

Barbara Daniele Almeida Porciuncula

**CONTROLE DA MICROESTRUTURA E TEXTURA NA
DESIDRATAÇÃO DE BANANA USANDO CICLOS DE
AQUECIMENTO-PULSO DE VÁCUO**

Tese submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Alimentos. Área de concentração: Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos.
Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Porciuncula, Barbara Daniele Almeida
CONTROLE DA MICROESTRUTURA E TEXTURA NA DESIDRATAÇÃO DE
BANANA USANDO CICLOS DE AQUECIMENTO-PULSO DE VÁCUO /
Barbara Daniele Almeida Porciuncula ; orientador, João
Borges Laurindo - Florianópolis, SC, 2014.
148 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Alimentos.

Inclui referências

1. Engenharia de Alimentos. I. Laurindo, João Borges.
- II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. III. Título.

Barbara Daniele Almeida Porciuncula

**CONTROLE DA MICROESTRUTURA E TEXTURA NA
DESIDRATAÇÃO DE BANANA USANDO CICLOS DE
AQUECIMENTO-PULSO DE VÁCUO**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor,
e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Alimentos.

Florianópolis, 4 de julho de 2014.

Prof. João Borges Laurindo, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Este trabalho é dedicado aos meus
amados pais.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela dádiva da vida e por colocar em meu caminho pessoas maravilhosas.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Borges Laurindo, pela orientação, paciência, confiança, pelo exemplo de profissional dedicado e pelos valiosos ensinamentos.

Aos membros da banca examinadora e ao relator pela disponibilidade e sugestões nas correções desta tese.

Ao professor Sereno pelo auxílio no desenvolvimento do picnômetro à gás.

Aos meus pais, Loiva e Raul, por serem simplesmente maravilhosos. Obrigada por acreditarem em mim e por me apoiarem em minhas decisões. Obrigada por me ensinarem a ser forte diante dos obstáculos que a vida nos apresenta.

Ao meu padrasto Wilson que mesmo distante sempre esteve presente!

Ao meu companheiro Natan pela paciência, carinho, amor e por tornar meus dias melhores.

Aos meus colegas e acima de tudo amigos do PROFI, Jaque, Gustavo, Jhony, Leno, Marieli, Marta, Marlene, Giustino, Daniel, Juca e Ricardo. Agradeço a prestatividade de todos e muito obrigada pelos momentos agradáveis dentro e fora do laboratório.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos em especial ao Prof. Bruno pelo carinho e atenção.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

“O período de maior ganho em conhecimento e experiência é o período mais difícil da vida de alguém”

(Dalai Lama)

RESUMO

A alta perecibilidade da banana, aliada à dificuldade de seu armazenamento, contribui para a perda de aproximadamente 40 % da produção nacional, indicando a necessidade de processos adequados para sua preservação e agregação de valor. Neste trabalho, três diferentes processos de secagem de bananas (var. Prata) foram investigados, todos eles usando múltiplos ciclos de aquecimento condutivo-pulso de vácuo (KMFD). A diferença entre os processos foi a temperatura de aquecimento e o número de ciclos aplicados. Diferentes temperaturas de aquecimento da câmara de secagem (80 °C e 90 °C) foram estudadas, observando os efeitos sobre as taxas de secagem e sobre as microestruturas e as texturas resultantes. Uma técnica de aplicação de 3 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD) também foi estudada. Os resultados obtidos por esses processos de desidratação foram comparados com os obtidos pelo processo denominado CMFD (*convective multi-flash drying process*), em que ar quente foi usado para o processo de aquecimento das frutas, com o processo de secagem a vácuo clássico (VD) e com o processo de secagem com ar quente (CD). Frutas desidratadas crocantes foram obtidas pelas diferentes técnicas de secagem que usam múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. Também foi estudada a influência do método de secagem na formação e no comportamento da microestrutura das bananas. Assim, as amostras foram submetidas à secagem através dos processos denominados KMFD, KMFD_VD, CD e VD e caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), determinação de densidade aparente, encolhimento e porosidade. A densidade aparente e a porosidade foram fortemente influenciadas pelo processo de secagem, devido ao encolhimento das amostras. A secagem convectiva causou o maior encolhimento das amostras. As amostras submetidas à secagem pelas técnicas de KMFD e KMFD_VD apresentaram menor encolhimento e maiores porosidades. Ao estudar o comportamento da microestrutura das frutas submetidas à secagem por KMFD com diferentes taxas de redução da pressão do sistema notou-se que a aplicação das maiores taxas (33,5 mbar s⁻¹) possibilitaram a obtenção de frutas desidratadas com maior porosidade. As curvas de sorção de umidade e a temperatura de transição vítrea das amostras das bananas desidratadas foram determinadas. Para que a textura das frutas desidratadas, pelas diferentes técnicas, seja mantida, ou seja, se mantenham crocantes, as mesmas devem ser acondicionadas em embalagens que mantenham sua atividade de água menor que 0,3.

Palavras-chave: Secagem, microestrutura, textura, banana.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Evolução da coloração amarela da casca de banana durante o amadurecimento (MEDINA e PEREIRA, 2004).	40
Figura 2.2. Curvas típicas de secagem.	41
Figura 2.3. Mecanismo do <i>puffing</i> antecedido de secagem (VARNALLIS et al., 2001).....	45
Figura 2.4. Velocidade relativa de reações em função da atividade de água (LABUZA, 1968).	52
Figura 2.5. Isoterma de sorção de alimentos generalizada (HELDMAN e LUND, 2007).	53
Figura 2.6. Diagrama representativo da transição de entre o estado vítreo e gomoso (LABUZA et al., 2004).....	56
Figura 2.7. Evolução da temperatura de transição vítrea do produto no transcorrer do processo de secagem (GENIN e RENÉ, 1995).....	588
Figura 3.1. Alternativas de aquecimento e aplicação de sucessivos ciclos de vácuo na aplicação da técnica de secagem por KMFD.	61
Figura 3.2. Diagrama esquemático do dispositivo experimental utilizado para a secagem por <i>Conductive multi-flash drying</i> (KMFD) e por <i>Conductive multi-flash drying associated with classical vacuum drying</i> (KMFD_VD).....	6262
Figura 3.3. Diagrama esquemático do perfil pressão-temperatura-tempo para o processo de KMFD.....	663
Figura 3.4. Diagrama esquemático do perfil pressão-temperatura-tempo para o processo de KMFD_VD.....	64
Figura 3.5. Demonstração da localização das perfurações durante os ensaios mecânicos.	65
Figura 3.6. Diagrama sistemático do picnômetro a gás.....	66
Figura 3.7. Fotografia ilustrativo picnômetro a gás.....	67
Figura 3.8. Balança analítica, com gancho acoplado para medições em solventes.....	68
Figura 3.9. Cesta para medição de amostras em solvente.	68

Figura 3.10. Evolução do teor de umidade de amostras de banana submetidas à técnica de secagem por KMFD (80 °C e 90°C) e secas por KMFD_VD (80 °C).	70
Figura 3.11. Contribuição condutiva e contribuição <i>flash</i>	71
Figura 3.12. Evolução da atividade de água das amostras de banana submetidas à técnica de secagem por KMFD e por KMFD_VD.	72
Figura 3.13. Curvas de força x deformação de amostras de banana submetidas à técnica de secagem por KMFD utilizando temperaturas de aquecimento de 80 °C e 90 °C no interior da câmara (b) e submetidas à técnica de KMFD_VD (c).	73
Figura 3.14. Fotografias de amostras de bananas desidratadas por KMFD com temperaturas de aquecimento da câmara de 80 °C e 90 °C, e de amostras de banana desidratadas por KMFD seguido de secagem a vácuo.	76
Figura 4.1. Diagrama esquemático do perfil pressão-temperatura-tempo para o processo de KMFD.	82
Figura 4.2. Evolução das densidades aparente das amostras de bananas durante os processos de secagem por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD), <i>conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).	86
Figura 4.3. Porosidade acessível das amostras de bananas secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD), <i>conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).	87
Figura 4.4. Encolhimento das amostras de bananas secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD), <i>conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).	89
Figura 4.5. Curvas força x deformação relativa das amostras de banana secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD), secadas por <i>conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secadas convectivamente (CD) e sob vácuo (VD).	90
Figura 4.6. Imagens de microscopia eletrônica das amostras submetidas à secagem por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD).	92

Figura 4.7. Imagens de microscopia eletrônica das amostras submetidas à secagem por <i>conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD).....	93
Figura 4.8. Imagens de microscopia eletrônica das amostras submetidas à secagem a vácuo (VD).....	94
Figura 4.9. Imagens de microscopia eletrônica das amostras submetidas à secagem convectiva (CD).....	95
Figura 5.1. Fluxograma operacional utilizado para a técnica de secagem por <i>Conductive multi-flash drying</i> (KMFD).....	99
Figura 5.2. Diagrama esquemático do perfil pressão x tempo para as diferentes taxas de redução da pressão estudadas.....	100
Figura 5.3. Evolução do teor de umidade das amostras de bananas secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.....	102
Figura 5.4. Contribuição condutiva e <i>flash</i> para as amostras de banana secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.....	104
Figura 5.5. Densidade aparente das amostras de bananas <i>in natura</i> e das amostras secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.....	105
Figura 5.6. Porosidades das amostras <i>in natura</i> e das amostras de bananas secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.....	107
Figura 5.7. Encolhimento das amostras de bananas secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.....	108
Figura 5.8. Curvas força x deformação obtidas nos testes mecânicos das amostras secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD) utilizando diferentes.....	109
Figura 5.9. Imagens de microscopia eletrônica de varredura das amostras secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema (aumento de 20X e 50X)	110
Figura 5.10. Imagens das amostras secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.....	111

Figura 6.1. Isotermas de sorção de umidade a 25 °C para amostras de banana secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD), <i>conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).....	119
Figura 6.2. Temperatura de transição vítrea experimental e ajustada pelo modelo de Gordon-Taylor para amostras de banana secas por diferentes técnicas, equilibrada em soluções salinas à 25°C.....	122
Figura 6.3. Temperatura de transição vítrea experimental e ajustada pelo modelo proposto por Roos (1987) para amostras de banana secas por diferentes técnicas, equilibrada em soluções salinas à 25°C.....	124
Figura 6.4. Temperatura de transição vítrea, T_g , em função da atividade de água, a_w , e isoterma de sorção de umidade, a 25 °C, de amostras de banana secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD). Pontos experimentais: (●) isoterma de sorção de umidade e (●) as temperaturas de transição vítrea.....	126
Figura 6.5. Temperatura de transição vítrea, T_g , em função da atividade de água, a_w , e isoterma de sorção de umidade, a 25 °C, de amostras de banana secas por <i>conductive multi-flash drying</i> seguido de uma secagem a vácuo (KMFD_VD). Pontos experimentais: (●) isoterma de sorção de umidade e (●) as temperaturas de transição vítrea.....	127
Figura 6.6. Temperatura de transição vítrea, T_g , em função da atividade de água, a_w , e isoterma de sorção de umidade, a 25 °C, de amostras de banana secas em estufa a vácuo a 60 °C (VD). Pontos experimentais: (●) isoterma de sorção de umidade e (●) as temperaturas de transição vítrea.....	127
Figura 6.7. Temperatura de transição vítrea, T_g , em função da atividade de água, a_w , e isoterma de sorção de umidade, a 25 °C, de amostras de banana secas em estufa com ar quente a 60 °C (CD). Pontos experimentais: (●) isoterma de sorção de umidade e (●) as temperaturas de transição vítrea.....	128
Figura 6.8. Fotografia das para amostras de banana secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD), <i>conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Composição química aproximada da banana prata madura.....	38
Tabela 3.1. Propriedades estruturais das amostras de banana desidratadas por KMFD com temperaturas de aquecimento de 90 °C e 80 °C e desidratadas por KMFD_VD (80 °C).....	75
Tabela 4.1. Propriedades físico-químicas das amostras de banana <i>in natura</i>	85
Tabela 6.1. Atividade de água de soluções salinas saturadas.....	83
Tabela 6.2. Resultados dos ajustes dos modelos das isotermas de sorção de amostras de banana secas por diferentes técnicas.....	116
Tabela 6.3. Resultados dos ajustes do modelo de Gordon-Taylor aos dados experimentais de temperaturas de transição de vítrea de amostras de banana desidratadas.....	123
Tabela 6.4. Resultados dos ajustes do modelo linear aos dados experimentais de temperaturas de transição de vítrea de amostras de banana desidratadas.....	125
Tabela 6.5. Parâmetros de cor das amostras <i>in natura</i> e das amostras secas por <i>conductive multi-flash drying</i> (KMFD), <i>conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).....	129

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Δm_w	Perda de massa (kg)
c	Calor específico médio do produto no intervalo de temperaturas de trabalho ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
m_p	Massa inicial do produto (kg),
ΔT	Redução da temperatura do material durante a aplicação do vácuo ($^\circ\text{C}$)
ΔH_v	Entalpia específica de vaporização da água na pressão final de trabalho (kJ kg^{-1})
$(P_w^v)_{si}$	Pressão de vapor do sistema
P_w^v	Pressão de vapor da água pura
α	Coefficiente de expansão
a^*	Parâmetro relacionado a cor verde negativo à cor vermelha positivo
A, B e C	Parâmetros da equação de Antoine
a_w	Atividade de água
b^*	Parâmetro relacionado a cor azul negativo à cor amarela positivo
<i>BET</i>	Brunauer-Emmett-Teller
c	Constante de GAB relacionada à energia de interação das moléculas na monocamada
c^*	Croma fornece uma medida da intensidade ou saturação da cor
CAPV	Secagem por sucessivos ciclos de aquecimento- pulso de vácuo
CD	Secagem com ar quente
CMFD	<i>Convective multi-flash drying process</i>
CNNPA	Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos
C_p	Capacidade calorífica
DIC	<i>Détente instantanée crôntolée</i>
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
dx/dt	Taxa de secagem
FAO	<i>Food and Agricultural Organization</i>
FAOSTAT	Divisão de estatística da FAO
G	Energia livre
<i>GAB</i>	Guggenheim - Anderson – Boer
H	Entalpia (kJ kg^{-1})

H	Parâmetro relacionado à tonalidade à cor vermelha (0°), à cor amarela (90°), à cor verde (180°) e à cor azul (360°)
HTST	<i>High temperature and short time</i>
K	Constante de GAB relacionada à energia de interação das moléculas adsorvidas na multicamada
K	Parâmetro do modelo de Gordon-Taylor
KMDF_VD	Conductive multi-flash drying seguido por um período de secagem a vácuo
KMFD	<i>Conductive multi-flash drying</i>
L*	Parâmetro relacionado a luminosidade variando de preto a branco
m_{ap}	Massa de sólidos somada a massa de ar das amostras (m ³)
m_c	Massa da amostra no ar (g)
$m_{c,b}$	Massa da amostra mais a massa da cesta no ar (g)
$m_{c,b,h}$	Massa da amostra mais a massa da cesta imersa em n-heptano (g)
$m_{c,h}$	Massa da amostra imersa em n-heptano (g)
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
m/m	Massa por massa
m_r	Massa de sólidos (kg)
P	Pressão (mbar)
R ²	Coefficiente de correlação
S_b	Encolhimento (%)
T	Tempo (s)
T	Temperatura (° C)
T_g	Temperatura de transição vítrea (° C)
T_{gs}	Temperatura de transição vítrea do sólido (° C)
T_{gw}	Temperatura de transição vítrea da água
T_m	Temperatura de fusão (° C)
UR	Umidade relativa (%)
V	Volume (m ³)
V_{ap}	Volume aparente da amostra (m ³).
V_{ap0}	Volume aparente inicial
VD	Secagem a vácuo clássica
V_r	Volume real das amostras (m ³)
V_v	Volume de vazios no interior da amostra seca (m ³)
X	Teor de umidade (g g ⁻¹)
X_{eq}	Teor de umidade de equilíbrio (g g ⁻¹)
X_m	Teor de umidade na monocamada (g g ⁻¹)

x_w	Teor de umidade da amostra (g g^{-1})
Y e Z	Parâmetros do modelo proposto por Roos (1987)
ΔP	Taxa de redução de pressão (mbar s^{-1})
ε	Porosidade (%)
η	Viscosidade (Pa s)
ρ_{ap}	Massa específica aparente das amostras (kg. m^{-3})
ρ_r	Massa específica das amostras (kg. m^{-3})
ρ_s	Massa específica do solvente n-heptano (kg. m^{-3})

SUMÁRIO

1. Introdução.....	33
2. Revisão Bibliográfica	37
2.1 Banana (<i>Musa spp.</i>)	37
2.1.1 Produção.....	37
2.1.2 Banana Prata (<i>Musa sapientum L.</i>).....	37
2.1.3 Banana Passa	39
2.2 Secagem de Alimentos.....	40
2.2.1 Secagem Convectiva.....	40
2.2.2 Secagem Solar	42
2.2.3 Secagem a Vácuo	43
2.2.4 Liofilização.....	44
2.2.5 <i>Puff drying</i>.....	44
2.2.6 Secagem por sucessivos ciclos de aquecimento- pulso de vácuo (CAPV)	45
2.3 Microestrutura de Alimentos	47
2.4 Porosidade e Encolhimento	48
2.5 Teor de Umidade e Atividade de Água (a_w)	50
2.6 Isotermas de Sorção de Umidade.....	52
2.7 Transição de Fase em Alimentos e Transição Vítre.....	54
2.8 Diagramas de estado	56
3. Estudo das variáveis de processo na evolução do teor de umidade, microestrutura e propriedades de textura de banana desidratada por KMFD (<i>Conductive multi-flash drying</i>).....	59
3.2 Material e Métodos.....	60

3.2.1	Preparação das amostras.....	60
3.2.2	Avaliação da influência das variáveis de processo na aplicação da técnica de KMFD (<i>Conductive multi-flash drying</i>).....	61
3.2.3	Descrição do equipamento utilizado para a <i>Conductive multi-flash drying</i> (KMFD) e para a <i>Conductive multi-flash drying</i> seguida por um período de secagem a vácuo (KMFD_VD).....	61
3.2.3.1	<i>Conductive multi-flash drying</i> (KMFD).....	63
3.2.3.2	<i>Conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD).....	64
3.2.4	Caracterização do produto final desidratado.....	65
3.2.4.1	Teor de umidade e atividade de água (a_w)	65
3.2.4.2	Determinação das propriedades mecânicas de textura.....	65
3.2.4.3	Volume real e aparente, porosidade acessível e encolhimento.....	66
3.3	Resultados e Discussão.....	69
3.4	Considerações parciais	77
4.	Estudo da influência do método de secagem na microestrutura e propriedades de textura de banana (var.prata)	79
4.1	Introdução	79
4.2	Material e Métodos	81
4.2.1	Preparação das amostras.....	81
4.2.2	Secagem.....	81
4.2.2.1	Descrição do equipamento utilizado para a <i>Conductive multi-flash drying</i> (KMFD) e para a <i>Conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD)	81
4.2.2.2	<i>Conductive multi-flash drying</i> (KMFD)	81
4.2.2.3	<i>Conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD).....	82
4.2.2.4	Secagem convectiva (CD)	82
4.2.2.5	Secagem a vácuo (VD)	83
4.2.3	Determinações experimentais	83

4.2.3.1 Densidade aparente e real, porosidade acessível e encolhimento.....	83
4.2.3.2 Teor de umidade.....	83
4.2.3.3 Atividade de água (a_w).....	83
4.2.4 Mudanças microestruturais.....	83
4.2.4.1 Preparo das amostras.....	83
4.2.4.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	84
4.2.5 Testes mecânicos.....	84
4.2.6 Densidade Aparente	85
4.2.7 Porosidade acessível das amostras durante a secagem	87
4.2.8 Encolhimento	88
4.2.9 Testes mecânicos.....	89
4.2.10 Microscopia eletrônica de varredura das amostras de banana.....	91
4.3 Considerações parciais.....	96
5. Estudo da influência de diferentes taxas de redução da pressão do sistema durante a secagem por <i>Conductive multi-flash drying</i> (KMFD) nas propriedades estruturais e de textura do produto desidratado.....	97
5.1 Introdução.....	97
5.2 Material e Métodos.....	98
5.2.1 Preparação das amostras.....	98
5.2.2 Secagem.....	98
5.2.2.1 <i>Conductive multi-flash drying</i> (KMFD).....	98
5.2.3 Parâmetros de qualidade do produto final desidratado	100
5.2.3.1 Teor de umidade.....	100
5.2.3.2 Determinação das propriedades mecânicas	100
5.2.3.3 Volume real e aparente, porosidade acessível e encolhimento.....	101
5.2.3.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	101
5.3 Resultados e discussão	11801

5.4 Considerações parciais.....	111
6. Estudo da capacidade de sorção de umidade e da temperatura de transição vítrea de amostras de banana secas por KMFD, KMFD_VD, secas convectivamente (CD) e secas a vácuo (VD).....	113
6.1 Introdução	113
6.2 Material e Métodos	114
6.2.1 Preparação das amostras.....	114
6.2.2 Secagem.....	114
6.2.2.1 Conductive multi-flash drying (KMFD)	115
6.2.2.2 <i>Conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD).....	115
6.2.2.3 Secagem convectiva (CD)	115
6.2.2.4 Secagem a vácuo (VD)	115
6.2.3 Isotermas de sorção de umidade.....	115
6.2.4 Temperatura de transição vítrea	116
6.2.4.1 Preparação da fruta seca.....	116
6.2.4.2 Condições dos ensaios de calorimetria diferencial de varredura (DSC).....	117
6.2.4.3 Representação matemática dos dados experimentais da temperatura de transição vítrea (T_g).....	117
6.2.5 Análise de cor	117
6.3 Resultados e discussão	118
6.3.1 Isotermas de sorção de umidade.....	118
6.3.2 Temperatura de transição vítrea (T_g)	120
6.3.3 Influência da atividade de água e do teor de umidade na temperatura de transição vítrea (T_g).....	125
6.3.4 Análise das alterações de cor.....	129
6.4 Considerações parciais	131
7. Conclusões	133

Diagrama Conceitual da Tese: “Controle da microestrutura e textura na desidratação de banana usando ciclos de aquecimento-pulso de vácuo”

Por quê?

- Para desenvolver bananas desidratadas com microestrutura e propriedades de textura controladas.
- Para desenvolver novos produtos.
- Para agregar valor à frutas desidratadas.

O que já está sendo feito?

Frutas desidratadas podem ser obtidas por diferentes técnicas de secagem, *puff drying*, liofilização, HTST, entre outras. Algumas dessas técnicas necessitam de longos tempos de secagem e em alguns casos, do uso de altas pressões e temperaturas, o que acarreta em modificações indesejáveis de textura, perdas nutricionais e sensoriais e elevados custos operacionais.

Como?

Tecnologia de secagem por KMFD (*Conductive-multi-flash drying*)

Diferentes temperaturas na câmara de secagem, com aquecimento por condução

Aplicação de vários ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.

- Aplicação de diferentes taxas de redução da pressão do sistema.

Hipótese da pesquisa

É possível controlar as propriedades de textura e a microestrutura de bananas desidratadas pela modificação das variáveis de processo do KMFD e pelo teor de umidade final do produto desidratado.

Metodologia científica - Influência de diferentes variáveis de processo

Processo KMFD (*Conductive-multi-flash drying*)

- Aquecimento condutivo (diferentes temperaturas).
- Diferentes números de pulsos aplicados.
- Diferentes taxas de redução de pressão do sistema.

Respostas – Caracterização das frutas durante o processo de desidratação e do produto desidratado final

- Teor de umidade
- Atividade de água
- Textura em função do teor de umidade do produto
- Microscopia eletrônica de varredura (MEV)
- Densidade aparente
- Porosidade
- Encolhimento
- Isotermas de sorção de umidade
- Temperatura de transição vítrea

Capítulo 1

1. Introdução

A exigência dos consumidores tem aumentado e produtos que preservem ao máximo suas características originais estão sendo preferidos. Em nível industrial, isso significa o desenvolvimento de operações que minimizem os efeitos adversos do processamento (GUINÉ, 2006; CANO-CHAUCA et al., 2004). As frutas e vegetais caracterizam-se pelo alto teor de umidade, o que os torna altamente perecíveis. A secagem é uma técnica eficiente de conservação desses alimentos, pela significativa redução da atividade da água, inibindo assim o crescimento microbiano e modificações enzimáticas indesejáveis. Além disso, facilita as operações de manipulação, armazenagem e transporte, uma vez que a massa e o volume são significativamente reduzidos (BARBOSA-CÁNOVAS e VEJA-MERCADO, 2000). A tendência para produtos secos com alta qualidade implica em maiores investimentos e custos operacionais, através de secadores mais onerosos ou empregando processos com baixas temperaturas, com o objetivo de preservar a qualidade do produto original (HO et al., 2002).

O encolhimento sofrido pelo produto é umas das principais mudanças físicas que ocorre durante a secagem. A perda de água e o aquecimento causam tensões na estrutura celular dos alimentos, ocasionando mudanças em sua forma e dimensão (MAYOR e SERENO, 2004). O encolhimento é uma consequência negativa sobre a qualidade do produto desidratado. Alterações na forma e a perda de volume causam um aumento da dureza, e na maioria dos casos, uma impressão negativa ao consumidor. Há, por outro lado, alguns produtos desidratados que possuem um aspecto naturalmente enrugado, um requisito de qualidade para o consumidor, como ameixas secas, damascos e uvas passas (MAYOR e SERENO, 2004).

Diversas técnicas de secagem têm sido empregadas na produção de frutas e vegetais desidratados com maior porosidade e menor encolhimento. A técnica de secagem por liofilização consiste na sublimação da água congelada a baixas temperaturas, sob vácuo. Alimentos liofilizados são produtos com alto valor agregado, pois retêm grande parte de seus nutrientes originais, uma vez que emprega baixas temperaturas em seu processamento (GEANKOPLIS, 2003; VIEIRA et al., 2012). Existem nesse processo algumas desvantagens, como os custos

com o equipamento e com a energia consumida para congelar o produto e para condensar os vapores produzidos pela sublimação do gelo, além do longo tempo de processamento. Outra técnica que reivindica a capacidade de produzir frutas e vegetais com pouco encolhimento e com alta qualidade é o DIC (*Détente instantanée crôntolée*) (LOUKA e ALLAF, 2002). O DIC é baseado na auto-evaporação da umidade. O produto é submetido a uma pré-secagem, posteriormente é aquecido a altas pressões e uma descompressão controlada do sistema é realizada, produzindo um produto seco e crocante (LOUKA e ALLAF, 2002; LOUKA et al., 2004). No entanto, não fica clara a diferença entre essa técnica e o que se convencionou denominar de *puff-drying* (secagem por “explosão”).

A secagem por KMFD (*conductive multi-flash drying*) é direcionada a resolver os inconvenientes das operações de secagem tradicionais, as quais geram produtos que não apresentam características visuais ou sensoriais agradáveis ao consumidor, ou quando as apresentam, são obtidas através de processos longos e onerosos. Dessa maneira, as frutas e hortaliças desidratadas através desta técnica apresentam baixo teor de umidade e atividade de água, textura crocante (semelhante aos produtos liofilizados) e alta taxa de reidratação (LAURINDO, 2011; ZOTARELLI et al., 2012).

Nesse sentido, o objetivo desse trabalho é desenvolver e avaliar frutas desidratadas com propriedades de textura e microestrutura controladas, desenvolvendo novos produtos e agregando valor.

Os objetivos específicos são:

- Investigar uma alternativa de aquecimento das frutas (bananas, var. Prata), usando a transferência de calor por condução, através do contato de fatias de frutas diretamente com uma placa aquecida.
- Analisar a influência de diferentes métodos de secagem na formação e no comportamento da microestrutura de bananas (var. Prata) e nas propriedades mecânicas de textura resultantes;
- Analisar o comportamento da microestrutural do produto desidratado obtido pela técnica de KMFD (*Conductive multi-flash drying*) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema;
- Analisar a capacidade de sorção de umidade, a temperatura de transição vítrea e a cor de amostras de banana desidratadas pelos processos de KMFD, KMFD_VD, (CD) e (VD);

Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado de maneira que os conteúdos abordados tenham uma sequência lógica. Desta maneira os capítulos foram divididos da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.

Capítulo 3 – Estudo das variáveis de processo na evolução do teor de umidade, microestrutura e propriedades de textura de banana desidratada por KMFD (*Conductive multi-flash drying*).

Capítulo 4 – Estudo da influência do método de secagem na microestrutura e propriedades de textura de banana (var.prata).

Capítulo 5 – Estudo da influência de diferentes taxas de redução da pressão do sistema durante a secagem por *Conductive multi-flash drying* (KMFD) nas propriedades estruturais e de textura do produto desidratado.

Capítulo 6 – Estudo da capacidade de sorção de umidade e da temperatura de transição vítrea de amostras de banana secas por KMFD, KMFD_VD, secas convectivamente (CD) e secas a vácuo (VD).

Capítulo 7 – Conclusões.

Capítulo 2

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Banana (*Musa spp.*)

2.1.1 Produção

A banana (*Musa spp.*) é uma das frutas mais consumidas no mundo, sendo explorada na maioria dos países tropicais (ALVES, 1999). Segundo dados da FAOSTAT (2013), em 2011 a produção mundial de bananas chegou a 106 milhões de toneladas, sendo o Brasil responsável por aproximadamente 7% desta produção.

Depois da laranja, a banana é uma das frutíferas mais cultivada no Brasil. Além do expressivo volume produzido e da área ocupada, a banana possui importância no cenário nacional, por estar presente na mesa da maioria dos consumidores. O mercado nacional é o 12º maior consumidor mundial dessa fruta. Segundo a FAO (2013), o consumo nacional tem aumentado gradativamente nos últimos anos, alcançando aproximadamente 31 kg/habitante/ano em 2011. O seu consumo cresce a cada ano, graças ao empenho do setor produtivo que atua na qualificação da produção e do setor mercadológico, envolvendo aspectos de apresentação, embalagem, bem como de divulgação dos benefícios gerados para o consumidor. A banana faz parte dos hábitos alimentares das populações mais carentes, devido a seu baixo custo e alta disponibilidade de calorias (87 kcal/100g). No entanto, a banana é também uma boa fonte de minerais como potássio e magnésio (WALL, 2006).

As exportações de banana são pouco expressivas em relação ao consumo interno. Os Estados das Regiões Sul e Sudeste vendem a maior parte de suas produções para os países do MERCOSUL, principalmente para os mercados argentino e uruguaio, enquanto os estados do nordeste, especialmente o Rio Grande do Norte e o Ceará, têm tido a participação crescente no mercado europeu.

O Estado de São Paulo se destaca no cenário nacional como o maior produtor de banana. Na safra de 2011 foi responsável por aproximadamente 18% do total produzido, seguido pelo Estado da Bahia, com 16%; Santa Catarina, com 10%; Minas Gerais, com 9%; Pará, com 8%; Pernambuco, com 7% e Ceará, com 7% (EPAGRI-SC, 2014). Esses

estados, juntos, perfazem aproximadamente 75% do volume total produzido.

2.1.2 Banana Prata (*Musa sapientum L.*)

A banana Prata foi introduzida no Brasil pelos portugueses, e por essa razão os brasileiros, especialmente os nordestinos e nortistas, manifestam uma clara e constante preferência pelo seu sabor. Essa variedade apresenta frutos pequenos, de sabor doce e suavemente ácido (SEBASTIÃO et al., 2004). São frutos de seção transversal pentagonal, com cinco quinhas bem visíveis, de tamanho médio, com 10 a 13 cm de comprimento e 3,5 a 4 cm de diâmetro, com extremidade bem anunciada, pontuda, sem restos florais (MEDINA, et al., 1995). A casca do fruto é fina, de cor amarelo-esverdeada, a polpa é creme-rósea-pálida, excelente para o consumo *in natura* (MANICA, 1997).

A composição química geral da porção comestível da banana prata, com ênfase em seu valor nutricional, está apresentada na tabela 2.1, segundo alguns dados reportados na literatura (MEDINA et al., 1995; NEPA, 2011).

Tabela 2.1- Composição química aproximada da banana prata madura.

Constituinte	Referências	
	Medina et al., 1995*	NEPA, 2011**
Umidade (%)	73,79	71,9
Amido (%)	2,91	--
Açúcares Totais (%)	20,58	--
Lipídios (%)	0,13	0,1
Proteínas (%)	1,43	1,3
Fibras (%)	0,21	2
Cinzas (%)	0,84	0,8

* em 100g de polpa madura fresca

** em 100g da fruta madura

Segundo Medina et al. (1995), 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 (cerca de 20%) que, durante a maturação, se converte, através das amilases, em

açúcares. A porcentagem de amido na banana completamente madura é bem mais baixa, situando-se em torno de 0,5% a 2%.

2.1.3 Banana Passa

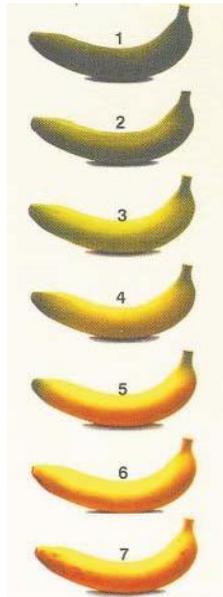
Segundo a resolução-CNNPA (Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos) n° 12, 1978, a banana passa é um produto obtido pela eliminação parcial da água da fruta madura, inteira ou em pedaços, por processos tecnológicos adequados. O produto deve ser processado com frutas sãs e limpas, isentas de matéria terrosa, parasitas e de detritos animais e vegetais. Não deve conter substâncias estranhas à sua composição normal, ou mesmo apresentar fermentações, que indicariam produto em decomposição. O único controle físico-químico estabelecido é o teor de umidade, que deve ser no máximo igual a 25% m/m.

Geralmente são utilizadas as bananas dos tipos nanica ou nanicão. O produto obtido é de coloração escura, consistência firme e sabor pouco persistente de banana (LIMA et al., 2000). A banana seca ou passa caracteriza-se por um elevado teor de açúcares (MEDINA et al., 1995).

Apesar da fabricação desse produto ser importante, com o objetivo de reduzir perdas e agregar valor, a escolha da matéria-prima é importante, pois dela vai depender a qualidade do produto final (MEDINA et al., 1995). É adotada uma escala de coloração da casca como indicativo de maturação dos frutos: 1) totalmente verde; 2) verde com traços amarelos; 3) mais verde do que amarelo; 4) mais amarelo do que verde; 5) amarelo com ponta verde; 6) totalmente amarelo; 7) amarelo com manchas marrons (MEDINA e PEREIRA, 2004). As amostras utilizadas para a produção de banana passa devem possuir amadurecimento adequado, uniforme e com nível de maturação 7 (MEDINA et al., 1995). Essa escala é ilustrada na figura 2.1.

A secagem mais comumente utilizada pela indústria é por meio do ar quente, em secadores tipo túnel. A temperatura ideal de secagem, tendo em conta os fatores qualidade, cor do produto, velocidade de secagem e condições atmosféricas ambientais, é 70 °C. O tempo de secagem é de cerca de 12 a 16 horas, quando a umidade relativa ambiente se situa entre 70 a 90% (MARTIN et al. 1985 apud ALVES, 1999).

Figura 2.1. Evolução da coloração amarela da casca de banana durante o amadurecimento (MEDINA e PEREIRA, 2004).



2.2 Secagem de Alimentos

Sabe-se que o objetivo principal da secagem é a remoção de água de um produto através da evaporação, sendo necessária a utilização de uma fonte de calor para evaporar a umidade do produto, através de um meio de secagem externo (geralmente o ar). Desta forma, para produtos agrícolas e alimentícios, a secagem é utilizada para preservação, permitindo também o transporte sem necessidade de refrigeração. Apresentam-se a seguir algumas técnicas de desidratação.

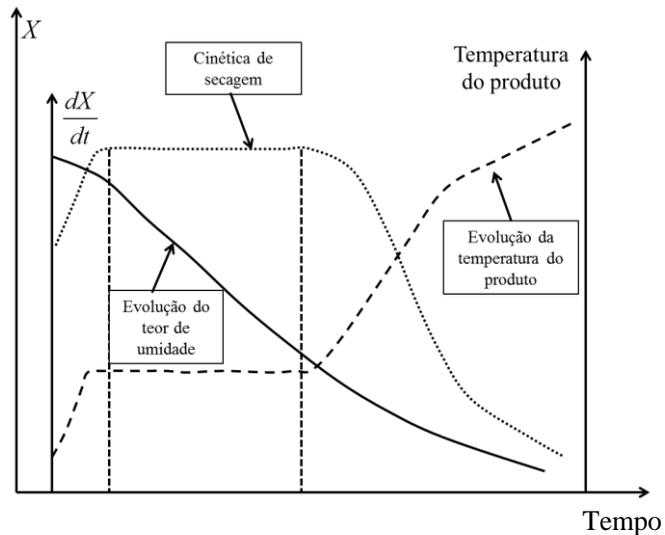
2.2.1 Secagem Convectiva

A secagem convectiva pode ser definida como o processo de remoção de voláteis (água) através do uso de energia térmica para se obter um produto sólido (KEEY, 1975; MUJUMDAR e MENON, 1995). O processo é caracterizado pela transferência simultânea de calor e massa

(HELDMAN e LUND, 2007) entre o ar de secagem e o produto sendo desidratado. A transferência de calor do ambiente para o sólido causa a evaporação da umidade superficial, enquanto que, a transferência de massa é a migração de umidade do interior do produto para a superfície externa e sua posterior evaporação, devido ao primeiro mecanismo (MUJUMDAR e MENON, 1995). A transferência de energia na forma de calor, a partir do ambiente circundante, para o sólido úmido pode ocorrer como resultado de convecção, condução e radiação, ou como a combinação destes mecanismos.

Na figura 2.2 são representadas uma curva típica de secagem, a curva da taxa de secagem, obtida da primeira e a evolução da temperatura do produto durante o processo.

Figura 2.2. Curvas típicas de secagem.



A curva de secagem (evolução do teor de umidade) representa a diminuição do teor de umidade (X , em base seca) do produto durante a secagem (t), isto é, a curva que é obtida pela diferença entre as massas do produto durante o processo, a dadas condições de secagem (temperatura, UR, velocidade do ar). A curva de cinética de secagem representa a velocidade (taxa) de secagem do produto, dX/dt , em relação ao tempo (t)

de processo, isto é, a curva obtida diferenciando a curva de secagem em relação ao tempo. A curva de evolução da temperatura do produto representa a variação da temperatura do produto durante a secagem.

Nas operações de secagem de produtos com umidade inicial elevada, três etapas podem ser identificadas. Na primeira, denominada de período de acomodação, a superfície do produto está mais fria que o ar e, portanto, sua temperatura eleva-se rapidamente. Após essa acomodação, inicia-se o primeiro período de secagem ou período de secagem a taxa constante, a remoção de umidade se dá à taxa constante. Esse período de secagem continua enquanto a umidade interna do produto é transportada para a superfície na mesma velocidade com que ocorre a evaporação na superfície. Assim, a taxa de secagem neste período depende unicamente da taxa de transferência de calor para a superfície do material que está sendo seco (FELLOWS, 2000; PARK et al., 2002). O mecanismo do deslocamento do líquido, e por isso a velocidade deste movimento, varia acentuadamente com a própria estrutura do sólido. Nos sólidos que possuem espaços vazios e abertos, o movimento será, possivelmente, controlado pelo mecanismo de capilaridade (tensão superficial) e, em menor importância, pelas forças de gravidade (desprezíveis, em alimentos). Nos sólidos com estruturas fibrosas e amorfas, o movimento do líquido ocorre por difusão através do sólido. Desde que, as taxas de difusão sejam menores que o escoamento por gravidade ou capilaridade, os sólidos nos quais a difusão controla o movimento do líquido tendem a ter períodos à taxa constante mais curtos, ou mesmo a secarem sem que haja esse período (FOUST et al., 1980).

No último período da secagem, denominado de período de secagem à taxa decrescente, a superfície fica gradualmente mais seca (com pouca água livre), pois a velocidade do movimento do líquido para a superfície é menor que a velocidade com que a água é evaporada da superfície (FOUST et al., 1980). O movimento da água no sólido pode ocorrer por diferentes mecanismos, como difusão do líquido devido a gradientes de concentração, difusão do vapor devido a gradientes de pressão parcial de vapor e o movimento do líquido por forças capilares (BARBOSA-CÁNOVAS e VEJA-MERCADO, 2000).

2.2.2 Secagem Solar

A secagem solar tem sido utilizada, há séculos, como meio de preservação de produtos agrícolas. No entanto, muitas limitações

dificultam a produção em escala industrial (IMRE, 2006). Chuva e nebulosidade, contaminação por poeira, insetos, pássaros e outros animais, falta de controle sobre as condições de secagem e possibilidade de deteriorações químicas, enzimáticas e microbiológicas, devido aos longos tempos de secagem, são algumas dessas limitações (JAYARAMAN e GUPTA, 2006). A temperatura do produto durante a secagem varia de 5 ° a 15 °C acima da temperatura ambiente, e o tempo de secagem pode se estender até 4 semanas. Forma e as condições iniciais e finais do teor de umidade influenciam no tempo de secagem (SOKHANSANJ e JAYAS, 2006).

Apesar de suas limitações, a secagem solar é muito utilizada em países como a Turquia e Índia, entre outros, onde o tradicional consumo de frutas secas faz parte da cultura das populações. Entre as vantagens da secagem solar, pode-se citar o baixo custo, não ser poluente e possuir uma fonte de energia renovável e abundante (IMRE, 2006).

2.2.3 Secagem a Vácuo

A técnica de secagem a vácuo consiste em secar o produto utilizando a combinação de aquecimento e vácuo. A transferência de calor se dá por condução e radiação, ou seja, o calor é transportado da placa de aquecimento para a bandeja contendo o alimento por condução, sendo que o alimento também é submetido à transferência de calor por radiação proveniente das paredes da câmara de vácuo e de placas aquecidas, em alguns casos. Na secagem a vácuo, com a diminuição da pressão do sistema, o ponto de ebulição da água é reduzido abaixo de 100°C. A redução da pressão do sistema e a temperatura de secagem a serem usadas dependem da sensibilidade do material (SOKHANSANJ e JAYAS, 2006). Dentro dos vários métodos de secagem, a secagem a vácuo é utilizada por ser um método intermediário entre a secagem tradicional e a liofilização, pois permite trabalhar a pressões baixas, com temperaturas moderadas (menores que 100°C), obtendo-se maiores taxas de evaporação da umidade e um produto final de melhor qualidade, se comparado com a secagem tradicional com ar quente (KOMPANY et al., 1990; KROKIDA et al., 1998).

2.2.4 Liofilização

A liofilização é um processo baseado na desidratação por sublimação do produto congelado (RATTI, 2001). Esta técnica consiste em congelar o produto rapidamente, submetendo o material congelado, ao fornecimento de calor sob vácuo, ocasionando a desidratação do produto até aproximadamente 2% de umidade (CAVALCANTI-MATA et al., 2005). Esse processo é reconhecido como eficaz na preservação das características sensoriais e nutricionais dos produtos, que são considerados de qualidade superior em relação aos produtos obtidos por meio de técnicas convencionais (KROKIDA et al., 1998). Devido a ausência de água líquida no produto e às baixas temperaturas necessárias para o processo, à maioria de reações de degradação e microbiológicas são reduzidas, conferindo excelente qualidade ao produto final (RATTI, 2001). O estado sólido da água durante o processo de liofilização protege a estrutura e minimiza mudanças na forma do produto, causando o mínimo encolhimento (RATTI, 2001). Pelas razões expostas, a liofilização tem sido usada como uma alternativa para conservar carnes, hortaliças e frutas susceptíveis a reações de escurecimento ou que contenham grandes quantidades de vitaminas termossensíveis ou de compostos voláteis (BARBOSA-CÁNOVAS e VEJA-MERCADO, 2000).

Apesar de a liofilização proporcionar um produto desidratado de qualidade superior, o método ainda é muito caro, o que limita sua utilização industrial. Deste modo, o uso de liofilização pela indústria de alimentos é normalmente restrito para produtos de alto valor agregado, tais como café, algumas frutas e legumes crocantes, alguns ingredientes prontos para comer e ervas aromáticas (PAN et al., 2008).

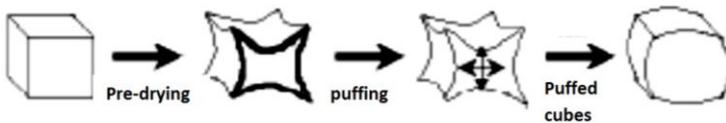
2.2.5 Puff drying

A qualidade de muitos produtos desidratados está ligada à manutenção de sua estrutura porosa e do volume original do produto *in natura*. Encolhimento e endurecimento são resultado do colapso da estrutura original, que afeta os parâmetros de textura e a capacidade de reidratação (KARATHANOS e SARAVACOS, 1993). Para evitar o colapso da estrutura rígida, a temperatura de secagem utilizada deve ser menor que a temperatura de transição vítrea do produto. Isso é possível durante a liofilização, devido às baixas temperaturas utilizadas. Na liofilização, os cristais de gelo sublimam sem colapsar o produto seco. O

produto final apresenta uma estrutura porosa, que facilita a reidratação (BARBOSA- CANOVAS e VEGA-MERCADO, 1996). Entretanto, a liofilização é um processo lento e caro, como discutido anteriormente.

Uma alternativa menos onerosa é o método de *puffing*, que produz produtos porosos com estrutura semelhante a dos produtos liofilizados. *Puffing* é a liberação ou expansão do gás ou vapor inerte do produto provocando uma expansão com rupturas na estrutura do produto (PAYNE et al., 1989). Na figura 2.3 está representado o mecanismo do *puff-drying* antecedido de uma pré-secagem. Esta técnica, incorporada à secagem convencional com ar quente, foi desenvolvida para produzir alimentos semelhantes aos liofilizados.

Figura 2.3. Mecanismo do *puffing* antecedido de secagem (VARNALLIS et al., 2001).



2.2.6 Secagem por sucessivos ciclos de aquecimento- pulso de vácuo (CAPV)

A secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo é apresentada no documento de patente PI107173-7 depositado por Laurindo, Porciuncula e Zotarelli (2011) e em Zotarelli et al. (2012). O princípio do processo de secagem é termo-mecânico, baseado no sucessivo aquecimento à pressão atmosférica das amostras, seguido de uma descompressão instantânea do sistema para a obtenção de produtos (alimentos) crocantes, com baixos teores de umidade e atividade de água.

Se alimentos úmidos e porosos são submetidos à redução da pressão, parte da água interna dos alimentos evapora, resfriando o alimento a uma temperatura tão baixa quanto a temperatura de saturação da água na pressão aplicada. Os alimentos possuem água e sólidos na sua composição, de modo que o fluido refrigerante associado ao resfriamento a vácuo não é água pura, mas uma solução de sais e açúcares (WANG e SUN, 2001). Sempre que uma porção de líquido evapora, uma quantidade de calor igual ao calor latente de evaporação deve ser absorvido pela parte

evaporada, resultando em redução da temperatura do produto (DOSSAT, 1991 apud WANG e SUN, 2001). A quantidade de vapor gerado é dependente da diferença de temperatura entre as duas etapas (antes e após a aplicação do vácuo). É essa evaporação a baixas pressões que causa a formação da estrutura porosa do alimento. A manutenção dessa estrutura depende do seu endurecimento, que é dependente da temperatura e do teor de água do produto (LOUKA e ALLAF, 2002).

O aquecimento das amostras, secas por CAPV, pode ocorrer por condução, convecção, radiação térmica, além do aquecimento por micro-ondas, ou pela presença simultânea de algumas delas (LAURINDO, 2011). Zotarelli et al. (2012) secaram amostras de bananas e mangas pela técnica de sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. Os autores utilizaram ar quente como principal fonte de aquecimento das amostras, mas as transferências de calor por condução e radiação também estavam presentes, devido à circulação de água quente na camisa do secador. A técnica foi denominada *Convective multi-flash drying* (CMFD). O produto final desidratado apresentou baixo teor de umidade e atividade de água e textura crocante

A quantidade de água evaporada do produto (perda de massa) durante a aplicação do pulso de vácuo (resfriamento a vácuo) é dada pela Equação 2.1, que é resultado de um simples balanço de energia.

$$\Delta m_w = \frac{c \cdot m_p \cdot \Delta T}{\Delta H_v} \quad (2.1)$$

em que:

- Δm_w é a perda de massa (kg),
- c é o calor específico médio do produto no intervalo de temperaturas de trabalho ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$),
- m_p é a massa inicial do produto (kg),
- ΔT é a redução da temperatura do material durante a aplicação do vácuo ($^\circ\text{C}$)
- ΔH_v é a entalpia específica de vaporização da água na pressão final de trabalho (kJ kg^{-1}).

O fenômeno de *puffing* que ocorre durante a aplicação do vácuo depende das condições de operação, como temperatura, pressão inicial e final e tempo de descompressão (LOUKA e ALLAF, 2002). Também devem ser levadas em consideração as propriedades intrínsecas do produto tratado (propriedades físicas, reológicas e termodinâmicas).

A equação de Antoine (equação 2.2) é a correlação empírica mais utilizada para a predição da pressão de vapor de saturação de uma substância pura em função da temperatura de saturação, pois descreve satisfatoriamente o comportamento da pressão (P) para um grande número de substâncias.

$$\log_{10} P = A - \frac{B}{T + C} \quad (2.2)$$

em que:

- T é a temperatura,
- P é a pressão e
- A, B, C são parâmetros tabelados para cada substância.

2.3 Microestrutura de Alimentos

A microestrutura de alimentos é definida pela organização dos seus componentes e suas interações. Durante o processamento, a microestrutura pode ser destruída e posteriormente reconstituída, resultando em uma reestruturação e reorganização (AGUILERA e STANLEY, 1999).

Ao discutir aspectos microestruturais em alimentos e sua relação com processamento, é essencial ter conhecimento básico da natureza e das propriedades do produto. Os métodos para o processamento promovem mudanças na microestrutura e afetam as propriedades do produto. Desse modo, técnicas de análise de microestrutura são necessárias para entender as relações estrutura-propriedade dos alimentos processados (AGUILERA, 2005).

Durante o processo de secagem, parte da umidade do produto é removida, ocasionando um aumento na vida útil devido à redução da

atividade de água. Para muitos autores, os parâmetros críticos da secagem são a velocidade da desidratação e a difusividade da água. Do ponto de vista do produto, as propriedades de cor, capacidade de reidratação e encolhimento são determinantes na qualidade do produto seco (AGUILERA, 2005). O encolhimento das células é o fenômeno que causa maiores modificações estruturais no produto durante o processo de secagem e está diretamente relacionado com a perda de água (RAMIREZ et al., 2012; LEWICKI e PAWLAK, 2003; RAMOS et al., 2004).

Apesar da enorme importância na qualidade dos alimentos, o encolhimento das frutas e vegetais tem sido muitas vezes estudado por medições diretas inferidas a partir de alterações nos parâmetros relacionados, tais como a porosidade e a densidade. A dificuldade nessas medições é que as alterações nas dimensões estruturais, durante a secagem não são isotrópicas. Com o uso da aquisição de imagens de qualidade e de ferramentas de análises, dados adicionais e mais específicos para o encolhimento estão disponíveis para a avaliação das propriedades estruturais de alimentos (AGUILERA, 2005). A organização estrutural desempenha um importante papel nas propriedades sensoriais, tais como cor, sabor e textura. Dentre estes atributos, o mais influenciado é a textura (AGUILERA e STANLEY, 1999). Aguilera (2005) cita como exemplo qualitativo a relação entre a força de penetração e a microestrutura de legumes cozidos.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma das técnicas mais utilizadas para análise de microestrutura. Uma camada de metal, responsável pela condutividade elétrica, é pulverizada sobre a amostra para que possa ser visualizada. Uma ampla faixa de aumento pode ser utilizada (20x-100.000x). Além disso, a MEV pode alcançar uma profundidade de campo 500 vezes maior que a microscopia ótica. Uma limitação da técnica é a necessidade de baixas pressões ($\sim 1.10^{-7}$ atm) no interior da câmara (AGUILERA e STANLEY, 1999).

2.4 Porosidade e Encolhimento

A estrutura do produto seco é fortemente dependente da natureza do material bem como as condições de secagem (MADIOULI et al., 2007). A porosidade é uma das características mais importantes que determinam a qualidade de um alimento seco e crocante. A perda de umidade que ocorre durante a secagem reduz o tamanho do tecido celular, causando o encolhimento do material. Se a redução no volume for

estritamente proporcional à perda de umidade, o encolhimento é classificado como ideal. Por outro lado, se a redução de volume é menor que o volume de água evaporada, a operação de secagem gera um aumento da porosidade do material. O fenômeno de encolhimento tem sido amplamente estudado em amostras de banana utilizando diferentes técnicas de secagem, como secagem convectiva (LIMA et al., 2002; TALLA et al., 2004), secagem com pulso HTST (HOFSETZ et al., 2007), secagem por CMFD (*convective multi-flash drying*) (ZOTARELLI et al., 2012), liofilização (KROKIDA e MAROULIS, 1997), entre outras.

A porosidade normalmente é definida como a razão entre o volume de espaços vazios no interior do produto e o seu volume total, ou seja, é a fração volumétrica de ar no interior de um produto seco, sendo definida como (RAHMAN, 1995; HII e LAW, 2010).

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_{ap}} \quad (2.3)$$

em que V_v é o volume de vazios no interior da amostra seca (m^3) e V_{ap} é o volume aparente da amostra (m^3).

A determinação da porosidade não é uma tarefa simples, uma vez que depende do conhecimento do volume real da matriz do sólido, parâmetro de difícil determinação experimental (SERENO et al., 2007). Uma das maneiras de se determinar seu valor é através do uso de picnômetros que utilizam gases como fluido de preenchimento dos espaços vazios, tendo como exemplo comum o picnômetro de hélio. Entretanto, o picnômetro de hélio usa vácuo para medir o volume de gás que penetra no meio poroso, causando a evaporação da água em produtos úmidos. Assim, não é uma técnica adequada para se medir a evolução da porosidade acessível de produtos contendo umidade, principalmente nos períodos iniciais de secagem. Sereno et al. (2007) desenvolveram um picnômetro a gás (ar) que trabalha com pressões entre $1,013 \times 10^5$ e 7×10^5 Pa, minimizando a evaporação da umidade. Deste modo, eles puderam usar o dispositivo para determinar o volume real de sólidos úmidos. Por outro lado, se a densidade aparente do material (definida como a razão entre a massa e o volume total do material) for determinada usando técnicas num fluido não molhante (heptano, por exemplo), a sua porosidade pode ser determinada pela equação 2.6.

Substituindo o termo de volume de vazios (V_v) na equação 2.3, temos:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_r}{V_{ap}} \quad (2.4)$$

em que:

- V_r é o volume real das amostras, ou seja, o volume de sólidos (m^3) e
- V_{ap} é o volume aparente da amostra (m^3).

Substituindo os volumes em termos de densidade, temos que:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\frac{m_r}{\rho_r}}{\frac{m_{ap}}{\rho_{ap}}} \quad (2.5)$$

em que:

- m_r é a massa de sólidos (kg),
- m_{ap} é a massa total (massa de sólidos somada a massa de ar) (kg),
- ρ_r é a densidade real das amostras ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) e
- ρ_{ap} é a densidade aparente das amostras ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Como a massa de ar é desprezível, os termos m_r e m_{ap} se igualam. Simplificando as massas, obtêm-se a seguinte equação:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_r} \quad (2.6)$$

2.5 Teor de Umidade e Atividade de Água (a_w)

A água é um dos principais constituintes dos alimentos, a qual afeta sua segurança, estabilidade, qualidade e propriedades físicas. A influência da água sobre as propriedades dos alimentos resulta da interação entre suas moléculas e os demais componentes do alimento. A extensão e a intensidade das interações dependem da composição química e são determinadas pelo estado da água no alimento (LEWICKI, 2004).

A atividade da água é definida como a razão entre a pressão do vapor de água no sistema e a pressão de vapor de água pura à mesma temperatura. Ela também pode ser expressa como a umidade relativa (*UR*) do ar que envolve o alimento, em situação de equilíbrio termodinâmico, quando há igualdade de temperatura e a pressão parcial de vapor de água no ar é igual à pressão de vapor d'água no alimento (SAHIN e SUMNU, 2005). Assim, a atividade de água pode ser expressa como:

$$a_w = \frac{(P_w^v)_{si}}{P_w^v} = UR \quad (2.4)$$

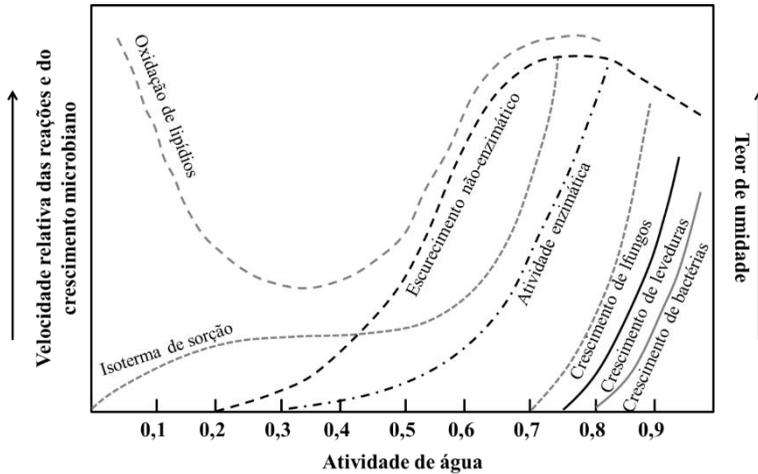
em que

- $(P_w^v)_{si}$ é a pressão de vapor do sistema,
- P_w^v é a pressão de vapor da água pura e
- *UR* é a umidade relativa do ar que envolve o alimento.

A maioria das reações químicas e atividades microbiológicas são controladas diretamente pela atividade de água (SAHIN e SUMNU, 2005), pois a mesma representa a disponibilidade de água para o crescimento de microrganismos e para as reações químicas e bioquímicas que alteram o produto. Geralmente, o objetivo principal da desidratação de alimentos é prolongar sua vida útil, além de obter produtos com características especiais. Isso é atingido através da redução da atividade de água (a_w) do alimento a um valor tão baixo que irá inibir o crescimento e desenvolvimento de microrganismos patogênicos e deteriorantes, reduzindo significativamente a atividade enzimática e a taxa em que as reações químicas indesejáveis ocorrem (BRENNAN, 1994).

Apresentam-se na Figura 2.4 as importâncias relativas das diferentes reações químicas e crescimento microbiano em função da atividade de água dos alimentos.

Figura 2.4. Velocidade relativa de reações em função da atividade de água (adaptado de LABUZA, 1968).

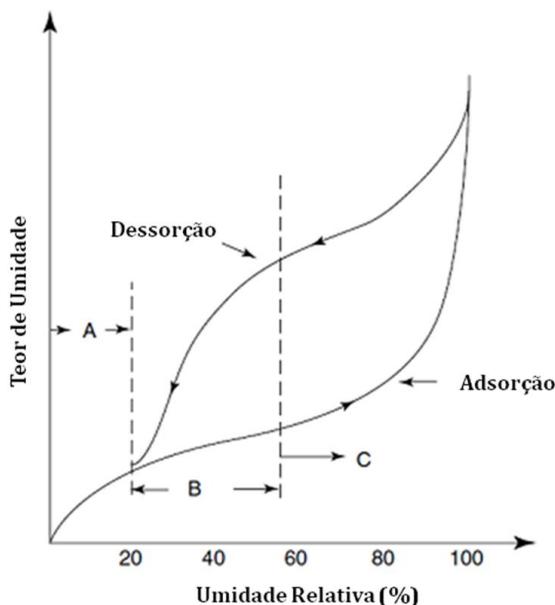


2.6 Isotermas de Sorção de Umidade

A isoterma de sorção de umidade de um alimento é representada por uma curva de umidade de equilíbrio em função da atividade de água ou umidade relativa da atmosfera em equilíbrio com o material (HELDMAN e LUND, 2007). Existem duas maneiras de construir uma isoterma (Figura 2.5):

- (i) A isoterma de adsorção é obtida colocando-se amostras de um material totalmente seco em contato com atmosferas com diferentes umidades relativas, e medindo-se sua umidade depois de atingido o equilíbrio.
- (ii) A isoterma de dessorção é obtida colocando-se o alimento úmido em contato com atmosferas com diferentes umidades relativas, e medindo-se sua umidade depois de atingido o equilíbrio.

Figura 2.5. Isoterma de sorção de alimentos generalizada (HELDMAN e LUND, 2007).



A diferença entre as curvas de adsorção e de dessorção apresentadas na figura 2.5 é definida como histerese. A histerese é observada em muitos alimentos higroscópicos. Durante a adsorção, os capilares se enchem de líquido devido ao aumento da umidade relativa. Quando a pressão parcial do vapor no ar se torna maior que a pressão de vapor do líquido nos capilares, há uma movimentação da água em direção aos poros. Durante a condensação do vapor nos poros, há formação de bolhas de ar, causando uma descontinuidade da fase líquida. Na dessorção, os poros encontram-se inicialmente cheios de líquido saturado. A saída do líquido contido nos poros só ocorre quando a pressão no seu meio se torna menor que a pressão de vapor do líquido dentro dos capilares.

As isotermas dividem-se em várias regiões, segundo a quantidade de água presente. Com o objetivo de interpretação, a curva generalizada de um alimento hipotético pode ser dividida em três regiões, como demonstrado na figura 2.5. A região A representa a água fortemente ligada, com entalpia de vaporização consideravelmente mais elevada que

a da água pura (HELDMAN e LUND, 2007; MUHTASEB et al., 2002). O teor de umidade da monocamada, teoricamente, representa a adsorção de moléculas de água na primeira camada. Geralmente, as moléculas de água nessa região são incongeláveis e não estão disponíveis para reações químicas (MUHTASEB et al., 2002). A região B representa as multicamadas acima da monocamada, onde as moléculas de água estão menos ligadas ao sólido, e a entalpia de vaporização é pouco maior que a da água pura. Essa água é disponível como solvente para solutos de baixa massa molar e para algumas reações bioquímicas. Na região C a água presente está em excesso nos macrocapilares ou como parte da fase fluida em materiais com alto teor de umidade. A água é conhecida como água livre e está fracamente ligada ao alimento. Nesta região ocorre a maior parte das reações de degradação e crescimento microbiano (HELDMAN e LUND, 2007; MUHTASEB et al., 2002).

Assim, as isotermas de sorção são ferramentas muito importantes na caracterização dos alimentos e na previsão do seu comportamento antes, durante e depois do seu processamento.

2.7 Transição de Fase em Alimentos e Transição Vítre

As transições de fase são mudanças no estado físico dos materiais, que têm efeitos significativos sobre suas propriedades físicas. O termo transição refere-se à alterações no estado físico que são causadas por uma mudança na temperatura ou pressão. Há basicamente três estados físicos que são o sólido, o líquido, e o estado gasoso (ROOS, 1995). Esses processos são conhecidos como uma transição de fase de primeira ordem (MARTINEZ et al., 1998). Substâncias puras como água e muitos compostos orgânicos e inorgânicos têm temperaturas exatas de transição de fase de primeira ordem (fusão-solidificação, vaporização-condensação, sublimação) e envolvem o fornecimento ou retirada de calor latente (entalpia de mudança de fase). Os valores das entalpias de mudança de fase podem ser elevados, como é o caso da água, que tem entalpia de vaporização da ordem de 2256 kJ kg^{-1} .

Existem transições de estado de segunda ordem, que não envolvem calor latente. Um exemplo importante desse caso de transição, é a transição vítrea (T_g), que envolve a transição de um estado amorfo sólido-vítreo para um estado amorfo semi-sólido-borrachoso (*rubbery state*, em inglês ou *estado gomoso*, em espanhol) (ROOS, 1995). Na ciência dos polímeros, esse estado é denominado de elastomérico. No

estado vítreo, as moléculas apresentam um grau de imobilidade semelhante ao observado em sólidos cristalinos, enquanto que no estado borrachoso a mobilidade molecular aumenta significativamente e o material adquire propriedades mecânicas tipicamente viscoelásticas (MARTINEZ et al., 1998).

Em termos termodinâmicos, a transição vítrea é definida como uma transição de segunda ordem, em que as duas fases envolvidas diferem nas segundas derivadas da energia livre, G , em relação à temperatura e pressão, mas não nas suas energias livres ou nas suas derivadas. Portanto, a transição vítrea é caracterizada por:

- (i) Descontinuidade no coeficiente de expansão térmica:

O volume, $V = (\partial G / \partial P)_T$, não se altera na transição, mas o coeficiente de expansão, α , definido por:

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial p \partial T} \right) \quad (2.5)$$

passa por uma mudança muito rápida.

- (ii) Descontinuidade na capacidade calorífica:

Similarmente ao item anterior, a entalpia, H , que é dada por:

$$H = G - T \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P \quad (2.6)$$

não se altera, mas a capacidade calorífica, C_p , que é definida por:

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = -T \left(\frac{\partial^2 G}{\partial T^2} \right)_P \quad (2.7)$$

sofre uma mudança brusca durante a transição.

A estabilidade é um importante critério na preservação de alimentos. Termodinamicamente, um material estável é aquele que se encontra em equilíbrio com as condições de pressão e temperatura do ambiente, não apresentando mudanças em seu estado físico em função do

tempo. No equilíbrio, a estrutura molecular desses materiais encontra-se organizada de modo a manter o menor nível de energia livre no sistema (ROOS, 1995).

2.8 Diagramas de estado

Diagramas de estado são ‘mapas’ dos diferentes estados de um alimento em função do teor de umidade ou concentração de sólidos e da temperatura. Tais diagramas facilitam a compreensão de mudanças complexas ocorridas no alimento quando são alterados o teor de umidade ou a temperatura do mesmo (RAHMAN e LABUZA, 2007).

Na Figura 2.6 é apresentado um diagrama de estado simples, representativo da transição entre o estado vítreo e gomoso. Ela indica que a transição do estado vítreo para o gomoso pode ocorrer tanto pelo aumento na concentração de plastificante, como pelo aumento da temperatura.

Figura 2.6. Diagrama representativo da transição de entre o estado vítreo e gomoso (LABUZA et al., 2004).



As relações entre os estados físicos, a pressão, a temperatura e o volume também podem ser mostradas em diagramas de fases tridimensionais. Estes diagramas mostram superfícies que indicam valores para as variáveis de estado sob condições de equilíbrio. Nas situações de equilíbrio, duas fases coexistem, ou seja, existe um equilíbrio

sólido-líquido, sólido-gás ou líquido-gás. As projeções bidimensionais dos diagramas de fase são muito úteis para aplicações práticas (ROOS, 1995).

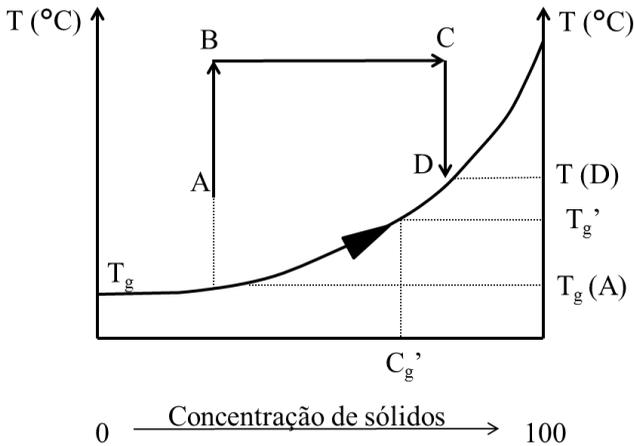
Segundo Labuza et al. (2004), os diagramas de estado podem ser utilizados para ilustrar algumas mudanças de estado físico de alimentos em função da umidade (ou concentração de plastificante) durante processos de remoção de água (secagem, cozimento, extrusão, evaporação) ou durante a armazenagem. O diagrama de estado define a região de umidade/temperatura na qual o domínio do alimento ou ingrediente é vítreo, gomoso, soluto cristalino ou congelado.

Quando um material se encontra no estado vítreo e, portanto, abaixo da temperatura de fusão, T_m , possui uma energia maior que aquela que caracteriza o estado de equilíbrio cristalino. No estado de não equilíbrio (amorfo), o material está sempre sujeito a uma força motriz, que tende a promover mudanças para o estado de equilíbrio. Acima de T_g , a mobilidade molecular é suficiente para permitir a reordenação das moléculas. No entanto, o tempo necessário para a cristalização depende da temperatura, da velocidade de difusão, das características do material e do tamanho das moléculas. Para as temperaturas abaixo de T_g a mobilidade molecular é baixa, devido à alta viscosidade, dificultando os rearranjos moleculares necessários à formação de estruturas cristalinas. (ROOS, 1995)

Labuza et al. (2004) ressaltam que uma complicação na utilização dos diagramas de estado para alimentos reside no fato de esses não serem soluções homogêneas ou isotrópicas, apresentando-se, no nível molecular, como micro-domínios heterogêneos que nunca existirão em equilíbrio verdadeiro. Essas regiões em alimentos podem existir como líquidos com solutos dissolvidos ou como sólidos no estado amorfo, que não são estados reais de equilíbrio e podem resultar em observações anômalas. Assim, os diagramas de estado são importantes ferramentas no estabelecimento das condições adequadas de processamento e armazenagem de alimentos desidratados e congelados (ROOS, 1995). Na Figura 2.7, está representada a evolução da temperatura de transição vítrea durante o processo de desidratação. A rápida remoção de água e a transformação de solutos em um estado amorfo são típicas da desidratação (ROOS, 1995). A operação de secagem inicia-se com um aumento da temperatura do produto, sem modificação de sua composição ($A \rightarrow B$). Posteriormente, a evaporação da água do produto se dá a uma temperatura constante ($B \rightarrow C$). Depois da secagem à taxa constante, o

produto pode passar por pelo menos um período de secagem à taxa decrescente, quando há um aumento da temperatura. Após a secagem, o produto é resfriado a uma temperatura próxima à temperatura inicial para ser armazenado (C→D) (GENIN e RENÉ, 1995).

Figura 2.7. Evolução da temperatura de transição vítrea do produto no transcorrer do processo de secagem (GENIN e RENÉ, 1995).



Pela Figura 2.7 é possível observar que a temperatura de transição vítrea do produto se eleva no decorrer do processo de secagem pela redução do teor de umidade do produto e conseqüentemente pelo aumento da concentração de sólidos. É aconselhável que a temperatura final do produto desidratado, $T(D)$, seja inferior à temperatura de transição vítrea (T_g), na concentração de sólidos alcançada e, portanto, o material permaneça no estado vítreo durante o armazenamento.

Capítulo 3

3. Estudo das variáveis de processo na evolução do teor de umidade, microestrutura e propriedades de textura de banana desidratada por KMFD (*Conductive multi-flash drying*)

3.1 Introdução

A demanda por alimentos processados que mantenham características mais próximas dos produtos originais tem aumentado nas últimas décadas. Em relação ao processamento industrial, seja em grande ou pequena escala, há a necessidade de desenvolver tecnologias que contribuam para minimizar os efeitos adversos provocados nos alimentos pelo processamento. Esse é o caso das frutas desidratadas utilizadas para consumo imediato como *snacks*, barras de cereais e granolas. Em todos esses casos é desejável que os ingredientes mantenham a cor, o aroma e o sabor o mais próximo da fruta *in natura*, preferencialmente sem a utilização de aditivos, proporcionando uma textura agradável ao alimento depois do processamento. A associação de operações e processos adequados durante a fabricação de determinado alimento pode garantir a manutenção dessas qualidades no produto final (DIONELLO et al., 2009; TORREGIANNI e BERTOLO, 2001).

A secagem de frutas é uma maneira eficiente de conservação, uma vez que reduz significativamente a atividade de água, inibindo assim o crescimento microbiano e reações enzimáticas indesejáveis (GUINÉ, 2006; MAYOR e SERENO, 2004). Durante a evaporação da água, ocorrem alterações na estrutura física do produto, sendo o encolhimento um fenômeno determinante na qualidade do produto final. De um modo geral, a qualidade de um produto desidratado pode ser caracterizada pela cor, textura, sabor, aroma, porosidade, densidade e pela capacidade de reidratação do produto (TSAMI e KATSIOTI, 2000).

Laurindo (2011) apresenta no documento de patente PI 1107173-7 uma nova técnica de secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo para obtenção de alimentos com qualidade superior. Essa técnica, assim como os resultados obtidos, foram publicados por Zotarelli et al. (2012). O princípio desse processo de secagem (denominado de CMFD- *convective multi-flash drying* pelos autores) é termo-mecânico, baseado na aplicação de sucessivos ciclos de aquecimento das amostras à

pressão atmosférica, seguidos da redução brusca da pressão do sistema para a obtenção de alimentos crocantes, com baixos teores de umidade e atividade de água. O aquecimento do produto foi realizado por convecção, através da circulação de ar quente no interior de um tanque contendo as amostras a serem desidratadas. Quando essas atingiam a temperatura de 60 °C, interrompia-se a circulação de ar quente e aplicava-se o pulso de vácuo até a pressão do tanque atingir 15 kPa. Na secagem de frutas, parte-se de materiais com altos teores de umidade (75-90 %, em base úmida), o que implica em longos tempos de aquecimento, devido à inevitável secagem convectiva que ocorre, se o ar injetado não estiver saturado de umidade. Os autores acima relataram tempos de aquecimento de até 30 minutos para banana e de até 60 minutos, para manga. Embora os tempos totais de secagem tenham sido bastante aceitáveis (3 horas), a redução dos tempos de aquecimento é desejável, visando reduzir o tempo total de secagem e, com isso, a competitividade do processo.

O objetivo deste estudo é investigar uma alternativa de aquecimento das frutas (bananas, var. Prata), usando a transferência de calor por condução, através do contato de fatias de frutas diretamente com uma placa aquecida. Assim, usando diferentes temperaturas da placa aquecida, pode-se estudar a influência de diferentes tempos de aquecimento e da aplicação de sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo na microestrutura e textura das frutas desidratadas. Para maior simplicidade da redação, essa técnica de secagem será denominada aqui de KMFD, significando *conductive-multi-flash drying process*.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Preparação das amostras

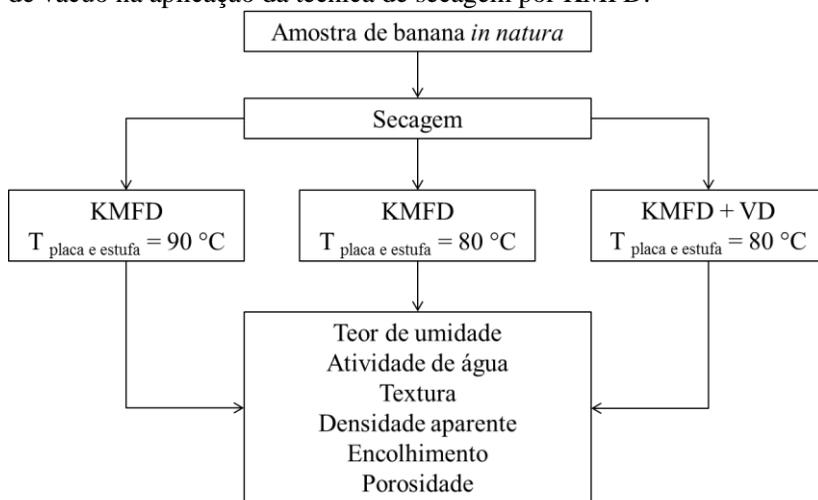
As amostras de banana (*Musa sapientum* L. var Prata) foram adquiridas no comércio local (Florianópolis, SC, Brasil). A seleção das amostras foi realizada pela aparência e pelo grau de maturação (grau 5 pela Figura 2.1), através da determinação do teor de sólidos solúveis determinado utilizando um refratômetro ótico manual (AR200 Reichert, EUA). As amostras selecionadas foram lavadas, descascadas manualmente e posteriormente cortadas em fatias de 5 mm de espessura.

3.2.2 Avaliação da influência das variáveis de processo na aplicação da técnica de KMFD (*Conductive multi-flash drying*)

Com o objetivo de produzir bananas desidratadas crocantes, foram avaliadas diferentes temperaturas de aquecimento e aplicação de sucessivos ciclos de vácuo na aplicação da técnica de secagem por KMFD (*Conductive multi-flash drying*).

Na Figura 3.1 estão apresentadas as alternativas avaliadas neste capítulo.

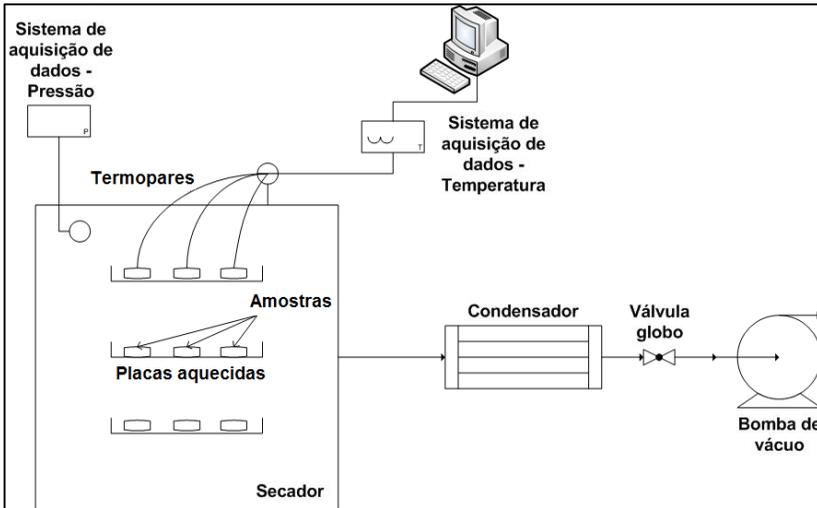
Figura 3.1. Alternativas de aquecimento e aplicação de sucessivos ciclos de vácuo na aplicação da técnica de secagem por KMFD.



3.2.3 Descrição do equipamento utilizado para a *Conductive multi-flash drying* (KMFD) e para a *Conductive multi-flash drying* seguida por um período de secagem a vácuo (KMFD_VD)

Na Figura 3.2 é apresentado o diagrama esquemático do dispositivo experimental utilizado para a secagem por *Conductive multi-flash drying* (KMFD) e por *Conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD).

Figura 3.2. Diagrama esquemático do dispositivo experimental utilizado para a secagem por *Conductive multi-flash drying* (KMFD) e por *Conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD).



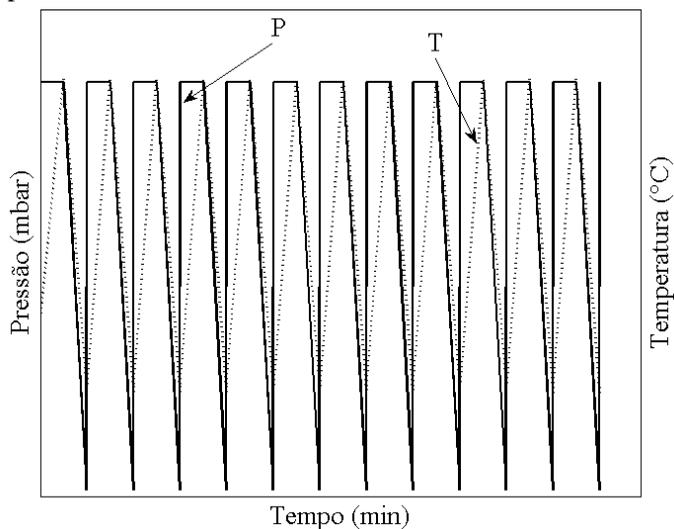
O aparato experimental consiste em uma câmara de secagem de 100 L (440-DE, Ethik Technology, Brasil) conectada a uma bomba de vácuo com capacidade de bombeamento de $350 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (LC305-DVP Vacuum Technology, Itália). Um sistema de condensação (*trapping*) foi instalado na linha, com o objetivo de manter a eficiência do bombeamento, pela condensação dos vapores condensáveis. No interior da câmara de secagem, as placas de acondicionamento das amostras (39 cm x 48,5 cm x 0,5 cm) foram mantidas aquecidas com resistências elétricas, com temperaturas controladas por um controlador PID (proporcional-integral-derivativo). A pressão do sistema foi monitorada durante a secagem através de um vacuômetro digital (Multi-Range Vacuum Gauge PIZA 111 – ILMVAC, Alemanha). A variação tempo-temperatura das amostras foi monitorada utilizando termopares do tipo T (Iope, model A-TX-TF-TF-R30AWG, Brasil) inseridos em cinco amostras em diferentes locais do secador, e conectado a um sistema de aquisição de dados (34970A, Agilent Technologies, EUA). Os termopares foram hermeticamente conectados à estufa através de um flange (Kaye feed thru, General Electric- EUA).

3.2.3.1 Conductive multi-flash drying (KMFD)

Após a preparação das amostras, estas foram colocadas sobre filmes plásticos (mylar®, composto por uma película de poli (tereftalato de etila) revestido de silicone) de 0,025 mm espessura e colocadas no interior da câmara de secagem sobre as placas aquecidas. A temperatura das placas foi mantida a 80 °C ou 90 °C, assim como a temperatura da câmara de secagem. Esta foi mantida à pressão atmosférica durante a etapa de aquecimento. Foram inseridos termopares em cinco amostras para o monitoramento da temperatura das frutas durante a secagem. Atingido 60 °C no interior das frutas, o sistema era evacuado pela aplicação de um pulso de vácuo (pressão final de 15 mbar). Transcorridos 5 minutos de vácuo a pressão do sistema era reestabelecida e um novo ciclo de aquecimento-pulso de vácuo aplicado.

Na Figura 3.3 está representado um diagrama esquemático do perfil pressão-temperatura-tempo. No processo de secagem por *Conductive multi-flash drying* (KMFD), foram aplicados 12 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.

Figura 3.3. Diagrama esquemático do perfil pressão-temperatura-tempo para o processo de KMFD.

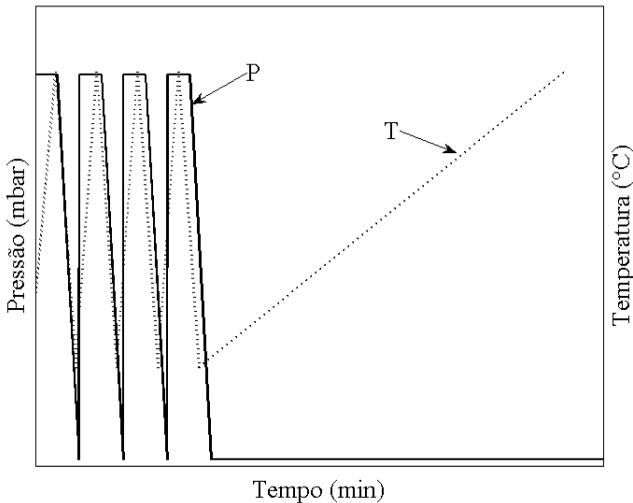


3.2.3.2 *Conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD)

Após a preparação das amostras, estas foram acondicionadas em filmes plásticos (mylar®) e colocadas no interior da câmara de secagem sobre as placas aquecidas. A temperatura das placas foi mantida a 80 °C, assim como a temperatura da câmara de secagem. Esta foi mantida à pressão atmosférica durante a etapa de aquecimento. Foram inseridos termopares em cinco amostras para o monitoramento da temperatura das frutas durante todo o processo de secagem. Atingido 60 °C no interior das frutas, o sistema era evacuado, pela aplicação de um pulso de vácuo. Transcorridos 5 minutos de vácuo, a pressão do sistema era reestabelecida e um novo ciclo de aquecimento-pulso de vácuo aplicado. Neste processo, foram aplicados 3 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, seguidos por uma secagem à vácuo clássica (65 min, com pressão da câmara igual a 15 mbar, totalizando um tempo de secagem de 2 horas.

Na Figura 3.4 está representado um diagrama esquemático do perfil pressão-temperatura-tempo.

Figura 3.4. Diagrama esquemático do perfil pressão-temperatura-tempo para o processo de KMFD_VD.



3.2.4 Caracterização do produto final desidratado

3.2.4.1 Teor de umidade e atividade de água (a_w)

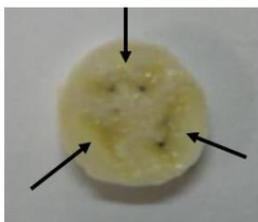
O teor de umidade das amostras foi determinado por método gravimétrico, em estufa a vácuo (TECNAL, TE-395, Brasil) a 70 °C, segundo a metodologia da A.O.A.C. (2000).

A atividade de água (a_w) foi determinada em higrômetro Aqualab (Aqualab Model Series 3, DecagonDevices Inc., Pullman, EUA) calibrado com cloreto de lítio e água destilada (a_w de 0,111 e 1,000, respectivamente) a 25 °C. As análises foram realizadas em triplicata.

3.2.4.2 Determinação das propriedades mecânicas de textura

As propriedades mecânicas de textura das frutas foram efetuadas por meio de teste de penetração com *probe* cilíndrica de 2mm de diâmetro, em analisador de textura TA-XT2, da Stable Micro System, controlado por microcomputador. Para a técnica de secagem KMFD, com diferentes temperaturas de aquecimento da câmara (80 °C e 90 °C), a cada ciclo de aquecimento-pulso de vácuo, foram retiradas 5 amostras da câmara para as análises de textura. Foram realizadas 3 perfurações em cada amostra, em diferentes regiões, como demonstrado na Figura 3.5. O mesmo procedimento foi realizado para a técnica de secagem por KMFD_VD.

Figura 3.5. Demonstração da localização das perfurações durante os ensaios mecânicos.

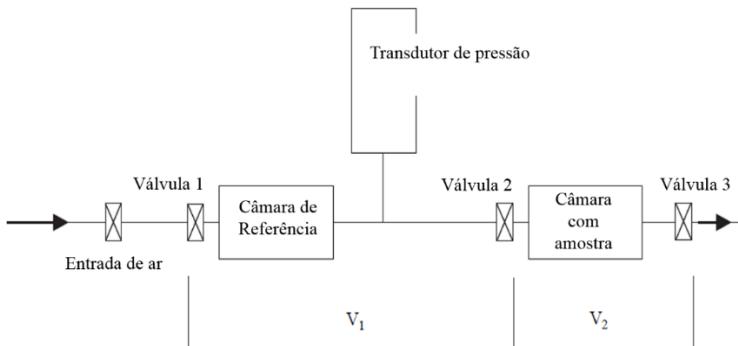


Devido à sensibilidade do equipamento, as curvas força x deformação para a técnica de secagem de KMFD foram analisadas a partir do 5º ciclo de aquecimento-pulso de vácuo. Para a técnica de secagem por KMFD_VD foi analisada somente a curva força x deformação da amostra seca final. Em todos os testes de perfuração, as amostras foram deformadas 70% da sua espessura inicial.

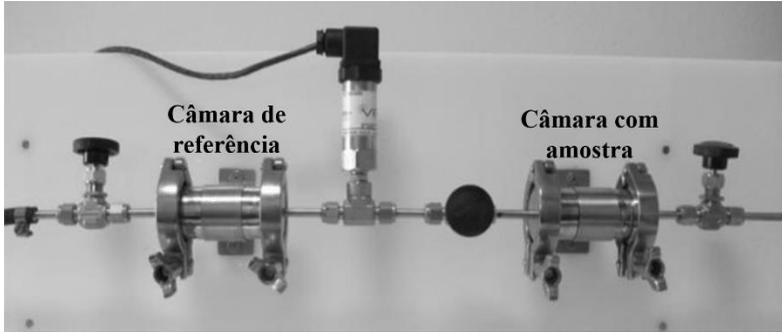
3.2.4.3 Volume real e aparente, porosidade acessível e encolhimento

O volume real (V_r) foi medido utilizando um picnômetro a gás, construído para trabalhar com sólidos úmidos ou secos, de acordo com metodologia proposta por Sereno et al. (2007). O diagrama esquemático e a ilustração do picnômetro construído no Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI-UFSC) estão apresentados na Figura 3.6 e 3.7, respectivamente.

Figura 3.6. Diagrama sistemático do picnômetro a gás.



Fonte: (SERENO et al., 2007)

Figura 3.7. Fotografia ilustrativa do picnômetro a gás.

O volume aparente (V_{ap}) foi determinado pelo deslocamento de volume das amostras quando imersas em n-heptano (Lozano et al., 1980). A cesta (figura 3.9) foi suspensa na parte inferior de uma balança semi-analítica, com precisão de 0,001 g (Shimadzu, AY220), (figura 3.8), e suas massas medidas no ar (m_c) e imersa em n-heptano ($m_{c,h}$) foram registradas. Uma amostra de banana foi colocada na cesta e suas massas no ar ($m_{c,b}$) e imersa em n-heptano ($m_{c,b,h}$) foram registradas. O volume aparente foi calculado de acordo com a equação 3.1. O n-heptano utilizado possuía densidade igual a $0,68 \text{ g cm}^{-3}$ a 25°C .

$$V_{ap} = \frac{(m_{c,b} - m_c) - (m_{c,b,h} - m_{c,h})}{\rho_s} \quad (3.1)$$

em que:

- $m_{c,b}$ é a massa da cesta com amostra de banana;
- m_c é a massa da cesta vazia;
- $m_{c,h}$ é a massa da cesta vazia imersa em n-heptano;
- $m_{c,b,h}$ é a massa da cesta com amostra de banana imersa em n-heptano;
- ρ_s é a densidade do solvente n-heptano.

Figura 3.8. Balança analítica, com gancho acoplado para medições em solventes.

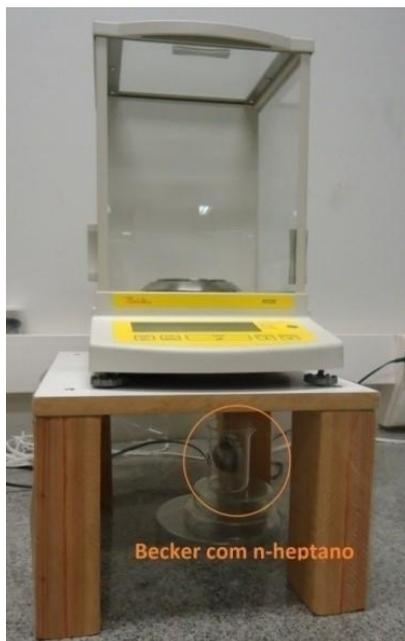
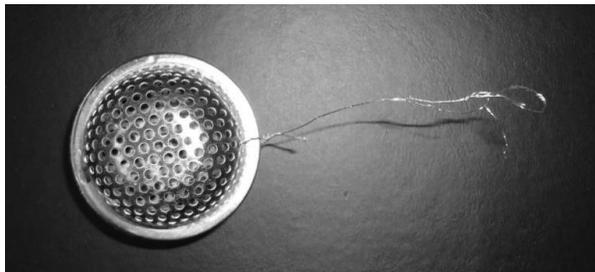


Figura 3.9. Cesta para medição da massa das amostras em solvente.



Para as diferentes técnicas de secagem estudadas, o volume real e o volume aparente foram determinados em quadruplicata. A porosidade

foi calculada a partir do volume real (V_r) e do volume aparente (V_{ap}), utilizando a Equação 3.2:

$$\varepsilon[\%] = \left[1 - \frac{V_r}{V_{ap}} \right] \times 100 \quad (3.2)$$

O encolhimento das amostras foi determinado pela relação entre o volume aparente da amostra em um determinado tempo pelo seu volume aparente inicial ($t=0$):

$$S_b[\%] = \left[1 - \frac{V_{ap}}{V_{ap0}} \right] \times 100 \quad (3.3)$$

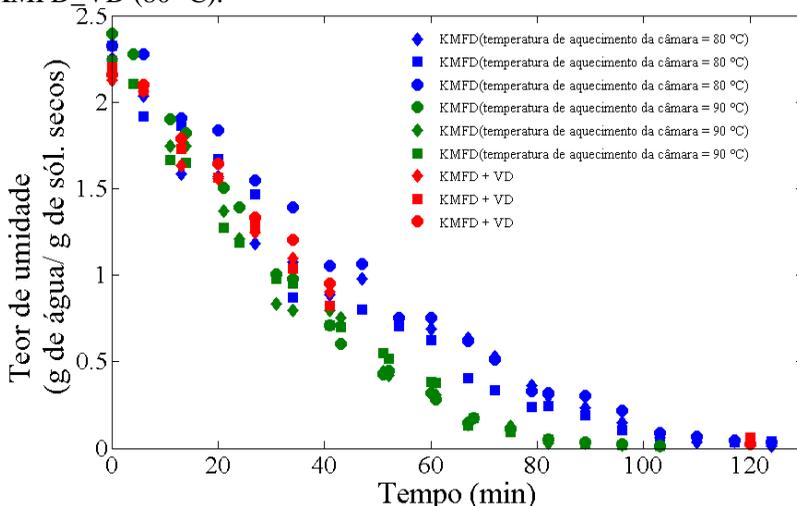
3.3 Resultados e Discussão

As amostras utilizadas neste estudo apresentavam teor de umidade inicial de $2,303 \pm 0,079$ g de água/ g de sólidos secos, atividade de água de $0,981 \pm 0,004$ e concentração de sólidos solúveis de $23,3 \pm 1,5$ ° Brix.

Na Figura 3.10 estão apresentadas a evolução do teor de umidade de amostras de banana secas por KMFD e por KMFD_VD, utilizando diferentes temperaturas de aquecimento no interior da câmara de secagem. Diferentes ícones na mesma cor representam a triplicata de experimento.

As amostras de banana iniciaram o processo de secagem com teor de umidade de aproximadamente $2,303 \pm 0,079$ g de água/g de sólidos secos. Ao final do processo de secagem por KMFD, as amostras apresentaram teor de umidade de $0,012 \pm 0,001$ (90 °C) e $0,029 \pm 0,010$ g de água/ g de sólidos secos (80 °C). O teor de umidade final das amostras foi semelhante, entretanto o tempo de secagem quando utilizada a maior temperatura de aquecimento da câmara (90 °C) foi menor. O tempo de secagem observado a 90 °C foi 16 % menor que o tempo de secagem observado a 80 °C.

Figura 3.10. Evolução do teor de umidade de amostras de banana submetidas à técnica de secagem por KMFD (80 °C e 90 °C) e secas por KMFD_VD (80 °C).



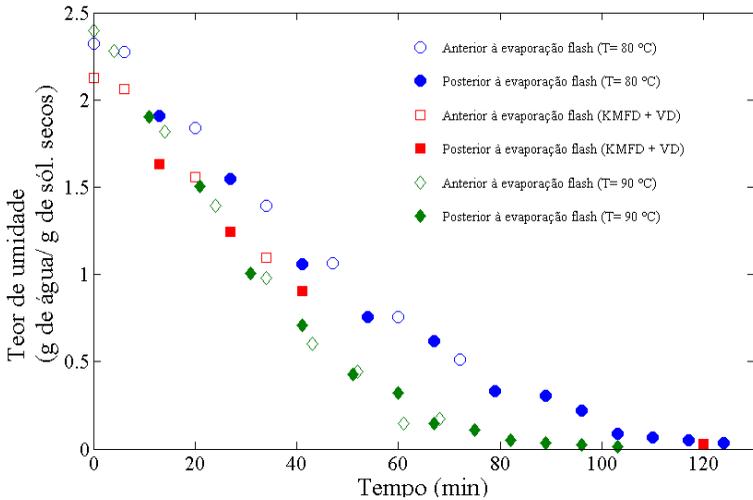
Para os experimentos de KMFD_VD optou-se pela temperatura de 80 °C no interior da câmara, uma vez que as amostras submetidas a secagem a 90 °C apresentaram maior encolhimento (Tabela 3.1). O comportamento das curvas apresentadas na figura 3.1 para as amostras secas por KMFD_VD foi semelhante ao observado para as amostras secas por KMFD, resultando em uma umidade de $0,041 \pm 0,013$ g de água/ g de sólidos secos ao final de 120 min de processo.

Porciuncula (2010) secou amostras de banana prata por CMFD (*Convective multi-flash drying*), técnica que utiliza os ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, usando ar quente como meio de aquecimento principal. A autora aplicou 12 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, e observou que ao final da secagem (135 min) as amostras apresentaram teor de umidade de 0,294 g de água/ g de sólidos secos.

Na Figura 3.11 estão apresentadas as curvas da evolução do teor de umidade, mostrando as contribuições relativas do aquecimento condutivo e dos pulsos de vácuo (*flash-drying*) no processo de secagem. A cada aplicação de um ciclo de aquecimento-pulso de vácuo, amostras em triplicata foram retiradas da estufa assim que atingissem a temperatura de 60 °C, para a determinação do teor de umidade. Atingida a temperatura de 60 °C era aplicado o pulso de vácuo, e após 5 minutos de vácuo,

amostras eram retiradas, em triplicata, para a determinação do teor de umidade. As curvas apresentadas são curvas representativas do processo como um todo.

Figura 3.11. Contribuição condutiva e contribuição *flash*



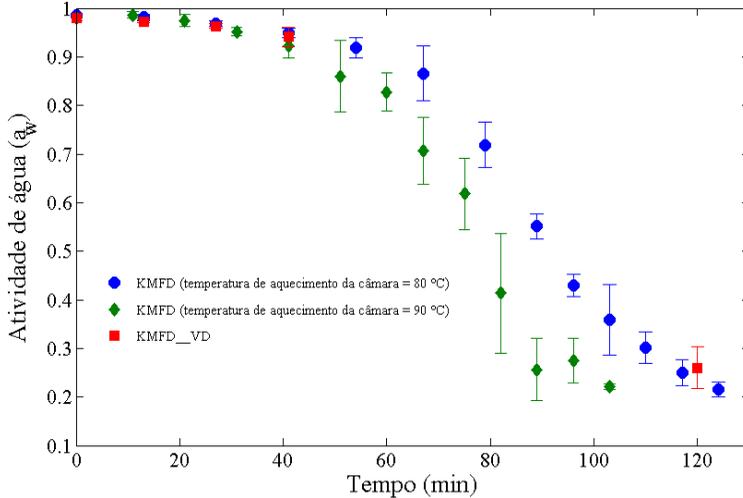
A secagem condutiva, para as amostras secas com temperatura de aquecimento da estufa de 80 °C, é responsável por aproximadamente 16% do total de umidade retirado das frutas. O restante da água evaporada, 84%, é retirada das amostras por evaporação *flash* (pulsos de vácuo). Para as amostras secas em estufa com aquecimento de 90 °C, a etapa de aquecimento condutivo foi responsável por aproximadamente 20% do total de água retirada das frutas.

Na secagem por KMFD, os 6 primeiros pulsos foram mais efetivos, representando, em média, aproximadamente 80 % da água evaporada das amostras de banana. Esta alta taxa de remoção de umidade das frutas se deve à grande quantidade de água livre presente nas amostras no início da secagem. Também foi observado que 60 % da umidade total das amostras foi retirada após a aplicação do 3º ciclo de aquecimento-pulso de vácuo.

Na Figura 3.12 estão apresentadas as evoluções da atividade de água das amostras de banana secas por KMFD utilizando diferentes temperaturas de aquecimento no interior da câmara (80 °C e 90 °C) e secas por KMFD_VD à 80 °C. Observa-se que inicialmente a aplicação

de sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo reduz pouco a atividade de água das frutas. No final do processo, a atividade das amostras foi de 0,222 e 0,215 para as amostras de banana submetidas à secagem com temperatura da câmara de 90° e 80 °C, respectivamente.

Figura 3.12. Evolução da atividade de água das amostras de banana submetidas à técnica de secagem por KMFD e por KMFD_VD.

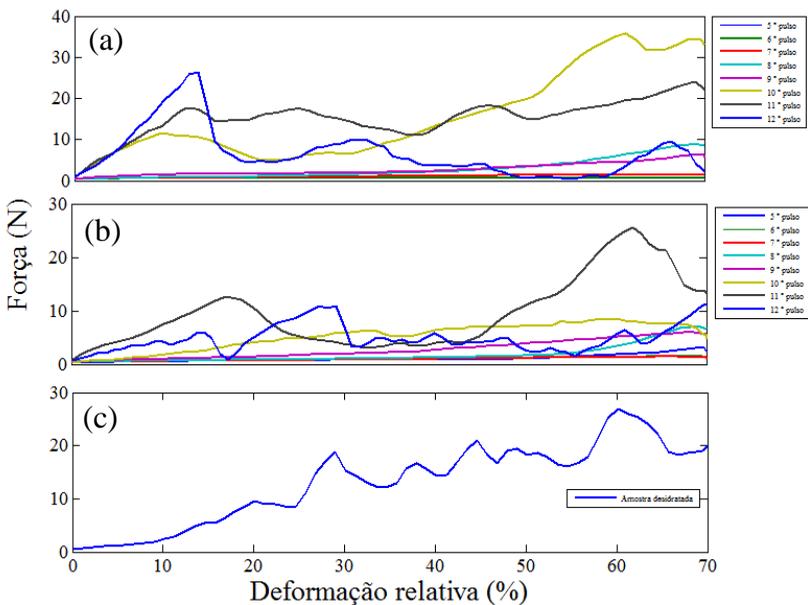


Como esperado, a atividade de água das amostras secas pela técnica de KMFD_VD, no início da secagem, apresentou aproximadamente o mesmo comportamento das amostras secas por KMFD com temperaturas de aquecimento da câmara de 90° e 80 °C. Após a aplicação dos 3 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo foi realizada uma secagem a vácuo nas amostras por aproximadamente 65 minutos. Ao final do processo as amostras apresentaram atividade de água de 0,260.

Para o processo de KMFD utilizando diferentes temperaturas no interior da câmara, 80 °C e 90 °C e KMFD_VD (80 °C), a atividade de água final foi de aproximadamente 0,2. Esse valor é semelhante aos reportados por Porciuncula (2010) para amostras comerciais de banana liofilizada e para amostras secas pela técnica de CMFD, que foram de 0,276 e 0,277, respectivamente.

Na Figura 3.13 estão representadas as curvas de força x deformação de amostras de banana submetidas à técnica de secagem por KMFD utilizando temperatura de aquecimento de 80 °C e 90 °C no interior da câmara, e de amostras submetidas à técnica de KMFD_VD à 80 °C.

Figura 3.13. Curvas de força x deformação de amostras de banana submetidas à técnica de secagem por KMFD utilizando temperaturas de aquecimento de 80 °C (a) e 90 °C (b) no interior da câmara e submetidas à técnica de KMFD_VD (c).



Pelas Figuras 3.13 (a) e (b) nota-se que com aplicação de sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo houve um aumento gradual na força de penetração aplicada nas amostras. Ao analisar as curvas obtidas nos ensaios de penetração para as amostras de banana submetidas aos primeiros ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, é possível observar que foram necessárias forças de menor intensidade para perfurar as amostras. A necessidade de menores forças de penetração se deve à baixa firmeza das amostras (alto conteúdo de água nas amostras). Inicialmente, as amostras apresentam alto teor de umidade, o que ocasiona uma plastificação das amostras (maior mobilidade molecular).

A partir da aplicação do 10º ciclo de aquecimento-pulso de vácuo, as curvas força x deformação relativa apresentaram diversos picos, demonstrando que o produto apresentava característica crocante, devido à formação da matriz porosa durante a aplicação dos sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. Optou-se pela aplicação de 12 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, pois as curvas apresentaram um maior número de picos. Mazumder et al. (2007) estudaram o efeito do teor de umidade através de testes de compressão uniaxial em *snacks* de milho extrusados. Os autores apontam que um bom indicador do comportamento crocante de uma amostra é o número de picos principais, os quais são sensíveis ao teor de umidade da amostra, principalmente quando este é maior que 4% (b.u). Em materiais com estrutura porosa e quebradiça, a força oscila muito durante a quebra da parede e a desintegração da estrutura (TAKEUCHI et al., 2005).

As curvas força x deformação das amostras secas por KMFD_VD apresentaram comportamento semelhante às curvas das amostras secas por KMFD com temperatura de aquecimento de 80 °C e 90 °C. Pela Figura 3.13 (c) é possível observar diversos picos na curva devido à ruptura das paredes celulares. Estes resultados são característicos de alimentos crocantes e estão associados à estrutura frágil da matriz porosa (DIKSTERHUIS et al., 2007; LAURINDO e PELEG, 2007, 2008). Para um produto ser crocante, em termos físicos, ele deve apresentar uma estrutura firme, mas ao mesmo tempo frágil, para que, ao ser submetido a uma força, ocorra a fratura e ele se desintegre. Porciuncula (2010) realizou testes de penetração em amostras de banana desidratadas pela técnica de CMFD e em amostras de bananas comerciais liofilizadas. A autora observou que as curvas força x deformação para ambas as amostras apresentaram comportamento semelhante, ou seja, curvas irregulares.

Na Tabela 3.1 estão apresentadas as propriedades estruturais das amostras de banana desidratadas por KMFD com temperaturas de aquecimento de 90 °C e 80 °C e de amostras desidratadas por KMFD_VD (80 °C).

Tabela 3.1- Propriedades estruturais das amostras de banana desidratadas por KMFD com temperaturas de aquecimento de 90 °C e 80 °C e desidratadas por KMFD_VD (80 °C).

		T = 90°C	T = 80°C	
	Amostra <i>in natura</i>	KMFD	KMFD	KMFD_VD
Densidade Aparente (g/cm ³)	1,03±0,03	0,68±0,03	0,56±0,01	0,50±0,01
Porosidade(%)	23,72±2,19	73,36±6,45	75,35±3,92	87,12±2,84
Encolhimento (%)	--	54,80±2,83	44,04±6,44	27,85±6,56

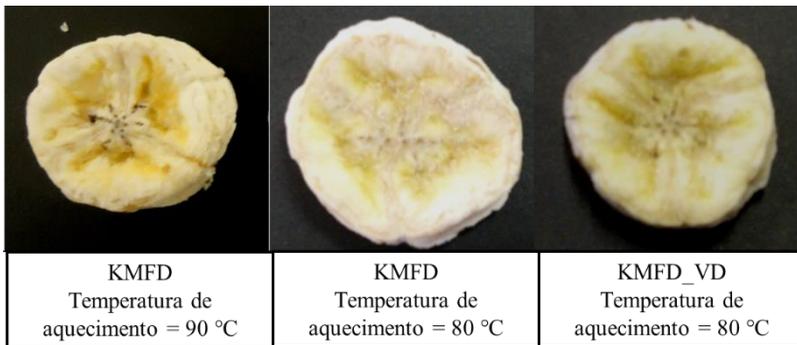
Observando os dados de densidade aparente apresentados na Tabela 3.1, nota-se que as amostras secas por KMFD com temperatura de aquecimento de 90 °C apresentaram valores mais elevados que as amostras secas por KMFD com temperatura de aquecimento de 80 °C. Com o aumento da temperatura de aquecimento do meio aumenta-se a taxa de transferência de calor para a amostra, fazendo com que a água no interior da amostra seja removida a uma taxa maior. A perda de água e o uso de altas temperaturas aumentam o *stress* mecânico sofrido pela estrutura celular dos alimentos, acarretando na mudança de forma e diminuição da dimensão (MAYOR e SERENO, 2004). O menor valor de densidade aparente encontrado foi para as amostras de banana secas por KMFD_VD, uma vez que o volume das amostras não sofre grandes reduções.

Alimentos sólidos e semi-sólidos são sistemas heterogêneos, constituídos de uma matriz sólida que geralmente mantém grandes quantidades de uma fase líquida, que em muitos casos pode ser considerada como uma solução aquosa. Geralmente a matriz sólida desses sistemas é composta por biopolímeros (AGUILERA e STANLEY, 1999). A estrutura particular do material e as características mecânicas dos seus elementos, em equilíbrio, definem o volume da amostra, seu tamanho e forma. Durante a secagem, a perda de água gera tensões na estrutura

celular provocando o encolhimento ou colapso da mesma. Além disso, podem ocorrer mudanças na forma do produto. Este fato foi constatado para as amostras submetidas à secagem por KMFD a diferentes temperaturas de aquecimento e para as submetidas à técnica de KMFD_VD. Para todas as técnicas de secagem estudadas foi observado um encolhimento da matriz celular. As amostras submetidas à técnica de secagem por KMFD com temperatura de aquecimento da câmara de 90 °C foram as que apresentaram o maior encolhimento. O menor encolhimento foi observado para as amostras de banana submetidas à técnica de KMFD_VD. Vale lembrar que, em todas as técnicas estudadas, as amostras foram aquecidas até a temperatura de 60 °C. Aumentando-se a temperatura de aquecimento aumenta-se o gradiente de temperatura entre a amostra e o meio, o que facilita a difusão de umidade do interior da fruta para a superfície.

Na Figura 3.14 estão apresentadas fotografias de amostras de bananas desidratadas por KMFD com temperaturas de aquecimento da câmara de 80 °C e 90 °C, e de amostras de banana desidratadas por KMFD seguido de secagem a vácuo.

Figura 3.14. Fotografias de amostras de bananas desidratadas por KMFD com temperaturas de aquecimento da câmara de 80 °C e 90 °C, e de amostras de banana desidratadas por KMFD seguido de secagem a vácuo.



Na figura 3.14 é possível observar que as amostras mantêm a cor semelhante à cor das amostras *in natura*. Porciuncula (2010), ao secar bananas por CMFD (*convective multi-flash drying*), observou que as

amostras não apresentaram o escurecimento característico das amostras secas pela técnica convectiva.

3.4 Considerações parciais

Pelas diferentes técnicas de secagem estudadas obtiveram-se amostras de bananas desidratadas crocantes, com baixo teor de umidade e baixa atividade de água. Além disso, as amostras não apresentaram escurecimento visual, devido às baixas temperaturas utilizadas durante a secagem.

Na técnica de secagem por KMFD foi observada uma diminuição no encolhimento e um aumento na porosidade das amostras com a diminuição da temperatura de aquecimento da câmara de secagem. Não foi observado diferenças entre os teores de umidade e atividade de água das amostras secas. Pôde-se observar um aumento crescente na força de penetração das amostras com o decorrer da secagem.

As amostras de bananas desidratadas obtidas pela técnica de KMFD_VD apresentaram alta porosidade, encolhimento pouco evidente e textura crocante. Esta técnica apresenta-se como uma alternativa viável para a obtenção de frutas desidratadas crocantes e com alta porosidade.

Capítulo 4

4. Estudo da influência do método de secagem na microestrutura e propriedades de textura de banana (var.prata)

4.1 Introdução

A desidratação é uma das técnicas mais utilizadas para melhorar a estabilidade dos alimentos, uma vez que reduz a atividade de água, reduz a atividade microbiológica e minimiza mudanças químicas e físicas durante o armazenamento (MAYOR e SERENO, 2004). As propriedades estruturais dos alimentos tais como densidade aparente, densidade real e porosidade são significativamente afetadas pelo método de secagem e condições utilizadas. O conhecimento dessas propriedades e de como o processo de secagem às influencia é importante, uma vez que elas são responsáveis pela caracterização da qualidade do produto obtido.

Tradicionalmente, secagem convectiva, secagem a vácuo e liofilização, além da desidratação osmótica, como método de pré-desidratação, são as técnicas de desidratação mais comumente utilizadas. Durante a secagem, a retirada da umidade afeta fortemente as propriedades de textura do produto, devido ao encolhimento da estrutura. Materiais secos pelo método convectivo são caracterizados por possuírem baixa porosidade e alta densidade aparente (ZOGZAS et al., 1994; RAMÍREZ et al., 2012). A técnica de liofilização produz alimentos secos com baixa densidade aparente, devido à alta porosidade resultante. Além disso, a estrutura, cor e aroma do produto são preservados. Entretanto, essa técnica possui a desvantagem de ser dispendiosa e exigir longos períodos de secagem (KROKIDA e MAROULIS, 1997).

Por outro lado, processos de secagem que utilizam ciclos de aquecimento-pulso de vácuo produzem frutas com textura crocante, semelhante às obtidas pelo processo de liofilização (ZOTARELLI et al., 2012). Essa classe de processo baseia-se na aplicação de sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo a frutas e hortaliças, até que a umidade final desejada seja alcançada (LAURINDO, 2011; ZOTARELLI et al., 2012). O produto é aquecido à pressão atmosférica, quando é atingida a temperatura desejada, uma redução súbita de pressão (pulso de vácuo) é aplicada, o que leva à evaporação de água (evaporação *flash*) e ao resfriamento do produto. O aquecimento pode ocorrer por diferentes

meios, como radiação, convecção, condução e por micro-ondas (LAURINDO, 2011). Zotarelli et al. (2012) ao secar mangas e bananas utilizando a técnica com o aquecimento convectivo (CMFD) aplicou 12 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo em mangas e bananas e obteve, ao final do processo, frutas desidratadas com textura crocante e com baixo teor de umidade.

A porosidade é uma das propriedades estruturais que determinam a qualidade de um alimento seco e crocante. A perda de água que ocorre durante a secagem reduz o tamanho do tecido celular, causando o encolhimento do produto. Se a redução no volume for estritamente proporcional à perda de água, o encolhimento é classificado como ideal. Por outro lado, se a redução de volume é menor que o volume de água evaporada, a operação de secagem gera um aumento da porosidade do material. A estrutura do produto seco é fortemente dependente da natureza do material, bem como das condições de secagem (MADIOULI et al., 2007). Esses dois fenômenos têm sido amplamente estudados em amostras de bananas utilizando diferentes técnicas de secagem, como na secagem convectiva (LIMA et al., 2002; TALLA et al., 2004), secagem com pulso HTST (HOFSETZ et al., 2007), na secagem por CMFD (*convective multi-flash drying*) (ZOTARELLI et al., 2012) e na liofilização (KROKIDA e MAROULIS, 1997).

Apesar da enorme importância na qualidade dos alimentos, o encolhimento de frutas e vegetais tem sido muitas vezes estudado por medições diretas inferidas a partir de alterações nos parâmetros relacionados, tais como a porosidade e densidade. A dificuldade nessas medições é que as alterações nas dimensões estruturais durante a secagem não são isotrópicas. A análise de imagens obtidas em condições adequadas pode auxiliar na avaliação complementar da microestrutura e do encolhimento das amostras durante e após a secagem (AGUILERA, 2005).

Ao sofrer processamento, a microestrutura do alimento é destruída e reconstituída, o que pode ser entendido como uma série de operações de reestruturação e reorganização. De acordo com Aguilera e Stanley (1999), define-se como microestrutura de alimentos a organização e interação de seus componentes.

O objetivo desta etapa do trabalho foi analisar a influência do método de secagem na formação e no comportamento da microestrutura de bananas (var. Prata). As técnicas de secagem analisadas foram: secagem por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-*

flash seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD). As mudanças microestruturais, ocorridas durante as técnicas de secagem estudadas, foram analisadas através de micrografias eletrônicas de varredura e correlacionadas com a densidade aparente, porosidade acessível durante a secagem e encolhimento das amostras.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Preparação das amostras

Amostras de banana (*Musa sapientum* L., var Prata) foram preparadas como citado no item 3.2.1.

4.2.2 Secagem

Após o preparo, as amostras de banana foram submetidas à secagem. Foram utilizadas diferentes técnicas de secagem: *Conductive multi-flash drying* (KMFD), *Conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).

4.2.2.1 Descrição do equipamento utilizado para a *Conductive multi-flash drying* (KMFD) e para a *Conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD)

O equipamento utilizado para a realização das secagens por KMFD e KMFD_VD está descrito no item 3.2.3.

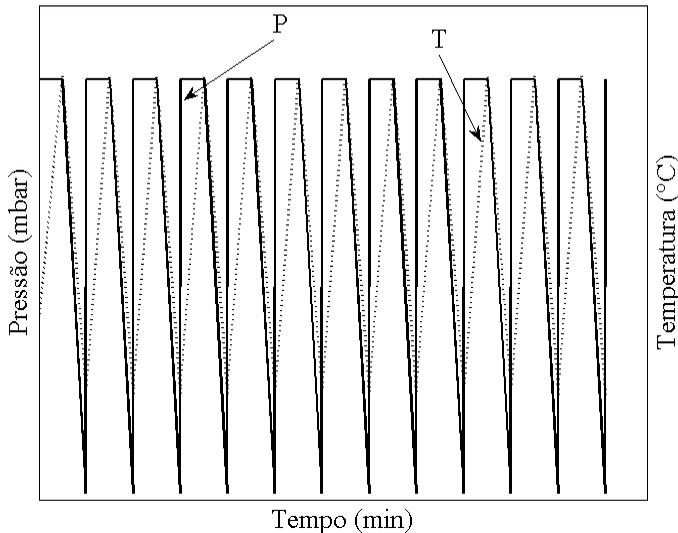
4.2.2.2 *Conductive multi-flash drying* (KMFD)

Após a preparação das amostras, as mesmas foram colocadas em filmes plásticos (de myllar®) e acondicionadas no interior da câmara de secagem sobre as placas aquecidas. A temperatura das placas foi mantida a 80 °C, assim como a temperatura da câmara. Foram inseridos termopares em cinco amostras para o monitoramento da temperatura. O aquecimento das amostras foi realizado à pressão atmosférica. Atendido 60 °C no interior das frutas, um pulso de vácuo era aplicado e o vácuo

mantido por 5 minutos, antes do restabelecimento da pressão atmosférica e aplicação de um novo ciclo de aquecimento-pulso de vácuo.

Na Figura 4.1 está representado um diagrama esquemático do perfil pressão-temperatura-tempo. No total foram aplicados 12 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.

Figura 4.1. Diagrama esquemático do perfil pressão-temperatura-tempo para o processo de KMFD.



4.2.2.3 *Conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD)

A metodologia utilizada para a secagem por KMFD_VD é a mesma apresentada no item 3.2.2.3.

4.2.2.4 Secagem convectiva (CD)

As amostras de banana foram secas em estufa convectiva (TE 394/2, TECNAL, Brasil) a 60 °C, umidade relativa de 12 % e velocidade do ar de 1 m/s. A umidade relativa do sistema foi medida com um

higrômetro (ThermoHygrometer, TESTO610, Alemanha) e a velocidade do ar foi medida com um anemômetro portátil (Anemometer TESTO 425, Alemanha) durante a secagem. Amostras foram retiradas do secador a cada 4 horas para as determinações da densidade aparente e real, porosidade acessível e encolhimento.

4.2.2.5 Secagem a vácuo (VD)

As amostras de banana foram secas em estufa a vácuo (440-DE, Ethick Technology, Brasil) a 60 °C. Amostras foram retiradas do secador a cada 2 horas para as determinações da densidade aparente e real, porosidade acessível e encolhimento.

4.2.3 Determinações experimentais

4.2.3.1 Densidade aparente e real, porosidade acessível e encolhimento

A densidade aparente e real, porosidade acessível e encolhimento foram determinados segundo a metodologia descrita no item 3.2.3.1.

4.2.3.2 Teor de umidade

O teor de umidade das amostras foi determinado segundo a metodologia descrita no item 3.2.4.1.

4.2.3.3 Atividade de água (a_w)

A atividade de água das amostras foi determinada segundo a metodologia descrita no item 3.2.4.1.

4.2.4 Mudanças microestruturais

4.2.4.1 Preparo das amostras

Durante a secagem por KMFD e KMFD_VD, amostras de frutas foram retiradas do secador após a aplicação de cada um dos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, e imediatamente congeladas em nitrogênio

líquido, para posterior desidratação em liofilizador de bancada (Liotop L101, Liobras, Brasil). O mesmo procedimento de congelamento em nitrogênio líquido e liofilização foram realizados para as amostras submetidas às técnicas de secagem convectiva e a vácuo. Durante a secagem convectiva e secagem a vácuo, as amostras foram retiradas a cada 4h e 2 h de processo, respectivamente.

4.2.4.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens de microscopia das amostras foram realizadas no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) -UFSC. A técnica foi utilizada para analisar a evolução da microestrutura interna das frutas durante a secagem por KMFD, KMFD_VD, secagem convectiva e secagem a vácuo. O recobrimento das amostras com ouro foi realizado utilizando um metalizador LEICA (EM SCD500). O microscópio utilizado foi o de varredura (JEOL JSM 6390LV) com fonte de elétrons de tungstênio e detector de elétrons secundários e retro-espalhados.

4.2.5 Testes mecânicos

As amostras desidratadas foram submetidas aos ensaios de penetração como descrito no item 3.2.4.2.

4.3 Resultados e Discussão

Na Tabela 4.1 estão apresentadas algumas propriedades físico-químicas para as amostras de bananas *in natura* utilizadas neste estudo. Os resultados apresentados representam a média entre 12 amostras.

Analisando a Tabela 4.1, verifica-se que a densidade aparente das amostras de banana é próxima à densidade aparente da água líquida (1000 kg m^{-3}), devido ao seu alto teor de umidade ($2,303 \text{ kg kg}^{-1}$). O valor da porosidade das amostras *in natura* foi maior que o encontrado por Hofsetz et al. (2007), devido à variabilidade das frutas, associada com o grau de maturação e espécie.

Tabela 4.1- Propriedades físico-químicas das amostras de banana *in natura*

Propriedade	Valor médio
Teor de umidade (kg kg ⁻¹)	2,303±0,079
Atividade de água (a _w)	0,981±0,004
Sólidos solúveis (%)	23,3±1,5
Densidade aparente (kg m ⁻³)	1029±33
Densidade real (kg m ⁻³)	1338±26
Porosidade (%)	23,72±2,19

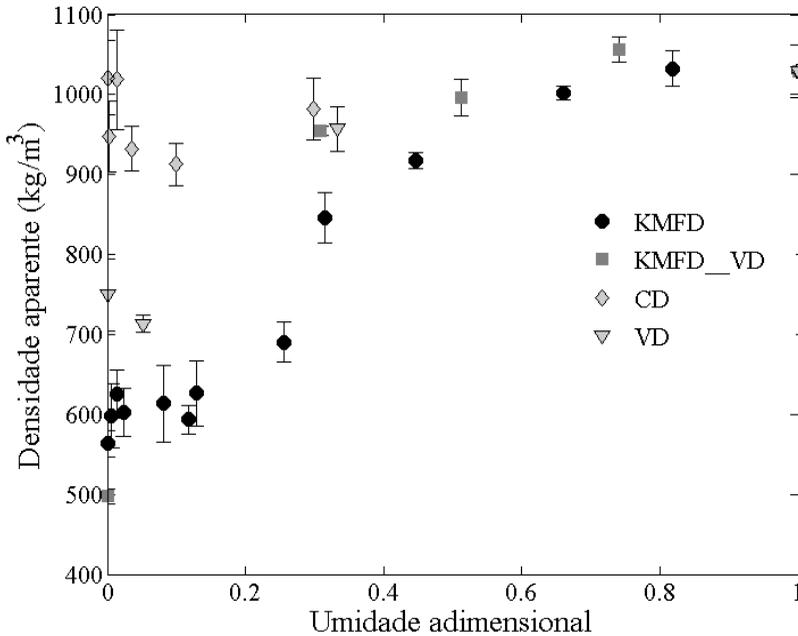
4.2.6 Densidade Aparente

Os resultados das densidades aparente das amostras de bananas secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD) estão apresentadas na Figura 4.2.

Ao se observar o comportamento da densidade aparente com o teor de umidade (Figura 4.2), nota-se que o processo de secagem afeta significativamente essa propriedade. Esta constatação está de acordo com Krokida e Maraoulis (1997), segundo os quais a densidade aparente é fortemente influenciada pelo método de secagem.

A densidade aparente das amostras secas pelo método convectivo não sofreu alterações durante o processo de secagem, oscilando em valores próximos a 1000 kg/m³. Pela figura 4.2 observa-se uma variação linear no volume das amostras durante o processo de secagem, isto é, a quantidade de água removida variou linearmente com o volume, acarretando em pequenas alterações na densidade aparente. Karathanos et al. (1996), ao secar maçãs com ar quente a 60 °C, não observou variação significativa na densidade aparente das amostras.

Figura 4.2. Evolução das densidades aparente das amostras de bananas durante os processos de secagem por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).

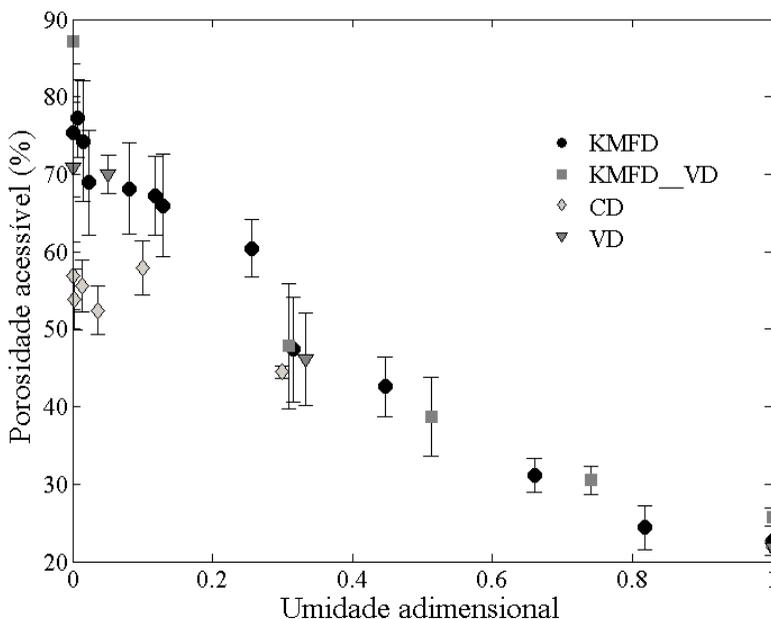


Reduções da densidade aparente das amostras foram observadas no decorrer dos processos de secagem por KMFD, KMFD_VD e VD. As maiores reduções na densidade aparente foram de 46% e 53% para as amostras submetidas às técnicas de KMFD e KMFD_VD, respectivamente. A redução da densidade aparente das amostras de banana se deve à perda de água e à formação de poros durante a secagem (LIU et al., 2012). Krokida e Maraoulis (1997) observaram 73 % de redução na densidade aparente de amostras de banana submetidas ao processo de liofilização. As amostras secas a vácuo (VD) apresentaram uma redução na densidade aparente de aproximadamente 28 %.

4.2.7 Porosidade acessível das amostras durante a secagem

Os resultados da porosidade acessível das amostras de bananas secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD) estão apresentadas na Figura 4.3.

Figura 4.3. Porosidade acessível das amostras de bananas secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).



Na Figura 4.3, pode-se observar que a porosidade acessível das amostras submetidas à secagem convectiva sofreu um aumento gradativo, chegando a 56 % no final o processo. Ao final da secagem a vácuo, a porosidade das amostras de banana foi de 70 %, valor coerente com os valores reportados por Krokida e Maraoulis (1997) ao secar bananas pela mesma técnica. Madiouli et al. (2007) afirmam que se a redução de volume é estritamente proporcional à perda de massa, o encolhimento é

considerado ideal. Por outro lado, se a redução de volume é menor que o volume de água evaporada, a operação de secagem gera um aumento da porosidade do material. As maiores porosidades das amostras de banana foram determinadas para as secagens por KMFD e KMFD_VD. Ao final da secagem por KMFD_VD, as amostras de banana apresentaram valores de porosidade semelhantes aos reportados na literatura para amostras submetidas ao processo de liofilização (70 – 80 %) (RAHMAN, 2001).

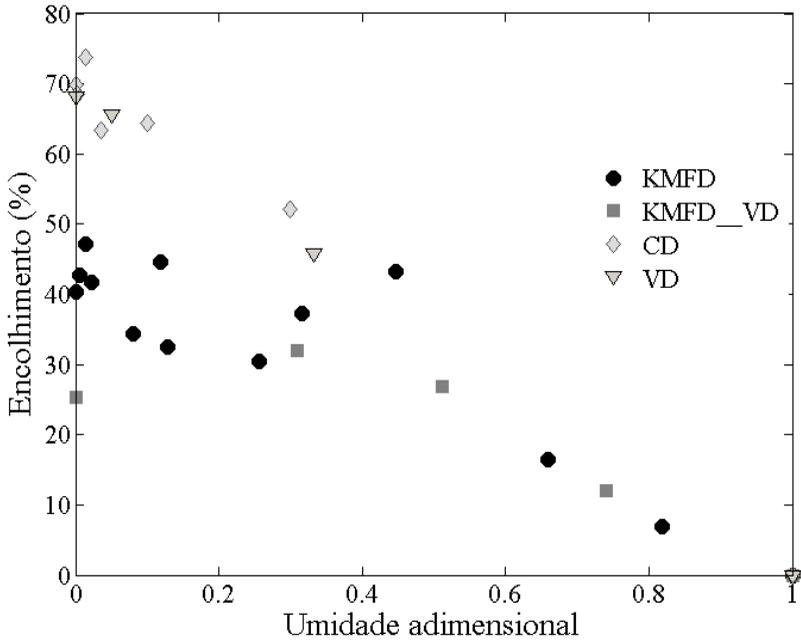
4.2.8 Encolhimento

Uma das mais importantes mudanças físicas que ocorre no alimento durante a secagem é o encolhimento. Durante a secagem, a perda de água gera tensões na estrutura celular provocando o encolhimento ou colapso da mesma. Além disso, podem ocorrer mudanças na forma do produto e, ocasionalmente, rachaduras no alimento (MAYOR e SERENO, 2004).

Os resultados do encolhimento sofrido pelas amostras de bananas secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD) estão apresentados na Figura 4.4.

Pela Figura 4.4 observa-se que os maiores encolhimentos ocorreram para as amostras submetidas ao processo de secagem por ar quente. As baixas taxas de secagem obtidas durante a secagem convectiva facilitam a acomodação da matriz porosa. Por outro lado, as menores reduções volumétricas foram observadas para as amostras secadas pelos processos de KMFD e KMFD_VD. Nesses processos, a água é evaporada e removida rapidamente da amostra ao se aplicar o pulso de vácuo (evaporação *flash*), fazendo com que a matriz porosa seja expandida devido ao grande volume de vapor gerado nas baixas pressões aplicadas. Cabe ressaltar que o volume específico do vapor de água à pressão atmosférica é de aproximadamente 1,67 m³/kg, valor que aumenta para 88,66 m³/kg quando a pressão é reduzida para 15 mbar (GEANKOPLIS, 2003). Zotarelli et al. (2012) observaram comportamento semelhante ao secar amostras de manga e banana por CMFD (*convective multi-flash drying*).

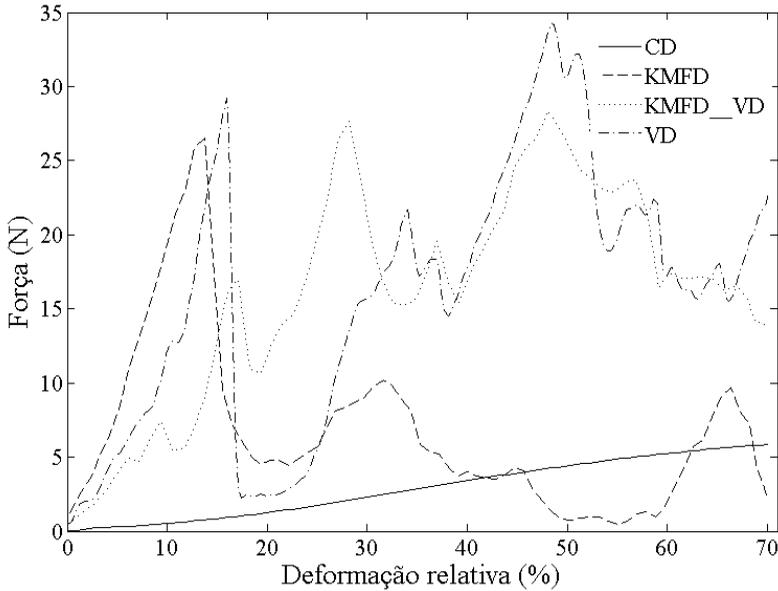
Figura 4.4. Encolhimento das amostras de bananas secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).



4.2.9 Testes mecânicos

Na Figura 4.5 estão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos de penetração para amostra de banana, submetidas aos processos de secagem por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secas com ar quente (CD) e secas a vácuo (VD).

Figura 4.5. Curvas força x deformação relativa das amostras de banana secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD), secadas por *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secadas convectivamente (CD) e sob vácuo (VD).



Pela Figura 4.5 nota-se que a técnica de secagem utilizada influenciou a textura final do produto seco. A migração da umidade e a transferência de calor produzem tensões e deformações na estrutura do alimento, causando encolhimento da matriz sólida, que influenciam diretamente a textura do produto desidratado (LOZANO et al., 1983; TSAMI e KATSIOTI, 2000; PRACHAYAWARAKORN et al., 2008). Durante o processo de secagem convectiva a amostra fica exposta a uma temperatura branda por um longo período de tempo. A baixa temperatura do ar de secagem faz com que a água do interior da amostra difunda lentamente para a superfície para que ocorra a secagem. A lentidão na remoção de água faz com que a matriz sólida possa se acomodar (empacotar).

Em materiais com estrutura porosa e quebradiça, a força de penetração oscila muito durante a quebra da parede e desintegração da estrutura (LAURINDO e PELEG, 2008; TAKEUCHI et al., 2005). Para

as curvas das amostras secas por KMFD, KMFD_VD e VD esse comportamento foi observado. Zotarelli et al. (2012) ao secar banana e manga por CMFD, observaram diversos picos nas curvas força x deformação, evidenciando a formação da matriz porosa e a estrutura quebradiça das amostras.

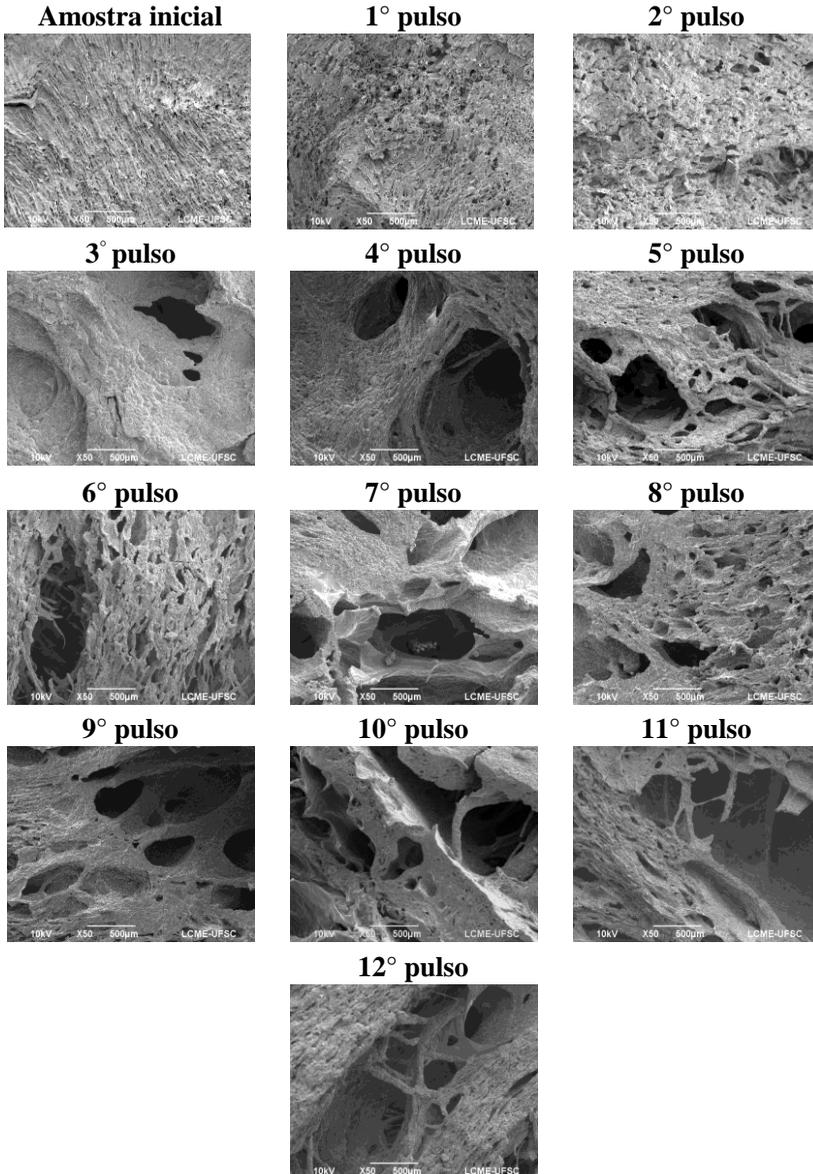
As amostras de banana submetidas ao processo de secagem por ar quente (secagem convectiva) necessitaram de baixas forças de penetração (~5N), ao contrário das frutas desidratadas pelos demais processos, que necessitaram de forças de aproximadamente 25N para serem perfuradas pela *probe*. Esse fato se deve ao endurecimento da superfície do material ocasionado pelas altas taxas de secagem (RAMOS et al., 2004) atingidas nos processos de KMFD, KMFD_VD e secagem a vácuo.

4.2.10 Microscopia eletrônica de varredura das amostras de banana

Em intervalos pré-determinados, para os diferentes processos de secagem investigados, amostras de banana foram retiradas do secador, preparadas e micrografadas. Nas Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 estão apresentadas as micrografias das amostras de banana submetidas os diferentes processos de secagem, *conductive multi-flash drying* (KMFD), secas por *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secas convectivamente (CD) e secas a vácuo (VD).

Na Figura 4.6 estão apresentadas as micrografias das amostras submetidas à secagem por *conductive multi-flash drying* (KMFD). Cada micrografia apresentada na figura representa a imagem da amostra após a aplicação de um ciclo de aquecimento-pulso de vácuo.

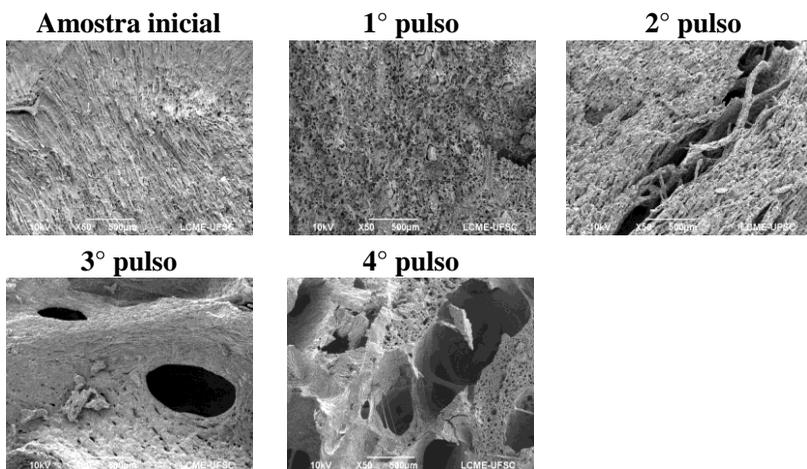
Figura 4.6. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras submetidas à secagem por *conductive multi-flash drying* (KMFD) (aumento de 50X).



Observa-se que a formação da matriz porosa da banana ocorre a partir da aplicação do 3º ciclo de aquecimento-pulso de vácuo. Ao final do processo, a fruta apresenta grandes poros distribuídos de forma aleatória. Louka e Allaf (2002), ao secar batatas pela técnica de DIC, e Zotarelli et al. (2012) ao secarem banana e manga pela técnica de CMFD, reportaram o mesmo comportamento da matriz porosa.

Na Figura 4.7 estão apresentadas as micrografias das amostras submetidas à secagem por *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD).

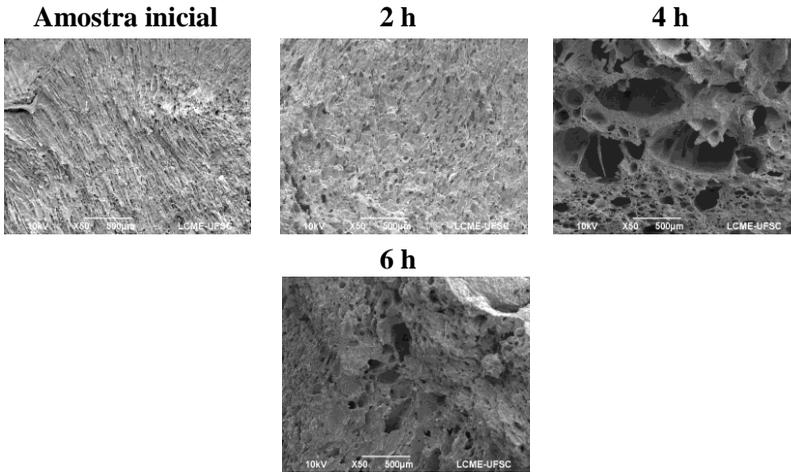
Figura 4.7. Imagens de microscopia eletrônica das amostras submetidas à secagem por *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD) (aumento de 50X).



A Figura 4.7 mostra que ao final da secagem as amostras apresentaram a formação da matriz porosa característica do processo de secagem por KMFD, indicando que não há a necessidade da aplicação de 12 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.

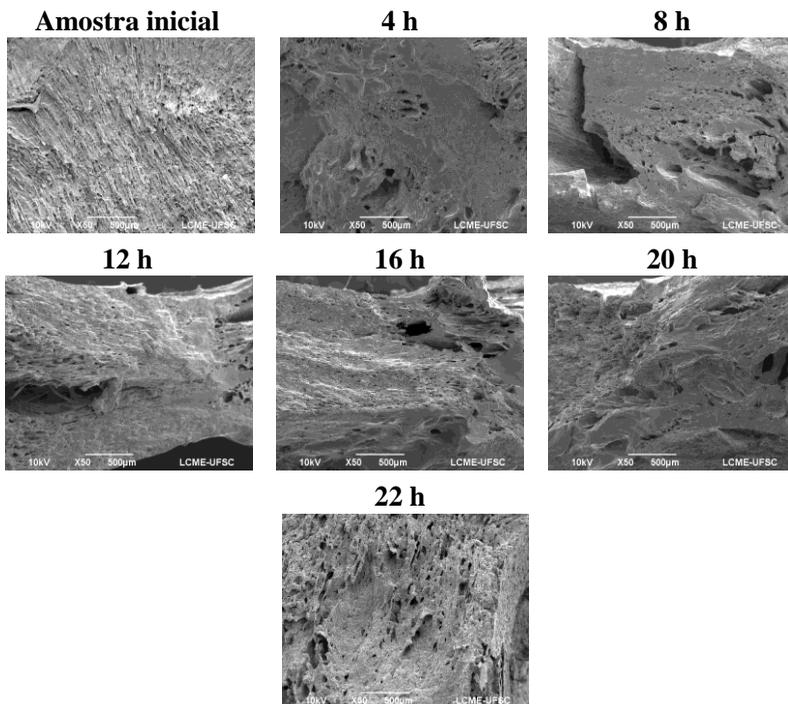
Na Figura 4.8 estão apresentadas as micrografias das amostras submetidas à secagem a vácuo (VD).

Figura 4.8. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras submetidas à secagem a vácuo (VD) (aumento de 50X).



Na Figura 4.9 estão apresentadas as micrografias das amostras submetidas à secagem convectiva (CD). Um processo lento de secagem leva a um encolhimento uniforme, porém mais pronunciado, enquanto que uma secagem mais rápida pode resultar em um encolhimento menor. Este fato pode ser observado ao se comparar a Figura 4.8 (secagem a vácuo) com a Figura 4.9 (secagem convectiva). Na secagem a vácuo utiliza-se baixas pressões e temperaturas moderadas, obtendo-se maiores taxas de evaporação da umidade e um produto final mais poroso se comparado com a secagem tradicional com ar quente (KROKIDA et al., 1998). Acompanhando as micrografias obtidas durante a secagem, nota-se que com o passar das horas há um aumento nos espaços vazios no interior das amostras. Com a saída da água, os espaços deixados por ela são substituídos por ar.

Figura 4.9. Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras submetidas à secagem convectiva (CD) (aumento de 50X).



Pela figura 4.9 é possível observar o retraimento do volume das amostras no decorrer da secagem. Condições severas de secagem levam ao fenômeno de colapso da matriz, ou seja, o volume de ar no interior da amostra é reduzido. No decorrer da secagem apenas uma fração do volume de água é substituído por ar, pois o restante desaparece como consequência do fenômeno de encolhimento (KHALLOUFI et al., 2009).

Segundo Brennan (1994), uma secagem conduzida de forma lenta (baixa temperatura), alta velocidade e baixa umidade relativa do ar proporciona produtos finais densos e uniformes. Este fato pôde ser observado pelas micrografias e confirmado através dos valores da densidade aparente apresentados na Figura 4.2. As amostras de banana secas convectivamente apresentaram altos valores de densidade quando comparados aos demais processos estudados.

4.3 Considerações parciais

Os parâmetros densidade aparente, porosidade acessível e encolhimento foram fortemente influenciados pelo processo de secagem. As amostras secadas pela técnica de secagem convectiva foram as que apresentaram um maior encolhimento da estrutura e menor porosidade. As amostras submetidas à secagem pelas técnicas de KMFD e KMFD_VD apresentaram alta porosidade e não foi observado um retraimento significativo na estrutura.

Pela escolha do método de secagem e suas variáveis de processo é possível controlar a microestrutura e as propriedades de textura de amostras de banana desidratada.

As técnicas de secagem utilizadas para analisar a influência do método de secagem na formação e no comportamento da microestrutura de bananas (var. Prata) foram eficientes e podem ser utilizadas para analisar o comportamento da microestrutura de outras frutas e vegetais submetidas a processos de secagem semelhantes.

Capítulo 5

5. Estudo da influência de diferentes taxas de redução da pressão do sistema durante a secagem por *Conductive multi-flash drying* (KMFD) nas propriedades estruturais e de textura do produto desidratado.

5.1 Introdução

Uma das técnicas de preservação de alimentos mais antigas utilizadas pelo homem consiste na remoção de umidade dos alimentos pelo processo de secagem. A remoção de umidade provoca diminuição da atividade de água do produto, inibindo o desenvolvimento de micro-organismos e retardando deteriorações de origem físico-química (CANO-CHAUCA et al., 2004). A fruta seca é o produto obtido pela perda parcial da água da fruta madura inteira ou em pedaços, atingindo-se um teor de umidade final que varia entre 15 e 25%. Nesse processo, normalmente ocorrem mudanças significativas na cor, sabor e textura do produto, quando comparado com a fruta fresca da qual se originam (MOTA, 2005).

Foust et al. (1980) classificam os materiais em função do comportamento durante a secagem em duas classes principais. A primeira é constituída por sólidos cristalinos que retêm a umidade nos interstícios entre as partículas, ou em poros superficiais, rasos e abertos. A outra classe é constituída de materiais amorfos, ou fibrosos ou gelatinosos. Nestes materiais, os teores de umidade de equilíbrio são em geral elevados, o que indica ser significativa a quantidade de água que é retida na estrutura do sólido, ou em poros tão finos que sua pressão de vapor é significativamente reduzida. Em virtude de a água presente fazer parte da estrutura, os sólidos são afetados pela remoção de umidade.

A escolha da técnica de secagem utilizada determina a qualidade do produto final desidratado. Alguns estudos com frutas e hortaliças demonstram que a secagem com ar quente não fornece produtos de boa qualidade, principalmente devido ao prolongado tempo de secagem, que degrada as características de cor, textura e volume do produto final (RATTI, 2001).

Produtos liofilizados são, em geral, superiores aos produtos obtidos por meio de técnicas convencionais de secagem. A liofilização é uma boa alternativa para conservar carnes, verduras e frutas, suscetíveis a reações de escurecimento ou que contenham grandes quantidades de

proteínas ou voláteis (BARBOSA-CÁNOVAS, 2000). Devido à ausência de água líquida no produto e às baixas temperaturas necessárias para o processo, a maioria de reações químicas e microbiológicas são reduzidas, conferindo ao produto final uma excelente qualidade geral (RATTI, 2001).

A técnica de secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, descrita no documento de patente PI 1107173-7, produz frutas desidratadas com qualidade semelhante à de produtos obtidos pela técnica de liofilização. Essa técnica é baseada no aquecimento do produto, seguida de uma descompressão quase instantânea da câmara de secagem. Se um alimento úmido e poroso é submetido à uma redução da pressão, parte da água presente na sua composição evapora, resfriando sua massa de maneira homogênea, até a temperatura de saturação da água, na pressão final alcançada após a redução da pressão. Geralmente, a maioria dos alimentos possui em sua composição água e sólidos solúveis e insolúveis. No resfriamento evaporativo, uma quantidade de calor igual ao calor latente de evaporação deve ser absorvido pela água evaporada (WANG e SUN, 2001).

O objetivo deste estudo é analisar o comportamento do produto desidratado obtido pela técnica de KMFD (*Conductive multi-flash drying*), utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Preparação das amostras

Amostras de banana (*Musa sapientum L.*, var Prata) foram preparadas segundo a metodologia descrita no item 3.2.1.

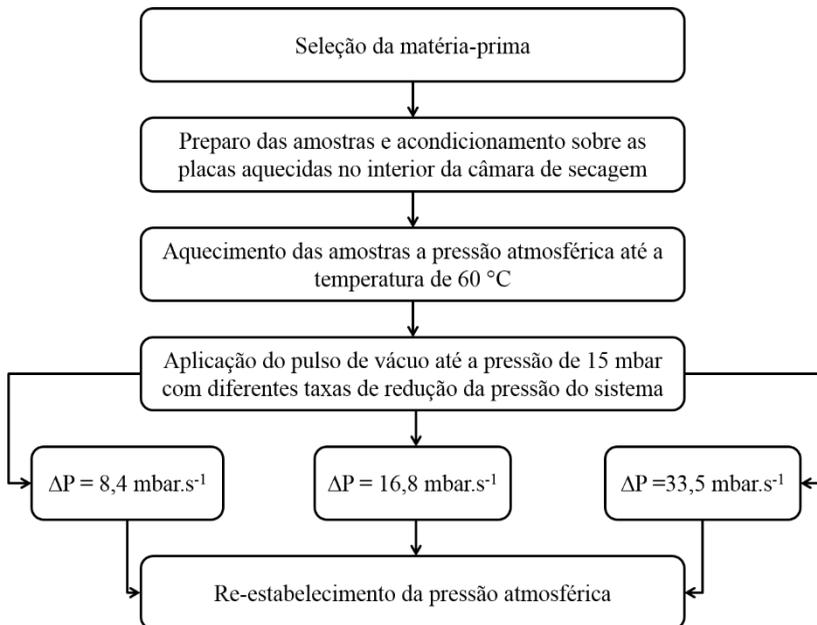
5.1.2 Secagem

Após o preparo, as amostras de banana foram submetidas à secagem por *Conductive multi-flash drying* (KMFD).

5.1.2.1 *Conductive multi-flash drying* (KMFD)

O fluxograma operacional utilizado para a secagem por *Conductive multi-flash drying* (KMFD) está apresentado na Figura 5.1

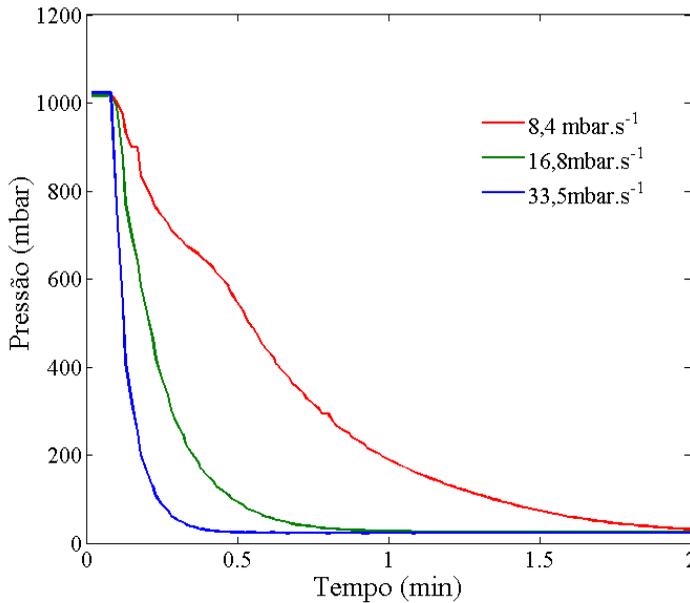
Figura 5.1- Fluxograma operacional utilizado para a técnica de secagem de amostras de banana por *Conductive multi-flash drying* (KMFD).



Após a preparação, as amostras foram colocadas em filmes plásticos (myllar®) e colocadas no interior da câmara de secagem sobre as placas aquecidas. A temperatura das placas foi mantida a 80 °C, assim como a temperatura da câmara. Foram inseridos termopares em cinco amostras para o monitoramento da temperatura. O aquecimento das amostras foi realizado à pressão atmosférica. Atingido 60 °C no interior das frutas, a pressão no interior da câmara foi reduzida, pela simples abertura da válvula, com diferentes taxas de redução da pressão, ou seja, 8,4, 16,8 e 33,5 mbar.s⁻¹, até a pressão final de 15 mbar. Transcorridos 5 minutos de vácuo, a pressão do sistema foi reestabelecida e um novo ciclo de aquecimento-pulso de vácuo aplicado. No total foram aplicados 12 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.

Na Figura 5.2 está representado um diagrama esquemático do perfil pressão x tempo para as diferentes taxas de redução da pressão estudadas.

Figura 5.2. Diagrama esquemático do perfil pressão x tempo para as diferentes taxas de redução da pressão estudadas.



5.1.3 Parâmetros de qualidade do produto final desidratado

5.1.3.1 Teor de umidade

O teor de umidade das amostras foi determinado como descrito no item 3.2.4.1.

5.1.3.2 Determinação das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do produto desidratado foram determinadas segundo a metodologia descrita no item 3.2.4.5.

5.1.3.3 Volume real e aparente, porosidade acessível e encolhimento

O volume real e aparente, a porosidade acessível e o encolhimento foram determinados segundo metodologia descrita no item 3.2.4.6.

5.1.3.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

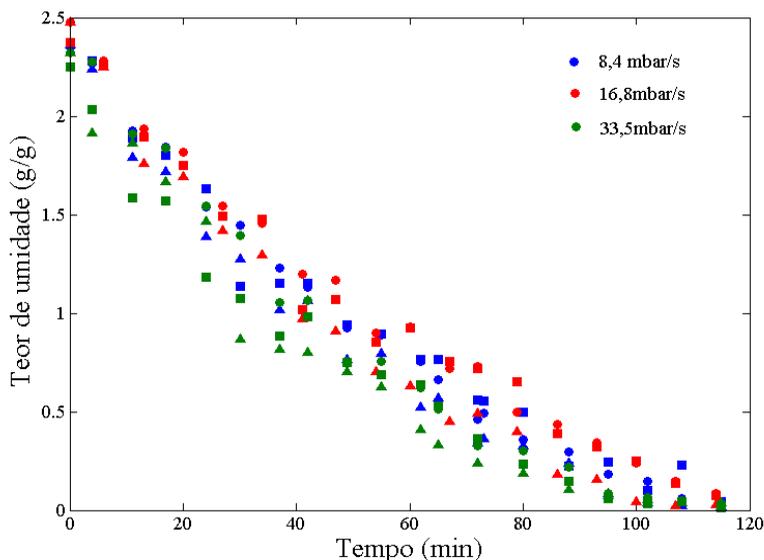
As imagens de microscopia das amostras desidratadas obtidas por KMFD com diferentes taxas de redução da pressão do sistema foram realizadas conforme metodologia descrita no item 4.2.4.2.

5.3 Resultados e discussão

Na Figura 5.3 estão representadas as evoluções do teor de umidade das amostras de banana submetidas a diferentes taxas de redução da pressão do sistema ($8,4 \text{ mbar}\cdot\text{s}^{-1}$, $16,8 \text{ mbar}\cdot\text{s}^{-1}$ e $33,5 \text{ mbar}\cdot\text{s}^{-1}$) durante a secagem por KMFD. Curvas de mesma cor representam as triplicatas de experimento. É possível observar que não houve diferenças entre as taxas de secagem das amostras de banana submetidas a diferentes taxas de redução da pressão. No início da secagem as amostras continham um teor de umidade de $2,368 \pm 0,072 \text{ g de água/ g de sól. secos}$ e após a aplicação de 12 ciclos de aquecimento pulsos de vácuo, para as diferentes taxas de redução de pressão, esse teor foi reduzido para $0,028 \pm 0,012 \text{ g de água/ g de sól. seco}$.

Durante a aplicação do pulso de vácuo, o produto sofre uma transformação adiabática irreversível. A descompressão induz a evaporação parcial do teor de água do alimento. A quantidade de vapor gerado é dependente da diferença de temperatura entre os dois instantes, ou seja, antes e após a aplicação do vácuo (LOUKA e ALLAF, 2002). Apesar da taxa de descompressão ter sido alterada durante a secagem, em todos os casos a pressão foi reduzida até 15 mbar, ou seja, a temperatura final da etapa de descompressão foi sempre a mesma ($15 \text{ }^\circ\text{C}$).

Figura 5.3- Evolução do teor de umidade das amostras de banana secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.

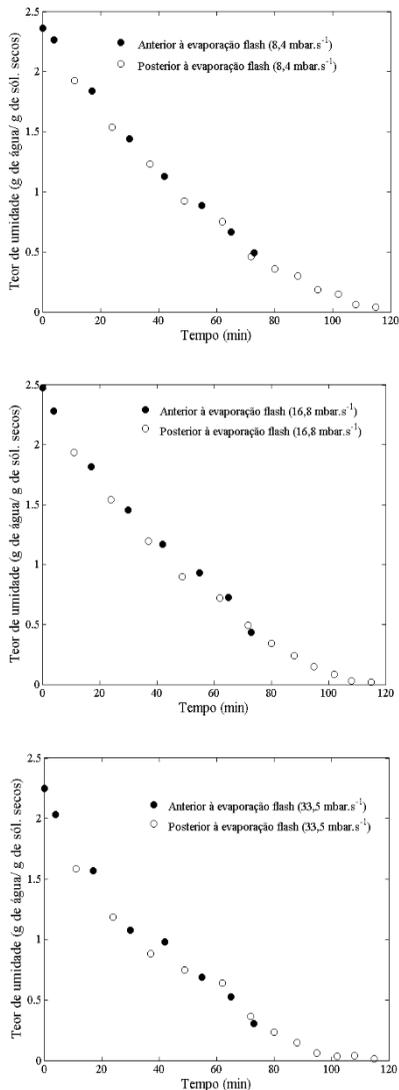


Na Figura 5.4 estão apresentadas as contribuições condutiva e do resfriamento evaporativo (*flash-drying*) para as amostras de banana secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema ($8,4 \text{ mbar}\cdot\text{s}^{-1}$, $16,8 \text{ mbar}\cdot\text{s}^{-1}$ e $33,5 \text{ mbar}\cdot\text{s}^{-1}$). Durante a secagem, a cada aplicação de um ciclo de aquecimento-pulso de vácuo (experimentos realizados em triplicata), amostras de frutas foram retiradas da estufa assim que atingissem a temperatura interna de $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, para a determinação do teor de umidade (ícones sólidos, sem preenchimento). Assim que a temperatura das frutas no interior da câmara atingiam $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ aplicava-se um pulso de vácuo (descompressão súbita da câmara de secagem). Após essa etapa, três amostras eram retiradas da estufa para determinação do teor de umidade (ícones sem preenchimento). As curvas apresentadas são representativas do processo.

Analisando as curvas apresentadas na Figura 5.4, nota-se que aproximadamente 50% da umidade das amostras de banana é removida durante a aplicação dos 3 primeiros ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo. Desses, 78 % são removidos pela contribuição do resfriamento evaporativo e 22 % pela secagem condutiva que ocorre durante a etapa de

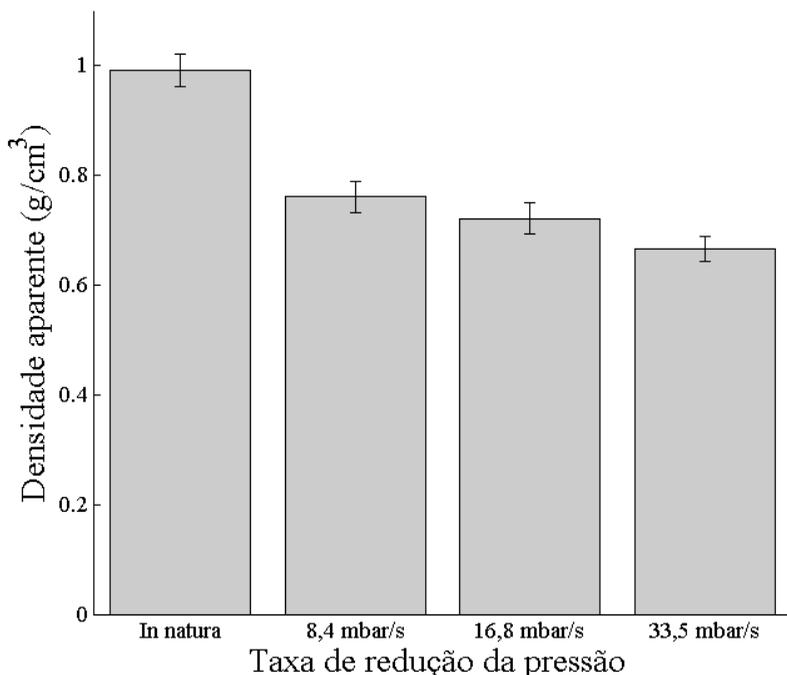
aquecimento das amostras. Essa alta taxa de remoção de umidade se deve à grande quantidade de água livre presente nas amostras. Zotarelli et al. (2012) secaram amostras de manga e banana pela técnica de sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo utilizando a convecção como meio de aquecimento (CMFD). Os autores observaram que a etapa de aquecimento foi responsável pela secagem de aproximadamente 80 % da umidade total das amostras. O calor fornecido pelo ar quente serviu para suprir o calor latente para a evaporação, o que acarretou na elevação dos tempos de secagem (aproximadamente 135 min), devido às baixas taxas de evaporação associadas à secagem convectiva. Entretanto, os autores afirmam que a etapa de descompressão, além de ser responsável pela texturização das amostras, também foi responsável pela remoção da água do interior para a superfície das amostras.

Figura 5.4- Contribuição condutiva e do resfriamento evaporativo (*flash-drying*) para as amostras de banana secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.



Na figura 5.5 estão apresentadas a densidade aparente das amostras de bananas *in natura* e das amostras secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.

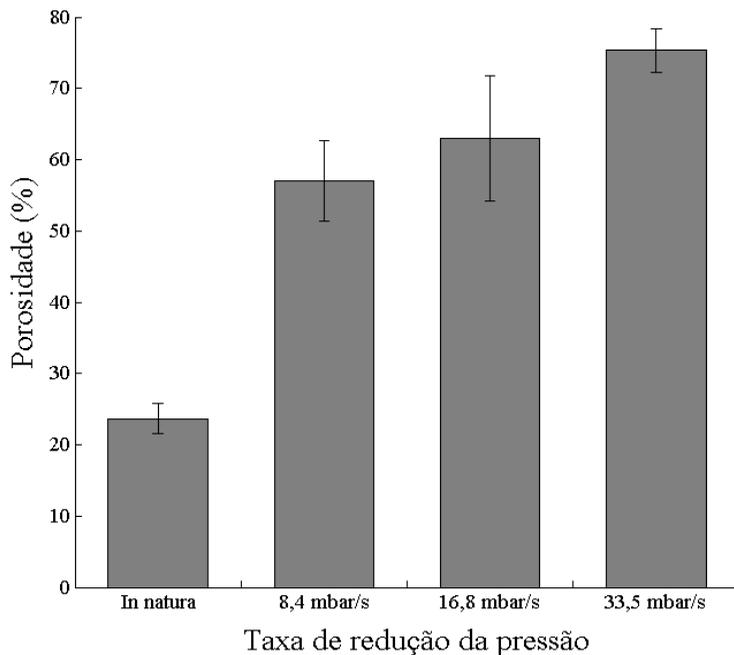
Figura 5.5-Densidade aparente das amostras de bananas *in natura* e das amostras secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.



A redução da densidade aparente das amostras em relação à amostra *in natura* observada na Figura 5.5 é explicada pela perda de água e pela formação de poros durante a secagem (LIU et al., 2012). A taxa de descompressão do sistema não influenciou as densidades aparentes das amostras secas. Na Figura 5.6 estão apresentados os valores das porosidades acessíveis das amostras *in natura* e das amostras de bananas secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.

A formação da matriz porosa é um processo essencialmente dinâmico que depende estritamente da cinética de redução da pressão. No entanto, a quantidade de vapor gerado pela auto-vaporização (resfriamento evaporativo) está relacionada apenas para os estados inicial e final (antes e após a descompressão), mas o impacto do vapor de água formado na modificação da matriz porosa muda com a velocidade da descompressão (LOUKA e ALLAF, 2002). Para a taxa de descompressão de $33,5 \text{ mbar}\cdot\text{s}^{-1}$, a redução da pressão é realizada em um curto intervalo de tempo. Foram necessários 15 s para a redução da pressão atmosférica até a pressão de 15 mbar. Como já discutido, a maior parte da umidade presente na amostra evapora na etapa de descompressão. À pressão atmosférica, o volume específico da água líquida é igual a $0,001 \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$, enquanto o volume específico do vapor de água nessa mesma condição é da ordem de $1 \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$. Quando a pressão é reduzida para 15 mbar, o volume específico do vapor de água aumenta para $88,66 \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ (GEANKOPLIS, 2003), provocando grandes fluxos de vapor no interior do produto, que geram as tensões e deformações associadas. Paralelamente, a análise das micrografias eletrônicas de varredura (Figura 5.9) pode auxiliar na compreensão dos fenômenos ocorridos durante a secagem, notadamente durante a aplicação dos pulsos de vácuo.

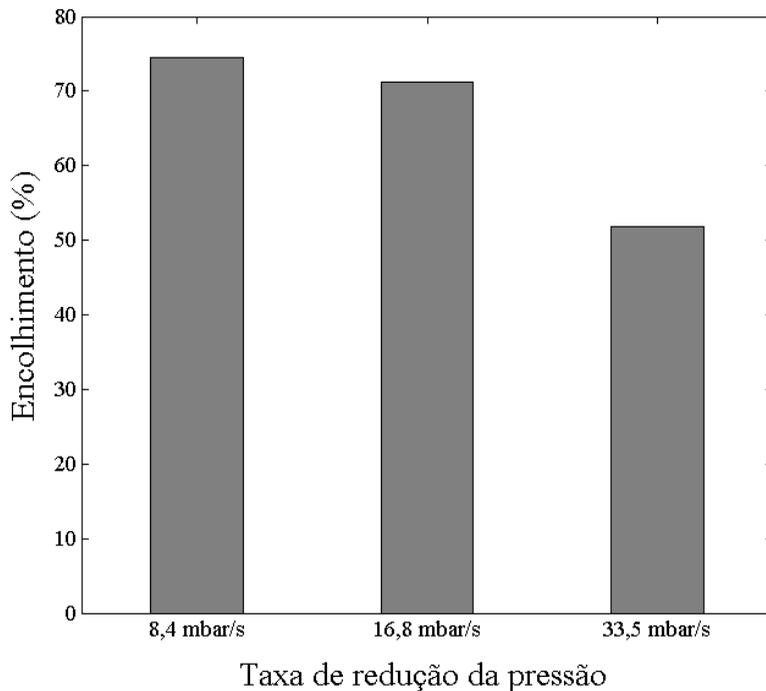
Figura 5.6- Porosidades acessíveis das amostras *in natura* e das amostras de bananas secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.



Analisando a menor taxa de descompressão aplicada ($8,4 \text{ mbar}\cdot\text{s}^{-1}$), nota-se que as amostras apresentaram a menor porosidade. A redução da pressão até a pressão de 15 mbar foi realizada durante 60 s. Durante a etapa de descompressão até 15 mbar, a água presente nas amostras foi sendo evaporada, ou seja, uma quantidade de água das amostras foi evaporada a maiores pressões. Na evaporação da água que ocorre a pressões acima de 15 mbar, seu volume específico não era tão grande, implicando em menores fluxos de vapor instantâneos e em menores deformações associadas.

Na Figura 5.7 está apresentado o encolhimento sofrido pelas amostras de bananas secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.

Figura 5.7- Encolhimento das amostras de bananas secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.

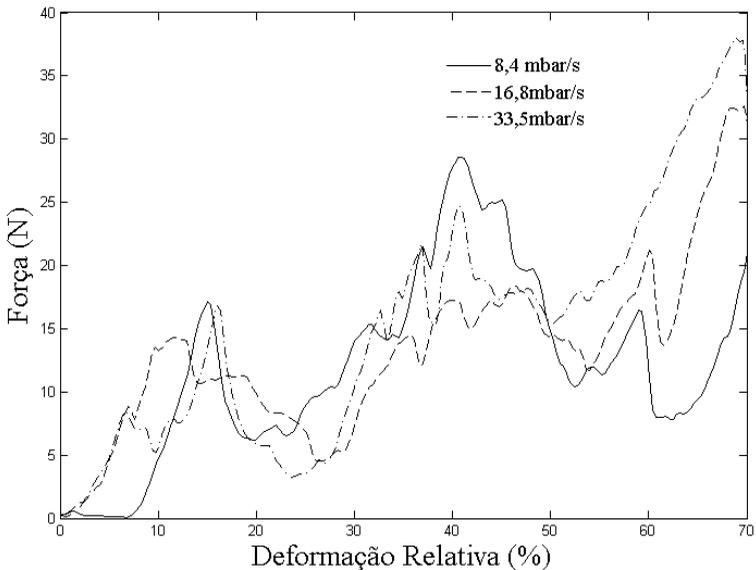


O maior encolhimento foi observado para as amostras submetidas à secagem com a menor taxa de descompressão do sistema (8,4 mbar.s⁻¹). Em todos os casos, a pressão da câmara de secagem foi reduzida até 15 mbar. Entretanto, ao se aplicar as maiores taxas de descompressão, a pressão do sistema foi reduzida mais rapidamente, o que provocou maiores taxas de evaporação de água (kg.s⁻¹) e um resfriamento mais rápido, que pode ter auxiliado na manutenção da estrutura expandida. Nas amostras submetidas às menores taxas de descompressão, as taxas de evaporação foram menores e foi necessário um maior tempo para que as amostras atingissem as temperaturas baixas. Isso levou a um maior encolhimento das amostras e consequentemente a uma menor porosidade.

As curvas força x deformação de amostras crocantes são irregulares (curva que apresenta diversos picos) devido às pequenas

fraturas que ocorrem durante a penetração da probe. Na Figura 5.8 estão demonstrados os resultados dos testes mecânicos de perfuração nas amostras de bananas desidratadas por KMFD utilizando diferentes taxas de descompressão do sistema. Foram realizados testes de perfuração em 3 diferentes pontos das amostras, até uma penetração de 70% da espessura da amostra. As curvas força x deformação relativa apresentadas na figura são representativas do que ocorreu nos testes de penetração.

Figura 5.8- Curvas força x deformação obtidas nos testes de penetração com amostras secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.

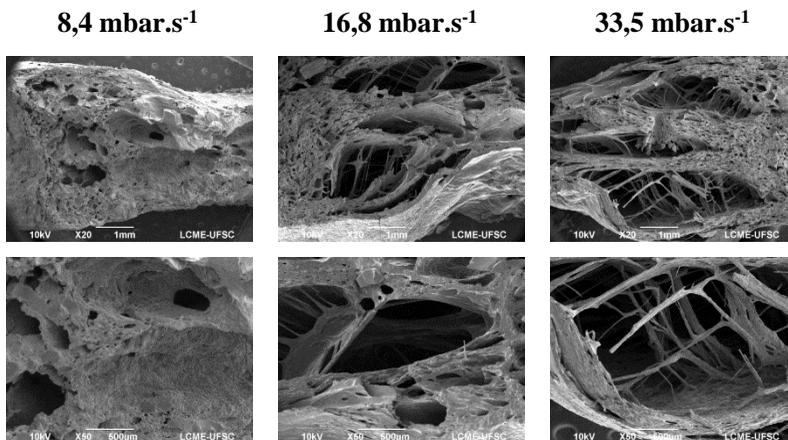


Mazumder et al. (2007) estudaram o efeito do teor de umidade através de testes de compressão uniaxial em *snacks* de milho extrusados. Os autores apontaram que um bom indicador do comportamento crocante de uma amostra é o número de picos principais, os quais são sensíveis ao teor de umidade da amostra, principalmente quando este é maior que 4 % (base úmida). Através da Figura 5.8 é possível observar que as curvas força x deformação relativa, para as diferentes amostras, apresentaram

diversos picos, demonstrando que o produto final obtido apresentava característica crocante.

Na Figura 5.9 estão apresentadas as imagens de microscopia eletrônica de varredura, com aumento de 20X e com o aumento de 50X, realizadas nas amostras de banana secas por KMFD utilizando diferentes taxas de descompressão do sistema.

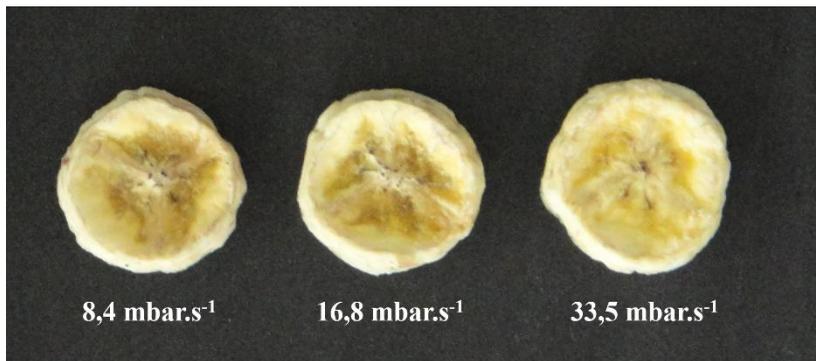
Figura 5.9- Imagens de microscopia eletrônica de varredura das amostras secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema (aumento de 20X e 50X).



As observações estruturais das amostras de banana secas por KMFD com diferentes taxas de descompressão do sistema apresentaram concordância com os resultados experimentais de porosidade acessível. Pela Figura 5.9 é possível observar que o aumento da taxa de descompressão do sistema ocasiona no aumento da formação da matriz porosa. Como discutido anteriormente, durante o período de descompressão, o produto é resfriado bruscamente devido à auto vaporização da umidade. Esse resfriamento mantém o produto expandido.

Na Figura 5.10 estão apresentadas fotografias das amostras ao final do processo de *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.

Figura 5.10- Fotografias das amostras secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD) utilizando diferentes taxas de redução da pressão do sistema.



Essas fotografias mostram que as amostras não apresentaram degradação térmica da cor durante o processo de secagem, quando as temperaturas foram iguais ou inferiores a 60 °C.

5.4 Considerações parciais

Não foi observado diferença na evolução do teor de umidade para as amostras submetidas a diferentes taxas de redução da pressão do sistema.

Ao se alterar a taxa de descompressão do sistema é possível controlar a formação da matriz porosa nas amostras de banana desidratadas. As amostras submetidas a maiores taxas de redução da pressão do sistema (33,5 mbar.s⁻¹) apresentaram maior porosidade.

Capítulo 6

6. Estudo da capacidade de sorção de umidade e da temperatura de transição vítrea de amostras de banana secas por KMFD, KMFD_VD, secas convectivamente (CD) e secas a vácuo (VD).

6.1 Introdução

O estado físico e as propriedades físico-químicas dos alimentos mudam durante o processamento, estocagem, distribuição e consumo. A remoção de água por evaporação ou congelamento geralmente resulta na formação de produtos no estado amorfo (SLADE e LEVINE, 1991). O estado amorfo é caracterizado pela falta de organização das moléculas, oposto à forma cristalina, que representa um melhor arranjo da estrutura.

A mais importante alteração, característica do estado amorfo, é chamada de transição vítrea (T_g), que envolve a transição de um estado sólido vítreo, com viscosidade acima de 10^{12} Pa. s para um estado semi-líquido-gomoso (ROOS, 1995).

Materiais amorfos no estado vítreo praticamente são líquidos que têm alta viscosidade ($\eta > 10^{12}$ Pa. s⁻¹), brilho, transparência e seus movimentos são restritos a vibrações e rotações de pequena amplitude. As alterações que podem ocorrer no estado vítreo são atribuídas a um fenômeno chamado envelhecimento físico. No entanto, as alterações são tão lentas que não são perceptíveis em um intervalo de tempo de observação prático. Portanto, os alimentos no estado vítreo são considerados cineticamente estáveis.

A textura é um dos atributos sensoriais de maior importância em alimentos e está diretamente relacionada com o seu estado físico. Durante o processamento e a armazenagem, os alimentos estão sujeitos a uma série de variações na sua composição e nas condições de temperatura e pressão, as quais levam a alterações no seu estado físico e, conseqüentemente, na sua textura. O conhecimento da temperatura de transição vítrea em função da concentração de água é de extrema importância na formulação e na determinação das condições ideais de processamento e armazenagem de alimentos, de forma a manter a qualidade do produto pelo maior tempo possível (LEITE et al., 2005).

Por outro lado, a compreensão dos dados de sorção de umidade é essencial para muitos aspectos em relação à tecnologia de alimentos, tais como selecionar os materiais de embalagem, bem como optar por condições adequadas de armazenamento (MRAD, et al., 2013).

Na formulação de novos produtos, o conhecimento do comportamento de seus constituintes na região de mudança de estado vítreo-borrachoso pode ajudar na predição da estabilidade e mudanças na textura quando os produtos são submetidos a várias condições de temperatura e umidade relativa. Diagramas de estado podem contribuir, mostrando as relações entre a composição do produto e o seu estado físico, fornecendo informações fundamentais para a adequada formulação dos produtos, objetivando à máxima estabilidade e qualidade. Nikolaidis e Labuza (1996) apontam a necessidade do conhecimento do diagrama de estado dos alimentos e de seus componentes separadamente para melhor avaliar as interações entre eles. Esses diagramas podem ser usados, com a mesma finalidade, no projeto de processos, equipamentos, embalagem e condições de estocagem (ROOS, 1995).

O objetivo desse trabalho é analisar a capacidade de sorção de umidade, a temperatura de transição vítrea e a cor de amostras de banana secas por KMFD, KMFD_VD, secas convectivamente (CD) e secas a vácuo (VD).

6.2 Material e Métodos

6.2.1 Preparação das amostras

Amostras de banana (*Musa sapientum L.*, var Prata) foram preparadas como descrito no item 3.2.1.

6.2.2 Secagem

Após o preparo, as amostras de banana foram submetidas à secagem. Foram utilizadas diferentes técnicas de secagem: *Conductive multi-flash drying* (KMFD), *Conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).

6.2.2.1 Conductive multi-flash drying (KMFD)

A metodologia utilizada para a secagem por KMFD foi a mesma apresentada no item 4.2.2.3.

6.2.2.2 *Conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD)

A metodologia utilizada para a secagem por KMFD_VD foi a mesma apresentada no item 3.2.2.3.

6.2.2.3 Secagem convectiva (CD)

A metodologia utilizada para a secagem por CD foi a mesma apresentada no item 4.2.2.4.

6.2.2.4 Secagem a vácuo (VD)

A metodologia utilizada para a secagem por VD foi a mesma apresentada no item 4.2.2.5.

6.2.3 Isotermas de sorção de umidade

As isotermas de sorção de água das amostras de banana desidratadas foram determinadas pelo método estático em dessecadores. As amostras desidratadas passaram por uma secagem em estufa a vácuo por 24 h (pressão de 15 mbar) à temperatura de 25 °C, para a retirada da umidade residual. Após este período, 10 gramas de amostras foram pesadas em balança analítica (Shimadzu AY 220) e colocadas em recipientes contendo diferentes soluções saturadas de sais (Tabela 6.1). Esses recipientes foram acomodados em estufa com temperatura controlada de 25 °C. Atingido o equilíbrio entre as amostras e os ambientes dos dessecadores, o teor de umidade foi determinado conforme metodologia descrita no item 3.2.4.1.

Tabela 6.1-Atividade de água de soluções salinas saturadas.

Solução salina saturada	Atividade de água (a_w)
Cloreto de lítio	0,116
Cloreto de magnésio	0,327
Carbonato de Potássio	0,438
Nitrato de magnésio	0,529
Nitrato de sódio	0,645
Cloreto de sódio	0,753
Sulfato de amônio	0,810
Cloreto de potássio	0,843
Cloreto de bário	0,903

Os dados experimentais foram representados matematicamente pelos modelos de GAB (Guggenheim - Anderson - Boer) apresentado na Equação 6.1.

$$X_{eq} = \frac{X_m \cdot c \cdot k \cdot a_w}{(1 - k \cdot a_w) \cdot (1 - k \cdot a_w + c \cdot k \cdot a_w)} \quad (6.1)$$

em que X_{eq} é a umidade de equilíbrio, k é a constante de GAB relacionada à energia de interação das moléculas adsorvidas na multicamada, c é a constante relacionada à energia de interação das moléculas na monocamada e X_m a umidade na monocamada.

6.2.4 Temperatura de transição vítrea

6.2.4.1 Preparação da fruta seca

Aproximadamente 10 mg de amostras desidratadas foram pesadas em balança digital e colocadas em cadinhos de alumínio especiais para análise de DSC (calorimetria diferencial de varredura), com volume de 40 μL . Após a pesagem, os cadinhos foram colocados em frascos herméticos contendo diferentes soluções saturadas de sal (diferentes UR do ar), à temperatura de 25 °C, até que o equilíbrio fosse atingido.

6.2.4.2 Condições dos ensaios de calorimetria diferencial de varredura (DSC)

O calorímetro empregado foi um aparelho Perkin Elmer (modelo Jade DSC) equipado com uma unidade de refrigeração operando com gás nitrogênio. Para cada amostra, foram feitos três termogramas independentes segundo a metodologia descrita por Hofsetz et al. (2007), a uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, de $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.2.4.3 Representação matemática dos dados experimentais da temperatura de transição vítrea (T_g)

Com a intenção de analisar o efeito de plastificação da água sobre as amostras de bananas desidratadas, o modelo de Gordon – Taylor (1952) (Equação 6.3) foi ajustado aos dados experimentais de temperatura de transição vítrea em função do conteúdo de água.

$$T_g = \frac{(1-x_w)T_{gs} + (Kx_wT_{gw})}{(1-x_w) + Kx_w} \quad (6.3)$$

em que T_g , T_{gs} , T_{gw} são as temperaturas de transição vítrea da mistura, dos sólidos e da água ($T_{gw} = -135\text{ }^{\circ}\text{C}$), respectivamente, x_w é a fração mássica de água na amostra e K é o parâmetro do modelo.

Um modelo linear foi ajustado aos dados de temperatura de transição vítrea e atividade de água, como proposto por Roos (1987).

$$T_g = Y \cdot a_w + Z \quad (6.4)$$

em que a_w é a atividade de água das amostras e Y e Z são parâmetro do modelo.

6.2.5 Análise de cor

A cor das amostras de banana desidratadas pelas diferentes técnicas de secagem foi determinada em sua face superior. As medidas foram realizadas utilizando um colorímetro (Miniscan EZ, Hunterlab,

EUA) operando no sistema CIELAB (L^* , a^* , b^* , c^* , h), utilizando sistema de iluminação D65 e ângulo de observação de 10° . O índice “ L^* ” mede a luminosidade variando de preto a branco; “ a^* ” mede a cor verde negativo à cor vermelha positivo; e “ b^* ” mede a cor azul negativo à cor amarela positivo. O “ c^* ” ou croma fornece uma medida da intensidade ou saturação da cor e o “ h ” corresponde à tonalidade à cor vermelha (0°), à cor amarela (90°), à cor verde (180°) e à cor azul (360°).

6.3 Resultados e discussão

6.3.1 Isotermas de sorção de umidade

Na Figura 6.1 estão apresentadas as isotermas de sorção de umidade das amostras de banana secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD). Além dos dados experimentais, estão apresentadas na figura os ajustes do modelo de GAB (linhas contínuas).

Pela Figura 6.1 observa-se que as isotermas de adsorção de umidade de bananas secas são do Tipo III, segundo a classificação de Brunauer, consideradas típicas de alimentos ricos em componentes solúveis. A forma destas curvas indica as forças que intervêm na ligação da água com a superfície do material higroscópico e permite avaliações da estrutura superficial do produto, da sua estabilidade durante o armazenamento, podendo ainda fornecer dados para projetos de embalagens apropriadas à melhor conservação do produto.

Os parâmetros de ajuste do modelo matemático de GAB aos dados experimentais de amostras de banana secas pelas técnicas de *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD) são apresentados na Tabela 6.2.

Figura 6.1. Isotermas de sorção de umidade a 25 °C para amostras de banana secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).

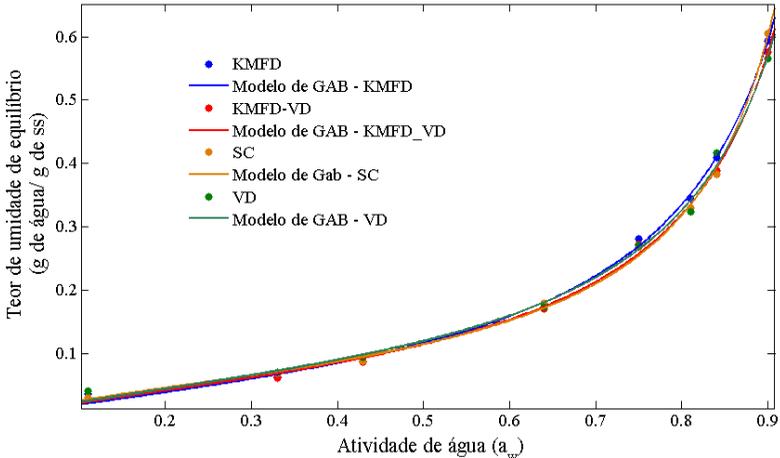


Tabela 6.2. Resultado dos parâmetros de ajuste do modelo de GAB às isotermas de sorção de amostras de banana secas por diferentes técnicas.

Processo de secagem	X_m	c	k	R^2
KMFD	0,090	2,259	0,954	0,998
KMFD_VD	0,081	2,948	0,963	0,997
SC	0,073	4,053	0,980	0,998
VD	0,084	3,063	0,954	0,995

O modelo de GAB representou bem as isotermas de sorção de umidade das amostras de banana secas pelas diferentes técnicas. Resultados semelhantes foram relatados por Hofsetz (2007) ao realizar o ajuste dos modelos de GAB e BET aos dados experimentais de isotermas de sorção de amostras de banana utilizando um pulso inicial a alta temperatura e curto tempo, combinado com uma etapa de secagem convencional a ar quente a 70 °C (HTST). Os autores observaram que o modelo de GAB foi o mais adequado para o ajuste aos dados experimentais.

Com o modelo de GAB é possível uma estimativa do conteúdo de umidade da monocamada (X_m) dos alimentos, que é o teor igual à umidade cobrindo locais hidrofílicos na superfície do material. X_m é de significativa importância para a estabilidade física e química de produtos desidratados no que diz respeito à oxidação lipídica, atividade enzimática, escurecimento não enzimático, preservação do sabor e características estruturais (MRAD et. al., 2013). Analisando o parâmetro X_m do modelo de GAB para amostras de bananas secas pelas diferentes técnicas ($X_m \approx 0,080$), nota-se que o mesmo encontra-se na mesma ordem de grandeza ao encontrado por Hofsetz (2007) e Luccas (1996) em amostras de banana secas por HTST ($X_m \approx 0,040$), por Katekawa (2006) para banana nanica seca em DVS (*Dynamic Vapour Sorption*) com temperatura de secagem de 50 °C e tempo de processo de 6 h ($X_m \approx 0,057$).

Comparando-se os valores do parâmetro k do modelo de GAB, obtidos para as amostras de banana secas pelas diferentes técnicas, nota-se que o valor foi próximo de 1 para todas as amostras ($k = 0,954$ para as amostras secas por KMFD, $k = 0,963$ para as amostras secas por KMFD_VD, $k = 0,980$ para as amostras secas por CD e $k = 0,954$ para as amostras secas por VD), valores característicos de produtos alimentícios. Ao analisar os valores do parâmetro X_m , observa-se que os maiores valores encontrados foram para as amostras submetidas à técnica de secagem por KMFD ($X_m = 0,090$), KMFD_VD ($X_m = 0,081$) e VD ($X_m = 0,084$). Valores mais elevados do parâmetro X_m significam maior higroscopicidade das amostras nas condições analisadas. Essa maior higroscopicidade, provavelmente, se deve ao fato das amostras apresentarem alta porosidade (como discutido no capítulo 4).

6.3.2 Temperatura de transição vítrea (T_g)

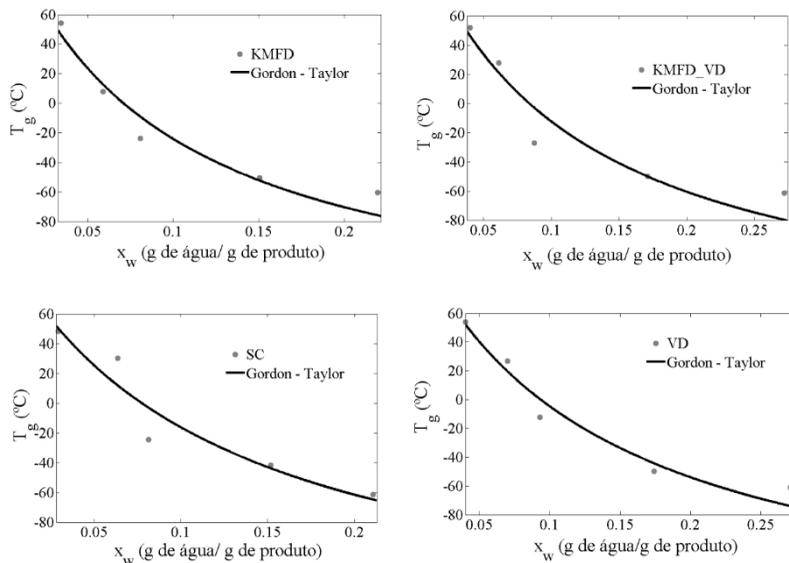
Baseado em conceitos da ciência dos polímeros sintéticos, um plastificante é definido como um “material incorporado em um polímero para aumentar sua flexibilidade e extensibilidade” (SLADE e LEVINE, 1995). A plastificação, em nível molecular, leva à um aumento do espaço intermolecular ou volume livre, diminuindo a viscosidade local e, concomitantemente, aumentando a mobilidade (FERRY, 1980).

A água é um dos plastificantes com menor peso molecular, apresentando um valor de T_g extremamente baixo (-135°C) (ROOS, 1995). Por ser um forte agente plastificante, a água se torna a principal responsável pela diminuição da T_g em sistemas alimentícios

(BHANDARI & HOWES, 1999). Este fato pode ser observado na figura 6.2, onde estão apresentadas as variações da temperatura de transição vítrea em relação a elevação do conteúdo de água das amostras secas.

Analisando a Figura 6.2 pode-se observar que há uma diminuição da temperatura de transição vítrea com o aumento da concentração de água nas amostras. Isto ocorre quando um alimento é submetido a um ambiente de umidade relativa elevada e adsorve água. Com isso, ocorre uma redução na sua viscosidade e um consequente aumento na mobilidade molecular, dentre outras modificações. Segundo Roos (1995), alimentos que encontram-se no estado vítreo possuem viscosidades elevadas, na ordem de 10^{12} Pa.s, situação de baixa mobilidade molecular, que não permite os rearranjos necessários para a formação de estruturas cristalinas. Por essa razão, supõe-se que tais materiais sejam estáveis abaixo da linha da T_g . Quando, pela absorção de água ou pelo aumento da temperatura, os materiais atingem uma viscosidade entre 10^6 e 10^8 Pa.s, eles começam a apresentar algum tipo de escoamento. Quando um sistema passa do estado vítreo para o gomoso, sua viscosidade cai de valores da ordem de 10^{12} para valores da ordem de 10^3 Pa.s. A viscosidade reduzida confere uma maior mobilidade aos reagentes e às cadeias de polímeros (LABUZA et al., 2004).

Figura 6.2. Temperaturas de transição vítrea determinadas experimentalmente por calorimetria exploratória de varredura e ajustadas pelo modelo de Gordon-Taylor para amostras de banana secas por diferentes técnicas, equilibrada em soluções salinas à 25°C.



A predição da diminuição da T_g em função do teor de água é muito usada na avaliação do efeito nas propriedades funcionais e estabilidade no armazenamento de alimentos, uma vez que a temperatura de transição vítrea afeta a vida útil e a qualidade dos alimentos desidratados, conforme discutido anteriormente.

Na Tabela 6.3 estão apresentados os parâmetros de ajuste do modelo de Gordon-Taylor aos dados experimentais de temperatura de transição vítrea de amostras de banana desidratadas por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem a vácuo (VD) e secagem convectiva (CD).

Tabela 6.3. Resultados dos ajustes do modelo de Gordon-Taylor aos dados experimentais de temperaturas de transição de vítrea de amostras de banana desidratadas.

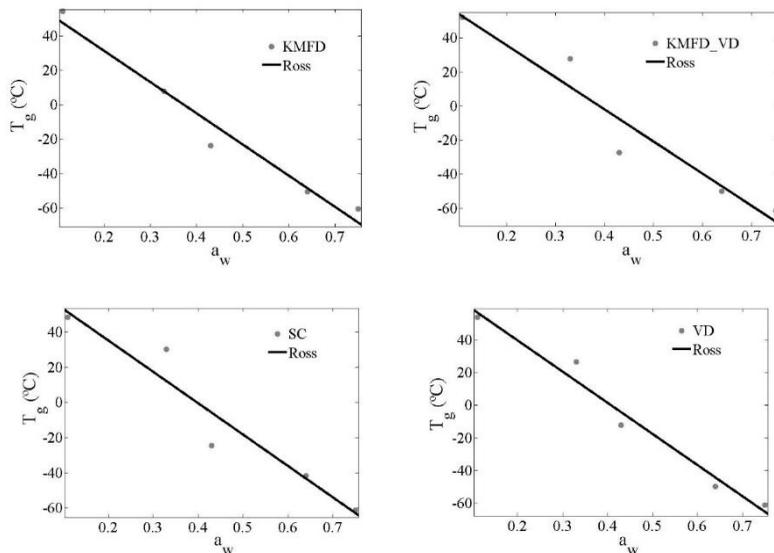
	T_{gs}	K	R^2
KMFD	124,3	12,07	0,938
KMFD_VD	119,1	9,659	0,897
VD	119	8,543	0,957
CD	99	8,76	0,910

A partir da Figura 6.2 e dos dados dos coeficientes de correlação apresentados na Tabela 6.3 é possível observar que o modelo de Gordon-Taylor foi capaz de representar adequadamente a tendência da variação da temperatura de transição vítrea com a umidade das amostras.

Os valores de K obtidos neste estudo foram maiores que os reportados na literatura. Moraga et al. (2011) reportaram valores de $K = 6,121$ para amostras de banana (var. Cavendish) liofilizadas. Sobral et al. (2001) ajustaram o modelo de Gordon-Taylor a dados de transição vítrea de amostras de caqui liofilizado e relataram valor de $K = 4,77$. A diferença entre os valores encontrados neste estudo aos dados apresentados na literatura se deve a diferenças entre as espécies e graus de maturação, que influencia diretamente na concentração de sólidos solúveis das amostras avaliadas.

A relação entre a temperatura de transição vítrea (T_g) e a a_w dos alimentos a uma dada temperatura fornece um método simples de predição dos efeitos da umidade relativa sobre a T_g durante o armazenamento (ROOS, et al., 1996). Visando verificar esse efeito, estão apresentados na Figura 6.3 a variação da T_g com a atividade de água para amostras de banana secas por diferentes técnicas, equilibrada a diferentes UR à 25°C. A figura mostra que houve uma redução na T_g com o aumento da atividade de água, fato este esperado, pois a água age como um plastificante, reduzindo assim a T_g .

Figura 6.3. Temperatura de transição vítrea experimental e ajustada pelo modelo proposto por Roos (1987) para amostras de banana secas por diferentes técnicas, equilibrada em diferentes UR, à 25 °C.



Roos (1987) estudou o efeito da água no estado físico de morangos liofilizados e reportou uma relação linear entre a atividade de água e a temperatura de transição vítrea. O autor observou correlação linear entre a T_g e a_w na faixa de a_w de 0,10 a 0,80. Como pode-se observar na Figura 6.3, as amostras de banana secas por diferentes técnicas apresentaram esse comportamento.

Na Tabela 6.4 estão apresentados os resultados dos ajustes dos parâmetros ao modelo linear aos dados experimentais de temperaturas de transição vítrea de amostras de banana submetidas à diferentes técnicas de secagem, equilibradas em diferentes UR à 25 °C. A linearidade dos dados de T_g com a atividade de água é confirmada pelos coeficientes de correlação apresentados nessa tabela. Para todas as técnicas de secagem estudadas, o coeficiente foi superior a 0,9. Mrad et al. (2013) também observou a linearidade dos dados de T_g com a atividade de água de amostras de maçã e pera desidratadas osmoticamente ($R^2 > 0,9$).

Tabela 6.4. Resultados dos ajustes do modelo linear aos dados experimentais de temperaturas de transição de vítrea de amostras de banana desidratadas.

	Y	Z	R ²
KMFD	-181,5	67,48	0,967
KMFD_VD	-188,2	73,26	0,928
VD	-191,1	77,86	0,973
SC	-178,6	70,9	0,923

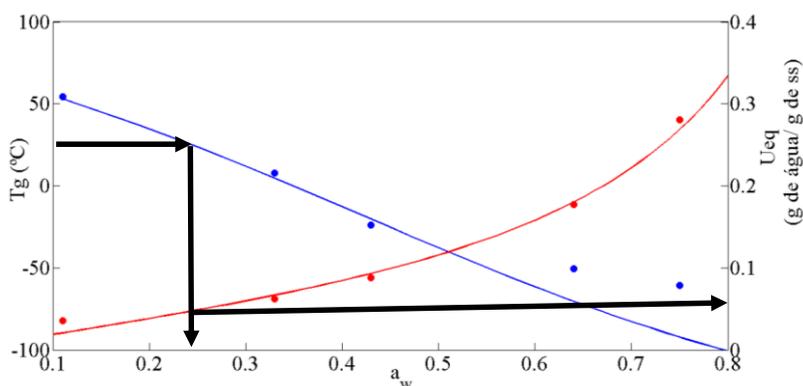
6.3.3 Influência da atividade de água e do teor de umidade na temperatura de transição vítrea (T_g)

A utilização combinada do modelo de Gordon-Taylor com as isotermas de sorção permitem avaliar a estabilidade de alimentos em diferentes condições de armazenamento. Os modelos podem ser ajustados aos dados experimentais e utilizados para apresentar a temperatura de transição vítrea (T_g) e a isoterma de sorção em um único gráfico, como pode ser observado nas Figuras 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7 para amostras de banana desidratadas por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD), respectivamente. A relação a_w -umidade foi calculada pelo modelo de GAB, enquanto os valores de T_g foram calculados pelo modelo de Gordon-Taylor. As informações contidas nessas figuras são de grande importância na determinação de valores críticos para a atividade de água e para a umidade, definidos como aqueles que reduzem a T_g para a temperatura ambiente (ROOS, 1993; JOUPPIILA e ROOS, 1994; ROOS, 1995)

Da Figura 6.4, por exemplo, se uma amostra de banana desidratada pela técnica de KMFD for armazenada em um ambiente com atividade de água igual a 0,25, ela atingirá umidade de 0,05 g de água/ g de sólidos secos, levando à redução da temperatura de transição vítrea para 25 °C. Isso significa que a atividade de água crítica para o armazenamento de bananas secas por KMFD é de 0,25, para que se mantenham vítreas. Em atividades de água maiores que este valor as amostras sofreriam alterações estruturais à temperatura ambiente. Resultado semelhante foi encontrado por Moraga et al. (2011) para amostras de banana liofilizadas. O autor encontrou um valor de atividade

de água crítica de 0,22 e teor de umidade crítico de 0,04 g de água/ g de sólidos secos.

Figura 6.4. Temperatura de transição vítrea, T_g , em função da atividade de água, a_w , e isoterma de sorção de umidade, a 25 °C, de amostras de banana secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD). Pontos experimentais: (●) isoterma de sorção de umidade e (●) as temperaturas de transição vítrea.



Na Figura 6.5 estão representadas as temperaturas de transição vítrea (T_g) em função da atividade de água (a_w) e a isoterma de sorção de umidade para amostras de banana desidratadas por *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD).

As amostras submetidas à técnica de secagem por KMFD_VD apresentaram comportamento semelhante ao das amostras submetidas à secagem por KMFD. A atividade de água e a umidade críticas para o armazenamento à temperatura ambiente ($T = 25$ °C) de bananas secas por KMFD_VD é de 0,27 e 0,05 g de água/ g de sólidos secos, respectivamente.

Na Figura 6.6 estão representadas as temperaturas de transição vítrea (T_g) em função da atividade de água (a_w) e a isoterma de sorção de umidade para amostras de banana desidratadas em estufa a vácuo a 60 °C (VD).

Figura 6.5. Temperatura de transição vítrea, T_g , em função da atividade de água, a_w , e isoterma de sorção de umidade, a 25 °C, de amostras de banana secas por *conductive multi-flash drying* seguido de uma secagem a vácuo (KMFD_VD). Pontos experimentais: (●) isoterma de sorção de umidade e (●) as temperaturas de transição vítrea.

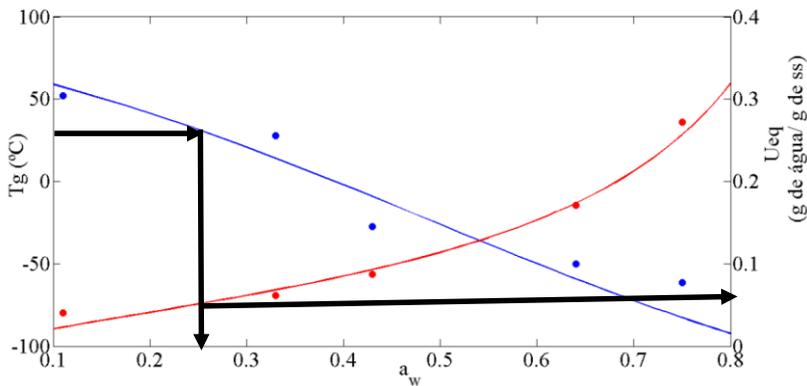
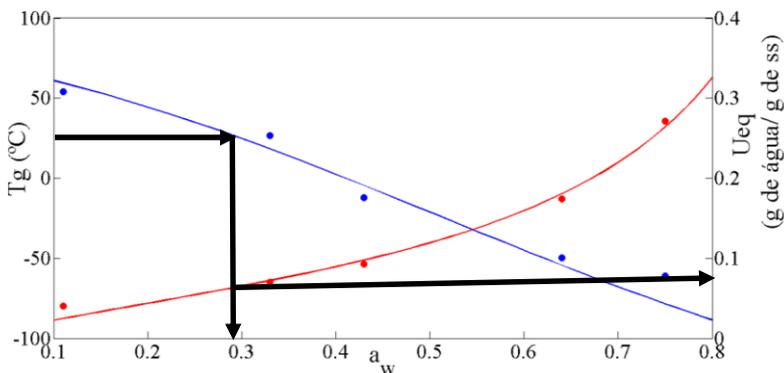


Figura 6.6. Temperatura de transição vítrea, T_g , em função da atividade de água, a_w , e isoterma de sorção de umidade, a 25 °C, de amostras de banana secas em estufa a vácuo a 60 °C (VD). Pontos experimentais: (●) isoterma de sorção de umidade e (●) as temperaturas de transição vítrea.



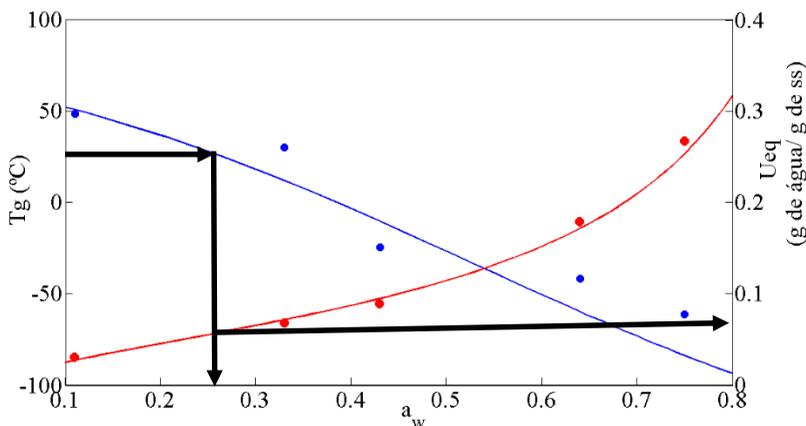
Analisando os valores de atividade e umidade críticos, nota-se que os mesmos foram mais elevados que aos das amostras submetidas a técnicas com aplicação de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (KMFD

e KMFD_VD). O valor da atividade de água crítica ficou próximo a 0,29 e o teor de umidade crítico aproximadamente 0,06 g de água/ g de sólidos secos.

Na Figura 6.7 estão representadas as temperaturas de transição vítrea (T_g), em função das atividades de água (a_w) e a isoterma de sorção de umidade para amostras de banana desidratadas em estufa com ar quente a 60 °C (CD).

Da Figura 6.7 conclui-se que, para as amostras de banana secas com ar quente manterem suas propriedades estruturais, as mesmas devem ser armazenadas à uma atividade de água de aproximadamente 0,3. Nessas condições de armazenamento a umidade crítica das amostras é próxima de 0,06 g de água/ g de sólidos secos. O maior valor da umidade crítica destas amostras se deve à sua menor higroscopicidade. Como discutido no capítulo 4, as amostras apresentam baixa porosidade, o que acarreta em uma menor área de contato da superfície da amostra com o ambiente.

Figura 6.7. Temperatura de transição vítrea, T_g , em função da atividade de água, a_w , e isoterma de sorção de umidade, a 25 °C, de amostras de banana secas em estufa com ar quente a 60 °C (CD). Pontos experimentais: (●) isoterma de sorção de umidade e (●) as temperaturas de transição vítrea.



6.3.4 Análise das alterações de cor

A cor é um dos principais atributos de qualidade que influenciam a percepção dos consumidores. Durante o processo de secagem podem haver mudanças nesse atributo, dependendo do processo e das condições de secagem utilizados (BAINI e LANGRISH, 2009). Frutas desidratadas que possuem coloração próxima à da fruta *in natura* podem atrair os consumidores (ESEHAGHBEYGI et al., 2014). Na Tabela 6.5 estão apresentados os parâmetros de cor das amostras *in natura* e das amostras secas por diferentes técnicas. A cor foi medida em termos de “L*”, que indica a luminosidade, “a*”, que indica a variação de verde a vermelho, “b*”, que indica a variação de azul a amarelo, “c*”, que indica a intensidade ou saturação da cor e o “h”, que corresponde à tonalidade à cor vermelha (0°), à cor amarela (90°), à cor verde (180°) e à cor azul (360°).

Tabela 6.5. Parâmetros de cor das amostras *in natura* e das amostras secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).

	L*	a*	b*	c*	H
<i>In natura</i>	68,655±3,750	3,928±1,255	25,963±2,597	26,273±2,663	81,038±3,209
KMFD	49,132±3,850	3,893±0,407	26,083±1,862	26,377±1,888	81,519±0,562
KMFD_VD	46,527±3,961	2,134±0,381	17,928±1,318	18,085±1,299	83,164±1,394
SC	49,345±2,942	6,251±0,342	26,725±1,141	27,448±1,151	76,826±0,631
VD	53,158±3,537	3,943±0,51	28,580±1,491	29,104±1,193	82,145±0,592

Analisando os parâmetros *L*, *a* e *b* das amostras *in natura*, nota-se que os mesmos foram ligeiramente inferiores aos reportados em literatura. Prachayawarakorn et al. (2008) analisaram os mesmos parâmetros para banana da variedade Gros Michel com concentração de sólidos solúveis entre 23–25 °Brix e reportaram valores de $L^* = 78$, $a^* = 2,6$ e $b^* = 27$. Jiang et al., (2013) determinaram valores de $L^* = 73,09$, $a^* = 1,41$ e $b^* = 15,92$, para amostras de banana da variedade Cavendish. As

diferenças observadas se devem também aos diferentes graus de maturação e diferentes variedades de banana.

A partir da Tabela 6.5 observa-se que o parâmetro L^* foi o mais afetado pelo processo de secagem. Nota-se que houve uma redução no valor desse parâmetro ao se comparar com o valor das amostras *in natura*. Uma diminuição do parâmetro L^* indica que as amostras de banana, secas pelas diferentes técnicas, tornaram-se mais escuras ao final do processo.

Para o parâmetro a^* , que mede a variação da cor verde à cor vermelha, a alteração mais evidente foi observada para as amostras secas com ar quente (CD). Esta alteração pode estar relacionada ao grande tempo (22h) de exposição das amostras à temperatura de 60 °C. Esehaghbeygi et al., (2014) observou comportamento semelhante em relação a este parâmetro ao secar bananas de 3 mm de espessura em micro-ondas com potência de 180 W.

Analisando o parâmetro b^* , nota-se que o mesmo não sofreu alterações ao ser comparado ao valor observado para as amostras *in natura*. Este resultado indica que não houve alterações na intensidade da coloração amarela das amostras de banana desidratadas pelas diferentes técnicas de secagem.

O parâmetro c^* ou croma, que fornece uma medida da intensidade ou saturação da cor das amostras, nota-se que houve um aumento na intensidade da cor para as amostras secas por KMFD, CD e VD. Para as amostras submetidas a secagem por KMFD_VD esse parâmetro sofreu uma redução, ou seja, a amostra perdeu a intensidade da cor durante a secagem.

Com base no parâmetro H , que corresponde à tonalidade da amostra, é possível afirmar que as amostras secas por KMFD, KMFD_VD e VD mantiveram tonalidade amarela após a secagem. As amostras submetidas a SC apresentaram alterações nessa tonalidade como pode ser visualizado na Figura 6.8.

Figura 6.8. Fotografia das amostras de banana secas por *conductive multi-flash drying* (KMFD), *conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD_VD), secagem convectiva (CD) e secagem a vácuo (VD).



6.4 Considerações parciais

O modelo de GAB foi o que melhor se ajustou aos dados de sorção de umidade das frutas desidratadas. Devido às suas estruturas porosas, as amostras secas por KMFD, KMFD_VD e VD foram as que apresentaram maior higroscopicidade.

As temperaturas de transição vítrea (T_g) das amostras de banana secas por KMFD, KMFD_VD, CD e VD apresentaram uma redução com a elevação do conteúdo de água. O modelo de Gordon–Taylor foi capaz de representar os dados de T_g em relação ao conteúdo de água. A variação da temperatura de transição vítrea com atividade de água apresentou um comportamento linear.

Para que as amostras secas pelas diferentes técnicas mantenham suas propriedades estruturais durante o armazenamento, as mesmas devem ser acondicionadas à uma atividade de água menor que 0,3.

Capítulo 7

7. Conclusões

A tecnologia de secagem desenvolvida por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo utilizando a condução como fonte de aquecimento (KMFD e KMFD_VD) possibilita o controle da microestrutura e das propriedades de textura de bananas (var. Prata). O produto final obtido pelas técnicas de secagem por KMFD (*conductive multi-flash drying*) e KMFD_VD (*conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo) apresentaram baixo teor de umidade e atividade de água e textura crocante comparáveis às amostras liofilizadas reportadas em literatura.

Foi observada uma pequena redução no tempo de secagem por KMFD utilizando maiores temperaturas no interior da câmara, entretanto as amostras apresentaram maior encolhimento e uma menor porosidade. As amostras submetidas a secagem em menor temperatura apresentaram maior porosidade, menor encolhimento e textura crocante. As amostras de bananas desidratadas obtidas pela técnica de KMFD_VD apresentaram alta porosidade, encolhimento pouco evidente e textura crocante. Está técnica apresenta-se como uma alternativa viável para a obtenção de frutas desidratadas crocantes e com alta porosidade.

As técnicas de secagem utilizadas para analisar a influência do método de secagem na formação e no comportamento da microestrutura de bananas (var. Prata) foram eficientes e podem ser utilizadas para analisar o comportamento da microestrutura de outras frutas e vegetais submetidas a processos de secagem semelhantes. Os parâmetros densidade aparente, porosidade acessível e encolhimento foram fortemente influenciados pelo processo de secagem. As amostras secadas pela técnica de secagem convectiva foram as que apresentaram um maior encolhimento da estrutura e menor porosidade. As amostras submetidas à secagem pelas técnicas de KMFD e KMFD_VD apresentaram alta porosidade e não foi observado um retraimento significativo na estrutura. As alterações na porosidade e no encolhimento durante as diferentes técnicas de secagem estudadas foram facilmente visualizadas pela análise das imagens de microscopia eletrônica de varredura.

A evolução do teor de umidade das amostras submetidas a secagem por KMFD com diferentes taxas de redução da pressão do sistema não apresentaram diferenças. Ao se alterar a taxa de descompressão do sistema é possível controlar a formação da matriz

porosa nas amostras de banana desidratadas. As amostras submetidas a maiores taxas de redução da pressão do sistema ($33,5 \text{ mbar}\cdot\text{s}^{-1}$) apresentaram maior porosidade

As temperaturas de transição vítrea (T_g) das amostras de bananas secas por KMFD, KMFD_VD, CD e VD apresentaram uma redução com a elevação do conteúdo de água, comprovando o efeito plastificante da água. O modelo de Gordon–Taylor foi capaz de representar os dados de T_g em relação ao conteúdo de água. A dependência linear verificada entre a temperatura de transição vítrea e a atividade de água permite determinar o valor da temperatura de transição vítrea da banana desidratada armazenada à diferentes umidades relativas. Para que as amostras secas pelas diferentes técnicas mantenham suas propriedades estruturais durante o armazenamento, as mesmas devem ser acondicionadas à uma atividade de água menor que 0,3.

Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar o estudo da secagem por KMFD e KMFD_VD para outras frutas e hortaliças de interesse comercial.
- Produzir frutas desidratadas com textura “borrachosa”.
- Realizar um estudo da viabilidade econômica do processo e compará-lo as técnicas de secagem existentes no mercado como a liofilização.
- Testar sensorialmente as amostras obtidas neste estudo.
- Testar diferentes graus de maturação das frutas e analisar o comportamento de sua textura e microestrutura.
- Testar menores taxas de descompressão do sistema e avaliar a microestrutura formada.

Referências Bibliográficas

AGUILERA, J. M. Why food microstructure?. *Journal of Food Engineering*, 67, 3-11, 2005.

AGUILERA, J. M.; STANLEY, D. W. Microstructural principles of food processing and engineering (2nd ed.). Gaithersburg, MD: Aspen Publishers, Inc., 1999.

ALVES, E. J. **A cultura da banana**. 2º edição revisada. Embrapa, p 585, 1999.

AOAC, (2000).Methods of analysis, 17th ed. *Association of official Analytical Chemists*.Washington, DC.

BAINI, R.; LANGRISH, T. A. G. Assessment of colour development in dried bananas – measurements and implications for modelling. **Journal of Food Engineering**, v. 93, p. 177-182, 2009.

BHANDARI, B. R.; HOWES, T. Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods, **Journal of food engineering**, v. 40, p. 71-79, 1999.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEJA-MERCADO, H. **Deshidratación de Alimentos**. Ed. Acribia S. A., p. 297, 2000.

BRENNAN, J.G. **Food Dehydration: a dictionary and guide**, 1st Ed. Butterworth-heinemann, Oxford, 1994.

CAVALCANTI-MATA, M. E. R. M.; DUARTE, M. E. M.; ALSEMO, G. C. S.; RODRIGUES, E.; GUEDES, M. A.; CAVALCANTI, A. S. R. R. M.; OLIVEIRA, C. C. A. Obtenção de graviola em pó pelo processo de liofilização, **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 27, n. 2, p. 165-172, 2005.

CANO-CHAUCA, M.; RAMOS, A. M.; STRINGHETA, P. C.; PEREIRA, J. A. M. Drying curves and water activity evaluation of dried banana.In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 14, 2004, São Paulo. **Proceedings**. São Paulo: IDS, 2004. p. 2013-2020.

DIJKSTERHUIS, G.; LUYTEN, H.; WIJK, R.; MOJET, J. A new sensory vocabulary for crisp and crunchy dry model foods. **Food Quality and Preference**, v. 18, p.37–50, 2007.

DIONELLO, R. G.; BERBERT, P. A.; MOLINA, M. A. B.; PEREIRA, R. C.; VIANA, A. P.; CARLESSO, V. O. Secagem de fatias de abacaxi in natura e pré-desidratadas por imersão-impregnação: cinética e avaliação de modelos. **Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas**, v. 29(1), p. 232-240, jan.-mar, 2009.

ESEHAGHBAYGI , A.; PIRNAZARI, K.; SADEGHI, M. Quality assessment of electrohydrodynamic and microwave dehydrated banana slices. **LWT - Food Science and Technology**, v. 55, p. 565- 571, 2014. EPAGRI. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. **Banana**. Disponível em: http://cepa.epagri.sc.gov.br/Publicacoes/Sintese_2011/Banana%20sintese%202011.pdf Acessado em 09 de janeiro de 2014.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=612&lang=en#ancor> , Acessado em 09 de julho de 2013.

FELLOWS, P. **Food Processing Technology - Principles and Practice**. 2°. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2000.

FERRY, J.D. **Viscoelastic Properties of Polymers**, 3^a ed., New York, John Wiley and Sons, Inc. 1980.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. Editora LTC, p. 670, 1980.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Process and Separation Process Principles**. Fourth edition. Prentice Hall, p. 1026, 2003.

GENIN, N.; RENÉ, F. Analyse Du role de La transition vitreusedans les procedes de conservation agro-alimentaries, **Journal of food engineering**, v. 26, p. 391-408, 1995.

GUINÉ, R. P. F. Influence of Drying Method on Density and Porosity of Pears. **Trans I Chem E, Part C, Food and Bioproducts Processing**, v. 84(C3), p. 179–185, 2006.

HO, J. C.; CHOU, S. K.; CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; HAWLADER, M. N. A. Analytical Study of Cyclic Temperature Drying: Effect on Drying Kinetics and Products Quality. **Journal of food engineering**, v. 51, p. 65-75, 2002.

HOFSETZ, K. **Propriedades físicas e transições de fase da banana nanica submetida à secagem com pulso HTST (inicial)**, 237p, (Tese de Doutorado)- Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

HOFSETZ, K., LOPES, C. C., HUBINGER, M. D., MAYOR, L., SERENO, A. M. Changes in the physical properties of bananas on applying HTST pulse during air-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 83, p. 531-540, 2007.

IMRE, L. Solar Drying, In: MUJUMDAR, A. S. editor. **Handbook of Industrial Drying**. Taylor & Francis Group, LLC. 2006, p. 308-356.

JAYARAMAN, K. S.; GUPTA, D. K. Drying of Fruit and Vegetables, In: MUJUMDAR, A. S. editor. **Handbook of Industrial Drying**. Taylor & Francis Group, LLC. 2006, p. 606-631.

JOUPPILA, K.; ROOS, Y. H. Glass Transitions and Crystallization in Milk Powders, **Journal Dairy Science**, v. 77, p. 2907-2915, 1994.

KARATHANOS, V. T.; SARAVACOS, G. D. Porosity and pore size distribution of starch materials, **Journal of Food Engineering**, v. 18, p. 259- 280, 1993.

KARATHANOS, V. T., KANELLOPOULOS, N. K., BELESSIOTIS, V. G. Development of porous structure during air drying of agricultural plant products. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 167-183, 1996.

KEYEY, R. B. **Drying: Principles and Practice**. Oxford: Pergamom Press, 1975. p. 358.

KHALLOUFI, S., ALMEIDA-RIVERA, C., BONGERS, P.A theoretical model and its experimental validation to predict the porosity as a function

of shrinkage and collapse phenomena during drying. **Food Research International**, v. 42, p. 1122–1130, 2009.

KROKIDA, M. K., KARATHANOS, V. T., MAROULIS, Z. B. Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. **Journal of Food Engineering**, v. 35, p. 369-380, 1998.

KROKIDA, M. K., MAROULIS, Z. B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, v. 15(10), p. 2441-2458, 1997.

LABUZA, T.; ROE, K.; PAYNE, C.; PANDA, F.; LABUZA, T. J.; LABUZA, P. S.; KRUSCH, L. Storage stability of dry food systems: Influence of state changes during drying and storage, **Proceedings of the 14th International Drying Symposium**, São Paulo, v. A, p. 48-68, 2004.

LAURINDO, J. B.; PELEG, M., Mechanical Characterization of Shredded Wheat, **Journal of Texture Studies**, v. 39, p. 444-459, 2008.

LAURINDO, J. B.; PELEG, M., Mechanical Measurements in Puffed Rice Cakes, **Journal of Texture Studies**, v. 38, p. 619-634, 2007.

LAURINDO, J.B., PORCIUNCULA, B.D.A.; ZOTARELLI, M.F. (2011). *Processo de secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) para obtenção de alimentos desidratados crocantes*. Brazilian Patent, PI 1107173-7.

LEITE, J.T. C.; MURR, F. E. X.; PARK, K. J. Transições de fases em alimentos: influência no processamento e na armazenagem, **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.1, p.83-96, 2005.

LEWICKI, P. P.; PAWLAK, G. Effect of Drying on Microstructure of Plant Tissue. **Drying Technology**, v.21, n.4, p. 657-683, 2003.

LEWICKI, P.P., Water as the determinant of food engineering properties. A review, **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 483-495, 2004.

LIMA, A. G. B.; NEBRA, S. A.; QUEIROZ, M. R., Aspectos Científicos e Tecnológicos da Banana, **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 2, p. 87-101, 2000.

LIMA, A. G. B., QUEIROZ, M. R., NEBRA, S. A. Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration. **Journal of Food Engineering**, v. 86, p. 85- 93, 2002.

LIU., G., CHEN, J., LIU, M., WAN, X. Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of bio-porous material. **Procedia Engineering**, v. 31, p. 634 – 640, 2012.

LOUKA, N., ALLAF, K. New process for texturizing partially dehydrated biological products using controlled sudden decompression to the vacuum: application on potatoes. **Journal of Food Science**, v. 67 (8), p.3033–3038, 2002.

LOUKA, N.; JUHEL, F.; ALLAF, K. Quality studies on various types of partially dried vegetables texturized by Controlled Sudden Decompression General patterns for the variation of the expansion ratio. **Journal of Food Engineering**, v. 65, p. 245–253, 2004.

LOZANO, J.E., ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M.J. Total porosity and open-pore porosity in the drying of fruits. **Journal of Food Science**, v. 45, p. 1403–1407, 1980.

LOZANO, J. E., ROTSTEIN, E., URBICAIN, M. J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. **Journal of Food Science**, v. 48, p. 1497-1553, 1983.

LUCCAS, V. Obtenção de fatias de banana desidratada crocantes através da pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leito fluidizado. Dissertação de Mestrado. Comissão de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 1996.

MADIOULI, J., LECOMTE, D., NGANYA, T., CHAVEZ, S., SGHAIER, J., SAMMOUDA, H. A method for determination of porosity change from shrinkage curves of deformable materials. **Drying Technology**, v. 25, p. 621-628, 2007.

MAYOR, L., SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 373-386, 2004.

MAZUMDER, P.; ROOPA, B. S.; BHATTACHARYA, S., Textural Attributes of a Model Snack Food at Different Moisture Contents, **Journal of Food Engineering**, v.79, p. 511–516, 2007.

MEDINA, V. M.; PEREIRA, M. E. C., **Banana**, Capítulo XII: Pós Colheita, 2004, Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/Livro_Banana_Cap_12I-D-zU0HVGp1W7.pdf, Acessado em 11 de janeiro de 2010.

MEDINA, J.C.; BLEINROTH, E.W.; MARTIN, Z.J.; TRAVAGLINI, D.A.; OKADA, M.; QUAST, D.G.; HASHIZUME, T.; NETO, L. C. B.; ALMEIDA, L. A. S. B.; RENESTO, O.V.; MORETTI, V.A. **Banana: da cultura, matéria-prima, processamento e aspectos econômicos**. 2º ed. Campinas (SP), ITAL, 1995, 302 p.

MORAGA, G.; TALENS, P.; MORAGA, M. J.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. Implication of water activity and glass transition on the mechanical and optical properties of freeze-dried apple and banana slices. **Journal of Food Engineering**, v. 106, p. 212-219, 2011.

MOTA, R. V. Avaliação da qualidade físico-química e aceitabilidade de passas de pêsego submetidas à desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25(1), p. 789-794, 2005.

MRAD, N. D.; BONAZZI, C.; COURTOIS, F.; KECHAOU, N.; MIHOUBI, B. Moisture desorption isotherms and glass transition temperatures of osmo-dehydrated apple and pear. **Food and bioproducts processing**, v. 91, p. 121- 128, 2013.

MUHTASEB, A. H.; McMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Food Products: A Review. **Trans IChemE**, v. 80, p. 118-128, 2002.

MUJUMDAR, A. S.; MENON, A. Drying of Solids: Principles, Classification and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 2ª edição. New York. Marcel Dekker, 1995. P. 1-39.

NEPA – NÚCLEO DE ESTUDOS E PESQUISA EM ALIMENTAÇÃO. **Tabela brasileira de composição de alimentos**. NEPA- Unicamp, Campinas (SP), 2011, 161p.

- NIKOLAIDIS, A., LABUZA, T. P. Glass Transition State Diagram of a Baked Cracker and Its Relationship to Gluten. **Journal of food science**, v. 61, p. 803-806, 1996.
- PAN, Z.; SHIH, C.; MCHUGH, T. H.; HIRSCHBERG, E., Study of Banana Dehydration Using Sequential Infrared Radiation Heating and Freeze-Drying. **Food Science and Technology**, v. 41, p. 1944-1951, 2008.
- PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R., Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 56, p. 97-103, 2002.
- PAYNE, F.A.; TARABA, J.L.; SAPUTRA, D. A review of puffing processes for expansion of biological products. **Journal of Food Engineering**, 10: 183-197, 1989.
- PORCIUNCULA, B. D. A. Desenvolvimento de processo integrado de desidratação e modificação da textura de banana (var. prata) por secagem convectiva e pulsos de vácuo. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- PRACHAYAWARAKORN, S., TIA, W., PLYTO, N., SOPONRONNARIT, S. Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. **Journal of Food Engineering**, v. 85, p. 509-517, 2008.
- RAHMAN, M. S. Toward prediction of porosity in foods during drying: A brief review. **Drying Technology**, v. 19(1), p. 1-13, 2001.
- RAHMAN, M. S. **Food Properties Handbook**, 1st ed., Rahman, M.S. (ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, p 500.
- RAHMAN, M.S. e LABUZA, T.P. 2007. **Water activity and food preservation**. In: Handbook of Food Preservation, 2nd ed., Rahman, M.S. (ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 447-476.

RAMÍREZ, J. R., LAGUNAS, L. M., ORTIZ, A. L., TORRES, S. S. True density and apparent density during the drying process for vegetables and fruits: A review. **Journal of food science**, v. 77 (12), p. 145-154, 2012.

RAMOS, I. N., SILVA, C. L. M., SERENO, A. M., AGUILERA, J. M. Quantification of microstructural changes during first stage air drying of grape tissue. **Journal of Food Engineering**, v. 62, p. 159-164, 2004.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 311-319, 2001.

ROOS, Y. H. Effect of Moisture on the Thermal Behavior of Strawberries Studied using Differential Scanning Calorimetry. **Journal of Food Science**, v. 52, n. 1, 1987.

ROOS, Y. H. Water Activity and Physical State Effects on Amorphous Food Stability. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 16, p. 433-447, 1993.

ROOS, Y. **Phase Transitions in Food**, San Diego, Academic Press, 1995.

ROOS, Y. Characterization of Food Polymers Using State Diagrams, **Journal of food engineering**, v. 24, p. 339-360, 1995.

ROOS, Y.; KAREL, M. Phase Transitions of Mixtures of Amorphous Polysaccharides and Sugars, **Biotechnology Progress**, v. 7, p. 49-53, 1991.

SAHIN, A. E SUMNU, S. G. 2005. **Water Activity and Sorption Properties of Foods**. In: Physical Properties of Foods, Heldman, D. R. (ed), Springer Science+Business Media, LLC, New York, USA, pp. 193-226.

SERENO, A. M., SILVA, M. A., MAYOR, L. Determination of Particle Density and Porosity in Foods and Porous Materials with High Moisture Content. **International Journal of Food Properties**, v. 10, p. 455-469, 2007.

SLADE, L.; LEVINE, H. Beyond water activity: recent advances based on an alternative approach to the assessment of food quality and safety.

Critical Reviews in Food Science and Nutrition. v.30, n.2-3, p. 115-360. 1991.

SLADE, L.; LEVINE, H. Water and the Glass Transition - Dependence of the Glass Transition on Composition and Chemical Structure: Special Implications for Flour Functionality in Cookie Baking, **Journal of Food Engineering**, v. 24, p. 431- 509, 1995.

SOBRAL, P. J. A.; TELIS, V. R. N.; HABITANTE, A.M. Q. B.; SERENO, A. Phase diagram for freeze-dried persimmon. **Thermochimica Acta**, v. 376, p. 83–89, 2001.

SOKHANSANJ, S.; JAYAS, D. S. Drying of Foodstuffs, In: MUJUMDAR, A. S. editor. **Handbook of Industrial Drying**. Taylor & Francis Group, LLC. 2006, p. 522-545.

TAKEUCHI, K. P.; SABADINI, E.; CUNHA, R. L., Análise das Propriedades Mecânicas de Cereais Matinais com Diferentes Fontes de Amido Durante o Processo de Absorção de Leite, **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, n. 25, p. 78-85, 2005.

TALLA, A., PUIGGALI, J. R., JOMAA, W., JANNOT, Y. Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. **Journal of Food Engineering**, v. 64, p. 103-109, 2004.

TSAMI, E., KATSIOTI, M. Drying kinetics for some fruits predicting of porosity and color during dehydration. **Drying Technology**, v. 18(7), p. 1559-1581, 2000.

WANG, L.; SUN, D-W. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology. **Trends in Food Science & Technology**, v. 12, p. 174 -184, 2001.

ZOGZAS, N. P., MAROULIS, Z. B., MARINOS-KOURIS, D. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. **Drying Technology**, v. 12(7), p. 1653- 1666, 1994.

VIEIRA, A. P., NICOLETI, J. F., TELIS, V. R. T. Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto. **Braz. J. Food Technol.**, Campinas, v. 15, n. 1, p. 50-58, jan./mar. 2012.

ZOTARELLI, M. F., PORCIUNCULA, B. D. A., LAURINDO, J. B. A convective multi-flash drying process for producing dehydrated crispy fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 108, p. 523-531, 2012.

WALL, M. M.; Ascorbic Acid, Vitamin A, and Mineral Composition of Banana (*Musa sp.*) and Papaya (*Carica papaya*) Cultivars Grown in Hawaii. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 19, p. 434–445, 2006.