

Ricardo Lemos Monteiro

**SECAGEM DE BANANA (VAR. PRATA) EM CAMPO DE
MICRO-ONDAS COM VÁCUO CONTÍNUO OU
INTERMITENTE**

Florianópolis/SC
2014

Ricardo Lemos Monteiro

**SECAGEM DE BANANA (VAR. PRATA) EM CAMPO DE
MICRO-ONDAS COM VÁCUO CONTÍNUO OU
INTERMITENTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

Coorientador: Prof. Dr. Bruno A. M. Carciofi

Florianópolis/SC
2014

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

Monteiro, Ricardo Lemos
SECAGEM DE BANANA (VAR. PRATA) EM CAMPO DE MICRO-ONDAS
COM VÁCUO CONTÍNUO OU INTERMITENTE / Ricardo Lemos
Monteiro ; orientador, João Borges Laurindo ;
coorientador, Bruno Augusto Mattar Carciofi. -
Florianópolis, SC, 2014.
136 p.

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

Inclui referências

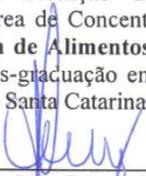
1. Engenharia de Alimentos. 2. Tecnologia de alimentos.
3. Desidratação. 4. Banana. 5. Secagem por micro-ondas a
vácuo. I. Laurindo, João Borges . II. Carciofi, Bruno
Augusto Mattar . III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Alimentos. IV. Título.

“SECAGEM DE BANANA (Var. Prata) EM CAMPO DE MICROONDAS COM VÁCUO CONTÍNUO OU INTERMITENTE”

Por

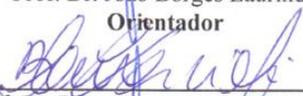
Ricardo Lemos Monteiro

Dissertação julgada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Alimentos**, área de Concentração de **Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina.



Prof. Dr. João Borges Laurindo

Orientador



Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi

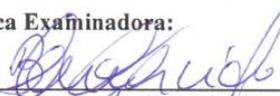
Coorientador



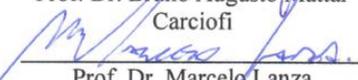
Prof. Dr. João Borges Laurindo

Cocordenador

Banca Examinadora:



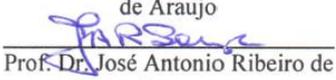
Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi



Prof. Dr. Marcelo Lanza



Prof. Dr. Pedro Henrique Hermes de Araujo



Prof. Dr. José Antonio Ribeiro de Souza

Florianópolis, 28 de março de 2014.

Este trabalho é dedicado à minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus avós, pais Margarete e Fernando e aos meus irmãos Fernanda e Rafael pelo amor incondicional, pela esperança sempre depositada em meu futuro, pelos conselhos que valerão por toda vida, e por vibrarem a cada dia com a minha felicidade.

Ao meu sobrinho Bernardo pelo amor, carinho e por me fazer feliz a cada dia.

A minha família e amigos pelo incentivo, confiança, compreensão, carinho e apoio ao longo desta jornada.

Obrigado em especial a Denise pela amizade, ensinamentos, companheirismo, amor, força e por fazer o amanhã o melhor dia da minha vida.

Aos meus orientadores João Borges Laurindo e Bruno Augusto Mattar Carciofi obrigado pelo apoio, atenção, preocupação e pelos valiosos ensinamentos, ao longo destes anos de convívio.

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 precioso tempo para a avaliação deste documento.

Ao professor Marsaioli pela ajuda no desenvolvimento do projeto do micro-ondas.

Ao técnico Marisandro que tornou essa pesquisa possível devido à fabricação do equipamento de micro-ondas.

As alunas de iniciação científica Amanda, Jéssica, Maria e Thatyara que me ajudaram no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos colegas do Laboratório PROFI (Angelise, Bárbara, Daniel, Gabriel, Giustino, Gustavo, Isadora, Jaque, Jhony, Laura, Leno, Marla, Marlene e Marta) pela ajuda e ensinamentos durante essa jornada. Em especial a Bárbara que me ensinou e ajudou em diversas etapas do meu projeto.

A todos que de alguma forma ou outra contribuíram para realização deste trabalho.

*“Nunca é alto o preço a pagar pelo
privilégio de pertencer a si mesmo”*

Friedrich Nietzsche

RESUMO

Realizou-se um estudo comparativo de diferentes estratégias de secagem para obtenção de bananas desidratadas com microestrutura e propriedades de textura controladas. Este trabalho avaliou a influência da aplicação de pulsos de vácuo nas propriedades físicas que controlam a crocância de frutas desidratadas em campo de micro-ondas. Adaptou-se um forno de micro-ondas doméstico que permitiu utilizar vácuo juntamente com o sistema rotativo, que homogeneiza a distribuição das ondas eletromagnéticas. No interior do forno foi utilizado um recipiente de polipropileno (câmara de vácuo) conectado a uma bomba de vácuo. Fatias de banana (var. Prata) de 5 mm de espessura foram desidratadas pela secagem com: I) micro-ondas a vácuo (MV) e II) múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, associados a um período complementar de secagem por micro-ondas sob vácuo (MVMFD). Ambos os procedimentos de secagem foram testados com potência nominal do forno de micro-ondas de 400, 700 e 1000 W. Na secagem MVMFD as amostras foram aquecidas no campo de micro-ondas até aproximadamente 60 °C, quando desligou-se o gerador de micro-ondas e foi reduzida a pressão da câmara até valores próximos a 8,0 kPa, seguido por rápida pressurização do sistema até a pressão atmosférica (pulso de vácuo). Este procedimento foi repetido por mais duas vezes. As cinéticas de secagem por MV e MVMFD apresentaram 3 períodos de secagem bem definidos, período de aquecimento, período de secagem rápida (taxa constante) e período de taxa decrescente de secagem. Entre os modelos empíricos utilizados, o modelo de Page foi o que melhor se ajustou a secagem de banana. O aumento de potência do micro-ondas ocasiona a diminuição do tempo de secagem. Com relação à textura, microestrutura, densidade aparente e porosidade não houve diferença das mesmas com relação a alteração da potência, quando comparado o mesmo processo. A potência de 1000 W apresentou menor tempo de processo e os parâmetros de cor foram mais preservados, tornando esta condição interessante para a secagem da banana. As diferenças estruturais das amostras secas pelos diferentes processos foram verificadas pela análise de microscopia eletrônica de varredura. As micrografias mostraram a formação de poros maiores nas amostras MVMFD, quando comparado com o processo de MV, além de maior porosidade (20% a 34% maior) e menor densidade aparente. Isso implicou em maior irregularidade na curva de força x penetração (maior número de picos) das amostras secas por MVMFD, obtida no teste de penetração, indicando maior crocância do produto final. O processo

MVMFD é competitivo com o processo de liofilização para a produção de frutas desidratadas crocantes, pois apresentou frutas com umidade, atividade de água e propriedades mecânicas semelhantes às observadas para frutas liofilizadas comerciais, com uma redução de 99% no tempo de processo. Os resultados obtidos mostram que é possível controlar a textura das frutas desidratadas através da aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, em campo de micro-ondas. Deste modo, este trabalho apresenta resultados que podem ser de grande utilidade para o aproveitamento industrial e agregação de valor às bananas.

Palavras chave: banana, secagem por micro-ondas a vácuo, secagem por ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, crocância.

ABSTRACT

A comparative study was realized of different strategies for drying to obtain dehydrated bananas with microstructure and texture properties controlled. This study evaluated the influence of the application of pulses of vacuum in the physical properties that control the crispness of dried fruit in microwave field. A domestic microwave oven was adapted to allowed the use in conjunction with vacuum and rotating turntable, which homogenizes the distribution of electromagnetic waves. Inside the oven a container of polypropylene (vacuum chamber) connected to a vacuum pump was used. Banana slices (Prata var.) 5 mm thick were dehydrated by drying: I) microwave vacuum drying (MV) and II) multiple cycles of heating-vacuum pulse, associated with an additional period of microwave vacuum drying (MVMFD). Both drying procedures were tested with nominal power of microwave oven of 400, 700 and 1000 W. In MVMFD drying the samples were heated in the microwave field to approximately 60 °C, when was turned off the microwave generator and the pressure was reduced from chamber to values near 8.0 kPa, followed by rapid pressurization of system to atmospheric pressure (vacuum pulse). This procedure was repeated two more times. The kinetics of drying MVMFD and MV presented 3 drying time well-defined, heating period, period of rapid drying (constant rate) and the falling rate period of drying. Among the empirical models used, the Page model was the best fit drying of banana. The increased power of the microwave causes the reduction of drying time. Regarding the texture, microstructure, density and porosity there was no difference of the same with respect to the potency, when compared to the same process. The power of 1000 W showed less process time and color parameters were better preserved, making this condition interesting for drying banana. Structural differences of the dried samples by different processes were verified by analysis of scanning electron microscopy. Micrographs showed the formation of larger pores MVMFD the samples when compared to the process of MV, besides higher porosity (20% to 34% higher) and lower density. This resulted in greater irregularity in the force-penetration (higher number of peaks) for the dried samples MVMFD obtained in penetration test curve, indicating greater crispness of the final product. The process of MVMFD is competitive with the lyophilization process for producing crunchy dried fruit, it showed fruits with moisture, water activity and mechanical properties similar to those observed for commercial freeze dried fruit, with a 99% reduction in process time. The results show that it is possible to control the texture of

the dried fruit by applying multiple cycles of heating-pulse vacuum in the field of microwave. Thus, this work presents results that can be useful for industrial use and aggregation value to bananas.

Keywords: banana, microwave vacuum drying, multiple cycles of heating-vacuum pulse, crispness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produtos obtidos a partir da banana.....	38
Figura 2 - Diagrama de fases da água.	40
Figura 3 - Diagrama com as etapas da liofilização.	41
Figura 4 - Representação esquemática do mecanismo de <i>puffing</i>	42
Figura 5 - Espectro eletromagnético.	43
Figura 6 - Ilustração esquemática de uma onda eletromagnética monocromática plana.	44
Figura 7 - Aspectos físicos, estrutura interna e funcionamento interno.	45
Figura 8 - Diagrama esquemático de micro-ondas convencional.....	46
Figura 9 - Princípio de ação das micro-ondas.	49
Figura 10 - Curvas típicas de secagem e temperatura do produto.....	52
Figura 11 - Comparação das secagens MV, ar e liofilização.	56
Figura 12 - Evolução da coloração amarela da casca de banana durante o amadurecimento.	63
Figura 13 - Dispositivo utilizado para cortar as bananas.	63
Figura 14 - Dispositivo do sistema rotativo.	65
Figura 15 - Dispositivo experimental.....	66
Figura 16 - Forno de micro-ondas adaptado e câmara de vácuo.	66
Figura 17 - Disposição das bananas na bandeja.	67
Figura 18 - Evolução temporal da pressão na secagem MV (—) e MVMFD (—) para potência de 400 W.	68
Figura 19 - Evolução temporal da pressão na secagem MV (—) e MVMFD (—) para potência de 700 W.	68
Figura 20 - Evolução temporal da pressão na secagem MV (—) e MVMFD (—) para potência de 1000 W.	69
Figura 21 - Amostras analisadas.	70
Figura 22 - Balança analítica adaptada com gancho conectado na parte inferior.....	71
Figura 23 - Diagrama esquemático do picnômetro	73
Figura 24 - Demonstração da localização das perfurações durante os testes mecânicos.....	73

Figura 25 - Evolução temporal da umidade em base seca das amostras de banana durante a secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, realizada em triplicata.	78
Figura 26 - Evolução temporal da atividade de água das amostras de banana durante a secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, realizada em triplicata.....	78
Figura 27 - Evolução temporal da umidade em base seca das amostras de banana durante os processos de secagem MV e MVMFD. MV-400 W(\times), MV-700 W(\square), MV-1000 W(Δ), MVMFD-400 W(+), MVMFD-700 W(\diamond), MVMFD-1000 W(\circ).....	79
Figura 28 - Evolução temporal da atividade de água das amostras de banana durante os processos de secagem MV e MVMFD. MV-400 W(\times), MV-700 W(\square), MV-1000 W(Δ), MVMFD-400 W(+), MVMFD-700 W(\diamond), MVMFD-1000 W(\circ).....	80
Figura 29 - Dados experimentais da variação da Xbs com o tempo para secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, ajustados linearmente. (Taxa constante (\circ), Taxa decrescente (Δ)).	82
Figura 30 - Dados experimentais da variação da Xbs com o tempo para secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, ajustados linearmente. (Taxa constante (\circ), Taxa decrescente (Δ)).	82
Figura 31 - Evolução temporal da temperatura média das amostras de banana durante os processos de secagem por MV. (MV-400 W (\times), MV-700 W (Δ), MV-1000 W (\square)).	83
Figura 32 - Evolução temporal da temperatura média das amostras de banana durante os processos de secagem por MVMFD. (MVMFD-400 W (\times), MVMFD-700 W (Δ), MVMFD-1000 W (\square))...	84
Figura 33 - Evolução temporal da umidade em base seca das amostras de banana durante o processo de secagem por liofilização, realizada em triplicata.	85
Figura 34 - Ajuste do modelo de Page para as amostras de banana durante a secagem MV com potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W. Experimental (\circ), Page ($-$).....	88
Figura 35 - Ajuste do modelo de Page para as amostras de banana durante a secagem MVMFD com potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W. Experimental (\circ), Page ($-$).	88

Figura 36 - Imagens de MEV com ampliação de 20 vezes para bananas secas por MV a 400 W (1a, 2a e 3a), a 700 W (1b, 2b e 3b) e a 1000 W (1c, 2c e 3c).....	90
Figura 37 - Imagens de MEV com ampliação de 20 vezes para bananas secas por MVMFD a 400 W (1a, 2a e 3a), a 700 W (1b, 2b e 3b) e a 1000 W (1c, 2c e 3c).....	91
Figura 38 - Imagens de MEV com ampliação de 50 vezes para bananas secas por MV a 400 W (1a, 2a e 3a), a 700 W (1b, 2b e 3b) e a 1000 W (1c, 2c e 3c).....	92
Figura 39 - Imagens de MEV com ampliação de 50 vezes para bananas secas por MVMFD a 400 W (1a, 2a e 3a), a 700 W (1b, 2b e 3b) e a 1000 W (1c, 2c e 3c).....	93
Figura 40 - Imagens de MEV com ampliação de 20 vezes para bananas secas LL (1a, 2a e 3a) e LC (1b, 2b e 3b).....	94
Figura 41 - Imagens de MEV com ampliação de 50 vezes para bananas secas LL (1a, 2a e 3a) e LC (1b, 2b e 3b).....	94
Figura 42 - Imagens do estereomicroscópio de amostras de banana secas por MV a 400 W (1), 700 W (2) e 1000 W (3) e por MVMFD a 400 W (4), 700 W (5) e 1000 W (6). (a) superfície da amostra (b) fratura da amostra.....	95
Figura 43 - Imagens do estereomicroscópio de amostras de banana (LL) (1) e LC (2). (a) superfície da amostra (b) fratura da amostra.	96
Figura 44 - Dados força aplicada vs penetração relativa para as amostras obtidas por LC (—) e LL (—).....	97
Figura 45 - Dados força aplicada vs penetração relativa para as amostras obtidas por MV em diferentes potências. MV-400 W (—), MV-700 W (—), MV-1000 W (—).....	97
Figura 46 - Dados força aplicada vs penetração relativa para as amostras obtidas por MVMFD em diferentes potências. MVMFD-400 W (—), MVMFD-700 W (—), MVMFD-1000 W (—).....	98
Figura 47 - Fotografia das bananas secas por liofilização no laboratório (1), comercial liofilizada (2), por MV – 400 W (3), 700 W (5), 1000 W (7) e por MVMFD - 400 W (4), 700 W (6) e 1000 W (8).....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Maiores importadores de banana (2011).....	35
Tabela 2 - Maiores produtores de banana (2011).....	36
Tabela 3 - Composição química aproximada da banana prata madura.....	37
Tabela 4 - Propriedades dielétricas de materiais a 20-25 °C e 2450 MHz.....	50
Tabela 5 - Estimativa de custo de energia para MV e secagem com ar.....	57
Tabela 6 - Caracterização físico-química das amostras de banana prata <i>in natura</i>	77
Tabela 7 - Tempo final de secagem (t_f), o valor médio seguido do desvio padrão para a $X_{bs_{final}}$ e a $a_{w_{final}}$ e a energia total consumida (E_t) pelo forno de micro-ondas durante o processo, para diferentes secagens.....	80
Tabela 8 - Coeficientes angulares, lineares, e o coeficiente de correlação (R^2), para o ajuste linear aos dados experimentais da secagem pelos processos MV e MVMFD.....	81
Tabela 9 - Parâmetros e desempenho dos modelos de Lewis e de Page ajustados aos dados experimentais da secagem pelos processos MV e MVMFD.....	87
Tabela 10 - Densidade aparente e porosidade para bananas <i>in natura</i> e secas com diferentes potências por MV e MVMFD, bananas LL e LC.....	99
Tabela 11 - Parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) da banana <i>in natura</i> e seca para todas as condições de secagem.....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Trabalhos encontrados na literatura sobre secagem por micro-ondas	58
------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas/ Siglas	Descrição
CIE	<i>Commision Internationale de L'Éclairage</i>
CMFD	<i>Convective multi-flash drying</i>
KMFD	<i>Conductive multi-flash drying</i>
LC	Liofilização comercial
LL	Liofilizada no laboratório
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MV	Secagem por micro-ondas a vácuo
MVMFD	Secagem por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, associados a um período complementar de secagem por micro-ondas sob vácuo
MWAD	Secagem convectiva com micro-ondas
MWD	Secagem por micro-ondas

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Coefficiente angular	-
B	Coefficiente lineare	-
ΔE^*	Variação total da cor	-
a^*	Tonalidade vermelha/verde	-
a_w	Atividade de água	-
b^*	Tonalidade amarela/azul	-
c	Velocidade da luz no vácuo ($3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$)	m s^{-1}
c_p	Calor específico	$\text{cal g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
$CP_{(H_2O)}$	Calor específico da água	$\text{cal g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
$CP_{(vidro)}$	Calor específico do vidro	$\text{cal g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Dp	Profundidade de penetração	cm
E	Campo elétrico local	V m^{-1}
Et	Energia total consumida	kJ
f	Frequência	Hz
FP	Força de penetração	kgf
k_L	Constante de secagem do modelo exponencial de Lewis	-
k_P	Constante de secagem de Page	-
L^*	Luminosidade entre o preto e branco	-
$m_{(g,n-hp)}$	Massa aparente registrada para gancho mergulhado no n-heptano	g
$m_{(H_2O)}$	Massa da água	g
$m_{(s+g)}$	Massa da amostra e do gancho	g
$m_{(s+g,n-hp)}$	Massa aparente registrada para a amostra e o gancho mergulhados no n-heptano	g
m_g	Massa do gancho	g
m_s	Massa da amostra	g
m_{vidro}	Massa do vidro	g
n	Parâmetro do modelo de Page	-
P_{abs}	Potência absorvida	W
$P_{micro-ondas}$	Potência do micro-ondas	W
P_V	Potência por unidade de volume	W m^{-3}
$P_{vácuo}$	Pressão de vácuo	kPa
R^2	Coefficiente de correlação	-
RMSE	Raiz quadrada do erro quadrático médio	-
SST	Sólidos solúveis totais	$^\circ\text{Brix}$
t	Tempo	min
T	Temperatura	$^\circ\text{C}$

$\tan \delta$	Tangente de perdas ou fator de dissipação	-
T_{ar}	Temperatura de entrada do ar	$^{\circ}\text{C}$
V_{ap}	Volume aparente	cm^3
v_{ar}	Velocidade de entrada do ar	m s^{-1}
v_r	Volume real	cm^3
X_{bs}	Umidade em base seca	g g^{-1}
X_{eq}	Umidade de equilíbrio	g g^{-1}
X_t	Conteúdo de umidade média	g g^{-1}
ΔT	Varição da temperatura	$^{\circ}\text{C}$
ε	Porosidade	-
ε'	Permissividade (ou constante dielétrica)	F m^{-1}
ε''	Fator (ou constante de perdas)	-
ε_0	Permissividade dielétrica do vácuo (8,854. $10^{-12} \text{ F m}^{-1}$)	F m^{-1}
λ	Comprimento de onda	cm
ρ_{ap}	Massa específica aparente	g cm^{-3}
ρ_{n-hp}	Massa específica do n-heptano.	g cm^{-3}

SUMÁRIO

DIAGRAMA CONCEITUAL	31
1 INTRODUÇÃO.....	33
1.1 OBJETIVOS	34
1.1.1. Objetivo geral	34
1.1.2. Objetivos específicos	34
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1 BANANA	35
2.2 PROCESSAMENTO DA BANANA	38
2.2.1 Banana crocante.....	39
2.3 MICRO-ONDAS	43
2.4 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS	46
2.5 SECAGEM	51
2.6 SECAGEM POR MICRO-ONDAS.....	53
2.7 SECAGEM POR MICRO-ONDAS A VÁCUO.....	55
3 MATERIAL E MÉTODOS	63
3.1 SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	63
3.2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL (MICRO-ONDAS).....	64
3.3 SECAGEM POR MICRO-ONDAS.....	67
3.3.1 Procedimento experimental	67
3.3.2 Cinéticas de secagem	69
3.4 SECAGEM POR LIOFILIZAÇÃO	69
3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	70
3.5.1 Determinação da umidade	70
3.5.2 Atividade de água	70
3.5.3 Temperatura	71
3.5.4 Volume e massa específica aparente	71
3.5.5 Volume real	72
3.5.6 Porosidade	73

3.5.7	Determinação das propriedades mecânicas	73
3.5.8	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	74
3.5.9	Estereomicroscópio.....	74
3.5.10	Medidas de cor	74
3.5.11	Análise estatística	75
3.6	AJUSTE POR MODELOS MATEMÁTICOS.....	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	77
4.2	CINÉTICA DE SECAGEM	77
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	88
4.3.1	Microscopia eletrônica de varredura e estereomicroscópio	88
4.3.2	Ensaio mecânicos	96
4.3.3	Propriedades físicas.....	98
5	CONCLUSÕES.....	103
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	105
	REFERÊNCIAS.....	107
	APÊNDICE A.....	117
	APÊNDICE B.....	119
	APÊNDICE C.....	131
	APÊNDICE D.....	135

DIAGRAMA CONCEITUAL

SECAGEM DE BANANA (VAR. PRATA) EM CAMPO DE MICRO-ONDAS COM VÁCUO CONTÍNUO OU INTERMITENTE

Motivação

- Desenvolver novos produtos;
- Agregar valor às frutas;
- Adquirir conhecimento para alteração da microestrutura e consequentemente da textura de frutas desidratadas;
- Reduzir o tempo de secagem pelo uso das micro-ondas a vácuo;
- Competir com frutas liofilizadas.

O que já foi feito?

- Frutas desidratadas crocantes podem ser obtidas por diferentes técnicas de secagem como, por exemplo, *puff drying* e liofilização. Algumas dessas técnicas necessitam de longos tempos de secagem e em alguns casos, o uso de altas pressões e temperaturas, o que acarreta em modificações indesejáveis de textura, perdas nutricionais e sensoriais, além de elevados custos operacionais. A secagem de banana por micro-ondas a vácuo também é uma alternativa para produção de frutas crocantes e vem sendo estudada por diversos pesquisadores como Drouzas e Schubert (1996), por Mousa e Farid (2002), porém esses autores não utilizaram um sistema que melhora a distribuição das ondas eletromagnéticas durante a secagem. Outra alternativa para produção de frutas desidratadas crocantes é a secagem por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, associados a um período complementar de secagem que vem sendo estudada pelo Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos – UFSC, para a modificação da textura.

Hipóteses

- A secagem por micro-ondas a vácuo (MV) produz frutas com textura crocante e com qualidade similares às liofilizadas;
- É possível alterar as propriedades de textura e a microestrutura de frutas desidratadas pelo controle das variáveis de processo e por múltiplos ciclos de aquecimento/pulso de vácuo, associados a um período complementar de secagem por MV.

Respostas

- Características visuais e físico-químicas das frutas ao longo do processo de desidratação: umidade, atividade de água, imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), fotografias, porosidade, massa específica real e aparente, cor e textura;
- Comparativo com bananas desidratadas por liofilização.

1 INTRODUÇÃO

A busca por melhor qualidade de vida vem mudando os hábitos dos consumidores. A procura por alimentos saudáveis e naturais são uma tendência no mercado mundial, em contrapartida, a rotina das grandes cidades faz com que o tempo para a realização das refeições diminua. Dessa forma, a busca por alimentos industrializados que mantenham as características originais é cada vez maior.

As frutas são alimentos ricos em vitaminas, minerais e fibras, de grande importância para a saúde humana. São consumidos em todo o mundo nas mais diversas formas: *in natura*, sucos naturais, purês, frutas em calda, secas, em pasta, ou podem ainda ser constituintes de outros produtos, tais como tortas, granolas e sorvetes.

A banana constitui importante fonte de alimento na dieta dos brasileiros, apresenta alto valor nutritivo, e baixo custo. A banana é um fruto altamente perecível, aliada a técnicas inadequadas de colheita e pós-colheita, a dificuldades de armazenamento nos meses de safra contribui para uma perda em torno de 40% da produção nacional (SOUSA et al., 2003; CHITARRA; CHITARRA, 2005; PINHEIRO et al., 2007).

Uma alternativa para diminuir os desperdícios de banana e produzir um alimento industrializado saudável é a desidratação, como forma de reduzir a atividade de água (a_w) das frutas para inibir o crescimento microbiano, retardando a deterioração das mesmas. Desta forma, é possível o aumento da vida de prateleira dos alimentos, a redução do peso e do volume a serem transportados, facilitando e reduzindo os custos, além de facilitar o consumo e diversificar a oferta de produtos.

A desidratação de banana vem sendo realizada por diferentes métodos de secagem como: secagem solar, secagem com ar quente, secagem a vácuo, secagem por micro-ondas, através de liofilização entre outras. Já a produção de bananas crocantes fica restrita por alguns métodos de secagem como a fritura, liofilização e por métodos alternativos como: *puff-drying* e secagem por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.

Dentre essas técnicas a liofilização se destaca pela alta qualidade da banana crocante, no entanto o acesso a esse produto fica restrito ao consumo de uma pequena parcela da população, pois um 1 kg desse produto custa em média R\$ 200,00; o alto valor do produto se deve aos altos custos do processo. Para as indústrias de frutas

desidratadas é de grande interesse a produção por métodos alternativos que apresentem menor tempo e baixo custo de processo, além de apresentar alta qualidade sensorial.

Sendo assim, a secagem por micro-ondas a vácuo é uma alternativa interessante e competitiva com a liofilização, pois apresenta como principal vantagem a rápida taxa de remoção de água, podendo resultar em produtos secos de qualidades nutricionais e sensoriais elevadas. As ondas eletromagnéticas promovem o aquecimento volumétrico, dessa forma, vapores são formados no interior do produto, gerando um gradiente interno de pressão, que irá forçar a saída da água. Assim, o encolhimento dos materiais alimentares é diminuído. Ainda como consequência, a secagem a vácuo impede a oxidação devido à ausência de ar, e, conseqüentemente, mantém a cor, textura e sabor dos produtos secos (ZHANG et al., 2006).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral desse estudo foi desenvolver um sistema de secagem em campo de micro-ondas sob vácuo contínuo e intermitente e comparar as propriedades físico-químicas e a microestrutura das bananas (var. Prata) desidratadas com as obtidas por liofilização.

1.1.2. Objetivos específicos

a) Adaptação de um forno de micro-ondas doméstico para operar sob vácuo e com o sistema giratório.

b) Determinar a cinética de secagem das bananas submetidas ao campo de micro-ondas sob vácuo (processo MV) em 3 níveis de potência emitida pelo equipamento (400 W, 700 W e 1000 W).

c) Determinar a cinética de secagem das bananas submetidas à aplicação de ciclos de aquecimento/pulso de vácuo, seguido pela manutenção em campo de micro-ondas sob vácuo (processo MVMFD) em 3 níveis de potência emitida pelo equipamento (400 W, 700 W e 1000 W).

d) Determinar a cinética de secagem das bananas liofilizadas no laboratório (LL).

Comparar as características físico-químicas, visuais e microestruturais dos produtos obtidos por MV, MVMFD, LL e das bananas liofilizadas comerciais (LC).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BANANA

A banana (*Musa* spp.) é originária da Ásia Tropical, com centros secundários na África e Ilhas do Oceano Pacífico. As bananeiras se encontram em todas as regiões tropicais e subtropicais do globo (PBMH; PIF, 2006).

Constitui importante fonte de alimento na dieta dos brasileiros, podendo ser utilizada verde ou madura, crua ou processada (cozida, frita, assada e industrializada), apresenta alto valor nutritivo, praticidade de consumo e baixo custo. Apenas um fruto pode conter valor energético de 411 kJ, além de fornecer quantidades significativas de vitaminas A, B e C, potássio e outros minerais, como sódio e fósforo (SEBRAE, 2008; TACO, 2011).

A banana é uma das frutas tropicais mais importantes e constitui alimento básico da população. O seu cultivo é bastante expressivo nos sistemas agrícolas e responde por uma produção total de 107,14 milhões de toneladas. É a fruta mais importada e exportada do mundo, sendo os Estados Unidos o maior importador (Tabela 1) e o Equador o maior exportador, além de ser a segunda fruta mais produzida em todo mundo, perdendo apenas para o tomate (FAO, 2014).

Tabela 1 - Maiores importadores de banana (2011).

Posição	Área	Toneladas
1	Estados Unidos	4.122.683
2	Bélgica	1.340.044
3	Rússia	1.306.794
4	Alemanha	1.288.293
5	Japão	1.064.125
6	Reino unido	1.019.227
7	China Continental	818.675

Fonte: FAO, 2014.

Dentro do contexto nacional, essa fruta é extremamente importante, pois é a segunda mais cultivada depois da laranja. O Brasil é responsável por aproximadamente 7% da produção mundial, sendo o quinto maior produtor (Tabela 2), com área cultivada de 512 mil hectares (FAO, 2014).

Tabela 2 - Maiores produtores de banana (2011).

Posição	Área	Toneladas
1	Índia	29.667.000
2	China	10.705.740
3	Filipinas	9.165.040
4	Equador	7.427.780
5	Brasil	7.329.470

Fonte: FAO, 2014.

A bananeira é cultivada em todos os estados brasileiros, desde a faixa litorânea até os planaltos do interior, sendo o nordeste e sudeste as regiões de maior produção da fruta (BORGES; SOUZA, 2004; IBGE, 2012).

Entretanto, certos fatores climáticos como a temperatura e o regime de chuvas, impõem limites à cultura fazendo com que os estados de maior produção sejam São Paulo, Bahia, Santa Catarina, Minas Gerais e Pará (SEBRAE, 2008; IBGE, 2012).

A banana Prata (*musa sapientum L.*) foi introduzida no Brasil pelos portugueses, essa variedade apresenta frutos pequenos, de sabor doce e suavemente ácido (SILVA et al., 2004). O fruto apresenta tamanho médio de 10 a 13 cm e diâmetro de 3,5 a 4 cm. A casca desta variedade é muito fina, de cor amarelo ouro e é excelente para o consumo *in natura* e para o preparo de produtos desidratados (MEDINA et al., 1995; SEBRAE, 2008).

A Tabela 3 apresenta a composição química aproximada da banana prata madura.

Tabela 3 - Composição química aproximada da banana prata madura.

Constituintes	Referências	
	Medina et al. (1995)	TACO (2011)
Umidade (%)	73,79	71,9
Amido (%)	2,91	--
Açúcar Total (%)	20,58	--
Lipídios (%)	0,13	0,1
Proteínas (%)	1,43	1,3
Fibras (%)	0,21	2,0
Cinzas (%)	0,84	0,8

As transformações que ocorrem na fruta durante todo o processo de maturação afetam constituintes como amido, açúcares, ácidos, ácido ascórbico, umidade, entre outros. Uma das mudanças bioquímicas mais importantes que ocorre durante o amadurecimento é a hidrólise do amido. Os açúcares solúveis provenientes dessa reação tornam a fruta mais macia e saborosa. O amolecimento da massa sólida da fruta, rica em amido quando verde, também é consequência da transformação da protopectina, principal componente da membrana celular, em pectina solúvel pela ação de enzimas (MEDINA et al., 1995).

A banana é um fruto climatérico, altamente perecível, apresentando elevada taxa respiratória e de produção de etileno, conduzindo rapidamente ao amadurecimento (PINHEIRO et al., 2007). Estima-se que as perdas na cadeia produtiva da banana brasileira são de até 40%. As principais causas são as técnicas inadequadas de colheita e pós-colheita, as quais comprometem a qualidade do produto. Falhas na distribuição e a dificuldade na colocação do produto no mercado também podem ser apontadas como causas de perdas (CHITARRA; CHITARRA, 2005).

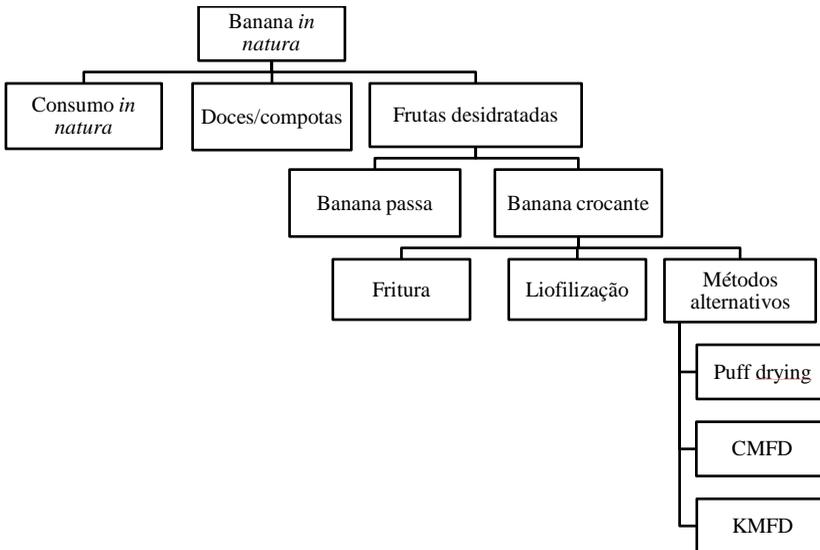
Uma alternativa para diminuir os desperdícios de banana é a desidratação, como forma de reduzir a atividade de água (a_w) das frutas para inibir o crescimento microbiano, retardando a deterioração das mesmas. Desta forma, é possível o aumento da vida de prateleira, a redução do peso e do volume a serem transportados, facilitando e reduzindo os custos, além de facilitar o consumo e diversificar a oferta de produtos.

2.2 PROCESSAMENTO DA BANANA

Além do consumo *in natura*, a banana possui uma demanda voltada para o processamento industrial, tanto no setor alimentício quanto em outras atividades, como farmacêutica e cosmética, além da crescente utilização em atividades artesanais e até industriais. Relativamente poucos produtores se dedicam a atividades de beneficiamento da fruta. No entanto, alguns produtos derivados da banana podem ser facilmente convertidos em produtos de maior valor agregado pelos próprios produtores, como banana-passa, doce de banana, entre outros doces bastante populares (SEBRAE, 2008).

No contexto da bananicultura, a agroindústria oferece alternativas interessantes à comercialização da fruta *in natura*. As dificuldades logísticas (incluindo transporte e armazenamento) são significativamente amenizadas, uma vez que os processos de industrialização reduzem peso e volume dos alimentos, além de torná-los menos perecíveis e mais lucrativos (NASCENTE, 2003). A Figura 1 mostra alguns dos produtos que podem ser obtidos a partir da banana.

Figura 1 - Produtos obtidos a partir da banana.



Fonte: Autor.

2.2.1 Banana crocante

2.2.1.1 Fritura

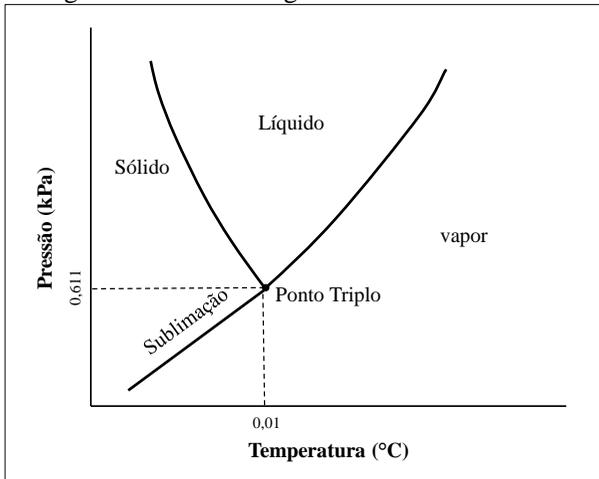
A fritura é definida como um processo de cozimento e secagem através do contato com o óleo quente. O alimento torna-se mais palatável e de bom gosto, e torna o alimento mais seguro, pois fornece um efeito de conservação que resulta da destruição térmica de microrganismos e enzimas, e uma redução da atividade de água na superfície. A vida de prateleira de produtos fritos é principalmente determinada pela umidade após a fritura. Os produtos que retêm umidade devem ser consumidos logo após a preparação, ou podem ser armazenados por um período relativamente curto, em condições de refrigeração ou de congelamento (MUJUMDAR, 2006).

Alimentos fritos são altamente saborosos devido a formação de uma crosta crocante e do desenvolvimento de sabores únicos. Além disso, o processo de fritura não apresenta um grande impacto sobre o valor nutritivo dos alimentos, devido ao tempo de fritura ser muito curto combinado com uma temperatura interna não superior a 100 °C o que conduz a uma boa retenção de nutrientes. No entanto, apresenta uma grande desvantagem, devido acrescentar muitas calorias aos alimentos por ser um método à base de imersão no óleo (FILLION; HENRY, 1998).

2.2.1.2 Liofilização

A liofilização é baseada na desidratação por sublimação do produto congelado e apresenta três principais etapas: congelamento, estágio primário de secagem (sublimação) e etapa de secagem secundária. A secagem é mais rápida durante o estado de secagem primária, devido à disponibilidade de grande quantidade de água livre no estado congelado. A sublimação do gelo seco deixa uma camada porosa que aumenta à medida que prossegue a secagem. Durante a fase de secagem secundária, a água ligada tende a ser evaporada (MELLOR, 1978; VEGA-MERCADO et al., 2001).

Através do diagrama de fases da água (Figura 2), observa-se que se a pressão de vapor de água de um alimento é mantida abaixo de 0,611 kPa e a água está congelada, desde que o alimento receba calor, o gelo sublima diretamente, sem ocorrer a sua fusão (FELLOWS, 2000).

Figura 2 - Diagrama de fases da água.

Fonte: Adaptado de Fellows (2000).

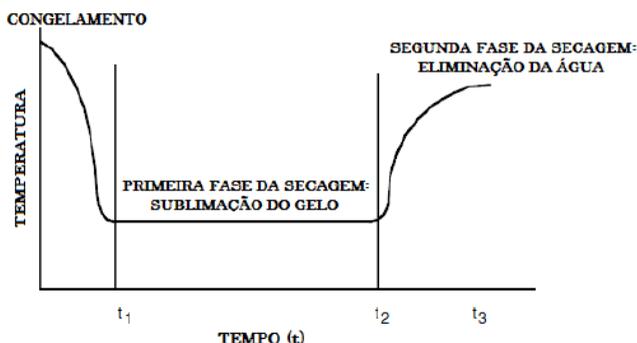
Segundo Smith (2011) as três principais fases do processo de liofilização podem ser distinguidas (Figura 3):

Congelamento: deve ser rápida e produzir pequenos cristais de gelo, resultando em uma estrutura porosa fina através do qual o vapor de água é capaz de difundir rapidamente. A água livre do alimento que é congelado mais facilmente e, portanto, sublima na fase de secagem primária.

Secagem primária: se o calor for fornecido sob vácuo, os cristais de gelo que são formados na fase de congelamento sublimam. A pressão baixa (isto é, um vácuo elevado) é necessária para aumentar a taxa de sublimação e pressões absolutas de 130-260 Pa são usualmente utilizados. O calor de sublimação da água deve ser fornecido por condução, através da placa de apoio do alimento (que pode ser na forma de prateleiras ocas, através da qual o fluido circula a quente) ou a partir de elementos radiantes acima do alimento. O vapor gerado na interface de sublimação é eliminado através dos poros do produto, devido à baixa pressão na câmara de secagem. A taxa de difusão vai depender do tamanho dos poros e da estrutura desta camada. Nem toda a água presente nos alimentos é congelada e, por conseguinte, há um limite para o teor de umidade que pode ser obtido na fase de secagem primária. O fim da secagem primária é indicado pelo aumento da temperatura na superfície do alimento.

Secagem secundária: a umidade residual é retirada à temperatura ambiente, mas ainda sob vácuo, usando os mesmos mecanismos de aquecimento como na etapa de secagem primária. Água ligada pode ser removida nesta etapa, mas a água eletrostaticamente ligada irá permanecer no produto seco. Uma grande taxa de adição de calor, nesta fase, pode fazer com que a temperatura do alimento exceda a "temperatura de colapso" para além da qual o alimento começa a fluir para dentro dos espaços vazios deixados pelos os cristais de gelo sublimados. Isto resulta num produto seco mais denso que hidrata lentamente. As temperaturas de colapso são da ordem de -30 a -40 °C para frutas. Quando a secagem está completa, o vácuo é quebrado com um gás inerte seco tal como o nitrogênio, seguido de embalagem e armazenamento.

Figura 3 - Diagrama com as etapas da liofilização.



Fonte: Barbosa-Cánovas e Vega-Mercado (2000).

Segundo a resolução da CNNPA nº 12 de 1978, fruta liofilizada é o produto obtido pela desidratação quase completa da fruta madura, inteira ou em pedaços com umidade máxima de 5%.

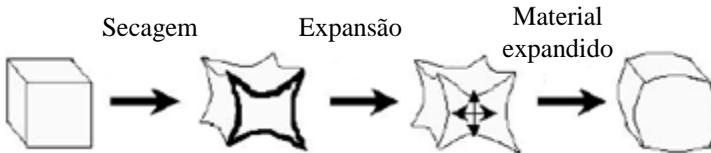
A banana liofilizada apresenta alto custo de processo, sendo pouco competitivo comparado com outros processos de desidratação. O produto final obtido, entretanto, apresenta melhores características de cor, aroma e sabor (FOLEGATTI; MATSUURA, 2004).

2.2.1.3 Puff drying

Uma alternativa para reduzir os custos de produção de produtos com estrutura semelhante aos liofilizados é o método de *puff drying*, que

é um processo que envolve o desprendimento ou a expansão de gás ou vapor no produto, provocando uma expansão ou ruptura da estrutura (PAYNE et al., 1989). A Figura 4 apresenta o mecanismo do *puff-drying*.

Figura 4 - Representação esquemática do mecanismo de *puffing*.



Fonte: Adaptado de Varnallis et al.(2001).

Segundo Saca e Lozano (1992) *puff-drying* é uma alternativa para secagem rápida e para produção de bananas desidratadas com a formação de estrutura mais porosa. Nesse processo, o produto parcialmente desidratado é acondicionado em uma câmara fechada e pressurizada pelo aquecimento interno com vapor superaquecido. Com o aumento da pressão, a água contida no alimento atinge temperaturas superiores às de ebulição na pressão atmosférica. Em seguida, a câmara é subitamente despressurizada, promovendo a evaporação *flash* da água, resultando em uma estrutura mais porosa (SULLIVAN; CRAIG, 1984).

2.2.1.4 CMFD e KMFD

Os processos CMFD (*convective multi-flash drying*) e KMFD (*conductive multi-flash drying*) desidratam e ao mesmo tempo proporcionam uma textura crocante às frutas. O processo baseia-se na aplicação de sucessivos ciclos de aquecimento e de pulsos de vácuo (redução da pressão para valores subatmosféricos e rápida recuperação da pressão atmosférica). O produto é aquecido, a pressão atmosférica, por meio do ar quente (aquecimento convectivo - CMFD) ou por contato com uma superfície aquecida (aquecimento condutivo - KMFD). Quando o produto atinge a temperatura desejada, uma redução súbita de pressão (pulso de vácuo) é aplicada, o que leva a evaporação da água instantaneamente (*flash*) e consequente resfriamento do produto (LAURINDO et al., 2011).

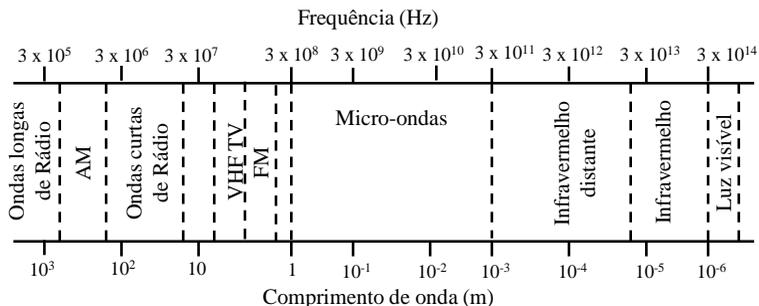
Segundo Zotarelli et al. (2012), a tecnologia de secagem *multi-flash* permite a produção de frutas desidratadas com umidade, atividade de água e propriedades mecânicas semelhantes às observadas para as

frutas liofilizadas comerciais. Bananas e mangas processadas por CMFD são tão crocantes quanto às liofilizadas. Além disso, a cor do produto é preservada, devido à utilização de temperaturas moderadas. CMFD é uma técnica de desidratação muito eficiente que pode ser concluída em tempos mais curtos (3 - 4 h) e, potencialmente, a custos mais baixos do que liofilização. CMFD é uma técnica muito eficiente de desidratação por duas razões principais: (1) durante a evaporação flash, uma parte da umidade interna é succionada para a superfície da fruta, o que melhora a secagem por convecção durante a etapa de aquecimento e (2) depois da evaporação *flash*, a temperatura da superfície da fruta diminui para 15 - 20 ° C, o que acarreta em uma grande diferença de temperatura entre o ar quente e fruta arrefecida, melhorando a transferência de calor no produto (ZOTARELLI et al., 2012).

2.3 MICRO-ONDAS

Micro-ondas são ondas eletromagnéticas com frequências desde 300 MHz até 300 GHz e comprimentos de onda desde 1 m até 1 mm. Essas ondas estão entre a região de ondas de TV e a região do infravermelho no espectro das ondas eletromagnéticas, representado na Figura 5 (POZAR, 2012).

Figura 5 - Espectro eletromagnético.

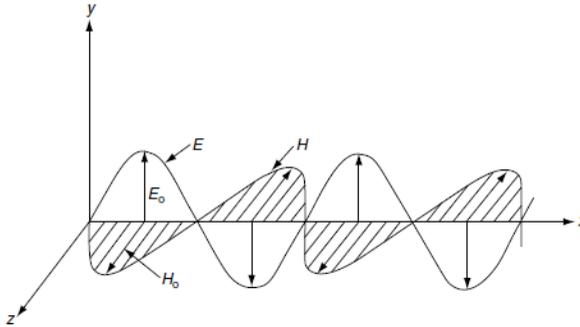


Fonte: Adaptado de Pozar (2012).

A onda eletromagnética (Figura 6) é composta por um campo elétrico, E , e um campo magnético, H , sendo E_0 e H_0 são as suas respectivas amplitudes. Estes campos são perpendiculares entre si e ambos são perpendiculares à direção de propagação, o que torna esta onda plana. A intensidade do campo em qualquer ponto pode ser representada por uma função de seno ou de cosseno, que faz com que

seja uma onda monocromática, ou seja, possui uma frequência de oscilação bem definida (MUJUMDAR, 2006).

Figura 6 - Ilustração esquemática de uma onda eletromagnética monocromática plana.



Fonte: Mujumdar (2006).

Durante a segunda Guerra Mundial (1945), o engenheiro Percy Spencer, trabalhando com radares, parou por alguns minutos na frente de um magnetron, um tubo de vácuo eletrônico que gera ondas de rádio de alta frequência, sentindo uma sensação estranha, Percy Spencer percebeu que a barra de chocolate no bolso estava começando a derreter. Descobrimo, assim, que as micro-ondas têm a capacidade de aquecer alimentos (PARKER; VOLLMER, 2004).

Atualmente, os fornos de micro-ondas domésticos operam em 2,45 GHz e sistemas industriais geralmente usam 2,45 GHz ou 915 MHz, o que corresponde a comprimentos de onda de 12,2 cm e 32,8 cm, respectivamente (DATTA; ANANTHESWARAN, 2000).

O comprimento de onda, frequência e velocidade das ondas eletromagnéticas estão relacionados conforme a Equação 1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

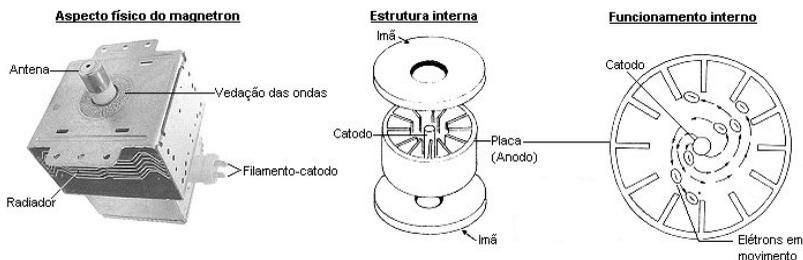
na qual λ é o comprimento de onda, f é a frequência e c é a velocidade da luz no meio (SINGH, 2009).

As micro-ondas são geradas pelo magnetron (Figura 7), um tubo oscilador alimentado por um circuito eletrônico capaz de converter energia elétrica de frequência industrial (60 Hz) em energia eletromagnética de micro-ondas (por exemplo, 2450 MHz). O campo eletromagnético se propaga na forma de onda eletromagnética (o meio

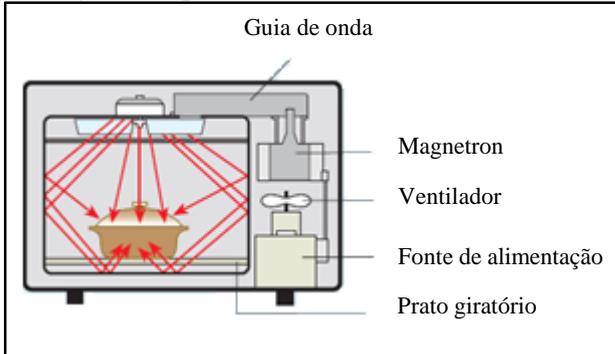
de transporte da energia) no interior de um guia de onda metálico (linha de transmissão), até ser injetada no aplicador (uma cavidade com paredes metálicas onde está o produto a aquecer). A penetração e o aquecimento de alimentos em um campo de micro-ondas são praticamente instantâneos, em contraste com métodos convencionais de aquecimento, onde o transporte de calor da superfície para o centro se dá de 10 a 20 vezes mais lento (SILVA; MARSIAOLI, 2003).

No magnetron, operando sob alto vácuo, uma diferença de potencial constante é aplicada entre o ânodo (que é um cilindro circular oco) e o cátodo. Os elétrons são acelerados do cátodo para o ânodo, mas a presença de um forte campo magnético (produzido por um eletroímã colocado entre os dois polos) faz com que os elétrons descrevam uma trajetória curva e sigam um caminho em espiral, produzindo radiofrequência. Posteriormente, por um mecanismo mais complexo, ocorrerá a emissão de ondas eletromagnéticas por uma antena colocada diretamente sobre o ânodo (ZLOTORZYNSKI, 1995).

Figura 7 - Aspectos físicos, estrutura interna e funcionamento interno.



A Figura 8 mostra um forno de micro-ondas convencional. As micro-ondas geradas pelo magnetron são enviadas para um guia de onda que direciona as ondas para o interior da câmara de cocção. Esta câmara tem paredes metálicas que atuam como uma gaiola de Faraday evitando a saída das micro-ondas para o exterior. A porta da frente e a cavidade da lâmpada são ambos cobertos por grades de metal. Os furos nestas grades são pequenos em comparação com o comprimento de onda das micro-ondas, por conseguinte, as grades atuam como placas de metal. A maioria dos micro-ondas tem uma plataforma giratória nesta câmara para homogeneizar a incidência das ondas sobre o alimento, mas alguns projetos incluem um refletor rotativo, atuando como um agitador (VOLLMER, 2004).

Figura 8 - Diagrama esquemático de micro-ondas convencional.

Fonte: Adaptado de Vollmer (2004).

Os limites de exposição de micro-ondas são baseadas na estimativa dos efeitos térmicos que as micro-ondas podem acarretar no corpo humano, sendo considerado seguro, na maioria dos países, o valor de 1 mW cm^{-2} na superfície corporal. A emissão máxima do equipamento de micro-ondas limita-se a um valor de 5 mW cm^{-2} medida a distância de 5 cm do ponto do vazamento (SCHUBERT; REGIER, 2005).

A exploração bem sucedida de aplicações de aquecimento por micro-ondas depende de um profundo conhecimento da interação entre as micro-ondas e os alimentos e sobre a capacidade de prever e prover um padrão de aquecimento desejado em alimentos para aplicações específicas. O aquecimento por micro-ondas em alimentos é um processo físico complexo que depende da propagação de micro-ondas regida pelas equações de Maxwell (referente a ondas eletromagnéticas), sobre as interações entre as micro-ondas e os alimentos (determinados por propriedades dielétricas), e sobre os fundamentos da transferência de calor e de massa (YANG; TANG, 2002).

2.4 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS

A capacidade de um material para converter a energia das micro-ondas em calor pode ser compreendida pelo estudo das suas propriedades dielétricas (CHANDRASEKARAN et al., 2013).

As propriedades dielétricas afetam diretamente o mecanismo de interação entre o material e o campo elétrico aplicado e é caracterizada pela permissividade relativa (ϵ^*), que determina o armazenamento e a dissipação da energia elétrica. A parte real (ϵ'), permissividade (ou

constante) dielétrica, determina a capacidade de um material armazenar energia elétrica, por unidade de volume, e a parte imaginária (ε''), fator (ou constante) de perdas, indica a capacidade do material de dissipar energia elétrica na forma de calor, sendo definida pela seguinte Equação 2:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2)$$

na qual $j = \sqrt{-1}$.

A relação das partes reais e imaginárias da permissividade representa outro parâmetro importante, conhecido como a tangente de perdas ou fator de dissipação, $\tan\delta$, que indica a capacidade do material para ser penetrado por um campo elétrico e para dissipar essa energia na forma de calor, é expressa pela Equação 3:

$$\tan\delta = \frac{K''}{K'} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3)$$

na qual K' e K'' são a constante dielétrica relativa e a constante dielétrica relativa de perda, respectivamente, sendo $K' = \varepsilon' / \varepsilon_0$ e $K'' = \varepsilon'' / \varepsilon_0$. O ε_0 é a permissividade no vácuo.

A profundidade de penetração (Dp) das micro-ondas, segundo Von Hippel (1954), é definida como a profundidade em que a potência dissipada é reduzida para $1/e$ (e é número de Euler $\approx 2,718$) da potência de entrada na superfície. A profundidade de penetração em alimentos pode ser calculada pela seguinte Equação 4:

$$Dp = \frac{c}{2\pi \cdot f \sqrt{2\varepsilon' \left[1 + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2 - 1} \right]}} \quad (4)$$

A absorção volumétrica de potência (P_v) e a elevação de temperatura no aquecimento por micro-ondas são geralmente descritas pelas Equações 5 e 6 (GOLDBLITH, 1967):

$$P_v = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \quad (5)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_v}{\rho c_p} \quad (6)$$

na qual, E é o campo elétrico local; T é a temperatura do material; c_p é o calor específico do material e ρ é a massa específica do material.

Segundo Mujumdar (2006), a interação dos campos eletromagnéticos com materiais podem ser divididas em quatro categorias:

Condutores: materiais com elétrons livres, tais como os metais, que refletem as ondas eletromagnéticas e são utilizados para conter e dirigir as ondas eletromagnéticas, como por exemplo, nos guias de onda.

Isoladores: materiais eletricamente não condutores, tais como vidro, cerâmica e ar, agem como isoladores, que refletem e absorvem ondas eletromagnéticas de modo insignificante, ou seja, são transparentes às ondas.

Dielétricos: materiais que absorvem a energia eletromagnética e convertem em calor, como, por exemplo, a água, os óleos, a madeira, os alimentos e outros materiais que contêm umidade.

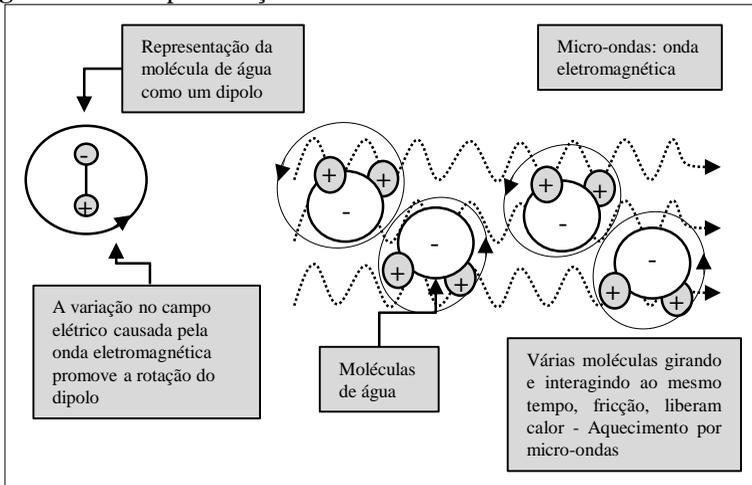
Compostos magnéticos: materiais, tais como ferrites, que interagem com o componente magnético da onda eletromagnética, são frequentemente usados como blindagem, dispositivos que impedem a fuga de energia eletromagnética.

O interesse nas propriedades dielétricas de materiais agrícolas e produtos tem sido principalmente para prever taxas de aquecimento que descreve o comportamento dos materiais quando submetidos à alta frequência ou campos elétricos de micro-ondas em aplicações de aquecimento dielétricos e como indicadores na sua utilização de métodos rápidos de teor de umidade em desenvolvimento de rápidas técnicas para a determinação de umidade (VENKATESH; RAGHAVAN, 2004).

O efeito de aquecimento em materiais alimentares é o resultado de dois mecanismos, rotação dipolar e polarização iônica. O dipolo mais responsável pelo aquecimento é a água, que é um dos principais constituintes da maioria dos alimentos. A água é uma molécula polar e geralmente tem uma orientação aleatória, no entanto, quando um campo elétrico é aplicado, as moléculas se orientam de acordo com a polaridade do campo. No campo de micro-ondas, a polaridade altera rapidamente (por exemplo, à frequência de micro-ondas de 2450 MHz, a polaridade muda a 2,45 bilhões de ciclos por segundo). As moléculas polares giram para manter o alinhamento com a polaridade do campo que muda rapidamente, tal rotação de moléculas leva ao atrito e dessa forma o

calor é gerado, este mecanismo pode ser visualizado no esquema apresentado na Figura 9 (SINGH e HELDMAN, 2009).

Figura 9 - Princípio de ação das micro-ondas.



Fonte: Adaptado de Magalhães et al. (2003).

A rotação dipolar depende da capacidade das moléculas para se mover, de modo que, por exemplo, o gelo é menos susceptível ao aquecimento por micro-ondas, pois as moléculas de água no estado sólido tem menor mobilidade do que no estado líquido (SMITH, 2011).

Quando um campo elétrico é aplicado às soluções alimentares que contêm íons, os íons se movem em um ritmo acelerado, devido à sua carga inerente. As colisões resultantes entre os íons fazem a conversão da energia cinética dos íons em energia térmica. Uma solução com uma elevada concentração de íons teria colisões iônicas mais frequentes e, por conseguinte, apresentam um aumento na temperatura (MUJUMDAR, 2006).

Sendo assim, o gelo apresenta baixas ϵ' e ϵ'' e alta profundidade de penetração quando comparada com a água líquida, já o presunto apresenta alta ϵ' e ϵ'' e baixa D_p , devido apresentar elevada umidade e alto teor de sais, esses fatos podem ser observado na Tabela 4 que apresentam as propriedades dielétricas de materiais a 20-25 °C e 2450 MHz.

Tabela 4 - Propriedades dielétricas de materiais a 20-25 °C e 2450 MHz.

Material	ϵ' (F m⁻¹)	ϵ''	D_p (cm)
Água destilada	77	9,2	1,7
Banana	62	17	0,93
Batata (crua)	62	16,7	0,93
Carne	51	16	0,87
Cenoura cozida	71	18	0,93
Gelo	3,2	0,003	1162
Manteiga	3	0,1	30,5
Óleo de cozinha	2,6	0,2	19,5
Pão	4	0,005	1170
Papel	4	0,1	50
Peixe (cozido)	46,5	12	1,1
Poliéster	4	0,02	195
Presunto	85	67	0,3
Salmoura (5%)	67	71	0,25
Vidro	6	0,1	40

Fonte: Adaptado de Fellows (2000).

O aquecimento por micro-ondas pode ser alterado de acordo com a geometria, tamanho, volume e composição do alimento. Qualquer alteração nos parâmetros afeta significativamente o processo de aquecimento por micro-ondas (PEYRE et al., 1997).

Vários são os autores que apresentam estudos sobre a distribuição de temperatura e potência absorvida por materiais alimentícios para diferentes geometrias (REMMEN et al., 1996; KHRAISHEH et al., 1997; YANG; GUNASEKARAN, 2004; RYYNÄNEN et al., 2004). Objetos cilíndricos e esféricos apresentam densidade de potência volumétrica absorvida maior e aquecimento mais centralizado, ao passo que objetos retangulares apresentam superaquecimento nos cantos e arestas (OHLSSON e RISMAN, 1978; YANG; GUNASEKARAN, 2004; RYYNÄNEN et al., 2004).

As propriedades dielétricas, que regem a absorção de energia de micro-ondas no material, são fortemente influenciadas pela temperatura, umidade e outros fatores, como teor de sal e açúcar. Como resultado, as propriedades dielétricas mudam substancialmente durante o curso da secagem (HOLTZ et al., 2010).

2.5 SECAGEM

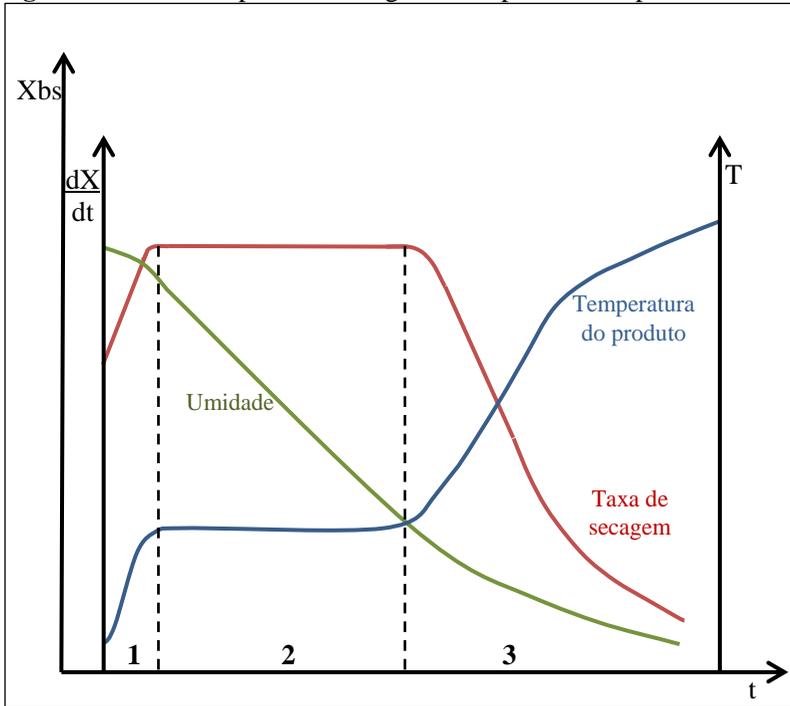
A secagem é definida como a aplicação de calor, sob condições controladas, para remover a maior parte da água de um material por meio de evaporação ou sublimação, como forma de reduzir a atividade de água (a_w) para inibir o crescimento microbiano, diminuindo a atividade enzimática e as velocidades das reações químicas, evitando assim a deterioração (FELLOWS, 2000). Além de aumentar a vida de prateleira dos alimentos, a secagem reduz o peso e o volume do produto em quantidades significantes, melhorando a eficiência de transporte e armazenamento do produto (SINGH; HELDMAN, 2009).

A remoção de umidade de um produto alimentar envolve simultânea transferência de calor e de massa. Na secagem por ar quente a transferência de calor, no interior da estrutura é limitada pela condutividade térmica do produto, enquanto que a transferência de massa é proporcional à difusão molecular de vapor de água no ar (SINGH; HELDMAN, 2009).

O princípio de secagem baseia-se no desequilíbrio entre a pressão de vapor da água contida no sólido e a pressão de vapor da água do ar ambiente. A umidade contida no sólido exerce uma pressão de vapor que depende de como a água está ligada no sólido, da estrutura do sólido e da temperatura. O ambiente que circunda o sólido possui uma pressão parcial de vapor, que está relacionada à umidade relativa e à temperatura do ar. Na secagem, o sólido irá perder umidade para o ambiente até que a pressão parcial de vapor de água no sólido seja igual a pressão parcial no ambiente (GEANKOPLIS, 1993).

Na Figura 10 são representados os valores qualitativos da evolução temporal da quantidade de água em base seca (X_{bs}), da taxa de secagem (dX/dt), e da temperatura (T) do produto, para um processo utilizando ar com propriedades constantes.

Em geral, a secagem é dividida esquematicamente em três períodos bem definidos de acordo com a evolução das transferências de calor e de massa ao longo do processo. No início do processo de secagem o sólido está, geralmente, à temperatura inferior à final, e a taxa de evaporação poderá aumentar, dependendo da temperatura do material a ser seco. Este ajuste inicial é chamado de fase de adequação, e geralmente, é muito curto e ignorado para o cálculo do tempo de secagem (GEANKOPLIS, 1993).

Figura 10 - Curvas típicas de secagem e temperatura do produto.

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

No período seguinte a temperatura da superfície alcança a temperatura de equilíbrio, ocorre o período de secagem à taxa constante. A evaporação nesse período é referente à água livre presente na superfície do material, de maneira que a taxa de evaporação depende diretamente da taxa de transferência de calor para o material que está sendo seco. O final desse período é caracterizado pela umidade crítica do sistema (X_c), a partir do qual a taxa de secagem começa a decrescer. A umidade X_c depende não apenas do material submetido à secagem, mas também das condições de processo (temperatura e umidade relativa do ar de secagem, vazão do ar de secagem que escoia paralelamente à superfície) (GEANKOPLIS, 1993).

No último período, o movimento da água no sólido pode ocorrer por diferentes mecanismos, como difusão do líquido devido a gradientes de concentração, difusão do vapor devido a gradientes de pressão parcial de vapor e o movimento do líquido por forças capilares. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se,

portanto, a transferência de massa da superfície para o ar de secagem, esse período de secagem é chamado de taxa decrescente. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem e o conteúdo de umidade de equilíbrio é atingido (GEANKOPLIS, 1993).

2.6 SECAGEM POR MICRO-ONDAS

A secagem por micro-ondas apresenta como principal vantagem a rápida taxa de remoção de água, podendo resultar em produtos secos de qualidade nutricional e sensorial elevadas. As ondas eletromagnéticas promovem o aquecimento volumétrico, dessa forma vapores são formados no interior do produto, gerando um gradiente interno de pressão, que irá forçar a saída da água. Assim, o encolhimento dos materiais alimentares é diminuído (ZHANG et al., 2006).

A aplicação de micro-ondas apresenta diferença quanto à aceleração da secagem nos períodos de taxa decrescente, provocando aquecimento volumétrico em materiais dielétricos e sendo absorvidas mais intensamente nas regiões mais úmidas em comparação às regiões mais secas. Desse modo, o gradiente de temperatura convencional é invertido, de forma que o centro apresenta temperaturas mais altas que o ambiente. Esse efeito acelera a transferência de massa devido ao aumento da pressão interna causada por uma maior taxa de evaporação de água livre no interior do produto (ERLE, 2005).

Em geral, um processo de secagem por micro-ondas consiste em três períodos de secagem. No período de aquecimento, a energia de micro-ondas é convertida em energia térmica dentro dos materiais úmidos, aumentando a temperatura do produto com o tempo. Uma vez que a pressão de vapor nos alimentos é superior ao do ambiente, o material começa a perder umidade a taxas relativamente baixas. O segundo período é o de secagem rápida, no qual um perfil estável de temperatura é estabelecido, e a energia térmica convertida das micro-ondas é usada para a vaporização da água. Em alimentos porosos, a taxa de vaporização da água em diferentes locais do alimento depende da localização da conversão das micro-ondas em energia térmica. Por fim, no período de taxa reduzida de secagem a umidade é reduzida para um ponto em que a energia necessária para a vaporização da água é inferior à energia térmica convertida pelas micro-ondas. A temperatura local pode elevar-se acima da temperatura de ebulição da água. Embora o fator de perda (ϵ'') e a conversão de energia das micro-ondas em calor diminuam, a temperatura do produto ainda pode continuar a subir,

resultando em superaquecimento ou carbonização (ZHANG et al., 2006).

As vantagens da secagem por micro-ondas comparativamente à secagem convectiva convencional são (DATTA; ANANTHESWARAN, 2000):

- a) Eficiência: na maioria dos casos, a energia vai para o solvente, e não ao substrato, o aquecimento é seletivo;
- b) Não destrutivo: secagem pode ser feita a baixas temperaturas, não há necessidade de manter a temperatura da superfície elevada, isso acarreta em menor diferença de temperatura no material;
- c) Redução da migração: solvente frequentemente mobilizado em vapor e, portanto não transporta outros materiais à superfície;
- d) Efeitos de nivelamento: aquecimento tende para as áreas mais úmidas;
- e) Velocidade: os tempos de secagem podem ser reduzidos em 50% ou mais;
- f) Uniformidade de secagem: o alimento é aquecido no seu todo, uniformemente, logo há menos desperdício de tempo e energia;
- g) Sistema operacional: menor espaço, manuseio reduzido;
- h) Melhoria do produto: em alguns casos elimina o endurecimento do produto, como o aquecimento é rápido, as vitaminas, nutrientes, sabor e a cor dos produtos alimentares podem ser preservados.

Embora o aquecimento por micro-ondas facilmente forneça energia para gerar calor na parte úmida do alimento, uma das suas principais desvantagens é a falta de uniformidade inerente do campo eletromagnético dentro da cavidade do micro-ondas, que pode gerar problemas de aquecimento não uniforme. O sucesso de aquecimento por micro-ondas em vegetais e frutas, com altos teores de umidade, muitas vezes depende da uniformidade de aquecimento. Embora este problema possa ser parcialmente compensado por um guia de onda e uma plataforma giratória (COHEN; YANG, 1995). Além disto, a temperatura final do produto em secagem por micro-ondas é difícil de ser controlada, comparada com a de secagem por ar quente, em que a temperatura do produto não se eleva para além da temperatura do ar (ZHANG et al., 2006).

2.7 SECAGEM POR MICRO-ONDAS A VÁCUO

A secagem é um dos métodos alternativos para obtenção de produtos do tipo *snack* livres de óleo. No entanto, a secagem convencional por ar quente produz *chips* de má qualidade, tendo problemas associados com o encolhimento, cor escura e textura dura (BAI-NGEW, 2011). Para melhorar a qualidade dos produtos secos e a eficiência do processo, a secagem por micro-ondas a vácuo pode ser utilizada (FIGIEL, 2009).

A fim de evitar a degradação significativa da qualidade do produto, a redução da pressão da câmara de secagem (usualmente denominada como vácuo) é introduzida para substituir o fluxo de ar quente da secagem convencional (ZHANG et al., 2006). Durante a secagem a vácuo, as moléculas de água de alta energia difundem para a superfície e evaporam devido à baixa pressão. O vapor de água se concentra na superfície e a baixa pressão faz com que o ponto de ebulição da água reduza. Estes criam grandes gradientes de pressão de vapor entre o interior de alimentos e superfície, resultando em taxas de secagem significativamente rápidas. Dessa forma, o vácuo permite que os produtos sejam secos a uma temperatura mais baixa do que produtos sob pressão atmosférica (CHEN; MUJUMDAR, 2008).

O aquecimento pelas micro-ondas combinado à aplicação de vácuo pode melhorar a eficiência da secagem, bem como a qualidade dos produtos alimentares. Ainda como consequência, a secagem a vácuo impede a oxidação devido à ausência de ar, e, conseqüentemente, mantém a cor, textura e sabor dos produtos secos. A secagem a vácuo é especialmente adequado para os produtos que são sensíveis ao calor, como frutas com alto teor de açúcar e certos vegetais de alto valor agregado (ZHANG et al., 2006).

A secagem por micro-ondas a vácuo pode ser utilizada para criar uma textura crocante desejável, para alimentos secos que podem ser consumidos sem a necessidade de reidratação. Uma textura crocante é obtida por um tecido que consiste em cavidades de ar cercada por uma fase estrutural quebradiça (SCAMAN; DURANCE, 2005). Sham et al. (2001) constataram que uma diminuição na pressão da câmara durante a secagem aumentou a crocância e ocorreu a maior expansão de *chips* de maçã. O mesmo foi observado por Zhang et al. (2007) quando trabalharam com lâminas de peixe.

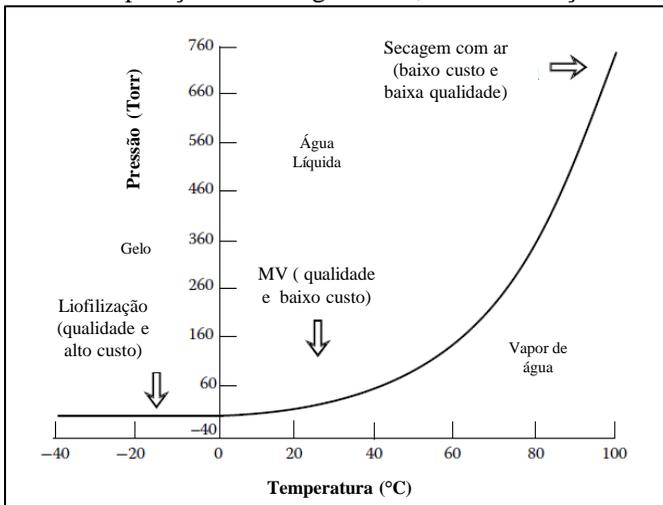
Segundo Kudra e Mujumdar (2009), a secagem por micro-ondas a vácuo (MV) oferece uma alternativa atraente pela boa relação custo/benefício, quando comparado com a liofilização e secagem com ar

quente, uma vez que oferece todas as vantagens do aquecimento dielétrico, mas a temperatura de processamento reduzida, o que é função da pressão de funcionamento (Figura 11). Além disso, o mecanismo de transferência de calor volumétrico e a ausência de oxigênio (vácuo) fornecem uma técnica ideal de secagem a baixa temperatura, bem como tempo de processamentos mais curtos.

Lin et al. (1998) realizou a secagem de micro-ondas a vácuo de fatias de cenoura e comparou com a liofilização e secagem de ar quente. A secagem a vácuo de micro-ondas é muito rápida, o processo requer apenas alguns minutos em vez de horas ou dias. Potencial de reidratação, valor nutricional, cor e propriedades de textura das fatias de cenoura desidratadas por MV são muito melhoradas em comparação com fatias de cenoura por secagem convectiva. Além disso, sensorialmente, a textura obtida pelo MV foi preferida entre os três métodos de secagem, apresentando propriedades desejáveis para o consumo tipo “*snack*”.

Na escolha do equipamento e do processo de secagem é de extrema importância a análise de custos energéticos. Uma estimativa destes é apresentada na Tabela 5. No entanto, a seleção final de um sistema adequado depende da qualidade do produto desidratado e de sua aceitação pelo consumidor (KUDRA; MUJUMDAR, 2009).

Figura 11 - Comparação das secagens MV, ar e liofilização.



Fonte: Adaptado de Kudra e Mujumdar (2009).

Tabela 5 - Estimativa de custo de energia para MV e secagem com ar.

Método de secagem	Custo Unitário (\$) por kg de água removida
100% ar	0,29
95% de ar + 5% final MV	0,24
85% + 15% final MV	0,20
70% + 30% final MV	0,17
100% MV	0,17

Fonte: Kudra e Mujumdar (2009).

A secagem de fatias de banana por micro-ondas a vácuo foi investigada experimentalmente por Drouzas e Schubert (1996). Pressões de 15, 25, 50, 100, 200 e 300 mbar e potência emitida pelo magnetron de 150, 280 e 850 W foram testadas. Seu estado ótimo de secagem foi de 150 W a menos de 25 mbar. A secagem foi realizada em menos de 30 minutos, sem ultrapassar 70 °C, produzindo produtos desidratados de excelente qualidade quanto ao sabor, aroma e testes de reidratação, sendo comparável a um produto liofilizado.

Mousa e Farid (2002) também estudaram a desidratação de banana. Os resultados mostram que a temperatura na fatia de banana sobe rapidamente e uniforme até a temperatura de saturação do vapor de água correspondente à pressão aplicada, em seguida, eleva-se lentamente até que a maior parte da umidade livre é perdida. O aumento na temperatura da amostra, após um período de secagem a temperatura praticamente constante, pode ser usado como um indicativo do fim da secagem (remoção de água livre).

O Quadro 1 apresenta diversos trabalhos encontrados na literatura sobre secagem de micro-ondas, relata os principais resultados, bem como os parâmetros de secagem e matéria-prima utilizada.

Quadro 1 - Trabalhos encontrados na literatura sobre secagem por micro-ondas.

Matéria-prima	Secagem	$P_{\text{micro-ondas}}$ $v_{\text{ar}} (\text{m s}^{-1})$ $T_{\text{ar}} (\text{°C})$ $P_{\text{v\u00e1cuo}} (\text{kPa})$	Resultados mais relevantes	Refer\u00eancia
Cenoura	MV	4 kW - - 13,33	O produto desidratado apresentou caracter\u00edsticas sensoriais superiores \u00e0 liofiliza\u00e7\u00e3o.	LIN et al. (1998)
Ma\u00e7\u00e3 e cogumelo	MWAD	0,5 W g ⁻¹ 0,5; 1,0 e 1,5 40; 60 e 80 -	A velocidade m\u00ednima do ar deve ser 1 m s ⁻¹ para evitar o escurecimento das amostras. O per\u00edodo de secagem reduziu significativamente comparado com a secagem convencional.	FUNEBO e OHLSSON (1998)
Banana	MWAD e MWD	350; 490 e 700 W 1,45 60 -	A taxa de secagem aumentou consideravelmente com a pot\u00eancia. A secagem por ar + final MWAD aumentou a taxa de secagem e reduziu o tempo de processo. Per\u00edodo de taxa constante n\u00e3o foi observado em qualquer uma das condi\u00e7\u00f5es de teste. Os diferentes processos de secagem apresentaram poucos efeitos sobre a cor e capacidade de reidrata\u00e7\u00e3o.	MASKAN (2000)
Kiwi	MWAD e MWD	210; 350 e 490 W 1,29 60 -	Foi obtido menor encolhimento e melhores caracter\u00edsticas de reidrata\u00e7\u00e3o na secagem por ar + final MWAD.	MASKAN (2001)

Continuação

Matéria-prima	Secagem	$P_{\text{micro-ondas}}$ $v_{\text{ar}} (\text{m s}^{-1})$ $T_{\text{ar}} (\text{°C})$ $P_{\text{v\u00e1cuo}} (\text{kPa})$	Resultados mais relevantes	Refer\u00eancia
Am\u00eandoa de castanha do Brasil	MWAD	104 W 0,8 55; 60 e 65 -	A energia de micro-ondas acelera a secagem, reduzindo substancialmente o tempo e promove melhor controle dos par\u00e2metros do processo.	SILVA e MARSAIOLI (2003)
Batata	MWAD	90 - 650 W 1,5 30; 40 e 60 -	As propriedades de reidrata\u00e7\u00e3o das amostras secas em micro-ondas foram melhores do que as secas somente por convec\u00e7\u00e3o. A reidrata\u00e7\u00e3o aumentou com o aumento da pot\u00eancia. No entanto, a m\u00e1xima pot\u00eancia acarretou na gelatiniza\u00e7\u00e3o do amido, resultando na diminui\u00e7\u00e3o da capacidade de reidrata\u00e7\u00e3o.	KHRAISHEH (2004)
Espinafre	MWD	90 - 1000 W - - -	O consumo de energia se manteve constante em pot\u00eancias entre 350-1000 W, devido ao fato de menores pot\u00eancias apresentarem maiores tempos de secagem. Na pot\u00eancia de 750 W, foi obtida a melhor resposta para a cor e preserva\u00e7\u00e3o do \u00e1cido asc\u00f3rbico.	OZKAN et al. (2005)
Macad\u00e2mia	MWAD	300 W 1,0 58; 60 e 62 -	Caracter\u00edsticas sensoriais semelhantes \u00e0s do produto seco de forma convencional. Desenvolvimento de caracter\u00edsticas de rancidez menos expressivas.	SILVA et al. (2006)

Continuação

Matéria-prima	Secagem	$P_{\text{micro-ondas}}$ $v_{\text{ar}} (\text{m s}^{-1})$ $T_{\text{ar}} (\text{°C})$ $P_{\text{v\u00e1cuo}} (\text{kPa})$	Resultados mais relevantes	Refer\u00eancia
Ab\u00f3bora	MWAD e MWD	160 e 350 W 1,0 50 e 75 -	O menor consumo de energia durante a secagem, menor tempo de processo e os melhores par\u00e2metros de cor, foram obtidos na secagem MWAD a 350 W e 50°C.	ALIBAS (2007)
Banana	MWAD	76-760 W 3,3 e 5,7 50; 70 e 80 -	Na fase final, o aumento da pot\u00eancia de micro-ondas diminuiu o tempo de secagem, entretanto, provocou um r\u00e1pido aumento na temperatura do produto e conseq\u00fcentemente, a carboniza\u00e7\u00e3o do produto seco. A qualidade do produto quanto \u00e0 cor, porosidade e volume aparente n\u00e3o foram fortemente afetados por par\u00e2metros do processamento.	PEREIRA et al. (2007)
Cogumelo	MV	115, 200 e 285 W - - 6,5; 15 e 23,5	O processo resultou em uma diminui\u00e7\u00e3o de 70-90% no tempo de secagem, comparados ao processo de secagem por convec\u00e7\u00e3o com ar quente. Os produtos secos apresentaram melhores caracter\u00edsticas de reidrata\u00e7\u00e3o e aparentemente maior n\u00famero de poros.	GIRI e PRASAD (2007)
Alho	MV	240; 480 e 720 W - - 4 - 6	O aumento da pot\u00eancia de micro-ondas aumentou a resist\u00eancia \u00e0 ruptura, a velocidade de secagem e a capacidade de absor\u00e7\u00e3o de \u00e1gua. A melhor reten\u00e7\u00e3o de \u00f3leos vol\u00e1teis foi observada para fatias de alho desidratado em 720 W.	FIGIEL (2009)

Continuação

Matéria-prima	Secagem	$P_{\text{micro-ondas}}$ $v_{\text{ar}} (\text{m s}^{-1})$ $T_{\text{ar}} (\text{°C})$ $P_{\text{v\u00e1cuo}} (\text{kPa})$	Resultados mais relevantes	Refer\u00eancia
Batata	MV	140; 240 e 340 W - - 40, 60 e 80	O efeito da press\u00e3o de v\u00e1cuo sobre a taxa de secagem n\u00e3o \u00e9 t\u00e3o significativa quanto \u00e0 pot\u00eancia do forno de micro-ondas.	SONG et al. (2009)
Folha de hortel\u00e3	MV	1,6; 1,92 e 2,24 kW - - 13,33	O tempo de secagem pode reduzir 85-90% em compara\u00e7\u00e3o com a secagem com ar quente. Apresentaram melhores par\u00e2metros de cor, maior taxa de reidrata\u00e7\u00e3o, estrutura mais porosa e uniforme.	THERDTHAI e ZHOU (2009)
Cenoura	MWD e MV	40; 60 e 80 W - - 67,72	A velocidade de secagem em micro-ondas foi influenciada pela forma de corte da amostra. O aumento da pot\u00eancia acelerou o processo de secagem, por\u00e9m resultou na maior degrada\u00e7\u00e3o do β -caroteno.	ROSA (2010)
Ma\u00e7\u00e3 e batata	MV	4 W g^{-1} - - 5	A secagem MV apresentou menor consumo de energia e tempo mais curto do que a liofiliza\u00e7\u00e3o por micro-ondas	HUANG et al. (2011)

Continuação

Matéria-prima	Secagem	$P_{\text{micro-ondas}}$ $v_{\text{ar}} (\text{m s}^{-1})$ $T_{\text{ar}} (\text{°C})$ $P_{\text{v\u00e1cuo}} (\text{kPa})$	Resultados mais relevantes	Refer\u00eancia
Durio	MV	582; 824 e 1085 W - - 13,33	Aumento de energia de micro-ondas produziu n\u00edtido aumento da velocidade de secagem e n\u00e3o afetou a leveza e a colora\u00e7\u00e3o amarela das fatias de durio. A estrutura e a dureza dos <i>chips</i> de durio foram compar\u00e1veis \u00e0s convencionalmente fritas.	BAI-NGEW et al. (2011)
Lichia e batata doce roxa	MV	2; 4; 6 e 8 W g ⁻¹ - - 5	Pot\u00eancias elevadas reduziram o tempo de secagem e produziram <i>snacks</i> com menor perda de nutrientes.	QIAO et al. (2012)

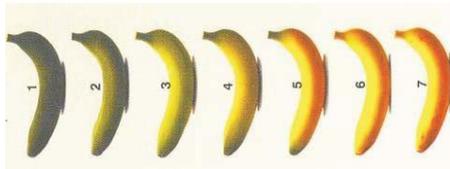
MWD: secagem por micro-ondas; MWAD: secagem convectiva com micro-ondas; MV: secagem com micro-ondas a v\u00e1cuo; $P_{\text{micro-ondas}}$: pot\u00eancia do micro-ondas; v_{ar} : velocidade de entrada do ar; T_{ar} : temperatura de entrada do ar; $P_{\text{v\u00e1cuo}}$: press\u00e3o de v\u00e1cuo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

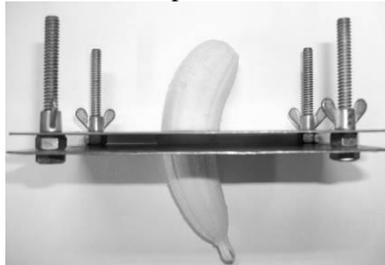
As bananas da variedade Prata (*Musa Sapientum L.*) foram adquiridas no comércio local da cidade de Florianópolis - SC e mantidas a temperatura ambiente até o momento da sua utilização. A seleção das frutas foi realizada pelo grau de maturação, determinado pela análise visual (utilizando a escala de coloração da casca da banana entre 5 e 6 Figura 12), força de penetração (FP) e conteúdo de sólidos solúveis (SST). A FP foi avaliada com o auxílio de um penetrômetro (Effegi Modelo - FT 327, Ø=8 mm, Itália) e o teor de SST foi medido por um refratômetro óptico com resolução 0,1 °Brix (Pocket refractometer Atago, Modelo - PAL-BX/RI, Japão). Para a determinação do teor SST utilizou-se o suco da fruta, obtido da filtração através de um tecido (TNT- tecido não tecido) da banana triturada. As bananas foram descascadas manualmente e cortadas em fatias de 5 mm de espessura em dispositivo específico para este fim (Figura 13).

Figura 12 - Evolução da coloração amarela da casca de banana durante o amadurecimento.



Fonte: Medina e Pereira (2004).

Figura 13 - Dispositivo utilizado para cortar as bananas.



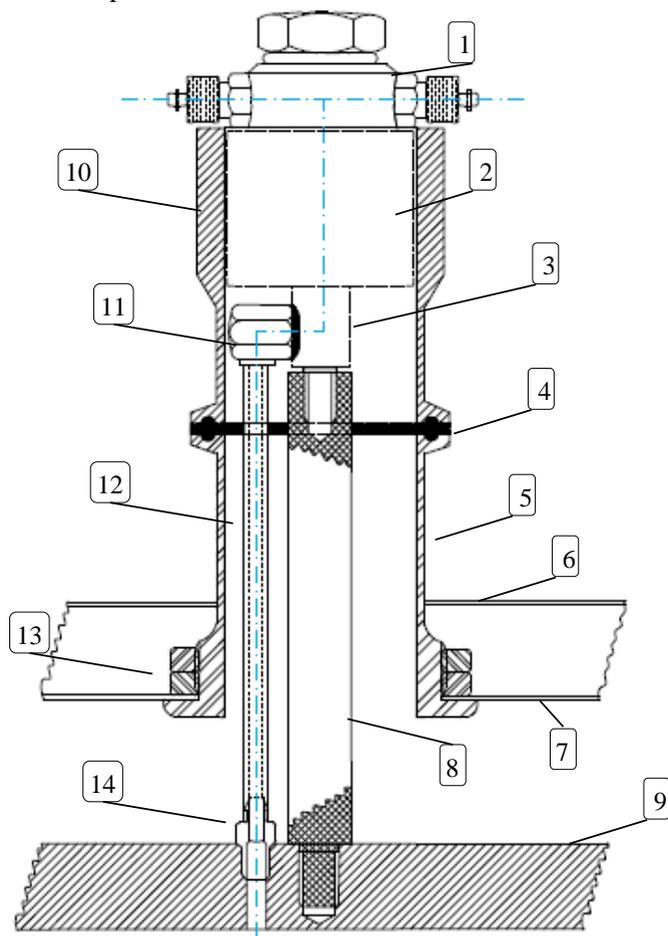
Fonte: Porciuncula (2010).

3.2 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL (MICRO-ONDAS)

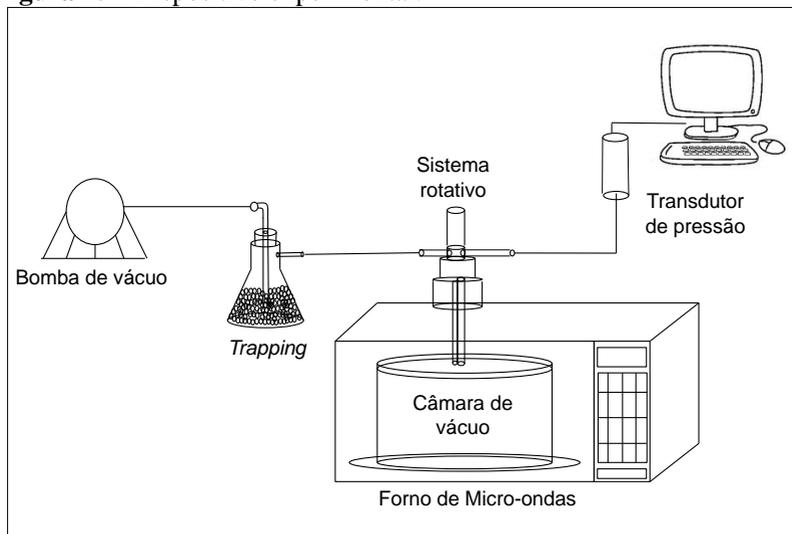
A secagem das amostras no campo das micro-ondas foi realizada em um forno doméstico adaptado (Electrolux, modelo - MEX55, Brasil), com espaço interno de 45 litros, potência máxima de saída do magnetron de 1000 W e frequência das ondas de 2450 MHz. No interior do forno foi adaptado um recipiente de polipropileno que serviu como câmara de vácuo. A escolha do polipropileno foi feita, pois ele é um material atóxico com propriedades dielétricas relativamente baixas, ou seja, pequena capacidade de gerar energia térmica quando submetido ao campo de micro-ondas, além de apresentar boa resistência mecânica. Este recipiente foi conectado a uma bomba de vácuo de vazão nominal de $350 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (DVP, modelo - LC.305, Itália) e a um transdutor de pressão (Warme, Modelo - WTP4010, Brasil) que enviou os dados para registro em um computador.

Um sistema rotativo consistindo de uma válvula T conectada a uma junta rotativa formada por um eixo fixo (conectado à bomba de vácuo e ao transdutor de pressão) e por um eixo livre (conectado à câmara de vácuo) (Figura 14) permitiu homogeneizar a distribuição das micro-ondas pelo acionamento do motor do prato giratório típico dos fornos de micro-ondas domésticos, o dispositivo experimental está representado esquematicamente na Figura 15. A Figura 16 apresenta a imagem do forno de micro-ondas adaptado e câmara de vácuo.

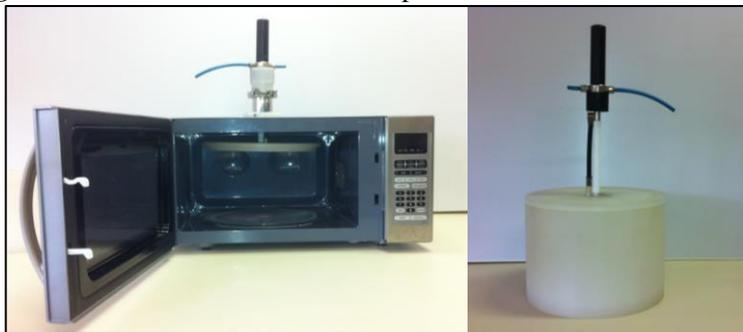
O dispositivo do sistema rotativo é formado por: (1) Válvula T; (2) Junta rotativa; (3) Eixo livre da junta rotativo; (4) Anel TC (*Tri-clamp*) de silicone (as peças (bucha de inox e de nylon) foram acopladas por uma abraçadeira *clamp*); (5) Bucha de inox flangeada na parte superior e inferior; (6) Parte externa do teto do forno de micro-ondas; (7) Parte interna do teto do forno de micro-ondas; (8) Eixo de teflon de acionamento da câmara de polipropileno, com rosca fêmea em cima (rosqueado na rosca macho do eixo livre da junta rotativa) e rosca macho em baixo (rosqueado na tampa de polipropileno); (9) Tampa de polipropileno; (10) Bucha de nylon flangeada na parte inferior; (11) Niple de latão sextavado (com 2 roscas torneadas, uma macho para rosquear lateralmente no eixo livre da junta rotativa, outra fêmea, para receber um o tubo de teflon); (12) Tubo de teflon; (13) Porca hexagonal; (14) Niple de teflon.

Figura 14 - Dispositivo do sistema rotativo.

Fonte: Autor.

Figura 15 - Dispositivo experimental.

Fonte: Autor.

Figura 16 - Forno de micro-ondas adaptado e câmara de vácuo.

Fonte: Autor.

Após o forno ser adaptado ele foi testado com um medidor de micro-ondas (Ets-Lindgren, modelo - Holaday EMF Measurement, USA) e verificou-se que o micro-ondas não apresenta vazamentos de ondas eletromagnéticas, devido não ultrapassar o limite de exposição permitido de 5 mW cm^{-2} medido a uma distância de 5 cm.

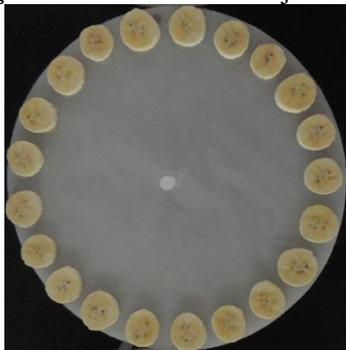
Além disso, foi realizada a verificação da potência absorvida pela potência emitida (potência nominal do forno de micro-ondas), e está descrita no Apêndice A, bem como, a importância do sistema giratório.

3.3 SECAGEM POR MICRO-ONDAS

3.3.1 Procedimento experimental

Para a secagem, as fatias de banana foram dispostas ao redor da extremidade de uma bandeja circular de polipropileno disposta na câmara de vácuo (Figura 17).

Figura 17 - Disposição das bananas na bandeja.



Fonte: Autor.

Foram adotados dois procedimentos de secagem, descritos a seguir. I) Micro-ondas a vácuo (MV): inicialmente reduziu-se a pressão até aproximadamente 4,0 kPa, quando o gerador de micro-ondas foi ligado, mantendo a bomba de vácuo ligada até o final do processo de secagem. II) Múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (MVMFD): as amostras foram aquecidas no campo de micro-ondas até aproximadamente 60 °C, quando desligou-se o gerador de micro-ondas e foi reduzida a pressão da câmara até valores próximos a 8,0 kPa, seguido por rápida pressurização do sistema até a pressão atmosférica (pulso de vácuo). Este procedimento foi repetido por mais duas vezes. Após estes três pulsos de vácuo, as amostras foram mantidas sob aquecimento pelas micro-ondas e sob vácuo até o final da secagem (as amostras foram secas ao máximo possível, sem que elas sofressem queimaduras visíveis).

Ambos os procedimentos de secagem foram testados com potência do magnetron de 400, 700 e 1000 W sendo realizado em triplicata cada procedimento experimental. Ao final de cada processo de secagem foi calculado a energia total consumida (E_t) pelo forno de

micro-ondas, que é o somatório de energia consumida em quanto o micro-ondas esteve ligado.

As Figuras 18, 19 e 20 apresentam as variações da pressão em função do tempo de secagem, para diferentes potências de processo.

Figura 18 - Evolução temporal da pressão na secagem MV (—) e MVMFD (—) para potência de 400 W.

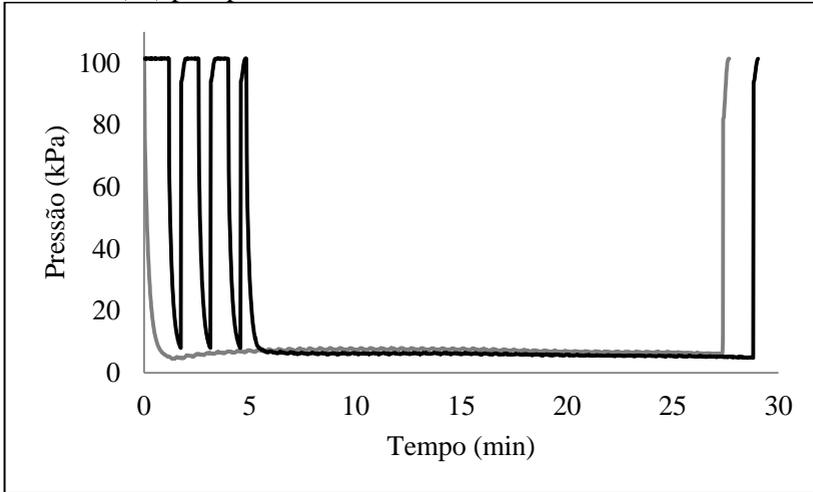


Figura 19 - Evolução temporal da pressão na secagem MV (—) e MVMFD (—) para potência de 700 W.

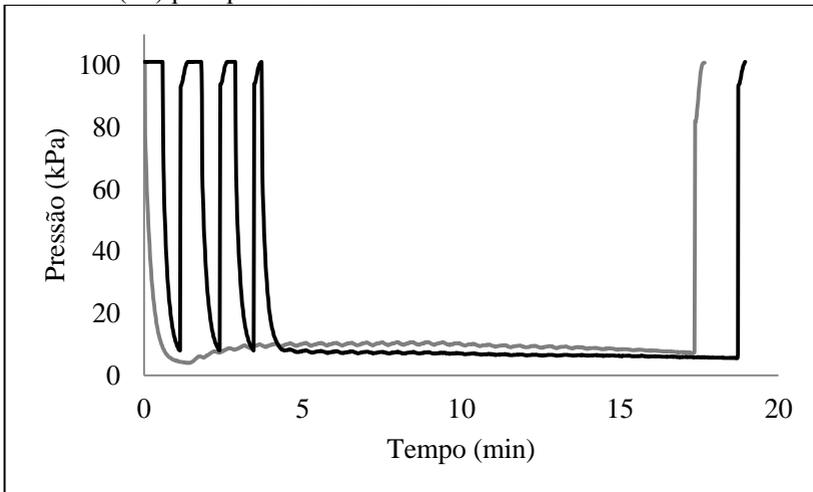
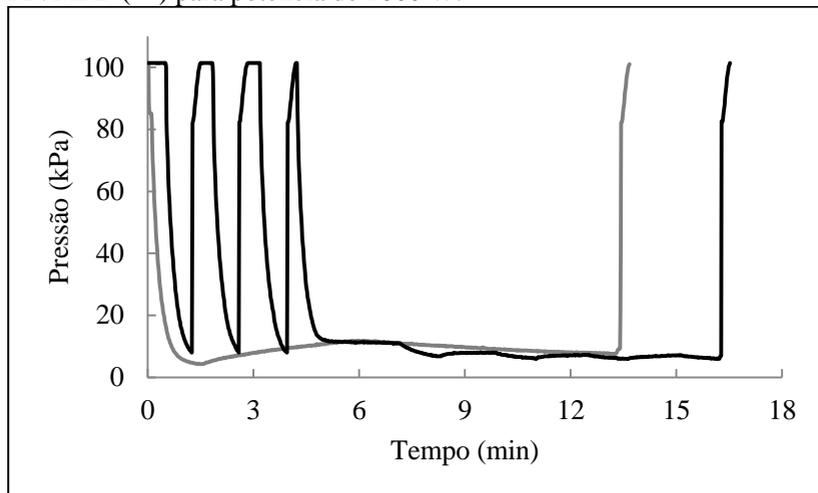


Figura 20 - Evolução temporal da pressão na secagem MV (—) e MVMFD (—) para potência de 1000 W.



3.3.2 Cinéticas de secagem

As cinéticas de secagem foram realizadas de forma destrutiva e, a cada intervalo pré-determinado, das amostras coletadas foi determinada a atividade de água, a umidade e a temperatura.

3.4 SECAGEM POR LIOFILIZAÇÃO

A secagem das amostras de banana por liofilização foi realizada utilizando para registro da variação temporal da massa uma célula de carga do tipo *single point* (Alfa Instrumentos, modelo GL, Brasil) com capacidade de 2 kg e exatidão de 0,1 g. Um sistema de aquisição de dados conectado a um computador permitiu o registro instantâneo dos valores indicados pela célula de carga durante o processo de secagem. (TRIBUZI; LAURINDO, 2014). Os experimentos foram realizados em triplicata e estas amostras foram denominadas como banana liofilizada no laboratório (LL).

Também foram adquiridas bananas liofilizadas do comércio local de Florianópolis (LC) da marca Jasmine (fruta não apresenta conservantes, sem ingredientes artificiais e sem adição de açúcar), para posterior comparação.

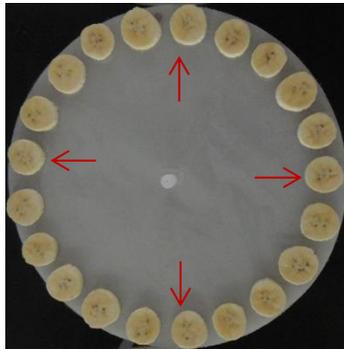
3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Ao final do processo de secagem, as amostras foram caracterizadas pela determinação de parâmetros físico-químicos: umidade, a_w , temperatura, volume aparente e real, massa específica aparente, porosidade, teste de penetração e cor. Além destes, foram realizadas capturas de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de um estéreo microscópio. Todos os parâmetros foram realizados para triplicata de secagem.

3.5.1 Determinação da umidade

O conteúdo de água foi determinado pelo método gravimétrico (Shimadzu, Modelo - AY220, Filipinas com precisão de 0,0001 g) a vácuo (≤ 100 mmHg, 70 °C) conforme metodologia da AOAC (2005) As análises foram realizadas em quadruplicata, sendo selecionadas fatias de bananas conforme a Figura 21.

Figura 21 - Amostras analisadas.



Fonte: Autor.

3.5.2 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.

3.5.3 Temperatura

A temperatura foi determinada por um termômetro digital (Modelo - TESTO 106, Brasil), imediatamente após o desligamento do forno. As análises foram realizadas em quadruplicata.

3.5.4 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. A amostra foi presa a um gancho conectado à parte inferior de uma balança analítica (Figura 22) com precisão de 0,0001 g (Marte, Modelo -AY220, Filipinas). O V_{ap} foi determinado conforme a Equação 7, sendo a análise realizada em quadruplicata.

Figura 22 - Balança analítica adaptada com gancho conectado na parte inferior.



Fonte: Autor.

$$V_{ap} = \frac{(m_{s+g} - m_g) - (m_{s+g,n-hp} - m_{g,n-hp})}{\rho_{n-hp}} \quad (7)$$

na qual m_g é massa do gancho, m_{s+g} é a massa da amostra e do gancho, $m_{(s+g,n-hp)}$ é a massa aparente registrada para a amostra e o gancho

mergulhados no n-heptano, $m_{(g,n-hp)}$ é a massa aparente registrada para gancho mergulhado no n-heptano e ρ_{n-hp} é a massa específica do n-heptano.

A massa específica aparente (ρ_{ap}) das amostras foi determinada pela razão entre a massa da amostra (m_s) e o volume aparente (Equação 8).

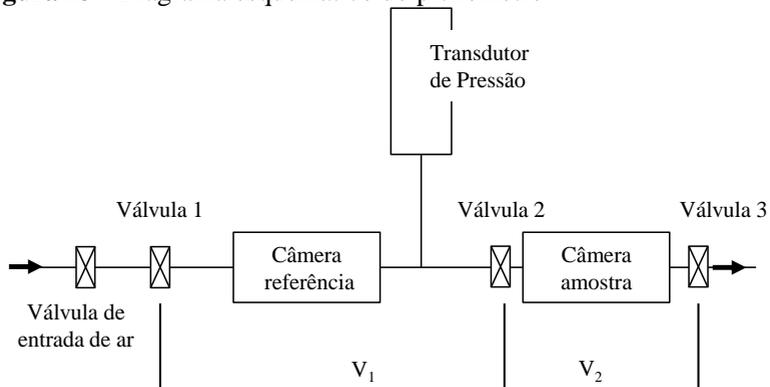
$$\rho_{ap} = \frac{m_s}{V_{ap}} \quad (8)$$

3.5.5 Volume real

O volume real (V_r) da amostra foi determinado utilizando um picnômetro de ar comprimido, esquematizado na Figura 23. O procedimento realizado foi conforme proposto por Sereno et al. (2007). O picnômetro é um instrumento o qual utiliza o método do deslocamento de gás, que é capaz de penetrar em todos os poros abertos, desde que estes tenham no mínimo o mesmo tamanho da molécula de gás. 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 expande-se 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. O V_r foi calculado utilizando a Equação 9, sendo a análise realizada em quadruplicata.

$$V_r = \frac{V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}{\left(\frac{P_{atm}}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_{amb}} - 1 \right)} + V_2 \quad (9)$$

na qual P_{atm} e T_{amb} são a pressão e a temperatura medida com picnômetro vazio e a válvula 1 fechada. P_1 e T_1 são a pressão e a temperatura medida após o equilíbrio da compressão de ar na câmara de referência, com as válvulas 1,2 e 3 fechadas. P_2 e T_2 são a pressão e a temperatura medida após a abertura da válvula 2, com as a válvula 1 e 3 fechadas.

Figura 23 - Diagrama esquemático do picnômetro

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

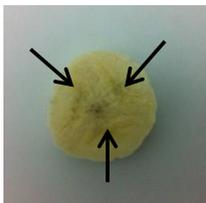
3.5.6 Porosidade

A porosidade (ε) das amostras foi calculada a partir dos valores de V_r e V_{ap} , conforme a Equação 10.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{V_r}{V_{ap}} \right) \cdot 100 \quad (10)$$

3.5.7 Determinação das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram realizadas por meio de teste de penetração com probe cilíndrica de 2 mm de diâmetro em um analisador de textura (Stable Micro System, Modelo - TA-HD-Plus, Reino Unido). Ao final de cada processo de desidratação foram analisadas 5 amostras, sendo realizadas 3 perfurações em diferentes regiões das mesmas (Figura 24).

Figura 24 - Demonstração da localização das perfurações durante os testes mecânicos.

Fonte: Autor.

3.5.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As microscopias das amostras foram realizadas no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (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 a retirada da umidade residual e recobertas com ouro utilizando um metalizador (LEICA, Modelo - EM SCD500). As imagens capturadas foram da parte interna das amostras fraturadas manualmente, após a secagem, sendo realizada uma imagem por secagem, com ampliação de 20 e 50 vezes.

3.5.9 Estereomicroscópio

As imagens foram realizadas da superfície e da parte interna das amostras fraturadas manualmente, após a secagem, no Laboratório Herbário Flor – UFSC pelo Estereomicroscópio (Meiji, Modelo - RZ, Japão), sendo realizada uma imagem por secagem.

3.5.10 Medidas de cor

As medidas de cor das bananas *in natura* e secas, foram realizadas por um colorímetro MiniScan (HunterLab, Modelo - EZ, USA). A cor foi expressa pelo sistema de coordenadas L^* , a^* e b^* (escala CIELAB) definido pela CIE (*Commision Internationale de L'Èclairage*) (1976). A leitura foi realizada diretamente sobre a superfície de 4 fatias, sendo realizada triplicata da mesma leitura e de processo. A variação da cor total é avaliada pelo parâmetro ΔE^* , tomando como referência a amostra *in natura* (L_0 , a_0 e b_0), foi calculado de acordo com a Equação 11.

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (11)$$

na qual o parâmetro L^* indica a luminosidade entre o preto e branco ($L^*=0$ preto e $L^*=100$ branco), o parâmetro a^* mede a tonalidade vermelha/verde ($+a^*$ =vermelho e $-a^*$ =verde) e o parâmetro b^* mede a tonalidade amarela/azul ($+b^*$ =amarelo e $-b^*$ =azul).

3.5.11 Análise estatística

Os resultados obtidos durante as análises de massa específica aparente, porosidade e cor 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.

3.6 AJUSTE POR MODELOS MATEMÁTICOS

Os dados foram ajustados a uma regressão linear, para a verificação dos períodos de secagem, o coeficiente de correlação (R^2) foi determinado, bem como o coeficiente linear e o coeficiente angular da reta que representa a taxa de secagem.

Além disso, foram ajustados dois modelos empíricos para simular as curvas de secagem, o modelo exponencial (Lewis) e de Page, que relacionam a umidade adimensional como uma função exponencial do tempo.

O ajuste do modelo exponencial de Lewis foi calculado de acordo com a Equação 12.

$$\frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k_L t) \quad (12)$$

na qual X_t é o conteúdo de umidade média (base seca) para um tempo t , k_L é a constante de secagem do modelo exponencial de Lewis e t é o tempo de secagem.

O ajuste do modelo de Page foi calculado de acordo com a Equação 13.

$$\frac{\bar{X}_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \exp(-k_P t^n) \quad (13)$$

na qual, k_P é a constante de secagem de Page e n é o parâmetro do modelo.

A umidade de equilíbrio (X_{eq}) na secagem por micro-ondas pode-se assumir como sendo nula. Essa consideração é baseada em outros trabalhos e no fato de que a umidade de equilíbrio do micro-ondas situa-se próxima de zero. Além disso, a umidade final apresenta um valor muito inferior em relação à umidade inicial e o termo pode ser desconsiderado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

A Tabela 6 apresenta o valor médio e o desvio padrão das propriedades físico-químicas das amostras de banana prata *in natura* utilizadas nos processos de secagem.

Antes de cada processo de secagem, foi caracterizado cada lote das frutas quanto a umidade em base seca (Xbs), atividade de água (a_w), sólidos solúveis totais (SST) e força de penetração (FP). Os valores de SST foram muito próximos aos encontrados por Zotarelli et al. (2012) para mesma variedade de banana ($23,1 \pm 1,4$ Brix).

Tabela 6 - Caracterização físico-química das amostras de banana prata *in natura*.

Secagens	Xbs (g g ⁻¹)	a_w	SST (°Brix)	FP (kgf)
MV-400 W	2,2812±0,1351	0,981±0,004	23,3±0,7	0,6± 0,1
MVMFD-400 W	2,2652±0,0411	0,979±0,003	23,0±0,9	0,6± 0,1
MV-700 W	2,2759±0,1426	0,983±0,003	20,9±1,2	0,7± 0,1
MVMFD-700 W	2,2253±0,0581	0,984±0,002	23,5±1,0	0,6± 0,1
MV-1000 W	2,4010±0,1021	0,981±0,006	23,1±1,6	0,6± 0,0
MVMFD-1000 W	2,4870±0,1272	0,981±0,006	23,2±1,2	0,6± 0,1
LL	2,3678±0,0844	0,980±0,005	23,5±0,2	0,6± 0,1

4.2 CINÉTICA DE SECAGEM

As Figuras 25 e 26 apresentam os dados em triplicata da evolução temporal da Xbs e a_w das amostras durante as secagens por MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W. Essas figuras são meramente ilustrativas e as secagens MV e MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, 700 W e 1000 W estão apresentadas no Apêndice B e apresentam uma boa reprodutibilidade da evolução temporal da Xbs e a_w das amostras durante a secagem MV e MVMFD, mesmo com a amostragem realizada de forma destrutiva. As massas de banana utilizada nos processos de secagem foram de $85,55 \pm 0,69$ g (média ± desvio padrão).

Figura 25 - Evolução temporal da umidade em base seca das amostras de banana durante a secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, realizada em triplicata.

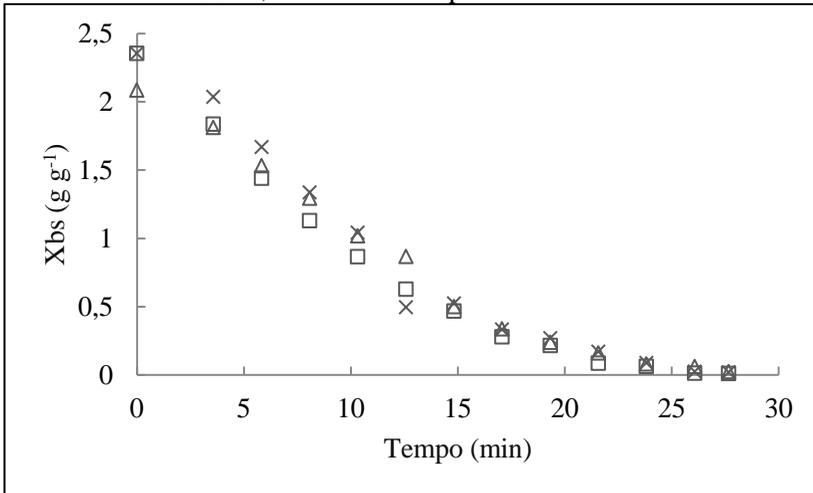
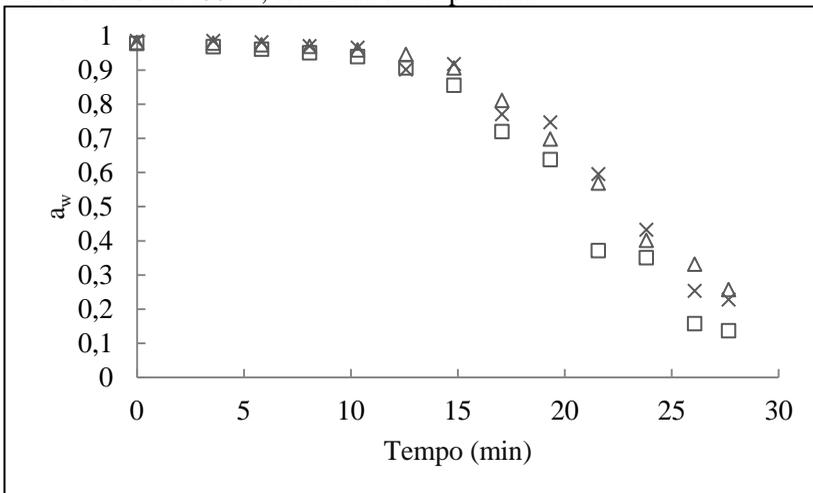


Figura 26 - Evolução temporal da atividade de água das amostras de banana durante a secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, realizada em triplicata.



Nas Figuras 27 e 28 são apresentados os dados da evolução temporal da umidade em base seca e da atividade de água das amostras durante a secagem MV e MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, 700 W e 1000 W.

A Tabela 7 apresenta os resultados do tempo final de secagem (t_f), o valor médio seguido do desvio padrão para a X_{bs} final e a a_w final e a energia total consumida (E_t) pelo forno de micro-ondas durante o processo. As secagens utilizando os menores valores de potência nominal do forno de micro-ondas requerem maior tempo de processo, e apresentam menor E_t para obtenção do produto final. O maior consumo de energia também foi observado para os processos com pulso de vácuo.

Figura 27 - Evolução temporal da umidade em base seca das amostras de banana durante os processos de secagem MV e MVMFD. MV-400 W(\times), MV-700 W(\square), MV-1000 W(\triangle), MVMFD-400 W($+$), MVMFD-700 W(\diamond), MVMFD-1000 W(\circ).

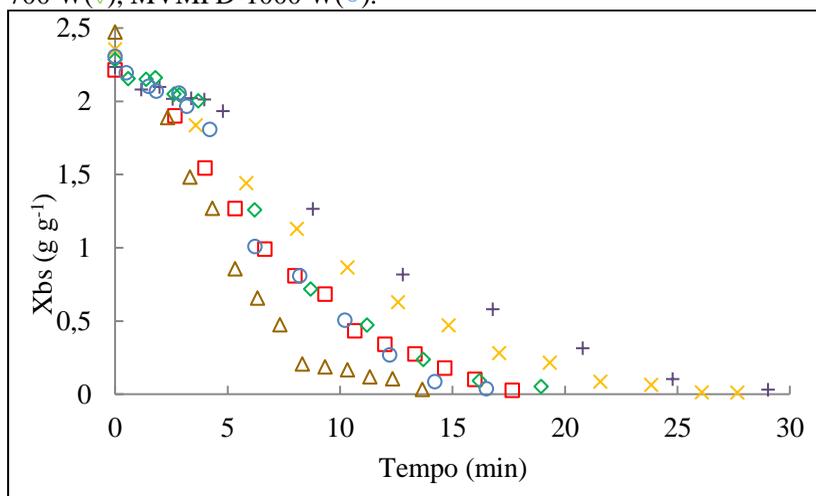


Figura 28 - Evolução temporal da atividade de água das amostras de banana durante os processos de secagem MV e MVMFD. MV-400 W(\times), MV-700 W(\square), MV-1000 W(\triangle), MVMFD-400 W(+), MVMFD-700 W(\diamond), MVMFD-1000 W(\circ).

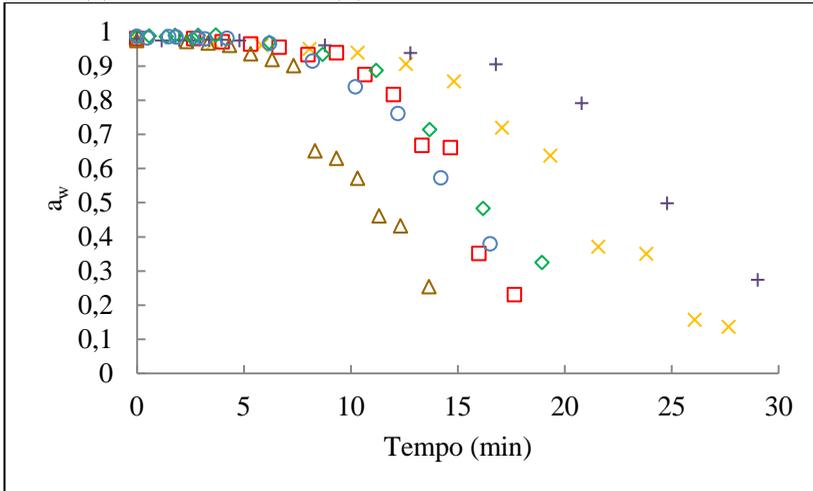


Tabela 7 - Tempo final de secagem (t_f), o valor médio seguido do desvio padrão para a $X_{bs_{final}}$ e a $a_{w_{final}}$ e a energia total consumida (E_t) pelo forno de micro-ondas durante o processo, para diferentes secagens.

Secagens	t_f (min)	$X_{bs_{final}}$ ($g\ g^{-1}$)	$a_{w_{final}}$	E_t (kJ)
MV-400 W	27,67	0,0190 \pm 0,0073	0,207 \pm 0,062	624
MVMFD-400 W	29,03	0,0246 \pm 0,0064	0,265 \pm 0,019	632,4
MV-700 W	17,67	0,0302 \pm 0,0172	0,262 \pm 0,066	672,7
MVMFD-700 W	18,95	0,0423 \pm 0,0083	0,322 \pm 0,011	683,2
MV-1000 W	13,67	0,0341 \pm 0,0025	0,259 \pm 0,006	720
MVMFD-1000 W	16,51	0,0518 \pm 0,0128	0,393 \pm 0,012	791
LL	1.050	0,0311 \pm 0,0029	0,224 \pm 0,019	-
LC	-	0,0241 \pm 0,0055	0,241 \pm 0,006	-

A Tabela 8 apresenta os valores dos coeficientes angulares (A), lineares (B), e do coeficiente de correlação (R^2), para o ajuste linear aos dados experimentais da secagem pelos processos MV e MVMFD, para a verificação dos períodos de secagem.

Tabela 8 - Coeficientes angulares, lineares, e o coeficiente de correlação (R^2), para o ajuste linear aos dados experimentais da secagem pelos processos MV e MVMFD.

Secagens	A ($\text{g g}^{-1} \text{min}^{-1}$)	B (g g^{-1})	R^2
MV-400 W	- 0,119	2,252	0,971
MVMFD-400 W	- 0,102	2,275	0,982
MV-700 W	- 0,170	2,241	0,975
MVMFD-700 W	- 0,157	2,312	0,967
MV-1000 W	- 0,266	2,431	0,975
MVMFD-1000 W	- 0,202	2,559	0,946

As Figuras 29 e 30 apresentam os dados experimentais da variação da X_{bs} com o tempo para secagem MV e MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, ajustados linearmente. Essas figuras são meramente ilustrativas e as secagens MV e por MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, 700 W e 1000 W, ajustados linearmente estão apresentadas no Apêndice C.

Através da Tabela 8 fica evidente que quanto maior a potência nominal do forno de micro-ondas maior é a taxa de secagem (coeficiente angular (A)), quando comparado ao mesmo processo de secagem. As taxas de secagem para os processos MV a 700 W e 1000 W, foram 43 e 124%, respectivamente, maiores que a secagem MV a 400 W. Para o processo MVMFD a 700 W e 1000 W, foram 54 e 98%, respectivamente, maiores que a secagem MVMFD a 400 W.

Segundo Zhang et al. (2006), a secagem por micro-ondas apresenta 3 períodos, o período de aquecimento, período de secagem rápida e período de taxa decrescente de secagem. Inicialmente a energia de micro-ondas é convertida em energia térmica dentro dos materiais úmidos, aumentando a temperatura do produto até a temperatura de ebulição da água no vácuo (período de aquecimento), no entanto esse período de aquecimento não é observado quando analisado as Figuras 29 e 30 pois é um período muito rápido, devido ao fato da secagem estar sob vácuo. Após este período, ocorre o período de secagem rápida (taxa constante), um perfil estável de temperatura é estabelecido, e a energia térmica convertida das micro-ondas é usada para a vaporização da água livre, esse período é nitidamente percebido por uma correlação linear até o período de taxa decrescente de secagem.

Figura 29 - Dados experimentais da variação da X_{bs} com o tempo para secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, ajustados linearmente. (Taxa constante (\circ), Taxa decrescente (Δ)).

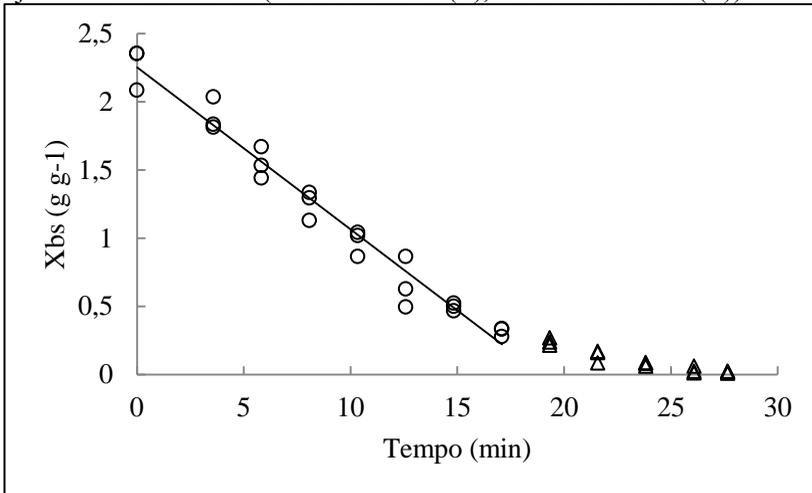
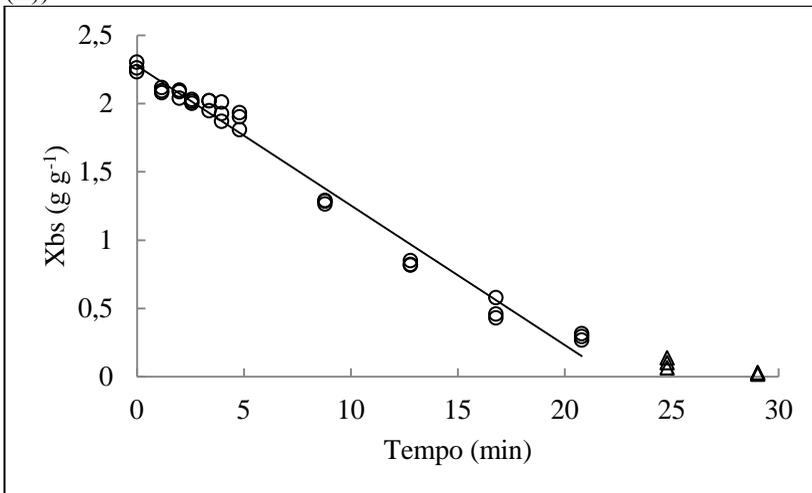


Figura 30 - Dados experimentais da variação da X_{bs} com o tempo para secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, ajustados linearmente. (Taxa constante (\circ), Taxa decrescente (Δ)).



O período de taxa decrescente também é observado nas Figuras 29 e 30, a umidade é reduzida lentamente, pois a maior parte da água livre foi perdida no período de taxa constante. Neste período, a energia necessária para a vaporização da água é inferior à energia térmica convertida pelas micro-ondas. Assim, a temperatura local pode elevar-se acima da temperatura de ebulição da água na pressão do interior da câmara, mesmo estando sob vácuo. O mesmo efeito foi relatado por Mousa e Farid (2002) no estudo da secagem de bananas por micro-ondas a vácuo.

O aumento da temperatura ao final da secagem pode ser verificado nas Figuras 31 e 32, as quais apresentam a evolução temporal da temperatura média das amostras de banana durante todos os processos de secagem por micro-ondas.

Figura 31 - Evolução temporal da temperatura média das amostras de banana durante os processos de secagem por MV. (MV-400 W (×), MV-700 W (Δ), MV-1000 W (□)).

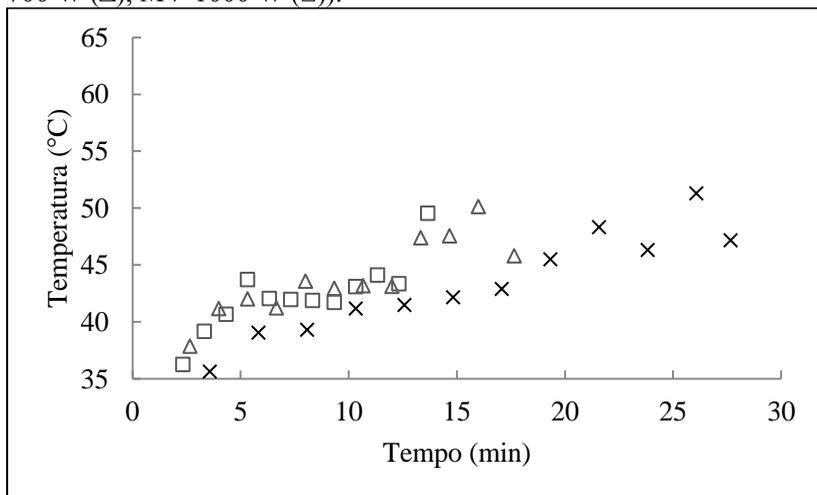
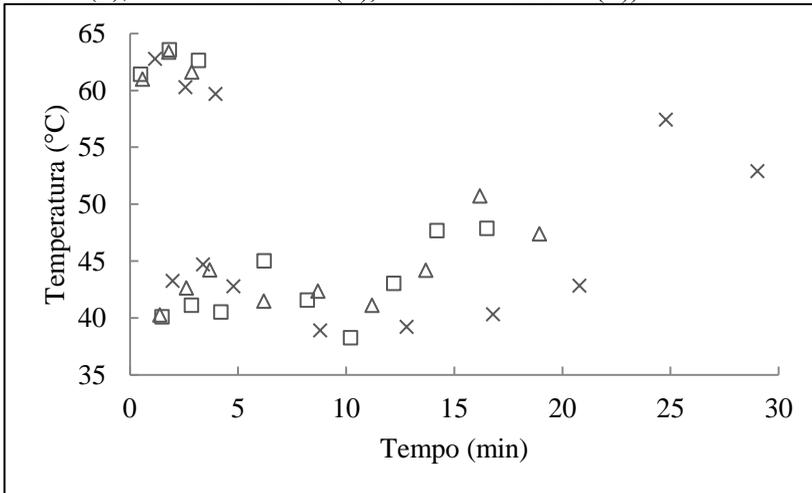


Figura 32 - Evolução temporal da temperatura média das amostras de banana durante os processos de secagem por MVMFD. (MVMFD-400 W (×), MVMFD-700 W (Δ), MVMFD-1000 W (□)).



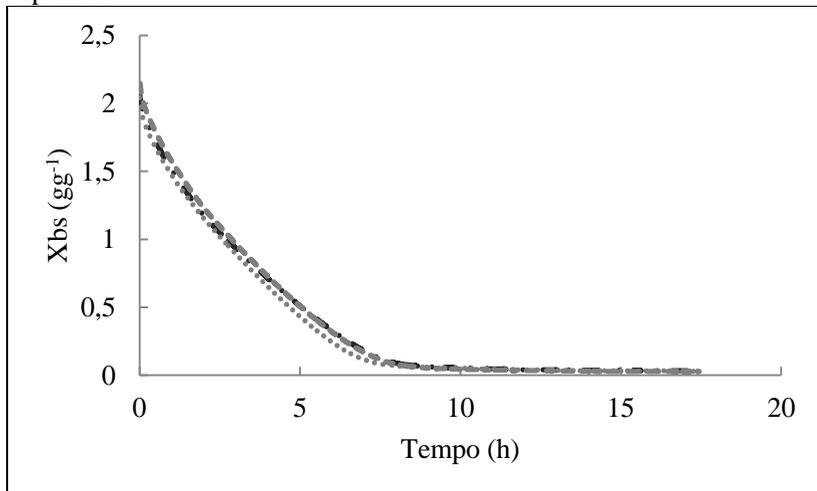
No processo MVMFD os pulsos acarretam na diminuição da pressão do sistema, ocasionando a redução da temperatura das amostras resultado do resfriamento evaporativo (Figura 32), aproximando-a da temperatura de saturação da água na pressão da câmara, pois este é um processo isoentálpico. A quantidade de vapor gerado é estritamente dependente da diferença de temperatura entre os dois instantes, antes e após a decompressão do sistema. O vapor gerado flui no interior do produto, que possui comportamento viscoelástico. Nesse estágio ocorre a formação dos poros, que influenciará a textura do produto desidratado. Este comportamento também foi observado por Louka e Allaf (2002) quando estudaram a desidratação de batata por um processo de texturização chamado e decompressão súbita controlada (DIC), que é um processo que envolve o tratamento sob uma alta pressão, seguido por um rápida decompressão para o vácuo, juntamente com uma fase de secagem.

Na Tabela 7 observa-se que a_w para as amostras desidratadas com o forno na potência de 400 W foram menores ao final da secagem que as amostras tratadas nas maiores potências, pois no período de taxa decrescente de secagem (final da secagem) a potência emitida foi menor, logo demorou maior tempo para a temperatura local elevar-se acima da temperatura de ebulição da água, acarretando em um produto mais seco.

Deste modo, para obter um processo com maior taxa de secagem e menores valores de a_w e X_{bs} do produto, pode ser sugerido uma aplicação de uma maior potência durante a etapa de secagem a taxa constante combinado a uma menor potência no período sob taxa decrescente, evitando o sobreaquecimento e a carbonização do produto. Esse processo é interessante, pois além de tornar um processo rápido, quanto menor o valor de a_w ($a_w < 0,3$) atinge-se a zona de absorção primária, em que as moléculas de água estão fortemente ligadas ao alimento, não podendo ser utilizada para dissolver componentes do alimento, o que leva as reações a terem velocidades próximas de zero e não desenvolvimento de micro-organismos.

A Figura 33 apresenta a evolução temporal da umidade em base seca das amostras em triplicata de banana durante o processo de secagem por liofilização (LL). Os dados experimentais registados pelo sistema apresentaram uma boa reprodutibilidade.

Figura 33 - Evolução temporal da umidade em base seca das amostras de banana durante o processo de secagem por liofilização, realizada em triplicata.



As bananas *in natura* apresentaram umidade em base seca média (\pm desvio padrão) de $2,3678 \pm 0,0844\ g\ g^{-1}$ e ao final do processo LL este valor foi reduzido para $0,0311 \pm 0,0029\ g\ g^{-1}$. A atividade de água inicial média (\pm desvio padrão) foi de $0,980 (\pm 0,005)$ e ao final do processo atingiu $0,224 \pm 0,019$. O tempo de processo foi de

aproximadamente 1050 min, sendo cerca de 4 h necessárias ao congelamento e cerca de 13,5 h dedicadas ao processo de secagem.

As amostras liofilizadas LC apresentaram umidade em base seca média (\pm desvio padrão) de $0,0241 \pm 0,0055$ g g⁻¹ atividade de água média de $0,241 (\pm 0,006)$.

A secagem MV com potência nominal de 400 W reduziu a a_w e a Xbs para valores inferiores aos obtidos pela liofilização. Na comparação do tempo do processo utilizando micro-ondas e o liofilizador, observa-se uma redução de 98% e 99% na potência nominal de 1000 W para os processos MVMFD e MV, respectivamente.

Zotarelli et al. (2012) estudaram a secagem de bananas por CMFD (*convective multi-flash drying*), secagem convectiva a vácuo e secagem convectiva, obtendo tempo de processo de aproximadamente de 150, 450 e 800 min, respectivamente, bem superiores aos obtidos pela secagem MV e MVMFD. As bananas secas por CMFD apresentaram valores próximos de a_w ($0,276 \pm 0,015$), e valores maiores para Xbs ($0,29 \pm 0,01$ g g⁻¹), quando comparadas com as bananas secas por micro-ondas.

Segundo a Resolução do Conselho Nacional de Normas e Padrões para Alimentos (CNNPA) n^o 12/1978, a umidade máxima permitida para a comercialização de frutas secas é de 25% (em base úmida), ou seja, $0,33$ g g⁻¹ em base seca (ANVISA, 1978). Desta forma, todos os processos de secagem por micro-ondas apresentaram umidade inferiores, podendo ser comercializadas no Brasil.

Os dados experimentais obtidos para a secagem de banana por MV, MVMFD e LL a diferentes potências, foram ajustados aos modelos empíricos de Lewis e Page. A Tabela 9 apresenta os valores dos parâmetros ajustados aos dados experimentais, o coeficiente de correlação (R^2) deste ajuste e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE). O ajuste da equação de Page foi o que apresentou os melhores valores do R^2 ($\geq 0,990$) e do RMSE. Entretanto, embora os modelos utilizados representem matematicamente o processo, eles não descrevem os fenômenos físicos envolvidos no mesmo.

As Figuras 34 e 35 apresentam os ajustes dos dados da curva de secagem das fatias de banana ao modelo de Page para secagem MV e MVMFD a 400 W. Essas figuras são meramente ilustrativas e as secagens MV e por MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, 700 W e 1000 W, e LL ajustadas ao modelo de Page estão apresentadas no Apêndice D.

Tabela 9 - Parâmetros e desempenho dos modelos de Lewis e de Page ajustados aos dados experimentais da secagem pelos processos MV e MVMFD.

Condições de secagem	Modelo	Parâmetro	R ²	RMSE
MV-400 W	Lewis	$K_L=0,1047$	0,972	0,1267
	Page	$K_p=0,0409$ $n=1,3824$	0,999	0,0312
MV-700 W	Lewis	$K_L=0,1301$	0,946	0,1662
	Page	$K_p=0,0407$ $n=1,5429$	0,998	0,0374
MV-1000 W	Lewis	$K_L=0,2029$	0,947	0,1817
	Page	$K_p=0,0701$ $n=1,6005$	0,996	0,0492
MVMFD-400 W	Lewis	$K_L=0,0714$	0,938	0,2138
	Page	$K_p=0,0150$ $n=1,6249$	0,994	0,0655
MVMFD-700 W	Lewis	$K_L=0,1042$	0,894	0,2965
	Page	$K_p=0,0169$ $n=1,9055$	0,994	0,0710
MVMFD-1000 W	Lewis	$K_L=0,1193$	0,907	0,2707
	Page	$K_p=0,0223$ $n=1,8449$	0,990	0,0937
LL	Lewis	$K_L=0.0050$	0,988	0,0584
	Page	$K_p=0.0026$ $n=1.1160$	0,992	0,0496

Figura 34 - Ajuste do modelo de Page para as amostras de banana durante a secagem MV com potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W. Experimental (○), Page (—).

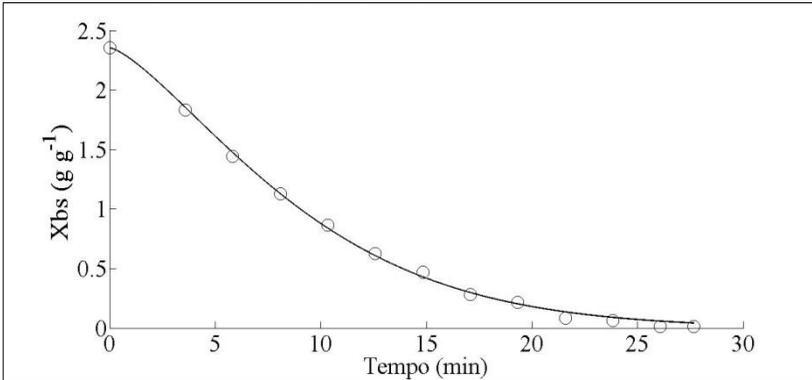
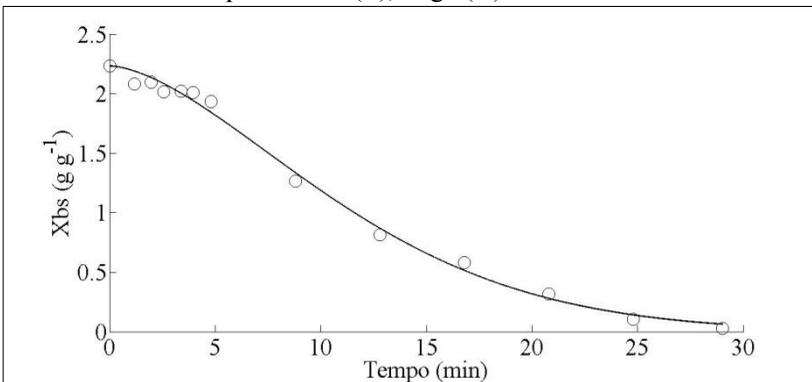


Figura 35 - Ajuste do modelo de Page para as amostras de banana durante a secagem MVMFD com potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W. Experimental (○), Page (—).



4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

4.3.1 Microscopia eletrônica de varredura e estereomicroscópio

Nas Figuras 36 a 41 são apresentadas as micrografias com ampliação de 20 e 50 vezes das amostras fraturadas de bananas secas por MV (400 W, 700 W, 1000 W), por MVMFD (400 W, 700 W e 1000 W) e por LL e LC.

As amostras secas por MVMFD apresentaram maior espaçamento intercelular (maiores poros), semelhantemente às amostras comerciais liofilizadas. Por outro lado, as amostras de banana secas por MV foram semelhantes às amostras secas por LL, apresentando menores espaços intracelulares (pequenos poros). A variação da potência nominal do forno de micro-ondas, conforme as imagens das Figuras 35 a 40, não afetaram a estrutura interna das bananas.

A secagem por micro-ondas promove o aquecimento volumétrico e desta forma vapores são formados no interior do produto, gerando um gradiente interno de pressão, o qual força a saída da água (ZHANG et al., 2006). Fica evidente que na secagem utilizando micro-ondas como fonte de aquecimento o encolhimento dos materiais alimentares é amenizado, quando comparado aos processos de secagem tradicionais.

A liofilização tende a preservar a estrutura do produto, ao passo que o processo de secagem por ciclos de aquecimento pulsos de vácuo tende a expandir a amostra (ZOTARELLI et al., 2012).

Os mesmos comportamentos obtidos pela análise de MEV, podem ser observados quando analisadas as Figuras 42 e 43 que apresentam as imagens do estereomicroscópio da superfície e da fratura das amostras de bananas secas por MV, MVMFD, LL e LC. Fica evidente que o processo de ciclos de aquecimento pulsos de vácuo (MVMFD) causou uma expansão na estrutura do produto, formando maior espaçamento intercelular (maiores poros), resultados semelhantes foram obtidos por Zotarelli et al. (2012), na secagem convectiva de banana e manga com e sem múltiplos ciclos de aquecimento com pulso de vácuo (CMFD).

Figura 36 - Imagens de MEV com ampliação de 20 vezes para bananas secas por MV a 400 W (1a, 2a e 3a), a 700 W (1b, 2b e 3b) e a 1000 W (1c, 2c e 3c).

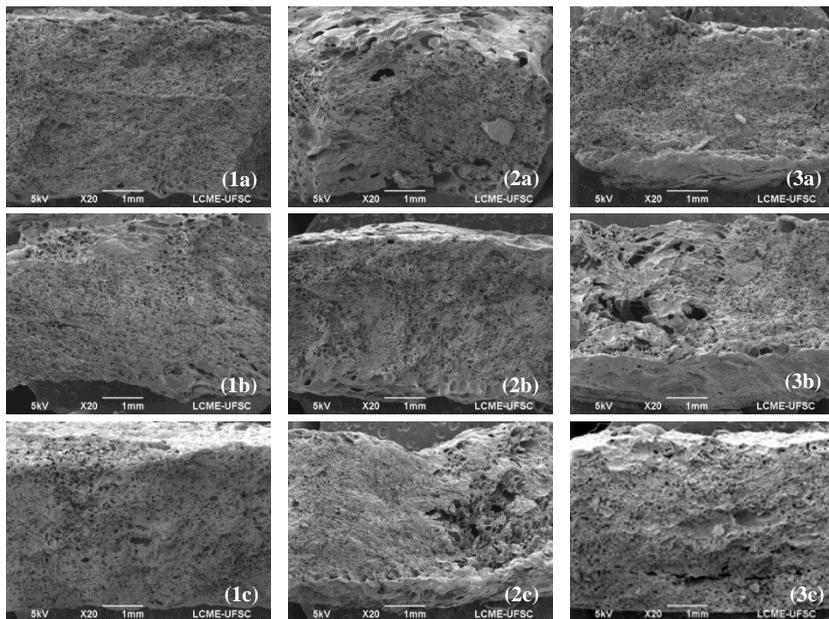


Figura 37 - Imagens de MEV com ampliação de 20 vezes para bananas secas por MVMFD a 400 W (1a, 2a e 3a), a 700 W (1b, 2b e 3b) e a 1000 W (1c, 2c e 3c).

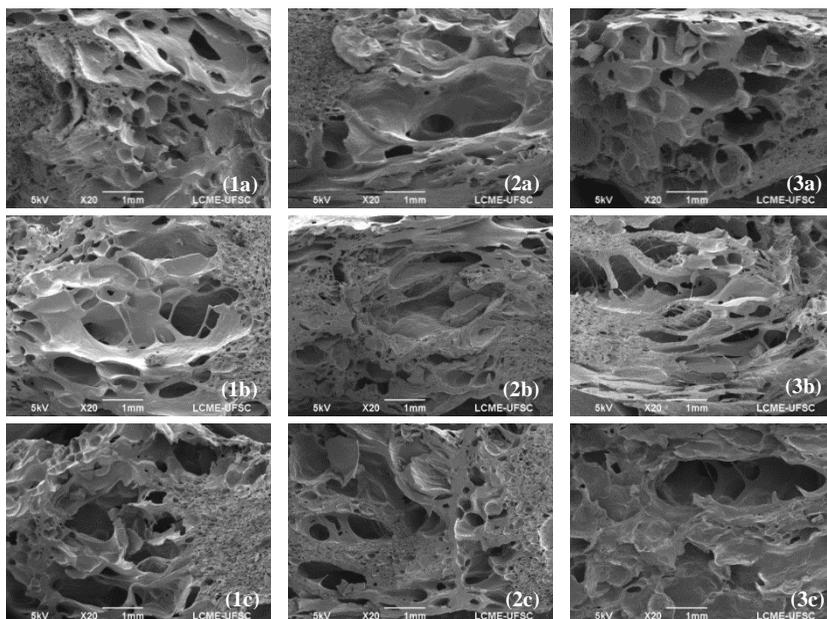


Figura 38 - Imagens de MEV com ampliação de 50 vezes para bananas secas por MV a 400 W (1a, 2a e 3a), a 700 W (1b, 2b e 3b) e a 1000 W (1c, 2c e 3c).

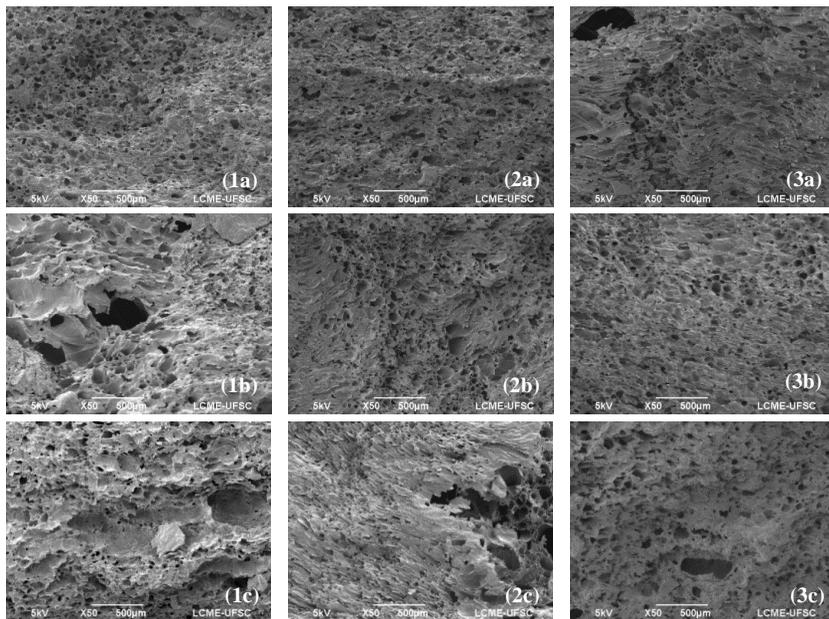


Figura 39 - Imagens de MEV com ampliação de 50 vezes para bananas secas por MVMFD a 400 W (1a, 2a e 3a), a 700 W (1b, 2b e 3b) e a 1000 W (1c, 2c e 3c).

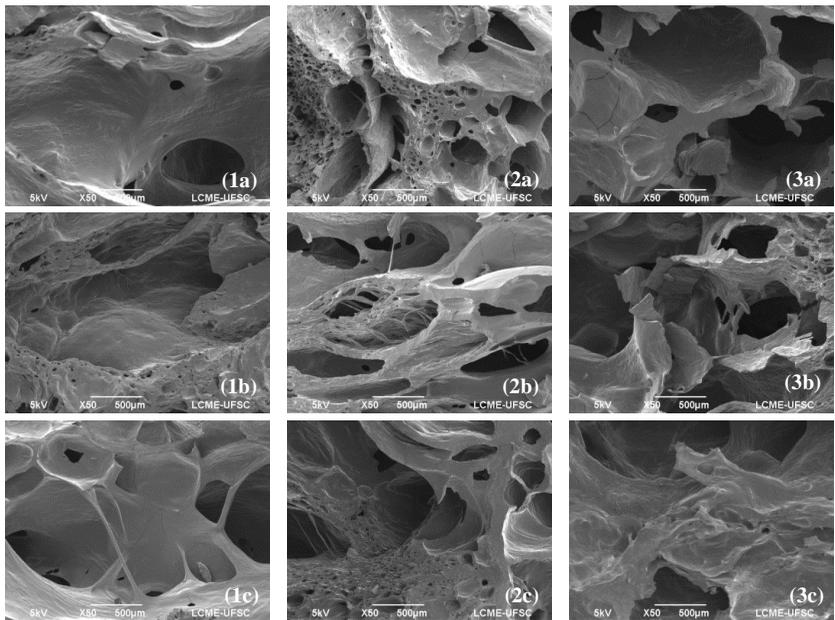


Figura 40 - Imagens de MEV com ampliação de 20 vezes para bananas secas LL (1a, 2a e 3a) e LC (1b, 2b e 3b).

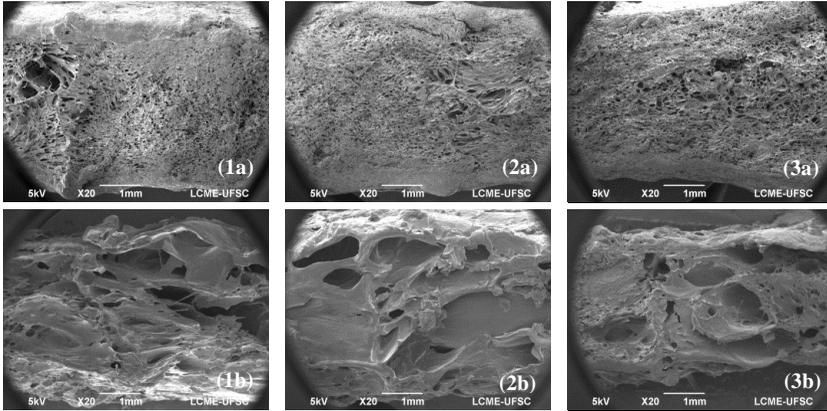


Figura 41 - Imagens de MEV com ampliação de 50 vezes para bananas secas LL (1a, 2a e 3a) e LC (1b, 2b e 3b).

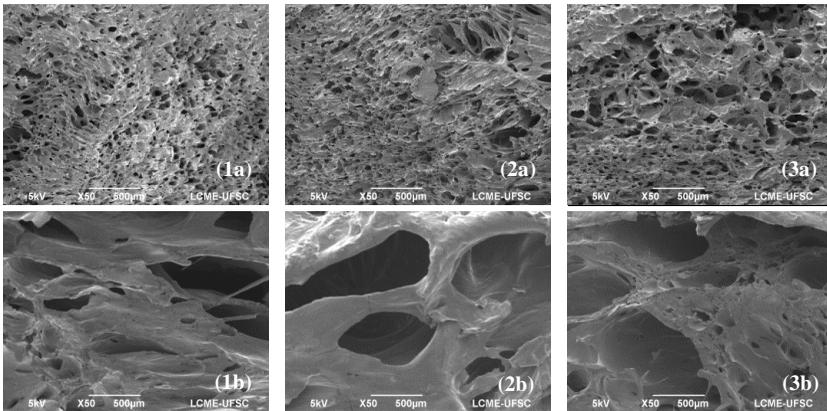


Figura 42 - Imagens do estereomicroscópio de amostras de banana secas por MV a 400 W (1), 700 W (2) e 1000 W (3) e por MVMFD a 400 W (4), 700 W (5) e 1000 W (6). (a) superfície da amostra (b) fratura da amostra.

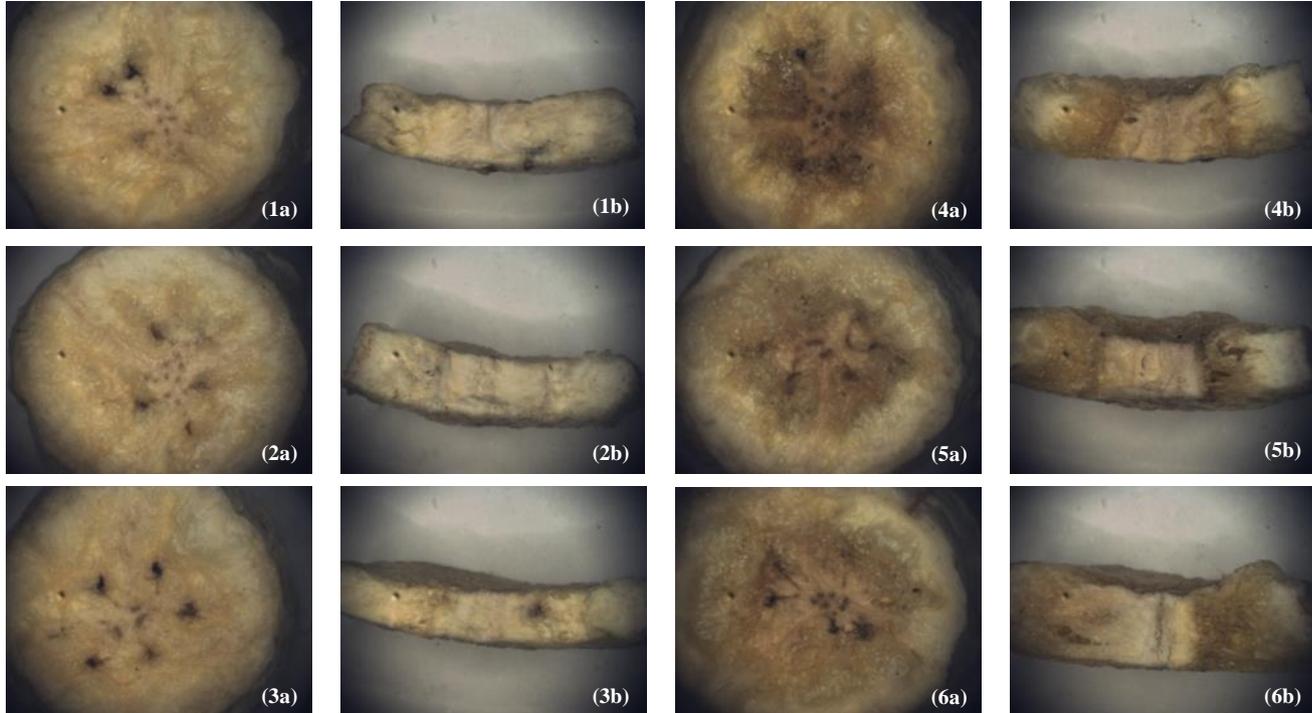
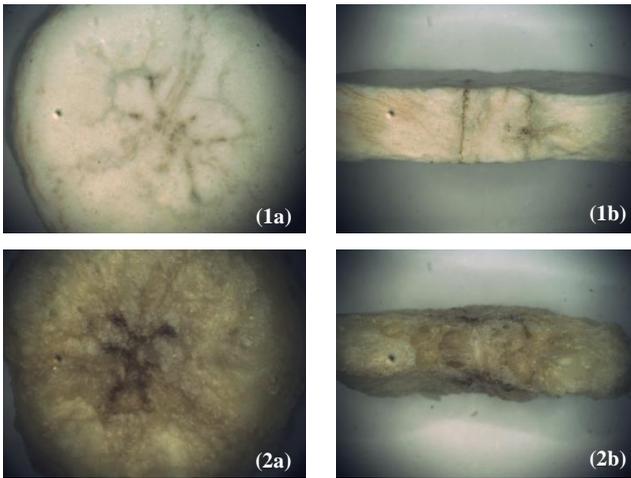


Figura 43 - Imagens do estereomicroscópio de amostras de banana (LL) (1) e LC (2). (a) superfície da amostra (b) fratura da amostra.



4.3.2 Ensaios mecânicos

Nas Figuras 44 a 46 estão apresentados os dados da força desenvolvida em função da penetração relativa da sonda (“*probe*”) na amostra (até 70% da espessura inicial) para os ensaios com amostras obtidas por LC, LL, MV e MVMFD.

As amostras obtidas dos processos LC, LL e MVMFD apresentaram comportamentos semelhantes entre si, com variação relativa da força de penetração caracterizada pelos picos presentes nas curvas de força x deformação. Esse tipo de curva é característico de produtos crocantes.

Segundo Scaman e Durance (2005), uma textura crocante é obtida por um tecido que consiste em cavidades de ar cercadas por uma fase estrutural quebradiça. No presente estudo, estas estruturas típicas foram observadas nas imagens das amostras secas por LC e por MVMFD (nas três potências do forno) obtidas pelo MEV e pelo estéreo microscópio (Figuras 37, 39 a 43).

A similaridade no comportamento das curvas de força aplicada vs penetração relativa ocorreu para a amostra LC e para LL, no entanto percebe-se que há maiores picos para amostras LC, indicando um produto com uma estrutura mais quebradiça e com maior crocância.

Figura 44 - Dados força aplicada vs penetração relativa para as amostras obtidas por LC (—) e LL (—).

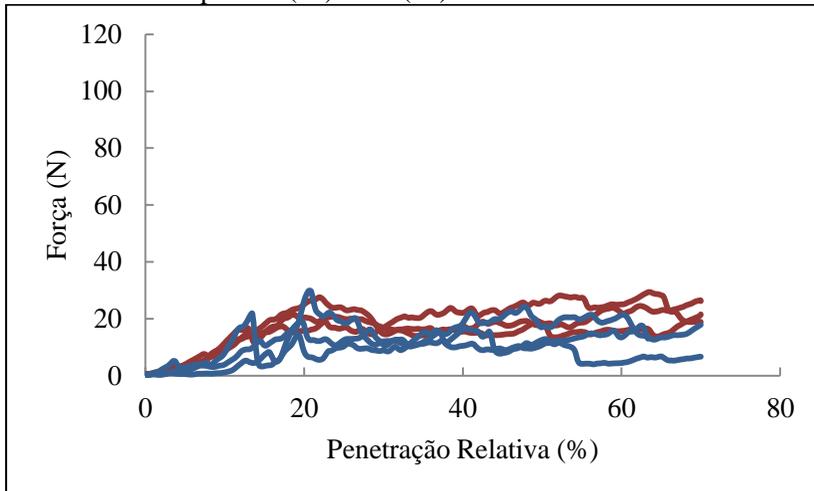


Figura 45 - Dados força aplicada vs penetração relativa para as amostras obtidas por MV em diferentes potências. MV-400 W (—), MV-700 W (—), MV-1000 W (—).

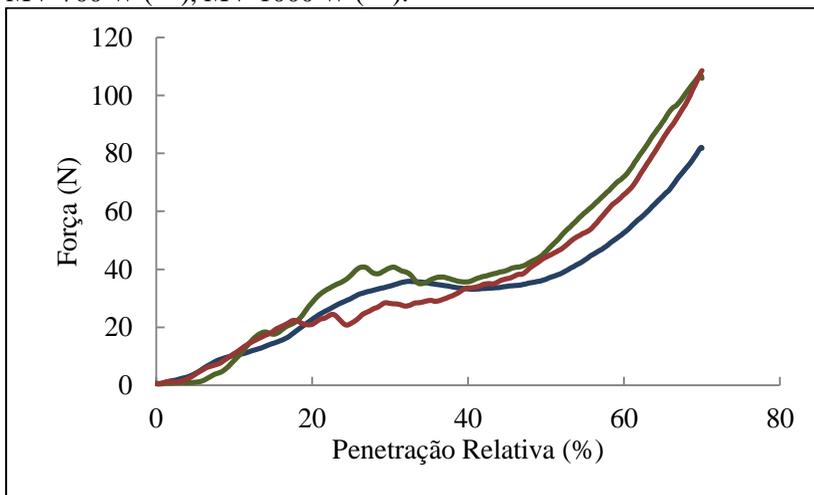
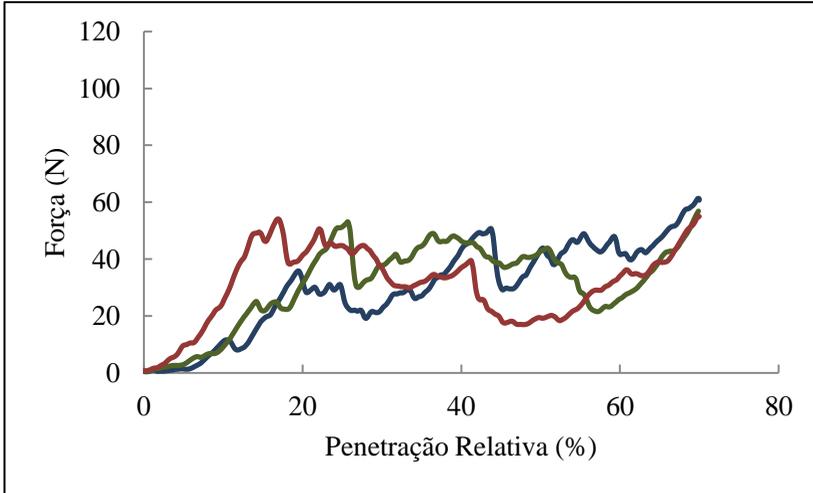


Figura 46 - Dados força aplicada vs penetração relativa para as amostras obtidas por MVMFD em diferentes potências. MVMFD-400 W (—), MVMFD-700 W (—), MVMFD-1000 W (—).



Por outro lado, as amostras secas por MV (nas três potências do forno) não apresentaram grandes variações relativas da força aplicada a cada posição penetrada na amostra, o que é um indicativo de uma estrutura compacta. Assim, na comparação deste teste mecânico aplicado às amostras obtidas por MV e MVMFD, fica evidente que os múltiplos aquecimentos com pulsos de vácuo alteram a microestrutura da banana durante a secagem, resultando em uma matriz porosa potencialmente crocante, o mesmo comportamento foi observado por Zotarelli et al. (2012), na comparação entre secagem convectiva de banana com e sem múltiplos ciclos de aquecimento com pulso de vácuo (CMFD).

4.3.3 Propriedades físicas

4.3.3.1 Massa específica aparente e porosidade

Na Tabela 10 está apresentado o valor médio (\pm desvio padrão) da massa específica aparente (ρ_{ap}) e da porosidade (ε) para a banana *in natura* e para os produtos obtidos pelos diferentes métodos de secagem.

A ρ_{ap} da banana prata *in natura* foi de $1,039 \pm 0,0111 \text{ g cm}^{-3}$ próxima à massa específica da água, devido ao seu alto teor de umidade,

o mesmo resultado foi obtido por (RAHMAN, 2008). A ε da banana prata *in natura* foi de $11,6 \pm 1,19\%$, segundo Krokida e Maroulis (1997) a ε da banana *in natura* varia bastante podendo chegar a valores de 10%.

Nota-se que o modo de secagem exerceu influência sobre o valor da ρ_{ap} , isso também foi observado por Krokida e Maroulis (1997).

Tabela 10 - Densidade aparente e porosidade para bananas *in natura* e secas com diferentes potências por MV e MVMFD, bananas LL e LC.

Secagens	ρ_{ap} (g cm ⁻³)	ε (%)
<i>In Natura</i>	1,0396 ^d ($\pm 0,0112$)	11,6 ^a ($\pm 1,2$)
MV-400 W	0,7599 ^b ($\pm 0,0400$)	39,2 ^b ($\pm 7,1$)
MV-700 W	0,7724 ^b ($\pm 0,0272$)	47,6 ^{cd} ($\pm 4,5$)
MV-1000 W	0,7712 ^b ($\pm 0,0276$)	43,4 ^{bc} ($\pm 5,4$)
MVMFD-400 W	0,6983 ^c ($\pm 0,0215$)	52,5 ^{de} ($\pm 3,5$)
MVMFD-700 W	0,6925 ^c ($\pm 0,0137$)	59,2 ^f ($\pm 5,4$)
MVMFD-1000 W	0,6617 ^c ($\pm 0,0340$)	55,3 ^{ef} ($\pm 4,5$)
LL	0,6785 ^b ($\pm 0,0318$)	51,2 ^{de} ($\pm 5,4$)
LC	0,4945 ^a ($\pm 0,0630$)	66,1 ^g ($\pm 5,2$)

Segundo Krokida e Maroulis (1997) a ρ_{ap} da banana na secagem por micro-ondas é de aproximadamente $1,7 \text{ g cm}^{-3}$, sendo maior que as bananas *in natura*. As amostras submetidas à secagem sob vácuo apresentaram uma redução na ρ_{ap} entre 55 a 61 %. A inclusão do vácuo ao processo diminui o valor desta propriedade, uma vez que a diferença de pressão imposta pelo vácuo pode causar uma expansão do material (LIN et al., 1998). Logo o mesmo comportamento pode ser esperado quando analisado a ε das bananas secas por MV que foram de 39,2% a 47,6%, valores superiores ao obtidos por Krokida e Maroulis (1997) quando estudaram a secagem de bananas por micro-ondas e obtiveram ε de 25%.

Segundo Saca e Lozano (1992), *explosion-puffing* é uma alternativa para uma secagem rápida e para produção de bananas desidratadas com a formação de uma estrutura mais porosa, obtendo ε de 46,8%, valores próximos aos obtidos pela secagem MV.

A secagem MVMFD apresentou menor ρ_{ap} quando comparada com as secas por MV, isso se deve ao fato das amostras apresentarem grandes poros (espaços intercelulares), resultados dos múltiplos ciclos de aquecimento e pulso de vácuo. Consequentemente, a ε da amostra MVMFD foi entre 20% e 34% maior que a ε da amostra seca apenas pelo processo MV, quando comparados com as mesmas potências de

processo. A variação da potência nominal do forno de micro-ondas, não refletiu na alteração do comportamento da ρ_{ap} e ε das bananas.

A porosidade dos materiais liofilizados é elevada quando comparada a outros processos de desidratação, podendo variar entre 80-90% (KROKIDA; MAROULIS, 1997). As secagens LL e LC apresentaram porosidade de 51% e 66%, respectivamente, valores inferiores aos encontrados na literatura, isso provavelmente se deve ao tipo de banana utilizado, o grau de maturação da banana e principalmente ao processo de liofilização empregado.

Apesar da estrutura interna da banana seca por MVMFD e LC serem semelhantes, a ρ_{ap} da banana liofilizada é menor e, conseqüentemente, apresenta maior ε .

Bananas secas por MVMFD apresentam estrutura internas bem diferentes da LL, no entanto apresentaram valores de ρ_{ap} e ε muito próximos, mostrando que é possível produzir bananas porosas no campo de micro-ondas.

4.3.3.2 Cor

O valor médio (\pm desvio padrão) para cada parâmetro de cor obtido (L^* , a^* e b^*) pelas diferentes técnicas de secagem está apresentado na Tabela 11.

Observa-se que, para todas as condições de secagem, a banana seca apresentou coloração mais escura que a fruta *in natura*, indicado pela diminuição do parâmetro L^* , o qual apresentou valores entre 37,35 ($\pm 3,87$) e 68,96 ($\pm 5,38$).

Na Figura 47 e Tabela 11 fica evidente que o as amostras liofilizadas apresentam menor escurecimento, devido à temperatura de processo ser mais baixas, desta forma, os valores de L^* foram mais próximos da *in natura*.

A maior potência de operação do forno (1000 W) resultou em um menor escurecimento quando comparado ao mesmo processo em potências inferiores (400 e 700 W). Resultados similares foram encontrados por Alibas (2007), que examinou a diferença da cor na secagem de folhas de urtiga por micro-ondas em quatro níveis de potência (500, 650, 750 e 850 W) e obteve a menor alteração da cor na maior potência (850 W). O aumento da potência geralmente diminui o tempo de processo, mantendo o produto mais próximo à coloração inicial, conforme corroborado por Sumnu et al. (2005).

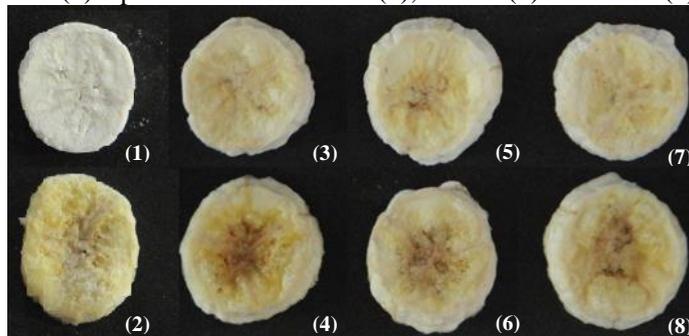
Esta alteração de cor também é evidenciada quando se compara o processo MVMFD ao processo MV em uma mesma potência. No primeiro, a amostra permanece em maiores temperatura por mais tempo, resultando em um maior escurecimento (menor valor de L^*) e aumento da tonalidade vermelha (maior parâmetro a^*) e amarela (maior valor de b^*).

A aplicação de maior potência (1000 W), quando comparadas com o mesmo processo de secagem, resultou em maiores valores do parâmetro a^* e b^* , amostras mais avermelhadas e amareladas.

Ao analisar a diferença de cor total (ΔE^*), os processos que mais se aproximam da banana *in natura* são os processos de liofilização, MV e MVMFD na potência de 1000 W. A cor geralmente conduz a preferência do consumidor na escolha de um alimento, destaca-se como um atributo decisivo, visto que, representa a qualidade que mais facilmente desperta a atenção do consumidor, pois o primeiro contato é feito através deste atributo (BOBBIO; BOBBIO, 2001). Dessa forma é de extrema importância a análise sensorial para a escolha do melhor processo quanto à preferência e aceitação do produto frente ao consumidor.

Tabela 11 - Parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) da banana *in natura* e seca para todas as condições de secagem.

Secagens	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
MV-400 W	43,87 ^b ($\pm 5,40$)	4,26 ^b ($\pm 0,57$)	23,26 ^{cb} ($\pm 2,54$)	30,81 ^d ($\pm 5,49$)
MVMFD-400 W	37,35 ^a ($\pm 3,87$)	4,81 ^{cd} ($\pm 0,56$)	24,40 ^{cd} ($\pm 1,94$)	37,17 ^e ($\pm 3,96$)
MV-700 W	40,71 ^{ab} ($\pm 5,49$)	4,07 ^b ($\pm 0,60$)	21,68 ^b ($\pm 2,86$)	34,13 ^e ($\pm 5,78$)
MVMFD-700 W	39,94 ^a ($\pm 5,84$)	4,88 ^{cd} ($\pm 0,67$)	24,44 ^{cd} ($\pm 3,46$)	34,71 ^e ($\pm 5,91$)
MV-1000 W	50,50 ^c ($\pm 3,95$)	5,29 ^{de} ($\pm 0,78$)	27,97 ^e ($\pm 3,56$)	24,31 ^c ($\pm 3,55$)
MVMFD-1000 W	48,21 ^c ($\pm 5,39$)	5,53 ^e ($\pm 0,84$)	28,81 ^e ($\pm 4,98$)	26,91 ^c ($\pm 4,81$)
LL	68,96 ^e ($\pm 5,38$)	1,19 ^a ($\pm 0,09$)	12,73 ^a ($\pm 1,40$)	15,93 ^b ($\pm 2,38$)
LC	63,80 ^d ($\pm 3,10$)	4,47 ^{bc} ($\pm 0,69$)	28,07 ^e ($\pm 2,18$)	11,09 ^a ($\pm 2,66$)
<i>In Natura</i>	74,42 ^f ($\pm 2,30$)	4,43 ^{bc} ($\pm 0,93$)	26,48 ^{de} ($\pm 2,38$)	0,00

Figura 47 - Fotografia das bananas secas por liofilização no laboratório (1), comercial liofilizada (2), por MV – 400 W (3), 700 W (5), 1000 W (7) e por MVMFD - 400 W (4), 700 W (6) e 1000 W (8).

5 CONCLUSÕES

É possível adaptar o forno de micro-ondas doméstico para utilizar vácuo em conjunto com o sistema giratório, o que possibilitou a realização dos experimentos de secagem por MV e MVMFD. O forno de micro-ondas não apresentou problemas de vazamento de ondas eletromagnéticas, mostrando-se segura a sua utilização.

As cinéticas de secagem por MV e MVMFD apresentaram 3 períodos de secagem bem definidos, período de aquecimento, período de secagem rápida (taxa constante) e período de taxa decrescente de secagem.

A potência de 1000 W apresentou menor tempo de processo e os parâmetros de cor foram mais preservados, tornando esta condição interessante para a secagem da banana. Com relação à textura, microestrutura, densidade aparente e porosidade não houve diferença das mesmas com relação a alteração da potência.

A combinação de potências durante a secagem pode ser uma alternativa para obter um processo com maior taxa de secagem e menores valores de a_w e X_{bs} do produto, pode ser sugerido uma aplicação de uma maior potência durante a etapa de secagem a taxa constante combinado a uma menor potência no período sob taxa decrescente, evitando o sobreaquecimento e a carbonização do produto.

As micrografias mostraram a formação de maiores poros nas amostras MVMFD, quando comparado com o processo de MV, além de maior porosidade (20% a 34% maior) e menor densidade aparente. Isso implicou em maior irregularidade na curva de força x penetração (maior número de picos) das amostras secas por MVMFD, obtida no teste de penetração (*puncture test*), indicando maior crocância do produto final.

É possível alterar a textura das frutas desidratadas através da aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo em campo de micro-ondas. O processo de secagem combinando o aquecimento por micro-ondas e sucessivos pulsos de vácuo pode ser competitivo com o processo de liofilização para a produção de frutas desidratadas crocantes, pois pode apresentar frutas com umidade, atividade de água e propriedades mecânicas semelhantes às observadas para frutas liofilizadas comerciais, e com redução de 99% no tempo de processo.

No entanto, dependendo das características da fruta, esta pode passar por deformações irreversíveis, pois o aquecimento das micro-ondas ocorre em todo o material, o que gera um gradiente de pressão interna, resultando em força para a saída da água. Deste modo, são

necessários estudos detalhados das condições de processo e das características da matéria-prima para definir a aplicabilidade e as limitações do processo. Bem como análise sensorial, pesquisas envolvendo detalhes da ampliação de escala e dos custos operacionais para a produção industrial. No entanto, os resultados apresentados neste trabalho indicam que é possível produzir frutas secas com qualidade diferenciada, a preços competitivos, usando a tecnologia desenvolvida.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao estudo do processo de secagem de MV e MVMFD as principais sugestões para trabalhos futuros são:

- Adaptação de um novo equipamento para que seja possível o acoplamento de uma balança, ou uma célula de carga para o monitoramento da massa das amostras sem que haja a interrupção do processo de secagem;
- Acoplamento de um sensor de fibra óptica e ou infravermelho, a fim de monitorar o perfil de temperatura durante a secagem;
- Construção de um equipamento piloto para a análise da viabilidade econômica e custos energéticos do processo;
- Comparar os processos MV e MVMFD em termos de eficiência energética;
- Análise das propriedades dielétricas do material durante a secagem, para a realização dos cálculos de potência absorvida pelo material, bem como modelagem da transferência de massa e de calor no produto;
- Estudar a cinética do encolhimento e modelagem da mesma;
- Avaliar a cinética de reidratação do material;
- Estudar a variação da potência emitida durante as etapas de secagem;
- Análise sensorial para avaliar as características e atributos do produto formado, bem como testes de aceitabilidade e preferência frente a outras frutas desidratadas já consolidadas no mercado;
- Estudos detalhados com outras matérias-primas (como, por exemplo, condimentos e especiarias que podem ser utilizados como insumos para indústrias de alimentos), como condições de processo, característica da matéria-prima, aplicabilidade e as limitações do processo para a mesma.

REFERÊNCIAS

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

ALIBAS, I. Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. **Food Science and Technology**, v.40, p.1445-1451, 2007.

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução - CNNPA nº 12, de 1978**. Frutas secas ou dessecadas. Disponível em: http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/e57b7380474588a39266d63fbc4c6735/RESOLUCAO_12_1978.pdf?MOD=AJPERES. Acessado em 31 de janeiro de 2014.

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução - CNNPA nº 12, de 1978**. Frutas liofilizadas. Disponível em: http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/e57b7380474588a39266d63fbc4c6735/RESOLUCAO_12_1978.pdf?MOD=AJPERES. Acessado em 31 de janeiro de 2014.

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

BAI-NGEW, S.; THERDTHAI, N.; DHAMVITHEE, P. Characterization of microwave vacuum-dried durian chips. **Journal of Food Engineering**, v.104, p.114–122, 2011.

BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; VEJA-MERCADO, H. **Deshidratación de Alimentos**. Zaragoza: Acribia S. A., 2000.

BOBBIO, P.A.; BOBBIO, F.O. **Química do processamento de alimentos**. 3 ed. São Paulo: Varela, 2001.

BORGES, A.L.; SOUZA, L. S. O cultivo da bananeira. **Embrapa mandioca e Fruticultura**, Cruz das Almas, 2004.

CHANDRASEKARAN, S.; RAMANATHAN, S.; BASAK, T. Microwave food processing-A review. **Food Research International**, v.52,p. 243-261, 2013.

METAXAS, C.; MEREDITH, R. J. **Industrial Microwave Heating**. London: Peter Peregrinus, p. 357, 1983.

CHEN, X.D.; MUJUMDAR, A.S. **Drying Technologies in Food Processing**. 1 ed., Oxford: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A.B. **Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio**. 2 ed., Lavras: UFLA, p.785, 2005.

COHEN, J.S.; YANG, T.C.S. Progress in food dehydration. **Trends in Food Science & Technology**, v.6, p. 20-25, 1995.

CRANK, J. **Mathematics of Diffusion**, 2 ed., London: Oxford University Press, 1975.

DARVISHI, H.; AZADBAKHT, M.; REZAEIASL, A.; FARHANG, A. Drying characteristics of sardine fish dried with microwave heating. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.12, p.121–127, 2012.

DATTA, A.K.; ANANTHESWARAN, R.C. **Handbook of Microwave Technology for Food Applications**. New York: Marcel Dekker Inc., 2000.

DROUZAS, A.E.; SCHUBERT, H. Microwave application in vacuum drying of fruits. **Journal of Food Engineering**, v.28, p.203-209,1996.

DUIZER, L. A review of acoustic research for studying the sensory perception of crisp, crunchy and crackly textures. **Trends in Food Science & Technology**, v.12, p.17-24, 2001.

ERLE, U. **The microwave processing of foods**. Cap. 8: Drying using microwave processing. Editado por SHUBERT, H.; REGIER, M. Flórida: CRC Press LLC, v.1, 2005.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.> Acessado em: 20 de janeiro de 2014.

FELLOWS, P.J. **Food Processing Technology: Principles and Practice**, 2 ed., Florida: Woodhead Publishing Ltd, 2000.

FIGIEL, A. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices. **Journal of Food Engineering**, v.94, p.98-104, 2009.

FILLION, L.; HENRY, C.J.K. Nutrient losses and gains during frying: a review. **International Journal of Food Science and Nutrition**, v. 49, p.157-168, 1998.

FOLEGATTI, M.I.S.; MATSUURA, F.C.A.U. Processamento (banana). In: BORGES, A. L.; SOUZA, L. S. (Org.). O cultivo da bananeira. **Embrapa mandioca e Fruticultura**, Cruz das Almas, p.232-244, 2004.

FUNEBO, T.; OHLSSON, T. Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. **Journal of Food Engineering**, v.38, p.353-367, 1998.

GEANKOPLIS, C.J. **Transport Processes and Unit Operations**, 3 ed., New Jersey: Inc. Prentice Hall, 1993.

GIRI, S.K.; PRASAD, S. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. **Journal of Food Engineering**, v.78, p.512-521, 2007.

GOLDBLITH, S.A. Basic principles of microwaves and recent developments. **Advances in Food Research**. v.15, p. 277-301, 1967.

HOLTZ, E.; AHRNÉ, L.; RITTENAUER, M.; RASMUSON, A. Influence of dielectric and sorption properties on drying behaviour and energy efficiency during microwave convective drying of selected food and non-food inorganic materials. **Journal of Food Engineering**. v. 97, p. 144–153, 2010.

HUANG, L.I.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A.S.; LIM, R.X. Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips. **Journal of Food Engineering**, v.103, p.279-284, 2011.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Levantamento sistemático da produção agrícola, 2012. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201202.pdf>. Acessado em: 20 de janeiro de 2014.

KHRAISHEH, M.A.M.; MCMINN, W.A.M.; MAGEE, T.R.A. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. **Food Research International**, v.37 p.497-503, 2004.

KHRAISHEH, M.A.M.; COOPER, T.J.R.; MAGEE, T.R.A. Microwave air drying. Fundamental considerations and assumptions for the simplified thermal calculations of volumetric absorption. **Journal of Food Engineering**, v. 33, p. 207-219, 1997.

KROKIDA, M.K.; MAROULIS, Z.B. Effect of drying method on shrinkage and porosity. **Drying Technology**, v. 15, n. 1, p. 2441-2458, 1997.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A.S. **Advanced drying technologies**. Flórida: Taylor & Francis Group, 2009.

LAURINDO, J.B., PORCIUNCULA, B.D.A.; ZOTARELLI, M.F. Processo de secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) para obtenção de alimentos desidratados crocantes. **Brazilian Patent** PI 017110000045 filed January 24, 2011.

LIN, T.M.; DURANCE, T.D.; SCAMAN, C.H. Characterization of vacuum microwave air and freeze dried carrot slices. **Food Research International**, v.4, p.111-117, 1998.

LOUKA, N.; ALLAF, K. Expansion ratio and color improvement of dried vegetables texturized by a new process “*Controlled Sudden Decompression to the Vacuum*”. application to potatoes, carrots and onions. **Journal of Food Engineering**, v. 65, p. 233-243, 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, p. 3033-3038, 2002.

MAGALHÃES, R.S.; FERNANDES LIMA, R.M.F.; SOUZA H.A. O uso de micro-ondas para determinação de umidade de bauxita. **Revista Escola de Minas**. v.56, p. 255-259, 2003.

MANLEY, J.; LAVER, R. From the eureka moment to the marketplace. **Policy Options**, p. 69-70, 2011.

MASKAN, M. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering**, v.48, p.177-182, 2001.

MASKAN, M. Microwave/air and microwave finish drying of banana. **Journal of Food Engineering**, v.44, p.71-78, 2000.

MATOS, E.H.S.F. Dossiê técnico sobre processamento de frutas desidratadas, sistema Brasileiro de Respostas Técnicas, Brasília: UnB, 2007. Disponível em: <<http://sbtr.ibict.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NDE=>>, Acesso em: 31 de janeiro, 2014.

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

MOUSA, N.; FARID, M. Microwave vacuum drying of banana slices. **Drying Technology**, v. 20, p.2055-2066, 2002.

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**, 3 ed., Florida: CRC/Taylor & Francis, 2006.

NASCENTE, A.S. A Fruticultura no Brasil e o Potencial da utilização de Fruteiras Nativas e Exóticas na Amazônia. Porto Velho: **Embrapa de Pesquisa Agroflorestal de Rondônia**, 2003.

OHLSSON, T.; RISMAN, P.O. Temperature distributions of microwave heating spheres and cylinders. **Journal of Microwave Power**, v. 13, n. 4, p. 303-310, 1978.

OZKAN, I.A., AKBUDAK, B.; AKBUDAK, N. Microwave drying characteristics of spinach. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p.577-583, 2005.

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.

PARKER, K.; VOLLMER, M. Bad food and good physics: the development of domestic microwave cookery. **Physics Education**, v.39, p.82-90, 2004.

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

PBMH e PIF - **Programa Brasileiro para a Modernização da horticultura & Produção Integrada de Frutas**. Normas de Classificação de Banana. São Paulo: CEAGESP, (Documentos, 29), 2006.

PEREIRA, N.R., MARSAIOLI JR.A.; AHRNE'L M. Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. **Journal of Food Engineering**, v.81 p.79-87, 2007.

PEYRE, F.; DATTA, A.; SEYLER, C. Influence of the dielectric property on microwave heating patterns: application to food materials. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v. 32, p. 3-14, 1997.

PINHEIRO, A.C.M.; VILAS BOAS, E.V.B.; ALVES, A.P.; SELVA, M.L. Amadurecimento de bananas 'Maçã' submetidas ao 1-metilciclopropeno. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.29, p.1-4, 2007.

PORCIUNCULA, B.D.A. Desenvolvimento de processo integrado de desidratação e modificação da textura de banana (var. prata) por secagem convectiva e pulsos de vácuo. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Alimentos) Faculdade de Engenharia de Alimentos - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.

PORCIUNCULA, B.D.A.; ZOTARELLI, M.F.; CARCIOFI, B.A.M.; LAURINDO, J.B. Determining the effective diffusion coefficient of water in banana (Prata variety) during osmotic dehydration and its use in predictive models. **Journal of Food Engineering**, v.119, p.490-496, 2013.

POZAR, D.M. **Microwave Engineering**. 4 ed., New York: John Wiley, 2012.

QIAO, F.; HUANG, L.L.; XIA, W.S. A study on microwave vacuum dried re-structured lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) mixed with purple sweet potato (*Ipomoea batatas*) snacks. **Food and Bioprocess Processing**, v. 90, p. 653-658, 2012.

RAHMAN, M.S. **Food Properties Handbook**, Chapter 14: Data and Models of Density, Shrinkage, and Porosity . 2 ed., Florida: CRC Press, 2008.

REMMEN, H.H.J.; PONNE, C.T.; NIJHUIS, H.H.; BARTELS, P.V.; KERKHOF, P.J.A.M. Microwave heating distribution in slabs, spheres and cylinders with relation to food processing. **Journal of Food Science**, v. 61, n. 6, p. 1105-1113, 1996.

ROSA, J.G. Secagem de cenoura (*Daucus carota* L.) em micro-ondas. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Química) – São Carlos – SP, Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR, 2010.

RYYNÄNEN, S.; RISMAN, P.O.; OHLSSON, T. Hamburger composition and microwave heating uniformity. **Journal of Food Science: Food Engineering and Physical Properties**, v. 69, p. 187-196, 2004.

SACA, S.A.; LOZANO, J.E. Explosion puffing of bananas. **International Journal of Food Science and Technology**, v.27, p.419-426, 1992.

SCAMAN, C.H.; DURANCE, T.D. **Emerging Technologies for Food Processing**. London: Elsevier Academic Press, p. 768, 2005.

SCHUBERT, H.; REGIER M. **The Microwave Processing of Foods**. Florida: CRC Press. v.1, 2005.

SEBRAE. **Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas**. Estudo de Mercado. Banana relatório completo, 2008. Disponível em:

<[http://bis.sebrae.com.br/GestorRepositorio/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bsnsf/8E2336FF6093AD96832574DC0045023C/\\$File/NT0003904A.pdf](http://bis.sebrae.com.br/GestorRepositorio/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bsnsf/8E2336FF6093AD96832574DC0045023C/$File/NT0003904A.pdf)>. Acessado em: 20 de janeiro 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.

SHAM, P.W.Y.; SCAMAN, C.H.; DURANCE, T.D. Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment, vacuum level and apple variety. **Journal of Food Science**, v.66, p.1341-1347, 2001.

SILVA, F.A., MARSAIOLI, Jr.A.; MAXIMO, G.J.; SILVA, M.A.A.P.; GONÇALVES, L.A.G. Microwave assisted drying of macadamia nuts. **Journal of Food Engineering**, v.77, p.550–558, 2006.

SILVA, F.A.; MARSAIOLI JR. Aspecto econômico de um processo de secagem de amêndoas de castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) assistida a micro-ondas. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v.5, p.157-167, 2003.

SILVA, S.O. ; SANTOS-SEREJOS, J. A.; Cordeiro, Z.J.M. Variedades In: BORGES, A.L.; SOUZA, L. S. O cultivo da bananeira. **Embrapa mandioca e Fruticultura**, Cruz das Almas, 2004.

SINGH, R.P.; HELDMAN, D.R. **Introduction to Food Engineering**. 4 ed., San Diego: Academic Press, 2009.

SMITH, P.G. **Introduction to Food Process Engineering**. 2 ed., New York: Editorial Springer-Verlag, 2011.

SONG, X.J.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A.S.; FAN, L. Drying characteristics and kinetics of vacuum microwave-dried potato slices. **Drying Technology**, v.27, p.969-974, 2009.

SOUSA, P.H.M.; SOUSA FILHO, M.S.M.; MAIA, G.A.; FIGUEIREDO, R.W.; SOUZA NETO, M.A.; CARVALHO, J.M. Avaliação das Curvas de Secagem e da Alteração de Cor e Textura da Banana Processada por Desidratação Osmótica Seguida de Secagem. **Revista Ciência Agrônômica**, v.34, p. 179-185, 2003.

SULLIVAN, J.F.; CRAIG, J.C.JR. The development of explosion puffing. **Food Technology**, v.38, p. 52-58, 1984.

SUMNU, G; TURABI, E; OZTOP, M. Drying of carrots in microwave and halogen lamp–microwave combination ovens. **Food Science and Technology**, v.38, p.549–553, 2005.

TACO. **Tabela brasileira de composição de alimentos**. NEPA – Núcleo de estudos e pesquisas em alimentos, Campinas:Flamboyant Ltda., 2011.

THERDTHAI, N.; ZHOU, W. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). **Journal of Food Engineering**, v.91, p.482-489, 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 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.

VENKATESH. M.S.; RAGHAVAN. G.S.V. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. **Biosystems Engineering**, v. 88, p.1–18, 2004.

VOLLMER, M. Physics of the microwave oven. **Physics Education**. v. 39, p. 74–81, 2004.

- VON HIPPEL, A. **Dielectrics and Waves**, New York: Wiley, 1954.
- YANG, H.W.; GUNASEKARAN, S. Comparison of temperature distribution in model food cylinders based on Maxwell's equation and Lambert's law during pulsed microwave heating. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 4, p. 445-453, 2004.
- YANG, X.H.; TANG, J. **Advances in bioprocessing engineering**. In: TANG, J.; HAO, F.; LAUT, M. Chapter I: Microwave heating in food processing. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., v.1, p.1-44, 2002.
- ZHANG, J.; ZHANG, M.; SHAN, L.; FANG, Z. Microwave-vacuum heating parameters for processing savory crisp bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) slices. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.885-891, 2007.
- ZHANG, M.; TANG, J.; MUJUMDAR, A.S.; WANG, S. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. **Trends in Food Science & Technology**, v.17, p.524-534, 2006.
- ZLOTORZYNSKI, A. The Application of Microwave Radiation to Analytical and Environmental Chemistry. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, v.25, p. 43-76, 1995.
- 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.08, p.523-531, 2012.

Apêndice A

Verificação da potência do equipamento

A verificação da potência fornecida pelo forno micro-ondas é uma etapa importante na realização dos experimentos de secagem. A verificação foi feita por calorimetria.

Utilizaram-se quatro béqueres de vidro, cada um foi colocado na extremidade da bandeja, local onde as amostras de bananas foram secas. Colocou-se em cada béquer aproximadamente 25 g de água destilada. A água foi aquecida aproximadamente a 60 °C, e mediu-se a variação da temperatura da água submetida a diferentes potências entre 200 W e 1000 W. Para cada potência o experimento foi realizado em triplicata.

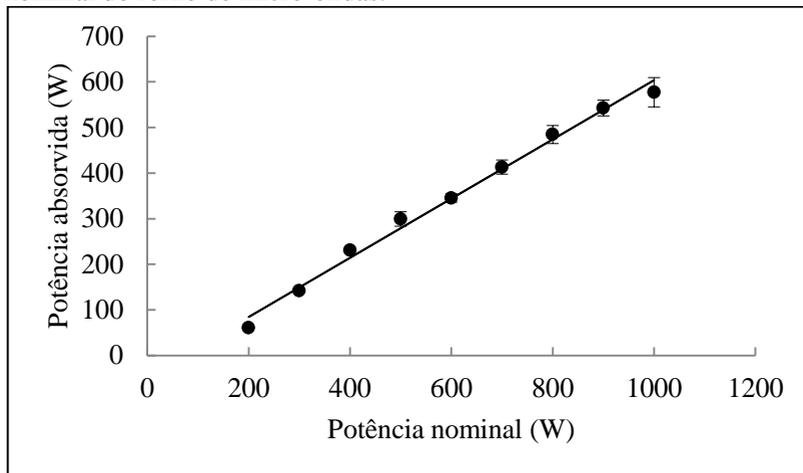
Esta faixa de potência foi escolhida por abranger as potências utilizadas no trabalho. Assumindo que toda a potência fornecida pelo forno micro-ondas foi transformada em energia térmica na água e no vidro, calculou-se a potência absorvida pela amostra (P_{abs}) para cada potência nominal, pela Equação A1:

$$P_{abs} = \frac{m_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} + m_{vidro} \cdot c_{p_{vidro}} \cdot (\Delta T)}{t} \quad (A1)$$

na qual m_{H_2O} é a massa da água, $c_{p_{H_2O}}$ é o calor específico da água, m_{vidro} é a massa do vidro, $c_{p_{vidro}}$ é o calor específico do vidro, ΔT é a variação da temperatura (°C) e t é o tempo.

A Figura A1 apresenta a relação entre a potência nominal e a potência absorvida pela massa de água, nota-se que houve reprodutibilidade da potência nominal pelo equipamento em face da pequena variação da potência absorvida pela água por unidade de tempo para cada potência aplicada. O desvio padrão das amostras (potência absorvida) variou entre 0,7% e 5,5% da potência média absorvida. Com isso, garantiu-se que as condições experimentais foram mantidas constantes para potências programadas iguais. Além disso, a potência absorvida pela massa de água foi diretamente proporcional à potência nominal. Através de regressão linear, os dados foram ajustados a uma reta e o coeficiente de correlação (R^2) foi determinado. O valor de R^2 foi 0,992, indicando que o ajuste linear representa bem os dados experimentais.

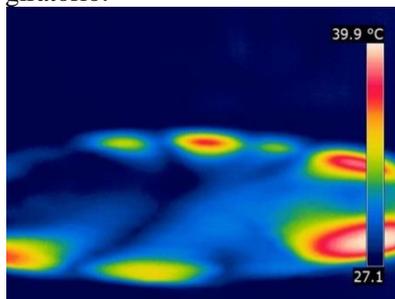
Figura A1 - Potência absorvida pela água em função da potência nominal do forno de micro-ondas.



Importância do sistema giratório

O forno doméstico de micro-ondas foi adaptado para a utilização de vácuo, em conjunto com um sistema giratório, pois umas das principais desvantagens da secagem por micro-ondas é a falta de uniformidade do campo eletromagnético dentro da cavidade do micro-ondas, que pode gerar problemas de aquecimento não uniforme. A Figura A2 apresenta uma imagem termográfica do aquecimento por 10 segundos de uma fina camada de água, sobre um prato de vidro, sem a utilização do prato giratório, podendo observar a não uniformidade do aquecimento por micro-ondas.

Figura A2 - Imagem termográfica do aquecimento da água no micro-ondas sem o prato giratório.



Apêndice B

Dados das cinéticas de secagem

Tabela B1 - Dados em triplicata da evolução temporal da Xbs para secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W.

Tempo (min)	Xbs ₁ (gg ⁻¹)	Xbs ₂ (gg ⁻¹)	Xbs ₃ (gg ⁻¹)
0,00	2,3543	2,3543	2,0862
3,58	2,0358	1,8351	1,8135
5,83	1,6700	1,4413	1,5332
8,08	1,3359	1,1297	1,2949
10,33	1,0434	0,8659	1,0184
12,58	0,4949	0,6284	0,8673
14,83	0,5238	0,4685	0,5009
17,08	0,3323	0,2800	0,3376
19,33	0,2688	0,2148	0,2392
21,58	0,1706	0,0854	0,1614
23,83	0,0885	0,0629	0,0826
26,08	0,0239	0,0129	0,0620
27,67	0,0211	0,0109	0,0250

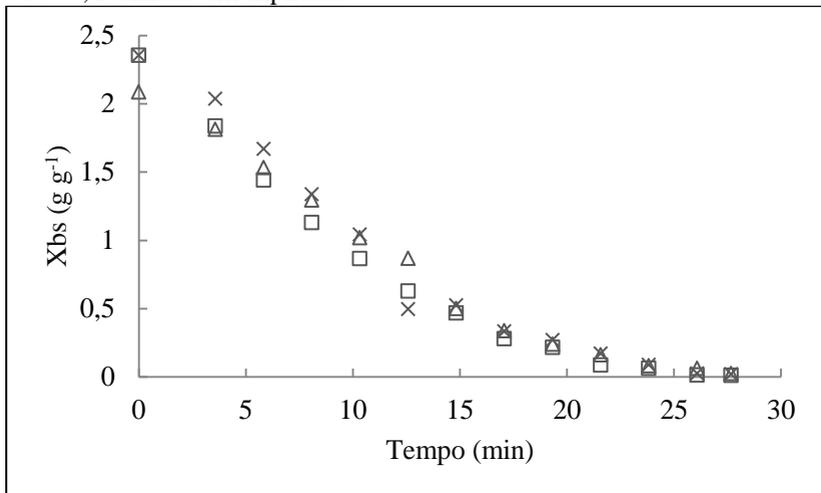
Figura B1 - Evolução temporal da Xbs das amostras de banana durante a secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, realizada em triplicata.

Tabela B2 - Dados em triplicata da evolução temporal da Xbs para secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 700 W.

Tempo (min)	Xbs ₁ (gg ⁻¹)	Xbs ₂ (gg ⁻¹)	Xbs ₃ (gg ⁻¹)
0,00	2,2132	2,4460	2,1685
2,67	1,8998	1,9880	1,7427
4,00	1,5430	1,6722	1,4312
5,33	1,2673	1,2737	1,2653
6,67	0,9907	1,1592	0,9842
8,00	0,8069	0,8277	0,7585
9,33	0,6823	0,6410	0,5683
10,67	0,4318	0,3800	0,3649
12,00	0,3409	0,3664	0,3183
13,33	0,2740	0,2968	0,2099
14,67	0,1774	0,1742	0,1179
16,00	0,0996	0,0562	0,0556
17,67	0,0261	0,0490	0,0155

Figura B2 - Evolução temporal da Xbs das amostras de banana durante a secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 700 W, realizada em triplicata.

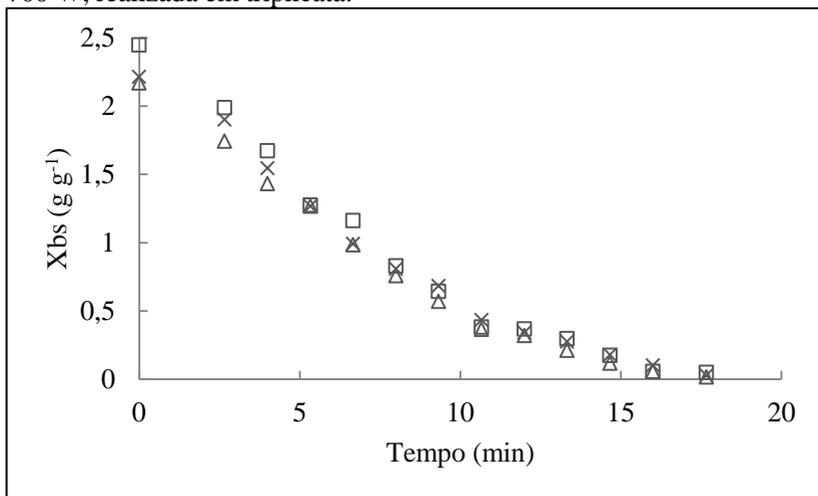


Tabela B3 - Dados em triplicata da evolução temporal da Xbs para secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 1000 W.

Tempo (min)	Xbs ₁ (gg ⁻¹)	Xbs ₂ (gg ⁻¹)	Xbs ₃ (gg ⁻¹)
0,00	2,4728	2,2787	2,4515
2,33	1,8883	1,9356	2,0320
3,33	1,4821	1,4452	1,6098
4,33	1,2690	1,2471	1,3259
5,33	0,8570	0,8932	0,9517
6,33	0,6565	0,4965	0,8900
7,33	0,4747	0,4639	0,5997
8,33	0,2061	0,2806	0,3661
9,33	0,1855	0,2650	0,2551
10,33	0,1665	0,1516	0,1150
11,33	0,1187	0,1418	0,0936
12,33	0,1051	0,0630	0,0526
13,67	0,0313	0,0361	0,0348

Figura B3 - Evolução temporal da Xbs das amostras de banana durante a secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 1000 W, realizada em triplicata.

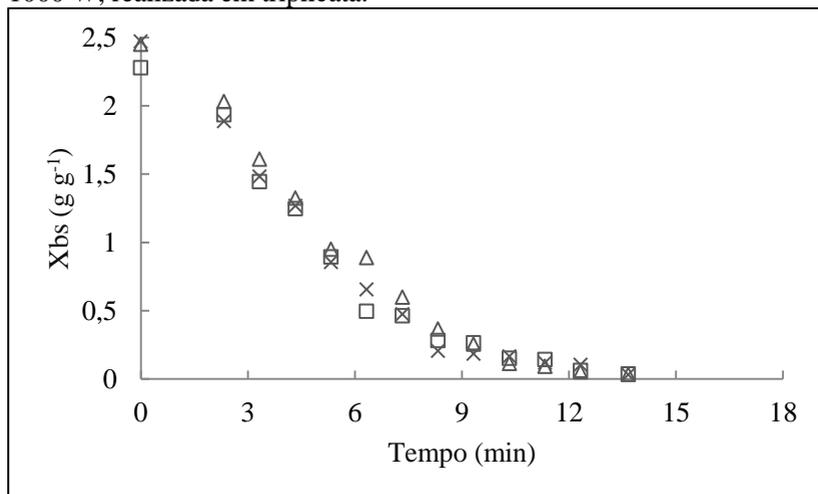


Tabela B4 - Dados em triplicata da evolução temporal da Xbs para secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W.

Tempo (min)	Xbs ₁ (gg ⁻¹)	Xbs ₂ (gg ⁻¹)	Xbs ₃ (gg ⁻¹)
0,00	2,3030	2,2330	2,2597
1,17	2,0923	2,0793	2,1164
1,98	2,0398	2,0984	2,0860
2,57	2,0004	2,0160	2,0300
3,38	2,0204	2,0205	1,9466
3,97	1,8697	2,0112	1,9259
4,80	1,9011	1,9327	1,8077
8,80	1,2891	1,2646	1,2852
12,80	0,8483	0,8157	0,8213
16,80	0,4574	0,5784	0,4300
20,80	0,2932	0,3145	0,2682
24,80	0,1379	0,1033	0,0656
29,03	0,0272	0,0292	0,0172

Figura B4 - Evolução temporal da Xbs das amostras de banana durante a secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, realizada em triplicata.

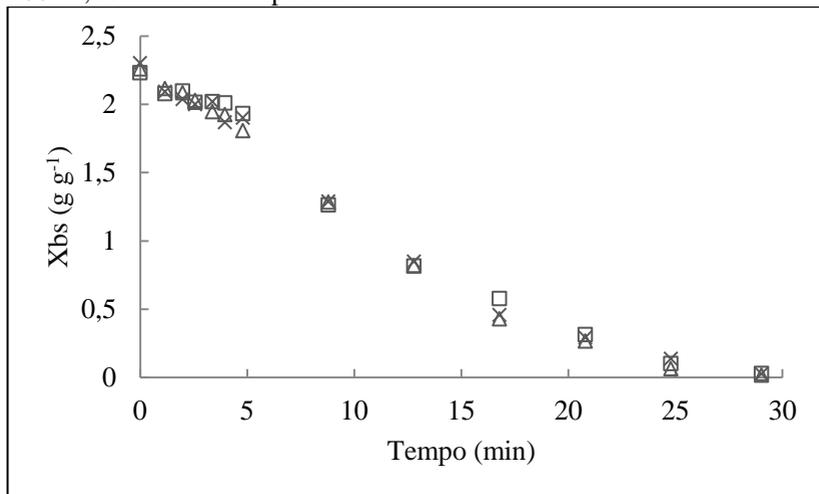


Tabela B5 - Dados em triplicata da evolução temporal da Xbs para secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 700 W.

Tempo (min)	Xbs ₁ (gg ⁻¹)	Xbs ₂ (gg ⁻¹)	Xbs ₃ (gg ⁻¹)
0,00	2,2844	2,1957	2,1957
0,58	2,1555	2,0833	2,1239
1,38	2,1492	2,0141	2,1539
1,80	2,1604	1,9079	2,0535
2,62	2,0484	1,8507	2,0495
2,87	2,0454	1,8049	1,9978
3,70	2,0032	1,8447	1,9811
6,20	1,2579	1,1805	1,2168
8,70	0,7187	0,7606	0,9530
11,20	0,4716	0,5244	0,4728
13,70	0,2359	0,2710	0,2820
16,20	0,0922	0,1383	0,1153
18,95	0,0515	0,0353	0,0402

Figura B5 - Evolução temporal da Xbs das amostras de banana durante a secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 700 W, realizada em triplicata.

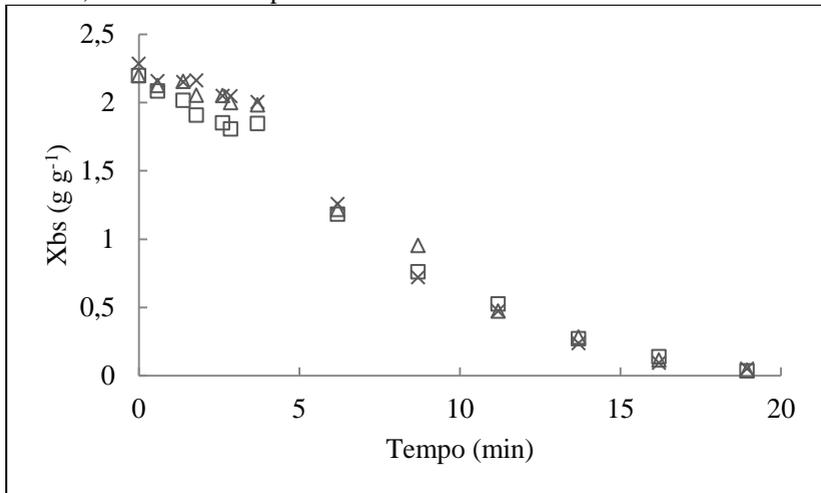


Tabela B6 - Dados em triplicata da evolução temporal da Xbs para secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W.

Tempo (min)	Xbs ₁ (gg ⁻¹)	Xbs ₂ (gg ⁻¹)	Xbs ₃ (gg ⁻¹)
0,00	2,5454	2,5641	2,3065
0,50	2,3634	2,3591	2,1936
1,50	2,3274	2,3496	2,1020
1,83	2,3136	2,2172	2,0679
2,85	2,2180	2,1669	2,0555
3,18	2,1800	2,0509	1,9667
4,22	2,1130	2,0062	1,8072
6,22	1,2885	0,9663	1,0072
8,22	0,5618	0,7169	0,8072
10,22	0,4373	0,2988	0,5039
12,22	0,2426	0,2497	0,2684
14,22	0,1349	0,1337	0,0858
16,52	0,0567	0,0614	0,0373

Figura B6 - Evolução temporal da Xbs das amostras de banana durante a secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 1000 W, realizada em triplicata.

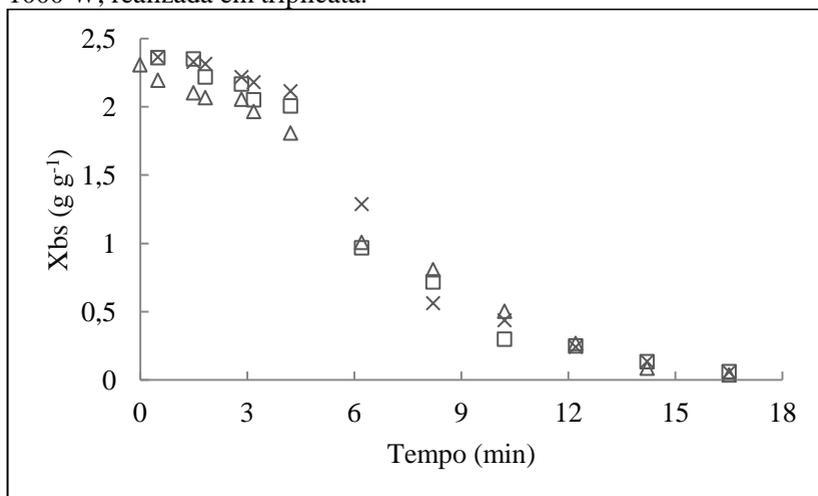


Tabela B7 - Dados em triplicata da evolução temporal da a_w para secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W.

Tempo (min)	a_{w1} (gg ⁻¹)	a_{w2} (gg ⁻¹)	a_{w3} (gg ⁻¹)
0,00	0,985	0,977	0,981
3,58	0,985	0,968	0,979
5,83	0,981	0,961	0,973
8,08	0,970	0,950	0,969
10,33	0,966	0,939	0,958
12,58	0,901	0,906	0,946
14,83	0,918	0,855	0,906
17,08	0,770	0,719	0,810
19,33	0,746	0,637	0,697
21,58	0,595	0,371	0,569
23,83	0,432	0,350	0,401
26,08	0,254	0,157	0,331
27,67	0,228	0,137	0,256

Figura B7 - Evolução temporal da a_w das amostras de banana durante a secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, realizada em triplicata.

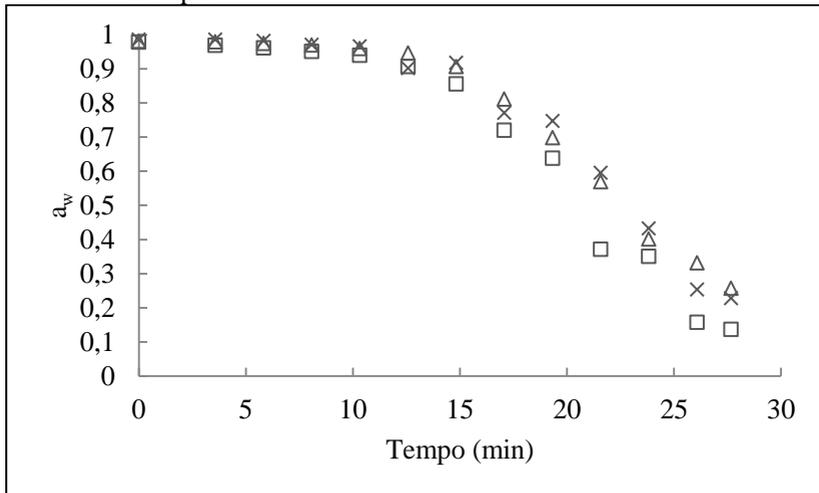


Tabela B8 - Dados em triplicata da evolução temporal da a_w para secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 700 W.

Tempo (min)	a_{w1} (gg^{-1})	a_{w2} (gg^{-1})	a_{w3} (gg^{-1})
0,00	0,980	0,982	0,986
2,67	0,980	0,981	0,984
4,00	0,971	0,976	0,981
5,33	0,964	0,971	0,976
6,67	0,955	0,963	0,968
8,00	0,934	0,945	0,953
9,33	0,939	0,929	0,927
10,67	0,875	0,868	0,840
12,00	0,816	0,833	0,817
13,33	0,668	0,603	0,690
14,67	0,661	0,603	0,580
16,00	0,351	0,390	0,353
17,67	0,230	0,338	0,217

Figura B8 - Evolução temporal da a_w das amostras de banana durante a secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 700 W, realizada em triplicata.

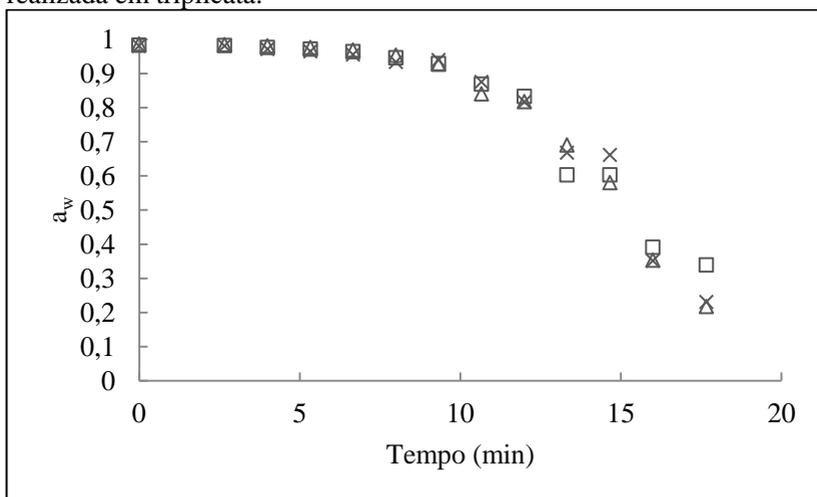


Tabela B9 - Dados em triplicata da evolução temporal da a_w para secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 1000 W.

Tempo (min)	a_{w1} (gg ⁻¹)	a_{w2} (gg ⁻¹)	a_{w3} (gg ⁻¹)
0,00	0,975	0,983	0,986
2,33	0,972	0,982	0,983
3,33	0,967	0,973	0,977
4,33	0,961	0,965	0,968
5,33	0,936	0,952	0,954
6,33	0,919	0,918	0,947
7,33	0,901	0,907	0,921
8,33	0,651	0,765	0,824
9,33	0,630	0,706	0,753
10,33	0,572	0,630	0,501
11,33	0,461	0,561	0,444
12,33	0,432	0,388	0,333
13,67	0,254	0,256	0,267

Figura B9 - Evolução temporal da a_w das amostras de banana durante a secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 1000 W, realizada em triplicata.

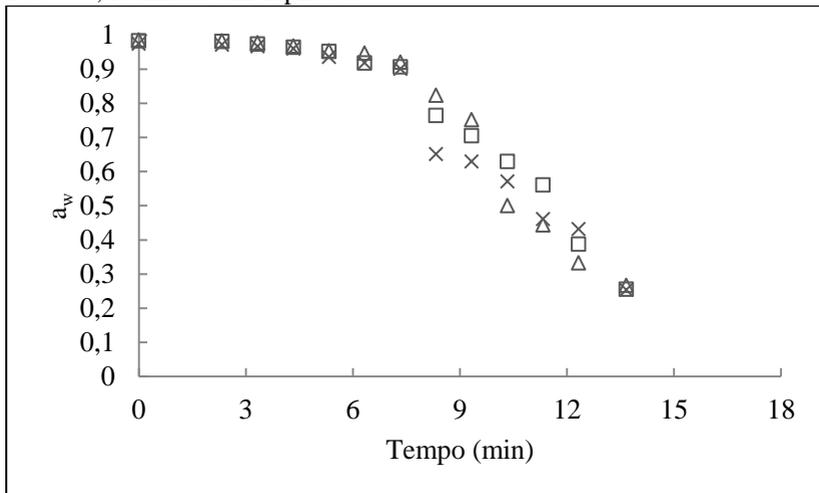


Tabela B10 - Dados em triplicata da evolução temporal da a_w para secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W.

Tempo (min)	a_{w1} (gg^{-1})	a_{w2} (gg^{-1})	a_{w3} (gg^{-1})
0,00	0,978	0,979	0,980
1,17	0,981	0,974	0,979
1,98	0,980	0,975	0,981
2,57	0,972	0,974	0,981
3,38	0,972	0,977	0,980
3,97	0,983	0,977	0,980
4,80	0,970	0,975	0,981
8,80	0,968	0,961	0,965
12,80	0,940	0,938	0,936
16,80	0,898	0,905	0,872
20,80	0,742	0,791	0,751
24,80	0,472	0,498	0,399
29,03	0,278	0,273	0,243

Figura B10 - Evolução temporal da a_w das amostras de banana durante a secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W realizada, em triplicata.

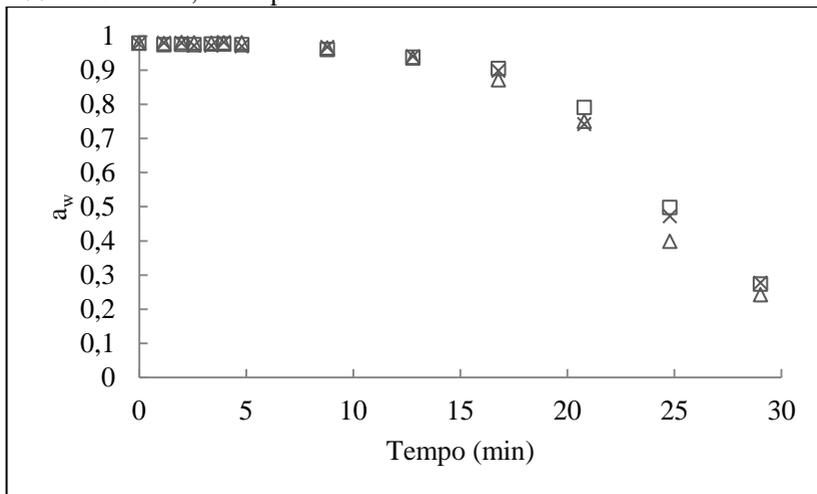


Tabela B11 - Dados em triplicata da evolução temporal da a_w para secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 700 W.

Tempo (min)	a_{w1} (gg^{-1})	a_{w2} (gg^{-1})	a_{w3} (gg^{-1})
0,00	0,985	0,985	0,984
0,58	0,988	0,985	0,985
1,38	0,986	0,982	0,985
1,80	0,989	0,984	0,987
2,62	0,980	0,982	0,986
2,87	0,989	0,981	0,984
3,70	0,991	0,983	0,984
6,20	0,969	0,963	0,971
8,70	0,935	0,941	0,955
11,20	0,887	0,888	0,867
13,70	0,713	0,757	0,767
16,20	0,483	0,560	0,529
18,95	0,324	0,310	0,333

Figura B11 - Evolução temporal da a_w das amostras de banana durante a secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 700 W, realizada em triplicata.

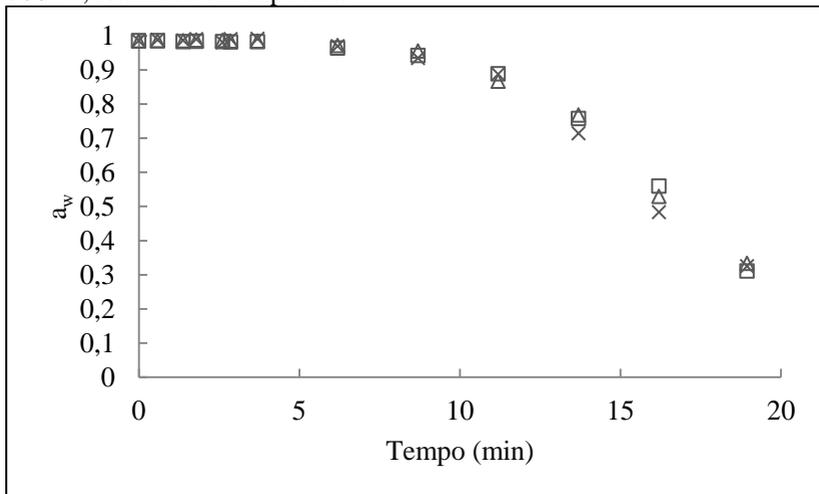
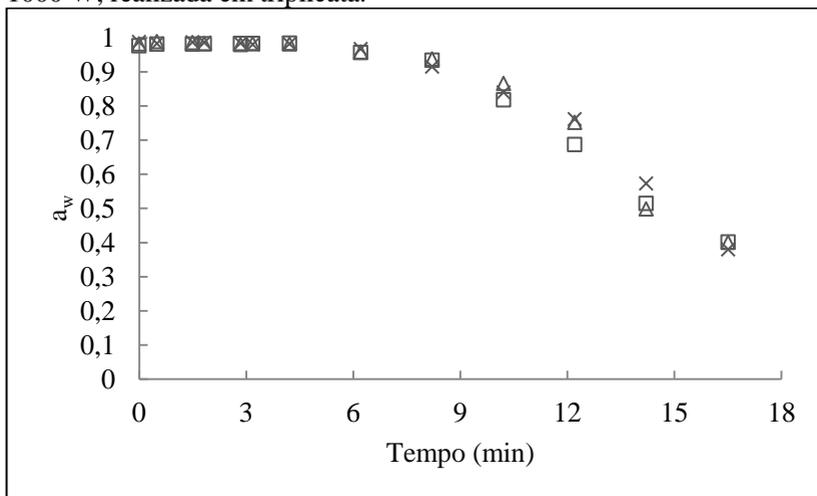


Tabela B12 - Dados em triplicata da evolução temporal da a_w para secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 1000 W.

Tempo (min)	a_{w1} (gg ⁻¹)	a_{w2} (gg ⁻¹)	a_{w3} (gg ⁻¹)
0,00	0,987	0,976	0,981
0,50	0,983	0,980	0,988
1,50	0,986	0,980	0,985
1,83	0,985	0,981	0,982
2,85	0,983	0,982	0,979
3,18	0,980	0,983	0,982
4,22	0,982	0,983	0,981
6,22	0,966	0,956	0,958
8,22	0,914	0,933	0,938
10,22	0,839	0,818	0,865
12,22	0,761	0,686	0,752
14,22	0,572	0,514	0,498
16,52	0,379	0,401	0,400

Figura B12 - Evolução temporal da a_w das amostras de banana durante a secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 1000 W, realizada em triplicata.



Apêndice C

Ajuste linear aos dados experimentais

Tabela C1 - Coeficientes angulares, lineares, e o coeficiente de correlação (R^2), para o ajuste linear aos dados experimentais da secagem pelos processos MV e MVMFD.

Secagens	A ($\text{g g}^{-1} \text{min}^{-1}$)	B (g g^{-1})	R^2
MV-400 W	- 0,119	2,252	0,971
MVMFD-400 W	- 0,102	2,275	0,982
MV-700 W	- 0,170	2,241	0,975
MVMFD-700 W	- 0,157	2,312	0,967
MV-1000 W	- 0,266	2,431	0,975
MVMFD-1000 W	- 0,202	2,559	0,946

Figura C1 - Dados experimentais da variação da X_{bs} com o tempo para secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, ajustados linearmente. (Taxa constante (\circ), Taxa decrescente (Δ)).

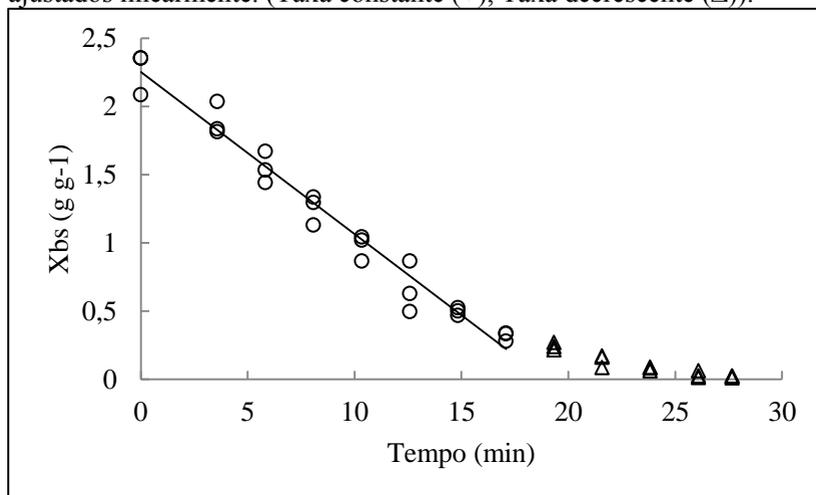


Figura C2 - Dados experimentais da variação da X_{bs} com o tempo para secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 700 W, ajustados linearmente. (Taxa constante (\circ), Taxa decrescente (Δ)).

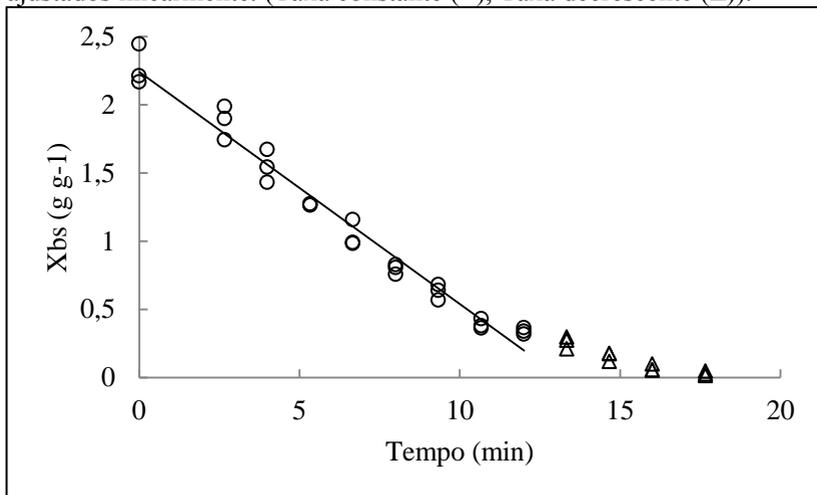


Figura C3 - Dados experimentais da variação da X_{bs} com o tempo para secagem MV para potência nominal do forno de micro-ondas de 1000 W, ajustados linearmente. (Taxa constante (\circ), Taxa decrescente (Δ)).

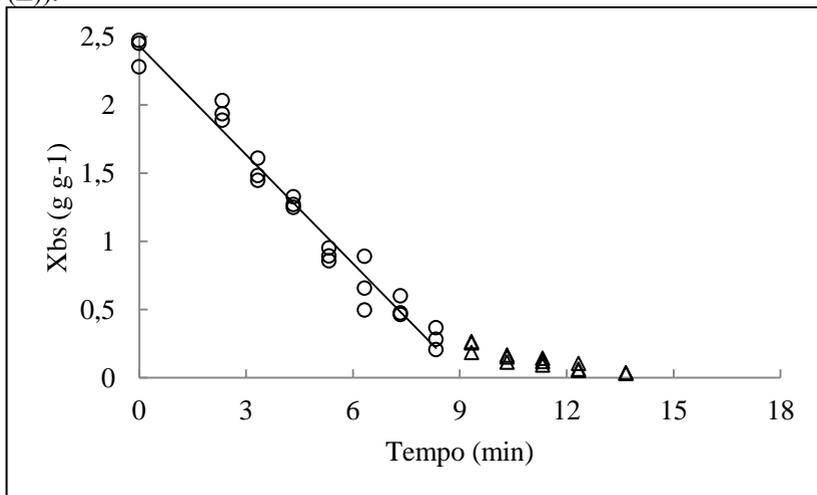


Figura C4 - Dados experimentais da variação da X_{bs} com o tempo para secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W, ajustados linearmente. (Taxa constante (\circ), Taxa decrescente (Δ)).

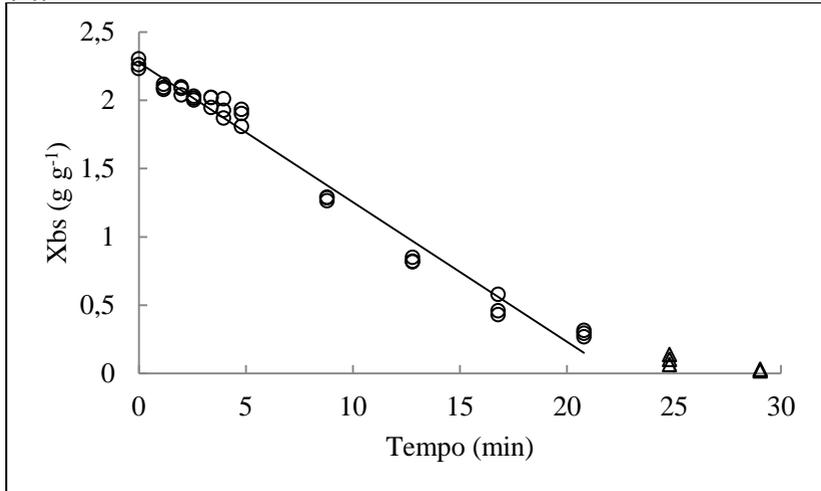


Figura C5 - Dados experimentais da variação da X_{bs} com o tempo para secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 700 W, ajustados linearmente. (Taxa constante (\circ), Taxa decrescente (Δ)).

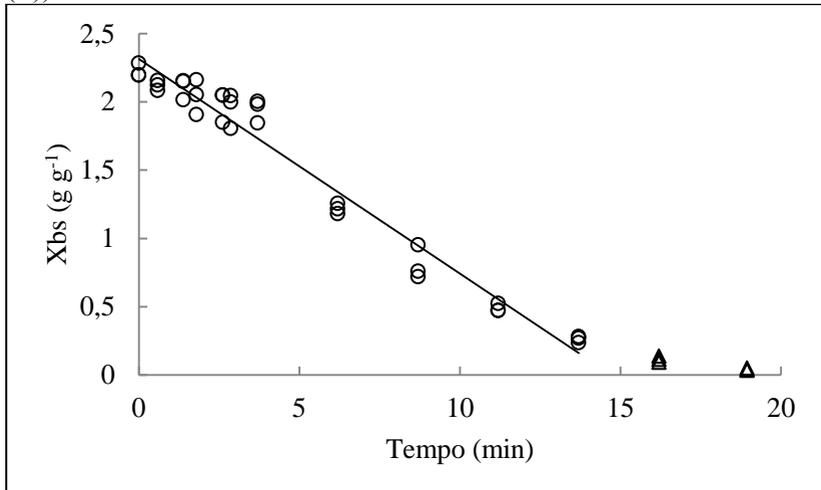
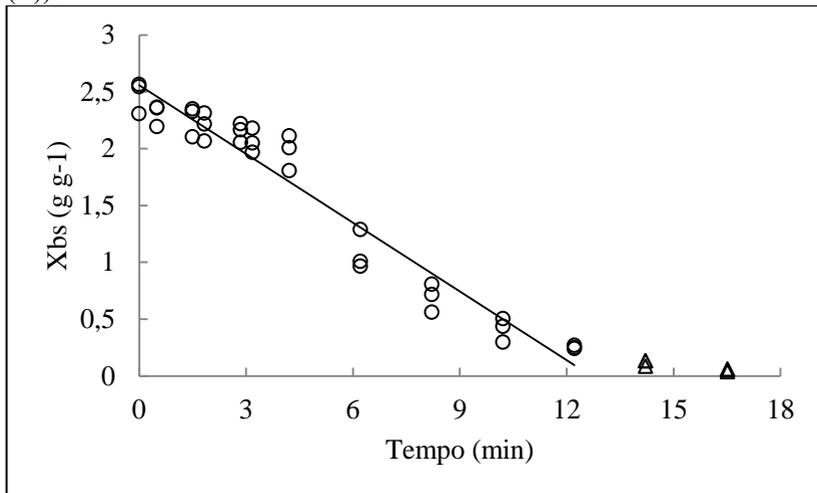


Figura C6 - Dados experimentais da variação da X_{bs} com o tempo para secagem MVMFD para potência nominal do forno de micro-ondas de 1000 W, ajustados linearmente. (Taxa constante (\circ), Taxa decrescente (Δ)).



Apêndice D

Ajuste ao modelo empírico de Page

Figura D1 - Ajuste do modelo de Page para as amostras de banana durante a secagem MV com potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W. Experimental (\circ), Page ($-$).

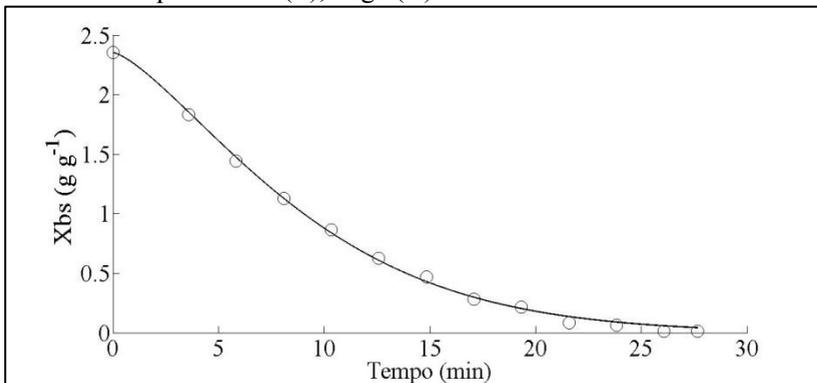


Figura D2 - Ajuste do modelo de Page para as amostras de banana durante a secagem MV com potência nominal do forno de micro-ondas de 700 W. Experimental (\circ), Page ($-$).

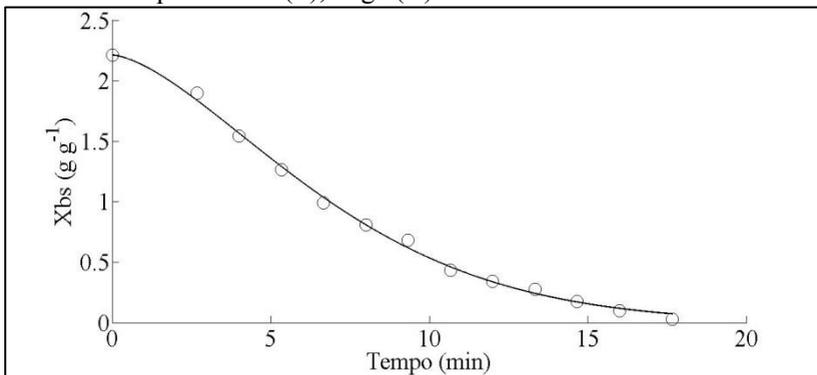


Figura D3 - Ajuste do modelo de Page para as amostras de banana durante a secagem MV com potência nominal do forno de micro-ondas de 1000 W. Experimental (\circ), Page ($-$).

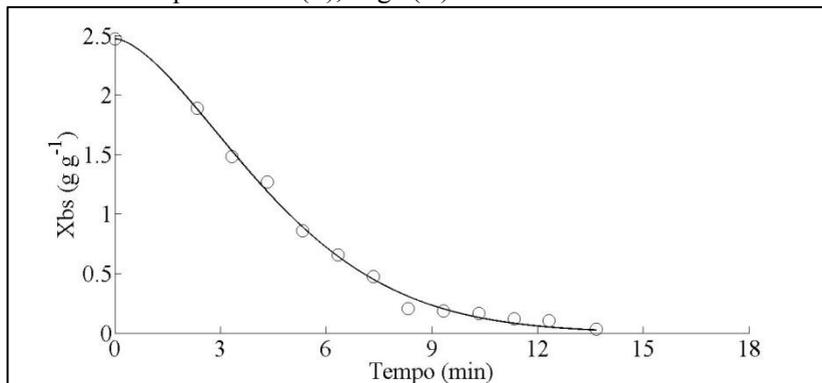


Figura D4 - Ajuste do modelo de Page para as amostras de banana durante a secagem MVMFD com potência nominal do forno de micro-ondas de 400 W. Experimental (\circ), Page ($-$).

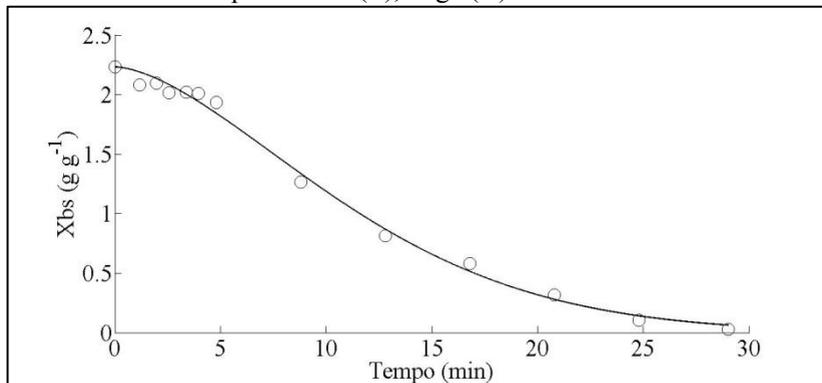


Figura D5 - Ajuste do modelo de Page para as amostras de banana durante a secagem MVMFD com potência nominal do forno de micro-ondas de 700 W. Experimental (\circ), Page ($-$).

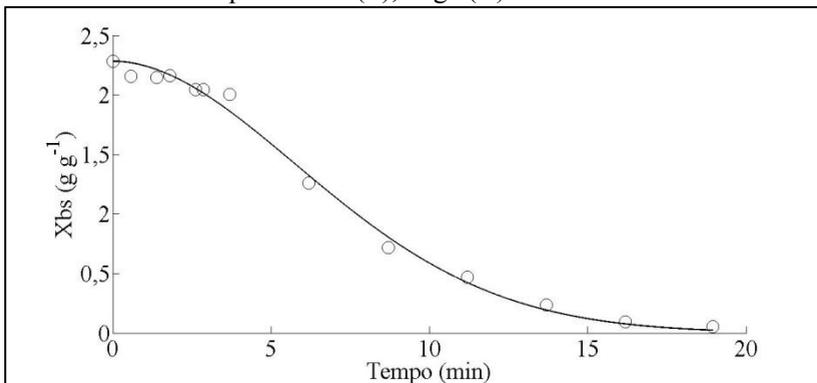


Figura D6 - Ajuste do modelo de Page para as amostras de banana durante a secagem MVMFD com potência nominal do forno de micro-ondas de 1000 W. Experimental (\circ), Page ($-$).

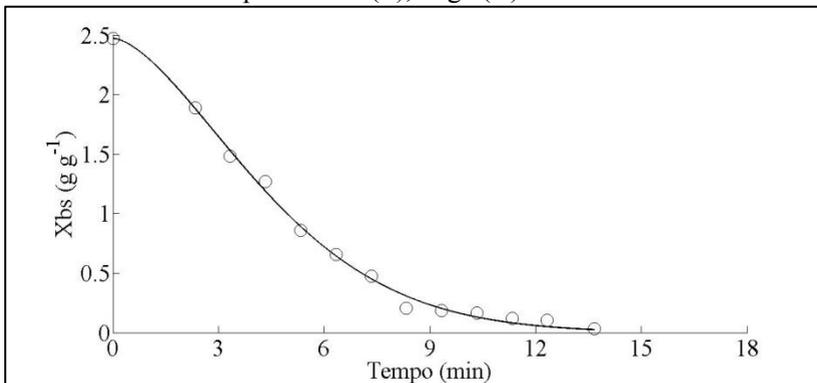


Figura D7 - Ajuste do modelo de Page para as amostras de banana durante a secagem LL. Experimental (—), Page (—).

