

Jade Varaschim Link

**APLICAÇÃO DE MÚLTIPLOS CICLOS DE AQUECIMENTO-
PULSO DE VÁCUO PARA A PRODUÇÃO DE FATIAS DE
MANGA (*Mangífera indica* L.) DESIDRATADAS**

Florianópolis/SC
2016

Jade Varaschim Link

**APLICAÇÃO DE MÚLTIPLOS CICLOS DE AQUECIMENTO-
PULSO DE VÁCUO PARA A PRODUÇÃO DE FATIAS DE
MANGA (*Mangífera indica* L.) DESIDRATADAS**

Tese de doutorado submetida 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.

Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

Florianópolis/SC
2016

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

Link, Jade Varaschim

Aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo para a produção de fatias de manga (*Mangifera indica* L.) desidratadas / Jade Varaschim Link ; orientador, João Borges Laurindo - Florianópolis, SC, 2016.

131 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia de Alimentos. 2. Tecnologia de Alimentos. 3. Secagem. 4. Manga. 5. Propriedades Físicas. I. Laurindo, João Borges. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais José Carlos e Ivana e ao meu irmão Juan pelo amor, compreensão e incentivo durante toda minha vida.

A minha namorada Camila pelo apoio, paciência, amor e carinho durante todos os momentos.

Ao meu orientador João Borges Laurindo pela orientação e dedicação durante esses anos de trabalho.

À CAPES, à UFSC e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, pela oportunidade e apoio financeiro.

À banca e ao relator que dispuseram de seu tempo para a avaliação deste documento.

Aos alunos de iniciação científica que me ajudaram no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos colegas do Laboratório PROFI pela ajuda e ensinamentos durante essa jornada. Em especial ao Giustino e ao Ricardo pela paciência e pelos ensinamentos durante todo o período de desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

A manga é uma das frutas mais consumidas nas regiões tropicais, isto devido ao excelente sabor aliado às boas características nutritivas do fruto. A perecibilidade das frutas contribui para que ocorram perdas decorrentes da comercialização do produto *in natura*, motivando o desenvolvimento de operações para preservar e agregar valor ao produto. A desidratação de manga pode ser realizada por secagem solar, secagem com ar quente, secagem a vácuo, liofilização, entre outras. Neste trabalho se investigou a influência dos parâmetros de processo de desidratação de manga por *conductive multi-flash drying* (KMFD). Foram avaliadas diferentes taxas de redução da pressão do sistema durante a aplicação dos pulsos de vácuo e a aplicação de três ciclos de aquecimento-pulso de vácuo seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD-VD). Frutas desidratadas com diferentes porosidades e texturas (macias e crocantes) foram obtidas pelas diferentes condições avaliadas. Além disso, a técnica KMFD-VD apresentou-se como uma alternativa viável para a obtenção de frutas crocantes. A influência de diferentes métodos de secagem (KMFD-VD, secagem convectiva, secagem a vácuo e liofilização) nas propriedades de mangas desidratadas foi avaliada na continuidade deste estudo. No processo KMFD-VD, a rápida remoção da umidade para a superfície da fruta melhorou as taxas iniciais de secagem, alterando a estrutura interna do material, com aumento da porosidade. As amostras KMFD-VD apresentaram capacidade de reidratação e conteúdo de carotenoides totais semelhantes as amostras liofilizadas e menores diferenças de cor quando comparadas com a fruta *in natura*. O efeito da sorção de água na temperatura de transição vítrea e propriedades mecânicas das amostras de mangas desidratadas por KMFD-VD, secagem convectiva, secagem a vácuo e liofilização, também foram avaliadas neste estudo. A isoterma de sorção de umidade das amostras foi característica de materiais higroscópicos e a temperatura de transição vítrea diminuiu com o aumento da atividade de água. As amostras KMFD-VD apresentaram característica de produto crocante quando foram armazenadas em atmosferas com atividade de água inferior a 0,3. Portanto, a desidratação de mangas por KMFD resulta em um produto de alta qualidade, em tempos de secagem curtos, e é um processo adequado para a produção de mangas secas com diferentes texturas (macias e crocantes).

Palavras chave: manga, desidratação, microestrutura, propriedades físicas, textura.

ABSTRACT

Mango is one of the most consumed fruits due to its excellent flavor and good nutritional and functional characteristics. Fruits have a relatively short shelf life, which limits its commercialization as fresh products, increasing postharvest losses. Researches on preservation strategies that can reduce these losses and add value to the product are very important. Mango drying can be performed by solar drying, hot air-drying, vacuum drying and freeze-drying. In this study, the effect of conductive multi-flash drying (KMFD) process variables were assessed. Different slopes of pressure drop during the vacuum pulses and a process based on the application of three heat vacuum-pulse cycles followed by vacuum-drying (KMFD-VD) were investigated. Fruits with different porosities and textures (soft and crispy) were obtained by different KMFD conditions. Furthermore, KMFD-VD technique showed as a viable alternative for obtaining crispy fruits. The influence of different drying methods (KMFD-VD, hot air-drying, vacuum drying and freeze-drying) on dried mangoes proprieties were also investigated. KMFD-VD allows a fast moisture removal, high initial drying rates and change the internal structure increasing the porous matrix formation of the product. KMFD-VD samples presented rehydration ability and carotenoids content similar to freeze-dried samples and lower color differences when compared to raw mangoes. The effect of the water sorption on the glass transition and mechanical proprieties of mangoes dried by KMFD-VD, air-drying, vacuum drying and freeze-drying were also explored in this study. Moisture sorption isotherms of dried mangoes are characteristic of hygroscopic materials. Glass transition temperature decreased with the increasing of water activity. Dried mangoes must be kept at water activity lower than 0.3 to preserve their crispy characteristic. Therefore, the KMFD allows the production of high quality and crispy products, in very short drying times, thus allowing the production of high added value soft-and-crispy mangoes.

Keywords: mango, drying, microstructure, physical proprieties, texture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Manga var. Tommy Atkins, (a) fotografia da fruta e (b) coloração da polpa.....	37
Figura 1.2 - Curvas típicas de secagem.	38
Figura 1.3 - Mecanismo do <i>puffing</i> antecedido de secagem.....	40
Figura 1.4 - Velocidade relativa de reações em função da atividade de água.	44
Figura 1.5 - Isotermas típicas de sorção e dessorção de umidade em um alimento.....	45
Figura 1.6 - Tipos de isotermas de sorção.....	46
Figura 2.1 - Representação esquemática do corte das mangas. Fatias paralelas ao eixo da manga (a), dispositivo utilizado para o corte (b), amostras utilizadas de 5 mm de espessura (c).....	60
Figura 2.2 - Dispositivo experimental utilizado para a secagem por KMFD e por KMFD-VD.....	61
Figura 2.3 - Fluxograma operacional utilizado para a técnica de secagem por <i>Conductive multi-flash drying</i> (KMFD) e por <i>Conductive multi-flash drying</i> seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD-VD).....	62
Figura 2.4 - Evolução temporal da temperatura do interior das amostras de manga desidratadas por KMFD – 18 pulsos de vácuo (a) e KMFD-VD (b).....	67
Figura 2.5 - Evolução temporal da umidade das amostras de manga durante o processo KMFD e KMFD-VD, realizadas em triplicata. KMFD – 9,8 mbar s ⁻¹ (a), KMFD – 15,9 mbar s ⁻¹ (b), KMFD – 25,5 mbar s ⁻¹ (c) e KMFD-VD - 25,5 mbar s ⁻¹ (d).	68
Figura 2.6 - Curvas de secagem representativas das fatias de manga (a) e evolução da atividade de água (b) durante a secagem por KMFD – 9,8 mbar s ⁻¹ (○), KMFD – 15,9 mbar s ⁻¹ (Δ), KMFD 25,5 - mbar s ⁻¹ (x) e KMFD-VD – 25,5 mbar s ⁻¹ (■).....	69
Figura 2.7 - Contribuição do aquecimento condutivo e dos pulsos de vácuo durante as secagens por KMFD - 9,8 mbar s ⁻¹ (a), KMFD – 15,9 mbar s ⁻¹ (b), KMFD – 25,5 mbar s ⁻¹ (c) e KMFD-VD - 25,5 mbar s ⁻¹ (d). (○) Anterior à evaporação flash e (●) posterior à evaporação flash. As setas indicam o final dos três primeiros pulsos de vácuo.	71

Figura 2.8 - Micrografias da fratura das amostras de mangas desidratadas usando 14 e 18 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) (I). Fotografias das superfícies das fatias de manga (II). Fotografias da fratura das frutas desidratadas (III). KMFD – 9,8 mbar s ⁻¹ (a), KMFD – 15,9 mbar s ⁻¹ (b), KMFD 25,5 - mbar s ⁻¹ (c) e KMFD-VD – 25,5 mbar s ⁻¹ (d).	75
Figura 2.9 - Curvas força-deformação obtidas dos testes de penetração das amostras de manga desidratadas. KMFD utilizando 18 pulsos de vácuo (a): KMFD – 9,8 mbar s ⁻¹ (---), KMFD – 15,9 mbar s ⁻¹ (---), KMFD 25,5 - mbar s ⁻¹ (—) e KMFD-VD (—). KMFD utilizando 14 pulsos de vácuo (b): KMFD – 9,8 mbar s ⁻¹ (---), KMFD – 15,9 mbar s ⁻¹ (—), KMFD 25,5 - mbar s ⁻¹ (—).	76
Figura 3.1 - Curvas dos dados experimentais da evolução temporal do teor de umidade em triplicata das amostras de manga desidratadas pelos diferentes métodos (AD, FD, VD e KMFD-VD).	91
Figura 3.2 - Evolução temporal da umidade adimensional das amostras de manga durante os diferentes processos de secagem. AD (—), FD (—), VD (Δ) e KMFD-VD (○).	93
Figura 3.3 - a) Fotografias das mangas desidratadas, b) imagens do estereoscópio óptico e c) imagens de MEV da fratura manual das mangas desidratadas (aumento de 50x).	94
Figura 3.4 - Curvas força-deformação das amostras de mangas desidratadas por AD (----), FD (—), VD (••••) e KMFD-VD (—).	95
Figura 3.5 - Razão de reidratação a 20 °C (a) e a 80 °C (b) das mangas desidratadas em função do tempo. Dados experimentais: AD (○), FD (□), VD (◇) e KMFD-VD (Δ). O modelo de Weibull ajustado as curvas está representado por uma linha contínua.	101
Figura 3.6 - a) Capacidade de absorção de água (WAC), b) capacidade de retenção de sólidos (DHC) e c) habilidade de reidratação (RA) das frutas desidratadas.	105
Figura 4.1 - Isotermas de sorção de umidade das amostras de manga desidratadas pelos diferentes métodos. Dados experimentais: AD (○), FD (□), VD (◇) e KMFD-VD (Δ). O modelo de GAB ajustado as curvas está representado por linhas contínuas.	118
Figura 4.2 - Temperatura de transição vítrea em função do teor de umidade (base úmida, b. u.) das amostras de manga desidratadas e acondicionadas em diferentes UR. AD (○), FD (□), VD (◇) e KMFD-	

VD (Δ). O modelo de Gordon-Taylor ajustado as curvas está representado por linhas contínuas. 120

Figura 4.3 - Temperatura de transição vítrea em função da atividade de água das amostras de manga desidratadas por secagem convectiva (AD), liofilização (FD), secagem a vácuo (VD) e KMFD-VD. O modelo de Roos ajustado às curvas está representado por linhas contínuas. 122

Figura 4.4 - Temperatura de transição vítrea (T_g) em função da atividade de água (a_w) e conteúdo de umidade (b.s.), a 25 °C, das amostras de manga desidratadas por AD, FD, VD e KMFD-VD. Dados experimentais de T_g (\bullet , \blacksquare , \blacklozenge , \blacktriangle). Dados experimentais de umidade de equilíbrio (\bullet , \blacksquare , \blacklozenge , \blacktriangle). Modelo de Roos (---). Modelo de GAB (---)..... 123

Figura 4.5 - Amplitude da oscilação da força a partir de resultados representativos dos testes de penetração das amostras KMFD-VD acondicionadas em umidade relativas entre 11,3 e 64,3 %. Linha superior: curvas força-deformação (\circ) e ajuste não-paramétrico (---). Linha inferior: curvas dos resíduos. 125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Principais países produtores de manga.	35
Tabela 1.2 - Composição química da manga var. Tommy Atkins por 100 g de parte comestível.	36
Tabela 2.1 - Teor de umidade (b.s.) e atividade de água das amostras de manga desidratadas pelas diferentes condições de secagem.	70
Tabela 2.2 - Valores médios e desvio padrão da massa específica aparente e porosidade acessível das amostras de manga <i>in natura</i> e desidratadas.	72
Tabela 2.3 - Parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) da manga <i>in natura</i> e desidratada por KMFD e KMFD-VD.....	73
Tabela 3.1 - Teor de umidade média ($X_{bs\ final}$) e atividade de água (a_w) das mangas desidratadas. Tempo de secagem (t_f), coeficientes angulares (taxa de secagem) e coeficiente de correlação (R^2) para o ajuste linear aos dados experimentais das diferentes condições de secagem.	92
Tabela 3.2 – Massa específica aparente (ρ_a) e porosidade acessível (ε) das amostras de manga <i>in natura</i> e desidratadas.....	97
Tabela 3.3 - Parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) das amostras <i>in natura</i> e desidratadas.	98
Tabela 3.4 - Valor médio (\pm desvio padrão) dos carotenoides em função da massa seca de produto para os diferentes métodos de secagem.	99
Tabela 3.5 - Parâmetros do modelo exponencial ajustado aos dados experimentais da razão de reidratação.....	102
Tabela 3.6 - Parâmetros do modelo de Peleg ajustado aos dados experimentais da razão de reidratação.....	102
Tabela 3.7 - Parâmetros do modelo de Weibull ajustado aos dados experimentais da razão de reidratação.....	103
Tabela 4.1 - Atividade de água de soluções salinas saturadas a temperatura de 25 °C.....	114
Tabela 4.2 - Umidades de equilíbrio das amostras de manga desidratadas por diferentes processos de secagem acondicionadas em diferentes umidades relativas (UR).	117

Tabela 4.3 - Parâmetros estimados do modelo de GAB para os dados experimentais das amostras de manga desidratada por diferentes processos de secagem acondicionadas em diferentes UR.	118
Tabela 4.4 - Parâmetros estimados do modelo de Gordon-Taylor e Ross para manga desidratada por diferentes processos de secagem. ..	120
Tabela 4.5 - Número de picos de força registrado no teste de penetração das amostras de mangas desidratadas por KMFD-VD acondicionadas em diferentes umidades relativas.....	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOAC	<i>Association of Official Analytical Chemists</i>
AD	Secagem convectiva com ar quente
ANOVA	Análise de variância
CAPV	Secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo
CMFD	<i>Convective multi-flash drying</i>
DIC	<i>Instant controlled pressure drop</i>
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
EPD	<i>Explosion puffing dryng</i>
FAOSTAT	Divisão de estatística da <i>Food and Agriculture Organization</i>
FD	Liofilização
GAB	Guggenheim – Anderson – Boer
HTST	<i>High-temperature short-time</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KMFD	<i>Conductive-multi-flash drying</i>
KMFD-VD	<i>Conductive multi-flash drying</i> seguido de um período de secagem a vácuo
LCME	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MFD	<i>Multi-flash drying</i>
MWMFD	<i>Microwave multi-flash drying</i>
PID	Proporcional-integral-derivativo
POF	Pesquisa Orçamentária Familiar
RW	<i>Refractance window</i> ®
VD	Secagem a vácuo

LISTA DE SÍMBOLOS

A, B, C	Parâmetros da equação de Antoine
<i>Abs</i>	Máxima absorvância medida
a_w	Atividade de água
a^*	Tonalidade vermelha/verde
$A_{1cm}^{1\%}$	Absortividade para o carotenoide predominante em éter de petróleo
A	Parâmetro de forma do modelo de Weibull
b^*	Tonalidade amarela/azul
B	Parâmetro de escala do modelo de Weibull
b.s.	Base seca ($g\ g^{-1}$)
<i>c</i>	Calor específico médio do produto no intervalo de temperaturas de trabalho ($kJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)
C	Constante de GAB relacionada à energia de interação das moléculas na monocamada
c^*	Intensidade ou saturação da cor
CAR	Carotenoides totais ($\mu g\ g^{-1}$)
DHC	Capacidade de retenção de sólidos
dX/dt	Taxa de secagem ($g\ g^{-1}\ h^{-1}$)
<i>E</i>	Taxa de expansão
ϵ	Porosidade
ΔE^*	Variação total da cor
FP	Força de penetração (kgf)
H	Tonalidade vermelha/amarela/verde/azul
ΔH_v	Entalpia específica de vaporização da água na pressão final de trabalho ($kJ\ kg^{-1}$)
K	Constante cinética da equação exponencial (min^{-1})
<i>K</i>	Constante de GAB relacionada à energia de interação das moléculas adsorvidas na multicamada
<i>k</i>	Parâmetro do modelo de Gordon-Taylor
k_1 e k_2	Parâmetros do modelo de Peleg
L^*	Luminosidade entre o preto e branco
<i>m</i>	Massa da amostra (g)
m_0	Massa de amostra no início da secagem (kg)
$m_{c,m}$	Massa da cesta com a amostra de manga (g)
m_c	Massa da cesta vazia (g)
$m_{c,m,h}$	Massa da cesta com a amostra de manga imersa em <i>n</i> -heptano (g)
$m_{c,h}$	Massa da cesta vazia imersa em <i>n</i> -heptano (g)
m_d	Massa da amostra desidratada (g)

m_i	Massa de amostra após o experimento (kg)
m_m	Massa da amostra de manga (g)
m_p	Massa inicial do produto (kg)
m_r	Massa da amostra reidratada (g)
m_{sr}	Massa de sólidos do material reidratado (g)
m_{sd}	Massa de sólidos do material desidratado (g)
m_{wr}	Massa de água do material (g)
m_{wd}	Massa de água do material desidratado (g)
m_{w0}	Massa de água da amostra inicial (g)
ΔM	Varição da massa de vapor evaporado durante a aplicação do pulso de vácuo por unidade de massa do material
Δm_w	Perda de massa (kg)
P	Pressão (mbar)
$(P_w^v)_{si}$	Pressão de vapor do sistema
P_w^v	Pressão de vapor da água pura
ΔP	Taxa de redução de pressão (mbar s ⁻¹)
ρ_{ap}	Massa específica aparente (g cm ⁻³)
ρ_r	Massa específica real (g cm ⁻³)
ρ_s	Massa específica do solvente <i>n</i> -heptano (g cm ⁻³)
ρ_v	Massa específica do vapor na temperatura após a descompressão do sistema (g cm ⁻³)
RC	Capacidade de reidratação
RR	Razão de reidratação
RR _e	Razão de reidratação na saturação
R ²	Coefficiente de determinação
RMSE	Raiz quadrada do erro quadrático médio
SST	Sólidos solúveis totais (°Brix)
t	Tempo de processo (s, min, h)
T	Temperatura (°C)
ΔT	Redução da temperatura do material durante a aplicação do vácuo (°C)
Δt	Tempo de descompressão (s)
t _f	Tempo final de secagem (min, h)
T _g	Temperatura de transição vítrea (°C)
T _{gs}	Temperatura de transição vítrea do sólido (°C)
T _{gw}	Temperatura de transição vítrea da água (-135 °C)
UR	Umidade Relativa (%)
V _{ap}	Volume aparente da amostra (m ³)
V _r	Volume real da amostra (m ³)

ΔV	Varição do volume do sistema por unidade de massa
X_{bs}	Umidade em base seca (g g^{-1})
X_{bu}	Umidade em base úmida (g g^{-1})
X_{eq}	Umidade de equilíbrio (g g^{-1})
X_m	Umidade na monocamada (g g^{-1})
WAC	Capacidade de absorção de água
w_s	Fração mássica de sólidos na mistura (g sólidos/g total)
w_w	Fração mássica de água na mistura (g água/g total)
Y	Parâmetro do modelo de Roos
Z	Parâmetro do modelo de Roos

SUMÁRIO

DIAGRAMA CONCEITUAL.....	29
INTRODUÇÃO.....	31
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
1.1 MANGA	35
1.1.1 Manga var. Tommy Atkins (<i>Mangífera indica</i> L.)	36
1.2 SECAGEM	37
1.2.1 Secagem convectiva	37
1.2.2 Secagem a vácuo	39
1.2.3 Liofilização	40
1.2.4 Puff drying	40
1.2.5 Secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV).....	41
1.3 ATIVIDADE DE ÁGUA E ISOTERMAS DE SORÇÃO DE UMIDADE.....	42
1.4 MICROESTRUTURA DE ALIMENTOS.....	46
1.5 POROSIDADE	47
1.6 TEXTURA.....	48
1.7 REIDRATAÇÃO	49
1.8 TRANSIÇÃO DE FASE E TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA (T_G).....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
2 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA CINÉTICA DE SECAGEM E NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE MANGAS DESIDRATADAS POR SUCESSIVOS CICLOS DE AQUECIMENTO-PULSO DE VÁCUO.....	59
2.1 INTRODUÇÃO	59
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	60

2.2.1 Seleção e preparação das frutas	60
2.2.2 Dispositivo experimental.....	61
2.2.3 Experimentos de secagem	62
2.2.4 Caracterização das amostras.....	63
2.2.4.1 Determinação da umidade	63
2.2.4.2 Atividade de água.....	63
2.2.4.3 Determinação das propriedades mecânicas	63
2.2.4.4 Volume e massa específica aparente	64
2.2.4.5 Volume real.....	64
2.2.4.6 Porosidade	65
2.2.4.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	65
2.2.4.8 Análise instrumental de cor.....	65
2.2.4.9 Análise estatística	66
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
2.3.1 Curvas de secagem	66
2.3.2 Propriedades da manga desidratada	71
2.3.2.1 Massa específica aparente e porosidade acessível.....	71
2.3.2.2 Análise instrumental de cor.....	72
2.3.2.3 Microestrutura	74
2.3.2.4 Propriedades mecânicas	76
2.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

3 ESTUDO DA DESIDRATAÇÃO DE FATIAS DE MANGA POR DIFERENTES MÉTODOS: CINÉTICAS DE SECAGEM, PROPRIEDADES FÍSICAS, REIDRATAÇÃO E CAROTENOIDES TOTAIS.

3.1 INTRODUÇÃO	83
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	85
3.2.1 Seleção e preparação das amostras.....	85
3.2.2 Secagem.....	85
3.2.2.1 Secagem convectiva (AD).....	85
3.2.2.2 Liofilização (FD).....	85
3.2.2.3 Secagem a vácuo (VD).....	86
3.2.2.4 Conductive multi-flash drying seguido de secagem a vácuo (KMFD-VD).....	86

3.2.3 Caracterização das frutas desidratadas.....	86
3.2.3.1 Determinações analíticas	86
3.2.3.2 Propriedades mecânicas.....	87
3.2.3.3 Microestrutura	88
3.2.3.4 Análise instrumental de cor	88
3.2.3.5 Reidratação.....	88
3.2.3.6 Ajuste matemático das curvas de reidratação.....	89
3.2.3.7 Análise estatística	90
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
3.3.1 Curvas de secagem.....	91
3.3.2 Caracterização das frutas desidratadas.....	93
3.3.2.1 Microestrutura e propriedades mecânicas	93
3.3.2.2 Massa específica aparente e porosidade acessível	96
3.3.2.3 Análise instrumental de cor	97
3.3.2.4 Carotenoides	98
3.3.2.5 Cinéticas de reidratação.....	100
3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

4 EFEITO DA SORÇÃO DE ÁGUA NA TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MANGAS DESIDRATADAS POR DIFERENTES MÉTODOS..... 111

4.1 INTRODUÇÃO	111
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	112
4.2.1 Seleção e preparação das amostras	112
4.2.2 Secagem	113
4.2.2.1 Secagem convectiva (AD).....	113
4.2.2.2 Liofilização (FD).....	113
4.2.2.3 Secagem a vácuo (VD).....	113
4.2.2.4 Conductive multi-flash drying seguido de secagem a vácuo (KMFV-VD).....	113
4.2.3 Isotermas de sorção de umidade.....	113
4.2.4 Temperatura de transição vítrea (T_g)	115
4.2.5 Propriedades mecânicas.....	116

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	116
4.3.1 Isotermas de sorção de umidade	116
4.3.2 Temperatura de transição vítrea (T_g).....	119
4.3.3 Propriedades mecânicas.....	124
4.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
5 CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES DE	
TRABALHOS FUTUROS	129
5.1 CONCLUSÕES	129
5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	130

DIAGRAMA CONCEITUAL

APLICAÇÃO DE MÚLTIPLOS CICLOS DE AQUECIMENTO-PULSO DE VÁCUO PARA A PRODUÇÃO DE FATIAS DE MANGA (*Mangífera indica* L.) DESIDRATADAS

Por quê?

- Desenvolver novos produtos: mangas desidratadas com diferentes microestruturas e texturas: frutas macias e crocantes
- Agregar valor às frutas
- Compreender os mecanismos de formação da microestrutura e textura durante a secagem e armazenamento

O que já existe

- Liofilização → frutas crocantes
- *Puff-drying* → frutas e hortaliças crocantes (uso de pressões de 6-8 bar)
- HTST → frutas crocantes (altas temperaturas)
- Ciclos de aquecimento-pulso de vácuo: convecção e condução de calor (CMFD, KMFD, trabalhos realizados no PROFI-UFSC) → frutas crocantes
- Secagem com micro-ondas sob vácuo → frutas crocantes

Contribuição do presente trabalho

- Determinar a influência das variáveis do processo de secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo na formação da microestrutura e da textura de frutas desidratadas

Hipóteses da pesquisa

- É possível alterar as propriedades de textura pela escolha do número de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo aplicados durante o KMFD e pelo teor de umidade final do produto desidratado
- É possível alterar a microestrutura e porosidade das mangas desidratadas por KMFD pela utilização de diferentes taxas de redução da pressão durante os pulsos de vácuo aplicados
- A secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo produz frutas com textura crocante e com propriedades similares às liofilizadas

Respostas esperadas

- Características visuais e físico-químicas das frutas ao longo do processo de desidratação por KMFD: umidade, atividade de água, imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), fotografias, porosidade, massa específica real e aparente, cor e textura
- Características físico-químicas e de reidratação das frutas após a desidratação por diferentes métodos de secagem
- Isotermas de sorção de umidade, temperaturas de transição vítrea e características de textura das frutas acondicionadas em diferentes umidades relativas

INTRODUÇÃO

A manga é uma fruta tropical de grande importância, sendo cultivada em muitas regiões do mundo. No Brasil, a manga é muito consumida devido ao seu sabor, aliado às suas características nutricionais, além de ser produzida para exportação. Assim, sua produção tem grande importância econômica para o país. Na maioria dos países tropicais em desenvolvimento, a abundância natural de frutas frescas leva a um excesso em relação à demanda local. O excedente de produção de frutas frescas nem sempre é completamente utilizado para processamento industrial, que agrega valor e reduz perdas pós-colheita.

As mudanças no estilo de vida do homem contemporâneo geram demanda por produtos convenientes, porém um maior consumo de frutas e hortaliças *in natura*, além de produtos processados com as propriedades sensoriais e nutricionais preservadas, tem sido incentivado por médicos e nutricionistas. Esse cenário gera a necessidade de desenvolvimento de processos e operações que minimizem a deterioração da qualidade de frutas e hortaliças durante o processamento.

A desidratação é uma das operações unitárias mais comumente utilizadas para a conservação de frutas e hortaliças. A redução da atividade de água resulta em produtos com maior estabilidade microbiológica, além de retardar outras reações indesejáveis, de origem química e enzimática. Além disso, devido à redução de massa e volume dos produtos desidratados, sua manipulação, armazenagem e transporte são facilitados (BARBOSA-CÁNOVAS e VEJA-MERCADO, 2000). A desidratação de manga pode ser realizada por diferentes métodos de secagem como: secagem solar, secagem com ar quente, secagem a vácuo e liofilização. A remoção da umidade dos alimentos é um processo que resulta em mudanças nas propriedades físicas e na aparência do produto, que podem prejudicar sua aceitação. Devido a isso, métodos alternativos de desidratação de manga como o *puff-drying* (secagem por explosão) e a secagem por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo vêm sendo estudados com a finalidade de aumentar a qualidade do produto final, assim como diminuir os custos e tempo de secagem (VARNALIS et al., 2001; ZOTARELLI et al., 2012; PORCIUNCULA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2016).

A aceitação do produto desidratado é determinada em grande parte pela percepção sensorial do consumidor, representada de maneira integrada pela aparência, sabor, aroma e textura. Esta última propriedade está relacionada diretamente à estrutura física e à composição do

alimento. A textura é uma propriedade importante para certas categorias de alimentos, particularmente para aqueles cujo atributo de crocância é esperado. Os exemplos clássicos são os *snacks* extrusados, maçãs frescas e algumas frutas e hortaliças desidratadas (WILKINSON, DIJKSTERHUIS e MINEKUS, 2000). Porém, a crocância dos produtos desidratados é afetada pelo aumento do conteúdo de umidade, que altera as propriedades de textura desses alimentos, tornando-os macios.

Nesse sentido, o objetivo global deste estudo é produzir mangas desidratadas utilizando diferentes métodos e condições de secagem, avaliar as suas propriedades físico-químicas e de reidratação, além de suas características de textura quando armazenadas em diferentes umidades relativas.

Os objetivos específicos são:

- Analisar as cinéticas de secagem e as propriedades físicas de mangas desidratadas por *Conductive multi-flash drying* (KMFD), utilizando diferentes taxas de redução da pressão durante os pulsos de vácuo aplicados e por de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo seguido por um período de secagem a vácuo;
- Analisar as cinéticas de secagem de mangas submetidas a diferentes processos (secagem convectiva, liofilização, secagem a vácuo e KMFD-VD), e a influência destes métodos nas propriedades físicas, conteúdo de carotenoides e reidratação das frutas;
- Avaliar a influência da sorção de umidade na temperatura de transição vítrea e nas propriedades mecânicas de mangas desidratadas por diferentes métodos.

Estrutura do documento

Os capítulos que compõem o documento foram divididos da seguinte forma:

Capítulo 1 – Revisão Bibliográfica.

Capítulo 2 – Influência das variáveis de processo na cinética de secagem e nas propriedades físicas de mangas desidratadas por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.

Capítulo 3 – Estudo da desidratação de fatias de manga por diferentes métodos: cinéticas de secagem, propriedades físicas, reidratação e carotenoides totais.

Capítulo 4 – Efeito da sorção de água na temperatura de transição vítrea e nas propriedades mecânicas de mangas desidratadas por diferentes métodos.

Capítulo 5 – Conclusões gerais e propostas de continuidade dos estudos.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 MANGA

A mangueira (*Mangífera indica* L.) é uma frutífera da família *Anacardiaceae*, conhecida há mais de quatro mil anos e atualmente é cultivada na maioria dos países de clima tropical e subtropical (CRUZ, 2006). A partir do desenvolvimento de tecnologias apropriadas, a produção de manga passou a ser realizada com técnicas modernas visando manter sua qualidade e alcançar bons valores no mercado (EMBRAPA, 2000; CRUZ, 2006). Segundo dados da FAOSTAT (2016), o mundo produziu no ano de 2013, aproximadamente 43,93 milhões de toneladas de manga. O Brasil representou 2,65 % da produção mundial no ano de 2013, com aproximadamente 1,16 milhões de toneladas (Tabela 1.1), produção 1,08 % menor em relação ao período anterior correspondente.

Tabela 1.1 – Principais países produtores de manga.

País	Produção (toneladas)	Porcentagem em relação a produção total (%)
Índia	18.002.000	40,97
China	4.450.000	10,13
Tailândia	3.141.950	7,15
Indonésia	2.058.607	4,68
México	1.901.871	4,32
Brasil	1.163.000	2,65

Fonte: FAOSTAT (2016).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2012), a região nordeste é a maior produtora de mangas do país (cerca de 66 %). Entre os estados da região, destacam-se a Bahia e Pernambuco, com uma produção de aproximadamente 422 e 226 mil toneladas em 2012, respectivamente. Outro estado que se destaca na produção de mangas no Brasil é São Paulo, com produção de 234 mil toneladas de manga em 2012. A manga é a terceira fruta mais exportada do país com aproximadamente 3,5 mil toneladas no ano de 2013, ficando atrás apenas de melões (28,2 mil toneladas) e limões (8,6 mil toneladas) (SEBRAE, 2014). O consumo de manga *in natura*, segundo dados da Pesquisa Orçamentária Familiar – (POF), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2010), foi de 0,97 kg por

habitante-ano em 2009, sendo as regiões nordeste, sul e sudeste as mais expressivas em termos de consumo.

1.1.1 Manga var. Tommy Atkins (*Mangífera indica* L.)

A manga está entre as frutas tropicais de maior expressão econômica nos mercados brasileiro e internacional (SEBRAE, 2014). É um fruto carnoso, com apenas uma semente, bastante variável em termos de tamanho, peso, forma e cor. A polpa é de cor amarela, mais ou menos fibrosa (de acordo com a variedade) e de sabor variado. No interior da polpa encontra-se o caroço ou semente, que é fibroso e apresenta formas similares, mas tamanhos diferentes nas variedades cultivadas (EMBRAPA, 2000).

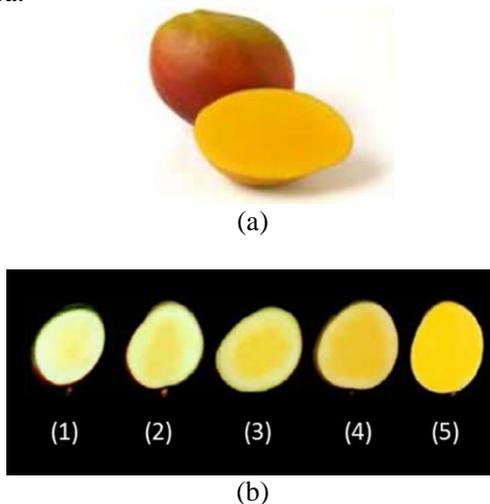
Os frutos da Tommy Atkins são originários da Flórida (EUA), possuem tamanhos médios a grandes (até 13 cm de comprimento e 400 a 600 g) resistentes ao manuseio e ao transporte, de casca grossa, lisa e de coloração que varia de vermelho com manchas amarelas a vermelho escuro. A semente é pequena, cerca de 8 % do peso do fruto. Seus principais constituintes são a água, carboidratos, fibras e proteínas (Tabela 1.2) (EMBRAPA, 2000; CRUZ, 2006). A polpa apresenta textura firme e sabor doce (Figura 1.1).

Tabela 1.2 - Composição química da manga var. Tommy Atkins por 100 g de parte comestível.

Constituinte	g.100g⁻¹
Umidade	85,8
Proteína	0,9
Lipídeos	0,2
Carboidratos	12,8
Fibra Alimentar	2,1
Cinzas	0,3

FONTE: NEPA-UNICAMP (2011).

Figura 1.1 - Manga var. Tommy Atkins, (a) fotografia da fruta e (b) coloração da polpa.



Fonte: CONASPROMANGO (2014).

1.2 SECAGEM

Devido à falta de processamento adequado, cerca de um terço da produção mundial de frutas e hortaliças é perdida anualmente (GUSTAVSSON et al., 2011; KUMAR et al., 2014). Várias técnicas têm sido utilizadas para reduzir as perdas e aumentar a vida útil das frutas e hortaliças, entre as quais a secagem merece destaque, sendo um dos métodos mais antigos e simples utilizados para conservação de alimentos. Além disso, a secagem reduz o peso e o volume e permite o transporte dos produtos sem necessidade de refrigeração (KUMAR et al., 2014). Os processos de secagem são diversos e muito utilizados no processamento de alimentos (KOYUNCU et al., 2007). Alguns desses processos são apresentados a seguir.

1.2.1 Secagem convectiva

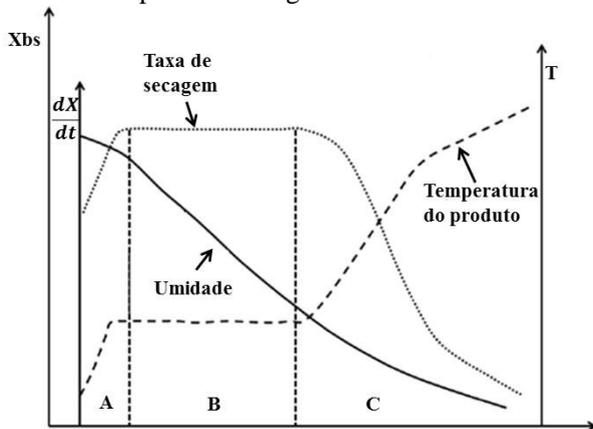
A secagem objetiva a remoção de líquido de um sólido através do fornecimento de calor (PERRY e CHILTON, 1984). Na secagem convectiva, o calor fornecido pelo ar quente é absorvido pelo produto, fornecendo o calor latente necessário para evaporar a água, que sai pela

superfície. Os gradientes de água líquida resultantes da maior secagem que ocorre na superfície do sólido geram gradientes de pressão capilar, que causam fluxo de água do interior para a superfície. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor da água entre o ar e o interior do sólido resulta na transferência de umidade do interior para a superfície do produto. Assim, a secagem é um processo que envolve simultaneamente transferência de calor e massa, sendo que o mecanismo de transporte do líquido e/ou vapor pode ocorrer diferentemente, dependendo do tipo do produto e da umidade do mesmo (FELLOWS, 2006).

A Figura 1.2 representa uma curva típica de secagem, a curva da taxa de secagem, e a evolução da temperatura do produto durante o processo.

A curva de secagem representa a diminuição do teor de umidade (X_{bs} , em base seca) do produto durante o processo (t), isto é, a curva que é obtida pesando o produto durante a secagem em determinadas condições de secagem (temperatura, umidade relativa, velocidade do ar). A curva da taxa 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 da variação da temperatura do produto durante a secagem está intimamente associada com as condições de secagem e com a evolução da umidade do sólido durante a secagem.

Figura 1.2 - Curvas típicas de secagem.



Fonte: Adaptado de Park et al. (2007).

Três diferentes etapas podem ser identificadas no processo de secagem. No período inicial de secagem (região A na Figura 1.2), ou período de estabilização, a temperatura da superfície do produto é baixa quando comparada com a temperatura do ar, elevando-se rapidamente (STRUMILO e KUDRA, 1986; FELLOWS, 2006). Após a estabilização da temperatura do produto, inicia-se o período de secagem à taxa constante (região B na Figura 1.2), no qual a remoção de umidade se dá à taxa constante. Em regime estacionário, a temperatura da superfície do produto é igual à temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, implicando uma taxa constante de transferência de calor, o que resulta em uma taxa de secagem constante. O final desta etapa é marcado por uma redução na taxa de secagem (ponto denominado de umidade crítica), onde as transferências internas passam a apresentar um papel mais importante (FELLOWS, 2006).

No último período de secagem (região C na Figura 1.2), a velocidade de secagem diminui continuamente ao longo de todo o período de secagem restante. Esta etapa é denominada 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., 1982). O líquido movimenta-se do interior do alimento para a superfície a taxas cada vez menores. Esse movimento se dá por forças capilares (particularmente em alimentos porosos), difusão de líquido devido à diferença na concentração dos solutos no interior do produto e difusão de vapor causada por gradientes de pressão de vapor nos espaços ocupados por ar dentro do alimento (FELLOWS, 2006).

1.2.2 Secagem a vácuo

Uma técnica muito utilizada em alimentos que podem sofrer danos, alterações de cor ou até mesmo perdas de vitaminas e antioxidantes se expostos a altas temperaturas é a secagem a vácuo. O vácuo aumenta a taxa de evaporação devido à diminuição da temperatura de saturação da água. A manutenção de baixas temperaturas é essencial para produtos termosensíveis, além de estabelecer um ambiente de secagem com baixas concentrações de oxigênio, contribuindo para reduzir as perdas sensoriais e nutricionais dos produtos desidratados. Os benefícios da secagem a vácuo incluem a utilização de menores temperaturas de processo e maiores taxas de secagem, que resultam em produtos com melhor qualidade, retenção de nutrientes e aromas quando comparados à secagem com ar quente (ALIBAS, 2007; ŠUMIC et al., 2013).

1.2.3 Liofilização

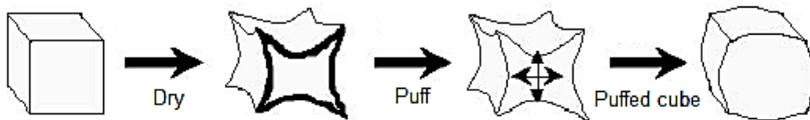
Entre os métodos de secagem, a liofilização é considerada um dos mais avançados para a secagem de produtos de alto valor e que são sensíveis a altas temperaturas, uma vez que evita o encolhimento indesejável e resulta em produtos com elevada porosidade, qualidade nutricional, retenção de aroma, sabor e cor, assim como com melhores propriedades de reidratação (OIKONOMOPOULOU et al., 2011).

A liofilização é baseada na desidratação por sublimação do produto congelado (RATTI, 2001). Nesta técnica, o produto é primeiro congelado e, em seguida, o gelo é removido por sublimação, diretamente do estado sólido para a fase de vapor (OIKONOMOPOULOU et al., 2011). Considerando o equipamento utilizado (unidade de congelamento, bomba de vácuo, condensador), o longo tempo de secagem necessário e a energia requerida, a liofilização é um processo de custo elevado (VARNALIS et al., 2001). Por este motivo, seu uso nas indústrias de alimentos é restrito a produtos de alto valor agregado, tais como café, chás, ervas aromáticas e frutas e hortaliças crocantes (BABIC et al., 2009, RATTI, 2001).

1.2.4 Puff drying

Um método alternativo e de menor custo para produzir materiais porosos é o *puff drying*. O método de *puffing* (Figura 1.3) envolve a liberação ou expansão do vapor ou do gás interno ao produto com o objetivo de expandir ou romper a estrutura existente (PAYNE et al., 1989; VARNALIS et al., 2001).

Figura 1.3 - Mecanismo do *puffing* antecedido de secagem.



Fonte: Varnalis et al. (2001).

De acordo com Varnalis et al. (2001), durante a secagem inicial, geralmente utilizando ar quente, uma camada é formada na superfície (que se acredita ser fundamental para se atingir o efeito de *puffing*). Em seguida, são aplicadas altas temperaturas que fazem com que parte da umidade interior da amostra se torne vapor. A camada parcialmente seca

evita o escape deste vapor, que aumenta a pressão interna. Quando o sistema é descomprimido, a expansão dos vapores força as paredes de dentro para fora, criando uma estrutura porosa, com volume expandido (*puffing*).

1.2.5 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 PII107173-7 depositado por Laurindo, Porciuncula e Zotarelli (2011) e em Zotarelli et al. (2012). O processo é baseado no sucessivo aquecimento à pressão atmosférica das amostras, seguido de uma descompressão instantânea do sistema para a obtenção de produtos desidratados e 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 próxima da temperatura de saturação da água na pressão aplicada (WANG e SUN, 2001). Sempre que uma porção de líquido evapora, uma quantidade de calor igual ao calor latente de evaporação deve ser absorvida 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 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 por CAPV pode ocorrer por diferentes maneiras (condução, convecção, radiação térmica e por micro-ondas) (LAURINDO, PORCIUNCULA e ZOTARELLI, 2011). Zotarelli et al. (2012) secaram amostras de mangas pela técnica de sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. Os autores utilizaram ar quente como principal fonte de aquecimento (até 60 °C) das amostras antes da aplicação dos pulsos de vácuo. A técnica foi denominada *Convective multi-flash drying* (CMFD). Após 240 min de processo, o produto final desidratado apresentou baixo teor de umidade e atividade de água e textura crocante. Porciuncula et al. (2016) investigaram uma alternativa de aquecimento de bananas a serem secas pela técnica CAPV usando a transferência de calor por condução, através do contato de fatias das frutas diretamente com uma placa aquecida. Este processo foi denominado de

Conductive-multi-flash drying (KMFD). A técnica se apresentou como uma alternativa para a obtenção de frutas desidratadas crocantes e com alta porosidade. Monteiro et al. (2016) estudaram a desidratação de bananas por aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. Os autores utilizaram micro-ondas para realizar o aquecimento e desidratação das amostras (*microwave multi-flash drying* – MWMFD). O processo MWMFD apresentou o período de aquecimento das amostras muito rápido e tempos de secagens muito curtos (17-30 min) em comparação a liofilização (900 min).

A quantidade de água evaporada do produto (perda de massa) durante a aplicação de um pulso de vácuo (resfriamento a vácuo) é dada pela Equação 1.1, que é resultado de um simples balanço de energia (ZOTARELLI et al., 2012). 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).

$$\Delta m_w = \frac{c \cdot m_p \cdot \Delta T}{\Delta H_v} \quad (1.1)$$

em que Δm_w é a perda de massa (kg); c é o calor específico médio do produto no intervalo de temperaturas de trabalho [kJ/(kg °C)]; m_p é a massa inicial do produto (kg); ΔT é a redução da temperatura do material durante a aplicação do vácuo e ΔH_v é a entalpia específica de vaporização da água na pressão final de trabalho (kJ/kg).

Para prever a temperatura de saturação da água na pressão final atingida pela câmara de secagem, a equação de Antoine (Equação 1.2) é a correlação empírica mais utilizada, pois descreve satisfatoriamente o comportamento da pressão (P) para um grande número de substâncias:

$$\log_{10} P = A - \frac{B}{T+C} \quad (1.2)$$

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

1.3 ATIVIDADE DE ÁGUA E ISOTERMAS DE SORÇÃO DE UMIDADE

A água é o principal componente dos alimentos e pode atuar como solvente, meio para transferência de calor e massa, ou participar em reações químicas e biológicas. A água é, portanto, um fator importante na

determinação das propriedades dos alimentos nos vários estágios de processamento e armazenamento (WANG e LIAPIS, 2012).

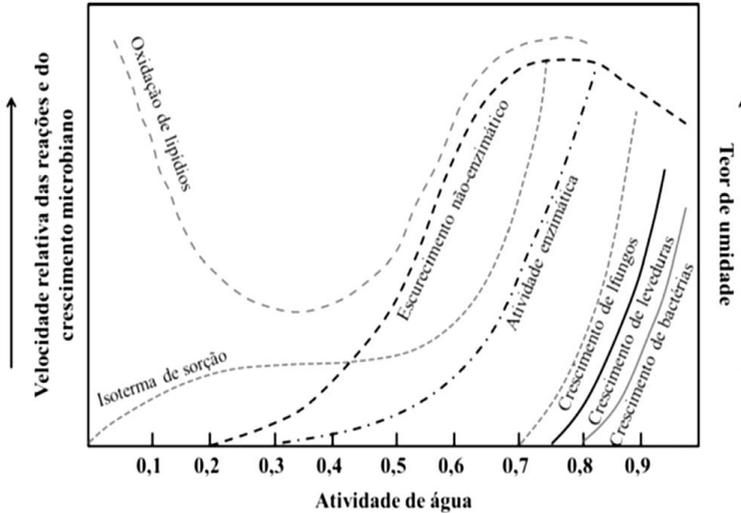
A definição de atividade de água de um alimento é baseada no potencial químico da água, que no equilíbrio deve ser o mesmo potencial químico da água no ar circundante. Isto também significa que a pressão de vapor da água no alimento e a pressão de vapor da água no ar devem ser iguais (LABUZA, TANNENBAUM e KAREL, 1970). Em condição de equilíbrio, a atividade da água a uma dada temperatura é definida como a razão entre a pressão parcial de vapor da água no sistema, pela pressão parcial de vapor da água pura na mesma temperatura (Equação 1.3). 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 (BARBOSA-CANOVAS et al., 2007). Assim a atividade de água pode ser expressa como:

$$a_w = \frac{(P_w^v)_{si}}{P_w^v} = UR \quad (1.3)$$

onde $(P_w^v)_{si}$ é a pressão de vapor do sistema; P_w^v é a pressão de vapor de água pura e UR é a umidade relativa.

A atividade de água é um dos fatores mais importantes para o processamento, conservação e armazenamento dos alimentos, uma vez que ela quantifica o grau de ligação da água contida no produto e, conseqüentemente, sua disponibilidade para agir como solvente e participar das transformações químicas, bioquímicas e microbiológicas (FELLOWS, 2006; DAMODARAN, PARKIN e FENNEMA, 2010). Apresentam-se, na Figura 1.4, as importâncias relativas das diferentes reações químicas e crescimento microbiano em função da atividade de água dos alimentos.

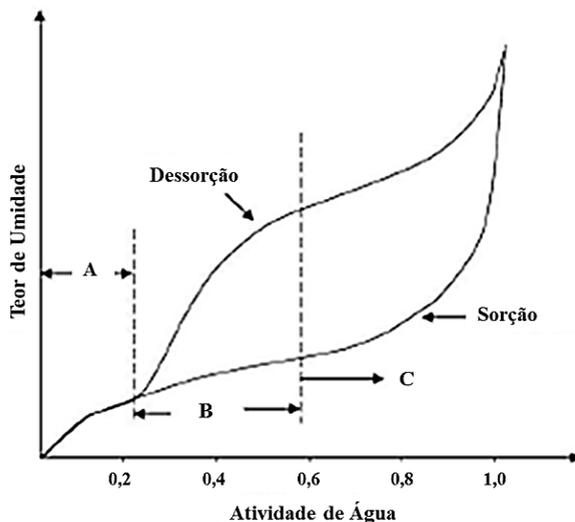
Figura 1.4 - Velocidade relativa de reações em função da atividade de água.



Fonte: adaptado de Labuza, Tannenbaum e Karel (1970).

A umidade e a atividade de água são fatores importantes para garantir a estabilidade de um alimento devido a transformações microbiológicas e químicas e, por esta razão, é importante saber a relação entre estes fatores. Isotermas de sorção de umidade descrevem a relação de equilíbrio entre a umidade de um alimento e a atividade de água, para uma temperatura constante. As isotermas fornecem informações para as operações de processamento de alimentos, assim como para prever a qualidade e estabilidade do produto durante o armazenamento (BARBOSA-CANOVAS et al., 2007; PAVAN, SCHMIDT e FENG, 2012). Diversos métodos podem ser empregados para analisar a relação entre a atividade de água e o teor de umidade do produto, sendo que o mais utilizado é o acondicionamento do alimento em recipientes com soluções salinas saturadas, de atividades de água conhecidas (FELLOWS, 2006; JANGAM e MUJUMDAR, 2010). As isotermas de sorção podem ser obtidas pela reidratação de uma amostra seca (isotermas de adsorção), pela desidratação de uma amostra úmida (dessorção) ou pela combinação dos dois métodos (isotermas de trabalho), como apresentado na Figura 1.5.

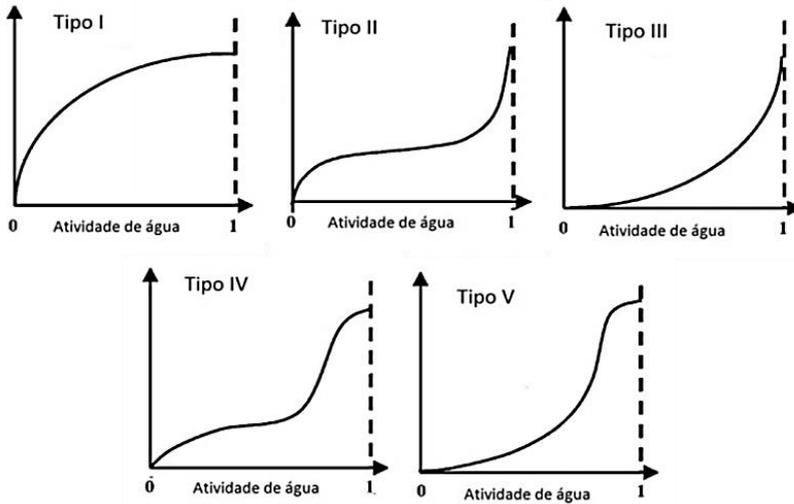
Figura 1.5 - Isotermas típicas de sorção e dessorção de umidade em um alimento.



Fonte: Adaptado de Fortes e Okos (1980).

Na região (A) da Figura 1.5 a água está fortemente ligada e não está disponível para reações. Nesta região, há essencialmente uma monocamada de adsorção de vapor de água e não existe distinção entre as isotermas de sorção e dessorção. Na região (B) a água está mais fracamente ligada devido ao seu confinamento em capilares menores. A água na região (C) está mais livre e disponível para as reações e atuar como solvente (JANGAM e MUJUMDAR, 2010).

As isotermas de sorção de umidade podem ser classificadas em cinco tipos (Figura 1.6), de acordo com a variação do teor de umidade com a atividade de água do produto. No caso de alimentos, as isotermas de sorção de maior interesse são as do tipo II e III, isotermas de produtos higroscópicos (BRUNAUER et al., 1938).

Figura 1.6 - Tipos de isotermas de sorção.

Fonte: Adaptado de Brunauer et al. (1938).

1.4 MICROESTRUTURA DE ALIMENTOS

A microestrutura dos alimentos é a organização dos seus elementos e suas interações. Durante o processamento ocorrem diversas alterações na estrutura do produto que afetam as suas propriedades e, portanto, as técnicas de análise de microestrutura são necessárias para entender a relação entre a estrutura e as propriedades dos alimentos processados (AGUILERA et al., 2000).

Na secagem de alimentos, a água é removida até que sua baixa concentração garanta a estabilidade microbiana do produto e minimize as mudanças químicas e físicas durante a armazenagem. Como resultado da remoção de água, alguns parâmetros e fenômenos influenciam a microestrutura do material (LEWICKI e JAKUBCZYK, 2004). O encolhimento das células é um fator importante, o qual provoca a maior modificação na estrutura global do produto. No entanto, é importante também, considerar o efeito da estrutura da amostra antes da secagem (mudanças estruturais induzidas por pré-tratamentos) e como as mudanças estruturais influenciam a velocidade de desidratação (RAMÍREZ et al., 2011; NIAMNUY et al., 2014). O encolhimento de frutas e vegetais tem sido muitas vezes estudado por medições diretas ou

inferidas por mudanças em parâmetros como porosidade e densidade. Porém as mudanças nas dimensões estruturais, durante a secagem não são isotrópicas. A partir da utilização de imagens de alta qualidade e ferramentas de análise (microscopia eletrônica de varredura, estéreo microscopia), dados mais precisos para o estudo das propriedades estruturais de alimentos estão disponíveis (AGUILERA, 2005; AGUILERA e STANLEY, 1999).

1.5 POROSIDADE

As modificações da estrutura de um produto durante a desidratação podem ser determinadas por diferentes características: volume, porosidade, distribuição do tamanho dos poros, dimensões em diferentes pontos da amostra e textura. O colapso da estrutura (redução drástica da porosidade) dos materiais desidratados, afeta a retenção de aromas, a capacidade de reidratação, a distribuição de umidade final, podendo resultar em endurecimento do produto (YAN et al, 2008). A porosidade (ε) é definida como a fração volumétrica de ar no interior de um produto seco e pode ser determinada usando as Equações 1.4 e 1.5 (YAN et al, 2008; SERENO et al., 2007):

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_r}{V_{ap}} \quad (1.4)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_r} \quad (1.5)$$

em que V_{ap} é o volume aparente da amostra; V_r é o volume real da amostra; ρ_{ap} é a densidade aparente da amostra e ρ_r é a densidade real da amostra.

A determinação da porosidade requer a medição de ambos os volumes, aparente e real. O volume aparente é definido pela razão entre a massa e o volume total de uma amostra. Sua determinação tem sido realizada por meio de diferentes procedimentos experimentais (LOZANO et al., 1980, SERENO et al., 2007). Um destes procedimentos é baseado no princípio do deslocamento de volume das amostras quando imersas em *n*-heptano (LOZANO et al., 1980).

A determinação do volume real da matriz do sólido é uma tarefa mais complexa em comparação com a determinação do volume aparente (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.

Os fenômenos do encolhimento e porosidade vêm sendo amplamente estudados em amostras de manga desidratadas por diferentes métodos de secagem, como secagem convectiva (YAN et al, 2008; DISSA et al, 2008), secagem por *Refractance Window*[®] (RW) (OCHOA-MARTÍNEZ et al, 2012), secagem por EPD (*Explosion puffing drying*) (ZOU et al, 2013), secagem por CMFD (*convective multi-flash drying*) (ZOTARELLI et al., 2012), entre outras técnicas.

1.6 TEXTURA

Um atributo muito utilizado na indústria de alimentos para avaliar a qualidade e aceitação de um produto é a textura. Além disso, a textura é uma propriedade muito importante em certos alimentos, principalmente aqueles com atributos de crocância, como *snacks* extrusados ou frutas frescas e hortaliças (WILKINSON, DIJKSTERHUIS, MINEKUS, 2000). Em 1992, o comitê da ISO (*International Organization for Standardization*) definiu textura como todos os atributos mecânicos, geométricos e de superfície perceptíveis de um produto, considerando propriedades receptoras mecânicas, táteis e, quando apropriado, visuais e auditivas (ISO, 1992).

Entre as características de textura, a dureza é importante para frutas e hortaliças e é usualmente utilizada para avaliar o grau de maturação (CHEN E OPARA, 2013). A crocância é a característica fundamental do alimento frágil e quebradiço (TANIWAKI e KOHYAMA, 2012). Em produtos de textura macia e borrachosa, a elasticidade, coesividade, adesividade e gomosidade são propriedades para a avaliação da textura (AKWETEY e KNIPE, 2012).

Os atributos de qualidade de textura de alimentos podem ser avaliados por ensaios sensoriais ou instrumentais. Ao longo dos anos, testes instrumentais foram utilizados em pesquisas e na indústria como alternativas aos ensaios sensoriais, por demandarem menos tempo e custos e se correlacionarem com as percepções sensoriais de textura dos

alimentos (COSTA et al., 2011; KIM et al, 2012; CHEN E OPARA, 2013). Estes desenvolvimentos têm possibilitado aos pesquisadores analisar de maneira mais aprofundada dados de textura de alimentos para proporcionar uma melhor compreensão dos mecanismos de textura e as suas relevâncias para a percepção sensorial (CHEN E OPARA, 2013).

Ensaio mecânicos têm sido usados para avaliar a textura de alimentos, através da medida das forças e tensões geradas (resistências) quando a amostra é submetida à compressão, corte ou à tração, usando um equipamento universal de ensaios ou um analisador de textura. Vários tipos de sondas ou dispositivos podem ser instalados junto ao equipamento de medida mecânica, de acordo com o tipo de amostra e a finalidade do teste (SAELEAW e SCHLEINING, 2011).

1.7 REIDRATAÇÃO

A reidratação é um processo complexo que visa à restauração das propriedades quando um produto desidratado é colocado em contato com a água. Os tratamentos que antecedem a secagem, o processo de secagem e o próprio processo de reidratação podem induzir mudanças na estrutura e composição dos produtos vegetais (perda de integridade e redução das propriedades hidrofílicas), que podem prejudicar as propriedades de reconstituição e reidratação (LEWICK, 1998; KROKIDA e MAROULIS, 2000; MARQUES, PRADO e FREIRE, 2009). Assim, a capacidade de reidratação de um produto pode ser considerada como uma medida dos danos causados ao material pela sua desidratação e tratamentos anteriores (branqueamento, cozimento, entre outros) (LEWICK, 1998).

A capacidade e a taxa de reidratação são, em relação à secagem, os atributos de qualidade mais discutidos na literatura (MEDA e RATTI, 2005; MARQUES, PRADO e FREIRE, 2009). A maioria dos trabalhos é concentrada em produtos desidratados por secagem convectiva (MCMINN e MAGEE, 1997; GARCIA-PASCUAL, et al., 2006; WITROWA-RAJCHERT e LEWICKI, 2006) e por liofilização (MEDA e RATTI, 2005; MARQUES, PRADO e FREIRE, 2009). Nestes estudos, a taxa de reidratação de produtos desidratados tem sido extensivamente discutida, além de algumas informações em relação aos fluxos que caracterizam o processo, como absorção de água e lixiviação de solutos (MARQUES, PRADO e FREIRE, 2009). Por outro lado, informações limitadas estão disponíveis em relação à reidratação de produtos desidratados por outros métodos.

1.8 TRANSIÇÃO DE FASE E TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA (T_g)

Transições de fase são mudanças no estado físico dos materiais, as quais têm efeitos significativos nas propriedades físicas. Compostos químicos puros como a água ou muitos compostos orgânicos e inorgânicos presentes nos alimentos apresentam temperaturas de transição de fase específicas. O termo transição se refere a mudança no estado físico que é causada pela mudança na temperatura ou pressão. O aquecimento de alimentos sólidos é muitas vezes usado para observar as temperaturas em que as alterações das propriedades térmicas ou físicas ocorrem, por exemplo, mudanças na capacidade calorífica, viscosidade ou nas características de textura (ROOS e DRUSCH, 2015).

O estado físico dos alimentos sólidos é extremamente sensível ao conteúdo de água, temperatura, e tempo (ROOS e DRUSCH, 2015). Acima de um valor crítico de temperatura, conhecida como a temperatura de transição vítrea (T_g), uma estrutura sólida vítrea começa a mudar para um “estado elástico” (*rubbery state*). Esta mudança estrutural influencia o processo e a qualidade físico-química dos produtos (BHANDARI e HOWES, 1999). A teoria da transição vítrea pode ajudar a entender as propriedades de textura dos alimentos e explicar mudanças que ocorrem durante o processamento (ROOS e DRUSCH, 2015). Para as frutas e hortaliças desidratadas, a crocância é um atributo muito importante. O aumento da quantidade de água reduz a temperatura de transição vítrea do produto e estas características de crocância são perdidas. A água é considerada um dos mais efetivos plastificantes nos alimentos, diminuindo a T_g e a resistência mecânica (PITTIA e SACCHETTI, 2008).

A temperatura de transição vítrea é difícil de determinar em alimentos, devido a sua complexidade e heterogeneidade. A calorimetria exploratória diferencial (DSC) detecta a mudança na capacidade calorífica ocorrendo na faixa de temperatura de transição vítrea (CARTER e SCHMIDT, 2012). As amostras são geralmente colocadas em recipientes que podem ser hermeticamente fechados. Portanto, o método pode ser usado para observar transições de fase e para determinar as temperaturas de transição sem alterações no teor de água, sendo que, um conteúdo de água constante é extremamente importante na determinação de transições de fase de alimentos (ROOS e DRUSCH, 2015).

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.

AGUILERA, J. M.; STANLEY, D. W.; BAKER, K. W. New dimensions in microstructure of food products. **Trends in Food Science & Technology**, 11, 3-9, 2000.

AKWETEY, W. Y., KNIPE, C. L. Sensory attributes and texture profile of beef burgers with gari. **Meat Science**. 92 (4), 745–748, 2012.

ALIBAS, I. Energy Consumption and Colour Characteristics of Nettle Leaves during Microwave, Vacuum and Convective Drying. **Biosystems Engineering**, v. 96, p. 495–502, 2007.

BABIC, J.; CANTALEJO, M. J.; ARROQUI, C. The effects of freeze-drying process parameters on *Broiler* chicken breast meat. **LWT - Food Science and Technology**, v. 42, p. 1325–1334, 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-CANOVAS, G. V.; FONTANA, A. J.; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. **Water activity and Foods: Fundamentals and Applications**. IFT Press, Ames, Iowa, 2007.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemists' Society**, 60, 309-319. 1938.

CARTER, B. P.; SCHMIDT, S. J. Developments in glass transition determination in foods using moisture sorption isotherms. **Food Chemistry**, v. 132, p. 1693–1698, 2012.

CHEN, L.; OPARA U. L. Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods – A review. **Journal of Food Engineering**, 119, 497–507, 2013.

CONASPROMANGO. **Comité Nacional Sistema Producto Mango**. Guia técnico-comercial mango mexicano - 2008. Disponível em: <http://mangomexicano.com.mx/sistema-producto-mango/mejorando-la-calidad-e-inocuidad/manejo-postcosecha-del-mango/>, acessado em 02 de outubro de 2014.

COSTA, F., CAPPELLIN, L., LONGHI, S., GUERRA, W., MAGNAGO, P., PORRO, D., SOUKOULIS, C., SALVI, S., VELASCO, R., BIASIOLI, F., GASPERI, F. Assessment of apple (*Malus × domestica* Borkh.) fruit texture by a combined acoustic-mechanical profiling strategy. **Postharvest Biology and Technology**, 61, 21-28, 2011.

CRUZ, M. J. D. S. Compostos bioativos na conservação e controle da antracnose e na pós-colheita de manga (*Mangifera indica*) cv. Tommy Atkins. **Tese** (Doutorado em Agronomia) Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2006.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4.ed., Porto Alegre: Artmed, 900p. 2010.

DISSA A.O., DESMORIEUX H., BATHIEBO J., KOULIDIATI J. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. ‘Amelie’) with correction for shrinkage. **Journal of Food Engineering**, v. 88, p. 429–437, 2008.

EMBRAPA. Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. **Manga. Produção: aspectos técnicos**. Série Frutas do Brasil, 4. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2000.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <http://faostat.fao.org>, acessado em 04 de agosto de 2016.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. Porto alegre: Artmed, 2ª ed, 2006. Desidratação.

- FORTES M.; OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to food and grain. In: MUJUMDAR, A. **Advances in Drying**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation v.1 p. 119-154. 1980.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. Editora LTC, p. 670, 1980.
- GARCIA-PASCUAL, P.; SANJUA´N, N.; MELIS, R.; MULET, A. Morchella esculenta (morel) rehydration process modelling. **Journal of Food Engineering**, 72, 346–353, 2006.
- GUSTAVSSON, J.; CEDERBERG, C.; SONESSON, U. Global Food Losses and Food Waste, **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2011.
- IBGE. Instituto brasileiro de geografia e estatística. **Pesquisa de orçamentos familiares 2008-2009**, Rio de Janeiro, 2010.
- IBGE. **Instituto brasileiro de geografia e estatística**. Produção agrícola municipal, Rio de Janeiro, v. 39, p.1-101, 2012.
- ISO. Sensory analysis – Vocabulary. **International Organization of Standardization**, ISO5492:1992, 1992.
- JANGAM, S. V.; MUJUMDAR, A. S. Drying of Foods, Vegetables and Fruits - Volume 1. Ed. Singapura. 2010.
- KIM, E.H.-J., CORRIGAN, V.K., WILSON, A.J., WATERS, I.R., HEDDERLEY, D.I., MORGENSTERN, M.P. Fundamental fracture properties associated with sensory hardness of brittle solid foods. **Journal of Texture Studies**. 43 (1), 49–62, 2012.
- KOYUNCU, T.; TOSUN, I.; PINAR, Y. Drying characteristics and heat energy requirement of cornelian cherry fruits (*Cornus mas* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 735–739, 2007.
- KROKIDA, M.; MAROULIS, Z. Quality changes during drying of food materials. In A. S. Mujumdar (Ed.), **Drying technology in agriculture and food sciences**. (pp. 61–106). Enfield, NH, USA: Science Publishers, Inc. 2000.

KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDDER, M. U. H. Intermittent drying of food products: A critical review, **Journal of Food Engineering**, v. 121, p. 48–57, 2014.

LABUZA, T.P.; TANNENBAUM, S.R.; KAREL, M. Water content and stability of low moisture and intermediate moisture foods. **Journal of Food Technology**, 24, 543–550, 1970.

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. **BrazilianPatent**, PI 1107173-7.

LEWICKI P. P., JAKUBCZYK E. Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. **Journal of Food Engineering**, v. 64, p. 307–314, 2004.

LEWICK, P. P.. Some remarks on rehydration of dried foods. **Journal of Food Engineering**, 36, 81–87, 1998.

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.

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.

MARQUES, L. G.; PRADO, M. M.; FREIRE, J. T. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. **LWT - Food Science and Technology**, 42, 1232–1237, 2009.

MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Physical characteristics of dehydrated potates – Part II. **Journal of Food Engineering**, 33, 49–55, 1997.

MEDA, L.; RATTI, C. Rehydration of freeze-dried strawberries at varying temperatures. **Journal of Food Process and Engineering**, 28, 233–246, 2005.

MONTEIRO, R.L., CARCIOFI, B.A.M., LAURINDO, J.B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. **Journal of Food Engineering**. 178, 1-11, 2016.

NEPA-UNICAMP. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação. **Tabela brasileira de composição de alimentos/NEPA-UNICAMP**. 4ª edição revisada e ampliada. Campinas, 161p., 2011.

NIAMNUY C., DEVAHASTIN S., SOPONRONNARIT S. Some recent advances in microstructural modification and monitoring of foods during drying: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 123, p. 148–156, 2014.

OCHOA-MARTÍNEZ C. I., QUINTERO P. T., AYALA A. A., ORTIZ M. J. Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. **Journal of Food Engineering**, v. 109, p. 69–75, 2012.

OIKONOMOPOULOU, V. P.; KROKIDA, M. K.; KARATHANOS, V. T. The influence of freeze drying conditions on microstructural changes of food products. **Procedia Food Science**, v. 1, p. 647 – 654, 2011.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas. p.47-51, 2007.

PAVAN, M. A.; SCHMIDT, S. J.; FENG, H. Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air dried açai (Euterpe oleracea Martius) juice. **LWT - Food Science and Technology**. 48, 75-81, 2012.

PAYNE, F. A.; TARABA, J. A.; SAPUTRA D. A review of puffing processes for expansion of biological products. **Journal of Food Engineering**, v. 10, p. 183–197, 1989.

PERRY, S; CHILTON, C. H. **Chemical Engineers' Handbook**. New York: Ed. McGraw-Hill, p. 2581, 1984.

PITTIA, P.; SACCHETTI, G. Antiplasticization effect of water in amorphous foods. A review. **Food Chemistry**. v. 106, p. 1417–1427, 2008.

PORCIUNCULA, B. D. A.; SEGURA, L. A.; LAURINDO, J. B. Processes for Controlling the Structure and Texture of Dehydrated Banana. **Drying Technology**, v. 34, p. 167-176, 2016.

RAMÍREZ C., TRONCOSO E., MUÑOZ J., AGUILERA J. M. Microstructure analysis on pre-treated apple slices and its effect on water release during air drying. **Journal of Food Engineering**, v. 106, p. 253–261, 2011.

ROOS, Y. H.; DRUSCH, S. **Phase transitions in foods** (2nd ed.). San Diego: Academic Press, Inc. 2015.

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

SAELEAW, M.; SCHLEINING, G. A review: Crispness in dry foods and quality measurements based on acoustic–mechanical destructive techniques. **Journal of Food Engineering**. 105, 387–399, 2011.

SEBRAE. **Serviço Brasileiro de apoio às Micro e Pequenas Empresas**. Dados de exportação de manga. Disponível em: <http://gestaoportal.sebrae.com.br/setor/fruticultura/fruticultura-imp-exp-1.pdf>, Acessado em 02 de outubro de 2014.

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.

STRUMILO, C.; KUDRA, T. **Heat and mass transfer in drying processes Drying: principles, applications and design**. Montreux: Gordon and Breach Science Publishers, v. 3, cap. 2, p. 37-66, 1986.

ŠUMIC, Z.; TEPIC, A.; VIDOVIC, S.; JOKIC, S.; MALBAŠA, R. Optimization of frozen sour cherries vacuum drying process. **Food Chemistry**, v. 136, p. 55–63, 2013.

TANIWAKI, M.; KOHYAMA, K. Mechanical and acoustic evaluation of potato chip crispness using a versatile texture analyzer. **Journal of Food Engineering**. 112, 268-273, 2012.

VARNALIS, A. I.; BRENNAN, J. G.; MACDOUGALL, D. B. A proposed mechanism of high-temperature puffing of potato. Part I. The influence of blanching and drying conditions on the volume of puffed cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 361–367, 2001.

WANG, J. -C.; LIAPIS, A. I. Water–water and water–macromolecule interactions in food dehydration and the effects of the pore structures of food on the energetics of the interactions. **Journal of Food Engineering**, 110, 514–524, 2012.

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.

WILKINSON; DIJKSTERHUIS; MINEKUS. From food structure to texture. **Trends in Food Science & Technology**, 11(12), 442 – 450, 2000.

WITROWA-RAJCHERT, D.; LEWICKI, P. P. Rehydration properties of dried plant tissues. **International Journal of Food Science and Technology**, 41, 1040–1046, 2006.

YAN Z., SOUSA-GALLAGHER M. J., OLIVEIRA F. A. R. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 84, p. 430–440, 2008.

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.

ZOU K., TENG J., HUANG L., DAÍ X., WEI B. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. **LWT - Food Science and Technology**, v. 51, p. 253-259, 2013.

2 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA CINÉTICA DE SECAGEM E NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE MANGAS DESIDRATADAS POR SUCESSIVOS CICLOS DE AQUECIMENTO-PULSO DE VÁCUO

2.1 INTRODUÇÃO

A manga é uma fruta tropical cultivada em diversas regiões tropicais e subtropicais e muito consumida em todo o mundo (LITZ, 2009). Em termos de produção, as mangas são a segunda fruta tropical mais importante, logo após as bananas, com uma produção anual estimada de 43 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2016).

Assim como muitas outras frutas, a manga apresenta uma vida útil relativamente curta, com limites da sua comercialização como uma fruta fresca, aumentando as perdas pós-colheita. Estudos recentes apontam que aproximadamente um terço da produção mundial de mangas é perdida anualmente (GUSTAVSSON et al., 2011; KUMAR et al., 2014). Pesquisas relacionadas com estratégias de preservação que possam reduzir essas perdas são muito importantes. Entre esses métodos, a secagem vem sendo extensivamente utilizada na preservação de alimentos, pois reduz a umidade e atividade de água, diminuindo o desenvolvimento de micro-organismos e a deterioração do produto (AGUDELO et al., 2015). A secagem permite não somente reduzir as perdas pós-colheita, mas também aumentar o valor agregado dos produtos. Métodos tradicionais de secagem, como a secagem solar (DISSA et al., 2011; TOURÉ e KIBANGU-NKEMBO, 2004) e a secagem com ar quente (CORZO et al., 2008; DISSA et al., 2008; RUSSO et al., 2013), causam perdas significativas da cor original, das propriedades nutricionais e sensoriais e da capacidade de reidratação das frutas. Por outro lado, a liofilização permite a produção de frutas desidratadas com estrutura, cor e nutrientes preservados, porém o custo desta tecnologia é muitas vezes superior aos custos associados aos métodos de secagem mencionados anteriormente (DUAN et al., 2013; MARQUES et al., 2007; RATTI, 2001).

Métodos alternativos de secagem que combinem baixos custos operacionais e produtos de alta qualidade vem sendo reportados na literatura. *Controlled Sudden Decompression* (LOUKA e ALLAF, 2002; LOUKA et al., 2004), *Puff-Drying* (HOFSETZ et al., 2007; VARNALIS et al., 2001; ZOU et al., 2013) e a secagem por *Multi-Flash Drying* (MFD) (MONTEIRO et al., 2016; PORCIUNCULA et al., 2016; ZOTARELLI

et al., 2012) têm sido apontados como tecnologias capazes de produzir frutas desidratadas com boas propriedades nutricionais, sensoriais e tempos de secagem reduzidos. Nos processos que utilizam sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (MFD), o produto é aquecido à pressão atmosférica até atingir a temperatura desejada e um pulso de vácuo é aplicado, que resulta em evaporação *flash*, aumentando as taxas de secagem e alterando a microestrutura do produto (LAURINDO et al., 2011). Se as amostras forem colocadas em contato com uma placa aquecida (transferência de calor por condução), esse processo é denominado de *conductive multi-flash drying* (KMFD) (PORCIUNCULA et al., 2016).

O objetivo deste estudo foi determinar a influência das condições do processo KMFD (número de ciclos de aquecimento condutivo-pulso de vácuo e as taxas de redução da pressão) e a utilização de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo seguido de secagem a vácuo (KMFD-VD) sobre as propriedades físicas e microestruturais de mangas desidratadas.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Seleção e preparação das frutas

As mangas da variedade Tommy Atkins (*Mangífera indica* L.) foram adquiridas no comércio local (Florianópolis, Brasil - 27°35'48" S, 48°32'57" W). As frutas foram selecionadas pelo grau de maturação, determinado pela análise visual (grau 4 pela Figura 1.1), força de penetração (FP) (avaliadas usando um penetrômetro Effegi Modelo - FT 327, Ø=8 mm, Itália) e conteúdo de sólidos solúveis (SST) (usando um refratômetro óptico Pocket refractometer Atago, Modelo - PAL-BX/RI, Japão). As frutas selecionadas apresentaram SST = 14,2±0,9 °Brix e FP = 2,9±1,0 N. As mangas foram lavadas, descascadas e fatiadas em direção paralela as fibras com uma espessura de 5 mm (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Representação esquemática do corte das mangas. Fatias paralelas ao eixo da manga (a), dispositivo utilizado para o corte (b), amostras utilizadas de 5 mm de espessura (c).

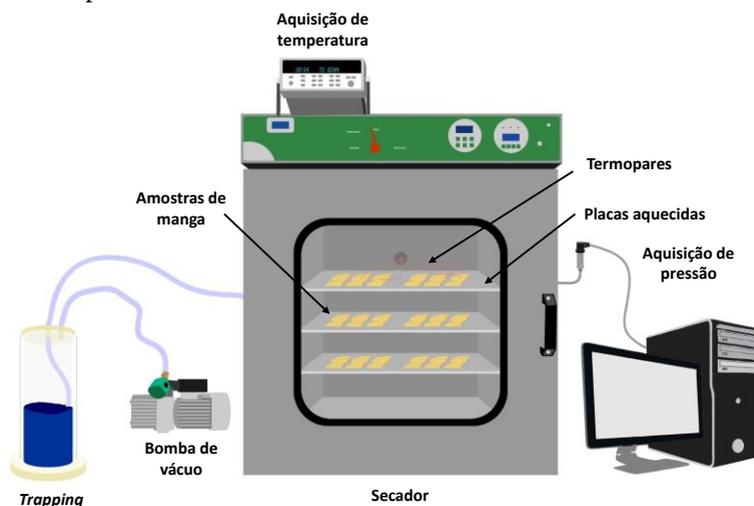


Fonte: Zotarelli (2010).

2.2.2 Dispositivo experimental

A Figura 2.2 representa 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 2.2 - Dispositivo experimental utilizado para a secagem por KMFD e por KMFD-VD.



Fonte: Adaptado de Porciuncula et al. (2016).

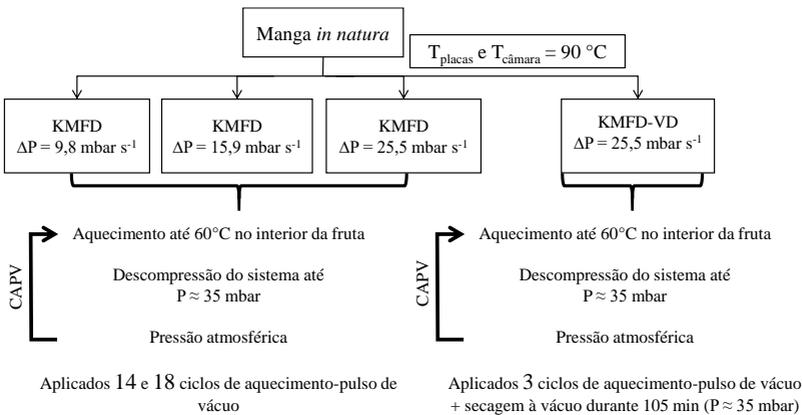
O aparato experimental consiste em um câmara de secagem de 100 L (440-DE, Ethik Technology, Brasil) conectada a uma bomba de vácuo com capacidade de bombeamento de $350 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (LC305-DVP Vacuum Technology, Itália). No interior da câmara de secagem, as placas foram mantidas aquecidas ($90 \text{ }^\circ\text{C}$) 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 manômetro digital (IT-MN-DG, Velki, Itu, Brasil). A variação tempo-temperatura das amostras foi monitorada utilizando termopares do tipo T (A-TX-TF-TF-R30AWG, Iope, São Paulo, 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).

2.2.3 Experimentos de secagem

Diferentes condições de processo foram avaliadas para obter mangas desidratadas com texturas macias e crocantes pelo processo KMFD e KMFD-VD. Na Figura 2.3 estão apresentadas as condições avaliadas neste capítulo.

Figura 2.3 - Fluxograma operacional utilizado para a técnica de secagem por *Conductive multi-flash drying* (KMFD) e por *Conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD-VD).



As amostras de manga foram colocadas sobre filmes plásticos (*myllar®*) (para evitar a adesão nas placas de aquecimento) e inseridas no interior da câmara de secagem sobre as placas aquecidas. Aproximadamente 400 g de mangas fatiadas foram utilizadas para determinar as curvas de secagem e as propriedades físicas das amostras após a secagem. A temperatura das placas foi mantida a 90 °C, assim como a temperatura da câmara. Foram adotados dois procedimentos de secagem, descritos a seguir. i) *Conductive multi-flash drying* (KMFD): As amostras foram aquecidas à pressão atmosférica até 60 °C (no centro das amostras) antes da aplicação de um pulso de vácuo. Em razão de determinar a influência de diferentes taxas de redução da pressão do sistema na microestrutura das amostras, a câmara de secagem foi evacuada com diferentes taxas de redução da pressão (9,8; 15,9 e 25,5

mbar s⁻¹), até a pressão final de 35 mbar. Transcorridos 5 min de evacuação a pressão do sistema foi reestabelecida e um novo ciclo de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) aplicado (14 e 18 CAPV foram aplicados); ii) *Conductive multi-flash drying* seguida de um período de secagem a vácuo (KMFD-VD): três ciclos de aquecimento-pulso de vácuo foram aplicados com taxa de descompressão de 25,5 mbar s⁻¹ nas mesmas condições do processo KMFD. Após a aplicação dos CAPV, as amostras foram desidratadas sob vácuo por 105 min à pressão de 35 mbar. Antes e após cada CAPV, o conteúdo de umidade e atividade de água das amostras foram determinadas. Todos os experimentos de secagem foram realizados em triplicata.

2.2.4 Caracterização das amostras

As amostras foram caracterizadas pela determinação de parâmetros físico-químicos: umidade, atividade de água (a_w), volume aparente e real, massa específica aparente, porosidade e propriedades mecânicas. Além destes, foram realizadas análises instrumentais de cor e capturas de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2.2.4.1 Determinação da umidade

O conteúdo de água das amostras foi determinado por método gravimétrico (Shimadzu, Modelo - AY220, Filipinas), em estufa a vácuo (TECNAL, TE-395, Brasil) a 70 °C, segundo a metodologia da AOAC (2005). As análises foram realizadas em triplicata.

2.2.4.2 Atividade de água

As amostras foram trituradas e a atividade de água foi determinada em higrômetro digital (Aqualab Modelo - Series 3 TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, EUA) pela medida do ponto de orvalho a 25 °C. As análises foram realizadas em triplicata.

2.2.4.3 Determinação das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram determinadas por meio de teste de penetração com sonda (*probe*) cilíndrica de 2 mm de diâmetro em um analisador de textura (Stable Micro System, Modelo - TA-XT2-Plus, Reino Unido). Para a técnica de secagem KMFD com diferentes taxas de redução da pressão do sistema, no 14º ciclo de aquecimento-pulso de

vácuo e no final de cada processo de desidratação, foram retiradas 5 amostras da câmara para as análises de textura. Foram realizadas 3 perfurações em cada amostra em diferentes regiões. Para a técnica de secagem por KMFD-VD foi analisada somente a curva força-deformação da amostra seca final. O teste foi realizado a 3 mm s^{-1} e as amostras foram deformadas 70 % da sua espessura inicial.

2.2.4.4 Volume e massa específica aparente

O volume aparente (V_{ap}) foi determinado indiretamente pela medida da força de empuxo da amostra imersa em *n*-heptano (LOZANO et al., 1980). Um suporte para as amostras foi suspenso na parte inferior de uma balança analítica (Marte, Modelo-AY220, Filipinas), e sua massa medida no ar (m_c) e imersa em *n*-heptano ($m_{c,h}$) foram registradas. Uma amostra de manga foi colocada no suporte e suas massas no ar ($m_{c,m}$) e imersa em *n*-heptano ($m_{c,m,h}$) foram registradas. O volume aparente foi calculado de acordo com a Equação 2.1. O *n*-heptano utilizado possuía massa específica igual a $0,68 \text{ g cm}^{-3}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. A análise foi realizada em quadruplicata.

$$V_{ap} = \frac{(m_{c,m} - m_c) - (m_{c,m,h} - m_{c,h})}{\rho_s} \quad (2.1)$$

onde, $m_{c,m}$ é a massa da cesta com a amostra de manga; m_c é a massa da cesta vazia; $m_{c,m,h}$ é a massa da cesta com a amostra de manga imersa em *n*-heptano; $m_{c,h}$ é a massa da cesta vazia imersa em *n*-heptano e ρ_s é a massa específica do solvente *n*-heptano.

A massa específica aparente (ρ_{ap}) das amostras foi determinada pela razão entre a massa da amostra (m_m) e o volume aparente (Equação 2.2).

$$\rho_{ap} = \frac{m_m}{V_{ap}} \quad (2.2)$$

2.2.4.5 Volume real

O volume real (V_r) foi medido utilizando um picnômetro de ar comprimido, construído para trabalhar com sólidos úmidos ou secos, de acordo com metodologia proposta por Sereno et al. (2007).

O picnômetro é um instrumento que utiliza ar comprimido como fluido de preenchimento dos espaços vazios. O restante da amostra, na qual o gás não penetra, é considerado como volume de sólido. O

picnômetro mede a mudança na pressão do experimentado por uma quantidade conhecida de gás comprimido numa câmara de referência (volume constante). Quando o gás se expande para uma segunda câmara contendo a amostra, ocorre uma mudança na pressão e temperatura. Assumindo comportamento de gás ideal é possível calcular o volume real da amostra.

2.2.4.6 Porosidade

A porosidade (ε) foi calculada utilizando os valores do volume real (V_r) e o volume aparente (V_{ap}), utilizando a Equação 2.3:

$$\varepsilon[\%] = \left[1 - \frac{V_r}{V_{ap}} \right] \cdot 100 \quad (2.3)$$

2.2.4.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As microscopias das amostras foram realizadas no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da UFSC (LCME-UFSC). Para as imagens de MEV (Modelo - JEOL JSM 6390LV, Japão), as amostras desidratadas foram liofilizadas (Liobras, Modelo - Liotop L101, Brasil) durante 24 h para retirar a umidade residual e recobertas com ouro utilizando um metalizador (LEICA, Modelo - EM SCD500). As imagens capturadas foram da parte interna das amostras fraturadas manualmente, com ampliação de 50 vezes.

2.2.4.8 Análise instrumental de cor

As medidas de cor das amostras de manga foram determinadas por um colorímetro MiniScan (HunterLab, Modelo - EZ, USA) operando no sistema CIELAB, L^* (preto/branco); “a*” (verde/vermelha) e b^* (amarela/azul). A leitura foi realizada diretamente sobre a superfície de 4 fatias, sendo realizada a leitura em quadruplicata. A variação da cor total é avaliada pelo parâmetro ΔE^* , tomando como referência a amostra *in natura* (L_0 , a_0 e b_0), calculado de acordo com a Equação 2.4:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (2.4)$$

2.2.4.9 *Análise estatística*

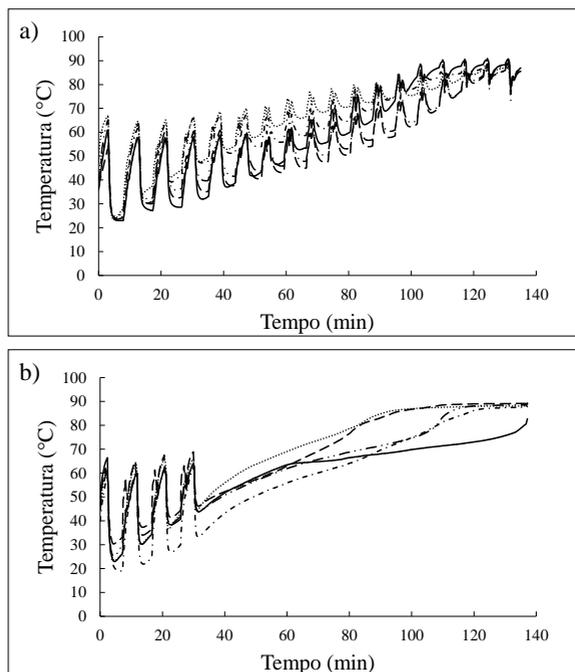
Os resultados experimentais de massa específica aparente, porosidade e cor foram analisados estatisticamente com o programa Statistica 7.0 (StatSoft, Tulsa, EUA), através de análise de variância (ANOVA) e pelo teste de Tukey a 95 % de confiança ($p \leq 0,05$).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 **Curvas de secagem**

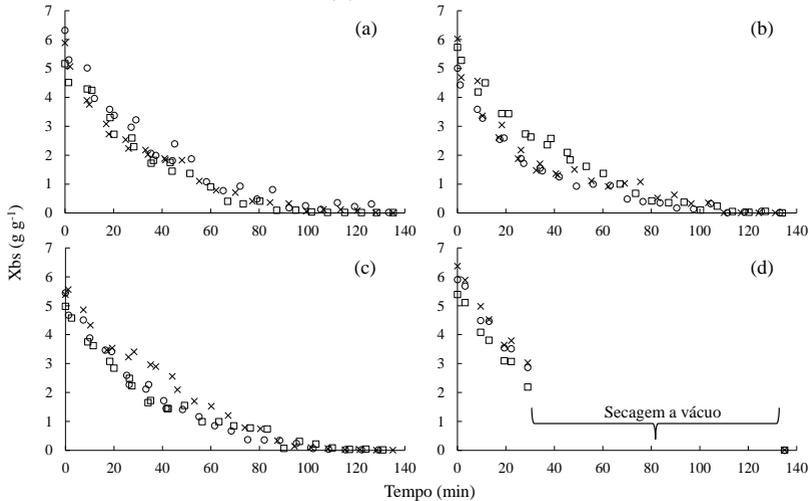
A evolução temporal da temperatura do interior das amostras de manga desidratadas por KMFD e KMFD-VD está apresentada na Figura 2.4. No final do primeiro pulso de vácuo, as amostras atingem aproximadamente a temperatura de saturação da água ($\approx 25\text{ }^\circ\text{C}$) na pressão final da câmara de secagem (35 mbar). A rápida redução da temperatura das amostras é resultado do resfriamento evaporativo. A temperatura interna média das amostras durante a aplicação dos primeiros pulsos de vácuo foi reduzida de aproximadamente $60\text{ }^\circ\text{C}$ para aproximadamente $25\text{ }^\circ\text{C}$, tanto para o processo por KMFD quanto para o processo KMFD-VD. Durante a secagem foi observado um aumento gradual das temperaturas das amostras, além da redução da variação de temperatura durante os pulsos de vácuo. Isto é explicado pela diminuição da umidade do produto com o avanço do processo de secagem, o que implica em menores pressões de vapor de água (atividades de água mais baixas). Como consequência, menor quantidade de água evaporada foi observada. A temperatura do produto se aproxima da temperatura da câmara de secagem ($90\text{ }^\circ\text{C}$) no final de ambos os processos. As temperaturas registradas pelos termopares nos processos de secagem estudados apresentam diferenças entre si e são resultados de incertezas no posicionamento dos termopares no interior das amostras.

Figura 2.4 - Evolução temporal da temperatura do interior das amostras de manga desidratadas por KMFD – 18 pulsos de vácuo (a) e KMFD-VD (b).



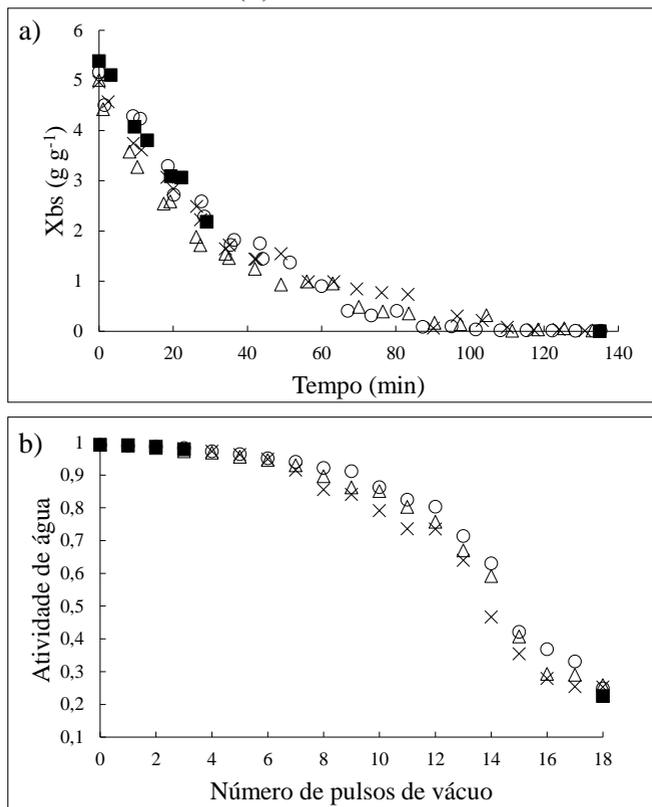
A Figura 2.5 apresenta triplicatas dos dados das cinéticas de secagem das amostras de manga desidratadas por KMFD utilizando diferentes taxas de redução da pressão (9,8; 15,9 e 25,5 mbar s^{-1}) e por KMFD-VD (25,5 mbar s^{-1}). As curvas com diferentes marcadores representam as triplicatas de experimento. As curvas de secagem representadas na Figura 2.5 mostram boa reprodutibilidade dos processos de secagem estudados, mesmo para amostras com pequenas diferenças de umidade inicial. A Figura 2.6(a) apresenta as curvas de secagem representativas das fatias de manga, enquanto a Figura 2.6(b) apresenta a evolução da atividade de água das amostras de manga desidratadas por KMFD utilizando as diferentes taxas de redução da pressão e por KMFD-VD. As diferentes taxas de redução da pressão e o período de secagem a vácuo não influenciaram as curvas de secagem das amostras de manga. Os principais efeitos são observados na formação da matriz porosa das frutas desidratadas, como é demonstrado pela porosidade, massa específica e microestrutura.

Figura 2.5 - Evolução temporal da umidade das amostras de manga durante o processo KMFD e KMFD-VD, realizadas em triplicata. KMFD – 9,8 mbar s⁻¹ (a), KMFD – 15,9 mbar s⁻¹ (b), KMFD – 25,5 mbar s⁻¹ (c) e KMFD-VD - 25,5 mbar s⁻¹ (d).



As amostras de manga apresentavam no início da secagem umidade de $5,804 \pm 0,638\ g\ g^{-1}$ (em base seca, b.s.) e a_w de $0,993 \pm 0,002$. O KMFD é um processo no qual a evaporação da maior quantidade de água ocorre a partir da rápida descompressão da câmara de secagem. Isto é diferente da secagem convectiva, controlada simultaneamente pela transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem. Apesar desta diferença, os padrões das curvas podem ser relacionados com a taxa constante da secagem clássica e o período de taxa decrescente. Uma taxa de secagem constante foi observada até tempos de secagem de aproximadamente 35 min, para todas as condições estudadas, quando a atividade de água foi aproximadamente 0,93. Em seguida, um período de taxa decrescente é observado, relacionado a uma diminuição na atividade de água. Devido ao rápido aquecimento das amostras pelas placas aquecidas e a baixa temperatura de ebulição nas condições de vácuo, um período de adaptação inicial não foi observado.

Figura 2.6 - Curvas de secagem representativas das fatias de manga (a) e evolução da atividade de água (b) durante a secagem por KMFD – 9,8 mbar s⁻¹ (○), KMFD – 15,9 mbar s⁻¹ (Δ), KMFD 25,5 - mbar s⁻¹ (x) e KMFD-VD – 25,5 mbar s⁻¹ (■).



Para o processo KMFD usando diferentes taxas de redução da pressão, no 14^o ciclo de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV), as amostras apresentaram conteúdo de umidade variando de 0,3 a 0,1 g g⁻¹ b.s. e a_w entre 0,63 e 0,47; característicos de alimentos de umidade intermediária. Estes produtos têm textura de produtos desidratados macios e são estáveis durante a distribuição e armazenamento, sem a necessidade de refrigeração (BARBOSA-CANOVAS et al., 2007).

As diferentes taxas de redução da pressão não influenciaram o comportamento das curvas de a_w . Durante os três primeiros CAPV, a evolução da a_w das amostras KMFD-VD apresentou o mesmo comportamento que as amostras KMFD, mostrando a reprodutibilidade

do processo. O conteúdo de umidade e atividade de água das mangas no final dos processos de secagem estudados estão mostrados na Tabela 2.1. Todas as amostras apresentaram valores similares de umidade e a_w após a aplicação de 18 CAPV, independentemente da taxa de redução da pressão aplicada no pulso de vácuo. As amostras KMFD-VD apresentaram valores do conteúdo de umidade similares aos observados para as amostras KMFD.

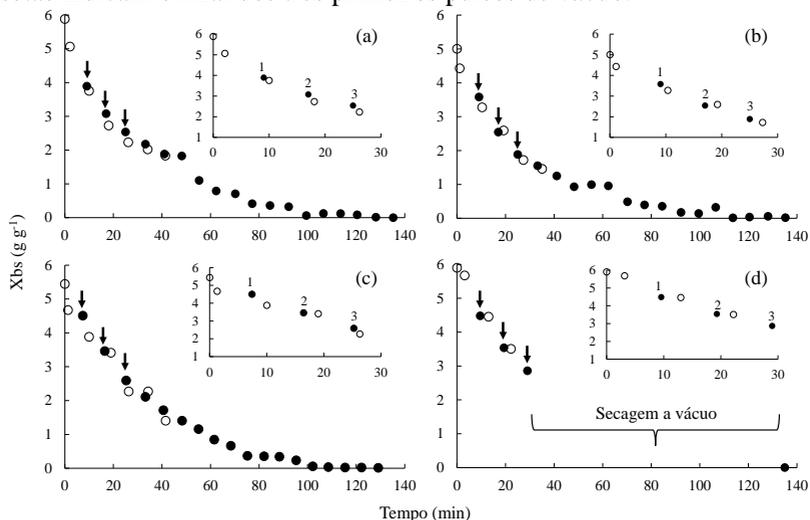
Tabela 2.1 - Teor de umidade (b.s.) e atividade de água das amostras de manga desidratadas pelas diferentes condições de secagem.

Processo	Teor de umidade (g g ⁻¹)	Atividade de água (a _w)
KMFD (9,8 mbar s ⁻¹)	0,010±0,009	0,249±0,034
KMFD (15,9 mbar s ⁻¹)	0,009±0,006	0,259±0,029
KMFD (25,5 mbar s ⁻¹)	0,011±0,006	0,253±0,003
KMFD-VD	0,005±0,002	0,226±0,028

Zotarelli et al. (2012) estudaram a secagem de amostras de manga por *Convective multi-flash drying* (CMFD), usando ar quente como meio de aquecimento. Ao final do processo de secagem (240 min) as amostras apresentaram teor de umidade de 0,090 g g⁻¹ e a_w de 0,359. Além disso, os autores reportaram que aproximadamente 63 % da água presente nas amostras era evaporada durante a etapa de aquecimento pelo ar quente soprado na câmara de secagem antes da aplicação do primeiro pulso de vácuo. Considerando o processo todo, a secagem convectiva foi responsável por cerca de 80 % da secagem total das amostras de manga. No processo KMFD, em que as amostras são aquecidas pelo contato com chapas, a etapa de aquecimento foi rápida e resultou em uma quantidade de água evaporada relativamente pequena. As contribuições relativas do aquecimento condutivo e dos pulsos de vácuo (*flash-drying*), para cada processo, estão apresentadas na Figura 2.7. Utilizando estas curvas é possível calcular as contribuições do processo de aquecimento e da evaporação *flash* na remoção de umidade das amostras de manga. Os três primeiros CAPV são responsáveis pela remoção de aproximadamente 50 % da umidade das amostras de manga. Da umidade total removida nos três CAPV, cerca de 70 % podem ser atribuídos a evaporação *flash*, enquanto 30 % ao aquecimento condutivo. Essa alta taxa de remoção da umidade das frutas é devido à grande quantidade de água presente nas amostras no início da secagem. Em cada pulso de vácuo aplicado durante o processo, a diferença de temperatura das amostras antes e após o pulso de vácuo (resfriamento evaporativo) diminui (Figura 2.4), reduzindo a

importância da evaporação *flash* no processo de desidratação. Este comportamento é explicado pela redução da água livre e da capacidade calorífica das amostras, devido a diminuição do conteúdo de umidade. Assim, a contribuição relativa da evaporação *flash* é muito maior no KMFD (aproximadamente 70 % da evaporação total) do que no processo CMFD, no qual o aquecimento com ar quente resulta em uma secagem convectiva importante (aproximadamente 80 % da secagem total).

Figura 2.7 - Contribuição do aquecimento condutivo e dos pulsos de vácuo durante as secagens por KMFD - $9,8 \text{ mbar s}^{-1}$ (a), KMFD - $15,9 \text{ mbar s}^{-1}$ (b), KMFD - $25,5 \text{ mbar s}^{-1}$ (c) e KMFD-VD - $25,5 \text{ mbar s}^{-1}$ (d). (○) Anterior à evaporação *flash* e (●) posterior à evaporação *flash*. As setas indicam o final dos três primeiros pulsos de vácuo.



2.3.2 Propriedades da manga desidratada

2.3.2.1 Massa específica aparente e porosidade acessível

Os valores médios e os desvios padrão, para a massa específica aparente (ρ_{ap}) e para a porosidade acessível (ϵ) de amostras de manga desidratadas por KMFD (14 e 18 pulsos de vácuo), e para amostras de mangas desidratadas por KMFD-VD estão apresentados na Tabela 2.2. Os valores de ρ_{ap} e porosidade encontrados para a amostra de manga *in natura* foram de $1,02 \pm 0,05 \text{ g cm}^{-3}$ e $10,9 \pm 2,2 \%$, respectivamente. Esses

valores são semelhantes aos reportados para mangas da variedade *Keit* por Yan et al. (2008). Como esperado, as amostras desidratadas utilizando 14 CAPV apresentaram maiores valores de ρ_{ap} do que as amostras desidratadas por 18 CAPV, isso é explicado pelo maior conteúdo de umidade das amostras desidratadas por 14 CAPV.

Tabela 2.2 - Valores médios e desvio padrão da massa específica aparente e porosidade acessível das amostras de manga *in natura* e desidratadas.

Processo	Densidade aparente (g cm⁻³)	Porosidade (%)
<i>in natura</i>	1,02 ^c ±0,05	10,9 ^a ±2,2
KMFD		
9,8 mbar s ⁻¹ – 14 CAPV*	0,78 ^b ±0,07	48,3 ^b ±4,7
15,9 mbar s ⁻¹ – 14 CAPV	0,73 ^{ab} ±0,02	49,6 ^b ±3,1
25,5 mbar s ⁻¹ – 14 CAPV	0,72 ^{ab} ±0,07	51,8 ^{bc} ±6,7
9,8 mbar s ⁻¹ – 18 CAPV	0,64 ^a ±0,02	49,1 ^b ±3,4
15,9 mbar s ⁻¹ – 18 CAPV	0,69 ^{ab} ±0,03	50,8 ^{bc} ±5,0
25,5 mbar s ⁻¹ – 18 CAPV	0,63 ^a ±0,02	54,4 ^{bc} ±3,9
KMFD-VD	0,62 ^a ±0,08	59,2 ^c ±6,2

^{a-c} Médias na mesma coluna com diferentes letras representa diferença significativa ($p \leq 0,05$).

* Número de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo aplicados (14 e 18 pulsos de vácuo).

Diferentes taxas de redução da pressão não apresentaram diferença na porosidade das amostras desidratadas, em um nível de confiança de 95 % ($p \leq 0,05$) no teste de Tukey. No entanto, diferenças são observadas no tamanho dos poros obtidos, como pode ser observado em fotografias e imagens de microscopia eletrônica de varredura (Figura 2.8). Estes dados estão de acordo com a indicativo de que maiores taxas de redução da pressão causam uma expansão mais rápida do vapor que, por sua vez, ocasiona a formação de poros maiores (LOUKA e ALLAF, 2002; PAYNE et al., 1989).

2.3.3.2 Análise instrumental de cor

O valor médio (\pm desvio padrão) para cada parâmetro de cor obtido (L^* , a^* e b^*) pelas diferentes técnicas de secagem estudadas está apresentado na Tabela 2.3. Todas as condições de secagem causaram uma redução dos valores do parâmetro L^* , indicando que os processos de secagem escurecem as amostras de manga *in natura*. No entanto, as

amostras desidratadas por KMFD usando 14 CAPV e KMFD-VD apresentaram, na média, maiores valores para o parâmetro L^* , próximos aqueles encontrados para a fruta *in natura*.

Tabela 2.3 - Parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) da manga *in natura* e desidratada por KMFD e KMFD-VD.

Processo	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
<i>in natura</i>	70,81 ^d ±1,39	17,89 ^d ±0,46	72,27 ^c ±2,29	-
KMFD- 14 CAPV*				
9,8 mbar s ⁻¹	64,59 ^{b,c} ±1,06	15,89 ^{a,b} ±1,40	64,37 ^a ±8,76	11,66 ^{a,b} ±6,80
15,9 mbar s ⁻¹	62,93 ^{a,b} ±2,91	16,88 ^{b,d} ±1,37	68,70 ^{a,b} ±1,55	9,04 ^{a,b} ±2,51
25,5 mbar s ⁻¹	66,18 ^c ±2,17	15,83 ^{a,b} ±0,93	66,58 ^{a,b} ±5,87	8,55 ^a ±4,87
KMFD- 18 CAPV				
9,8 mbar s ⁻¹	60,64 ^a ±1,16	15,40 ^{a,c} ±0,17	64,50 ^a ±2,21	13,19 ^b ±1,47
15,9 mbar s ⁻¹	61,20 ^a ±1,25	16,00 ^{a,b} ±2,20	66,80 ^{a,b} ±1,63	11,42 ^{a,b} ±1,12
25,5 mbar s ⁻¹	61,95 ^{a,b} ±0,80	13,90 ^c ±0,39	62,59 ^a ±2,44	13,85 ^{a,b} ±1,51
KMFD-VD	64,12 ^{a,b,c} ±4,40	14,63 ^{a,c} ±1,53	74,97 ^{b,c} ±1,47	8,41 ^{a,b} ±3,45

^{a-c} Médias na mesma coluna com diferentes letras representa diferença significativa ($p \leq 0,5$).

* Número de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo aplicados (14 e 18 pulsos de vácuo).

Os parâmetros a^* e b^* foram diferentes significativamente dos encontrados para as amostras *in natura*, para todas as condições avaliadas. A intensidade da coloração das mangas desidratadas foi modificada pelas diferentes condições de secagem, com redução da tonalidade da coloração verde e amarela. A diferença total de cor (ΔE^*) demonstra que as amostras desidratadas por KMFD-VD e KMFD por 14 CAPV e 25,5 mbar s⁻¹ apresentaram menores diferenças de cor em relação as frutas *in natura*. As amostras desidratadas por KMFD usando 18 CAPV e 25,5 mbar s⁻¹ apresentaram maiores diferenças de cor, no entanto, as alterações de cor não foram grandes o suficiente para descaracterizar as fatias de manga.

Chong et al. (2013) estudaram o efeito do uso de técnicas de secagem combinadas para melhorar a qualidade de frutas desidratadas (maçã, pêra, mamão e manga). Os autores observaram uma diferença total de cor ($\Delta E^* = 25,36 \pm 4,31$) para mangas desidratadas por ar quente (53,94±0,03 °C) em comparação a fruta *in natura*. Este valor é maior que os encontrados para todas as condições neste estudo. Zou et al. (2013) avaliaram o efeito da desidratação osmótica na cor e outras propriedades de *snacks* de manga obtidos por *explosion puffing dryng* (EPD). As

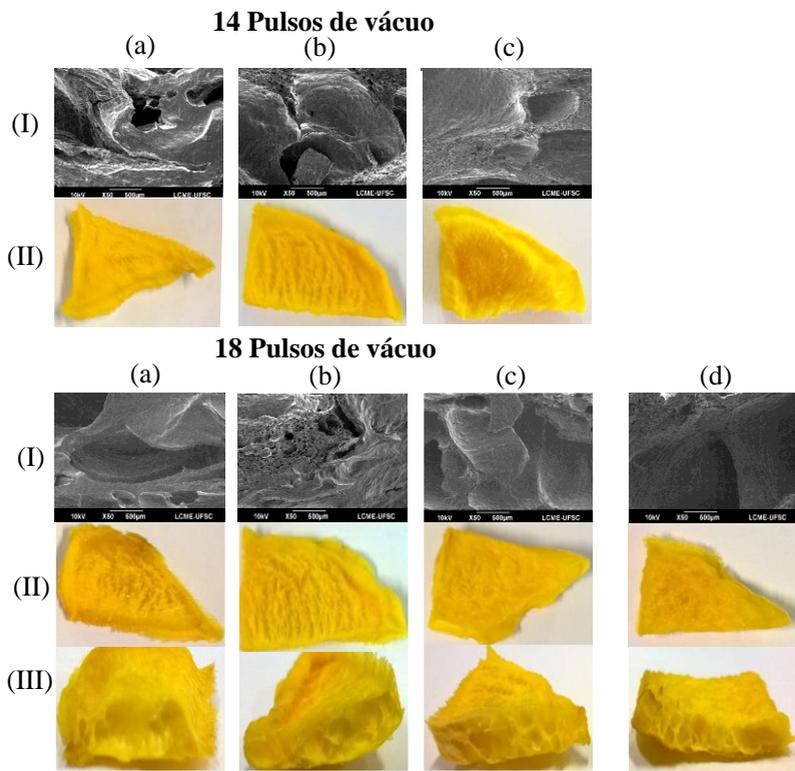
amostras foram aquecidas a 95 °C por um gerador de vapor e mantidas a esta temperatura por 5 minutos. Após este procedimento, a câmara era despressurizada e as amostras atingiam a temperatura aproximada de 75 °C. As amostras desidratadas por EPD sem prévia desidratação osmótica apresentaram parâmetros de cor diferentes dos observados para as frutas *in natura* ($\Delta E^* = 22,9 \pm 5,1$). Nos processos KMFD e KMFD-VD, as amostras eram aquecidas até 60 °C e, após a aplicação do vácuo, as amostras atingiram 25 °C. Assim, as menores temperaturas do produto resultaram em menores diferenças dos parâmetros de cor entre as amostras *in natura* e desidratadas.

2.3.3.3 Microestrutura

A Figura 2.8 apresenta as micrografias da fratura das amostras com aumento de 50 vezes e as fotografias das superfícies de mangas desidratadas por KMFD (14 e 18 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo) e das amostras KMFD-VD.

As amostras desidratadas por KMFD usando taxa de redução da pressão de 25,5 mbar s⁻¹ e por KMFD-VD apresentaram a formação de matrizes mais porosas, com poros grandes e distribuídos aleatoriamente. Esses resultados estão de acordo com os resultados experimentais de porosidade acessível (Tabela 2.2). Louka e Allaf (2002) apresentaram resultados semelhantes para amostras de batatas desidratadas por um processo que utiliza vapor sob alta pressão, seguido de uma descompressão súbita e uma etapa de secagem. Neste estudo, a quantidade de vapor gerado é relacionada com a diferença de temperatura antes e após a descompressão. O vapor gerado causa expansão ou ruptura da estrutura. A intensidade da expansão depende das condições de operação como a temperatura, pressão inicial e final e tempo de descompressão.

Figura 2.8 - Micrografias da fratura das amostras de mangas desidratadas usando 14 e 18 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) (I). Fotografias das superfícies das fatias de manga (II). Fotografias da fratura das frutas desidratadas (III). KMFD – 9,8 mbar s⁻¹ (a), KMFD – 15,9 mbar s⁻¹ (b), KMFD 25,5 - mbar s⁻¹ (c) e KMFD-VD – 25,5 mbar s⁻¹ (d).



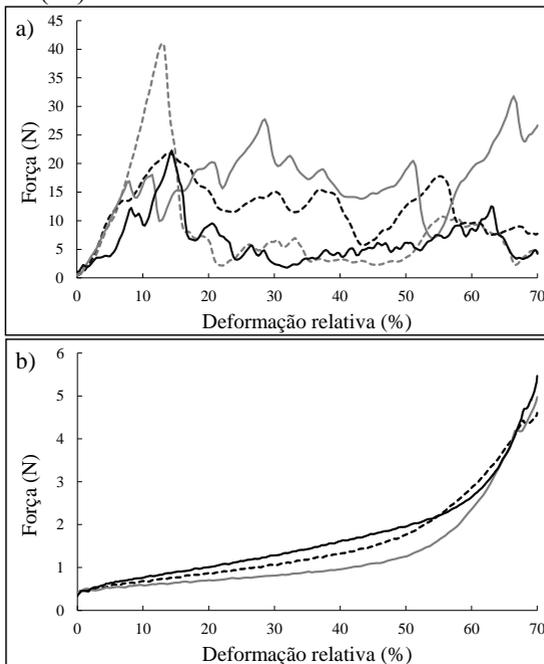
Zotarelli et al. (2012) observaram uma maior expansão na estrutura de bananas e mangas submetidas à secagem por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CMFD), em comparação com amostras submetidas à secagem convectiva. Os autores observaram que a espessura das bananas e mangas desidratadas por CMFD aumentaram aproximadamente 5 % e 7 %, respectivamente, enquanto a secagem utilizando ar quente causou colapso da estrutura da fruta, com redução de espessura de aproximadamente 17 % para banana e 23 % para manga. Porciuncula et al. (2016) avaliaram a secagem de bananas por KMFD, secagem convectiva e secagem a vácuo. Os autores observaram maior

porosidade nas amostras de banana desidratadas por KMFD e a formação de uma matriz porosa mais aberta após a aplicação de três ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. Na Figura 2.8 (18 CAPV (c) e (d)) pode-se observar que as mangas desidratadas por KMFD-VD (3 CAPV) apresentaram estrutura similar as amostras submetidas a 18 CAPV.

2.3.3.4 Propriedades mecânicas

As curvas força-deformação obtidas dos testes de penetração das amostras de manga desidratadas por KMFD, usando 14 e 18 CAPV, e desidratadas por KMFD-VD, estão apresentadas na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Curvas força-deformação obtidas dos testes de penetração das amostras de manga desidratadas. KMFD utilizando 18 pulsos de vácuo (a): KMFD $-9,8 \text{ mbar s}^{-1}$ (---), KMFD $-15,9 \text{ mbar s}^{-1}$ (---), KMFD $25,5 \text{ mbar s}^{-1}$ (—) e KMFD-VD (—). KMFD utilizando 14 pulsos de vácuo (b): KMFD $-9,8 \text{ mbar s}^{-1}$ (---), KMFD $-15,9 \text{ mbar s}^{-1}$ (—), KMFD $25,5 \text{ mbar s}^{-1}$ (—).



As curvas do teste de penetração das amostras de manga desidratadas por KMFD usando 18 CAPV e desidratadas por KMFD-VD apresentaram muitos picos de força, típicos de alimentos crocantes (Figura 2.9 (a)). Este comportamento é resultado de uma estrutura quebradiça e relativamente frágil que sofreu fratura das paredes celulares (LAURINDO e PELEG, 2008; PAENGGKANYA et al., 2015). As curvas força-deformação obtidas dos testes de penetração das mangas desidratadas por KMFD por 14 CAPV (Figura 2.9 (b)) apresentaram menor resistência a penetração, sem oscilações importantes de força, comportamento típico de materiais macios (KAREL, 1985; LEWICKI, 2004).

2.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Os processos KMFD e KMFD-VD são métodos de desidratação muito eficientes que permitem a obtenção de fatias de manga secas e crocantes em aproximadamente duas horas. A microestrutura e porosidade das frutas podem ser controladas pela taxa de redução de pressão durante o pulso de vácuo aplicado, no qual maiores taxas resultam em frutas com maior porosidade. Além disso, o número de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo aplicado permite a obtenção de frutas macias (14 pulsos de vácuo) e crocantes (18 pulsos de vácuo). As amostras desidratadas por KMFD-VD apresentaram microestrutura e porosidade semelhantes às amostras KMFD utilizando 18 pulsos de vácuo. Portanto, os processos KMFD e KMFD-VD são alternativas viáveis para a obtenção de frutas desidratadas e crocantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUDELO, C.; IGUAL, M.; TALENS, P.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. Optical and mechanical properties of cocona chips as affected by the drying process. **Food and Bioproducts Processing**. 95, 192–199, 2015.

AGUILERA, J. M.; STANLEY, D. W.; BAKER, K. W. New dimensions in microstructure of food products. **Trends in Food Science & Technology**, 11, 3-9, 2000.

AOAC, Official Methods of Analysis, Association of Official Analytical Chemists, Washington, 2005.

BARBOSA-CANOVAS, G.V.; FONTANA, A.J.; SCHMIDT, S.J.; LABUZA, T.P. **Water activity and Foods: Fundamentals and Applications**. IFT Press, Ames, Iowa, 2007.

CHONG, C. H.; LAW, C. L.; FIGIEL, A.; WOJDYLO, A.; OZIEMBLOWSKI, M. Colour, phenolic content and antioxidant capacity of some fruits dehydrated by a combination of different methods. **Food Chemistry**, 141, 3889–3896, 2013.

CORZO, O.; BRACHO, N.; ALVAREZ, C. Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying. **Journal of Food Engineering**, 87, 479–484, 2008.

DISSA, A.O.; BATHIEBO, D.J.; DESMORIEUX, H.; COULIBALY, O.; KOULIDIATI, J. Experimental characterization and modelling of thin layer direct solar drying of Amelie and Brooks mangoes. **Energy**, 36, 2517-2527, 2011.

DISSA A.O., DESMORIEUX H., BATHIEBO J., KOULIDIATI J. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage. **Journal of Food Engineering**, 88, 429–4378, 2008.

DUAN, X.; DING, L.; REN, G.; LIU, L.; KONG, Q. The drying strategy of atmospheric freeze drying apple cubes based on glass transition. **Food and Bioproducts Processing**, 91, 534–538, 2013.

FAOSTAT., 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org>. Acessado em 04 de agosto de 2016.

GUSTAVSSON, J.; CEDERBERG, C.; SONESSON, U. Global Food Losses and Food Waste, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011.

HOFSETZ, K.; Lopes, C. C. HUBINGERA, 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**, 83, 531–540, 2007.

KAREL, M.. Effect of water activity and water content on mobility of food components, and their effect on phase transitions in food system. In

D. Simatos, & J. L. Multon (Eds.), **Properties of water in foods in relation to quality and stability** (pp. 153–169). Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1985.

KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDDER, M. U. H. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering**, 121, 48–57, 2014.

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

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.

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

LITZ, R. E. **The mango: botany, production and uses**. Second Edition, Cabi Series, CABI, Wallingford, UK, 2009.

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**, 65, 245–253, 2004

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.

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.

MARQUES, L. G.; SILVEIRA, A. M; FREIRE, J. T. Freeze-Drying Characteristics of Tropical Fruits. **Drying Technology**, 24, 457–463, 2006.

MONTEIRO, R.L., CARCIOFI, B.A.M., LAURINDO, J.B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. **Journal of Food Engineering**, 178, 1-11, 2016.

PAENGGKANYA, S.; SOPONRONNARIT, S.; NATHAKARANAKULE, A. Application of microwaves for drying of durian chips. **Food and Bioproducts Processing**, 96, 1–11, 2015.

PAYNE, F. A.; TARABA, J. A.; SAPUTRA D. A review of puffing processes for expansion of biological products. **Journal of Food Engineering**, v. 10, p. 183–197, 1989.

PORCIUNCULA, B. D. A.; SEGURA, L. A.; LAURINDO, J. B. Processes for Controlling the Structure and Texture of Dehydrated Banana. **Drying Technology**, 34, 167-176, 2016.

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

RUSSO, P.; ADILETTA, G.; DI MATTEO, M. The influence of drying air temperature on the physical properties of dried and rehydrated eggplant. **Food and Bioproducts Processing**, 91, 249–256, 2013.

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.

TOURÉ, S.; KIBANGU-NKEMBO, S. Comparative study of natural solar drying of cassava, banana and mango. **Renewable Energy**, 29, 975–990, 2004.

VARELA P; CHEN J; FISZMAN S; POVEY M J W. Crispness assessment of roasted almonds by an integrated approach to texture description: texture, acoustics, sensory and structure. **Journal of Chemometrics**, v. 20, p. 311–320, 2006.

VARNALIS, A. I.; BRENNAN, J. G.; MACDOUGALL, D. B. A proposed mechanism oh high-temperature puffing of potato. Part I. The

influence of blanching and drying conditions on the volume of puffed cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 361–367, 2001.

YAN Z., SOUSA-GALLAGHER M. J., OLIVEIRA F. A. R. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 84, p. 430–440, 2008.

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.

ZOU K., TENG J., HUANG L., DAÍ X., WEI B. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. **LWT - Food Science and Technology**, v. 51, p. 253-259, 201

3 ESTUDO DA DESIDRATAÇÃO DE FATIAS DE MANGA POR DIFERENTES MÉTODOS: CINÉTICAS DE SECAGEM, PROPRIEDADES FÍSICAS, REIDRATAÇÃO E CAROTENOIDES TOTAIS.

3.1 INTRODUÇÃO

Processos inovadores de secagem de frutas e hortaliças têm sido desenvolvidos para obter produtos de alta qualidade, reduzindo o tempo de processamento e custos operacionais. Processos de secagem como o *high-temperature short-time* (HTST) (HOFSETZ et al., 2007), *explosion puffing* (ZOU et al., 2013), *instant controlled pressure drop* (DIC) (LOUKA e ALLAF, 2002; LOUKA et al., 2004), *convective multi-flash drying* (CMFD) (LAURINDO et al., 2011; ZOTARELLI et al., 2012), *conductive multi-flash drying* (KMFD) (LAURINDO et al., 2011; PORCIUNCULA et al., 2016) e *microwave multi-flash drying* (MWMFD) (LAURINDO et al., 2011; MONTEIRO et al., 2016) têm sido propostos como alternativas aos métodos convencionais de secagem. Essas tecnologias são capazes de obter frutas e hortaliças com alta porosidade e textura crocante em tempos de processo reduzidos quando comparados com métodos tradicionais de secagem como a secagem convectiva ou liofilização.

Nos processos por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (*multi-flash drying*), o produto é aquecido à pressão atmosférica até a temperatura desejada, e então um pulso de vácuo é aplicado, levando a evaporação *flash* e ao resfriamento da amostra (LAURINDO et al., 2011). Esta tecnologia de desidratação permite a obtenção de frutas e hortaliças secas e crocantes com alta porosidade, baixos teor de umidade e atividade de água em tempos reduzidos. Além disso, este processo apresenta custos operacionais mais baixos e permite obter produtos similares aos liofilizados (LAURINDO et al., 2011; ZOTARELLI et al., 2012, PORCIUNCULA et al., 2016, MONTEIRO et al., 2016).

A qualidade dos produtos desidratados pode ser determinada comparando a forma, cor, textura, aromas e características nutricionais dos produtos secos e *in natura*. Outras propriedades importantes como rápida capacidade de reidratação e retenção de água são importantes na análise da qualidade de frutas desidratadas (VARNALIS, 2001). A perda de qualidade durante a secagem pode limitar o valor de mercado e a demanda por frutas e hortaliças desidratadas (ACHANTA e OKOS, 2000). Uma das principais razões pela perda de qualidade das frutas e hortaliças secas são as mudanças da estrutura do produto. Essas alterações

da estrutura podem ser determinadas por meio de parâmetros físicos como o volume, porosidade, distribuição e tamanho dos poros e textura. Essas mudanças na estrutura podem reduzir a porosidade dos materiais, influenciando a retenção de aromas, distribuição de umidade, capacidade de reidratação e resultando em um endurecimento indesejável do produto (YAN et al., 2008). A capacidade de reidratação é outro parâmetro importante em alimentos desidratados. A reidratação é um processo complexo em que o produto desidratado é imerso em água a fim de restaurar as propriedades do produto original. Em condições ideais, se a integridade estrutural é preservada durante a desidratação, o produto seco deveria absorver água até atingir o mesmo conteúdo de umidade do produto *in natura* e recuperar as propriedades originais (MARQUES et al., 2009). No entanto, as condições do pré-tratamento, da secagem e da reidratação influenciam a estrutura e a composição do produto reidratado, resultando em alterações na capacidade de reidratação (LEWICK, 1998). Então, a capacidade de reidratação de um produto pode ser considerada como a medida dos danos causados pelas condições do pré-tratamento, secagem e reidratação no produto final (LEWICK, 1998).

A capacidade de reidratação é um dos atributos de qualidade mais discutidos das frutas e hortaliças desidratadas. O efeito da secagem com ar quente, a vácuo e da liofilização na capacidade de reidratação foi intensamente investigada em diversos produtos, como morangos (MEDA e RATTI, 2005); mangas e outras frutas tropicais (MARQUES et al., 2009); abóboras (SEREMET et al., 2016); bananas (KHAWAS et al., 2016) e cenouras (DOYMAZ, 2016). Nesses estudos, a razão de reidratação dos produtos desidratados e alguns detalhes sobre os fluxos durante o processo de reidratação (absorção de água e lixiviação de solutos) têm sido discutido. Atualmente, alguns estudos em relação a reidratação de produtos desidratados por processos de secagem alternativos estão disponíveis, como por exemplo a secagem de manga por *explosion puffing* (ZOU et al., 2013); a secagem de mirtilo por micro-ondas associado a outras técnicas (ZIELINSKA e MARKOWSKI, 2016); secagem de pitaya por micro-ondas e *explosion puffing* (YI et al. 2016). Estas técnicas inovadoras reduzem os tempos de secagem e alteram as propriedades físicas das frutas e hortaliças desidratadas (textura, microestrutura e porosidade) melhorando a capacidade de reidratação.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar as cinéticas de secagem, propriedades físicas, de reidratação e microestruturais de amostras de manga submetidas a diferentes métodos de secagem (secagem convectiva, secagem a vácuo, liofilização e *conductive multi-flash drying*).

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Seleção e preparação das amostras

As mangas da variedade Tommy Atkins (*Mangifera indica* L.) foram selecionadas como citado no item 2.2.1.1. As mangas selecionadas (conteúdo de sólidos solúveis totais de $14,5 \pm 0,8$ °Brix e força de penetração de $3,9 \pm 1,9$ N) foram lavadas, descascadas e fatiadas com espessura de 5 mm em direção paralela às fibras.

3.2.2 Secagem

As amostras fatiadas foram submetidas a diferentes métodos de secagem: secagem convectiva com ar quente (AD), liofilização (FD), secagem a vácuo (VD) e *conductive multi-flash drying* seguido de secagem a vácuo (KMFD-VD).

3.2.2.1 Secagem convectiva (AD)

Aproximadamente 100 g de amostras de manga foram desidratadas em estufa convectiva (TE 394/2, TECNAL, Ourinhos, Brasil) a 60 °C. A umidade relativa ($24,1 \pm 1,9$ %) e a velocidade do ar ($\approx 1 \text{ m s}^{-1}$) foram medidas com um higrômetro (ThermoHygrometer, TESTO610, Alemanha) e um anemômetro portátil (Anemometer TESTO 425, Alemanha) durante a secagem. Um sistema *on-line* para a determinação da massa das amostras foi adaptado a câmara para se obter as curvas de secagem. O sistema consiste em um suporte de alumínio conectado a uma célula de carga *single-point* (Alfa Instrumentos, modelo GL1, São Paulo, Brasil), com capacidade de 2 kg e exatidão de 0,1 g, sustentado por um suporte metálico dentro do secador. A célula de carga foi conectada a um computador por uma interface eletrônica (Alfa Instrumentos, Modelo 3102, São Paulo, Brasil), como descrito por Tribuzi e Laurindo (2014).

3.2.2.2 Liofilização (FD)

A secagem das amostras de manga por liofilização foi realizada utilizando um liofilizador comercial (Liotop, L101, São Carlos, Brasil) adaptado para realizar o registro *on-line* das curvas de secagem, como apresentado por Tribuzi e Laurindo (2014). As amostras foram congeladas a -60 ± 1 °C e desidratadas à pressão de $0,2 \pm 0,05$ mbar. Os

experimentos foram realizados em triplicata com aproximadamente 100 g de amostras de manga.

3.2.2.3 Secagem a vácuo (VD)

As amostras de manga foram desidratadas em estufa a vácuo (440-DE, Ethik Technology, Vargem Grande Paulista, Brasil) conectada a uma bomba de vácuo (LC305, DVP Vacuum Technology, Itália) a 60 °C e 35 mbar. Aproximadamente 400 g de amostras foram utilizadas em cada experimento. As amostras foram retiradas do secador a cada 30 min nas primeiras 2 h e a cada 60 min no período restante de secagem para determinação das curvas de secagem. Os experimentos foram realizados em triplicata.

3.2.2.4 Conductive multi-flash drying seguido de secagem a vácuo (KMFD-VD)

Devido aos resultados obtidos no estudo anterior (Capítulo 2) demonstrarem que as amostras desidratadas por KMFD e por KMFD-VD apresentam propriedades similares, o processo KMFD-VD foi escolhido para o estudo comparativo com os processos tradicionais. O aparato experimental utilizado na secagem por KMFD-VD está descrito na seção 2.2.2. Aproximadamente 400 g de amostras de manga foram utilizadas para determinar as cinéticas de secagem e as propriedades das amostras após a secagem. As amostras foram aquecidas até 60 °C antes da aplicação de um pulso de vácuo. A câmara de secagem foi mantida a 35 mbar por 5 min. Em seguida, a pressão atmosférica foi reestabelecida e um novo ciclo de aquecimento-pulso de vácuo aplicado. Três ciclos de aquecimento-pulso de vácuo foram aplicados seguidos de uma secagem a vácuo por 105 min a 35 mbar. O conteúdo de umidade das amostras durante o processo KMFD-VD foi determinado antes e após cada pulso de vácuo aplicado e a cada 30 min durante o período de secagem a vácuo. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

3.2.3 Caracterização das frutas desidratadas

3.2.3.1 Determinações analíticas

O teor de umidade das amostras foi determinado em estufa a vácuo (TE-395, TECNAL, Piracicaba, Brasil) a 70 °C (AOAC, 2005). A atividade de água foi determinada com um higrômetro digital (Aqualab

Series 3, Decagon Devices, Inc., Pullman, EUA). O volume real (V_r) foi determinado com um picnômetro a gás, de acordo com a metodologia proposta por Sereno et al. (2007). O volume aparente (V_{ap}) foi determinado pela medida da força de empuxo da amostra imersa em *n*-heptano (LOZANO et al., 1980). A massa específica aparente (ρ_{ap}) foi calculada utilizando a massa das amostras (m) e seu volume aparente (Equação 3.1). A porosidade acessível foi calculada com o volume real e aparente das amostras (Equação 3.2):

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_{ap}} \quad (3.1)$$

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

O conteúdo de carotenoides totais das amostras *in natura* e desidratadas foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Rodriguez-Amaya (2001). Essa metodologia é baseada na extração dos carotenoides com acetona, seguida por separação em éter de petróleo, diluição e leitura em espectrofotômetro (HITACHI, U2900, China) (comprimento de onda de 450 nm), utilizando éter de petróleo puro como branco. Os resultados foram expressos em termos de carotenoides totais ($\mu\text{g g}^{-1}$) e calculados de acordo com a Equação 3.3:

$$CAR = \frac{Abs \cdot V \cdot 10^4}{A_{1cm}^{1\%} \cdot m} \quad (3.3)$$

em que V é o volume da diluição (mL), Abs é a máxima absorvância medida, $A_{1cm}^{1\%}$ é a absorvância para o carotenoide predominante em éter de petróleo (no caso β -caroteno) e m é a massa da amostra (g).

3.2.3.2 Propriedades mecânicas

Os testes de penetração das amostras desidratadas foram realizados em um texturômetro com célula de carga de 25 kg (Stable Micro System, Modelo - TA-XT2-Plus, Reino Unido), utilizando uma probe cilíndrica de 2 mm de diâmetro, velocidade de teste de 3 mm s^{-1} e deformação de 40 % da espessura inicial das amostras. Para isto, 5 amostras foram retiradas do secador após os processos de desidratação e 3 perfurações foram realizadas em cada amostra, em diferentes regiões.

3.2.3.3 Microestrutura

A análise da microestrutura interna das mangas produzidas pelos diferentes métodos de secagem foi realizada utilizando um estereoscópio óptico e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Imagens das amostras fraturadas manualmente foram obtidas utilizando um estereoscópio óptico (Optech, Alemanha) com uma câmera microscópica (Opticam, OPT 10000, Brasil). As imagens foram analisadas utilizando um *software* (TSview, Tucsen, V 7.3.1.7, China). Para a MEV, as amostras foram desidratadas por liofilização (L101, Liotop, Brasil) e recobertas com ouro utilizando um metalizador (LEICA, Modelo - EM SCD500). Então, as amostras foram examinadas em um microscópio eletrônico de varredura operando a 10 kV (6390LV, JEOL, Japão).

3.2.3.4 Análise instrumental de cor

Um colorímetro (MiniScan EZ, HunterLab, EUA) foi utilizado para determinar os parâmetros de cor das amostras de manga. A cor foi expressa pelo sistema de coordenadas CIELAB, L* (branco/preto), a* (verde/vermelho) e b* (azul/amarelo).

3.2.3.5 Reidratação

As amostras desidratadas pelos diferentes processos de secagem (AD, FD, VD e KMFD-VD) foram totalmente imersas em água destilada (1:100, massa de manga seca : massa de água). O efeito da temperatura da água nos parâmetros de reidratação também foi investigado realizando experimentos com água a 20 °C e 80 °C. A massa das amostras foi determinada após 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360 e 420 min de imersão para os experimentos conduzidos a 20 °C, e após 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 90, 120, 180 min de imersão para os experimentos conduzidos a 80 °C. Todos os experimentos de reidratação foram realizados em triplicata.

As cinéticas de reidratação foram avaliadas calculando a razão de reidratação (RR) de acordo com a Equação 3.4:

$$RR = \frac{m_r}{m_d} \quad (3.4)$$

em que, m_r é a massa da amostra reidratada e m_d é a massa da amostra desidratada.

A média dos valores da RR calculada da repetição de três experimentos foi plotada contra o tempo para avaliar as cinéticas de reidratação das amostras de manga.

Durante o processo de reidratação, além da absorção de água ocorre também a lixiviação de sólidos solúveis. Três índices foram utilizados para estimar as características da reidratação das amostras desidratadas (LEWICKI, 1998): i) capacidade de absorção de água (Equação 3.5), informa a habilidade do material desidratado de absorver água; ii) capacidade de retenção de sólidos (Equação 3.6), expressa a habilidade do material reter sólidos solúveis e iii) habilidade de reidratação (Equação 3.7):

$$WAC = \frac{m_{wr} - m_{wd}}{m_{wo} - m_{wd}} \quad (3.5)$$

$$DHC = \frac{m_{sr}}{m_{sd}} \quad (3.6)$$

$$RA = WAC \cdot DHC \quad (3.7)$$

em que, WAC é a capacidade de absorção de água, m é a massa (g) e os subscritos o , d e r se referem as amostras *in natura*, desidratadas e reidratadas, respectivamente; DHC é a habilidade do material reter sólidos solúveis, m_{sr} é a massa de sólidos do material reidratado (g) e m_{sd} é a massa de sólidos do material desidratado (g); RA é a habilidade de reidratação.

3.2.3.6 Ajuste matemático das curvas de reidratação

Três modelos: modelo exponencial, modelo de Peleg (PELEG, 1988) e modelo de Weibull foram utilizados para representar a reidratação das mangas desidratadas.

A equação exponencial representa um modelo cinético de primeira ordem e é descrita como a Equação 3.8:

$$RR = RR_e - (RR_e - 1)\exp(-kt) \quad (3.8)$$

onde RR é a razão de reidratação (adimensional) no tempo t (min), RR_e é a razão de reidratação na saturação (adimensional) e k é a constante cinética (min^{-1}).

O modelo proposto por Peleg (1988) é uma equação não exponencial que apresenta três parâmetros (Equação 3.9):

$$RR = \left(RR_e - \frac{1}{k_2} \right) + \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (3.9)$$

em que k_1 é uma constante cinética com dimensão de tempo e k_2 é um parâmetro adimensional, que está relacionado com a máxima razão de reidratação.

O modelo de Weibull pode ser expresso como segue (Equação 3.10):

$$RR = RR_e + (1 - RR_e) \exp \left[- \frac{t}{\beta} \right]^\alpha \quad (3.10)$$

onde α é o parâmetro de forma do modelo de Weibull (adimensional) e β é um parâmetro de escala, com dimensão de tempo.

3.2.3.7 Análise estatística

Os dados das curvas de secagem dos processos estudados (AD, FD, VD e KMFD-VD) foram ajustados a uma regressão linear, para a verificação dos períodos de secagem. O coeficiente de correlação (R^2) e o coeficiente angular da reta (taxa de secagem), foram determinados.

Os modelos selecionados para o ajuste dos dados de reidratação apresentam dois ou três parâmetros que foram estimados utilizando regressão não linear, usando o método dos mínimos quadrados, com o *software* MATLAB (R2010a). A adequação dos modelos aos dados experimentais foi avaliada utilizando-se o coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

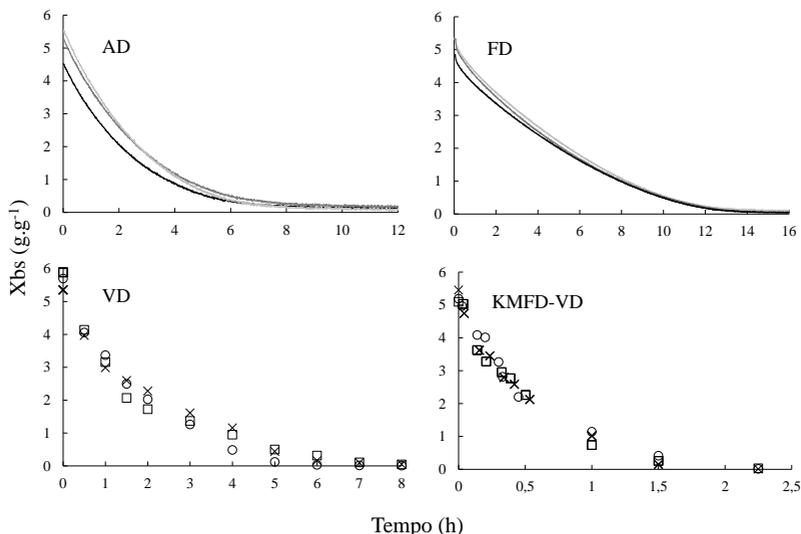
Os dados experimentais obtidos de massa específica aparente, porosidade, cor e carotenoides totais foram analisados estatisticamente com o programa Statistica 7.0 (StatSoft, Tulsa, Estados Unidos), através de análise de variância (ANOVA) e pelo teste de Tukey a 95 % de confiança ($p \leq 0,05$).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Curvas de secagem

A Figura 3.1 apresenta as triplicatas dos dados das curvas de secagem de mangas desidratadas pelos diferentes métodos (AD, FD, VD e KMFD-VD). As curvas de secagem representadas na Figura 3.1 apresentam boa reprodução dos processos de secagem estudados. As amostras utilizadas iniciaram o processo de secagem com teor de umidade inicial de $5,299 \pm 0,231 \text{ g g}^{-1}$ (em base seca, b.s.) e atividade de água de $0,991 \pm 0,001$. A Tabela 3.1 apresenta os valores médios do teor de umidade final, a_w , o tempo de secagem, coeficientes angulares (taxas de secagem) e coeficientes de correlação (R^2) para o ajuste linear aos dados experimentais de cada processo estudado.

Figura 3.1 - Curvas dos dados experimentais da evolução temporal do teor de umidade em triplicata das amostras de manga desidratadas pelos diferentes métodos (AD, FD, VD e KMFD-VD).



No processo KMFD-VD, as amostras atingiram teor de umidade de $0,010 \pm 0,005 \text{ g g}^{-1}$ b.s. e a_w de $0,293 \pm 0,002$ após 2,25 horas. O processo KMFD-VD reduziu o tempo de secagem em 86 % em relação ao processo FD, 81 % em relação ao AD e em 72 % em relação ao VD. A comparação entre curvas representativas dos dados de umidade adimensional contra o

tempo de cada processo estudado para a desidratação das amostras (Figura 3.2), facilita visualizar esta diferença. Estes resultados comprovam a eficiência da evaporação *flash* durante o pulso de vácuo e os resultados obtidos por Zotarelli et al. (2012) que, estudando um processo similar (CMFD - *Convective multi-flash drying*), observaram a redução pela metade do tempo de secagem em comparação a secagem usando ar quente e a secagem a vácuo. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Monteiro et al. (2016), que utilizaram o aquecimento por micro-ondas e a aplicação de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo na desidratação de bananas. Os tempos de secagem da técnica por micro-ondas a vácuo e micro-ondas utilizando ciclos de aquecimento-pulso de vácuo foram muito menores que o tempo necessário para a liofilização e para os tempos conhecidos para a secagem convectiva.

Tabela 3.1 - Teor de umidade média ($X_{bs\ final}$) e atividade de água (a_w) das mangas desidratadas. Tempo de secagem (t_f), coeficientes angulares (taxa de secagem) e coeficiente de correlação (R^2) para o ajuste linear aos dados experimentais das diferentes condições de secagem.

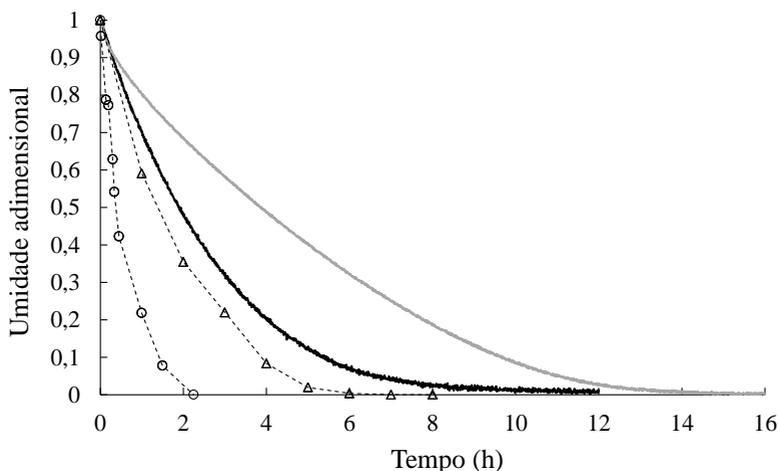
Secagem	$X_{bs\ final}$ (g g ⁻¹)	a_w	t_f (h)	Taxa de secagem (g g ⁻¹ h ⁻¹)	R^2
AD	0,034±0,009	0,353±0,007	12,00	1,237	0,989
FD	0,032±0,002	0,310±0,007	16,00	0,585	0,994
VD	0,023±0,009	0,308±0,008	8,00	1,884	0,971
KMFD-VD	0,010±0,005	0,293±0,002	2,25	6,244	0,940

Uma taxa de secagem constante no estágio inicial foi observada para todos os processos de secagem. Este período pode ser descrito pelo ajuste de uma reta antes do início do período de taxa decrescente (MONTEIRO et al., 2016). A Tabela 3.1 apresenta os coeficientes angulares (taxas de secagem) e o coeficiente de correlação (R^2) para o ajuste linear aos dados experimentais do teor de umidade contra o tempo de todos os processos de secagem estudados. A taxa de secagem constante para o processo KMFD-VD foi 10,67 vezes superior à taxa observada para o processo de liofilização; 5,05 vezes superior à taxa observada para o processo de secagem convectiva e 3,31 vezes superior à observada para a secagem a vácuo.

No processo KMFD-VD, as amostras são aquecidas até 60 °C. Durante a aplicação do pulso de vácuo, a água livre evapora das amostras (evaporação *flash*), resfriando o produto até a temperatura de saturação da água (25 °C) na pressão final da câmara (35 mbar). O gradiente de

temperatura entre as amostras e as placas aquecidas (90 °C) aumenta a transferência de calor durante a etapa de aquecimento. Devido a uma etapa de aquecimento mais rápida e a evaporação *flash* durante os pulsos de vácuo, o processo KMFD-VD é diferente da secagem convencional (controlada pela simultânea transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem), apresentando taxas de secagem superiores e tempos de secagem reduzidos.

Figura 3.2 - Evolução temporal da umidade adimensional das amostras de manga durante os diferentes processos de secagem. AD (—), FD (—), VD (Δ) e KMFD-VD (\circ).

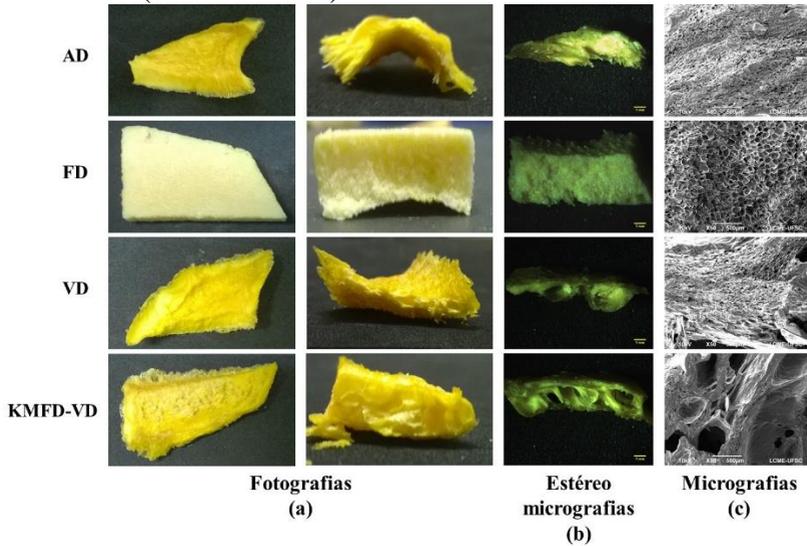


3.3.2 Caracterização das frutas desidratadas

3.3.2.1 Microestrutura e propriedades mecânicas

As fotografias, imagens do estereoscópio óptico e as micrografias realizadas nas amostras de manga desidratadas pelos diferentes métodos estão apresentadas na Figura 3.3.

Figura 3.3 - a) Fotografias das mangas desidratadas, b) imagens do estereoscópio óptico e c) imagens de MEV da fratura manual das mangas desidratadas (aumento de 50x).

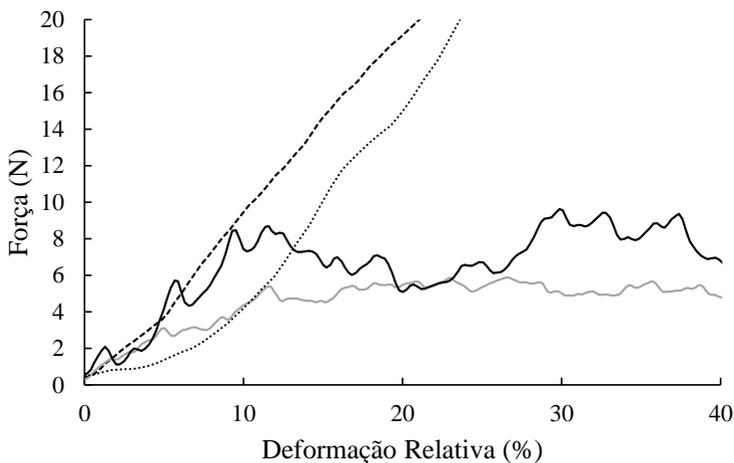


As amostras desidratadas por KMFD-VD apresentaram uma matriz porosa com poros maiores do que os observados nas amostras desidratadas por FD, AD e VD, causados pela expansão da estrutura das frutas durante o processamento. As amostras FD apresentaram estrutura esponjosa com grande número de pequenos poros, típica dos produtos desidratados com a estrutura original preservada. Por outro lado, as amostras desidratadas por AD e VD apresentaram uma estrutura compacta e com poucos poros, mostrando um encolhimento uniforme e pronunciado durante o processo. Monteiro et al. (2016) obtiveram resultado similares ao estudar a secagem de fatias de bananas por micro-ondas a vácuo e micro-ondas utilizando ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (*microwave multi-flash drying*). A microestrutura das amostras de banana apresentou poros maiores e uma estrutura mais porosa quando elas foram desidratadas utilizando ciclos de aquecimento-pulso de vácuo do que a secagem por micro-ondas a vácuo convencional. Esta estrutura porosa resulta em curvas força-deformação irregulares, durante os testes de perfuração, características de produtos crocantes.

As curvas força-deformação (até 40 % da espessura inicial) para as amostras AD, FD, VD e KMFD-VD estão apresentadas na Figura 3.4. As curvas dos testes de perfuração para os processos FD e KMFD-VD

apresentaram comportamentos similares, com variações da força de penetração, caracterizado por muitos picos presentes nas curvas força-deformação. O número e a intensidade desses picos podem ser relacionados à crocância dos produtos desidratados. Em materiais porosos e com estrutura quebradiça, a força de penetração oscila durante a quebra das paredes e desintegração da estrutura (LAURINDO e PELEG, 2008). Analisando as curvas força-deformação para os processos FD e KMFD-VD, ambos apresentam este padrão. No entanto, as amostras KMFD-VD apresentam curvas força-deformação irregulares com oscilações de força muito maiores, indicando uma potencial textura mais crocante em comparação as amostras FD.

Figura 3.4 - Curvas força-deformação das amostras de mangas desidratadas por AD (----), FD (—), VD (.....) e KMFD-VD (—).



No processo KMFD-VD, o vapor gerado durante os pulsos de vácuo permitem a formação de um produto com estrutura altamente porosa que apresenta grande influência na textura dos produtos desidratados. Este efeito de *puffing* permite a formação de frutas muito crocantes. Resultados semelhantes foram observados por Porciuncula et al. (2016) na comparação de diferentes métodos de secagem de fatias de banana com e sem aplicação de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo e por Monteiro et al. (2016) que observou que bananas desidratadas por micro-ondas com aplicação de pulsos de vácuo são mais crocantes do que as desidratadas por micro-ondas a vácuo e por liofilização.

As amostras desidratadas por AD e por VD apresentaram um aumento contínuo da força de penetração. Durante a secagem com ar quente ou a vácuo, as amostras são expostas a temperaturas relativamente baixas e constantes por um longo período. As baixas temperaturas na câmara de secagem causam uma lenta difusão da água do interior para a superfície do produto, com isso a matriz sólida encolhe e compacta. As amostras de manga desidratadas por AD e VD necessitaram de maiores forças de penetração (aproximadamente 20 N) do que as frutas secas por FD e KMFD-VD, que necessitaram de forças de penetrações na faixa de 5-10 N. Este fato está associado a formação de um produto compacto e com baixa porosidade nos processos AD e VD (DISSA et al., 2008).

3.3.2.2 Massa específica aparente e porosidade acessível

Os dados obtidos da massa específica aparente das amostras de manga *in natura* e desidratadas estão apresentados na Tabela 3.2. Este parâmetro foi influenciado pela desidratação. As amostras AD apresentaram maiores valores de massa específica aparente em comparação as mangas *in natura*, além disso, as massas específicas aparentes das amostras FD, KMFD-VD e VD foram menores após a secagem. A redução da massa específica aparente está relacionada com a perda de água e a formação de poros durante a secagem (LIU et al., 2012). As amostras FD e KMFD-VD apresentaram valores similares de ρ_{ap} , menores do que as amostras AD e VD. Este resultado pode ser explicado considerando o maior número de poros das amostras FD e KMFD-VD (Figura 3.3).

Na Tabela 3.2 também estão apresentados os dados da porosidade acessível das mangas *in natura* e desidratadas pelos diferentes processos. O encolhimento do produto durante a secagem teve influência significativa na porosidade final obtida, de fato as amostras AD e VD apresentaram os menores valores de porosidade acessível entre os processos estudados. O fenômeno do encolhimento pode ser governado por diferentes mecanismos, como a transição vítrea, pressão capilar, e força mecânica da matriz sólida (KUROZAWA et al., 2012). Nas amostras AD e VD, a difusão da água é lenta permitindo que o produto encolha e compacte, por outro lado, no processo KMFD-VD a rápida geração de vapor durante os pulsos de vácuo rompe a estrutura do produto causando uma expansão (efeito de *puffing*).

Tabela 3.2 – Massa específica aparente (ρ_a) e porosidade acessível (ε) das amostras de manga *in natura* e desidratadas.

Secagem	ρ_a (g cm ⁻³)	ε (%)
<i>in natura</i>	1,02 ^c ($\pm 0,02$)	10,4 ^a ($\pm 2,6$)
AD	1,13 ^d ($\pm 0,04$)	37,3 ^b ($\pm 2,7$)
FD	0,42 ^a ($\pm 0,04$)	65,9 ^c ($\pm 3,4$)
VD	0,83 ^b ($\pm 0,05$)	42,7 ^b ($\pm 4,6$)
KMFD-VD	0,47 ^a ($\pm 0,01$)	62,4 ^c ($\pm 1,4$)

^{a-d} Médias na mesma coluna com diferentes letras representa diferença significativa ($p \leq 0,05$).

As amostras FD e KMFD-VD foram altamente porosas e apresentaram valores similares de porosidade acessível. O processo de liofilização tem como característica preservar a forma e o volume do produto (ROOS, 1997), enquanto os processos por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo tendem a expandir as amostras, compensando o encolhimento do produto (ZOTARELLI et al., 2012; PORCIUNCULA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2016). Monteiro et al. (2016) avaliaram a massa específica aparente e a porosidade acessível de bananas desidratadas por liofilização e ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, usando micro-ondas como fonte de aquecimento das amostras, e observaram que mesmo as amostras apresentando estruturas internas diferentes, os valores de ρ_{ap} e ε foram semelhantes.

3.3.2.3 Análise instrumental de cor

Os parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) e a diferença total de cor (ΔE^*) obtidos para as amostras de mangas *in natura* e desidratadas estão apresentadas na Tabela 3.3. As amostras AD, VD e KMFD-VD apresentaram uma coloração mais escura em comparação as frutas *in natura* demonstrado pelos valores menores do parâmetro L^* . Por outro lado, as amostras FD apresentaram maiores valores do parâmetro L^* . Uma coloração mais clara das amostras liofilizadas foi também observada por Ceballos et al. (2012) na liofilização de polpa de graviola, indicando que este processo apresenta uma tendência a produzir frutas processadas de coloração mais clara. No entanto, durante a secagem, os atributos de cor mudam dependendo do processo e das condições de secagem (BAINI e LANGRISH, 2009).

Tabela 3.3 - Parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) das amostras *in natura* e desidratadas.

Secagem	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
<i>in natura</i>	70,25±1,93 ^c	15,55±1,64 ^c	70,38±1,80 ^c	-
AD	59,81±1,65 ^a	15,01±1,40 ^{b,c}	55,88±6,05 ^b	18,31±5,10 ^c
FD	75,47±1,63 ^d	8,93±0,40 ^a	42,81±1,53 ^a	28,89±1,38 ^d
VD	59,30±3,95 ^a	16,08±2,41 ^c	60,27±2,38 ^c	15,38±3,63 ^b
KMFD-VD	64,93±2,29 ^b	14,61±1,43 ^b	62,92±5,74 ^d	10,03±4,96 ^a

^{a-c} Médias na mesma coluna com diferentes letras representa diferença significativa ($p \leq 0,05$).

As amostras KMFD-VD apresentaram menor escurecimento em comparação as amostras AD e VD. Apesar das temperaturas do secador serem maiores (90 °C), no início do processo, quando a maior parte da umidade é removida (evaporação *flash*), as amostras são aquecidas apenas até 60 °C antes do pulso de vácuo. Então, devido à baixa temperatura no início, a rápida remoção de umidade e os tempos de processo reduzidos, as amostras KMFD-VD apresentaram menos modificações nos parâmetros de cor do que os outros processos em relação as amostras *in natura*. As amostras desidratadas por AD, VD e KMFD-VD apresentaram menores variações no parâmetro a^* (verde/vermelho) quando comparadas com as amostras *in natura*. O parâmetro b^* (amarelo/azul) das amostras VD e KMFD-VD apresentou maiores valores comparados as amostras AD e FD, confirmando que as amostras KMFD-VD apresentaram maior tonalidade amarela. Além disso, o processo KMFD-VD apresentou menores valores de ΔE^* indicando menores diferenças de cor em relação as mangas *in natura*. Frutas desidratadas que apresentam cor similar as frutas *in natura* atraem a atenção dos consumidores (ESEHAGHBEGYI et al., 2014).

3.3.2.4 Carotenoides

O conteúdo de carotenoides das mangas desidratadas pelos diferentes métodos e a retenção de carotenoides em relação a fruta *in natura* estão apresentados na Tabela 3.4. Para as mangas *in natura*, foi encontrado um conteúdo de carotenoides de 198,6±14,1 $\mu\text{g g}^{-1}$ de massa seca ou 28,80±2,1 $\mu\text{g g}^{-1}$ de massa total. O conteúdo de carotenoides totais de mangas varia entre 17 e 51 $\mu\text{g g}^{-1}$ de massa total de acordo com o grau de maturação (MERCADANTE e RODRIGUEZ-AMAYA, 1998; LITZ, 2009).

Tabela 3.4 - Valor médio (\pm desvio padrão) dos carotenoides em função da massa seca de produto para os diferentes métodos de secagem.

Secagem	Carotenoides ($\mu\text{g g}^{-1}$ massa seca)	Retenção em relação a fruta <i>in natura</i> (%)
<i>in natura</i>	198,6 \pm 14,1 ^d	-
AD	69,8 \pm 1,9 ^a	35,1
FD	141,9 \pm 5,0 ^c	71,4
VD	99,5 \pm 2,2 ^b	50,1
KMFD-VD	88,8 \pm 3,2 ^{a,b}	44,7

^{a-d} Médias na mesma coluna com diferentes letras representa diferença significativa ($p \leq 0,05$).

Os carotenoides são pigmentos responsáveis pela cor amarela de frutas e hortaliças, e são altamente susceptíveis a oxidação, a qual é acelerada a altas temperaturas (SAXENA et al., 2012). As amostras desidratadas pelos diferentes processos apresentaram diferentes conteúdos de carotenoides. As amostras FD apresentaram alto conteúdo de carotenoides e, conseqüentemente, maior retenção em relação a fruta *in natura*. A liofilização é um processo reconhecido para produtos termossensíveis, devido ao uso de baixas temperaturas e aplicação de alto vácuo (RATTI, 2001). As amostras VD e KMFD-VD apresentaram conteúdos de carotenoides similares; no entanto as amostras VD apresentaram maior retenção em relação a fruta *in natura* em comparação as amostras KMFD-VD. Apesar do tempo de processo longo (8 horas), durante a secagem a vácuo, as amostras foram mantidas sob vácuo e a temperatura máxima de 60 °C. Por outro lado, durante o processo KMFD-VD, as amostras foram aquecidas até 60 °C sob pressão atmosférica, o que facilita a oxidação dos carotenoides, e durante a segunda parte do processo a temperatura interna das amostras aumentou atingindo o equilíbrio com as placas aquecidas a 90 °C. As amostras AD apresentaram os menores valores de carotenoides e menor retenção em relação a manga *in natura*, devido ao longo tempo de secagem sob pressão atmosférica.

3.3.2.5 Cinéticas de reidratação

As curvas de reidratação das amostras AD, VD, FD e KMFD-VD estão apresentadas na Figura 3.4. As razões de reidratação (RR) foram entre 1 e 6 para os experimentos realizados a 20 °C e entre 1 e 5 para os experimentos realizados a 80 °C. Uma reidratação mais rápida no início do processo pode ser observado para as amostras FD, no entanto a RR final dessas amostras foi menor em comparação as mangas desidratadas pelos outros métodos. Marques et al. (2009) observaram comportamento similar durante a reidratação de manga e outras frutas tropicais liofilizadas. As amostras obtidas por KMFD-VD apresentaram reidratação mais rápida no início e valores de RR maiores no equilíbrio em comparação as amostras AD e VD. A estrutura porosa expandida das amostras de mangas desidratadas por KMFD-VD resulta em uma rápida reidratação e melhor retenção de água (SETIADY et al., 2009). Na média, a reidratação na temperatura da água de 80 °C (Figura 3.4b) foi mais rápida que a 20 °C, no entanto a capacidade de reidratação no equilíbrio foi menor (aproximadamente 14 %). A reidratação a temperaturas elevadas afeta a estrutura dos produtos desidratados dificultando a absorção de água. Esses danos causados a estrutura reduz o número e tamanho dos capilares e poros disponíveis das amostras dificultando a sucção capilar, afetando os valores da RR (MEDA e RATTI, 2005; YI et al. 2016). O modelos exponencial, de Peleg e Weibull foram ajustados aos dados experimentais da RR das mangas reidratadas (Figura 3.4). Estes resultados do ajuste não linear dos parâmetros dos modelos e os coeficientes estatísticos são apresentados nas Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7.

Figura 3.5 - Razão de reidratação a 20 °C (a) e a 80 °C (b) das mangas desidratadas em função do tempo. Dados experimentais: AD (○), FD (□), VD (◇) e KMFD-VD (△). O modelo de Weibull ajustado às curvas está representado por uma linha contínua.

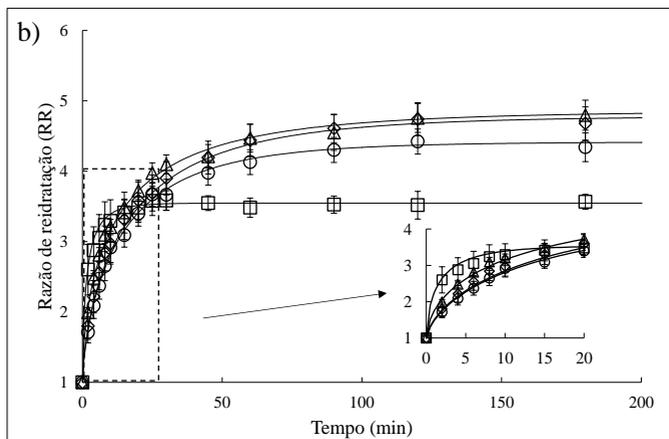
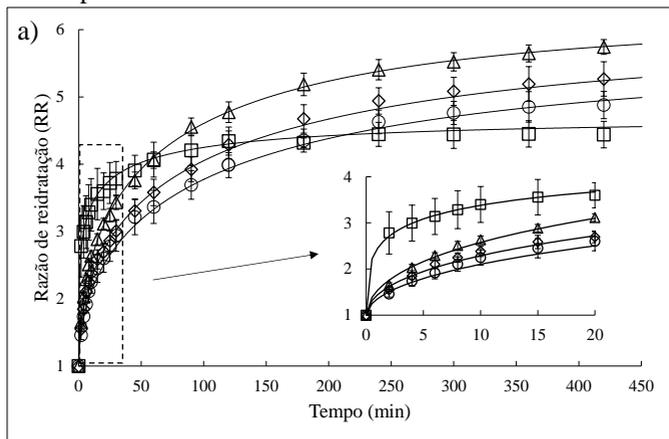


Tabela 3.5 - Parâmetros do modelo exponencial ajustado aos dados experimentais da razão de reidratação.

		AD	FD	VD	KMFD-VD	
Modelo exponencial	Parâmetros 20 °C	RR _e (-)	4,529±0,046	4,137±0,116	4,859±0,105	5,271±0,065
		k (min ⁻¹)	0,027±0,007	0,214±0,088	0,026±0,003	0,031±0,001
		R ²	0,934	0,854	0,922	0,927
		RMSE	0,325	0,335	0,381	0,405
	Parâmetros 80 °C	RR _e (-)	4,221±0,105	3,503±0,027	4,505±0,035	4,453±0,161
		k (min ⁻¹)	0,080±0,004	0,443±0,007	0,071±0,002	0,105±0,011
		R ²	0,973	0,966	0,969	0,954
		RMSE	0,180	0,127	0,210	0,245

Tabela 3.6 - Parâmetros do modelo de Peleg ajustado aos dados experimentais da razão de reidratação.

		AD	FD	VD	KMFD-VD	
Modelo de Peleg	Parâmetros 20 °C	RR _e (-)	5,257±0,020	4,361±0,157	5,682±0,187	5,969±0,091
		k ₁ (min)	13,659±1,619	1,498±0,308	13,010±0,343	8,160±0,251
		k ₂ (· ⁻¹)	0,257±0,000	0,320±0,018	0,238±0,008	0,222±0,003
		R ²	0,987	0,961	0,985	0,986
	RMSE	0,151	0,182	0,175	0,183	
	Parâmetros 80 °C	RR _e (-)	4,641±0,125	3,603±0,012	5,000±0,042	4,870±0,161
		k ₁ (min)	2,784±0,126	0,410±0,044	3,039±0,050	2,027±0,233
		k ₂ (· ⁻¹)	0,278±0,007	0,384±0,003	0,256±0,003	0,266±0,010
R ²		0,994	0,974	0,996	0,994	
RMSE	0,084	0,107	0,078	0,089		

Tabela 3.7 - Parâmetros do modelo de Weibull ajustado aos dados experimentais da razão de reidratação.

		AD	FD	VD	KMFD-VD	
Modelo de Weibull	Parâmetros 20 °C	RR _e (-)	5,561±0,072	4,672±0,255	5,893±0,078	6,168±0,101
		α (-)	0,530±0,019	0,317±0,089	0,505±0,008	0,517±0,004
		β (min)	112,970±8,657	8,728±1,685	104,516±20,845	70,635±2,273
		R ²	0,998	0,997	0,998	0,999
		RMSE	0,053	0,051	0,062	0,052
	Parâmetros 80 °C	RR _e (-)	4,417±0,115	3,547±0,005	4,783±0,029	4,858±0,187
		α (-)	0,701±0,004	0,619±0,091	0,674±0,006	0,581±0,005
		β (min)	14,995±0,807	1,904±0,056	18,047±0,284	14,152±0,410
		R ²	0,995	0,982	0,998	0,997
		RMSE	0,077	0,089	0,052	0,062

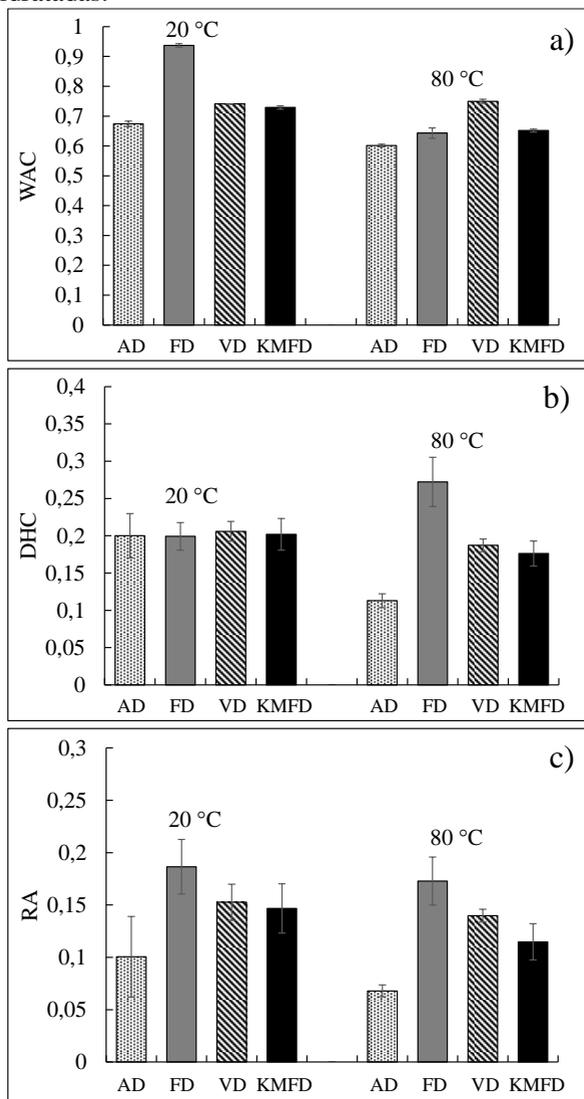
Os modelos de Peleg e Weibull apresentaram bons ajustes ($RMSE \leq 0,183$ e $R^2 \geq 0,961$), sugerindo que, para efeitos práticos, esses dois modelos podem ser utilizados para descrever as cinéticas de reidratação. No entanto, os melhores parâmetros estatísticos foram obtidos para o ajuste do modelo de Weibull aos dados experimentais da RR, então este modelo pode ser considerado o mais preciso para prever as cinéticas de reidratação das amostras de mangas desidratadas neste estudo.

O parâmetro de forma do modelo de Weibull “ α ” pode ser relacionado com a velocidade de absorção de água no início do processo de reidratação, quando os capilares e cavidades próximos a superfície são preenchidos pela água (GARCIA-PASCUAL et al., 2006). Uma razão de absorção de água mais rápida no início da reidratação resulta em menores valores de α . As amostras FD reidratadas a 20 °C, apresentaram menores valores do parâmetro α , seguidas pelas amostras VD e KMFD-VD. Além disso, as amostras FD e KMFD-VD reidratadas a 80 °C apresentaram os menores valores de α , indicando uma absorção de água mais rápida (Figura 3.5b). O valor do parâmetro β representa a constante cinética da equação de Weibull e indica a dificuldade ou facilidade do material de reidratar (MARQUES et al., 2009). As amostras FD apresentaram menores valores do parâmetro β , seguidas pelas amostras KMFD-VD, indicando que essas amostras absorvem água mais facilmente que as amostras AD e FD. Apesar das amostras KMFD-VD apresentarem porosidade similar as amostras FD (Tabela 3.2), a estrutura das mangas KMFD-VD apresenta menor colapso durante a reidratação, o que não afeta sua absorção de água.

Os parâmetros WAC (capacidade de absorção de água), DHC (capacidade de retenção de sólidos) e RA (habilidade de reidratação) foram calculados também para determinar o efeito do método de secagem e temperatura da água na reidratação das amostras (Figura 3.6). Estes parâmetros levam em consideração não apenas a absorção de água, mas também a perda de sólidos solúveis (LEWICKI, 1998). O parâmetro WAC apresentou maiores valores para as amostras reidratadas a 20 °C, indicando que as amostras são capazes de absorver mais água nesta temperatura. As amostras reidratadas a 20 °C são capazes de absorver 67 % a 94 % da umidade removida durante a secagem, enquanto a 80 °C apenas 60 % a 75 % da umidade removida durante a secagem foi absorvida. O índice DHC das mangas variou entre 11 % e 27 %. Os maiores valores foram obtidos para as amostras FD a 80 °C e os menores para as amostras AD a 80 °C. Estes resultados indicam uma baixa

capacidade de reter sólidos das mangas desidratadas, também observadas por Marques et al. (2009).

Figura 3.6 - a) Capacidade de absorção de água (WAC), b) capacidade de retenção de sólidos (DHC) e c) habilidade de reidratação (RA) das frutas desidratadas.



O índice RA está relacionado com os efeitos dos processos de secagem e reidratação na qualidade do produto. As amostras FD apresentaram a maior habilidade de reidratação na temperatura de 20 °C ($0,187\pm 0,026$) e 80 °C ($0,173\pm 0,043$). As amostras VD e KMFD-VD apresentaram resultados similares em ambas as temperaturas de reidratação, enquanto as amostras AD apresentaram os menores valores de RA, para ambas temperaturas.

3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A desidratação por KMFD-VD de mangas permitiu uma remoção rápida da umidade acelerando as taxas iniciais de secagem, alterando a estrutura interna e aumentando a formação da matriz porosa do produto. Essa estrutura aumenta a crocância das mangas desidratadas que é confirmada pela alta porosidade e pelo perfil de textura das amostras KMFD-VD. Além disso, neste estudo foi demonstrado que as amostras KMFD-VD apresentaram habilidade de reidratação e conteúdo de carotenoides similares as amostras desidratadas a vácuo e apresentou menores diferenças de cor quando comparadas as mangas *in natura*. Portanto, o KMFD-VD possibilita a obtenção de mangas crocantes de alta qualidade, em tempos de secagem muito curtos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHANTA, S., OKOS, M. R. Quality changes during drying of food polymers. In A. S. Mujumdar (Ed.), **Drying technology in agriculture and food sciences**, pp. 133–147, Enfield, NH, USA: Science Publishers, Inc, 2000.

AOAC, Official Methods of Analysis, Association of Official Analytical Chemists, Washington, 2005.

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.

CEBALLOS, A. M.; GIRALDO, G. I.; ORREGO, C. E. Effect of freezing rate on quality parameters of freeze dried soursop fruit pulp. **Journal of Food Engineering**, v. 111, p. 360-365, 2012.

DISSA, A. O.; DESMORIEUX, H.; BATHIEBO, J.; KOULIDIATI J. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage. **Journal of Food Engineering**. v. 88, p. 429–437, 2008.

DOYMAZ, I. Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. **Heat and Mass Transfer**, p. 1-11, 2016.

ESEHAGHBEGYI, 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.

GARCIA-PASCUAL, P.; SANJUA´N, N.; MELIS, R.; MULET, A. Morchella esculenta (morel) rehydration process modelling. **Journal of Food Engineering**, 72, 346–353, 2006.

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**. 83, 531–540, 2007.

KHAWAS, P.; DASH, K. K.; DAS, A. J.; DEKA, S. C. Modeling and Optimization of the Process Parameters in Vacuum Drying of Culinary Banana (*Musa ABB*) Slices by Application of Artificial Neural Network and Genetic Algorithm. **Drying Technology**. V. 34, p. 491-503, 2016.

KUROZAWA, L. E.; HUBINGER, M. D.; PARK, K. J. Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. **Journal of Food Engineering**, v. 108, p. 43–50, 2012.

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

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.

LEWICKI, P. P. Some remarks on rehydration of dried foods. **Journal of Food Engineering**. v. 36, p. 81–87, 1998.

LITZ, R. E. **The mango: botany, production and uses**. MPG Books Group. Second edition, 2009.

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.

MARQUES L. G.; PRADO M. M.; FREIRE J. T. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. **LWT - Food Science and Technology**. v. 42, p.1232–1237, 2009.

MEDA, L.; RATTI, C. Rehydration of freeze-dried strawberries at varying temperatures. **Journal of Food Process Engineering**. v. 28, p. 233–246, 2005.

MERCADANTE, A. Z.; RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. Effects of Ripening, Cultivar Differences, and Processing on the Carotenoid Composition of Mango. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 46, p. 128-130, 1998.

MONTEIRO, R.L., CARCIOFI, B.A.M., LAURINDO, J.B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas, **Journal of Food Engineering**, v. 178, p. 1-11. 2016.

PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**. v. 53(4), p. 1216–1219, 1988.

PORCIUNCULA, B. D. A.; SEGURA, L. A.; LAURINDO, J. B. Processes for Controlling the Structure and Texture of Dehydrated Banana. **Drying Technology**, v. 34, p. 167-176, 2016.

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

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. **A Guide to Carotenoid Analysis in Foods**. (1sted) ILSI Press, Washington, D. C, 2001.

ROOS, Y. H. Frozen state transitions in relation to freeze drying. **Journal of Thermal Analysis**. v. 48, P. 535–544, 1997.

SAXENA, A.; MAITY, T.; RAJU, P. S.; BAWA, A. S. Degradation kinetics of colour and total carotenoids in jackfruit (*artocarpus heterophyllus*) bulb slices during hot air drying. **Food and Bioprocess Technology**. v.5, p. 672–679, 2012.

SEREMET, L.; BOTEZ, E.; NISTOR, O.; ANDRONOIU, D. G.; MOCANU, G. Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. **Food Chemistry**, v. 195, p. 104–109, 2016.

SETIADY, D., TANG, J., YOUNCE, F., SWANSON, B.A., RASCO, B.A., CLARY, C.D. Porosity, color, texture and microscopic structure of russet potatoes dried using microwave vacuum, heated air, and freeze-drying. **ASABE Applied Engineering in Agriculture**, 25 (5), p. 719–724, 2009.

TRIBUZI, G.; LAURINDO, J. B. How to Adapt a Lab-Scale Freeze Dryer for Assessing Dehydrating Curves at Different Heating Conditions. **Drying Technology**, v. 32, p. 1119-1124, 2014.

VARNALIS, A. I.; BRENNAN, J. G.; MACDOUGALL, D. B. A proposed mechanism oh high-temperature puffing of potato. Part I. The influence of blanching and drying conditions on the volume of puffed cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 361–367, 2001.

YAN Z., SOUSA-GALLAGHER M. J., OLIVEIRA F. A. R. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 84, p. 430–440, 2008.

YI, J.; ZHOU, L.; BI, J.; LIU, X.; QINQIN, C.; WU, X. Influences of microwave pre-drying and explosion puffing drying induced cell wall

polysaccharide modification on physicochemical properties, texture, microstructure and rehydration of pitaya fruit chips. **LWT - Food Science and Technology**, v. 70, p. 271–279, 2016.

ZIELINSKA, M.; MARKOWSKI, M. The influence of microwave-assisted drying techniques on the rehydration behavior of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.). **Food Chemistry**, v. 196, p. 1188–1196, 2016.

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.

ZOU K., TENG J., HUANG L., DAÍ X., WEI B. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying. **LWT - Food Science and Technology**, v. 51, p. 253-259, 2013.

4 EFEITO DA SORÇÃO DE ÁGUA NA TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MANGAS DESIDRATADAS POR DIFERENTES MÉTODOS

4.1 INTRODUÇÃO

A manga é uma das mais antigas e importantes frutas e seu consumo tem mostrado exercer benefícios à saúde devido a sua alta qualidade nutricional (alto conteúdo de carotenoides, vitaminas e compostos fenólicos). Apesar das mangas serem utilizadas em diversos produtos (sucos, geleias, purês, fatias enlatadas, produtos desidratados, entre outros), apenas 0,22 % das mangas cultivadas no mundo são processadas (YAHIA, 2011). Os *snacks* crocantes de frutas e hortaliças desidratadas são produtos alternativos interessantes e saudáveis que podem aumentar as possibilidades de processamento e diminuir as perdas pós-colheita.

Atualmente, diversos processos de desidratação de frutas e hortaliças estão sendo estudados com o objetivo de produzir *snacks* crocantes com menores custos operacionais e tempos reduzidos em relação aos produtos liofilizados. Processos de secagem como o HTST (*high-temperature short-time*) (HOFSETZ et al., 2007), *explosion puffing* (ZOU et al., 2013), *instant controlled pressure drop* (DIC) (LOUKA e ALLAF, 2002), *multi-flash drying* (MFD) (LAURINDO et al., 2011; ZOTARELLI et al., 2012; PORCIUNCULA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2016) são processos capazes de produzir frutas e hortaliças desidratadas com baixo teor de umidade e atividade de água em tempos de secagem relativamente curtos, agregando valor e prolongando a vida útil destes produtos.

Para manter a qualidade durante o armazenamento, o estado físico-químico do produto desidratado deve ser mantido pelo maior tempo possível. Qualquer mudança em sua estrutura causa alterações não apenas em atributos sensoriais, mas também tem outras consequências como um aumento da taxa de reações químicas, danos estruturais e mudança na característica microbiológica (BHANDARI e HOWES, 1999). A umidade relativa do ambiente de armazenamento desempenha um papel importante na estabilidade de frutas desidratadas, devido a alterações em suas propriedades térmicas e físico-químicas, que estão relacionadas a mudanças no conteúdo de umidade, variação do volume da fruta, oxidação de pigmentos e alterações na temperatura de transição vítrea (T_g). A água adsorvida pelo alimento atua como plastificante,

umentando a mobilidade das cadeias poliméricas, e portanto, alterações no estado físico da matriz dos alimentos pode modificar a capacidade de sorção e produzir alterações nas propriedades visuais e termofísicas (VÁSQUEZ et al., 2013).

Para prever a estabilidade de alimentos desidratados e calcular as mudanças de conteúdo de umidade durante o armazenamento, isotermas de sorção de umidade são determinadas. No entanto, para se obter uma melhor compreensão sobre os fatores que regem a estabilidade dos alimentos, é importante entender a relação entre a atividade da água e a transição vítrea. As relações entre estes conceitos podem ser muito complexas (características do produto e a estabilidade a serem estudados) (BAZARDEH e ESMAILI, 2014). Para identificar a estabilidade de frutas desidratadas, o uso do diagrama de estado baseado nos modelos de sorção de Gordon-Taylor e GAB (Guggenheim-Andersen-de Boer) tem sido proposto (VÁSQUEZ et al., 2013; BAZARDEH e ESMAILI, 2014). A temperatura de transição vítrea (T_g) é principalmente uma função do teor de umidade, peso molecular e da natureza de uma dada substância. Quando um alimento desidratado sofre a transição vítrea, ele muda de um estado vítreo quebradiço altamente viscoso para um estado mais elástico (*rubbery state*) (ROOS, 1995).

O estudo da estabilidade das frutas e hortaliças desidratadas crocantes é essencial, pois para estes produtos a textura é uma propriedade muito importante, e pode ser afetada pela sorção de umidade. O aumento do conteúdo de umidade pode resultar em perda da crocância, devido ao efeito plastificante da água, que afeta as propriedades mecânicas do produto, tornando-o elástico e/ou macio.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da sorção de água na temperatura de transição vítrea e nas propriedades mecânicas das amostras de mangas desidratadas por *conductive multi-flah drying* seguido de secagem a vácuo (KMGD-VD), secagem convectiva, secagem a vácuo e liofilização.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Seleção e preparação das amostras

As mangas da variedade Tommy Atkins (*Mangífera indica* L.) foram selecionadas como citado no item 2.2.1.1. As mangas selecionadas (conteúdo de sólidos solúveis totais de $13,9 \pm 0,7$ °Brix e força de penetração de $4,9 \pm 1,9$ N) foram lavadas, descascadas e fatiadas com espessura de 5 mm em direção paralela às fibras.

4.2.2 Secagem

Após a preparação, as amostras foram submetidas a diferentes métodos de secagem: secagem convectiva com ar quente (AD), liofilização (FD), secagem a vácuo (VD) e *Conductive multi-flash drying* seguido de secagem a vácuo (KMFD-VD).

4.2.2.1 Secagem convectiva (AD)

Aproximadamente 400 g de amostras de manga foram secas em estufa convectiva (TE 394/2, TECNAL, Ourinhos, Brasil) por 12 h a 60 °C, conforme a metodologia descrita no item 3.2.2.1.

4.2.2.2 Liofilização (FD)

A secagem das amostras de manga por liofilização foi realizada utilizando um liofilizador comercial (Liotop, L101, São Carlos, Brasil) por 16 h, conforme a metodologia descrita no item 3.2.2.2. Aproximadamente 400g de amostras foram utilizadas.

4.2.2.3 Secagem a vácuo (VD)

Aproximadamente 400 g de amostras de manga foram secas em estufa a vácuo (440-DE, Ethik Technology, Vargem Grande Paulista, Brasil) a 60 °C e 35 mbar durante 8 h, conforme a metodologia descrita no item 3.2.2.3.

4.2.2.4 *Conductive multi-flash drying* seguido de secagem a vácuo (KMFD-VD)

Cerca de 400 g de amostra de manga foram secas por KMFD-VD utilizando a metodologia descrita no item 3.2.2.4, totalizando 2,25 h de processo.

4.2.3 Isotermas de sorção de umidade

Isotermas de sorção de umidade foram determinadas pelo método gravimétrico estático. As amostras de manga desidratadas pelos diferentes métodos de secagem (AD, FD, VD e KMFD-VD) foram liofilizadas por 24 h, para a retirada da umidade residual, pesadas em

potes plásticos (aproximadamente 0,6 g) e acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados contendo nove soluções saturadas de sais (Tabela 4.1), a 25 °C (GREENSPAN, 1997).

Os potes contendo as amostras foram pesados em uma balança analítica (Shimadzu, Modelo - AY220, Filipinas) em intervalos regulares de tempo até atingir o equilíbrio (aproximadamente 10 semanas). Após o equilíbrio, o conteúdo de umidade das amostras foi determinado em estufa a vácuo (TE-395, TECNAL, Piracicaba, Brasil) a 70 °C.

Tabela 4.1 - Atividade de água de soluções salinas saturadas a temperatura de 25 °C.

Solução Salina Saturada	Atividade de água (a_w) (25°C)
Cloreto de lítio	0,113
Acetato de potássio	0,225
Cloreto de magnésio	0,327
Carbonato de potássio	0,438
Nitrato de magnésio	0,529
Nitrato de sódio	0,643
Cloreto de sódio	0,753
Cloreto de potássio	0,843
Cloreto de bário	0,903

O modelo de GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) foi ajustado aos dados das isotermas de sorção de umidade das amostras de manga. Esse modelo é expresso pela Equação (4.1):

$$X_{eq} = \frac{(C-1).K.a_w.X_m}{1+(C-1).K.a_w} + \frac{K.a_w.X_m}{1-K.a_w} \quad (4.1)$$

em que X_{eq} é a umidade de equilíbrio (em base seca, b.s.), X_m é a umidade (b.s.) absorvida na monocamada e C é a constante de Guggenheim (que pode ser relacionada com o calor total de sorção na primeira camada) e K é constante do modelo (que pode ser relacionada com o calor total de sorção de água multicamada).

Os parâmetros da equação de GAB foram estimados usando regressão não linear, utilizando o método dos mínimos quadrados com o *software* MATLAB (R2010a). A adequação do modelo aos dados experimentais foi avaliada utilizando o coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

4.2.4 Temperatura de transição vítrea (T_g)

Após atingirem o equilíbrio, as amostras acondicionadas a 25°C em diferentes umidades relativas foram colocadas em panelinhas de alumínio com volume de 40 µL para determinação da temperatura de transição vítrea. Esses recipientes foram hermeticamente fechados e então submetidos à análise de calorimetria diferencial de varredura (DSC) (Perkin Elmer, modelo Jade DSC, Waltham, EUA). A calibração do equipamento foi realizada com índio ($T_{\text{fusão}} = 156,6$ °C) e zinco ($T_{\text{fusão}} = 419,5$ °C), utilizando nitrogênio com vazão constante de 25 mL min⁻¹.

Inicialmente, as amostras foram resfriadas até -70 °C, e em seguida, aquecidas até 120 °C, à taxa constante de 10 °C min⁻¹. As análises foram realizadas em duplicata e os dados foram analisados utilizando o *software* Pyris DSC (Perkin Elmer, Waltham, EUA). O efeito plastificante da água na transição vítrea foi descrito utilizando o modelo de Gordon-Taylor (GORDON TAYLOR, 1952), segundo a Equação 4.2:

$$T_g = \frac{w_s T_{gs} + k w_w T_{gw}}{w_s + k w_w} \quad (4.2)$$

em que, T_g , T_{gs} , T_{gw} são as temperaturas de transição vítrea da mistura, do sólido puro e da água (°C), respectivamente; w_w e w_s são as frações mássicas de água e de sólidos na mistura (g água ou g sólidos/g total); e k é a constante do modelo de Gordon-Taylor. A T_{gw} foi considerada como sendo -135 °C (VÁSQUEZ et al., 2013).

Os parâmetros da equação de Gordon-Taylor foram estimados usando regressão não linear, utilizando o método dos mínimos quadrados com o *software* MATLAB (R2010a). A adequação do modelo aos dados experimentais foi avaliada utilizando o coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

Um modelo linear (Equação 4.3) foi ajustado aos dados de temperatura de transição vítrea e atividade de água, como proposto por Roos (1987).

$$T_g = Y a_w + Z \quad (4.3)$$

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

Os parâmetros da equação de Ross foram estimados usando regressão linear com o *software* Microsoft Excel 2013. A adequação do modelo aos dados experimentais foi avaliada utilizando-se o coeficiente de determinação (R^2) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

4.2.5 Propriedades mecânicas

Para a realização dos testes de penetração das amostras de manga desidratadas e acondicionadas em diferentes umidades relativas, foi utilizado um texturômetro com uma célula de carga de 25 kg (Stable Micro System, Modelo - TA-XT2-Plus, Reino Unido), uma *probe* cilíndrica de 2 mm de diâmetro, velocidade de teste de 1 mm s^{-1} , 500 Hz e deformação de 70 % da espessura inicial da amostra. Após atingirem o equilíbrio, 9 amostras acondicionadas a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ em umidades relativas entre 11,3 e 64,3 % foram removidas dos recipientes hermeticamente fechados e 3 perfurações foram realizadas em cada amostra, em diferentes regiões. Os testes mecânicos foram realizados utilizando somente as amostras desidratadas por KMFD-VD. Os experimentos foram realizados em uma sala à temperatura de $23,6 \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $50,8 \pm 1,3 \%$. Durante o teste, além das curvas força-deformação, foi registrado o número de picos de força, pois as oscilações de força durante o teste de penetração estão relacionadas com uma potencial crocância das frutas (LAURINDO e PELEG, 2008).

Os dados de força-deformação sofreram um ajuste não paramétrico baseado em uma aproximação de um polinômio de segunda ordem, para separar o comportamento global e as oscilações de força (SAVITZKY e GOLAY, 1964). Os resíduos normalizados foram calculados pela diferença entre os dados de força experimentais e ajustados (LAURINDO e PELEG, 2008). Os cálculos foram realizados com o *software* MATLAB (R2010a), utilizando a função *sgolayfilt*. A suavização foi realizada levando em conta a forma geral das curvas força-deformação. Uma função polinomial de segunda ordem e um conjunto de 149 pontos experimentais foram escolhidos na função *sgolayfilt* no *software* Matlab para todos os ajustes.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Isotermas de sorção de umidade

As amostras de manga utilizadas neste estudo apresentaram teor de umidade de $6,493 \pm 0,192 \text{ g g}^{-1}$ (em base seca, b.s.) e atividade de água de $0,991 \pm 0,002$. Após a secagem, as amostras desidratadas por AD e VD apresentaram os maiores valores de teor de umidade e atividade de água. As amostras desidratadas por AD apresentaram teor de umidade de $0,024 \pm 0,003 \text{ g g}^{-1}$ (b.s.) e a_w de $0,250 \pm 0,001$. As amostras desidratadas por VD apresentaram teor de umidade de $0,026 \pm 0,001 \text{ g g}^{-1}$ (b.s.) e a_w de

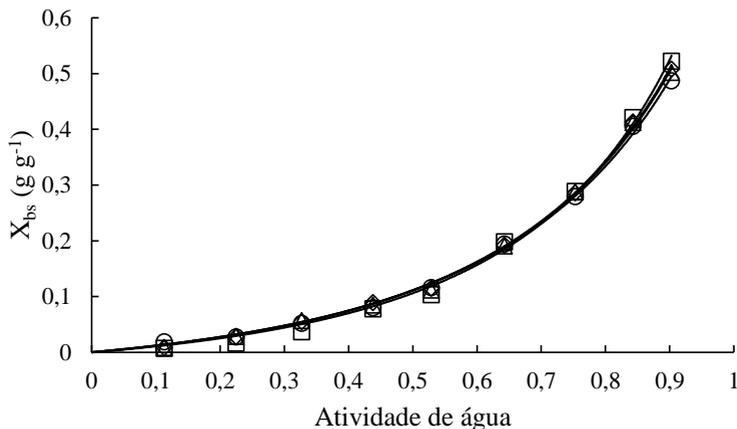
0,229±0,006. As amostras liofilizadas apresentaram teor de umidade de 0,021±0,001 g g⁻¹ (b.s.) e a_w de 0,196±0,002 e as amostras desidratadas por KMFD-VD apresentaram teor de umidade de 0,014±0,004 g g⁻¹ (b.s.) e a_w de 0,223±0,001. Os dados de umidade de equilíbrio das amostras de manga desidratadas pelos diferentes métodos de secagem (AD, FD, VD e KMFD-VD) e acondicionadas em nove diferentes umidades relativas estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Umidades de equilíbrio das amostras de manga desidratadas por diferentes processos de secagem acondicionadas em diferentes umidades relativas (UR).

Atividade de água	Umidade de Equilíbrio (g g ⁻¹)			
	AD	FD	VD	KMFD-VD
0,113	0,019±0,002	0,008±0,001	0,009±0,000	0,009±0,001
0,225	0,028±0,000	0,017±0,001	0,028±0,002	0,029±0,004
0,327	0,052±0,005	0,037±0,012	0,055±0,001	0,057±0,002
0,438	0,080±0,010	0,078±0,002	0,090±0,002	0,085±0,002
0,529	0,116±0,003	0,104±0,003	0,116±0,003	0,112±0,003
0,643	0,194±0,002	0,199±0,006	0,192±0,005	0,191±0,002
0,753	0,280±0,002	0,289±0,002	0,286±0,005	0,288±0,003
0,843	0,405±0,000	0,421±0,001	0,414±0,004	0,412±0,002
0,903	0,487±0,001	0,523±0,007	0,508±0,012	0,502±0,002

Na Figura 4.1 estão apresentadas as isotermas de sorção de umidade das amostras de manga desidratadas pelos diferentes métodos de secagem (AD, FD, VD e KMFD-VD) e os ajustes do modelo de GAB aos dados experimentais (linhas contínuas). De acordo com a classificação de Brunauer et al. (1938), as isotermas de sorção de umidade obtidas para as amostras de manga desidratadas são do tipo III. Zhao et al (2015) observou o mesmo comportamento das isotermas de sorção de umidade ao estudar a sorção de água de pós de polpa de manga liofilizada e atribuiu este comportamento ao alto teor de frutose da fruta, uma vez que as isotermas do tipo III são típicas de alimentos com grande conteúdo de açúcares e sais. As amostras desidratadas pelos diferentes métodos exibiram um comportamento de sorção de umidade similar.

Figura 4.1 - Isotermas de sorção de umidade das amostras de manga desidratadas pelos diferentes métodos. Dados experimentais: AD (○), FD (□), VD (◇) e KMFD-VD (△). O modelo de GAB ajustado as curvas está representado por linhas contínuas.



O modelo de Guggenheim, Anderson e de Boer (GAB) foi ajustado aos dados experimentais de isoterma de sorção das mangas desidratadas (Figura 4.1). Os parâmetros do modelo e os coeficientes estatísticos estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Parâmetros estimados do modelo de GAB para os dados experimentais das amostras de manga desidratada por diferentes processos de secagem acondicionadas em diferentes UR.

Parâmetros	Método de secagem			
	AD	FD	VD	KMFD-VD
X_m (b.s.)	0,127	0,117	0,125	0,125
K	1,256	1,155	1,237	1,237
C	0,662	0,702	0,673	0,672
R^2	0,998	0,997	0,999	0,999
RMSE	0,007	0,012	0,006	0,007

O modelo de GAB apresentou bom ajuste ($RMSE \leq 0,012$ e $R^2 \geq 0,997$) aos dados experimentais de sorção de umidade para as diferentes amostras de manga desidratadas. Os valores estimados do teor de umidade da monocamada (X_m) para as amostras de manga desidratadas estão na faixa de 0,117-0,127 g g⁻¹ (b.s.). Os menores valores de X_m encontrados foram para as amostras desidratadas por FD (0,117 g g⁻¹ b.s.), seguida das amostras desidratadas por KMFD-VD (0,125 g g⁻¹ b.s.), por

VD (0,125 g g⁻¹ b.s.) e AD (0,127 g g⁻¹ b.s.). Os valores obtidos são próximos aos encontrados por Moraga et al. (2011) para fatias de banana (0,081 g g⁻¹ b.s.) e maçã (0,086 g g⁻¹ b.s.) liofilizadas e dos encontrados por Zhao et al. (2015) para polpa de manga liofilizada (0,122 g g⁻¹ b.s.). A umidade da monocamada molecular (X_m) indica a quantidade de água que está fortemente adsorvida no alimento e, portanto, é um parâmetro importante para assegurar a estabilidade física e química de produtos desidratados (RAHMAN, 2008). O parâmetro C é uma constante relacionada com o calor total de sorção na primeira camada (VÁSQUEZ et al., 2013). Os valores obtidos do parâmetro C foram menores para as amostras AD (0,662), indicando que há uma baixa energia de absorção da monocamada para estas amostras. Os valores do parâmetro K das amostras apresentaram pequenas variações, todas próximas de 1. Este parâmetro está relacionado com o calor total de sorção de água multicamada (MORAGA et al., 2011). As amostras AD apresentaram o maior valor para este parâmetro (1,256), seguidas pelas amostras KMFD-VD (1,237), VD (1,237) e pelas amostras FD (1,155).

4.3.2 Temperatura de transição vítrea (T_g)

A variação da temperatura de transição vítrea em relação a elevação do conteúdo de umidade (base úmida, b.u.) das amostras desidratadas está representada na Figura 4.2. A temperatura de transição vítrea diminui com o aumento da umidade das amostras. Isto ocorre quando um alimento é submetido a um ambiente de umidade relativa elevada e adsorve água. A água é o principal solvente e plastificante dos alimentos e quando adsorvida pelo produto causa um aumento da mobilidade molecular e aumento do volume livre, diminuindo a temperatura de transição vítrea (ROOS e DRUSCH, 2015). O modelo de Gordon-Taylor foi ajustado aos dados experimentais da temperatura de transição vítrea em relação à umidade das amostras (Figura 4.2). Os resultados do ajuste não linear dos parâmetros do modelo e os coeficientes estatísticos são apresentados na Tabela 4.4. Este modelo considera os alimentos como misturas binárias de sólidos e água, e mostrou ser um preditor confiável das temperaturas de transição vítrea de açúcares em vários teores de água e vem sendo utilizado em várias amostras de frutas (ROOS e DRUSCH, 2015).

Figura 4.2 - Temperatura de transição vítrea em função do teor de umidade (base úmida, b. u.) das amostras de manga desidratadas e acondicionadas em diferentes UR. AD (\circ), FD (\square), VD (\diamond) e KMFD-VD (Δ). O modelo de Gordon-Taylor ajustado as curvas está representado por linhas contínuas.

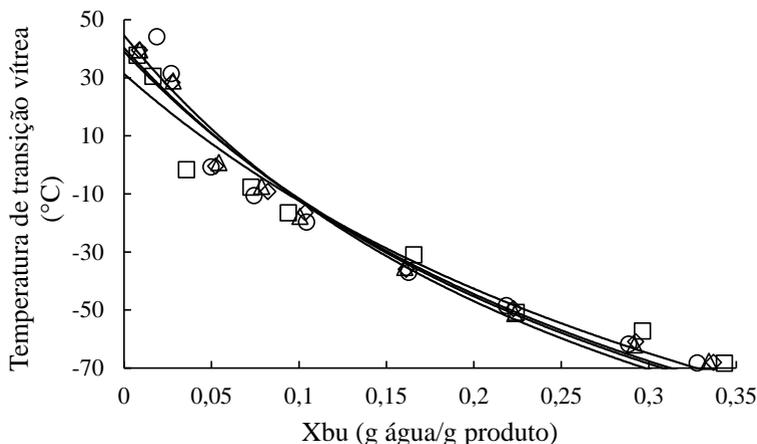


Tabela 4.4 - Parâmetros estimados do modelo de Gordon-Taylor e Ross para manga desidratada por diferentes processos de secagem.

		AD	FD	VD	KMFD-VD
Parâmetros do modelo de Gordon-Taylor	Tg (°C)	44,679	31,371	39,079	40,311
	k	4,165	3,209	3,696	3,820
	R^2	0,950	0,951	0,976	0,978
	RMSE	9,379	8,842	6,335	6,103
Parâmetros do modelo de Ross	Y	-140,50	-133,35	-135,88	-137,67
	Z	55,54	52,44	52,92	53,90
	R^2	0,982	0,982	0,988	0,990
	RMSE	4,992	4,755	3,918	3,580

O modelo de Gordon-Taylor foi capaz de representar a variação da temperatura de transição vítrea com o aumento da umidade das amostras de manga desidratadas pelos diferentes processos (RMSE \leq 9,379 e $R^2 \geq$ 0,950). Os valores encontrados para o parâmetro k , estão na faixa de 3,209 - 4,165 para todos os processos de secagem estudados. O parâmetro k influencia o grau de curvatura da T_g e está relacionado com as forças de interação entre os componentes e a susceptibilidade do sólido interagir com a água. Quanto maior o valor de

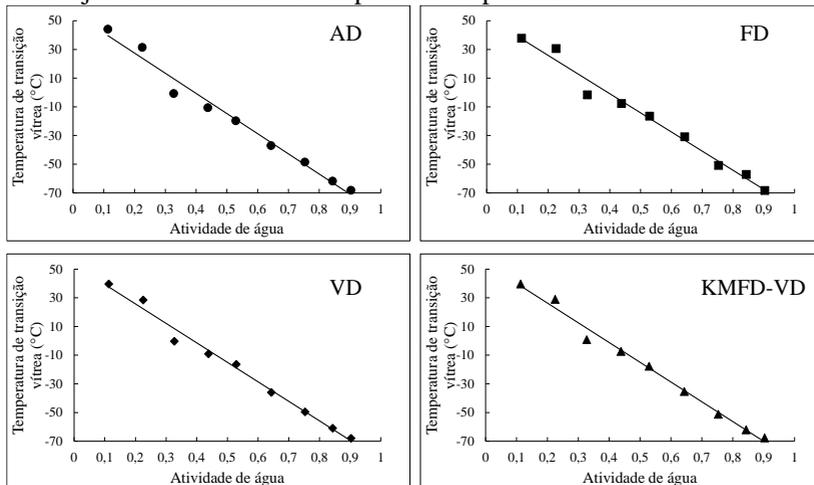
k , maior a interação com a água. As amostras desidratadas por AD apresentaram a maior interação com a água ($k = 4,165$), seguidas pelas amostras KMFD-VD ($k = 3,820$) e pelas amostras VD ($k = 3,696$). Por outro lado, baixos valores foram encontrados para as amostras FD ($k = 3,209$), que apresentam uma baixa interação do sólido com a água, o que pode estar relacionado com a energia de sorção de água multicamada das amostras FD (Tabela 4.3). Esses valores foram semelhantes aos valores reportados na literatura por Vásquez et al. (2013), para suco de mirtilo liofilizado (2,44-4,62) e por Moraga et al. (2011), para fatias de banana (6,121) e maçã (3,472) liofilizadas.

Os valores encontrados para a T_g das amostras de manga desidratadas variaram entre 31,371 - 44,679 °C para os métodos de secagem estudados. As amostras de manga possuem um elevado conteúdo de açúcares, que apresentam valores de T_g relativamente baixos. De acordo com Roos e Karel (1991), a glicose tem valores de temperatura de transição vítrea de 31 °C, a sacarose de 62 °C e a frutose de 5 °C. Estes açúcares são comumente encontrados em frutas e estão relacionados com as temperaturas de transição vítrea encontradas para as amostras de manga desidratadas.

A relação entre os valores de temperatura de transição vítrea e atividade de água apresentam uma linearidade que proporciona um método simples para a previsão dos efeitos da umidade relativa na T_g de alimentos desidratados (Figura 4.3). O modelo linear proposto por Roos (1987) foi ajustado aos dados experimentais da T_g em relação a atividade de água das amostras (Figura 3.4). Os resultados do ajuste dos parâmetros do modelo e os coeficientes estatísticos são apresentados na Tabela 4.4.

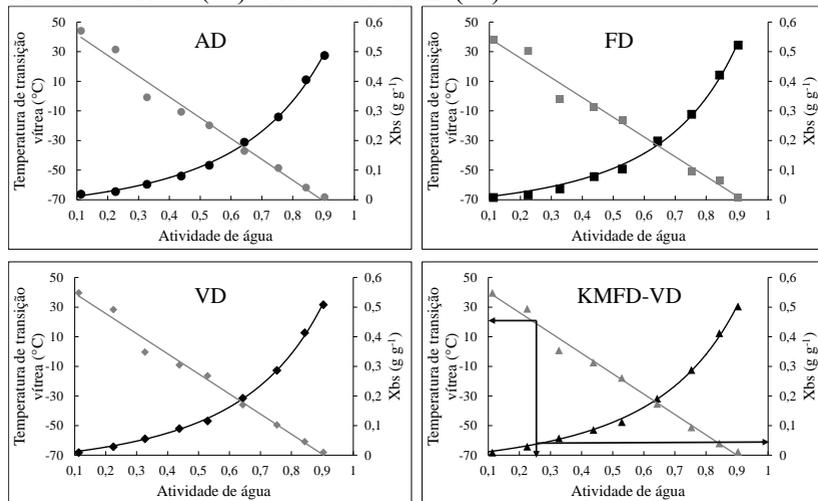
A temperatura de transição vítrea apresentou uma redução com o aumento da atividade de água. A relação linear entre T_g e a_w é extremamente útil no desenvolvimento de produtos e para o estabelecimento dos requisitos das condições de armazenamento e materiais de embalagem. Além disso, a esta relação linear entre T_g e a_w representa um método rápido e razoavelmente confiável para localizar a T_g de materiais armazenados em diversas condições, antes de se obter a verificação experimental (ROOS e DRUSCH, 2015). A linearidade dos dados é confirmada pelos coeficientes estatísticos obtidos ($RMSE \leq 4,992$ e $R^2 \geq 0,982$). Um comportamento semelhante dos dados de temperatura de transição vítrea e a_w foi apresentado por Roos (1987), o autor observou uma relação linear entre a T_g e a_w para morangos liofilizados em uma faixa de a_w entre 0,1-0,8. Moraga, Martínez-Navarrete e Chiralt (2006) ao avaliarem kiwis liofilizados em uma faixa de a_w entre 0,1-0,7 também observaram comportamento linear entre os dados de T_g e a_w .

Figura 4.3 - Temperatura de transição vítrea em função da atividade de água das amostras de manga desidratadas por secagem convectiva (AD), liofilização (FD), secagem a vácuo (VD) e KMFD-VD. O modelo de Roos ajustado às curvas está representado por linhas contínuas.



Na Figura 4.4, uma combinação da adsorção de água (modelo de GAB) e da relação entre T_g e a_w (equação de Roos) das amostras de manga desidratadas pelos diferentes métodos (AD, FD, VD e KMFD-VD) foi representada graficamente. Este diagrama permite obter os valores críticos de umidade e atividade de água em que ocorre a transição vítrea, a uma determinada temperatura (ROOS e DRUSCH, 2015).

Figura 4.4 - Temperatura de transição vítrea (T_g) em função da atividade de água (a_w) e conteúdo de umidade (b.s.), a 25 °C, das amostras de manga desidratadas por AD, FD, VD e KMFD-VD. Dados experimentais de T_g (●, ■, ◆, ▲). Dados experimentais de umidade de equilíbrio (●, ■, ◆, ▲). Modelo de Roos (—). Modelo de GAB (—).



À temperatura de 20 °C, as atividades de água calculadas a partir do modelo de Ross para as amostras de manga desidratadas pelos diferentes métodos apresentaram valores similares. As amostras desidratadas por AD apresentaram valores de a_w de 0,253. Estes valores foram superiores aos encontrados para as amostras desidratadas por FD (0,243), por VD (0,242) e por KMFD-VD (0,246). A partir dos diagramas, utilizando os respectivos valores de a_w , pode-se estimar o valor crítico de umidade para cada processo estudado. Para as amostras AD o valor crítico de umidade calculado foi de 0,038 g g⁻¹ (b.s.). As amostras desidratadas por KMFD-VD apresentaram valor crítico de umidade de 0,036 g g⁻¹ (b.s.), ligeiramente superiores aos determinados para as amostras VD (0,035 g g⁻¹ b.s.) e FD (0,033 g g⁻¹ b.s.). Os valores de atividade de água e de umidade críticos são normalmente usados para estimar as condições de armazenamento mais estáveis para determinado produto desidratado (VÁSQUEZ et al., 2013). Moraga et al. (2011), ao estudar o comportamento de fatias de banana e maçã liofilizadas e armazenadas em diferentes umidades relativas, encontrou valores próximos para os valores de umidade críticos a 20 °C (banana-0,044 g g⁻¹ b.s. e maçãs-0,010 g g⁻¹ b.s.). Portanto, as amostras desidratadas por

KMFD-VD, por exemplo, devem ser armazenadas à atividade de água de aproximadamente 0,250 para manterem suas propriedades físicas e estruturais. Nessas condições de armazenamento a umidade crítica das amostras KMFD-VD será de 0,036 g g⁻¹ (b.s.).

4.3.3 Propriedades mecânicas

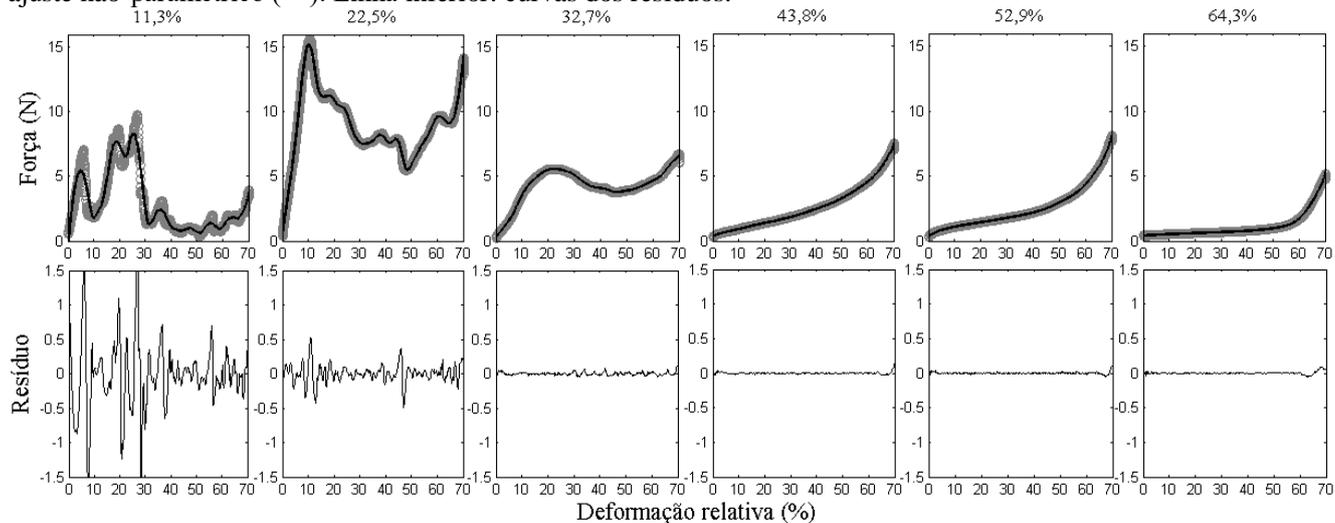
As propriedades mecânicas das amostras desidratadas por KMFD-VD e armazenadas em umidades relativas entre 11,3 e 64,3 % a 25 °C foram determinadas. Os dados experimentais de força-deformação, as curvas suavizadas e a curva dos resíduos estão apresentados na Figura 4.5, em que as curvas suavizadas representam o comportamento global da força-deformação (GONZALEZ MARTINEZ et al., 2003; LAURINDO e PELEG, 2008). As amostras armazenadas em umidades relativas inferiores a 30 % apresentam curvas força-deformação irregulares, com grande número de picos e maiores amplitudes destes picos. Esses dados podem ser confirmados através da Tabela 4.5, que apresenta os valores registrados do número de picos durante os testes de penetração.

Tabela 4.5 - Número de picos de força registrado no teste de penetração das amostras de mangas desidratadas por KMFD-VD acondicionadas em diferentes umidades relativas.

Umidade Relativa (%)	11,3	22,5	32,7	43,8	52,9	64,3
Picos de força	25±4	13±3	3±1	1±0	1±0	1±0

Curvas força-deformação irregulares são um indicativo de produtos crocantes (LAURINDO e PELEG, 2008). As amostras acondicionadas em atividades de água inferiores a 0,3 estão no estado vítreo. No estado vítreo, as amostras perdem a capacidade de deformação e tornam-se frágeis e quebradiças (BOUDHRIOUA et al., 2002). Quando as amostras adsorvem água (acondicionadas em $a_w > 0,3$) passam a um estado elástico (*rubbery state*) e se tornam macias, evidenciando o efeito de plastificação da água. A partir deste momento, a quantidade de picos de força e as amplitudes diminuem (Figura 4.5 e Tabela 4.5). Portanto, importantes alterações nas propriedades mecânicas são associadas com a adsorção de umidade e com a transição vítrea, e ambas podem ser consideradas como meios de prevenção de alterações nas propriedades de crocância de frutas desidratadas.

Figura 4.5 - Amplitude da oscilação da força a partir de resultados representativos dos testes de penetração das amostras KMFD-VD acondicionadas em umidade relativa entre 11,3 e 64,3 %. Linha superior: curvas força-deformação (○) e ajuste não-paramétrico (—). Linha inferior: curvas dos resíduos.



4.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As relações entre a temperatura de transição vítrea, atividade de água e umidade permitem definir as condições adequadas de processamento e armazenamento das mangas desidratadas pelos diferentes métodos. As mangas desidratadas por KMFD-VD acondicionadas em umidades relativas inferiores a 0,3 a 25 °C se apresentaram no estado vítreo, com características de produtos potencialmente crocantes. A adsorção de água causou um efeito plastificante, diminuindo a temperatura de transição vítrea e alterando as propriedades mecânicas das frutas. Portanto, os resultados gerados fornecem informações importantes para prever a estabilidade e textura de mangas desidratadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZARDEH, M. E.; ESMAILI, M. Sorption isotherm and state diagram in evaluating storage stability for sultana raisins. **Journal of Stored Products Research**. v. 59, p. 140-145, 2014.

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.

BOUDHRIUA, N., MICHON, C., CUVELIER, G., BONAZZI, C. Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying. **Journal of Food Engineering**. v. 55 (2), p. 115–121, 2002.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemists'Society**, 60, 309-319. 1938.

GONZALEZ MARTINEZ C., CORRADINI, M.G., PELEG, M. Effect of moisture on the mechanical properties of pork rind (“chicharon”). **Food Sci. Technol. Int**. v. 9, p. 249–255, 2003.

GORDON, M.; TAYLOR, J. S. Ideal copolymers and the second-order transitions of syntetic rubbers. I. Non-crystalline copolymers. **Journal of Applied Chemistry**, 2 (9), p. 493–500, 1952.

GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **Journal of Research of the National Bureau of Standards – Physics and Chemistry**. v. 81, p. 89–96, 1977.

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**. 83, 531–540, 2007.

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

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.

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.

MONTEIRO, R.L., CARCIOFI, B.A.M., LAURINDO, J.B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas, **Journal of Food Engineering**, v. 178, p. 1-11. 2016.

MORAGA, G.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N.; CHIRALT, A. Water sorption isotherms and phase transitions in kiwifruit. **Journal of Food Engineering**. v. 72, p. 147–156, 2006.

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.

PORCIUNCULA, B. D. A.; SEGURA, L. A.; LAURINDO, J. B. Processes for Controlling the Structure and Texture of Dehydrated Banana. **Drying Technology**, v. 34, p. 167-176, 2016.

RAHMAN, S. **Food Properties Handbook**. CRC Press. 2008.

ROOS, Y. Characterization of food polymers using state diagrams. **Journal of Food Engineering**, v. 24, p. 339–360, 1995.

ROOS, Y. H.; DRUSCH, S. **Phase transitions in foods** (2nd ed.). San Diego: Academic Press, Inc. 2015.

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.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Anal. Chem.** 36, 1627-1639, 1964.

VÁSQUEZ, C.; DÍAZ-CALDERÓN, P.; ENRIONE, J.; MATIACEVICH, S. State diagram, sorption isotherm and color of blueberries as a function of water content. **Thermochemica Acta**, v. 570, p. 8-15, 2013.

YAHIA, E. M. **Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits**. Volume 3: Cocona to mango. Woodhead Publishing Limited, 2011.

ZHAO, J. H.; LIU, F.; WEN, X.; XIAO, H. W.; NI, Y. Y. State diagram for freeze-dried mango: Freezing curve, glass transition line and maximal-freeze-concentration condition. **Journal of Food Engineering**, v. 157, p. 49–56, 2015.

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.

5 CONCLUSÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

As diferentes condições de processo empregadas possibilitaram a obtenção de mangas desidratadas com diferentes propriedades estruturais e de textura. As frutas apresentam maiores poros e uma tendência a uma maior porosidade quando maiores taxas de redução da pressão são aplicadas durante os pulsos de vácuo. A aplicação de três pulsos de vácuo seguidos por uma secagem a vácuo convencional (KMFD-VD) mostrou ser uma alternativa viável para a produção de frutas desidratadas crocantes. Reduzindo o número de ciclos de aquecimento-pulso de vácuo aplicados e conseqüentemente o tempo de processo, é possível obter mangas com textura macia que podem ser uma alternativa as frutas crocantes.

As altas taxas de secagem durante o período inicial de processo devido ao rápido aquecimento e a aplicação dos pulsos de vácuo reduziram o tempo de secagem de mangas em 86 % em comparação ao processo de liofilização. As mangas desidratadas por KMFD-VD apresentaram perfil de textura mais crocantes em comparação aos demais processos estudados e menor escurecimento em relação a fruta *in natura*. Os modelos de Peleg e Weibull apresentaram bons ajustes aos dados experimentais de reidratação, podendo ambos serem utilizados para prever a razão de reidratação das frutas. A capacidade de reidratação e conteúdo de carotenoides das mangas secas por KMFD-VD foram similares aos obtidos para as amostras desidratadas a vácuo.

As relações entre umidade, atividade de água e temperatura de transição vítrea provaram ser eficientes na determinação dos parâmetros críticos de armazenamento das frutas desidratadas. Os modelos de GAB, Gordon-Taylor e Roos são capazes de prever estas relações e permitem a elaboração de diagramas que são úteis para estabelecer os parâmetros críticos. Em valores de atividade de água acima de 0,3 a 25 °C; as mangas desidratadas por KMFD-VD sofrem uma transição vítrea e perdem suas características de crocância. Portanto, as mangas desidratadas por KMFD-VD devem ser armazenadas à atividade de água inferior a 0,250 para que mantenham suas propriedades estruturais e sejam estáveis durante o armazenamento.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao estudo do processo de secagem por KMFD, sugere-se a realização de:

- Estudo da secagem por KMFD para outros produtos de interesse comercial.
- Análise sensorial para avaliar a preferência frente a outras frutas desidratadas já existentes e a aceitabilidade das frutas com texturas crocante e macia.
- Análise sensorial de textura para avaliar as características e atributos do produto formado, além de obter uma correlação com os dados obtidos por testes mecânicos;
- Análise da viabilidade econômica e custos energéticos do processo e comparar aos processos existentes no mercado;
- Estudo para fundamentar o efeito dos pulsos de vácuo na formação da matriz porosa do alimento;
- Desenvolvimento de um novo equipamento para desidratação de frutas e hortaliças por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, que aproveite uma maior fração do volume aquecido. Em estufas, menos de 10 % do volume é ocupado pelas frutas.

