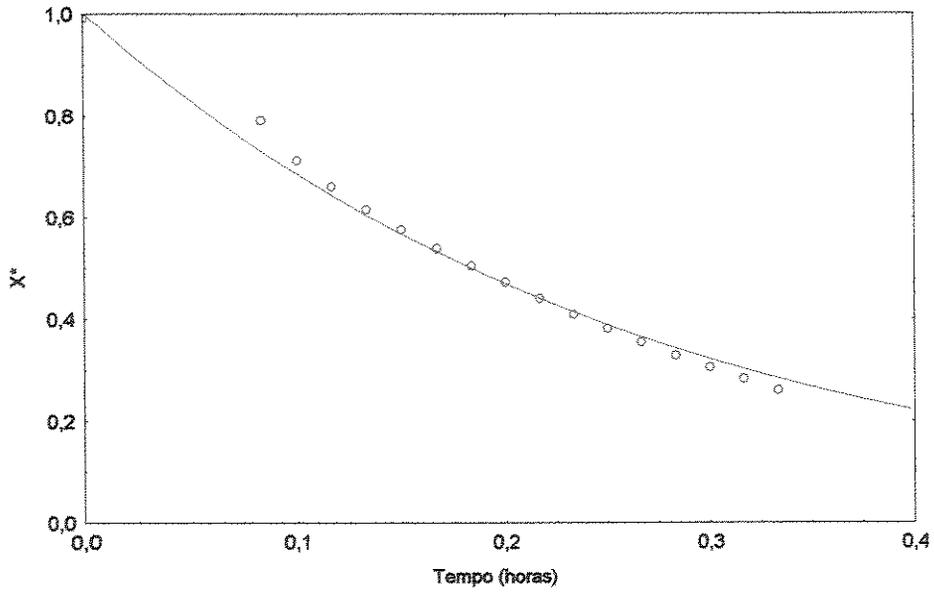


Figura C3: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa *HTST* do ensaio 3 (130°C-15min)

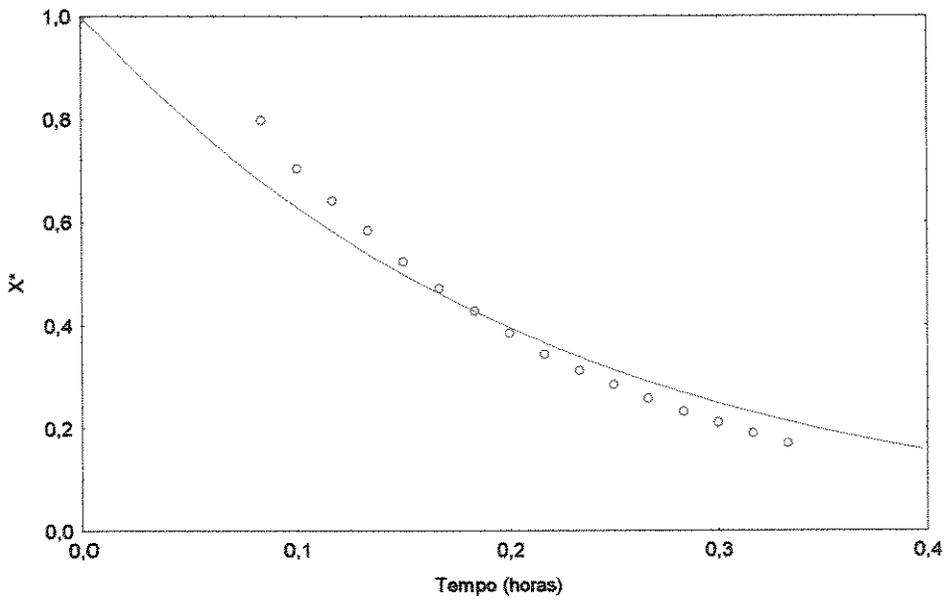


Figura C4: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa *HTST* do ensaio 4 (150°C-15min)

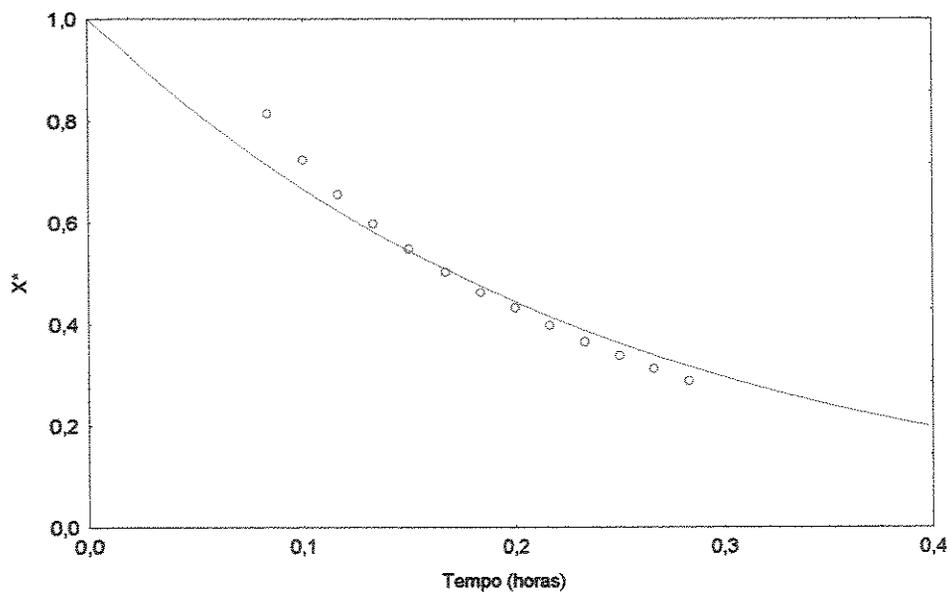


Figura C5: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa *HTST* do ensaio 5 (140°C-12min(a))

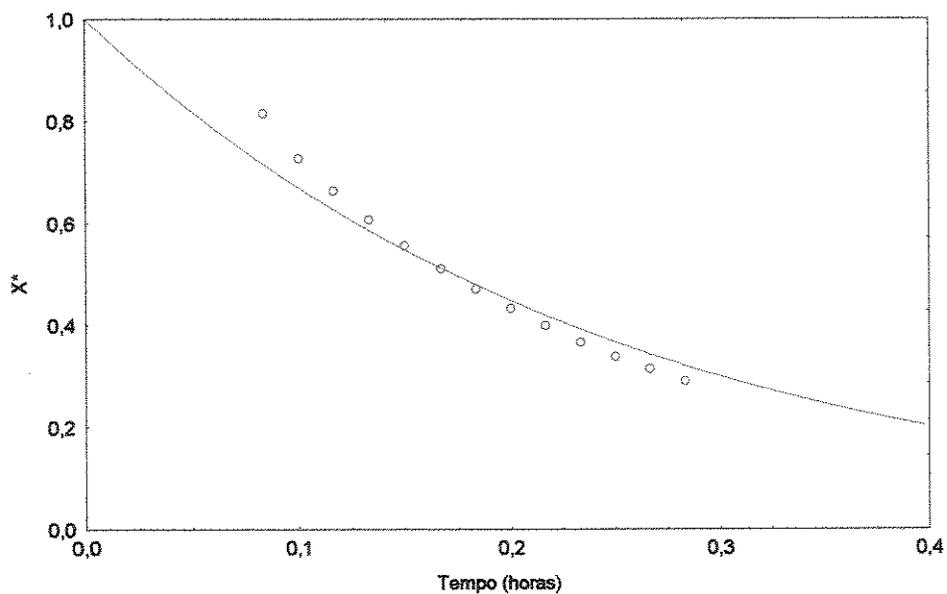


Figura C6: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa *HTST* do ensaio 6 (140°C-12min(b))

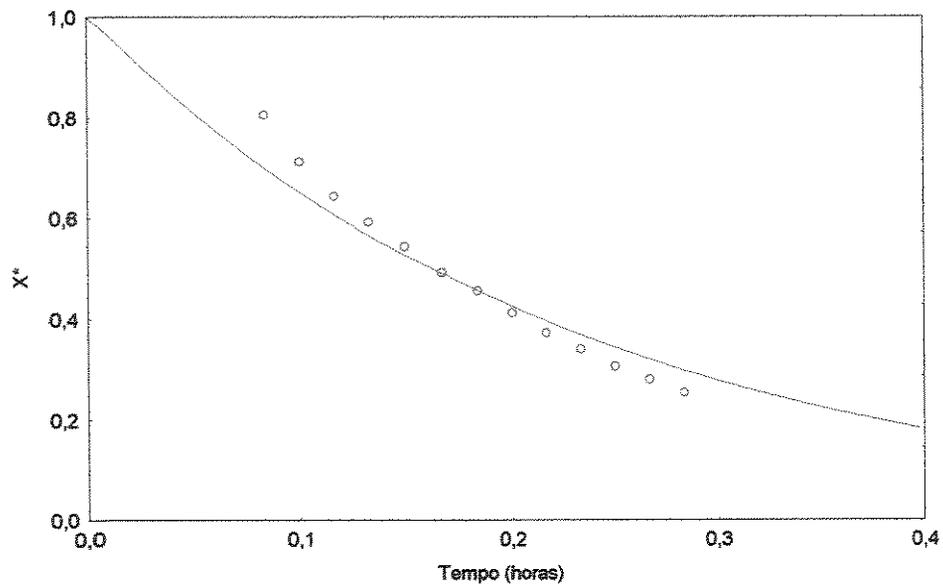


Figura C7: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa *HTST* do ensaio 7 (140°C-12min(c))

APÊNDICE D

**Ajuste do modelo de Lewis para os dados experimentais da
etapa a 70°C dos ensaios 1 ao 8**

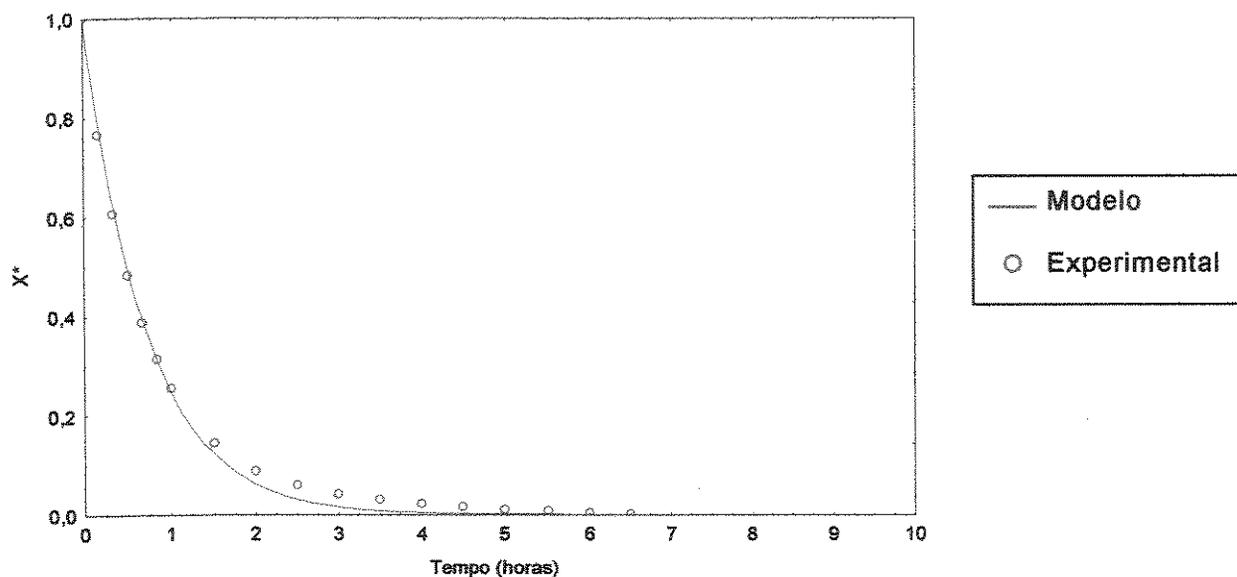


Figura D1: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa a 70°C do ensaio 1 (130°C-9min)

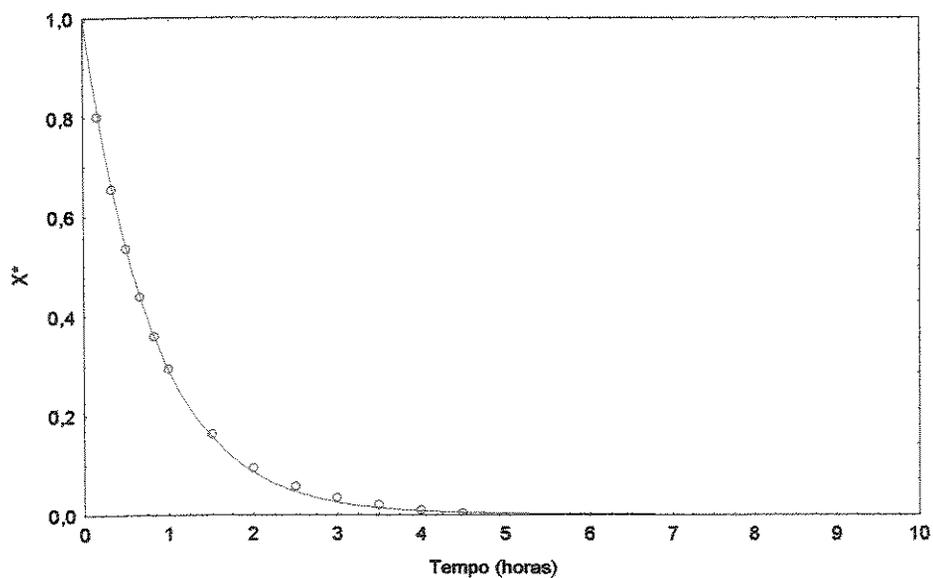


Figura D2: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa a 70°C do ensaio 2 (150°C-9min)

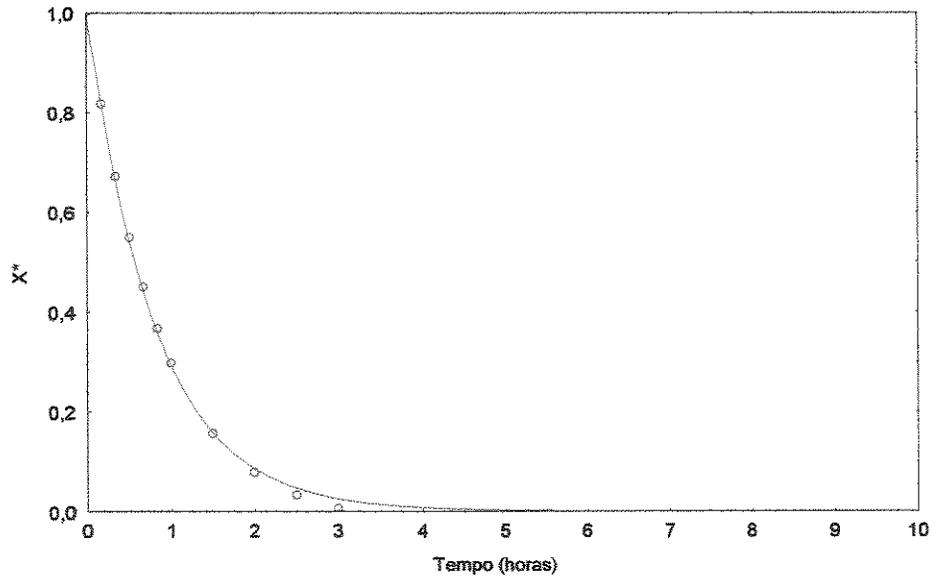


Figura D3: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa a 70°C do ensaio 3 (130°C-15min)

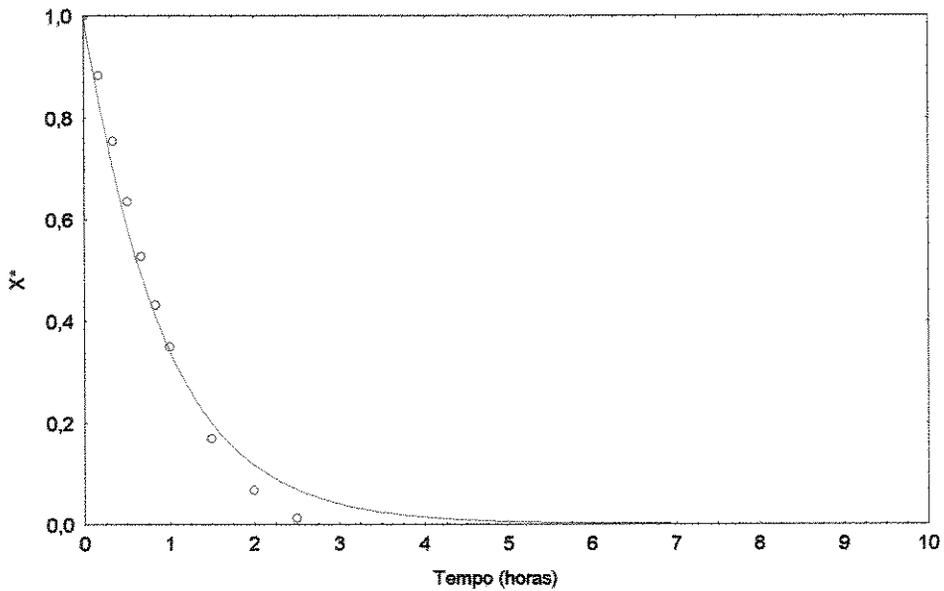


Figura D4: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa a 70°C do ensaio 4 (150°C-15min)

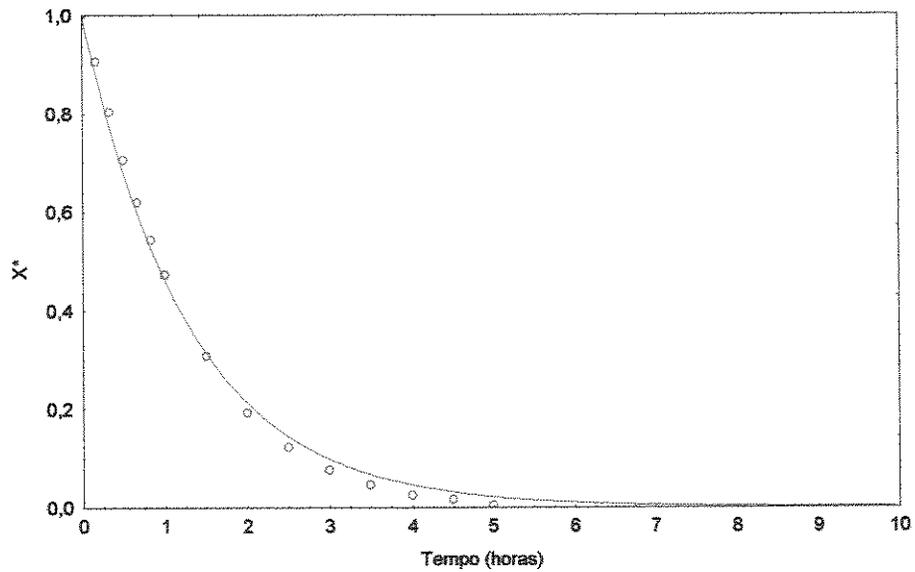


Figura D5: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa a 70°C do ensaio 5 (140°C-12min(a))

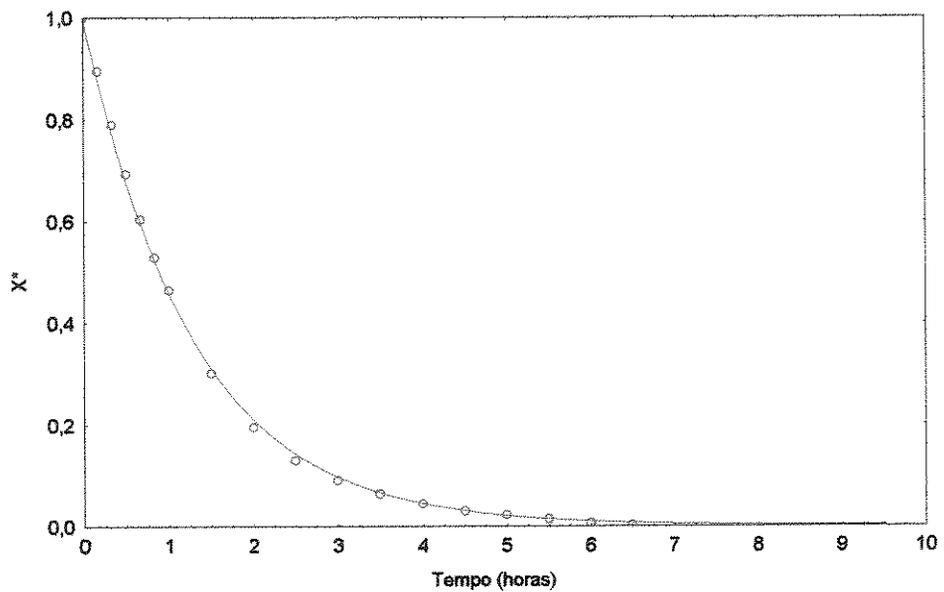


Figura D6: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa a 70°C do ensaio 6 (140°C-12min(b))

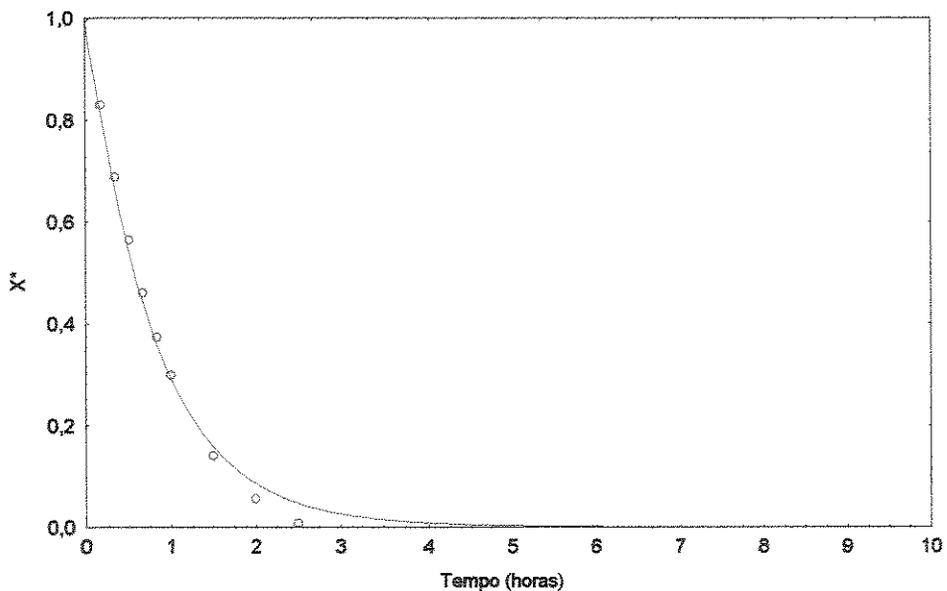


Figura D7: Ajuste do modelo de Lewis para a etapa a 70°C do ensaio 7 (140°C-12min(c))