

Ricardo Lemos Monteiro

**SECAGEM DE BATATA-DOCE EM MICRO-ONDAS A VÁCUO  
COM CONTROLE DA TEMPERATURA PELA  
MANIPULAÇÃO DA POTÊNCIA**

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

Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

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

Florianópolis/SC  
2018

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

Lemos Monteiro, Ricardo

SECAGEM DE BATATA-DOCE EM MICRO-ONDAS A VÁCUO  
COM CONTROLE DA TEMPERATURA PELA MANIPULAÇÃO DA  
POTÊNCIA / Ricardo Lemos Monteiro ; orientador,  
João Borges Laurindo ; coorientador, Bruno  
Augusto Mattar Carciofi, 2018.

186 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis,  
2018.

Inclui referências.

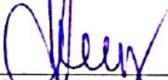
1. Engenharia de Alimentos. 2. Operações  
unitárias. 3. Transferência de calor e massa. 4.  
Secagem. 5. Batata-doce. I. Borges Laurindo, João  
. II. Augusto Mattar Carciofi, Bruno . III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. IV. Título.

**“SECAGEM DE BATATA-DOCE EM MICROONDAS A VÁCUO COM O CONTROLE DE TEMPERATURA PELA MANIPULAÇÃO DA POTÊNCIA”**

Por

**Ricardo Lemos Monteiro**

Tese julgada para obtenção do título de **Doutor 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**

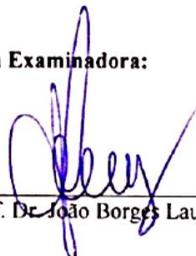


---

Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi

**Coordenador**

**Banca Examinadora:**



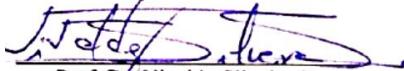
---

Prof. Dr. João Borges Laurindo



---

Prof. Dr. Antonio Marsaioli Junior



---

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Jr.



---

Prof. Dr. José Antonio Ribeiro de Souza

**Florianópolis, 08 de junho de 2018.**



*Este trabalho é dedicado em especial  
à minha família e à minha amada companheira,  
Denise Adamoli Laroque*



## AGRADECIMENTOS

Aos meus avós (Ari, Cloé e Maria Angélica), pais (Margarete e Fernando), irmãos (Fernanda e Rafael) e sobrinho (Bernardo) pelo amor, carinho pela esperança sempre depositada em meu futuro, pelos conselhos que valerão por toda vida, e por vibrarem a cada dia com a minha felicidade. À toda minha família e amigos pelo incentivo, confiança, compreensão, carinho e apoio ao longo desta jornada. Em especial à minha mãe pela dedicação, incentivo, amor, amizade e por sempre acreditar no meu potencial.

Ao amor da minha vida (Denise) pela amizade, companheirismo, ensinamentos, amor, carinho, força, por me apoiar todos momentos e por fazer parte da minha vida todos os dias.

Aos meus orientadores João Laurindo e Bruno Carciofi por serem exemplos de profissionais. Obrigado pelo apoio, atenção, pelos ensinamentos e ideias que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e da minha formação. Pela amizade, preocupação e oportunidades que vocês proporcionaram e continuam proporcionando.

À UFSC, ao PPGEAL, ao CNPq e à CAPES pela oportunidade, pelo apoio financeiro do projeto e pela bolsa de estudos. Aos professores que fazem parte do corpo docente e que ajudaram a contribuir com a minha formação acadêmica e profissional. Ao Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI), que ofereceu totais condições e suporte para realização deste trabalho. Aos funcionários da UFSC, em especial a parte mecânica do núcleo de manutenção (NUMA) pela ajuda e pelos inúmeros serviços prestados ao longo desses anos e que tornaram essa pesquisa possível.

À banca que se dispôs em avaliar e contribuir com este trabalho.

Aos alunos de iniciação científica Ana, Analiz, Gabriela, Guilherme, Jéssica, Natalia e Isis que me ajudaram no desenvolvimento desse trabalho e de diversos outros. Aos alunos do curso de Engenharia Elétrica (Antônio, Edilberto, Heron, João Paulo e Roddy) pela ajuda na montagem do controlador e das medições das propriedades dielétricas. À Stephanie do CCA pela disponibilidade em ajudar nas medições de cor. Aos colegas de laboratório (Ana, Betina, Edilberto, Fernanda, Gabriel, Gabriela, Guilherme, Gustavo, Josi, Jhony, Laura, Leno, Marco, Manu, Melchor, Milena, Pamela, Paula, Raquel, Renata, Thalles e Thayla) pela amizade, ajuda e ou ensinamentos durante essa jornada. Em especial aos amigos Aline, Giustino, Jaque e Jade que me ensinaram e ajudaram em diversas etapas desse projeto e da minha formação acadêmica. A todos que de alguma forma ou outra contribuíram para realização deste trabalho.



*“Sucesso não é o final, falhar não é fatal:  
é a coragem para continuar que conta.”*

*Winston Churchill*



## RESUMO

A procura por alimentos saudáveis e práticos é uma tendência mundial. A batata-doce tem tido grande atenção por apresentar carboidratos de baixo índice glicêmico. Batata-doce desidratada pode ser uma excelente alternativa de consumo e agregação de valor para essa matéria-prima. O objetivo deste trabalho foi estudar a secagem de batata-doce em secador de micro-ondas sob vácuo (*microwave vacuum drying, MWVD*), com controle da temperatura pela manipulação da potência, com controle *PID*. O *feedback* da temperatura foi realizado com sensor de fibra óptica, ou com termômetro de infravermelho. Os experimentos foram realizados em secadores em escalas de bancada e piloto, visando a produção de *chips* de batata-doce crocantes e isentos de óleo. Primeiramente foi avaliada a possibilidade de produção de *chips*, utilizando forno de micro-ondas doméstico adaptado com vácuo e sistema rotativo, e as propriedades físico-químicas das amostras foram avaliadas durante a secagem. Foi possível determinar o tempo de secagem de 27 min para produzir amostras crocantes com baixa umidade (0,028 g g<sup>-1</sup> bs) e atividade de água (0,262) e alta porosidade (67,5%). Um agitador de ondas foi instalado no secador piloto e melhorou a distribuição das ondas eletromagnéticas no interior da cavidade, diminuindo os *hot spots* nas amostras. O controle de temperatura foi eficaz para a produção de amostras com coloração e umidade mais homogêneas, quando comparado com o processo sem o uso do sistema de controle. Amostras de batata-doce produzidas por processos de secagem por convecção (*AD*), liofilização (*FD*) e *conductive multi-flash drying (KMFD)* foram comparadas com amostras produzidas por *MWVD* com tambor rotativo e controle *PID*. Amostras secadas por *AD* apresentaram-se compactas, enquanto amostras liofilizadas tiveram suas estruturas preservadas, com característica esponjosa (poros pequenos). Por outro lado, amostras secas por *MWVD* e *KMFD* apresentaram estrutura expandida e com grandes poros, resultando em curvas acústico-mecânicas irregulares, características de produtos crocantes e com maior aceitação sensorial. As secagens por *MWVD* e *KMFD* demonstraram grande potencial para produção industrial de *chips* de batatas-doces crocantes, livre de óleo e de conservantes. Entre todos os processos estudados, o processo *MWVD* com tambor rotativo e controle *PID* da temperatura apresentou maior potencial para a produção de *chips* de batata-doce homogêneos e crocantes.

**Palavras chave:** secagem, micro-ondas, vácuo, controle de temperatura, *chips*, manipulação potência.



## ABSTRACT

The demand for healthy and practical foods is a worldwide trend. Sweet potatoes have attracted great attention to presenting low glycemic index carbohydrates. Dehydrated sweet potatoes can be an excellent alternative to consuming and adding value to this raw material. The objective of this work was to study the drying of sweet potatoes in microwave vacuum drying (*MWVD*), with temperature control by manipulation of power, with *PID* control. The temperature feedback was performed with fiber optic sensor, or with infrared thermometer. The experiments were performed in dryers on lab scale and pilot scale, aiming the production of crisp and oil-free sweet potato chips. First, the possibility of chip production was evaluated using a domestic microwave vacuum dryer with turntable, and the physicochemical properties of the samples were evaluated during drying. It was possible to determine the drying time of 27 min to produce crunch samples with low moisture ( $0.028 \text{ g g}^{-1} \text{ db}$ ) and water activity (0.262) and high porosity (67.5%). A mode stirrer was installed in the pilot dryer and improved the distribution of the electromagnetic waves inside the cavity, reducing the hot spots in the samples. The temperature control was effective for the production of samples with more homogeneous color and moisture when compared to the process without the use of the control system. Sweet potato samples produced by air drying (*AD*), freeze-drying (*FD*) and conductive multi-flash drying (*KMFD*) were compared with samples produced by *MWVD* with rotary drum and *PID* control. Samples dried by *AD* were compact, whereas freeze-drying samples had their structures preserved, with spongy characteristics (small pores). On the other hand, dry samples by *MWVD* and *KMFD* presented expanded (puffing) structure with large pores, resulting in irregular acoustic-mechanical curves, characteristics of crisp products and with greater sensorial acceptance. Drying by *MWVD* and *KMFD* demonstrated great potential for industrial production of crisp sweet potato chips, free of oil and preservatives. Among all the studied processes, the *MWVD* process with rotary drum and *PID* temperature control presented greater potential for the production of homogeneous and crisp sweet potato chips.

**Keywords:** drying, microwave, vacuum, temperature control, chips, power modulation.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Curvas típicas de secagem com ar quente. ....	44
<b>Figura 2.2</b> - Representação esquemática do mecanismo de <i>puffing</i> . ....	47
<b>Figura 2.3</b> - Evaporação e resfriamento durante a aplicação de um pulso de vácuo. ....	50
<b>Figura 2.4</b> - Ilustração esquemática de uma onda eletromagnética plana uniforme em função de $x$ no tempo zero. $E_o$ e $H_o$ são as amplitudes dos campos elétrico e magnético, respectivamente. ....	50
<b>Figura 2.5</b> - Espectro eletromagnético. ....	51
<b>Figura 2.6</b> - Aspectos físicos, estrutura interna e funcionamento interno do magnetron.....	52
<b>Figura 2.7</b> - Profundidade de penetração típica dentro de materiais de grande porte (Maior do que o comprimento de onda). ....	56
<b>Figura 2.8</b> - Comparação do forno de micro-ondas <i>inverter</i> com micro-ondas convencional. ....	62
<b>Figura 2.9</b> - Padrões de cozimento de fornos de micro-ondas <i>inverter</i> e convencional, conforme reivindicado por um fabricante de fornos de micro-ondas.....	62
<b>Figura 2.10</b> - Comparação do forno de micro-ondas <i>inverter</i> com micro-ondas convencional com relação ao descongelamento.....	62
<b>Figura 3.1</b> - Batata-doce da variedade <i>Ipomoea batatas</i> L. Lam.....	65
<b>Figura 3.2</b> - Medidas dos diâmetros das batatas-doces ( $D_1$ , $D_2$ e $D_3$ )...	66
<b>Figura 3.3</b> - Diagrama esquemático do picnômetro. ....	69
<b>Figura 3.4</b> - Localização das perfurações durante os ensaios mecânicos. ....	71
<b>Figura 3.5</b> - Equipamento utilizado para a análise instrumental acústico-mecânica da batata-doce.....	72
<b>Figura 3.6</b> - Analisador vetorial de rede de mão RF FieldFox. ....	73
<b>Figura 3.7</b> - Sonda e High temperature short block .....	74
<b>Figura 3.8</b> - a) Curvas de secagem de batata-doce por <i>MWVD</i> (triplicata), b) Evolução temporal da atividade de água ( $a_w$ ) das amostras (triplicata) e potência (—) aplicada durante a secagem, c) Evolução temporal da temperatura das amostras (triplicata e desvio padrão) e evolução temporal da pressão no sistema (—). ....	78
<b>Figura 3.9</b> - a) Evolução temporal da taxa de secagem. b) Curva de secagem de batata-doce por <i>MWVD</i> (Figura 3.8a), com a reta usada para a determinação da taxa de secagem durante o período à taxa constante. Os dados experimentais foram representados por pontos ( $\circ$ ) e a taxa de secagem durante o período da taxa de secagem constante foi representada por uma linha reta.....	79

<b>Figura 3.10</b> - Imagens obtidas por microscopia ótica da fratura (A) e da superfície (B) das amostras de batata-doce desidratadas por MWVD. ...	80
<b>Figura 3.11</b> - Amplitude da oscilação da força a partir de resultados representativos dos testes de penetração das amostras de batata-doce desidratadas. Coluna esquerda: Dados de força-deformação (○) e ajuste não-paramétrico (—); Coluna direita: curvas dos resíduos. (a) <i>in natura</i> , (b) branqueada, (c) 2 min, (d) 4 min, (e) 6 min, (f) 8 min, (g) 10 min, (h) 12 min, (i) 27 min.....	82
<b>Figura 3.12</b> - Evolução da Força aplicada (—) e nível de Pressão Sonoro (SPL) (—) versus o tempo de penetração das amostras: (a) <i>In natura</i> , (b) branqueada, (c) 2 min, (d) 4 min, (e) 6 min, (f) 8 min, (g) 10 min, (h) 12 min, (i) 27 min. ....	85
<b>Figura 3.13</b> - Evolução da porosidade das fatias de batata-doce durante a secagem por MWVD. ....	87
<b>Figura 3.14</b> - Evolução da massa específica aparente das fatias de batata-doce durante a secagem por MWVD. ....	88
<b>Figura 3.15</b> - Fotografia das batatas retiradas em diferentes estágios de secagem por MWVD. Amostras: (1) <i>In natura</i> , (2) branqueada, (3) 2 min, (4) 4 min, (5) 6 min, (6) 8 min, (7) 10 min, (8) 12 min, (9) 27 min.....	89
<b>Figura 3.16</b> - Evolução dos parâmetros de cor ( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ , $\Delta E^*$ ) da batata-doce <i>in natura</i> e das batatas-doces durante a secagem por MWVD.....	90
<b>Figura 3.17</b> - Constante dielétrica ( $\epsilon'$ ) nas frequências de 915 MHz a 2450 MHz. (a) Água deionizada; (b) Batata branqueada; (c) Batata <i>in natura</i> ; batata em pó acondicionada em diferentes umidades relativas (UR): (d) UR=75,3 %; (e) UR=64,3 %; (f) UR=52,9 %; (g) UR=43,8 %; (h) UR=32,7 %; (i) UR=22,5 % . ....	94
<b>Figura 3.18</b> - Constante de perda ( $\epsilon''$ ) nas frequências de 915 MHz a 2450 MHz. (a) Água deionizada; (b) Batata branqueada; (c) Batata <i>in natura</i> ; batata em pó acondicionada em diferentes umidades relativas (UR): (d) UR=75,3 %; (e) UR=64,3 %; (f) UR=52,9 %; (g) UR=43,8 %; (h) UR=32,7 %; (i) UR=22,5 % . ....	95
<b>Figura 4.1</b> - Dispositivo experimental do secador de micro-ondas a vácuo. ....	100
<b>Figura 4.2</b> - Dispositivo experimental do monitoramento de massa e de temperatura durante secagem. ....	101
<b>Figura 4.3</b> - a) Agitador de ondas e bandeja de polipropileno com <i>marshmallows</i> na cavidade; b) Conjunto hélice, haste, rolamento e motor (agitador de onda); c) Guia de onda com o agitador de onda; d) Guia de onda com o retentor para evitar a perda de vácuo. ....	102
<b>Figura 4.4</b> - Posição da hélice (base, meio e extremidade) na haste. ...	103

<b>Figura 4.5</b> - Disposição das batatas na caixa de secagem (imagem ilustrativa). .....	106
<b>Figura 4.6</b> - Fotografia dos marshmelows na bandeja de polipropileno (Imagens coloridas na parte superior e binarizadas na parte superior). Amostras: (a) sem aquecimento, (b) aquecimento sem agitador de onda, (c) aquecimento com agitador de ondas (hélice na base da haste), (d) aquecimento com agitador de ondas (hélice no meio da haste), (e) aquecimento com agitador de ondas (hélice na extremidade da haste). .....	108
<b>Figura 4.7</b> - a) Evolução temporal da temperatura durante o aquecimento e controle da temperatura ( <i>setpoint</i> 60 °C ) de 5000 g de água. b) Potência aplicada durante o processo (máxima potência aplicada 2700 W). O processo foi realizado em duplicata (1ª e 2ª coluna). .....	110
<b>Figura 4.8</b> - Evolução temporal da temperatura e da potência durante o aquecimento e controle da temperatura da água ( <i>setpoint</i> 60 °C). Duplicata de processo (média dos controles). Massa de água: a) 5000 g; b) 3000 g; c) 1000 g; d) 500 g. Foi mantida a densidade de potência máxima nos processos. ....	111
<b>Figura 4.9</b> - a) Evolução temporal da temperatura durante o aquecimento e controle da temperatura ( <i>setpoint</i> 60 °C) de 500 g de água. b) Potência aplicada durante o processo (máxima potência aplicada 2700 W). O processo foi realizado em duplicata (1ª e 2ª coluna). 3ª coluna: duplicata de processo (média dos controles). ....	112
<b>Figura 4.10</b> - a) Evolução temporal da temperatura durante o aquecimento e controle da temperatura ( <i>setpoint</i> 70 °C e 80 °C) de 5000 g de água. b) Potência aplicada durante o processo (máxima potência aplicada 2700 W). O processo foi realizado em duplicata (1ª e 2ª coluna). .....	113
<b>Figura 4.11</b> - Evolução temporal da temperatura e da potência durante o aquecimento e controle da temperatura da água ( <i>setpoint</i> 70 °C e 80 °C). Duplicata de processo (média dos controles). Massa de água: a) 5000 g; b) 3000 g; c) 1000 g; d) 500 g. A densidade de potência máxima nos processos foi mantida. ....	114
<b>Figura 4.12</b> - Curvas de secagem das amostras de batata-doce durante a secagem por <i>MWVDC</i> com controle da temperatura (1500 W), realizada em triplicata. ....	116
<b>Figura 4.13</b> - a) Evoluções da temperatura (—) da amostra e da pressão no sistema (—) durante a secagem por <i>MWVD</i> ; b) Potência aplicada durante a secagem; c) Evolução temporal da densidade de potência. Cada linha representa as triplicatas. ....	118

<b>Figura 4.14</b> - Evolução temporal da (a) umidade em base seca, da temperatura (—) e da (b) taxa de secagem em função do tempo; c) Taxa de secagem em função da umidade, com controle de temperatura (1500 W). I - Período de aquecimento; II - Taxa de secagem constante; III - Taxa de secagem decrescente. ....	119
<b>Figura 4.15</b> - a) Curvas de secagem de amostras de batata-doce durante os diferentes processos de secagem por <i>MWVD</i> . b) Período de secagem à taxa constante para os diferentes processos de secagem está representado por uma linha reta (—). <i>MWVDS-300 W</i> (-·-); <i>MWVDS-1500 W</i> (---); <i>MWVDS-2700 W</i> (—); <i>MWVDC-1500 W</i> (↔). ....	121
<b>Figura 4.16</b> - Fotografia representativas das batatas secas por <i>MWVD</i> sem controle de temperatura (300 W, 1500 W e 2700 W) e com o controle de temperatura (1500 W). ....	122
<b>Figura 5.1</b> - Procedimento experimental. ....	126
<b>Figura 5.2</b> - Liofilizador de laboratório adaptado para determinação on-line da curva de desidratação. ....	127
<b>Figura 5.3</b> - Dispositivo experimental da estufa convectiva. ....	128
<b>Figura 5.4</b> - Dispositivo experimental do <i>KMFD</i> . ....	129
<b>Figura 5.5</b> - Dispositivo experimental do secador semi-industrial de micro-ondas a vácuo. ....	130
<b>Figura 5.6</b> - Secador piloto de tambor rotativo, operando com micro-ondas, sob vácuo. ....	131
<b>Figura 5.7</b> - Evolução temporal da umidade em base seca das amostras durante as secagens <i>MWVD</i> ( $\Delta$ ) e <i>MWVD-AJ</i> ( $\circ$ ). Os processos foram realizados em triplicata para o processo <i>MWVD</i> e duplicata para o processo <i>MWVD-AJ</i> . ....	135
<b>Figura 5.8</b> - a) Evolução temporal da temperatura da amostra, durante as secagens <i>MWVD</i> e <i>MWVD-AJ</i> , para o controle de temperatura em 60°C; b) Potência aplicada durante a secagem. ....	135
<b>Figura 5.9</b> - a) Evolução temporal da umidade das amostras de batata-doce durante os diferentes processos de secagem. b) Período de secagem à taxa constante está representado por uma linha reta (—). <i>MWVD</i> ( $\blacksquare$ ); <i>MWVD-AJ</i> ( $\blacktriangle$ ); <i>KMFD</i> ( $\bullet$ ); <i>FD</i> (—); <i>AD</i> (—). As linhas pontilhadas ligando os pontos foram usadas para facilitar a comparação dos processos. As curvas de secagem foram ampliadas para uma melhor visualização do início dos processos <i>KMFD</i> , <i>MWVD</i> e <i>MWVD-AJ</i> . ....	138
<b>Figura 5.10</b> - Evolução temporal da temperatura (—) e da pressão (---) das amostras de batatas-doce desidratadas pelos diferentes métodos de secagem. a) <i>KMFD</i> , b) <i>FD</i> e <i>AD</i> . ....	140

<b>Figura 5.11</b> - Imagens das superfícies e fraturas de amostras de batata-doce secas, obtidas por microscopia ótica e por MEV secas.....	142
<b>Figura 5.12</b> - Fotografia das batatas-doces secas por diferentes métodos de secagem. (1) <i>MWVD</i> , (2) <i>MWVD-AJ</i> , (3) <i>FD</i> , (4) <i>KMFD</i> e (5) <i>AD</i> (duplicata de imagens). .....	146
<b>Figura 5.13</b> - Gráfico de aceitação em relação aos atributos de aparência, cor, sabor, textura e impressão global das amostras de batata-doce desidratadas pelos diferentes métodos de secagem, utilizando a escala hedônica estruturada de 9 pontos. <i>FD</i> (●), <i>AD</i> (●), <i>MWVD</i> (●) e <i>KMFD</i> (●). .....	150
<b>Figura 5.14</b> - Frequência dos valores da escala estruturada de 5 pontos atribuídos pelos provadores à intenção de compra das amostras de batatas-doces desidratadas pelos diferentes métodos de secagem. <i>FD</i> (■), <i>AD</i> (■), <i>MWVD</i> (■) e <i>KMFD</i> (■).....	150
<b>Figura 5.15</b> - Amplitude da oscilação da força a partir de resultados representativos dos testes de penetração das amostras de batata-doce desidratadas pelos diferentes métodos de secagem. Primeira Linha: Dados de força-deformação (○) e ajuste não-paramétrico (—); Segunda Linha: curvas dos resíduos.....	152
<b>Figura 5.16</b> - Evolução da Força aplicada (—) e nível de Pressão Sonoro ( <i>SPL</i> ) (—) versus o tempo de penetração das amostras: (a) <i>AD</i> , (b) <i>FD</i> , (c) <i>KMFD</i> , (d) <i>MWVD</i> , (e) <i>MWVD-AJ</i> .....	154
<b>Figura 5.17</b> - <i>Biplot</i> do PCA. Variáveis analisadas (●). Amostras desidratadas pelos diferentes processos de secagens analisados (●);..	157



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Percentual da produção de batata-doce no Brasil, segundo as grandes regiões.....	42
<b>Tabela 2.2</b> - Propriedades dielétricas e profundidade de penetração de materiais a 2450 MHz e a temperatura de análise.....	57
<b>Tabela 3.1</b> - Atividade de água de soluções salinas saturadas a temperatura de 25 °C acondicionadas para realização das propriedades dielétricas.....	75
<b>Tabela 3.2</b> - Valores médios e desvios padrões dos parâmetros obtidos nos testes acústico-mecânicos.....	84
<b>Tabela 3.3</b> - Parâmetros de cor ( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ , $\Delta E^*$ ) da batata-doce <i>in natura</i> e das batatas-doces durante a secagem por <i>MWVD</i> .....	89
<b>Tabela 3.4</b> - Propriedade dielétricas e profundidade de penetração das micro-ondas da água, das batatas <i>in natura</i> , branqueada e secas em pó e acondicionada em soluções salinas de diferentes umidades relativas, nas frequências de 915 e 2450 MHz. Atividade de água ( $a_w$ ) e umidade em base úmida ( $X_{bu}$ ) das amostras.....	96
<b>Tabela 4.1</b> - Potência nominal absorvida ( $P_{abs}$ ) e eficiência do sistema durante o aquecimento por micro-ondas com diferentes quantidades de água.....	115
<b>Tabela 4.2</b> - Taxas de secagem e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os ajustes lineares ao período de taxa constante.....	120
<b>Tabela 4.3</b> - Classificação das amostras quanto à presença de amostras queimadas, pontos escuros e não queimadas, após os processos de secagem por <i>MWVD</i> .....	122
<b>Tabela 5.1</b> - Teor de umidade inicial ( $X_{bs}$ ) das batatas-doces <i>in natura</i> , após o branqueamento e após serem desidratadas pelos diferentes processos de secagem. Atividade de água ( $a_w$ final) das amostras secas e tempo final de secagem ( $t_f$ ).....	136
<b>Tabela 5.2</b> - Taxa de secagem e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), para os ajustes lineares ao período de taxa constante.....	138
<b>Tabela 5.3</b> - Porosidade e massa específica aparente das batatas-doces obtidas pelos diferentes métodos de secagem.....	142
<b>Tabela 5.4</b> - Parâmetros de cor ( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ , $\Delta E^*$ ) da batata-doce <i>in natura</i> , branqueada e secas por diferentes métodos de secagem.....	146
<b>Tabela 5.5</b> - Soma das ordens e média da análise de ordenação para as batatas-doces desidratadas pelos diferentes métodos de secagem.....	147
<b>Tabela 5.6</b> - Resultados do teste de aceitação e intenção de compra para as batatas-doces desidratadas pelos diferentes métodos de secagem.....	149

<b>Tabela 5.7</b> - Valores médios e desvios padrões dos parâmetros obtidos nos testes acústico-mecânico, para amostras secas pelos diferentes processos de secagem. ....	155
<b>Tabela 5.8</b> - Matriz de coeficientes de correlação (r) entre variáveis investigadas determinada a partir do PCA. ....	158

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 2.1</b> - Estado da arte sobre controle da temperatura pela manipulação da potência. ....	63
---	----



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>Abreviaturas e Siglas</b>	<b>Descrição</b>
<i>AD</i>	Secagem convectiva
<i>ANOVA</i>	Análise de variância
<i>AOAC</i>	<i>Association of Official Analytical Chemists</i>
<i>CIE</i>	<i>Commision Internationale de L'Éclairage</i>
<i>CMFD</i>	<i>Convective multi-flash drying</i>
<i>DIC</i>	<i>Instant controlled pressure drop</i>
<i>EM</i>	Eletromagnéticas
<i>FAO</i>	<i>Food and Agricultural Organization</i>
<i>FAOSTAT</i>	Divisão de estatística da <i>Food and Agriculture Organization</i>
<i>FD</i>	Liofilização
<i>HTST drying</i>	<i>High-temperature short-time drying</i>
<i>KMFD</i>	<i>Conductive multi-flash drying</i>
<i>LCME</i>	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica
<i>MEV</i>	Microscopia Eletrônica de Varredura
<i>MFD</i>	<i>Multi-flash drying</i>
<i>MWAD</i>	Secagem por micro-ondas com ar quente
<i>MWD</i>	Secagem por micro-ondas
<i>MWMFD</i>	<i>Microwave multi-flash drying</i>
<i>MWVD</i>	Secagem por micro-ondas a vácuo
<i>MWVD-AJ</i>	Secagem por micro-ondas a vácuo com controle ajustado
<i>MWVDC</i>	Secagem por micro-ondas a vácuo com controle de temperatura
<i>MWVDS</i>	Secagem por micro-ondas a vácuo sem controle de temperatura
<i>PCA</i>	Análise das componentes principais
<i>PID</i>	Proporcional-integral-derivativo
<i>PROFI</i>	Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos
<i>UFSC</i>	Universidade Federal de Santa Catarina



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$\Delta E^*$	Variação total da cor	-
$a^*$	Tonalidade vermelha/verde	-
$a_w$	Atividade de água	-
$b^*$	Tonalidade amarela/azul	-
$c$	Velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ )	$\text{m s}^{-1}$
$c_p$	Calor específico	$\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
$cp_{H_2O}$	Calor específico da água	$\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
$cp_{vidro}$	Calor específico do vidro	$\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
$dp$	Profundidade de penetração	cm
$dX/dt$	Taxa de secagem	-
$E$	Campo elétrico	$\text{V m}^{-1}$
$f$	Frequência	Hz
$H$	Campo magnético	-
$K'$	Constante dielétrica relativa	-
$K''$	Constante dielétrica relativa	-
$L^*$	Luminosidade entre o preto e branco	-
$m_{H_2O}$	Massa da água	g
$m_p$	Massa inicial do produto	kg
$m_s$	Massa da amostra	g
$m_{vidro}$	Massa do vidro	g
$P_{abs}$	Potência absorvida	W
$P_{em}$	Potência nominal emitida	W
$P_V$	Potência volumétrica dissipada	$\text{W m}^{-3}$
$SPL$	Nível de Pressão Sonoro	dB
$SPL_{10}$	Média do nível de pressão sonora dos dez maiores picos acústicos	dB
$SPL_{máx}$	Média do valor de pressão sonora do pico acústico máximo	dB
SST	Sólidos solúveis totais	$^\circ\text{Brix}$
$t$	Tempo	min
$T$	Temperatura	$^\circ\text{C}$
$\tan \delta$	Tangente de perdas ou fator de dissipação	-
$UR$	Umidade relativa	$\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$
$V_{ap}$	Volume aparente	$\text{cm}^3$
$V_r$	Volume real	$\text{cm}^3$
$X_{bs}$	Umidade em base seca	$\text{g g}^{-1}$
$X_{bu}$	Umidade em base úmida.	$\text{g g}^{-1}$

---

$X_c$	Umidade crítica do sistema	-
$\alpha$	Fator de atenuação	cm
$\Delta H_v$	Entalpia específica de vaporização da água	J/kg
$\Delta m_w$	Perda de massa	kg
$\Delta T$	Varição da temperatura	°C
$\varepsilon$	Porosidade	-
$\varepsilon_d''$	Fator (ou constante de perdas) contribuição rotação dipolar	-
$\varepsilon_\sigma''$	Fator (ou constante de perdas) contribuição condução de iônica	-
$\varepsilon^*$	Permissividade relativa	-
$\varepsilon'$	Permissividade (ou constante dielétrica)	F m <sup>-1</sup>
$\varepsilon''$	Fator (ou constante de perdas)	-
$\varepsilon_0$	Permissividade dielétrica do vácuo (8,854. 10 <sup>-12</sup> F m <sup>-1</sup> )	F m <sup>-1</sup>
$\lambda$	Comprimento de onda	cm
$\lambda_0$	Comprimento de onda no espaço livre	cm
$\rho$	Massa específica	g cm <sup>-3</sup>
$\rho_{ap}$	Massa específica aparente	g cm <sup>-3</sup>
$\sigma$	Condutividade iônica	S m <sup>-1</sup>
$\omega$	Frequência angular	rad s <sup>-1</sup>

---

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>13</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>15</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>21</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>23</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>25</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>27</b>
<b>DIAGRAMA CONCEITUAL DA TESE .....</b>	<b>33</b>
<b>ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....</b>	<b>35</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>37</b>
1.1 OBJETIVOS .....	39
1.1.1 Objetivo geral.....	39
1.1.2 Os objetivos específicos são:.....	40
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>41</b>
2.1 FRUTAS E HORTALIÇAS .....	41
2.2 BATATA-DOCE.....	41
2.3 SECAGEM .....	42
2.3.1 Secagem solar .....	45
2.3.2 Secagem convectiva .....	45
2.3.3 Secagem a vácuo .....	45
2.3.4 Liofilização .....	46
2.4 MÉTODOS ALTERNATIVOS DE SECAGEM PARA PRODUÇÃO DE FRUTAS E HORTALIÇAS CROCANTES..	46
2.4.1 Secagem por explosão ( <i>explosion puffing</i> ) .....	46
2.4.2 Redução brusca da pressão (Instant controlled pressure drop - DIC) .....	47
2.4.3 Pulso de secagem à alta temperatura e curto tempo ( <i>High-temperature short-time pulse drying - HTST             drying</i> ) .....	48
2.4.4 Secagem por micro-ondas a vácuo .....	48
2.4.5 Múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo ( <i>Multi-flash drying - MFD</i> ).....	48
2.5 MICRO-ONDAS .....	50

2.6 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS E AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS .....	53
2.7 AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS .....	58
2.8 CONTROLE DA POTÊNCIA E DA TEMPERATURA DURANTE A SECAGEM POR MICRO-ONDAS .....	59
<b>3 AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CHIPS DE BATATA-DOCE POR MWVD E DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DURANTE A SECAGEM.....</b>	<b>65</b>
3.1 MATERIAL E MÉTODOS .....	65
<b>3.1.1 Seleção e preparo das amostras.....</b>	<b>65</b>
<b>3.1.2 Experimentos de secagem .....</b>	<b>66</b>
<b>3.1.3 Caracterização das amostras.....</b>	<b>67</b>
Determinação da umidade.....	68
Atividade de água.....	68
Determinação da temperatura .....	68
Massa específica aparente .....	68
Porosidade.....	69
Medidas de cor.....	70
Determinação das propriedades mecânicas.....	70
Determinação das propriedades acústica e mecânicas .....	71
Estereoscópio Óptico .....	73
<b>3.1.4 Determinação das propriedades dielétricas .....</b>	<b>73</b>
<i>Profundidade de penetração</i> .....	75
<b>3.1.5 Análise estatística.....</b>	<b>76</b>
3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
<b>3.2.1 CINÉTICAS DE SECAGEM .....</b>	<b>76</b>
<b>3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS .....</b>	<b>79</b>
Propriedades acústico-mecânicas das amostras durante a secagem.....	80
Porosidade e massa específica aparente das amostras durante a secagem .....	86
Cor das amostras durante a secagem.....	89
Propriedades dielétricas das amostras .....	91
3.3 CONCLUSÃO.....	97
<b>4 ESTRATÉGIAS PARA MELHORAR A SECAGEM POR MICRO-ONDAS A VÁCUO: CONTROLE DA TEMPERATURA</b>	

<b>DO PRODUTO PELA MANIPULAÇÃO DA POTÊNCIA E USO DE AGITADOR DE ONDAS.....</b>	<b>99</b>
4.1 MATERIAL E MÉTODOS .....	99
<b>4.1.1 Secador .....</b>	<b>99</b>
<b>4.1.2 Agitador de onda (<i>mode stirrer</i>).....</b>	<b>102</b>
Validação do agitador de onda .....	103
<b>4.1.3 Controlador de temperatura pela manipulação da         potência de geração de micro-ondas .....</b>	<b>103</b>
Validação do controlador .....	105
<b>4.1.4 Seleção e preparo das amostras.....</b>	<b>105</b>
<b>4.1.5 Experimentos de secagem .....</b>	<b>106</b>
Secagem por micro-ondas a vácuo sem controle de temperatura (MWVDS).....	106
Secagem por micro-ondas a vácuo com controle de temperatura (MWVDC) .....	107
4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	107
<b>4.2.1 Validação do agitador de onda .....</b>	<b>107</b>
<b>4.2.2 Validação do controlador de temperatura .....</b>	<b>108</b>
<b>4.2.3 Secagem MWVD com controle de temperatura e         agitador de ondas.....</b>	<b>115</b>
4.3 CONCLUSÃO .....	123
<b>5 DESIDRATAÇÃO DE BATATA-DOCE EM SECADOR DE TAMBOR ROTATIVO, AQUECIDO POR MICRO-ONDAS SOB VÁCUO, COM CONTROLE DA TEMPERATURA PELA MANIPULAÇÃO DA POTÊNCIA .....</b>	<b>125</b>
5.1 MATERIAL E MÉTODOS .....	125
<b>5.1.1 Liofilização (<i>FD</i>).....</b>	<b>127</b>
<b>5.1.2 Secagem convectiva (<i>AD</i>) .....</b>	<b>127</b>
<b>5.1.3 Secagem condutiva por múltiplos ciclos de         aquecimento-pulso de vácuo (<i>Conductive multi-flash         drying - KMFD</i>).....</b>	<b>128</b>
<b>5.1.4 Secagem por micro-ondas a vácuo com tambor         rotativo (<i>MWVD</i>) .....</b>	<b>129</b>
MWVD com controle instantâneo (MWVD) .....	132
MWVD com controle ajustado (MWVD-AJ) .....	132
<b>5.1.5 Análises sensoriais .....</b>	<b>132</b>

<b>5.1.6</b>	<b>Análise estatística.....</b>	<b>133</b>
<b>5.2</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>134</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Curvas experimentais de secagem.....</b>	<b>134</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Imagens das amostras obtidas por microscopia ótica e por microscopia eletrônica de varredura .....</b>	<b>141</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Porosidade e massa específica aparente .....</b>	<b>142</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Cor .....</b>	<b>144</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Análises sensoriais .....</b>	<b>147</b>
<b>5.2.6</b>	<b>Propriedades mecânicas.....</b>	<b>151</b>
<b>5.2.7</b>	<b>Propriedades acústico-mecânicas.....</b>	<b>153</b>
<b>5.2.8</b>	<b>Análise de correlações entre propriedades estruturais, acústico-mecânicas e sensoriais .....</b>	<b>156</b>
<b>5.3</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>159</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>161</b>
	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>163</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>165</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>183</b>
	<b>ANEXO B .....</b>	<b>185</b>
	<b>ANEXO C .....</b>	<b>185</b>

## DIAGRAMA CONCEITUAL DA TESE

### SECAGEM DE BATATA-DOCE EM MICRO-ONDAS A VÁCUO, COM CONTROLE DA TEMPERATURA PELA MANIPULAÇÃO DA POTÊNCIA

#### ***Por quê?***

- A secagem de alimentos por micro-ondas sob vácuo apresenta curtos tempos de secagem e gera produtos crocantes e de alta qualidade. Porém, o processo precisa ser melhorado e adaptado para cada alimento, pois: i) durante a secagem, a remoção da água reduz a conversão das micro-ondas em energia térmica, devido à modificação das propriedades dielétricas dos produtos; ii) não homogeneidades do campo de micro-ondas geram pontos quentes (*hot spots*). Estes problemas deterioram a qualidade do produto e aumentam o consumo de energia.

#### ***O que já existe?***

Liofilização, *explosion puffing*, *HTST drying*, *multi-flash drying*. Este último processo foi desenvolvido na UFSC para produzir frutas, hortaliças e queijos crocantes;

- Secagem com micro-ondas a vácuo → hortaliças e frutas crocantes;
- Secagem por micro-ondas a vácuo com sistema rotativo → melhor distribuição das ondas eletromagnéticas no produto;
- Controle da potência em micro-ondas doméstico usando medida da temperatura e um micro controlador.

#### ***Hipóteses da pesquisa***

É possível melhorar o processo de secagem de batatas *chips* utilizando micro-ondas a vácuo com controle da temperatura do produto pela manipulação da potência emitida pelo gerador de micro-ondas.

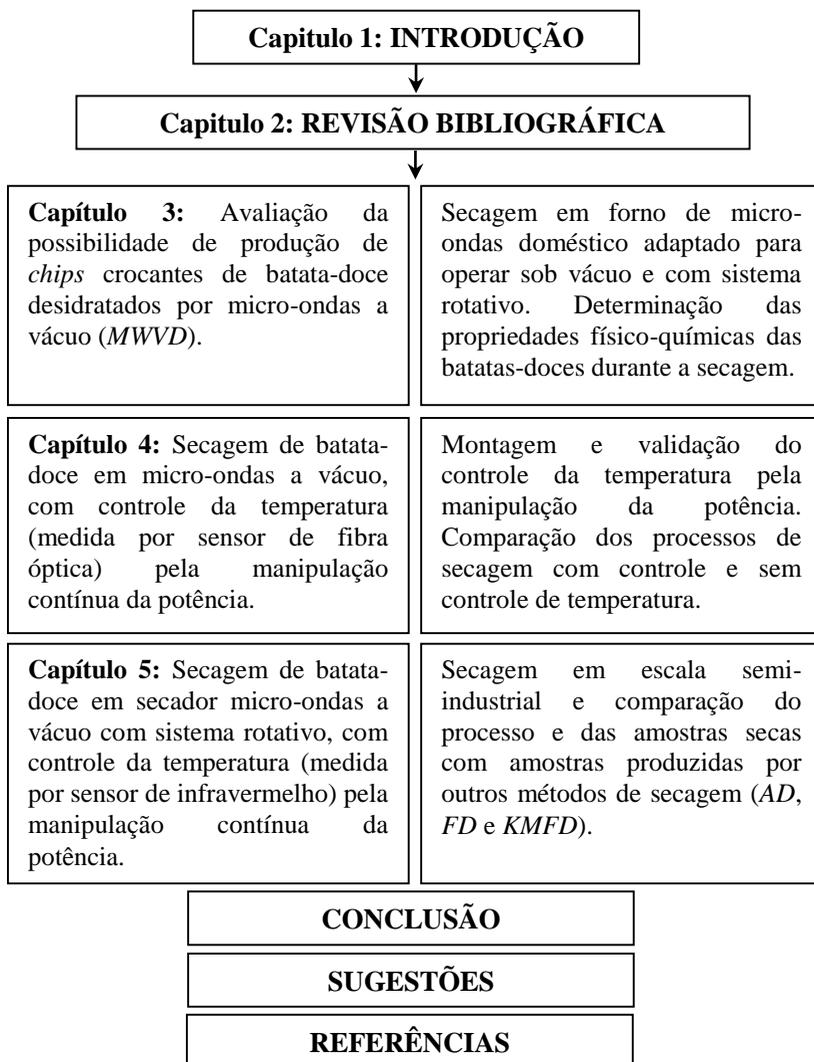
#### ***Resultados esperados***

O controle da temperatura evitará o sobreaquecimento dos produtos, resultando em alimentos desidratados de alta qualidade. Essa estratégia viabilizará escalas industriais de produção.



## ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Para apresentar os conteúdos e os temas tratados em uma sequência lógica, este documento está apresentado conforme disposto a seguir. Os capítulos de material e métodos, resultados e discussão e conclusão parcial foram divididos com base em três estudos.





## 1 INTRODUÇÃO

---

Frutas e hortaliças são muito cultivadas em todo o mundo e consumidas *in natura*, minimamente processadas, cozidas, desidratadas e fritas. Essas matérias-primas podem ser processadas para servirem como ingredientes industriais (produtos B to B, *Business to Business*). A produção mundial de frutas e hortaliças foi de 1.806,27 milhões de toneladas em 2013, sendo a China, a Índia e os Estados Unidos, os maiores produtores (FAOSTAT, 2017).

Em geral, frutas e hortaliças têm vida útil curta, levando a perdas de 30-40% nos países em desenvolvimento, quando são usadas técnicas inadequadas de colheita, pós-colheita e armazenamento (JAYARAMAN e GUPTA, 2014). As frutas e hortaliças são muito sensíveis à deterioração, mesmo sob refrigeração, sendo necessário resfriá-las, congelá-las ou secá-las para estender sua vida útil. A desidratação de frutas e hortaliças é uma alternativa viável para diminuir o desperdício, pois reduz o teor de umidade e a atividade da água, inibindo o crescimento microbiano, a atividade enzimática e as taxas de reações químicas. Além disso, a redução dos custos de transporte e armazenamento, devido à redução do peso e volume, e o desenvolvimento de novos produtos processados possibilitam a agregação de valor monetário à cadeia de produção de frutas e hortaliças (VAN ARSDEL, 1963; RATTI, 2001; AGUILERA et al., 2003; FELLOWS, 2006; SINGH e HELDMAN, 2009).

Alimentos saudáveis, naturais e práticos são a tendência no mercado mundial, motivados pela busca de alimentos que ajudem na promoção da saúde, e que demandem pouco tempo de preparação. Dessa forma, uma alternativa interessante de produto industrializado e saudável são os *chips* de batata-doce desidratados, livre de óleos e conservantes. A batata-doce é uma hortaliça de consumo crescente no Brasil, apresentando alto teor nutritivo, fibras dietéticas, minerais, vitaminas e antioxidantes. Além disso, vem se destacando como uma excelente opção de carboidrato, por apresentar carboidratos de baixo índice glicêmico, que são absorvidos lentamente pelo organismo, favorecendo a liberação gradativa de glicose na corrente sanguínea.

Diferentes métodos de secagem são utilizados para a produção de frutas e hortaliças desidratadas, e.g. secagem convectiva, secagem a vácuo, liofilização, secagem por micro-ondas, entre outros. A escolha do processo mais adequado depende principalmente do alimento a ser desidratado e das características desejadas para o produto.

Secagem convectiva é o método mais popular utilizado para produzir frutas e hortaliças desidratadas (KARAM et al., 2016). No entanto, apresenta baixa eficiência energética, longos tempos de secagem, podendo provocar degradações térmicas e encolhimento da matriz sólida, reduzindo a capacidade de reidratação do produto desidratado (ORIKASA et al., 2014).

Por outro lado, a liofilização tem sido considerada o melhor processo de desidratação para produtos termolábeis de alto valor agregado (ZOTARELLI et al., 2012), resultando em produtos desidratados de alta qualidade nutricional e sensorial. A estrutura é preservada, resultando em produtos altamente porosos, que apresentam excelentes propriedades de reidratação (MUJUMDAR, 2006; OIKONOMOPOULOU et al., 2011). Entretanto, a liofilização apresenta alto custo energético e longos tempos de processo, sendo indicada para produtos com elevado valor agregado (LOUKA e ALLAF, 2002; MUJUMDAR, 2006).

A busca por tecnologias de secagem que apresentam curto tempo de processo, e resultem em produtos alimentícios de alta qualidade nutricional e sensorial, é de grande importância para o desenvolvimento industrial deste setor. Dessa forma, novas tecnologias de secagem, como as baseadas na aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo - *multi-flash drying* (MFD) e micro-ondas a vácuo (MWVD) têm sido utilizadas para a produção de frutas e hortaliças crocantes de alta qualidade, em curto tempo de processo quando comparados à liofilização (ZOTARELLI et al. 2012; CHANDRASEKARAN et al., 2013; MONTEIRO et al., 2015; PORCIUNCULA et al. 2016; MONTEIRO et al., 2016).

O processo *multi-flash drying* (MFD) é baseado na aplicação de sucessivos ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo, no qual o produto é aquecido à pressão atmosférica, usando ar quente, placas aquecidas ou micro-ondas, até atingir uma temperatura desejada. Em seguida, aplica-se uma redução súbita de pressão (pulso de vácuo), resultando na evaporação rápida da água (evaporação *flash*) e resfriamento do produto, provocando desidratação e texturização (LAURINDO et al., 2011).

A secagem por micro-ondas a vácuo vem sendo utilizada para a produção de produtos crocantes, com tempos de secagem curtos e baixo custo, quando comparados com a liofilização (DROUZAS e SCHUBERT, 1996; LIN et al., 1998; GUNASEKARAN, 1999; KROKIDA e MAROULIS, 1999; MOUSA e FARID, 2002; ZHANG et al., 2006). Por outro lado, a secagem por micro-ondas apresenta desvantagens quanto à falta de uniformidade, inerente ao campo eletromagnético dentro da cavidade do micro-ondas, que podem gerar

superaquecimento de parte do produto, pontos quentes (*hot spots*), alterando a qualidade do produto final e levando a um consumo de energia maior do que o necessário (COHEN e YANG, 1995; DATTA e ANANTHESWARAN, 2001; PUSCHNER, 2005; SEBERA et al., 2012).

No entanto, a uniformidade da secagem por micro-ondas pode ser melhorada por um *design* adequado da cavidade de micro-ondas, instalação de agitadores de onda (*mode stirrers*) e através da movimentação do produto no interior da cavidade (prato giratório ou tambor rotativo) (COHEN e YANG, 1995; WAËPPLING-RAAHOLT e OHLSSON, 2005; DOMINGUEZ-TORTAJADA et al., 2007; SEBERA et al., 2012; MONTEIRO et al., 2015). O controle da temperatura pela manipulação da potência pode melhorar a uniformidade do aquecimento e a eficiência energética da secagem. Além disso, o uso de micro-ondas sob vácuo reduz as degradações nutricionais e sensoriais (cor, sabor) e resulta em produtos mais fáceis de serem reidratados (LIN et al., 1998; LI, 2006; CLARY et al., 2007).

As alterações nas propriedades físicas dos alimentos (massa específica aparente, porosidade, textura, etc.) são de grande importância em processos de secagem e devem ser analisadas, pois influenciam a qualidade do produto e sua aceitação pelos consumidores (MADIOULI et al., 2012). As propriedades dielétricas dos materiais variam com o teor de umidade e influenciam diretamente na secagem com micro-ondas. Conhecer a variação dessas propriedades durante a secagem é essencial na concepção e controle de sistemas de secagem por micro-ondas (FENG et al., 2002).

Estudos sobre a secagem de frutas e hortaliças com o uso de micro-ondas sob vácuo merecem atenção, pois essa técnica de secagem é uma alternativa viável para a produção de produtos desidratados de qualidade, com tempos de secagem curtos e custos competitivos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo é avaliar a secagem de batata-doce por micro-ondas a vácuo com controle da temperatura pela manipulação da potência.

### 1.1.2 Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar a possibilidade de produção de *chips* crocantes de batata-doce desidratados por micro-ondas a vácuo (*MWVD*) em um forno de micro-ondas doméstico adaptado com vácuo e sistema rotativo.
- b) Determinar as propriedades físico-químicas (umidade, atividade de água, temperatura, cor, massa específica aparente, porosidade, propriedades mecânicas, análise acústica de textura e propriedades dielétricas) das batatas-doces durante o processo de secagem por *MWVD*.
- c) Homogeneizar o campo eletromagnético pela instalação de um agitador de onda (*mode stirrers*) na cavidade de um secador multifuncional de micro-ondas.
- d) Montar e validar um sistema de secagem utilizando controle da temperatura pela manipulação da potência das micro-ondas;
- e) Determinar as curvas de secagem de batatas-doces desidratadas por micro-ondas a vácuo (*MWVD*), utilizando o controle da temperatura (medida por um sensor de fibra óptica) por meio da manipulação da potência;
- f) Determinar as curvas de secagem de batatas-doces desidratadas por micro-ondas a vácuo (*MWVD*), utilizando tambor rotativo e o controle da temperatura (medida pelo termômetro de infravermelho) por meio da manipulação da potência;
- g) Determinar as curvas de secagem de batata-doce por diferentes processos (*AD*, *FD* e *KMFD*);
- h) Comparar as características físico-químicas, visuais e microestruturais dos produtos obtidos por *MWVD*, *KMFD*, *AD* e *FD*;
- i) Avaliar a aceitação sensorial e a intenção de compra das batatas-doces desidratadas pelos diferentes processos de secagem (*MWVD*, *KMFD*, *AD* e *FD*).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 FRUTAS E HORTALIÇAS

As frutas e hortaliças são muito cultivadas ao redor do mundo e consumidas *in natura*, cozidas, minimamente processadas, desidratadas, fritas e utilizadas como ingredientes domésticos e industriais.

De acordo com a *Food and Agricultural Organization* (FAO), a produção mundial de frutas foi de cerca de 673,68 milhões de toneladas em 2013. A China é o principal produtor de frutas do mundo, com produção de 151,54 milhões de toneladas (22,5%). A Índia, com 82,63 milhões de toneladas (12,3%) ocupa a segunda posição, seguida pelo Brasil (5,6%), Estados Unidos (4,0%) e Espanha (2,6%).

Além disso, a produção mundial de hortaliças foi de cerca de 1.132,59 milhões de toneladas em 2013. O maior produtor de hortaliças foi a China, com produção de 580,70 milhões de toneladas (51,3%), enquanto, a Índia apresentou a segunda maior produção, contribuindo com cerca de 121,02 milhões de toneladas (10,7%), seguida pelos Estados Unidos (3,0%), Turquia (2,5%) e Irã (2,1%) (FAOSTAT, 2017).

Frutas e hortaliças têm uma vida útil curta, resultando em grande desperdício. Nesse sentido, estratégias de preservação que podem reduzir estas perdas são importantes para aumentar a disponibilidade desses alimentos.

### 2.2 BATATA-DOCE

A batata-doce é uma hortaliça da variedade (*Ipomoea batatas* L. Lam.), da família botânica *Convolvulaceae*, sendo rica em amido (HORTIBRASIL, 2014). É originária das Américas Central e do Sul, sendo encontrada em diversos países. As variedades de batata-doce podem ser diferenciadas pela coloração da casca e da polpa (roxo, salmão, amarelo, creme ou branco), pelas características da casca, formato, conteúdo de açúcares e conteúdo de matéria seca (HORTIBRASIL, 2014).

Segundo dados da FAOSTAT (2017), a produção mundial da batata-doce em 2014 foi de aproximadamente 107 milhões de toneladas, sendo que 75% da produção foram obtidas na Ásia, 21% na África e 4% no resto do mundo. A China é o maior produtor de batata-doce, com aproximadamente 72 milhões de toneladas por ano. Dados de 2013 mostram que a produção anual de batata-doce no Brasil foi de 505 mil

toneladas em uma área de 38.602 hectares (FAOSTAT, 2017). Essa hortaliça é cultivada em todas as regiões, porém apresenta maior produção na região sul, representando um percentual de 45% da produção total (Tabela 2.1).

**Tabela 2.1** - Percentual da produção de batata-doce no Brasil, segundo as grandes regiões.

<b>Regiões</b>	<b>Produção Brasileira (%)</b>
Sul	45,0
Nordeste	28,1
Sudeste	23,6
Centro-oeste	2,0
Norte	1,3

Fonte: IBGE (2013).

A batata-doce contém de 63% a 83% de umidade em base úmida (OSUNDAHUNSI et al., 2003, AINA et al., 2009; FALADE e SOLADEMI, 2010), sendo considerada um alimento altamente nutritivo, rico em fibras dietéticas, minerais, vitaminas e antioxidantes, tais como  $\beta$ -caroteno e ácidos fenólicos (ISHIDA et al., 2000). Essa hortaliça é também uma importante fonte de carboidrato, cujo principal constituinte é o amido. Seus carboidratos são complexos e de baixo índice glicêmico, sendo lentamente absorvidos pelo organismo, liberando a glicose gradativamente na corrente sanguínea. O consumo controlado de batata-doce é benéfico para pacientes diabéticos, podendo ajudá-los a regular os níveis de glicose no sangue (ALLEN et al., 2012). Segundo Lin et al. (2008) e Allen et al. (2012), o tipo de tratamento térmico ao qual o amido é submetido, pode alterar o índice glicêmico, gerando quantidades diferentes de amido resistente. O termo amido resistente é definido como a soma do amido e produtos da sua degradação que não são digeridos pelas enzimas humanas de indivíduos saudáveis, o que prolonga a digestão e favorece a fermentação do alimento no trato intestinal (SALGADO et al., 2005).

As batatas-doces frescas são muito susceptíveis à deterioração microbiana, mesmo sob refrigeração, sendo necessário congelar, enlatar ou secar para estender sua vida útil.

### 2.3 SECAGEM

Uma alternativa viável para diminuir os desperdícios de frutas e hortaliças e produzir alimentos industrializados saudáveis, práticos e

convenientes é a desidratação. Entre os métodos de conservação, a secagem tem sido extensivamente utilizada para preservar e aumentar a vida útil de frutas e hortaliças. Processos de desidratação de alimentos são utilizados para reduzir o teor de umidade e atividade da água, a fim de inibir o crescimento microbiano, diminuir a atividade enzimática e as taxas de reações químicas (VAN ARSDEL, 1963; FELLOWS, 2006; RATTI, 2001).

A secagem não é considerada apenas um processo de conservação, mas também um método para agregar valor à matéria-prima, desenvolvendo novos produtos e ajudando a suavizar as variações sazonais no consumo de frutas e de hortaliças (MOUNIR et al., 2014; MONTEIRO et al., 2016). Além disso, os produtos secos apresentam menores custos de transporte e armazenamento, devido à redução de volume e pela possibilidade de serem armazenados à temperatura ambiente (AGUILERA et al., 2003; SINGH e HELDMAN, 2009).

O princípio da secagem baseia-se no desequilíbrio entre a pressão de vapor da água contida no sólido ou em uma suspensão (polpa de fruta, por exemplo) e a pressão de vapor da água do ar ambiente. A secagem é um processo de transferência simultânea de calor e massa, em que os mecanismos de transporte do líquido e vapor no interior do material dependem da estrutura e do teor de umidade (FELLOWS, 2006).

Na Figura 2.1 estão apresentadas as curvas típicas de secagem com ar quente: evolução temporal da umidade em base seca ( $X_{bs}$ ), taxa de secagem ( $dX/dt$ ) e evolução temporal da temperatura ( $T$ ) do produto. Em geral, a secagem de materiais com altos teores de umidade é dividida esquematicamente em três períodos bem definidos, de acordo com a evolução das transferências de calor e massa ao longo do processo.

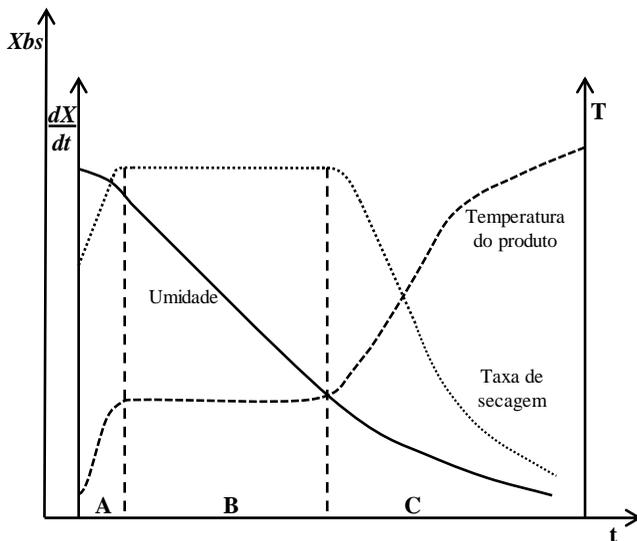
No período inicial de secagem (região A, Figura 2.1), chamado de fase de adequação, a temperatura inicial do produto é inferior a temperatura do ar de secagem, a qual se eleva rapidamente até a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem (GEANKOPLIS, 1993).

No período seguinte, a temperatura da superfície alcança a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, iniciando-se o período de secagem à taxa constante (região B, Figura 2.1). 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 marcado pela umidade crítica do sistema ( $X_c$ ), a partir da qual há redução da taxa de secagem (GEANKOPLIS, 1993). Essa umidade crítica não é uma propriedade do material, pois depende muito das condições de processo. Um material submetido a uma corrente de ar com

elevada temperatura e escoando a velocidades elevadas resultará em menor  $X_c$  de secagem, que aquele submetido a uma corrente de ar à temperatura moderada e escoando em baixa velocidade.

O último período (região C, Figura 2.1) é denominado de período de secagem à taxa decrescente. Nesse período, a umidade da superfície do material é relativamente baixa e a taxa de secagem é controlada pela migração de umidade do interior para a superfície do material (GEANKOPLIS, 1993). A água no interior dos alimentos movimenta-se por diferentes mecanismos, dentre os quais se destacam: i) movimento de líquido por forças capilares, ii) difusão de vapores causado pelos gradientes de pressão parcial de vapor e iii) difusão de líquido devido à diferença na concentração dos solutos no interior do produto (FELLOWS, 2006). Nesse período de secagem, a temperatura do produto aumenta, podendo atingir a temperatura do ar de secagem. A umidade mínima que pode ser alcançada é a umidade de equilíbrio do material com o ar de secagem, marcando o fim do processo (GEANKOPLIS, 1993).

**Figura 2.1** - Curvas típicas de secagem com ar quente.



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

Diversos processos de secagem são utilizados para produzir frutas e hortaliças desidratadas, dentre os quais os mais comuns são a secagem solar, a secagem convectiva, a secagem a vácuo e a liofilização.

### 2.3.1 **Secagem solar**

A secagem solar tem sido usada há séculos como um meio de conservação de produtos agrícolas. Entre as vantagens da secagem solar, podem ser citadas o baixo custo, o caráter não poluente e a utilização de uma fonte de energia renovável, gratuita e abundante. No entanto, muitas limitações dificultam a produção em escala industrial (IMRE, 2014; PRAKASH e KUMAR, 2014). Condições ambientais, contaminação por poeira, insetos, pássaros e outros animais, a falta de controle sobre as condições de secagem e as deteriorações químicas, enzimáticas e microbiológicas durante o longo tempo de secagem são as principais limitações (JAYARAMAN e GUPTA, 2014).

### 2.3.2 **Secagem convectiva**

A secagem convectiva é o método mais popular utilizado para produzir frutas e legumes desidratados, viabilizada por muitos modelos de secadores, para diversas escalas de produção (KARAM et al., 2016). A secagem convectiva apresenta baixa eficiência energética e longos tempos de secagem durante o período de taxa decrescente de secagem. Este método também provoca alteração significativa na cor e degradação de nutrientes, além de acarretar o encolhimento e reduzir a capacidade de reidratação dos produtos (ORIKASA et al., 2014). Atualmente, a secagem convectiva tem sido utilizada em combinação com outras técnicas de secagem (micro-ondas, vácuo e radiação infravermelha), a fim de aumentar a eficiência energética deste processo e reduzir a exposição a elevadas temperaturas à pressão atmosférica, que podem resultar em deterioração substancial da qualidade dos alimentos (CALÍN-SÁNCHEZ et al., 2014; MOTEVALI et al., 2014; ZIELINSKA e MARKOWSKI, 2016; KARAM et al., 2016).

### 2.3.3 **Secagem a vácuo**

A secagem a vácuo é um processo em que o alimento é seco sob pressão subatmosférica. Este método é utilizado para alimentos termossensíveis que podem ser danificados, se expostos a altas temperaturas. Na secagem a vácuo, a taxa de evaporação é aumentada devido à diminuição da temperatura de saturação da água. Este processo apresenta vantagens em relação à secagem convectiva, como por exemplo, temperaturas de processo mais baixas e taxas de secagem mais elevadas, que proporcionam produtos com melhor qualidade sensorial e

nutricional (ALIBAS, 2007; ŠUMIC et al., 2013). No entanto, o alimento é exposto a uma temperatura moderada e constante durante longos períodos, não evitando o encolhimento e acarretando produtos com baixa porosidade (DISSA et al., 2008; KARAM et al., 2016). Isso é uma limitação, se o objetivo é a produção de alimentos desidratados crocantes.

#### 2.3.4 Liofilização

A liofilização é considerada como a melhor tecnologia de desidratação para produtos termolábeis, de alto valor agregado, uma vez que se baseia na desidratação por sublimação da água. Os produtos liofilizados destacam-se por terem a estrutura preservada e altamente porosa, além de conservarem suas propriedades nutricionais, com retenção de aroma, cor e excelente capacidade de reidratação (RATTI, 2001; OIKONOMOPOULOU et al., 2011). No entanto, os custos de investimento nos equipamentos e o processo de liofilização são caros. Os custos operacionais estão associados ao alto consumo de energia, devido ao congelamento do produto, manutenção do vácuo em longos períodos, e à necessidade de condensação dos vapores a baixas temperaturas. (RATTI, 2001; VARNALIS et al., 2001).

### 2.4 MÉTODOS ALTERNATIVOS DE SECAGEM PARA PRODUÇÃO DE FRUTAS E HORTALIÇAS CROCANTES

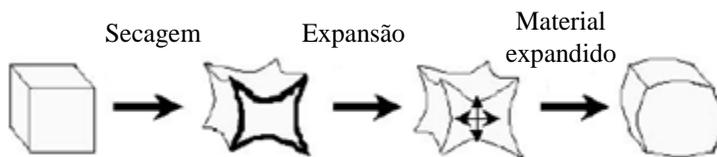
Métodos alternativos de secagem para produção de frutas e hortaliças crocantes têm sido publicados na literatura. *Explosion puffing*, *instant controlled pressure drop (DIC)*, *high-temperature short-time drying (HTST drying) pulse*, micro-ondas a vácuo e *multi-flash drying (MFD)* são alguns processos alternativos que estão associados à formação de alimentos desidratados com uma microestrutura porosa, formada pela rápida expansão de gás e geração de vapor (SULLIVAN e CRAIG, 1984; SACA e LOZANO, 1992; LIN et al., 1998; GUNASEKARAN, 1999; DATTA e ANANTHESWARAN, 2001; LOUKA e ALLAF, 2002; LOUKA et al., 2004; HOFSETZ et al. 2007; ZHANG et al., 2006; ZOTARELLI et al., 2012).

#### 2.4.1 Secagem por explosão (*explosion puffing*)

A secagem *explosion puffing* foi desenvolvida no Eastern Regional Research Center na década de 60, contribuindo de maneira importante para a qualidade das frutas e hortaliças desidratadas (SULLIVAN et al.,

1977). O processo *explosion puffing* baseia-se na compressão-descompressão da câmara de secagem, que causa autovaporização da umidade do material, resultando em produtos crocantes, com boa qualidade sensorial, boa capacidade de reidratação e baixos custos de processamento (SULLIVAN e CRAIG, 1984, SACA e LOZANO, 1992). Nesse processo, as frutas e hortaliças parcialmente desidratadas são colocadas em uma câmara pressurizada e aquecidas por vapor de água superaquecido. A água no alimento atinge rapidamente uma temperatura superior a 100 °C, quando o sistema é instantaneamente despressurizado até a pressão atmosférica, resultando em produtos porosos e expandidos (*puffing effect*), devido à evaporação instantânea (SULLIVAN e CRAIG, 1984; KOZEMPEL et al., 1989; SACA e LOZANO, 1992). Após o *explosion puffing*, os produtos precisam ser secos por outros métodos convencionais até 2 a 4% de umidade. Na Figura 2.2 é apresentado o mecanismo da expansão (*puffing effect*).

**Figura 2.2** - Representação esquemática do mecanismo de *puffing*.



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

#### 2.4.2 Redução brusca da pressão (Instant controlled pressure drop - DIC)

O processo *DIC*, em francês *Détente Instantanée Contrôlée*, é um processo de secagem por expansão (*puffing drying*) dos anos 80, que utiliza alta pressão de vapor e alta temperatura em curto espaço de tempo, seguido de uma descompressão instantânea até pressões subatmosféricas (vácuo), que induz a autovaporização e a expansão dos gases e vapores, resultando em produtos crocantes. O *DIC* é um processo inserido entre duas etapas de secagem convectiva e tem sido utilizado em várias indústrias para secar frutas e hortaliças (LOUKA e ALLAF, 2002; LOUKA et al., 2004; LOUKA e ALLAF, 2004; MOUNIR e ALLAF, 2008).

### 2.4.3 **Pulso de secagem à alta temperatura e curto tempo (*High-temperature short-time pulse drying - HTST drying*)**

Pulso de secagem à alta temperatura e curto tempo (*High-temperature short-time pulse* (130 °C a 150 °C por 23-12 min), seguido por uma secagem convencional de ar quente, foi descrito por Hofsetz et al. (2007) como capaz de produzir bananas crocantes e porosas. A combinação da secagem *HTST* com secagem convectiva foi relatado como capaz de substituir a etapa preliminar de branqueamento e resultar em produtos crocantes. Esse processo tende a reduzir o encolhimento e aumentar a porosidade, quando comparado com a secagem convectiva clássica.

### 2.4.4 **Secagem por micro-ondas a vácuo**

A secagem por micro-ondas a vácuo (*MWVD*) tem sido considerada uma alternativa viável para a produção de frutas e hortaliças crocantes, com tempos de secagem curtos e baixos custos operacionais, resultando em produtos de alta qualidade nutricional e sensorial (DROUZAS e SCHUBERT, 1996; LIN et al., 1998; GUNASEKARAN, 1999; KROKIDA e MAROULIS, 1999; MOUSA e FARID, 2002; FIGIEL, 2009; SCAMAN e DURANCE, 2014).

O aquecimento por micro-ondas é volumétrico e seletivo. Se a secagem ocorrer sob vácuo, os vapores formados no interior do produto geram gradientes de pressão entre o interior e a superfície do alimento. Esses gradientes causam escoamento do vapor produzido e da água líquida presente nos poros do material, causando um efeito de expansão (*puffing effect*) (ZHANG et al., 2006). O vácuo favorece a evaporação a temperaturas moderadas, sendo apropriado para secagem de alimentos termo sensíveis (frutas e hortaliças), resultando em produtos desidratados de alta qualidade e com encolhimento reduzido (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001; ZHANG et al., 2006).

### 2.4.5 **Múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (*Multi-flash drying - MFD*)**

O processo *MFD* foi desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina para a desidratação e texturização de alimentos (e.g., frutas e hortaliças). O processo resulta em alimentos desidratados crocantes, com alta porosidade, em tempo de processamento reduzido

(ZOTARELLI et al., 2012; PORCIUNCULA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2016).

O processo baseia-se na aplicação de sucessivos ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo. O aquecimento do produto é realizado à pressão atmosférica e pode ser realizado por diferentes métodos, a saber: i) por contato com ar quente (aquecimento convectivo, *CMFD, convective multiflash drying*), ii) por contato com uma superfície aquecida (aquecimento condutivo – *KMFD, conductive multiflash drying*) ou iii) por micro-ondas (aquecimento eletromagnético – *MWMFD, microwave multi-flash drying*). Quando o produto atinge a temperatura desejada (e.g. 60 °C), uma redução súbita de pressão (pulso de vácuo) é aplicada, o que leva à evaporação instantânea da água (*flash*), com resfriamento do produto (Figura 2.3) e consequente texturização, como descrito na Patente PI 017110000045 (LAURINDO et al., 2011).

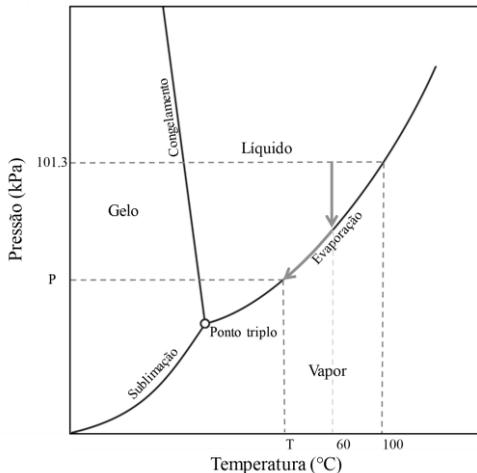
A quantidade de água evaporada do produto (perda de massa) durante a aplicação de um pulso de vácuo (resfriamento a vácuo) é dada pela Equação 2.1. O *puffing effect* que ocorre durante a aplicação do vácuo depende das condições de operação, como temperatura, pressão inicial e final e tempo de descompressão (LOUKA e ALLAF, 2002; ZOTARELLI et al., 2012; LINK, 2016).

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

na qual  $\Delta m_w$  é a perda de massa (kg);  $c_p$  é o calor específico médio do produto no intervalo de temperaturas de trabalho ( $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ );  $m_p$  é a massa inicial do produto (kg);  $\Delta T$  é a redução da temperatura do material durante a aplicação do vácuo e  $\Delta H_v$  é a entalpia específica de vaporização da água na pressão final de trabalho (J/kg).

Este novo processo é versátil, mais simples e menos dispendioso do que os processos de *explosion puffing* e *DIC*, pois o aquecimento é realizado à pressão atmosférica, não necessitando de vapor superaquecido, alta pressão e alta temperatura durante o processamento. Dessa forma, como a etapa de aquecimento é realizada à pressão atmosférica e faz uso de temperaturas moderadas durante o processamento, as propriedades nutricionais e sensoriais dos alimentos são preservadas na secagem *multi-flash drying*.

**Figura 2.3** - Evaporação e resfriamento durante a aplicação de um pulso de vácuo.

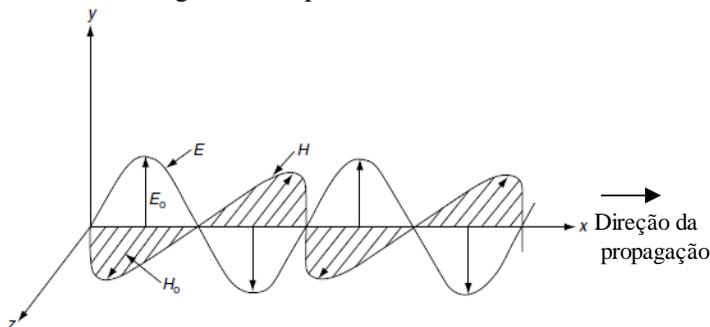


Fonte: Autor.

## 2.5 MICRO-ONDAS

Micro-ondas são ondas eletromagnéticas (*EM*) compostas por um campo elétrico, *E*, e um campo magnético, *H*, que variam perpendicularmente entre si (onda plana uniforme), sendo ambas perpendiculares à direção de propagação da onda, seguindo a regra da mão direita (Figura 2.4) (MUJUMDAR, 2006; SADIKU, 2012).

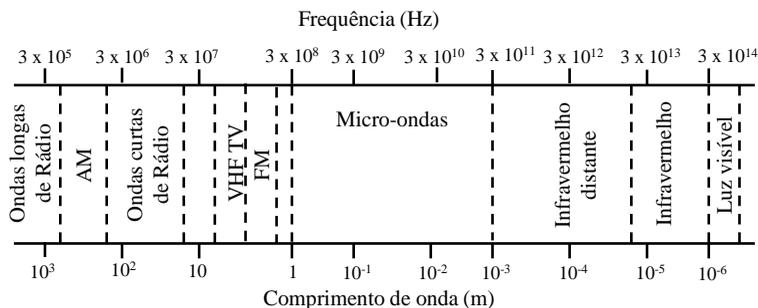
**Figura 2.4** - Ilustração esquemática de uma onda eletromagnética plana uniforme em função de *x* no tempo zero. *E<sub>o</sub>* e *H<sub>o</sub>* são as amplitudes dos campos elétrico e magnético, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Mujumdar (2006).

As micro-ondas fazem parte do espectro de onda eletromagnética, apresentando frequência de oscilação de 300 MHz até 300 GHz e comprimentos de onda de 1 m até 1 mm (Figura 2.5) (POZAR, 2012).

**Figura 2.5** - Espectro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de Pozar (2012).

No entanto, a frequência utilizada para processamento de alimentos é restrita a 2450 MHz para fornos de micro-ondas domésticos e 2450 MHz ou 915 MHz para o uso industrial (DATTA; ANANTHESWARAN, 2001). O comprimento de onda ( $\lambda$ ) das micro-ondas é dado pela razão entre a velocidade da luz no meio ( $c$ ) e a frequência ( $f$  em Hz), conforme a Equação 2.2 (SINGH e HELDMAN, 2009)

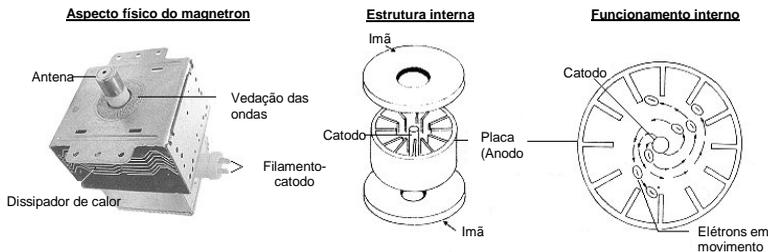
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

Os comprimentos de onda correspondentes às frequências de 2450 MHz e 915 MHz são de 12,2 cm e 32,8 cm, respectivamente, para a velocidade da luz no vácuo ( $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ) (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001).

A geração das micro-ondas em fornos domésticos e industriais é realizada por uma válvula eletrônica conhecida como magnetron. O magnetron consiste em um tubo de vácuo com um filamento central (cátodo) emissor de elétrons, cercado por cavidades internas (ânodo) (Figura 2.6). A estrutura mecânica dessas cavidades internas determina a frequência de operação do magnetron (SCHUBERT e REGIER, 2005).

A conversão da energia elétrica em energia eletromagnética de micro-ondas inicia-se quando uma voltagem é aplicada, o filamento de cátodo aquece e produz elétrons e esses, devido à presença de um forte campo magnético (produzido por um eletroímã colocado entre os dois polos), giram em alta velocidade ao redor do ânodo, de modo que as cavidades formem um circuito ressonante gerando as ondas eletromagnéticas (SCHUBERT e REGIER, 2005). A energia eletromagnética armazenada é direcionada através de uma antena posicionada sobre o ânodo, e as micro-ondas são enviadas para um guia de onda que direcionam as ondas para o interior da câmara dos fornos (ZLOTORZYNSKI, 1995).

**Figura 2.6** - Aspectos físicos, estrutura interna e funcionamento interno do magnetron.



Fonte: Autor desconhecido.

As micro-ondas emitidas apresentam interações diferentes com os materiais, que podem ser divididos em quatro categorias (MUJUMDAR, 2006).

**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, água, óleos, madeira, 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 aquecimento de alimentos por micro-ondas é resultado de dois mecanismos, rotação dipolar e condução iônica (MEREDITH, 1998). A rotação dipolar ocorre principalmente com a molécula de água, que é uma molécula polar. Quando expostas a um campo elétrico, as moléculas de água se alinham de acordo com a polaridade do campo (SINGH e HELDMAN, 2009). A frequência dos campos de micro-ondas é geralmente 2,45 GHz, ou seja, a polaridade muda  $2,45 \times 10^9$  vezes por segundo e gera atrito entre as moléculas, resultando no aquecimento do alimento (YAM e LAI, 2006). A condução iônica é causada pelos íons que acompanham a oscilação do campo elétrico, acarretando em colisões entre íons e moléculas, provocando a dissipação de calor por fricção (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001).

As equações de Maxwell descrevem a distribuição de energia eletromagnética em sistemas de aquecimento por micro-ondas, sendo as propriedades dielétricas dos materiais os principais parâmetros dessas equações. Essas propriedades influenciam significativamente a distribuição do campo eletromagnético e a conversão da energia eletromagnética em energia térmica dentro dos materiais (TANG et al., 2002; TANG, 2005).

Enquanto a rotação dipolar e a condução iônica proporcionam uma compreensão qualitativa dos mecanismos de conversão de micro-ondas em calor, as propriedades dielétricas fornecem uma caracterização quantitativa das interações entre energia eletromagnética das micro-ondas e os alimentos (YAM e LAI, 2006).

## 2.6 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS E AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS

As propriedades dielétricas afetam diretamente o mecanismo de interação entre as micro-ondas e o material, influenciando a distribuição do campo eletromagnético aplicado. A permissividade relativa ( $\epsilon^*$ ) (KOMAROV, et al., 2005) determina o armazenamento e a dissipação da energia elétrica e pode ser expressa pela Equação 2.3

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.3)$$

na qual a parte real ( $\epsilon'$ ), que é chamada de permissividade (ou constante) dielétrica, determina a capacidade de um material armazenar energia

elétrica, influenciando principalmente a distribuição dos campos  $EM$  no interior do material. A parte imaginária ( $\varepsilon''$ ), fator (ou constante) de perda, indica a capacidade do material de dissipar energia  $EM$  na forma de calor, sendo  $j = \sqrt{-1}$ .

Uma propriedade importante usada na teoria do eletromagnetismo é a tangente de perda ou fator de dissipação ( $\tan\delta$ ) que relaciona a parte real e imaginária da permissividade. Essa propriedade indica a capacidade do material para ser penetrado por um campo elétrico e para dissipar essa energia na forma de calor, sendo expressa pela Equação 2.4

$$\tan \delta = \frac{K''}{K'} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.4)$$

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 parâmetro  $\varepsilon_0$  é a permissividade no vácuo  $8,854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ .

Para as frequências de micro-ondas de 915 MHz e 2450 MHz, a condução iônica e a rotação dipolar são os mecanismos dominantes das perdas dielétricas, dessa forma, a constante de perda pode ser representada pela Equação 2.5 (KOMAROV et al., 2005)

$$\varepsilon'' = \varepsilon_d'' + \varepsilon_\sigma'' = \varepsilon_d'' + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 + \omega} \quad (2.5)$$

na qual os índices “ $d$ ” e “ $\sigma$ ” representam a contribuição da rotação dipolar e da condução iônica, respectivamente;  $\sigma$  é a condutividade iônica ( $\text{S m}^{-1}$ ) do material e  $\omega = 2\pi f$  ( $\text{rad s}^{-1}$ ) representa a frequência angular das ondas.

A partir das propriedades dielétricas e das Equações 2.6 e 2.7 é possível calcular a potência volumétrica dissipada ( $P_v$  em  $\text{W m}^{-3}$ ) e a elevação da temperatura média do material no aquecimento por micro-ondas, (GOLDBLITH, 1966).

$$P_v = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \quad (2.6)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_v}{\rho c_p} \quad (2.7)$$

Nas equações 2.6 e 2.7,  $E$  é o campo elétrico local ( $\text{V m}^{-1}$ );  $f$  é a frequência (Hz);  $T$  é a temperatura do material ( $^{\circ}\text{C}$ );  $c_p$  é o calor específico do material ( $\text{J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), e  $\rho$  é a massa específica do material ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

Em materiais dielétricos, a intensidade do campo elétrico diminui com a distância  $z$  a partir da superfície (KOMAROV et al., 2005) e é descrita pela Lei de Beer-Lambert, dada pela Equação 2.8

$$E = E_0 e^{-\alpha z} \quad (2.8)$$

na qual  $\alpha$  é o fator de atenuação, determinado pela função das propriedades dielétricas do material (VON HIPPEL, 1954), expressa pela Equação 2.9

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[ \frac{1}{2} \varepsilon' \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{\left(\frac{1}{2}\right)} \quad (2.9)$$

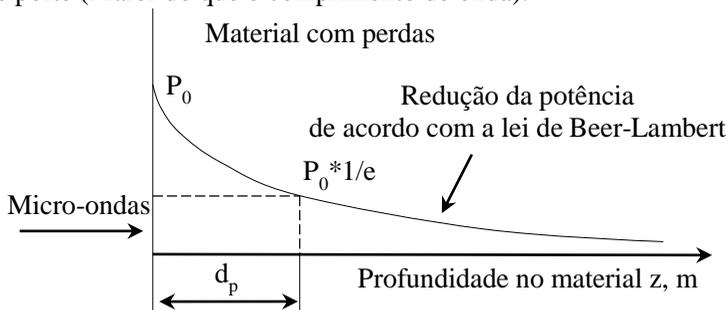
na qual  $\lambda_0$  é o comprimento de onda no espaço livre (vácuo).

Como a potência dissipada é proporcional ao quadrado do campo elétrico, substituindo a Equação 2.8 na Equação 2.6, obtém-se a Equação 2.10 (KOMAROV et al., 2005)

$$P = P_0 e^{-2\alpha z} \quad (2.10)$$

A profundidade de penetração ( $dp$ ) das micro-ondas 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 (Figura 2.7) (VON HIPPEL, 1954; KOMAROV et al., 2005).

**Figura 2.7** - Profundidade de penetração típica dentro de materiais de grande porte (Maior do que o comprimento de onda).



Fonte: Adaptado de Komarov et al. (2005).

Utilizando a relação  $P(dp) = P_0/e$  e a Equação 2.9, a profundidade de penetração das micro-ondas em alimentos pode ser calculada pela Equação 2.11

$$dp = \frac{1}{2\alpha} = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon'} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right]} \quad (2.11)$$

As propriedades dielétricas são fortemente influenciadas por fatores como a frequência, temperatura, umidade, massa específica e composição dos alimentos (teor de sais, gordura, entre outros) (NELSON e DATTA, 2001; TANG, 2005). O efeito de alguns desses fatores pode ser observado na Tabela 2.2, que apresenta as propriedades dielétricas e a profundidade de penetração de alguns materiais na frequência de 2450 MHz.

A perda dielétrica aumenta com o aumento de umidade e com o teor de sal. As propriedades dielétricas influenciam diretamente na secagem por micro-ondas. O conhecimento das propriedades dielétricas dos alimentos em função do teor de umidade é essencial na concepção e controle dos sistemas de secagem por micro-ondas (FENG et al., 2002). Sendo assim, as propriedades dielétricas dos alimentos mudam substancialmente durante a secagem (HOLTZ et al., 2010).

**Tabela 2.2** - Propriedades dielétricas e profundidade de penetração de materiais a 2450 MHz e a temperatura de análise.

<b>Material</b>	<b>T (°C)</b>	<b><math>\epsilon'</math> (F m<sup>-1</sup>)</b>	<b><math>\epsilon''</math></b>	<b>dp (cm)</b>
Abóbora	20	47,00	37,60	0,4
Água	25	78	12,48	1,4
Água	75	60,5	39,93	0,4
Água	1,5	80,5	25	0,7
Ar	-	1	0	$\infty$
Aspargo	21	71	16	1,0
Banana	20-25	62	17	0,9
Batata	25	62-64	14-17	0,93-1,1
Carne	-15	5	0,75	5,8
Carne	25	40	12	1,0
Carne cozida	25	31,0–35,4	10,0-11,6	1,01-1,1
Cenoura	25	65	15	1,1
Cenoura cozida	25	71-72	15,0-17,8	0,94-1,1
Espinafre cozido	23	34	27,2	0,4
Frango	25	53	18	0,8
Gelo	-1,5	3,2	0,0029	1202,7
Maçã (* $X_{bu}$ = 87,5%)	22	54,5	11,2	1,3
Maçã desidratada ( $X_{bu}$ = 30,3%)	22	10,7	5,5	1,2
Maçã desidratada ( $X_{bu}$ = 9,2%)	22	2,2	0,1	28,9
Manteiga sem sal	25	3	0,1	33,8
Metal	-	$\infty$	0	0,0
Óleo de cozinha	20-25	2,6	0,2	15,7
Pão	25	4	2	2,0
Papel	20-25	4	0,1	39,0
Peixe cozido	20-25	46,5	12	1,1
Pepino	24	69,19	11,88	1,4
Poliéster	20-25	4	0,02	195,0
Presunto	20-25	85	67	0,3
Rabanete	24	66,7	15,6	1,0
Salmoura (5%)	20-25	67	71	0,2
Vidro	20-25	6	0,1	47,8

\*  $X_{bu}$  =umidade em base úmida.

Fonte: Adaptado de Datta e Anantheswaran (2001), Feng et al. (2002), Tang (2005), Fellows (2006), Yam e Lai (2006), Smith (2011), Nelson (2015).

## 2.7 AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS

O aquecimento por micro-ondas está diretamente relacionado com as propriedades dielétricas dos materiais e pode ser alterado de maneira complexa por diversos fatores (PEYRE et al., 1997). Os fatores que afetam a uniformidade do aquecimento são a concepção (*design*) do: sistema de guia de ondas, do sistema gerador de ondas e da cavidade ressonante (RISMAN, 1994; WAËPPLING-RAAHOLT e OHLSSON, 2005). Para conseguir uma distribuição de temperaturas uniforme, as cavidades ressonantes devem ser cuidadosamente projetadas. Cavidades mal projetadas causam pontos quentes (*hot spots*), ou seja, ocorre o superaquecimento de parte do produto (PUSCHNER, 2005). Como as perdas dielétricas dependem da temperatura, esses pontos quentes podem resultar em fuga térmica (PUSCHNER, 2005). Desta forma, a temperatura elevada provoca perdas dielétricas mais elevadas e, por conseguinte, a quantidade de energia absorvida pelo ponto quente aumenta (PUSCHNER, 2005).

Outros fatores que afetam significativamente a uniformidade do aquecimento são a geometria, tamanho, volume, propriedades dielétricas, propriedades térmicas e composição dos alimentos, bem como o espaçamento entre produtos vizinhos (ZHANG e DATTA, 2001; MEDA, 2005; WAËPPLING-RAAHOLT e OHLSSON, 2005). Não só o padrão do campo eletromagnético, a condução de calor, a radiação, bem como a convecção de calor, mas também o transporte de água no alimento pode influenciar a distribuição espacial do aquecimento (WAËPPLING-RAAHOLT e OHLSSON, 2005).

Alimentos com baixa umidade, baixa constante de perda e baixo fator de atenuação são responsáveis por causar ondas estacionárias no interior da amostra, que por sua vez, causam um rápido aquecimento, *hot spots*, e/ou até mesmo queima do produto (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001). Essas ondas estacionárias podem ser formadas por ondas incidentes e refletidas que se combinam, resultando em regiões de interferência construtiva, que aumentam a potência absorvida, e regiões de interferência destrutiva, que geram um mínimo na potência absorvida (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001).

Os maiores problemas relacionados à uniformidade do aquecimento por micro-ondas são o superaquecimento de cantos e arestas (*corner and edge overheating*), causado por fortes campos elétricos paralelos a um canto do alimento, o aquecimento seletivo em alimentos congelados (o gelo é transparente às micro-ondas) e padrões de ondas estacionárias (WAËPPLING-RAAHOLT e OHLSSON, 2005).

Alimentos com formatos cilíndricos e esféricos apresentam maior densidade de potência volumétrica absorvida e o aquecimento é mais centralizado, ao passo que objetos retangulares apresentam superaquecimento nos cantos e arestas (OHLSSON e RISMAN, 1978; YANG e GUNASEKARAN, 2004; RYYNÄNEN et al., 2004).

Considerando o exposto, uma das principais desvantagens da secagem por micro-ondas é a falta de uniformidade inerente ao campo eletromagnético dentro da cavidade do micro-ondas, que pode gerar problemas de aquecimento não uniforme (COHEN e YANG, 1995; SEBERA et al., 2012). No entanto, existem várias maneiras de reduzir esse fenômeno negativo. A uniformidade da secagem pode ser melhorada por um projeto adequado da cavidade do micro-ondas, disposição e números de magnetron, instalação de agitadores de onda (*mode stirrers*), uso de prato giratório, tambor rotativo, controle da potência e controle da temperatura (COHEN e YANG, 1995; WAËPPLING-RAAHOLT e OHLSSON, 2005; DOMINGUEZ-TORTAJADA et al., 2007; LI et al., 2011; SEBERA et al., 2012; MONTEIRO et al., 2015; WANG et al., 2016).

## 2.8 CONTROLE DA POTÊNCIA E DA TEMPERATURA DURANTE A SECAGEM POR MICRO-ONDAS

Segundo Zhang et al. (2006), a secagem por micro-ondas apresenta três períodos: i) período de aquecimento, na qual a energia de micro-ondas é convertida em energia térmica dentro dos materiais úmidos, aumentando a temperatura do produto no início da secagem; ii) período de taxa constante, com a energia térmica convertida das micro-ondas sendo usada para a vaporização da água livre; iii) período de taxa de secagem decrescente, sendo a umidade reduzida para um valor 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 a constante de perda ( $\varepsilon''$ ) 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 do produto.

Dessa forma, para realizar um processo de secagem com micro-ondas que resulte em produtos de alta qualidade, é necessário controlar o fornecimento de energia (potência das micro-ondas), controlando assim a temperatura da amostra. A potência das micro-ondas deve ser ajustada durante todo processo, especialmente no último período de secagem, para evitar danos ao produto (LI et al., 2010a). O controle da potência na

secagem permite maior uniformidade do aquecimento, melhorando a eficiência energética da secagem e a qualidade dos produtos desidratados. Com controle da temperatura pela manipulação da potência, consegue-se redução das perdas nutricionais e das alterações de cor, além de produtos com melhores propriedades de reidratação (LIN et al., 1998; CLARY et al., 2007; LI et al., 2010b).

A manipulação da potência em um secador de micro-ondas pode ser ajustada a partir de medidas da temperatura do produto. Assim, a energia fornecida para o magnetron a cada instante de tempo é ajustada dinamicamente, de acordo com a temperatura medida no produto (LI, 2004).

A potência emitida é produzida pelo magnetron. Existem diversos tipos de magnetrons que são utilizados para diferentes tecnologias que envolvem micro-ondas, dependendo dos níveis de potência e eficiência necessários para cada processo (PUSCHNER, 2005). Simplificadamente, os magnetrons mais utilizados em processamento de alimentos são magnetrons convencionais que operam de forma liga-desliga (*on-off*) e os magnetrons que operam em regime contínuo.

Fornos de micro-ondas domésticos operam em ciclos de trabalhos de liga-desliga (*on-off*), passando de potência máxima à potência zero em ciclos cronometrados, conhecidos como *duty cycles*. Monteiro et al. (2016) realizaram um estudo com micro-ondas (Electrolux, Modelo MEX55, Brasil), que apresentava a potência nominal máxima de 1000 W. Quando esse nível de potência é usado, o magnetron produz micro-ondas continuamente, ficando ligado o tempo todo. No nível de potência de 700 W, o gerador fica "on" por 20 s e "off" por 9 s, enquanto, a 400 W o sistema de micro-ondas fica "on" por 11 s e "off" por 18 s. Os padrões usados para os *duty cycles* podem variar de um equipamento para outro.

O tipo de magnetron também interfere na uniformidade do aquecimento, uma vez que os magnetrons convencionais emitem sempre a máxima potência em tempos de processos diferentes, acarretando em menor uniformidade do campo eletromagnético, gerando *hot spots*, que diminuem a qualidade do produto final e levam a um consumo de energia maior do que o necessário. Esse efeito é amenizado com a utilização de magnetrons que funcionam em regime contínuo e constante. Alguns secadores industriais de micro-ondas funcionam em regime contínuo e constante, podendo regular a faixa de potência de saída entre 10% e 100% (WAÈPPLING-RAAHOLT e OHLSSON, 2005).

A empresa Panasonic usa em alguns equipamentos domésticos uma tecnologia de operação do magnetron (conhecida como *inverter*) de forma contínua, que reduz os *hot spots*, os picos de corrente e o consumo

de energia (PANASONIC, 2016). No forno *inverter* a potência das ondas é controlada alterando a tensão aplicada no magnetron, enquanto em fornos convencionais a potência é controlada ligando e desligando o magnetron em determinados intervalos de tempo.

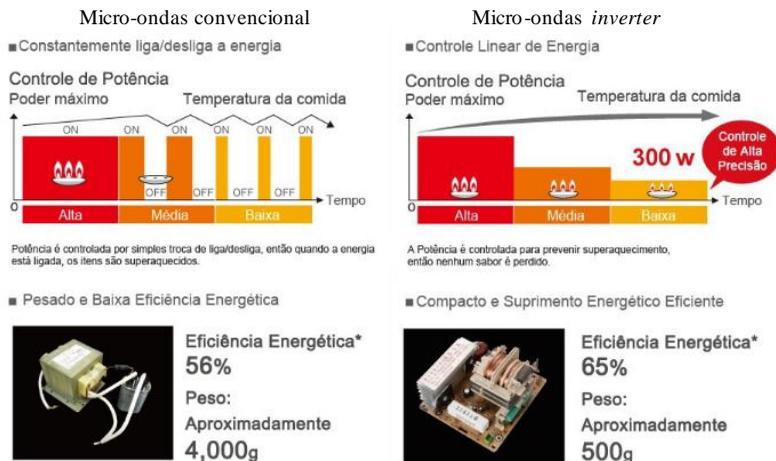
Segundo a Panasonic (2016), os fornos de micro-ondas *inverter* apresentam diversas vantagens em relação aos micro-ondas convencionais (Figura 2.8) como:

- Economia de energia, pelo fato de se usar fonte chaveada;
- Melhor aproveitamento das ondas, devido ao magnetron ficar ligado em tempo integral;
- Prevenção ou redução da degradação térmica de alimentos, pois evitam o superaquecimento que os fornos de micro-ondas convencionais podem causar (Figura 2.9);
- Aquecimento e descongelamento mais rápido. Os fornos *inverter* utilizam um sistema sequenciador avançado de micro-ondas usando a função de fornecimento de energia contínuo;
- No descongelamento, os alimentos não ficam congelados no meio, enquanto apresentam bordas secas e cozidas, resultando em alimentos com cor, forma e textura melhoradas (Figura 2.10);
- Fornos mais leves, pois não utilizam fonte comum (transformador de voltagem, diodo e capacitor).

Nas figuras 2.9 e 2.10 são mostradas esquematicamente o funcionamento e o desempenho de fornos de micro-ondas domésticos dotados de inversores de frequência, que permitem o controle contínuo da potência emitida.

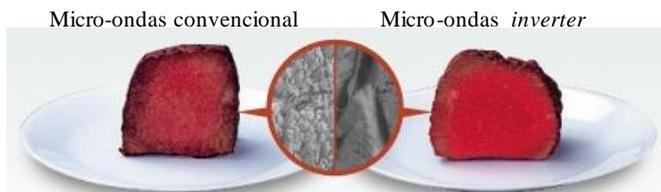
No Quadro 2.1 são apresentados diversos trabalhos encontrados na literatura sobre controle de temperatura e potência, tipo de magnetron utilizado, bem como resumos dos estudos realizados e dos principais resultados encontrados.

**Figura 2.8** - Comparação do forno de micro-ondas *inverter* com micro-ondas convencional.



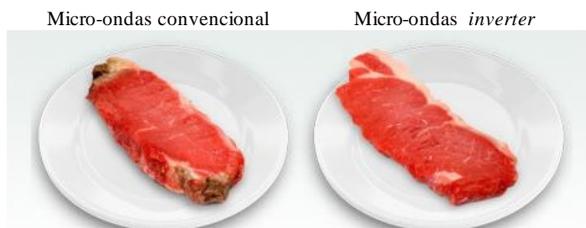
Fonte: Adaptado de Panasonic (2016).

**Figura 2.9** - Padrões de cozimento de fornos de micro-ondas *inverter* e convencional, conforme reivindicado por um fabricante de fornos de micro-ondas.



Fonte: Adaptado de Panasonic (2016).

**Figura 2.10** - Comparação do forno de micro-ondas *inverter* com micro-ondas convencional com relação ao descongelamento.



Fonte: Adaptado de Panasonic (2016).

**Quadro 2.1** - Estado da arte sobre controle da temperatura pela manipulação da potência.

<b>Secagem/ Produto</b>	<b>Estudo realizado</b>	<b>Magnetron/ Potência nominal</b>	<b>Resultados</b>	<b>Referência</b>
<i>MWD</i> Cenoura	Desenvolvimento de um microcontrolador para micro-ondas convencional, baseado no sistema de controle de potência através do <i>feedback</i> da temperatura por fibra óptica, termopar e infravermelho.	Convencional 950 W	As amostras não apresentaram sinais de danos térmicos. A cor das amostras secas sofreu menor escurecimento do que as secas com um sistema de micro-ondas com fluxo de ar forçado.	LI et al. (2006)
<i>MWVD</i> Uvas	Estudo da desidratação de uvas através da secagem por micro-ondas a vácuo baseado no controle da temperatura pela potência. O secador utilizado foi acoplado com prato giratório e com sensor de infravermelho.	Contínuo 3000 W	Secagem em micro-ondas sob vácuo, com controle de temperatura e potência melhoraram qualidade do produto e resultaram em uma secagem com maior eficiência energética, comparado com a secagem com uso de níveis fixos de potência.	CLARY et al. (2007)
<i>MWVD</i> Batata	Estudo da desidratação de batata por micro-ondas a vácuo, baseado no controle da temperatura pela manipulação da potência. O secador utilizado foi acoplado com prato giratório e com sensor de infravermelho.	Contínuo 3000 W	A secagem em micro-ondas sob vácuo produziu batatas desidratadas com textura porosa e expandida	SETIADY et al. (2009)
<i>MWD</i> Maçã	Estudo de um sistema de secagem de micro-ondas com controle automático de temperatura e potência. Foi adaptado com agitador de ondas ( <i>mode stirrer</i> ) e sistema de medição <i>online</i> da massa.	Convencional 950 W	Melhor controle da temperatura e menor gasto de energia foi alcançado com o ajuste automático da potência de micro-ondas.	LI et al. (2010a,c)

<p><i>MWAD</i> Maça</p>	<p>Estudo da secagem pela combinação de ar quente e micro-ondas, controlando a potência agindo sobre o tempo do ciclo de trabalho do magnetron (<i>duty cycle</i>), a fim de controlar a temperatura do produto a partir de uma câmara termográfica.</p>	<p>Convencional 2000 W</p>	<p>As flutuações de temperatura tornaram-se maiores com o aumento do tempo e dos níveis de temperatura, causando impacto negativo na qualidade dos frutos secos. Um agitador de onda (<i>mode stirrer</i>) foi instalado, o qual reduziu as oscilações de temperatura das amostras.</p>	<p>CUCCURULLO et al. (2012)</p>
<p><i>MWD</i> Cenoura</p>	<p>Estudo dos efeitos da disposição e do número de magnetrons e da combinação de potências na uniformidade da temperatura. O controle de temperatura foi realizado pelo aquecimento intermitente do micro-ondas.</p>	<p>Convencional 1000 W</p>	<p>A uniformidade da temperatura e da secagem foi maior usando 3 magnetrons do que quando usando somente 2 ou 1.</p>	<p>WANG et al., 2016</p>

*MWD*: secagem por micro-ondas; *MWAD*: secagem por micro-ondas com ar quente; *MWVD*: secagem por micro-ondas a vácuo

### 3 AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE *CHIPS* DE BATATA-DOCE POR MWVD E DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DURANTE A SECAGEM

---

A produção de *chips* crocantes de batata-doce por micro-ondas a vácuo (MWVD) foi avaliada. O experimento foi realizado em um forno de micro-ondas doméstico adaptado com vácuo e sistema rotativo. Pequena quantidade de amostras foi utilizada para avaliar a possibilidade de produção dos *chips* de batata-doce crocantes. Além disso, foram determinadas as propriedades físico-químicas das amostras de batata-doce (umidade, atividade de água, temperatura, cor, massa específica aparente, porosidade, propriedades mecânicas, análise acústica de textura e propriedades dielétricas) durante o processo de secagem por MWVD.

#### 3.1 MATERIAL E MÉTODOS

##### 3.1.1 Seleção e preparo das amostras

As amostras de batata-doce, *Ipomoea batatas* L. Lam. (Figura 3.1), foram adquiridas no comércio local (Florianópolis, SC, Brasil) e mantidas sob refrigeração (10 °C) até o momento da sua utilização. A seleção das amostras foi realizada por análise visual, quanto à presença de cortes, furos, fungos e tamanho.

**Figura 3.1** - Batata-doce da variedade *Ipomoea batatas* L. Lam.

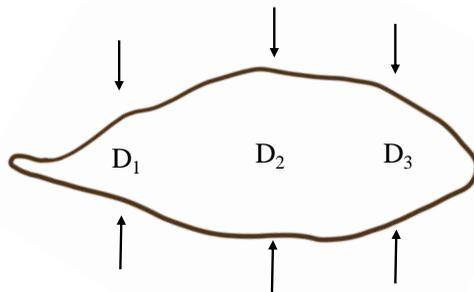


As batatas-doces selecionadas apresentaram um comprimento de  $232,0 \text{ mm} \pm 38,0 \text{ mm}$  e diâmetros de  $D_1 = 51,5 \text{ mm} \pm 11,2 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 71,0 \text{ mm} \pm 8,6 \text{ mm}$  e  $D_3 = 54,5 \text{ mm} \pm 11,8 \text{ mm}$ , como mostrado na Figura 3.2.

As batatas-doces foram lavadas, descascadas manualmente, posteriormente, cortadas em fatias de  $4,2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  de espessura, através de um mandolin profissional (Progressive, Modelo - PL8®, Estados Unidos). Para melhor uniformidade das amostras, as fatias foram cortadas em forma cilíndrica, utilizando um molde de aço inox de  $41,7 \text{ mm}$  de diâmetro interno, e apresentaram um diâmetro de  $41,5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ .

Posteriormente, as fatias foram branqueadas ( $97 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  por 5 min) e resfriadas ( $6 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  por 3 min) em água destilada com uma razão amostra/água de 1:20 (g:mL). Após o branqueamento, as amostras foram colocadas (durante 1 min) em papel de filtro para remoção da água aderida às suas superfícies.

**Figura 3.2** - Medidas dos diâmetros das batatas-doces ( $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ ).



### 3.1.2 Experimentos de secagem

A secagem das amostras por *MWVD* foi realizada em um forno de micro-ondas adaptado com vácuo e sistema rotativo (MONTEIRO et al., 2015). O micro-ondas doméstico (Electrolux, Modelo MEX55, Brasil) apresenta espaço interno de 45 litros, potência máxima de saída do magnetron de 1000 W e frequência de 2.450 MHz. Um recipiente cilíndrico de polipropileno foi adaptado dentro do forno, para permitir operação a vácuo, sobre o prato giratório, que permite uma absorção mais homogênea das micro-ondas pelo alimento durante o aquecimento (MONTEIRO et al., 2015). O polipropileno é um material atóxico com baixas propriedades dielétricas (constante dielétrica,  $\epsilon' = 2,2$ , e tangente

de perda,  $\tan\delta = 0,0003-0,0004$ ) e boa resistência mecânica. Este recipiente foi conectado a uma bomba de vácuo de vazão nominal de  $350 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  (D.V.P, Vacuum Technology, Modelo - LC.305, Itália) e a um transdutor de pressão (Warme, Modelo - WTP4010, Brasil).

Aproximadamente  $97,04 \text{ g} \pm 0,04 \text{ g}$  de amostras, equivalente a 16 fatias, foram distribuídas uniformemente ao redor da extremidade de uma bandeja circular de polipropileno (27,0 cm de diâmetro) e inseridas na câmara de vácuo (30,0 cm de diâmetro e 20,2 cm de altura).

A pressão da câmara foi reduzida a aproximadamente 4 kPa quando o gerador de micro-ondas foi ligado, mantendo a bomba de vácuo ligada até o final do processo de secagem. Durante a etapa de aquecimento e vácuo, foram utilizadas respectivamente 3 diferentes potências: 1000 W (6 min), 400 W (6 min) e 200 W (15 min). A modulação da potência foi utilizada para obter uma elevada taxa de secagem, bem como para prevenir o sobreaquecimento e a carbonização das amostras (MONTEIRO et al., 2015).

Fornos de micro-ondas domésticos operam, em ciclos de trabalhos de liga-desliga (“*on-off*”), passando de potência máxima a potência zero em ciclos cronometrados conhecidos como “*duty cycles*”. No presente estudo, o micro-ondas (Electrolux, Modelo MEX55, Brasil) tem um período de ciclo de 29 s. Na potência máxima nominal de 1000 W, o magnetron produz micro-ondas continuamente, ficando ligado o tempo todo. No nível de potência de 400 W fica “*on*” por 11 s e “*off*” por 18 s, enquanto a 200 W o sistema de micro-ondas fica “*on*” por 5 s e “*off*” por 24 s.

Em intervalos regulares de tempo foram retiradas amostras para determinação das curvas de secagem. O processo foi realizado de forma destrutiva, ou seja, cada dado experimental foi determinado a partir de um novo experimento de secagem. Este procedimento foi utilizado para evitar a distorção dos resultados devido à modificação da densidade de potência (razão entre potência das micro-ondas e massa da amostra) e a interrupção do processo de secagem.

### 3.1.3 Caracterização das amostras

As amostras desidratadas durante a secagem por *MWVD* foram caracterizadas quanto à umidade,  $a_w$ , temperatura, cor, massa específica aparente, porosidade, propriedades mecânicas e análise acústica de textura. Além disso, foi realizada a micrografia das amostras desidratadas por estereoscópio óptico. Todas essas análises de caracterização estão descritas a seguir.

### Determinação da umidade

O conteúdo de água foi determinado pelo método gravimétrico (Shimadzu, Modelo - AY220, Filipinas com precisão de 0,0001 g) utilizando uma estufa a vácuo (TECNAL, Modelos - TE-395, Brasil) a pressão  $\leq 13,33$  kPa e temperatura de 70 °C, conforme metodologia da AOAC (2005). As análises foram realizadas em triplicata.

### 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, Estados Unidos) pela medida do ponto de orvalho a 25 °C. As análises foram realizadas em triplicata.

### Determinação da temperatura

A temperatura das amostras durante a realização da secagem foi monitorada utilizando termopares do tipo T (Iope, Modelo - A-TX-TF-TF-R30AWG, Brasil), conectados a um sistema de aquisição de dados (Agilent Technologies, Modelo - 34970A, Estados Unidos), imediatamente após o desligamento do forno (*off-line*). As análises foram realizadas em triplicata.

### Massa específica aparente

A massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ) das amostras foi determinada pela razão entre a massa da amostra ( $m_s$ ) e o volume aparente ( $V_{ap}$ ), conforme a Equação 3.1

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

O volume aparente ( $V_{ap}$ ) foi determinado indiretamente pela medida da força de empuxo (Lozano et al., 1980), utilizando *n*-heptano como líquido. A amostra foi presa a um gancho de aço conectado a uma abertura da parte inferior da balança analítica (Marte, Modelo -AY220, Filipinas) (YAN et al., 2008).

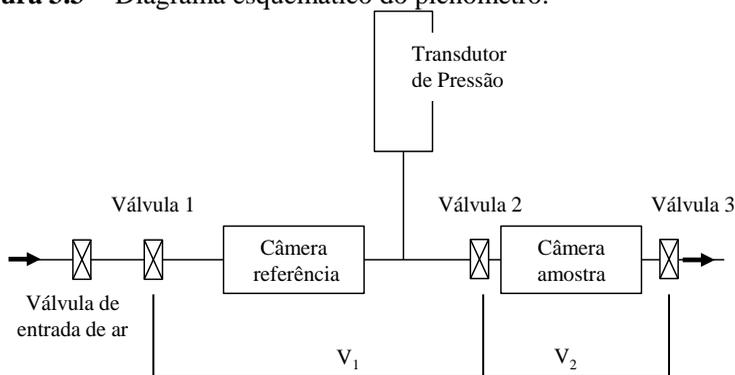
### Porosidade

A porosidade ( $\varepsilon$ ) das amostras foi calculada a partir dos valores de  $V_{ap}$  e volume real ( $V_r$ ), conforme a Equação 3.2

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

O volume real ( $V_r$ ) das amostras foi determinado utilizando um picnômetro de ar comprimido, esquematizado na Figura 3.3, como proposto por Sereno et al. (2007). O picnômetro é um instrumento que utiliza o método do deslocamento de gás, que é capaz de penetrar em todos os poros acessíveis, desde que estes tenham no mínimo o mesmo tamanho da molécula de gás.

**Figura 3.3** - Diagrama esquemático do picnômetro.



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

O restante da amostra, na qual o gás não penetra é considerado como volume de sólido. O picnômetro mede a mudança na pressão do experimentado por uma quantidade conhecida de gás comprimido numa câmara de referência (volume constante). Quando o gás se expande para uma segunda câmara contendo a amostra, ocorre uma mudança na pressão e temperatura. Assumindo comportamento de gás ideal é possível calcular o volume real da amostra pela Equação 3.3.

$$V_r = \frac{V_1 \left( \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}{\left( \frac{P_{atm}}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_{amb}} - 1 \right)} + V_2 \quad (3.3)$$

na qual  $P_{atm}$  e  $T_{amb}$  são a pressão e a temperatura medidas com picnômetro vazio e a válvula 1 fechada.  $P_1$  e  $T_1$  são a pressão e a temperatura medidas 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 medidas após a abertura da válvula 2, com as a válvula 1 e 3 fechadas. A porosidade foi realizada em triplicata.

### Medidas de cor

Um colorímetro portátil Minolta Chroma Meter (Konica Minolta, Modelo - CR-400, Japan), ajustado para operar com um sistema padrão de iluminação D65 e ângulo de observação de 10°, foi utilizado para determinar os parâmetros de cor das amostras *in natura* e secas. A cor foi expressa pelo sistema CIELab,  $L^*$  (preto/branco),  $a^*$  (vermelho/verde) e  $b^*$  (amarelo/azul), de coordenadas definido pela CIE (*Commision Internationale de L'Éclairage*) (1976). A leitura foi realizada diretamente sobre a superfície de 4 fatias de batata-doce, sendo realizada a leitura em ambos os lados das fatias. A variação total da cor foi avaliada pelo parâmetro  $\Delta E^*$ , utilizando como referência a amostra branqueada ( $L_0$ ,  $a_0$  e  $b_0$ ), calculado de acordo com a Equação 3.4

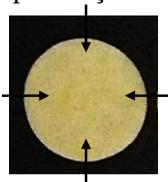
$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (3.4)$$

### Determinação das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram determinadas por meio de teste de penetração. Os experimentos foram realizados com uma probe cilíndrica de 2 mm de diâmetro em um analisador de textura (Stable Micro System, Modelo - TA-XT2i, Reino Unido), com uma célula de carga de 25 kg, auxiliados pelo programa Texture Expert Exceed 2.61 (Stable Micro Systems, Reino Unido) e com velocidade de teste de 3 mm s<sup>-1</sup> até a deformação de 70% da espessura original da amostra. A análise foi

realizada em triplicata, com 4 perfurações em cada amostra em diferentes regiões, como demonstrado na Figura 3.4.

**Figura 3.4** - Localização das perfurações durante os ensaios mecânicos.



As oscilações das forças, durante o teste de penetração, foram relacionadas com amostras potencialmente crocantes (LAURINDO e PELEG, 2007; LAURINDO e PELEG, 2008), sendo assim, os dados experimentais de força de penetração foram suavizados por um ajuste não-paramétrico baseado em uma aproximação polinomial de segunda ordem, como descrito por Savitzky e Golay (1964). Os resíduos normalizados foram calculados pela diferença entre a força registrada e a força ajustada, para mesma penetração (LAURINDO e PELEG, 2007; LAURINDO e PELEG, 2008).

Através das curvas de força de penetração das curvas suavizadas por um ajuste não-paramétrico e das curvas de resíduos foi possível analisar o número dos picos, bem como a amplitude dos mesmos e comparar a crocância das amostras secas pelos diferentes processos de secagem.

Todos os cálculos foram realizados com o *software* Matlab® (Math Works Inc., Modelo - R2017a, Estados Unidos), utilizando a função `sgolayfilt` para aplicar a rotina de suavização Savitzky e Golay. O padrão dos resíduos não depende da qualidade do ajuste, quando ele só capta a forma geral da curva de força-deslocamento (Laurindo e Peleg, 2008). Assim, a suavização foi realizada considerando a forma geral da curva. A função polinomial de segunda ordem e uma janela com tamanho de 49 pontos experimentais foram escolhidas na função `sgolayfilt` para todos os procedimentos de suavização.

### Determinação das propriedades acústica e mecânicas

As propriedades acústicas durante o ensaio de penetração foram determinadas utilizando um dispositivo de aquisição de sinal, o conversor National Instruments 9234 (NI 9234) AD com resolução de 24 bits e 102 dB de faixa dinâmica. Os sinais foram capturados por um microfone (G.R.A.S. Sound & Vibration, Modelo G.R.A.S. 46AE ½" CCP Free-

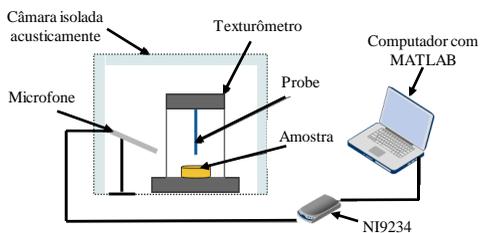
field Microphone Set, Dinamarca), com sensibilidade de  $52,27 \text{ mV Pa}^{-1}$ , ligado a um pré-amplificador IEPE conectado ao dispositivo de aquisição. A taxa de amostragem foi definida como sendo de  $51,2 \text{ kHz}$ , que abrange a frequência de audição humana ( $20 \text{ Hz}$  a  $20 \text{ kHz}$ ). O microfone foi posicionado a  $5 \text{ cm}$  de distância e com um ângulo de  $45^\circ$  em relação à amostra (Figura 3.5).

O microfone e o texturômetro foram colocados dentro de uma câmara de isolamento acústico para atenuar o ruído do ambiente. Os dados acústicos foram tratados utilizando um filtro FIR de passa-banda (*bandpass*) com atenuação de  $60 \text{ dB}$ , para eliminar o ruído do motor do texturômetro. As configurações desse filtro são a frequência inferior de corte de banda de  $1 \text{ kHz}$ , a frequência inferior de passa-banda de  $3,125 \text{ kHz}$ , a frequência superior de corte de banda de  $22 \text{ kHz}$  e a frequência superior de passa-banda de  $20 \text{ kHz}$ . Os parâmetros obtidos na análise das propriedades acústicas foram: i) média do número de picos (queda no nível de pressão sonora maior que  $10 \text{ dB}$ ); ii)  $SPL_{10}$  (média do nível de pressão sonora dos dez maiores picos acústicos) e iii)  $SPL_{\text{máx}}$  (média do valor de pressão sonora do pico acústico máximo).

Os dados mecânicos foram expressos como força *versus* tempo, enquanto os dados acústicos, que foram coletados simultaneamente, foram expressos como nível de pressão sonora ( $\text{dB}$ ) *versus* tempo. Os parâmetros obtidos pelas propriedades mecânicas foram: i) média da área abaixo da curva de força *versus* deformação, a qual é relacionada ao trabalho total envolvido no teste; ii) média das forças máximas; iii) média do número de picos de força (queda do nível de força maior que  $0,049 \text{ N}$ ) e iv) média das forças de cada pico.

A análise foi realizada em triplicata com 4 medições acústicas por amostra. Detalhes completos sobre o equipamento utilizado podem ser encontrados em Murta et al. (2017).

**Figura 3.5** - Equipamento utilizado para a análise instrumental acústico-mecânica da batata-doce.



Fonte: Murta et al. (2017).

### Estereoscópio Óptico

Micrografias da superfície e da parte interna das amostras (fraturadas manualmente) foram realizadas, após a secagem, usando um estereoscópio óptico (Meiji, Modelo - RZ, Japão), com uma câmera microscópica (OptiCam, Modelo - OPT 10000, Brasil). As imagens capturadas foram analisadas utilizando *software* TSview (Tucsen, V, 7.3.1.7, China).

#### 3.1.4 **Determinação das propriedades dielétricas**

As medições das propriedades dielétricas das batatas-doces foram realizadas utilizando um conjunto de sonda dielétrica de alta temperatura (Keysight Technologies, Modelo - N1501A-101, EUA), conectado ao analisador vetorial de rede RF FieldFox (Keysight Technologies, Modelo - N9923A, EUA), como apresentado na Figura 3.6. As faixas de operação do analisador de rede é de 2 MHz até 6 GHz.

**Figura 3.6** - Analisador vetorial de rede de mão RF FieldFox.



Fonte: Keysight technologie (2015).

A sonda possui um selo hermético constituído de vidro-metal, que o torna resistente a produtos químicos corrosivos ou abrasivos. Esta resiste a uma ampla gama de temperaturas, que varia de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$  e permite medições em função da frequência e da temperatura. A flange grande facilita a medição de materiais sólidos de superfície plana, além de líquidos e semi-sólidos (KEYSIGHT TECHNOLOGIE, 2015).

A sonda dielétrica de alta temperatura pode realizar medições na faixa de frequência de 200 MHz a 20 GHz com um analisador de rede. As propriedades dielétricas são calculadas pelo analisador de rede a partir da medida do coeficiente de reflexão do material em contato com a ponta do sensor. A magnitude do sinal refletido é medida pelo equipamento e com a ajuda do software (Keysight Materials Measurement Suite) que

acompanha o kit, essa medida é expressa em termos de permissividade relativa complexa e os valores da permissividade dielétrica e do fator de perda dielétrica do material medido são fornecidos.

A calibração do equipamento foi realizada a partir da sonda que mede o ar (circuito aberto), o *High temperature short block* (bloco de curto circuito para alta temperatura, apresentado na Figura 3.7) e a água deionizada a uma temperatura de  $24\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ .

**Figura 3.7** - Sonda e High temperature short block



Fonte: Keysight technologie (2015).

As faixas de operação do analisador de rede utilizadas para a varredura de frequência foram de 900 MHz até 6000 MHz (variando a cada 5 MHz).

### Preparação das amostras para medição das propriedades dielétricas

As propriedades dielétricas das amostras *in natura* e branqueadas foram medidas com 6 fatias empilhadas ( $\approx 22\text{ mm}$ ) e pressionadas contra a sonda dielétrica através de uma plataforma elevatória do tipo tesoura, com uma superfície de aproximadamente 7 cm de espessura de polipropileno, sendo as medições realizadas em sextuplicata de amostra e triplicata de leitura.

As amostras desidratadas por *MWVD* foram secas, moídas em moinho de facas (TECNAL, Modelo - TE 631/2, Brasil) e peneiradas em uma peneira de 48 mesh. Aproximadamente 25 g de amostra moída foram pesadas em balança analítica (Shimadzu, Modelo - AY220, Filipinas) e condicionadas em placas de vidro, que foram armazenadas em seis recipientes de vidro hermeticamente fechados, contendo soluções saturadas de sais (Tabela 3.1), a  $25\text{ °C}$  (GREENSPAN, 1997). As amostras foram pesadas em intervalos regulares de tempo até que a

variação entre pesagens fosse menor do que 0,02 g (condição de equilíbrio - aproximadamente 9 semanas). Após o equilíbrio, o conteúdo de umidade das amostras foi determinado em estufa a vácuo (TECNAL, Modelos - TE-395, Brasil) a 70 °C. Esse procedimento foi realizado para obter amostras com umidades homogêneas.

Aproximadamente 5 g a 7 g do pó de batata-doce foram colocados em uma proveta graduada de 50 mL, cortada a uma altura de 30 mm da base. A amostra foi compactada realizando batidas repetidas sobre uma superfície plana, com uma amplitude de aproximadamente 2 cm entre a superfície e a proveta, até que a altura do leito de partículas ficasse estável, o que ocorreu após 100 batidas. Após esse procedimento as medições das propriedades dielétricas dos pós de batata-doce foram realizadas pressionando a proveta (contendo as amostras) contra a sonda dielétrica, usando uma plataforma elevatória do tipo tesoura.

**Tabela 3.1** - Atividade de água de soluções salinas saturadas a temperatura de 25 °C acondicionadas para realização das propriedades dielétricas.

Solução salina saturada	Atividade de água ( $a_w$ ) (25°C)
Acetato de potássio	0,225
Cloreto de magnésio	0,327
Carbonato de potássio	0,438
Nitrato de magnésio	0,529
Nitrito de sódio	0,643
Cloreto de sódio	0,753

### Profundidade de penetração

A profundidade de penetração das micro-ondas foi calculada, conforme a Equação 3.5

$$dp = \frac{c}{2\pi \cdot f \sqrt{2\varepsilon' \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right]}} \quad (3.5)$$

na qual  $f$  é a frequência,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ),  $\varepsilon'$  é a constante dielétrica e  $\varepsilon''$  é a constante de perda.

Os valores de profundidade de penetração para as diferentes amostras foram calculados nas frequências comerciais de aquecimento de micro-ondas (915 MHz e 2450 MHz).

### 3.1.5 Análise estatística

Os resultados obtidos durante as análises de cor, propriedades acústico-mecânicas foram analisadas estatisticamente com o programa Statística 7.0 (StatSoft, Tulsa, Estados Unidos) utilizando análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 95% de confiança.

## 3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.2.1 CINÉTICAS DE SECAGEM

As amostras de batata-doce *in natura* utilizadas neste estudo apresentaram teor de umidade média em base seca (bs) de  $3,559 \text{ g g}^{-1} \pm 0,240 \text{ g g}^{-1}$ ,  $78,07\% \pm 1,2\%$  de umidade média em base úmida (bu) e  $a_w$  de  $0,993 \pm 0,002$ . Valores similares, entre 63% e 83% de umidade (bu), foram reportados por Osundahunsi et al. (2003), Aina et al. (2009) e Falade e Solademi (2010). Após o processo de branqueamento, as amostras apresentaram umidade média de  $4,297 \text{ g g}^{-1} \pm 0,380 \text{ g g}^{-1}$  (bs),  $81,12\% \pm 1,4\%$  (bu) e  $a_w$  de  $0,994 \pm 0,002$ .

Na Figura 3.8 são apresentadas as curvas de secagem, da evolução temporal da atividade de água ( $a_w$ ), da temperatura das amostras de batata-doce durante a secagem por *MWVD*, da pressão do sistema e da potência aplicada durante a secagem. A evolução da atividade de água foi usada como um modo simples e rápido de determinar a pressão de vapor da água durante a secagem. As amostras de batata-doce branqueadas foram secadas por *MWVD* por 27 min e apresentaram umidade final média de  $0,028 \text{ g g}^{-1} \pm 0,006 \text{ g g}^{-1}$  (bs),  $2,7\% \pm 0,6\%$  (bu) e  $a_w$  de  $0,262 \pm 0,041$ . As triplicatas do processo de secagem indicaram boa reprodutibilidade. A  $a_w$  permaneceu elevada (próxima da  $a_w$  das amostras *in natura*) apenas nos primeiros cinco minutos de secagem. Depois disso, os valores e  $a_w$  diminuíram de maneira quase-linear com o tempo. Durante todo o processo de secagem, a temperatura das amostras ficou abaixo de  $40-42^\circ\text{C}$ , fato associado à aplicação do vácuo e à redução da potência de emissão de micro-ondas.

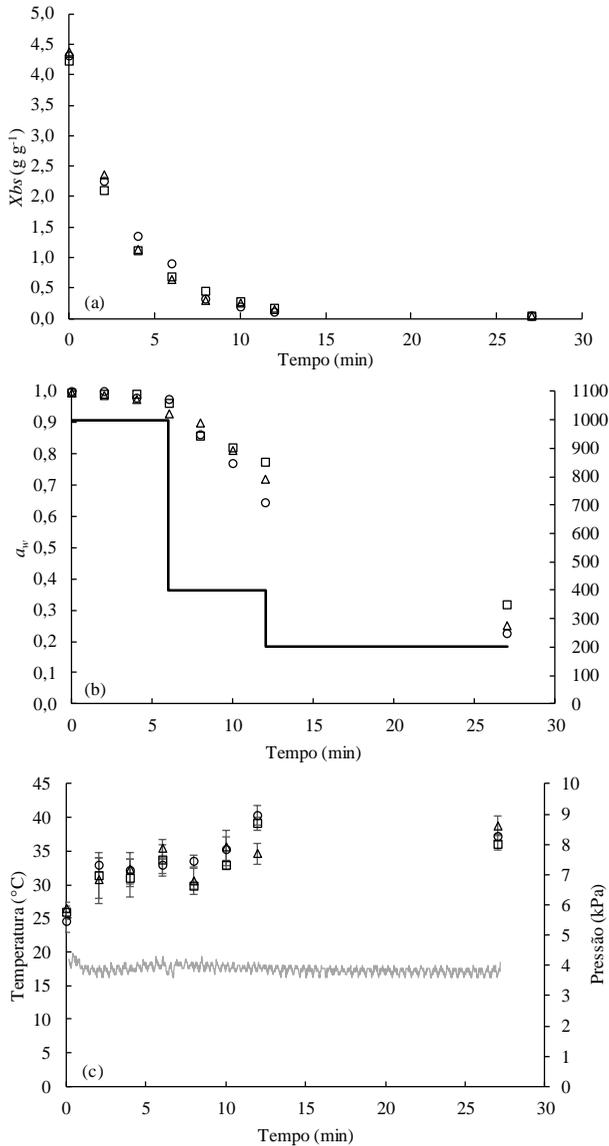
A Figura 3.9 apresenta curvas de taxa de secagem (Figura 3.9a), calculadas por  $dX/dt$ . A análise da Figura 3.9a induz à conclusão de que toda a secagem ocorreu à taxa de secagem decrescente.

No entanto, ao analisar as Figuras (3.8a, 3.8b e 3.8c) em conjunto, pode-se verificar a existência de dois períodos de secagem. No início, a existência de um período à taxa constante pode ser justificada pela constância da  $a_w$  próxima de 1 (característico da evaporação da água livre). O período de secagem à taxa decrescente pode ser facilmente identificado na Figura 3.9, além dos dados da redução gradativa da  $a_w$  das amostras com o tempo. Dessa forma, o período de velocidade de secagem constante foi representado por uma linha reta, obtido a partir de uma regressão linear, considerando coeficientes de correlação  $R^2=0,96$  (Figura 3.9b). A taxa de secagem constante calculada dessa forma foi de  $0,78 \text{ g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ , enquanto a umidade crítica estimada no final do período à taxa constante foi de aproximadamente  $1,02 \text{ g g}^{-1}$  (bs), após remoção de aproximadamente 75% da umidade inicial, nos primeiros 4 min de processo.

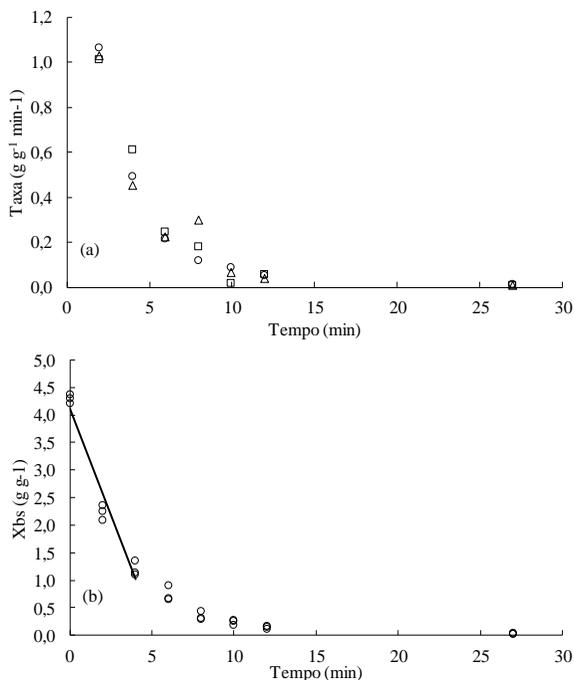
Segundo Zhang et al. (2006), a secagem por micro-ondas apresenta três períodos, um período de aquecimento da amostra, um período de taxa constante e um período de taxa decrescente de secagem. Na secagem de batata-doce por *MWVD* não foi possível observar o período de aquecimento, devido ao rápido aumento da temperatura. O período de taxa de secagem constante é marcado pela conversão das micro-ondas em energia térmica, fornecendo o calor latente de vaporização da água livre. Esse período de secagem representa a maior quantidade de água evaporada, tendo duração de 4 min para as condições avaliadas no presente estudo. Neste período, a temperatura das amostras se manteve próxima de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , valor próximo da temperatura de ebulição da água para pressão de 4 kPa ( $29 \text{ }^\circ\text{C}$ ), corroborando novamente a existência de um período de secagem à taxa constante.

No período de taxa decrescente, o teor de umidade foi lentamente reduzido, em consequência aumentando a resistência à transferência de massa no interior da amostra. Neste último período de secagem, as temperaturas das amostras podem elevar-se acima do ponto de ebulição da água (na pressão da câmara de vácuo), pois a energia necessária para a vaporização da água é inferior à energia térmica convertida pelas micro-ondas, causando o aumento da temperatura do produto (SCAMAN e DURANCE, 2005, MONTEIRO et al., 2015, MONTEIRO et al., 2016). Esse efeito foi observado sutilmente e as amostras não excederam temperaturas maiores que  $\approx 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , decorrente das potências reduzidas aplicadas na fase de taxa decrescente.

**Figura 3.8** - a) Curvas de secagem de batata-doce por *MWVD* (triplicata), b) Evolução temporal da atividade de água ( $a_w$ ) das amostras (triplicata) e potência (—) aplicada durante a secagem, c) Evolução temporal da temperatura das amostras (triplicata e desvio padrão) e evolução temporal da pressão no sistema (—).



**Figura 3.9** - a) Evolução temporal da taxa de secagem. b) Curva de secagem de batata-doce por *MWVD* (Figura 3.8a), com a reta usada para a determinação da taxa de secagem durante o período à taxa constante. Os dados experimentais foram representados por pontos ( $\circ$ ) e a taxa de secagem durante o período da taxa de secagem constante foi representada por uma linha reta.



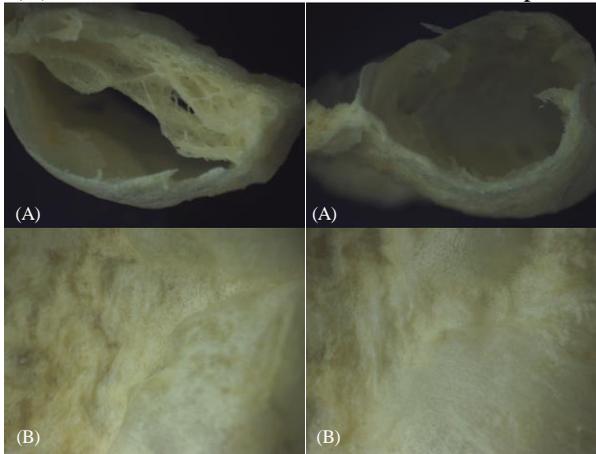
### 3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

#### Imagens obtidas por microscopia ótica

A Figura 3.10 mostra as imagens obtidas pelo estereoscópio óptico, das superfícies e das fraturas das amostras de batata-doce desidratadas por *MWVD*. No processo *MWVD*, a estrutura porosa se deve ao aquecimento volumétrico causado pelas micro-ondas e à rápida formação de vapor a baixas pressões. A saída de vapor do interior para a superfície é considerada o principal mecanismo responsável pela expansão da estrutura (*puffing effect*) e formação de um novo espaço poroso (ZHANG et al., 2006; MONTEIRO et al., 2015; MONTEIRO et al., 2016;

MONTEIRO et al., 2018). Na Figura 3.10 pode-se observar a amostra expandida. Como discutido neste estudo, essa estrutura tem característica frágil e quebradiça.

**Figura 3.10** - Imagens obtidas por microscopia ótica da fratura (A) e da superfície (B) das amostras de batata-doce desidratadas por *MWVD*.



#### Propriedades acústico-mecânicas das amostras durante a secagem

A textura dos alimentos é um dos atributos que mais influenciam a escolha dos consumidores. A textura de alimentos pode ser avaliada por meio de análises sensoriais ou instrumentais. A avaliação sensorial da textura é mais fácil de ser utilizada pela indústria, mas é dispendiosa e demorada. Métodos instrumentais podem ser usados e correlacionados com resultados de análises sensoriais. Quando isso é possível, eles podem ser confiáveis e práticos para prever com precisão atributos de textura sensorial (KIM et al., 2009; KIM et al., 2012; CHEN e OPARA, 2013). As propriedades acústico-mecânicas de batatas-doces desidratadas são análises que podem ajudar a avaliar as propriedades de textura desse produto.

A crocância é um atributo de textura desejável para a aceitação de vários tipos de produtos (VICKERS, 1983). A palavra crocante é utilizada para descrever produtos que quebram ao invés de deformar (FILLION e KILCAST, 2001), como é o caso da batata-doce desidratada investigada neste estudo.

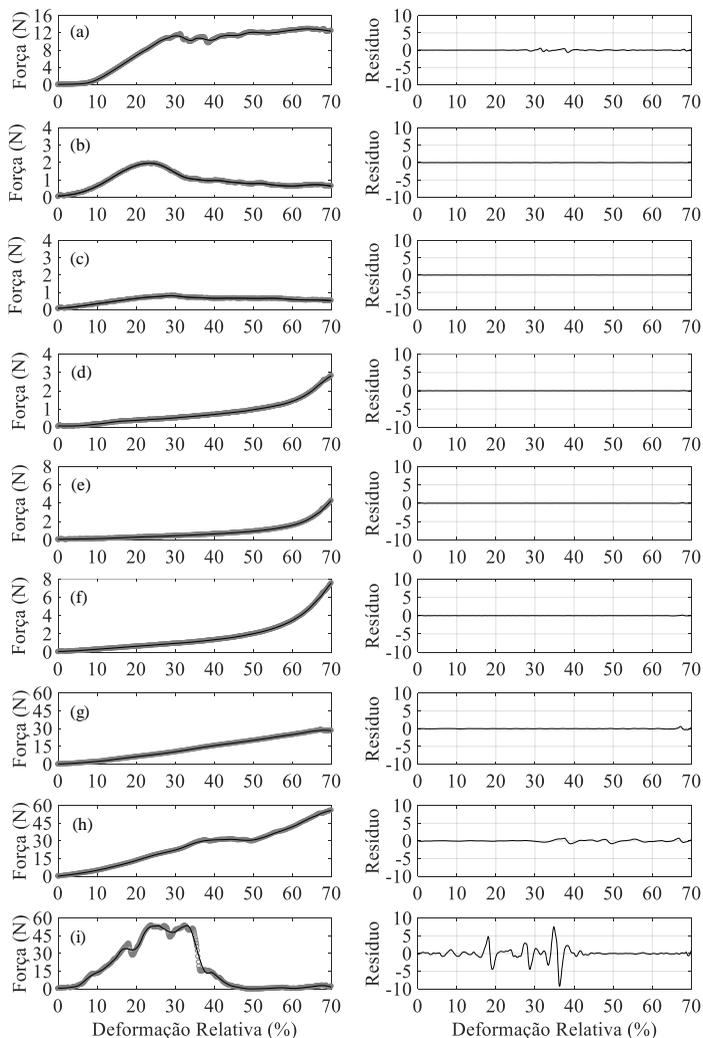
Na Figura 3.11 são apresentadas as curvas representativas dos testes mecânicos de perfuração (*puncture test*), que mostram os dados da

força desenvolvida em função da deformação relativa sofrida pelas amostras (até 70% da espessura inicial). A crocância de produtos desidratados pode ser relacionada com a irregularidade das curvas de força-deformação, que por sua vez é associada ao número e intensidade dos picos de força presentes (LAURINDO e PELEG, 2007; LAURINDO e PELEG, 2008).

As curvas de força-deformação para as amostras desidratadas por *MWVD* (27 min de secagem) apresentaram comportamento característico de produtos crocantes. Para estimar a crocância das amostras a partir das irregularidades das curvas, os dados experimentais de força-deformação foram suavizados e os resíduos normalizados foram calculados pela diferença entre a força registrada e a força ajustada (Figura 3.11). As curvas suavizadas representam o comportamento global da força-deformação, enquanto os resíduos representam as oscilações instantâneas da força de penetração (GONZALEZ MARTINEZ et al., 2003; LAURINDO e PELEG, 2007; LAURINDO e PELEG, 2008).

O branqueamento modifica a estrutura da batata *in natura*, com redução da força máxima e da irregularidade das curvas (Figura 3.11a,b). Durante a secagem à taxa constante, quando a umidade ainda é elevada (Figura 3.11c,d,e) as amostras mostraram baixa resistência inicial à penetração, com aumento gradual devido ao acúmulo de material sob a sonda. Do sexto para o oitavo minuto de processamento é possível observar um aumento considerável na força necessária para penetrar 70% da amostra, sendo de 4 N e 8 N, respectivamente. A partir de 10 min de secagem observou-se um aumento ainda maior da força necessária para penetrar as amostras. As amostras começaram a apresentar pequenas irregularidades nos gráficos dos resíduos a partir de 12 min de secagem ( $X_{bs} = 0,139 \text{ g g}^{-1} \pm 0,032 \text{ g g}^{-1}$ ), ainda com baixa amplitude. Somente a partir de 27 min de secagem ( $X_{bs} = 0,028 \text{ g g}^{-1} \pm 0,006 \text{ g g}^{-1}$ ) as amostras apresentaram uma estrutura quebradiça (crocante), apresentando maior número e amplitude dos picos de força.

**Figura 3.11** - Amplitude da oscilação da força a partir de resultados representativos dos testes de penetração das amostras de batata-doce desidratadas. Coluna esquerda: Dados de força-deformação ( $\circ$ ) e ajuste não-paramétrico ( $\text{—}$ ); Coluna direita: curvas dos resíduos. (a) *in natura*, (b) branqueada, (c) 2 min, (d) 4 min, (e) 6 min, (f) 8 min, (g) 10 min, (h) 12 min, (i) 27 min.



A crocância de produtos alimentícios também pode ser avaliada pela análise simultânea da acústica e dos resultados mecânicos de ensaios de penetração ou de compressão (SAELEAW e SCHLEINING, 2011; PAULA e CONTI-SILVA, 2014; PHILIPP et al., 2017; ÇARŞANBA et al., 2017). Essa combinação oferece maiores informações da crocância do produto do que qualquer um dos dois métodos separadamente (VICKERS, 1987; ARIMI et al., 2010). A avaliação sonora de textura de alimentos crocantes tem mostrado correlação com a aceitação ou rejeição de produtos crocantes por parte dos consumidores (SAELEAW e SCHLEINING, 2011).

As amostras foram retiradas do secador durante a secagem, em tempos pré-determinados, e submetidas a ensaios mecânico-acústicos, em que a força desenvolvida e o nível de pressão sonora (*SPL*) emitidos durante a penetração da sonda foram registrados (Figura 3.12). Os sinais sincronizados permitiram a comparação dos eventos mecânicos e sonoros importantes. Os parâmetros obtidos dos testes acústico-mecânicos são apresentados na Tabela 3.2.

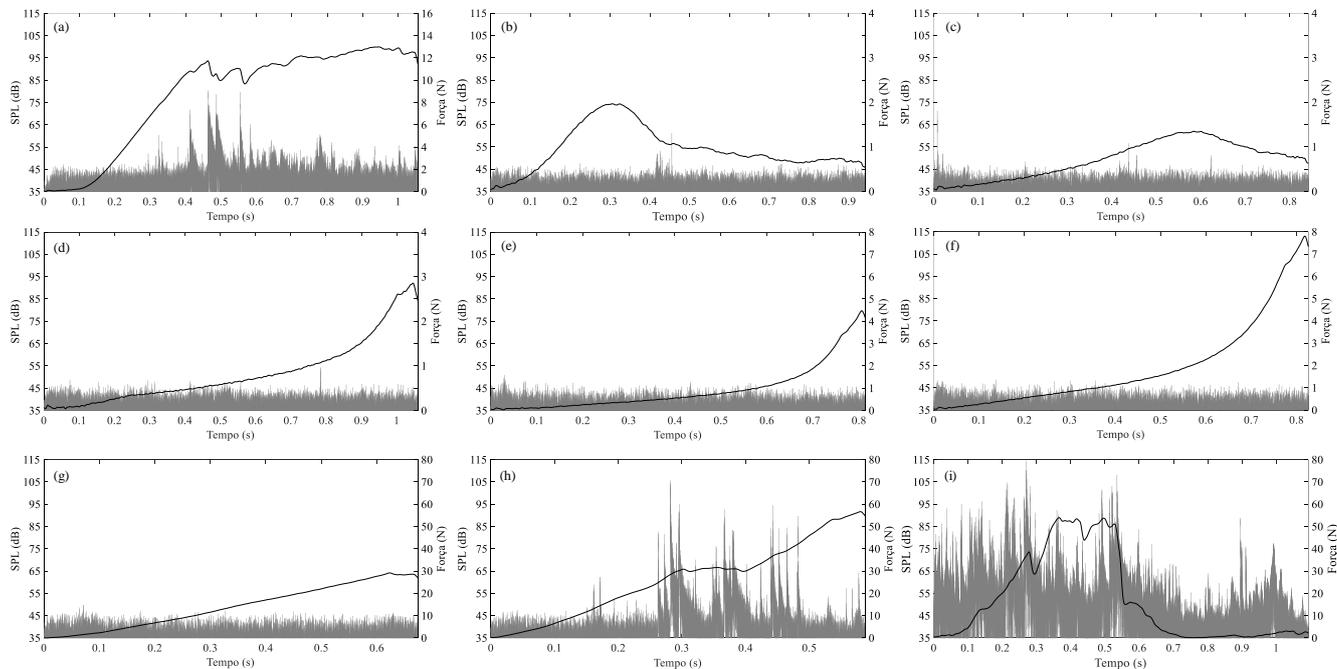
As amostras que apresentaram maiores irregularidades acústicas foram as secas por *MWVD* após 12 min e 27 min de secagem. No entanto, as amostras após 12 min de secagem apresentaram baixo número de picos de força-deformação relativa, o que pode ser relacionado à menor crocância do produto. As batatas-doces desidratadas até o final do processo de secagem apresentaram maiores números de picos de força, de picos acústicos,  $SPL_{10}$  e  $SPL_{máx}$ . O maior número de picos de força mostrou relação direta com o maior número de picos acústicos,  $SPL_{10}$  e  $SPL_{máx}$ . A intensidade e o elevado número de picos acústicos estão diretamente relacionados à crocância dos produtos (VAN HECKE et al., 1998; DUIZER, 2001; CHEN et al., 2005; SANZ et al., 2006; CASTRO-PRADA et al., 2007; SALVADOR et al., 2009; ARIMI et al., 2010; SAELEAW e SCHLEINING, 2011; PIAZZA e GIOVENZANA, 2015; ÇARŞANBA et al., 2017).

**Tabela 3.2 - Valores médios e desvios padrões dos parâmetros obtidos nos testes acústico-mecânicos.**

Amostra	Parâmetros instrumentais mecânicos				Parâmetros instrumentais acústicos		
	Área (N.mm)	Número de picos de força	Força máxima (N)	Forças dos picos (N)	$SPL_{10}$ (dB)	$SPL_{máx}$ (dB)	Número de picos acústicos
<i>In Natura</i>	30,9 ± 4,0 <sup>b*</sup>	13 ± 3 <sup>c</sup>	13,0 ± 1,2 <sup>ab</sup>	11,4 ± 2,4 <sup>b</sup>	74,3 ± 8,7 <sup>b</sup>	79,5 ± 9,5 <sup>b</sup>	575 ± 441 <sup>a</sup>
0 min	2,6 ± 0,7 <sup>a</sup>	3 ± 1 <sup>ab</sup>	1,7 ± 0,6 <sup>a</sup>	1,1 ± 0,7 <sup>a</sup>	61,8 ± 7,1 <sup>a</sup>	66,5 ± 9,8 <sup>a</sup>	15 ± 9 <sup>a</sup>
2 min	1,9 ± 1,1 <sup>a</sup>	2 ± 1 <sup>ab</sup>	1,4 ± 1,2 <sup>a</sup>	0,9 ± 1,1 <sup>a</sup>	59,3 ± 3,3 <sup>a</sup>	64,0 ± 5,8 <sup>a</sup>	12 ± 6 <sup>a</sup>
4 min	2,0 ± 0,6 <sup>a</sup>	2 ± 0 <sup>ab</sup>	2,7 ± 1,6 <sup>a</sup>	1,6 ± 1,8 <sup>a</sup>	60,4 ± 3,8 <sup>a</sup>	63,8 ± 4,9 <sup>a</sup>	14 ± 6 <sup>a</sup>
6 min	3,0 ± 1,6 <sup>a</sup>	2 ± 1 <sup>a</sup>	6,0 ± 3,2 <sup>a</sup>	3,6 ± 3,8 <sup>ab</sup>	59,5 ± 3,8 <sup>a</sup>	63,7 ± 6,1 <sup>a</sup>	12 ± 7 <sup>a</sup>
8 min	4,2 ± 3,9 <sup>a</sup>	2 ± 0 <sup>a</sup>	6,3 ± 6,0 <sup>a</sup>	4,4 ± 6,0 <sup>ab</sup>	59,4 ± 3,5 <sup>a</sup>	63,4 ± 6,4 <sup>a</sup>	8 ± 5 <sup>a</sup>
10 min	46,8 ± 43,3 <sup>b</sup>	3 ± 1 <sup>ab</sup>	32,9 ± 19,1 <sup>b</sup>	29,1 ± 20,8 <sup>c</sup>	62,5 ± 7,3 <sup>a</sup>	67,4 ± 9,7 <sup>ab</sup>	19 ± 16 <sup>a</sup>
12 min	82,2 ± 36,0 <sup>c</sup>	6 ± 4 <sup>b</sup>	66,8 ± 25,2 <sup>c</sup>	47,6 ± 24,0 <sup>d</sup>	89,6 ± 16,6 <sup>b</sup>	97,1 ± 16,5 <sup>c</sup>	606 ± 568 <sup>a</sup>
27 min	35,3 ± 18,8 <sup>b</sup>	16 ± 6 <sup>c</sup>	55,1 ± 38,4 <sup>c</sup>	12,2 ± 18,6 <sup>b</sup>	107,1 ± 6,3 <sup>c</sup>	112,3 ± 7,2 <sup>d</sup>	3389 ± 1454 <sup>b</sup>

\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

**Figura 3.12** - Evolução da Força aplicada (—) e nível de Pressão Sonora (SPL) (—) versus o tempo de penetração das amostras: (a) *In natura*, (b) branqueada, (c) 2 min, (d) 4 min, (e) 6 min, (f) 8 min, (g) 10 min, (h) 12 min, (i) 27 min.



Segundo Van Hecke et al. (1998), produtos crocantes secos mostram tantos picos quanto o número de rupturas da parede celular, sem apresentar acumulação de força. Em produtos úmidos não crocantes, não há ruptura da parede celular, devido a sua flexibilidade. Nesse caso, observa-se um aumento contínuo da força desenvolvida durante a penetração da sonda, sem a presença de picos de força. Segundo Chauvin et al. (2008), os alimentos celulares que contêm apenas ar dentro dos espaços intercelulares, como batatas fritas, são designados alimentos secos e crocantes (*dried-and-crisp foods*). Por outro lado, alimentos que contêm fluidos dentro de suas células, como frutas e vegetais, são chamados de alimentos crocantes úmidos (*crunch foods*). Sendo assim, a batata-doce *in natura* pode ser considerada um alimento crocante úmido, por apresentar pequenas irregularidades nas curvas acústico-mecânico, características de vegetais frescos e crocantes.

O trabalho necessário para perfurar a amostra está relacionado à área sob a curva de força-deformação. A área sob a curva, a média das forças máximas e a média dos picos de força aumentaram com o tempo de secagem, até 12 min de secagem. O aumento da área e da força máxima está associado à dureza do material sentida pelos painelistas (CHANVRIER et al., 2014). Após 27 min de secagem, a área da curva e a média das forças nos picos reduziram, devido à formação de uma estrutura expandida, porosa e crocante. Essa expansão (*puffing effect*), juntamente com a redução da umidade da amostra, produziram uma estrutura crocante com maiores números de picos de força, como é observado na Tabela 3.2, após 27 min de secagem.

Segundo Peleg (2006) quando alguns cereais e *snacks* absorvem moderadamente umidade, ocorre uma perda simultânea da fragilidade (*brittleness*) e um aumento mensurável na resistência à deformação (*stiffness*) ou na resistência mecânica (*toughness*), percebida como dureza (*hardness*) por painelistas não treinados.

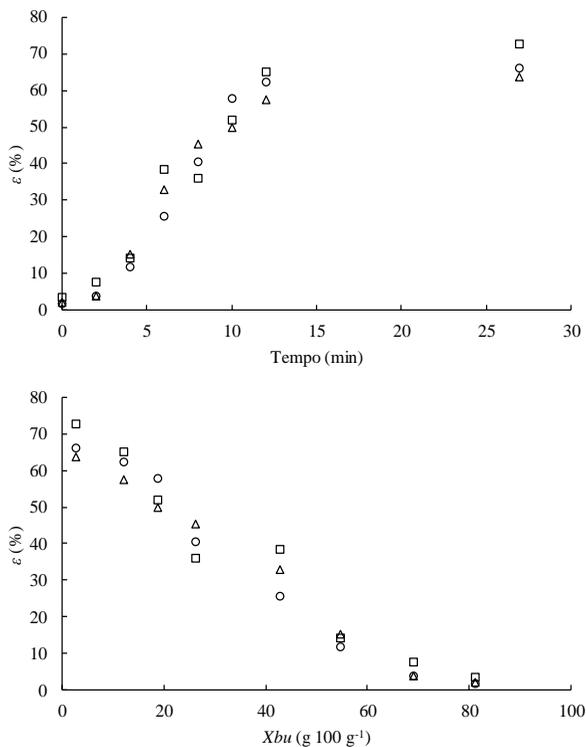
O processo MWVD produziu batata-doce crocante devido à expansão da estrutura das amostras. O mesmo comportamento foi observado por Monteiro et al. (2016) e Monteiro et al. (2018) para secagem MWVD de bananas e abóbora, respectivamente.

### Porosidade e massa específica aparente das amostras durante a secagem

Nas Figuras 3.13 e 3.14 são apresentadas as evoluções da porosidade ( $\rho_{ap}$ ) e da massa específica aparente ( $\epsilon$ ) das fatias de batata-doce durante a secagem por MWVD. Através dessas figuras podemos observar que essas propriedades físicas são muito influenciadas pelo

tempo de secagem. Essa influência vem sendo relatada na literatura, em diversos estudos sobre secagem (KROKIDA e MAROULIS, 1997; KROKIDA e MAROULIS, 1999; MADIOULI et al., 2008; LIU et al., 2012; PORCIUNCULA et al., 2016).

**Figura 3.13** - Evolução da porosidade das fatias de batata-doce durante a secagem por *MWVD*.



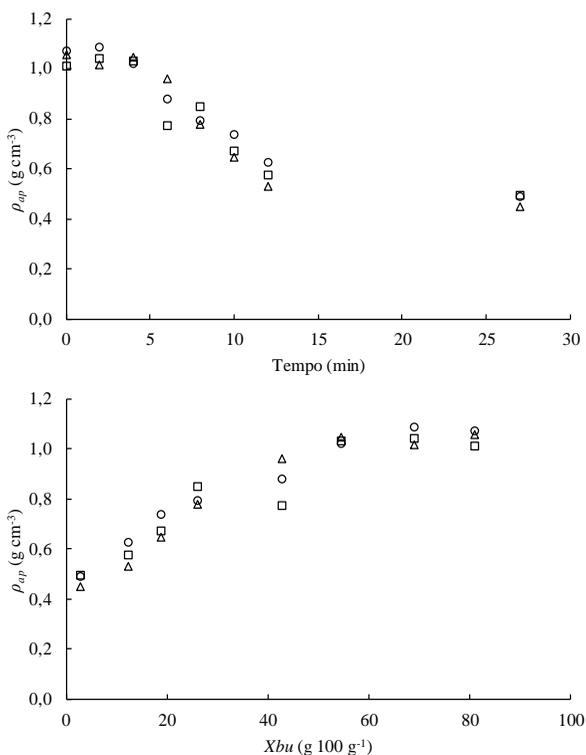
As batatas-doces *in natura* apresentaram  $\rho_{ap}$  de  $1,077 \text{ g cm}^{-3} \pm 0,007 \text{ g cm}^{-3}$  e  $\epsilon$  de  $4,3 \% \pm 2,1 \%$ . Após o processo de branqueamento, uma pequena absorção de água é observada pelo aumento de umidade das amostras, causando uma diminuição da  $\epsilon$  para  $2,2\% \pm 0,7\%$ . Essa absorção de água, a temperaturas de  $(97 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C})$ , promovem a gelatinização do amido, ainda que parcial. Durante a secagem, a  $\epsilon$  das amostras aumenta e a  $\rho_{ap}$  diminui, mesmo comportamento observado por Porciuncula et al. (2016), para secagem

por *KMFD*, secagem convectiva e secagem a vácuo de amostras de banana.

Ao final do processo de secagem (27 min), a massa específica das amostras foi reduzida para  $0,456 \text{ g cm}^{-3} \pm 0,119 \text{ g cm}^{-3}$ , enquanto a porosidade aumentou para  $67,5\% \pm 8,6\%$ .

Durante a secagem por *MWVD*, o aumento da pressão capilar, que causa o encolhimento é compensado pelas forças relacionadas à expansão do gás, causada pelo aquecimento volumétrico sob vácuo (SEGURA et al., 2014). Dessa forma, observou-se que a secagem por *MWVD* é capaz de produzir batatas-doces desidratadas altamente porosas, como resultado da expansão da matriz sólida (*puffing effect*) causada pelo processo.

**Figura 3.14** - Evolução da massa específica aparente das fatias de batata-doce durante a secagem por *MWVD*.



Cor das amostras durante a secagem

A Figura 3.15 apresenta as fotografias das amostras de batatas-doces *in natura*, branqueadas, e de amostras durante a secagem por MWVD. A Tabela 3.3 e a Figura 3.16 apresentam os valores médios ( $\pm$  desvio padrão) dos parâmetros da escala de cor CIELab ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  e  $\Delta E^*$ ) medidos nas amostras retiradas durante a secagem. A cor é um parâmetro importante na escolha de frutas e hortaliças desidratadas, e quanto mais próximo da cor do alimento *in natura*, maior é a aceitação desses produtos pelos consumidores (ESEHAGHBAYGI et al., 2014).

**Figura 3.15** - Fotografia das batatas retiradas em diferentes estágios de secagem por MWVD. Amostras: (1) *In natura*, (2) branqueada, (3) 2 min, (4) 4 min, (5) 6 min, (6) 8 min, (7) 10 min, (8) 12 min, (9) 27 min.

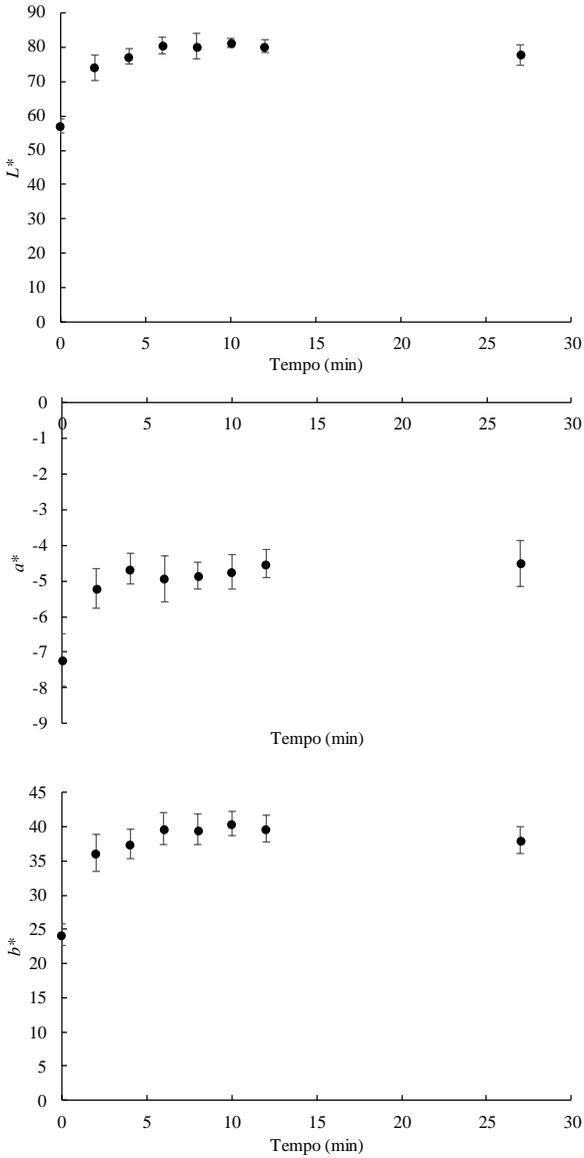


**Tabela 3.3** - Parâmetros de cor ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E^*$ ) da batata-doce *in natura* e das batatas-doces durante a secagem por MWVD.

Amostras	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$
<i>In natura</i>	83,45 $\pm$ 1,36 <sup>d**</sup>	-2,24 $\pm$ 0,94 <sup>c</sup>	30,65 $\pm$ 3,00 <sup>b</sup>	-
0 min	57,09 $\pm$ 2,17 <sup>a</sup>	-7,21 $\pm$ 0,74 <sup>a</sup>	24,16 $\pm$ 1,60 <sup>a</sup>	27,66 $\pm$ 2,05 <sup>b</sup>
2 min	73,98 $\pm$ 3,83 <sup>b</sup>	-5,21 $\pm$ 0,57 <sup>b</sup>	36,16 $\pm$ 2,75 <sup>c</sup>	12,02 $\pm$ 2,36 <sup>a</sup>
4 min	77,28 $\pm$ 2,38 <sup>cb</sup>	-4,66 $\pm$ 0,43 <sup>b</sup>	37,54 $\pm$ 2,12 <sup>cd</sup>	9,74 $\pm$ 2,56 <sup>a</sup>
6 min	80,49 $\pm$ 2,33 <sup>cd</sup>	-4,94 $\pm$ 0,64 <sup>b</sup>	39,70 $\pm$ 2,41 <sup>d</sup>	10,15 $\pm$ 2,48 <sup>a</sup>
8 min	80,17 $\pm$ 3,79 <sup>cd</sup>	-4,85 $\pm$ 0,36 <sup>b</sup>	39,59 $\pm$ 2,29 <sup>d</sup>	10,58 $\pm$ 2,00 <sup>a</sup>
10 min	81,12 $\pm$ 1,3 <sup>d</sup>	-4,74 $\pm$ 0,49 <sup>b</sup>	40,41 $\pm$ 1,81 <sup>d</sup>	10,46 $\pm$ 1,61 <sup>a</sup>
12 min	80,24 $\pm$ 1,73 <sup>cd</sup>	-4,52 $\pm$ 0,40 <sup>b</sup>	39,66 $\pm$ 1,94 <sup>d</sup>	9,94 $\pm$ 2,11 <sup>a</sup>
27 min	77,67 $\pm$ 3,09 <sup>c</sup>	-4,51 $\pm$ 0,63 <sup>b</sup>	38,03 $\pm$ 1,95 <sup>cd</sup>	10,04 $\pm$ 2,26 <sup>a</sup>

\*\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

**Figura 3.16** - Evolução dos parâmetros de cor ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E^*$ ) da batata-doce in natura e das batatas-doces durante a secagem por MWVD



Ao analisar a Figura 3.15 e o parâmetro  $L^*$ , que indica a luminosidade, observa-se que as amostras branqueadas escureceram em relação às amostras *in natura*. No entanto, as amostras secas por MWVD apresentaram coloração mais clara em comparação com as amostras branqueadas, demonstrado pelos maiores valores do parâmetro  $L^*$ .

Após o branqueamento, ocorreu a diminuição dos parâmetros  $a^*$  e  $b^*$ , quando comparados com os parâmetros determinados em amostras *in natura*. Depois da secagem, ocorreu o aumento em ambos os parâmetros, quando comparados com os medidos nas amostras branqueadas, indicando que a secagem modificou a cor das amostras para tonalidades mais próximas do vermelho (maior parâmetro  $a^*$ ) e do amarelo (maior valor de  $b^*$ ).

As amostras secas apresentaram valores baixos do parâmetro  $\Delta E^*$  ( $\approx 10$ ), indicando poucas mudanças de coloração, quando comparadas às amostras *in natura*. Resultados semelhantes nos comportamentos dos parâmetros de cor foram relatados por Setiady et al. (2009), na secagem por micro-ondas a vácuo, secagem convectiva e liofilização de amostras de batata.

As amostras secas não apresentaram diferenças significativas ( $p \leq 0,05$ ) dos parâmetros  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E^*$ , durante a secagem.

Os resultados obtidos nesse estudo mostram que as secagens por MWVD produzem batatas-doces desidratadas com coloração uniforme, (similar ao vegetal *in natura*) e ausência de partes queimadas, sendo assim, atrativas aos consumidores.

### Propriedades dielétricas das amostras

As Figuras 3.17 e 3.18 apresentam as propriedades dielétricas ( $\epsilon'$  e  $\epsilon''$ ) da água, das batatas *in natura*, branqueadas e secas (em pó), acondicionadas em diferentes umidades relativas (*UR*). Os resultados foram obtidos entre as frequências de 900 MHz e 6000 MHz. Inicialmente, o sistema foi calibrado com água deionizada. As curvas das propriedades dielétricas da água em função da frequência (Figuras 3.17a e 3.18a) são similares às publicadas por Kaatze (1989), que estudou as propriedades dielétricas da água em função da frequência e da temperatura.

As constantes  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  apresentaram boa reprodutibilidade de leitura em função da frequência. A  $\epsilon'$  diminuiu com o aumento da frequência, o mesmo comportamento foi observado para frutas e legumes (SEAMAN e SEALS, 1991; NELSON et al., 1994; IKEDIALA et al., 2000; NELSON, 2015) e para maçãs secas com diferentes teores de umidade (FENG et al.,

2002). Segundo Içier e Baysal (2004) esse comportamento ocorre, pois à medida que a frequência aumenta as moléculas polares não conseguem mais acompanhar as rápidas mudanças da polaridade do campo, acarretando na diminuição da constante dielétrica.

A  $\varepsilon''$  para água aumenta na faixa de frequência estudada, o ponto de relaxamento da água se encontra afastado da faixa de frequência adotada, segundo o modelo proposto por Debye (1929), o ponto de relaxamento da água a 25 °C se encontra em frequências próximas a 20 GHz. A constância de perda das frutas e legumes diminui para frequências maiores do que 200 MHz, até atingirem o mínimo em faixas de 1000 a 3000 MHz, seguida por uma inflexão, que aumenta com o aumento da frequência até se aproximar de 20 GHz (Nelson et al., 1994). O mesmo comportamento foi observado na Figura 3.18, para batata *in natura* e branqueada. Essa diminuição na constante de perda ocorre provavelmente pela influência da condutividade iônica e relaxamento da água ligada nas frequências mais baixas (NELSON e DATTA, 2001).

A Tabela 3.4 apresenta as propriedades dielétricas e profundidade de penetração das micro-ondas para água, batatas *in natura*, branqueada e secas em pó com diferentes teores de umidade.

As batatas-doces (*Ipomoea batatas* L. Lam) apresentaram constante dielétrica  $\varepsilon' = 53,7 \pm 2,4$  e constante de perda  $\varepsilon'' = 16,3 \pm 1,3$  para frequências de 2,45 GHz. Esses valores são similares aos obtidos por Nelson (1980) que mediu as propriedades dielétricas de diferentes cultivares de batata-doce a 2,45 GHz e 23 °C pela técnica de linha coaxial de curto-circuito (*short-circuited coaxial-line technique*).

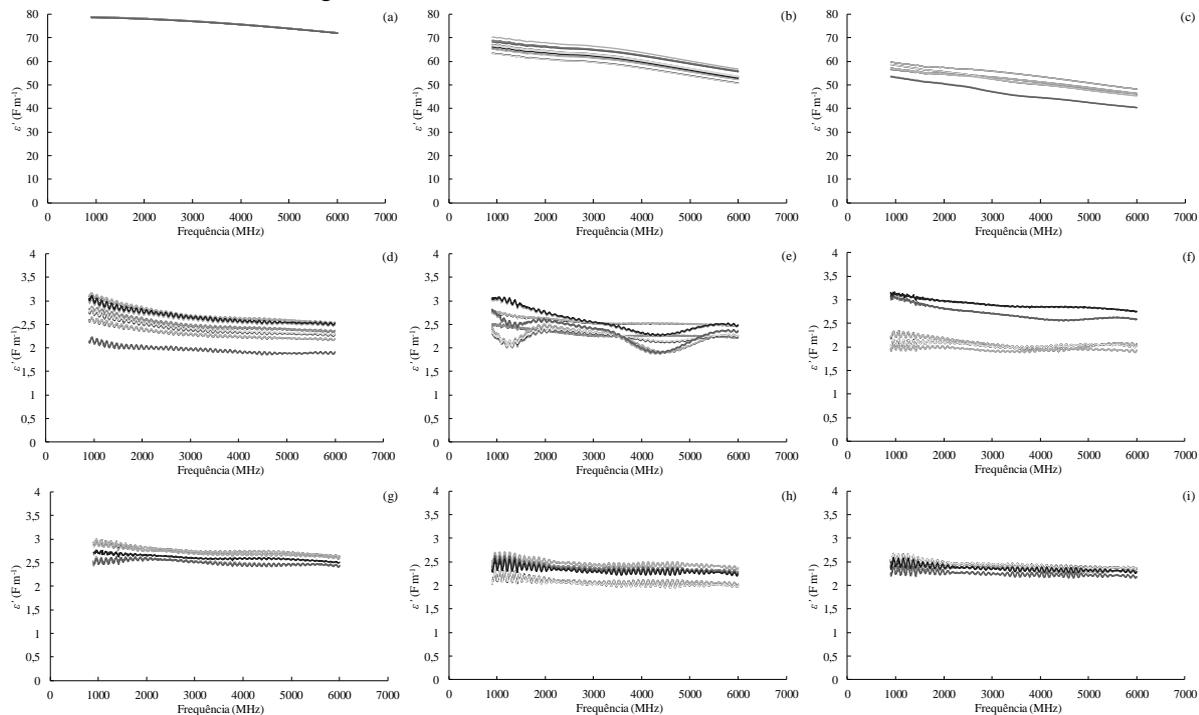
As propriedades dielétricas variam durante a secagem de alimentos, a redução do teor de umidade provoca uma redução nas propriedades dielétricas e um aumento da profundidade de penetração (*dp*) (Feng et al., 2002). Ao analisar a Tabela 3.4, podemos perceber que as amostras analisadas variaram entre 14,7 - 4,1% de umidade (bu) e 0,751 - 0,388 de atividade de água. Nessa faixa estudada, não foi possível observar variação nas propriedades dielétricas, provavelmente devido a água estar predominantemente ligada. A água quimicamente ligada exerce menor influência que a água livre, na qual as moléculas polares podem se orientar livremente com um campo elétrico aplicado (IÇIER e BAYSAL, 2004).

Para alimentos com alta umidade, nos quais a água ligada desempenha papel insignificante, as propriedades são influenciadas não apenas pelo conteúdo de água, mas também por constituintes dissolvidos e pela condução iônica (NELSON e DATTA, 2001). Como é o caso das amostras de batata *in natura* e branqueada, apesar das amostras

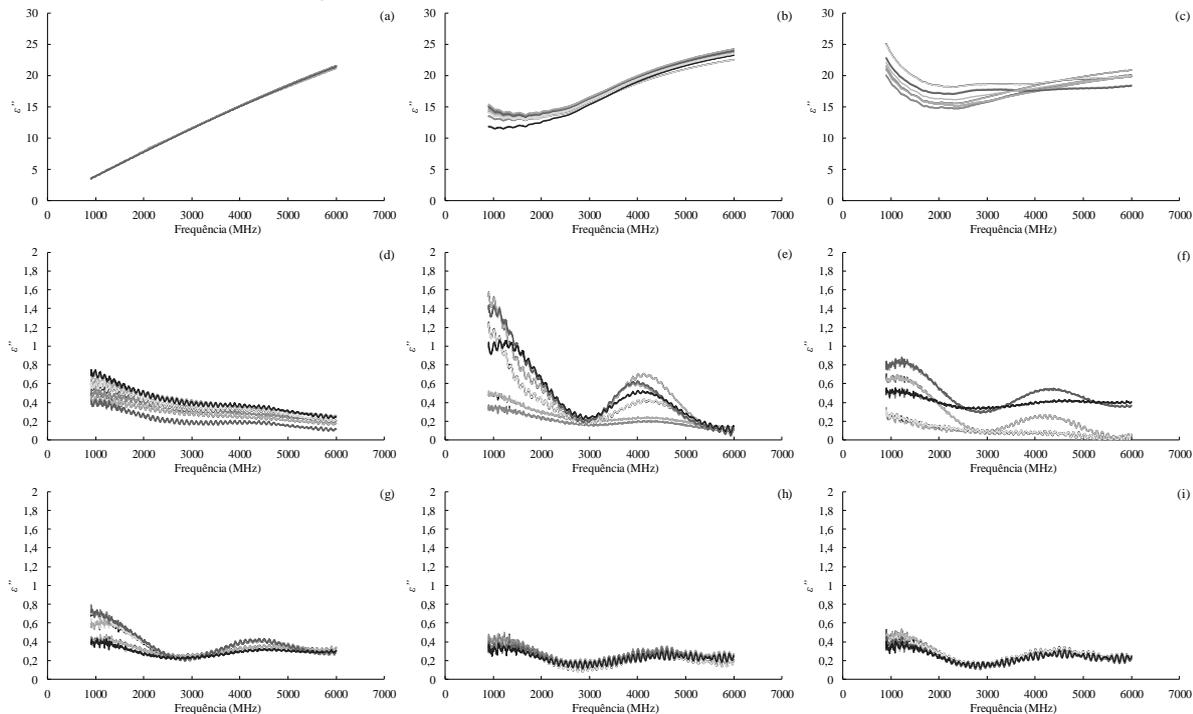
branqueadas apresentarem maior umidade, proporcionando maior  $\epsilon'$ , as batatas *in natura* obtiveram maior  $\epsilon''$ , pois apresentam maior condução iônica, acarretando em menor profundidade de penetração das micro-ondas.

Dessa forma, para avaliar melhor a influência das propriedades dielétricas durante a secagem, seria necessário analisar na faixa de umidade entre 80,5 -14,7% (bu), para poder predizer o comportamento das propriedades dielétricas.

**Figura 3.17** - Constante dielétrica ( $\epsilon'$ ) nas frequências de 915 MHz a 2450 MHz. (a) Água deionizada; (b) Batata branqueada; (c) Batata *in natura*; batata em pó acondicionada em diferentes umidades relativas (UR): (d)  $UR=75,3\%$ ; (e)  $UR=64,3\%$ ; (f)  $UR=52,9\%$ ; (g)  $UR=43,8\%$ ; (h)  $UR=32,7\%$ ; (i)  $UR=22,5\%$ .



**Figura 3.18** - Constante de perda ( $\epsilon''$ ) nas frequências de 915 MHz a 2450 MHz. (a) Água deionizada; (b) Batata branqueada; (c) Batata *in natura*; batata em pó acondicionada em diferentes umidades relativas (UR): (d)  $UR=75,3\%$ ; (e)  $UR=64,3\%$ ; (f)  $UR=52,9\%$ ; (g)  $UR=43,8\%$ ; (h)  $UR=32,7\%$ ; (i)  $UR=22,5\%$ .



**Tabela 3.4** - Propriedade dielétricas e profundidade de penetração das micro-ondas da água, das batatas *in natura*, branqueada e secas em pó e acondicionada em soluções salinas de diferentes umidades relativas, nas frequências de 915 e 2450 MHz. Atividade de água ( $a_w$ ) e umidade em base úmida ( $Xbu$ ) das amostras.

Amostras	$a_w$	$Xbu$ (%)	$\epsilon'$ ( $F m^{-1}$ )		$\epsilon''$		$dp$ (cm)	
			915 MHz	2450 MHz	915 MHz	2450 MHz	915 MHz	2450 MHz
(a) Água deionizada	1,000 ± 0,001	-	78,7 ± 0,1 <sup>d*</sup>	77,6 ± 0,1 <sup>d</sup>	3,6 ± 0,0 <sup>b</sup>	9,5 ± 0,1 <sup>b</sup>	12,8 ± 0,1 <sup>bc</sup>	1,8 ± 0,0 <sup>a</sup>
(b) Batata branqueada	0,994 ± 0,002	80,5 ± 1,0	66,7 ± 2,0 <sup>c</sup>	63,5 ± 2,0 <sup>c</sup>	14,0 ± 1,1 <sup>c</sup>	14,3 ± 0,5 <sup>c</sup>	3,1 ± 0,3 <sup>a</sup>	1,1 ± 0,0 <sup>a</sup>
(c) Batata <i>in natura</i>	0,993 ± 0,002	74,2 ± 0,2	57,1 ± 2,1 <sup>b</sup>	53,7 ± 2,4 <sup>b</sup>	21,9 ± 1,7 <sup>d</sup>	16,3 ± 1,3 <sup>d</sup>	1,8 ± 0,1 <sup>a</sup>	0,9 ± 0,1 <sup>a</sup>
(d) UR=75,3 %	0,751 ± 0,000	14,7 ± 0,0	2,7 ± 0,3 <sup>a</sup>	2,4 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,6 ± 0,1 <sup>a</sup>	0,3 ± 0,1 <sup>a</sup>	16,1 ± 2,6 <sup>bcd</sup>	9,4 ± 2,3 <sup>b</sup>
(e) UR=64,3 %	0,643 ± 0,001	10,3 ± 0,1	2,6 ± 0,3 <sup>a</sup>	2,5 ± 0,1 <sup>a</sup>	1,0 ± 0,4 <sup>a</sup>	0,3 ± 0,1 <sup>a</sup>	12,1 ± 7,7 <sup>b</sup>	10,8 ± 2,7 <sup>b</sup>
(f) UR=52,9 %	0,542 ± 0,001	7,6 ± 0,2	2,5 ± 0,5 <sup>a</sup>	2,4 ± 0,4 <sup>a</sup>	0,6 ± 0,3 <sup>a</sup>	0,2 ± 0,1 <sup>a</sup>	17,0 ± 7,7 <sup>cd</sup>	16,9 ± 9,0 <sup>c</sup>
(g) UR= 43,8 %	0,459 ± 0,002	5,6 ± 0,1	2,8 ± 0,3 <sup>a</sup>	2,7 ± 0,1 <sup>a</sup>	0,6 ± 0,2 <sup>a</sup>	0,3 ± 0,0 <sup>a</sup>	14,9 ± 4,6 <sup>bc</sup>	12,1 ± 1,5 <sup>b</sup>
(h) UR=32,7 %	0,486 ± 0,000	4,3 ± 0,0	2,3 ± 0,2 <sup>a</sup>	2,3 ± 0,2 <sup>a</sup>	0,4 ± 0,0 <sup>a</sup>	0,2 ± 0,0 <sup>a</sup>	21,9 ± 2,2 <sup>e</sup>	19,5 ± 2,2 <sup>c</sup>
(i) UR=22,5 %	0,388 ± 0,001	4,1 ± 0,3	2,4 ± 0,1 <sup>a</sup>	2,4 ± 0,1 <sup>a</sup>	0,4 ± 0,0 <sup>a</sup>	0,2 ± 0,0 <sup>a</sup>	20,5 ± 2,1 <sup>de</sup>	18,6 ± 0,7 <sup>c</sup>

\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

### 3.3 CONCLUSÃO

A secagem por micro-ondas a vácuo permite uma rápida remoção de água das batatas-doces branqueadas, com elevadas taxas de secagem. Através desse processo é possível produzir *chips* de batata-doce desidratadas com uma estrutura altamente porosa e com coloração muito próxima do observado nas amostras *in natura*. As amostras ao final do processo de secagem apresentaram baixas umidade e atividade de água, com maiores irregularidades nas curvas de força-deformação e nas curvas de nível de pressão sonora durante a penetração da sonda na amostra. Sendo assim, apresentaram maiores números de picos de força, picos acústicos e maiores pressões sonoras, características de produtos crocantes. Portanto, esse método de secagem tem grande potencial para produzir frutas e hortaliças desidratados e crocantes de alta qualidade. Sendo que, o controle da temperatura do produto durante o processo, bem como o dimensionamento de equipamentos que viabilizem a produção em escala industrial são necessários.

No próximo capítulo apresenta-se um estudo sobre estratégias para melhorar a secagem por micro-ondas a vácuo pelo controle da temperatura através da manipulação da potência e do uso de agitador de ondas.



## 4 ESTRATÉGIAS PARA MELHORAR A SECAGEM POR MICRO-ONDAS A VÁCUO: CONTROLE DA TEMPERATURA DO PRODUTO PELA MANIPULAÇÃO DA POTÊNCIA E USO DE AGITADOR DE ONDAS

---

Neste estudo foi realizada a instalação de um agitador de onda (*mode stirrer*) na cavidade de um secador multifuncional de micro-ondas, com o objetivo de homogeneizar o campo eletromagnético. Além disso, foi realizada a montagem e a validação de um controlador de temperatura dos alimentos a serem processados por meio da manipulação da potência do micro-ondas, sob vácuo. Após a validação do controlador, a comparação entre secagens de batata-doce por micro-ondas a vácuo (*MWVD*) com e sem o controle da temperatura foi realizada.

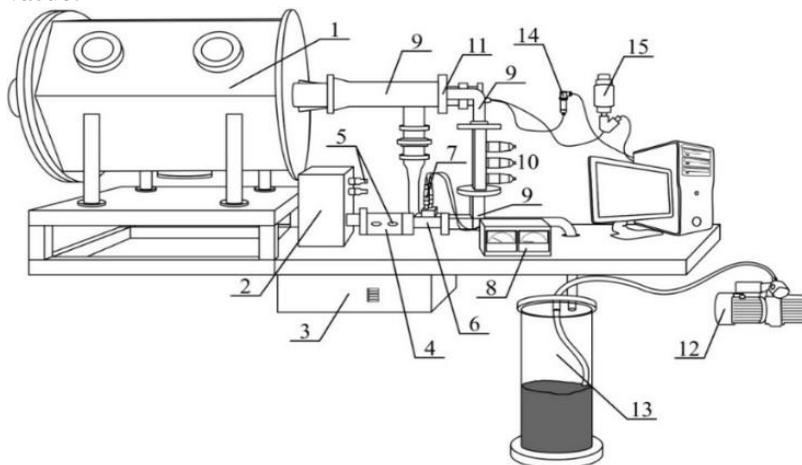
### 4.1 MATERIAL E MÉTODOS

#### 4.1.1 Secador

O secador multifuncional de micro-ondas utilizado para adaptação do controle contínuo da potência foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI), localizado na Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, Brasil (BARRETO, 2016), e está esquematizado na Figura 4.1.

O secador apresenta cavidade prismática hexagonal, visando homogeneizar a distribuição de micro-ondas e reduzir os efeitos causados por ondas estacionárias. O equipamento tem volume interno de 175 L, um gerador de micro-ondas com magnetron de ondas contínuas, com potência nominal máxima de saída de 3 kW, faixa de potência de saída regulável de 10-100%, frequência de 2,45 GHz (GAE, GA4329A, EUA) e uma fonte de alta tensão (Alter Reggio Emilia, Modelo - SM1250, Itália). Ao gerador de micro-ondas está ligado um sistema de refrigeração composto por um circulador de 3 portas (GAE, Modelo - GA1112, USA) e um *short dummy load* (GAE, Modelo - GA1201, USA), responsável por isolar o magnetron das ondas refletidas. A refrigeração do sistema é feita por dois banhos termostáticos (MS Equipamentos, Palhoça – SC, Brasil) com vazão mínima de 3,8 L min<sup>-1</sup> de água e vazão máxima de 7,6 L min<sup>-1</sup> e temperatura de circulação entre 4-35 °C.

**Figura 4.1** - Dispositivo experimental do secador de micro-ondas a vácuo.



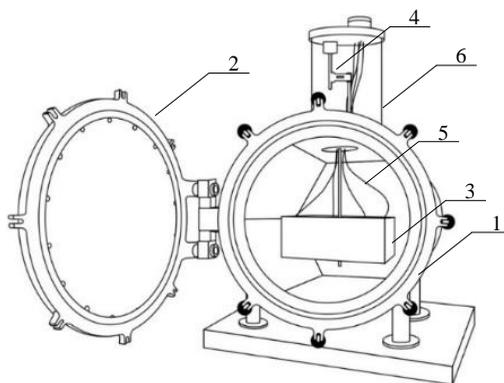
(1) Cavidade prismática hexagonal; (2) Gerador de micro-ondas; (3) Fonte de Alta Tensão; (4) Circulador de 3 Portas e *Short Dummy Load*; (5) Conexões para água refrigerada; (6) Acoplamento direcional duplo; (7) Detectores de onda emitida e refletida; (8) Monitor duplo de potência emitida e refletida; (9) Guia de Onda; (10) 3sintonizadores de precisão; (11) Janela de quartzo; (12) Bomba de Vácuo; (13) *Trapping*; (14) Transdutor de Pressão; (15) Válvula de controle de pressão.

O sistema possui um monitor de potência de micro-ondas, composto por um acoplador direcional duplo (GAE, Modelo - GA3104, USA), dois detectores de onda, um para ondas emitidas e outro para ondas refletidas (GAE, USA), e um monitor visual duplo de potência (GAE, Modelo - GA3004-3A, USA) para medir a potência das ondas refletidas e emitidas. Após o acoplador direcional duplo, há um guia de onda em curva 90° tipo E (GAE, Modelo - GA2302, USA) seguido por 3 sintonizadores de impedância (GAE, Modelo - GA1009, USA) e outro guia de onda em curva 90° tipo E. Uma janela de quartzo (permite fazer vácuo na cavidade e deixa passar as micro-ondas) conecta esse guia de ondas a outro guia, conectado à cavidade do secador. O secador foi conectado a uma bomba de vácuo de vazão nominal de 365 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (D.V.P., Modelo - LC.305, Itália), conectada à uma eletroválvula proporcional (Asco, Modelo - E290-PD, Brasil) acoplada a um transdutor de pressão (Warme, Modelo - WTP 4010, Brasil), que envia os dados de pressão para um computador. Um *software* dedicado foi utilizado para

aquisição dos dados e para o controle *PID* da válvula de controle da pressão (Altem, Florianópolis – SC, Brasil). A porta da cavidade do secador micro-ondas tem travas de segurança, que interrompem imediatamente a emissão das ondas eletromagnéticas, caso a porta seja aberta.

O secador de micro-ondas possui um sistema adaptado para registrar a variação temporal da massa a partir de uma célula de carga do tipo *single point* (Alfa Instrumentos, Modelo - GL, Brasil), com capacidade de 5 kg e exatidão de 0,1 g, sustentada por um suporte (haste e uma caixa) de polipropileno inserido na câmara de vácuo (Figura 4.2). A célula de carga foi ligada a um sistema de aquisição de dados conectado a um computador por uma interface eletrônica (Alfa Instrumentos, Modelo - 3102, Brasil), como descrito por Laurindo et al. (2007) e Carciofi et al. (2012). Além disso, as temperaturas das amostras durante o processo de secagem foram monitoradas por dois sensores de fibra ótica (Figura 4.2), conectados a um sistema de condicionamento de sinal (Luxtron, Modelo-M600, USA), que é conectado a um computador.

**Figura 4.2** - Dispositivo experimental do monitoramento de massa e de temperatura durante secagem.



- (1) Cavidade prismática hexagonal (câmara de secagem);
- (2) Porta da cavidade;
- (3) Suporte para amostra;
- (4) Célula de carga;
- (5) Sensores de temperatura de fibra ótica;
- (6) Câmara de acrílico, que permite conectar a célula de carga e os sensores, sem perda do vácuo.

#### 4.1.2 Agitador de onda (*mode stirrer*)

Um agitador de onda (*mode stirrer*) foi instalado dentro da cavidade prismática hexagonal do secador multifuncional de micro-ondas para homogeneizar o campo eletromagnético (Figura 4.3). O agitador consiste de uma hélice de alumínio, conectada por uma haste metálica de aço inox. A hélice é ajustável na haste metálica por um parafuso sextavado sem cabeça. Para permitir a rotação da hélice e da haste metálica foram usados um rolamento e um motor de prato de forno de micro-ondas doméstico (Motor Synchronous – Modelo 49TYJ, China), como mostrado na Figura 4.3b. Rotações de 2,5 a 3 por minuto (rpm) são permitidas com este sistema.

Para sustentar o sistema, constituído por hélice, haste e motor, foi construído um guia de onda (tubo cilíndrico) soldado à cavidade prismática hexagonal al, que também serve para evitar a fuga de ondas eletromagnéticas (Figura 4.3c). A energia de micro-ondas é atenuada à medida que passa pela guia de ondas circular com um diâmetro inferior ao que permite que a potência se propague livremente. Para evitar fugas eletromagnéticas, o comprimento do tubo foi calculado a partir da relação do comprimento pelo diâmetro da tubulação, como descrito por Monteiro et al. (2015). Além disso, para evitar a perda de vácuo, foi utilizado um retentor que foi inserido dentro do guia de onda juntamente com o rolamento que possibilita a rotação do agitador (Figura 4.3d).

Vazamentos de ondas foram analisados utilizando um medidor de micro-ondas (Ets-Lindgren, Modelo - Holaday EMF Measurement, USA). Não foram detectadas fugas de micro-ondas quando o equipamento estava em operação, sendo seguro para exposição humana.

**Figura 4.3** - a) Agitador de ondas e bandeja de polipropileno com *marshmallows* na cavidade; b) Conjunto hélice, haste, rolamento e motor (agitador de onda); c) Guia de onda com o agitador de onda; d) Guia de onda com o retentor para evitar a perda de vácuo.



### Validação do agitador de onda

A influência do agitador de ondas na homogeneidade do campo elétrico na cavidade foi estudada com *marshmelows* brancos posicionados em uma bandeja de polipropileno retangular de (660 mm x 490 mm x 5 mm), com 11 linhas x 8 colunas (Figura 4.3a). As amostras foram submetidas ao aquecimento utilizando potência do magnetron de 1000 W por 10 min, até que as amostras apresentassem alteração de cor. O aquecimento dos *marshmelows* foi testado com e sem a presença do agitador de onda, para avaliar a distribuição das ondas eletromagnéticas. Três posições diferentes da haste metálica foram testadas, conforme mostrado na Figura 4.4.

**Figura 4.4** - Posição da hélice (base, meio e extremidade) na haste.



#### 4.1.3 Controlador de temperatura pela manipulação da potência de geração de micro-ondas

Um sistema de controle de temperatura das amostras durante a secagem foi desenvolvido com o objetivo de evitar que os alimentos fossem submetidos a temperaturas elevadas. O controle de temperatura é realizado por um sistema em malha fechada, manipulando a potência do magnetron a partir de medições de temperatura do produto com sensores de temperatura de fibra óptica ou por sensores de temperatura pela medida da radiação térmica emitida (sensor de infravermelho).

O controlador é composto por um microcontrolador Cortex M4 (*Texas Instruments*, Modelo - TM4C123GH6P, Estados Unidos), na placa de desenvolvimento *Tiva C*, responsável pela aquisição, processamento de dados e controle de saída. A placa contém conversores analógico-digitais (*ADC*) de 12 bits e módulo de comunicação *EUSART*. Um módulo *DAC* (*Digital – Analogic Converter*), também de 12 bits, transforma o sinal digital em uma saída de até 3.3 V, a qual é amplificada até 10 V (sinal de controle do magnetron). O controlador possui um *LCD*

alfanumérico de 2 linhas por 16 caracteres por linha. Os dados a serem exibidos podem ser escolhidos pela interface gráfica.

O controlador contém 3 entradas analógicas, projetadas para o sinal do sensor de infravermelho, permitindo entradas entre 0 e 3.3 V, e duas adicionadas para medidores entre 0 e 10V. As medições feitas pelas fibras ópticas foram obtidas via comunicação serial, pelo protocolo UART RS-232.

O Controlador apresenta uma interface via computador, que permite configurar os parâmetros de execução, bem como modos de operação. Os parâmetros de execução são potência máxima utilizada e temperatura de controle (*setpoint*). O *setpoint* é definido pelo usuário, sendo a temperatura em que se deseja manter o sistema, enquanto a saída é uma tensão aplicada ao magnetron, que resultará na potência que será aplicada no sistema.

Um controlador *PID* (Proporcional, Integrador e Derivativo) foi utilizado para manter o controle da malha fechada. O sistema permite a configuração dos coeficientes, a fim de evitar tanto uma resposta lenta, quanto evitar a instabilidade do sistema.

Ao se iniciar o controle, uma grande diferença entre a temperatura medida e o *setpoint* pode causar uma resposta muito demorada, mesmo que isso implique em uma grande estabilidade ao final do processo. Com o intuito de reduzir este tempo inicial, é possível configurar uma rampa que funciona durante um período anterior ao controle *PID*. Esta rampa irá gradativamente aumentando a potência de saída até que se atinja a potência máxima determinada pelo usuário. O controlador manterá a potência máxima até um dado limite, também configurado pelo usuário, no qual o controle *PID* será então ativado. Esse limite é configurado com um valor de temperatura abaixo do *Setpoint* para o qual o controlador *PID* deve começar a atuar.

Antes de cada experimento com massa de amostras diferentes, o controlador foi calibrado em conjunto com monitor de potência (GAE, Modelo - GA3004-3A, USA), uma equação de segundo grau foi ajustada entre a potência real lida pelo monitor *versus* a potência emitida. A calibração do controlador foi realizada sem o controle *PID* e sim a partir da potência constante emitida, variando entre 300 W a 3000 W. Essa equação foi colocada no programa do controlador, sendo a potência ajustada igual à medida.

### Validação do controlador

A validação do controlador foi realizada utilizando béqueres de vidro com diferentes massas de água destilada (500 g, 1000 g, 3000 g e 5000 g), controlando diferentes temperaturas (60 °C, 70 °C, 80 °C). Além disso, a reprodutibilidade do controlador foi avaliada, realizando cada experimento em duplicata.

O controle de temperatura da água foi mantido utilizando a densidade de potência máxima de 0,54 W g<sup>-1</sup>, ou seja, a máxima potência utilizada para 5000 g de água foi 2700 W, para 3000 g foi 1620 W, para 1000 g foi 540 W e para 500 g foi 270 W. Além disso, foi realizado um teste utilizando uma pequena quantidade de água operando com um controle com máxima potência aplicada (500 g de água com 2700 W).

A partir dos resultados obtidos pelo controlador foi possível verificar a potência absorvida pelas amostras e calcular a eficiência do secador de micro-ondas. A verificação foi realizada por calorimetria, assumindo que toda a potência fornecida pelo forno de micro-ondas foi transformada em energia térmica na água e no vidro. A potência absorvida pela amostra ( $P_{abs}$ ) durante o aquecimento foi calculada pela Equação 4.1

$$P_{abs} = \frac{(m_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} + m_{vidro} \cdot c_{p_{vidro}}) \cdot (\Delta T)}{t} \quad (4.1)$$

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,  $\Delta T$  é a variação da temperatura e  $t$  é o tempo.

A eficiência do secador de micro-ondas juntamente com o controlador pode ser determinada pela relação entre a potência nominal emitida pelo equipamento e a potência absorvida pela amostra.

#### 4.1.4 Seleção e preparo das amostras

A seleção e o preparo das amostras ocorreram como descritos na metodologia do Capítulo 3, item 3.1.1. No entanto, as batatas-doces selecionadas apresentaram um comprimento de aproximadamente 225,1 mm ± 35,4 mm e diâmetros de  $D_1 = 85,1 \text{ mm} \pm 9,5 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 91,6 \text{ mm} \pm 32,4 \text{ mm}$  e  $D_3 = 89,0 \text{ mm} \pm 5,4 \text{ mm}$ . As batatas-doces foram lavadas, descascadas manualmente e posteriormente, cortadas em fatias de aproximadamente 3,9 mm ± 0,4 mm de espessura com um mandolin profissional (Progressive, Modelo - PL8®, Estados Unidos).

Para melhor uniformidade das amostras, as fatias foram cortadas em forma cilíndrica, utilizando um molde de aço inox de 60 mm de diâmetro interno, e apresentaram um diâmetro de  $59,8 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ .

#### 4.1.5 Experimentos de secagem

Antes da secagem, 44 fatias totalizando  $520 \text{ g} \pm 4 \text{ g}$  foram dispostas verticalmente em um suporte, dentro da caixa de polipropileno (Figura 4.5), sendo essas secas por *MWVD*.

**Figura 4.5** - Disposição das batatas na caixa de secagem (imagem ilustrativa).



O processo de desidratação das batatas-doces por *MWVD* foi realizado com e sem a utilização do controle de temperatura pela manipulação da potência. Em ambos os processos, a pressão da câmara foi reduzida a aproximadamente 4 kPa, quando o gerador de micro-ondas foi ligado, sendo mantida nesse valor até o final do processo de secagem. O agitador de ondas foi usado em todas os experimentos de secagem, realizados em triplicata. Ao final de cada processo de secagem as amostras foram analisadas quanto à umidade, e à presença de partes queimadas ou escuras nas fatias.

#### Secagem por micro-ondas a vácuo sem controle de temperatura (MWVDS)

Para comparação, foram realizados diferentes experimentos de secagem utilizando potência constante (300 W, 1500 W ou 2700 W).

## Secagem por micro-ondas a vácuo com controle de temperatura (MWVDC)

A temperatura das amostras foi medida com um sensor de fibra óptica. A fibra foi inserida no interior da fatia de batata-doce, e esta foi colocada sempre na mesma posição (mais próxima da entrada das micro-ondas na câmara). A escolha da utilização de somente um sensor de temperatura (de fibra óptica) se deve à falta de homogeneidade do campo eletromagnético e da grande diferença de temperatura entre as amostras durante o aquecimento, o que dificultaria o processo de controle de temperatura. Com o objetivo de reduzir degradação térmica das amostras, fixou-se o *setpoint* de temperatura em 60 °C. O controle *PID* foi utilizado desde o início do processo e a máxima potência utilizada durante a secagem foi de 1500 W.

### 4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.2.1 Validação do agitador de onda

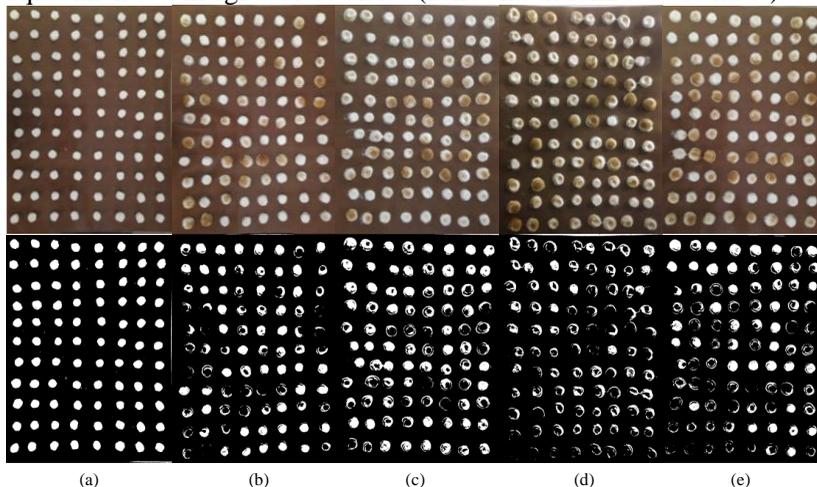
Para avaliar a influência do agitador de onda foi realizado o aquecimento de *marshmelows* no secador de micro-ondas, com e sem o agitador de ondas, cuja hélice foi testada em três posições diferentes da haste metálica. As amostras foram submetidas ao aquecimento até que mostrassem alteração de cor. Na Figura 4.6 apresentam-se as imagens coloridas e ajustadas em escala de preto e branco dos *marshmelows* sem aquecimento e com aquecimento.

Na Figura 4.6 fica evidente que o uso do agitador de ondas resultou em melhor homogeneidade da coloração das amostras após o aquecimento.

Isso é explicado pelo efeito das pás giratórias, que perturbam as ondas continuamente, evitam a formação de modos estacionários e fazem com que as micro-ondas sejam distribuídas de forma mais uniforme na cavidade. Esses resultados são corroborados pela literatura, que tem destacado a importância de agitador de ondas (*mode stirrer*) na secagem por micro-ondas (TULASIDAS et al., 1996; IDRIS et al., 2004; GEEDIPALLI et al., 2007; LI et al., 2011; CUCCURULLO et al., 2017).

A hélice do agitador posicionada na extremidade da haste do agitador resultou em maior homogeneidade na coloração e menor número de *marshmelows* queimados, indicando menor presença de *hot spots* dentro da câmara de secagem. Deste modo, essa configuração foi escolhida para realização dos experimentos seguintes.

**Figura 4.6** - Fotografia dos marshmelows na bandeja de polipropileno (Imagens coloridas na parte superior e binarizadas na parte superior). Amostras: (a) sem aquecimento, (b) aquecimento sem agitador de onda, (c) aquecimento com agitador de ondas (hélice na base da haste), (d) aquecimento com agitador de ondas (hélice no meio da haste), (e) aquecimento com agitador de ondas (hélice na extremidade da haste).



#### 4.2.2 Validação do controlador de temperatura

Para avaliar o funcionamento sistema de controle da temperatura foram utilizados béqueres de vidro com diferentes massas de água, usando diferentes *setpoints* para a temperatura da água. Na Figura 4.7 são apresentadas curvas representativas das evoluções temporais da temperatura e da potência durante o aquecimento. Os resultados são relativos a um béquer com 5000 g de água, com *setpoint* da temperatura em 60 °C. O controlador foi alimentado com a temperatura média da água, resultado de medidas efetuadas com duas fibras ópticas inserida no interior do béquer. Apresenta-se também as potências aplicadas durante o processo (máxima potência aplicada 2700 W) para que a temperatura fosse controlada. O processo de controle da temperatura funcionou satisfatoriamente e foi reprodutivo.

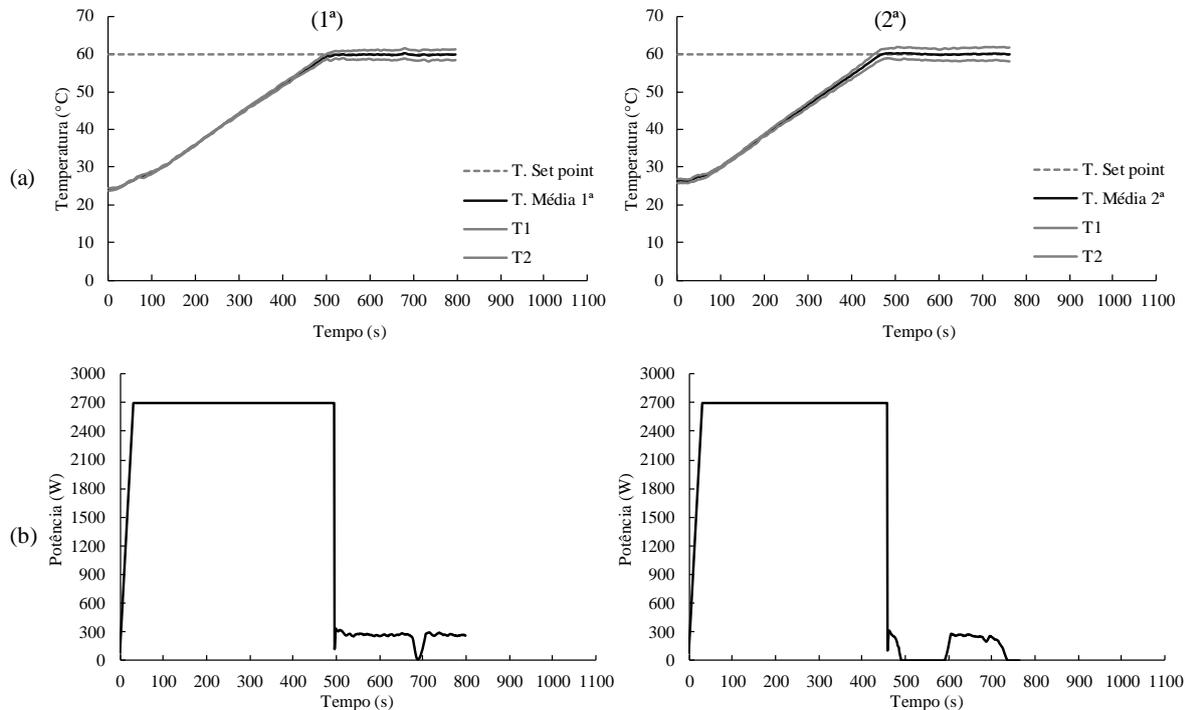
A evolução temporal da temperatura e da potência durante os controles da temperatura da água (*setpoint* 60 °C) com diferentes massas de água estão apresentadas na Figura 4.8. Foi possível controlar a temperatura da água mantendo a densidade de potência de 0,54 W g<sup>-1</sup>,

sendo que todos os processos apresentaram boa reprodutibilidade. Além disso, foi possível controlar a temperatura de uma pequena quantidade de água (500 g) utilizando a máxima potência aplicada (2700 W), também com boa reprodutibilidade (Figura 4.9).

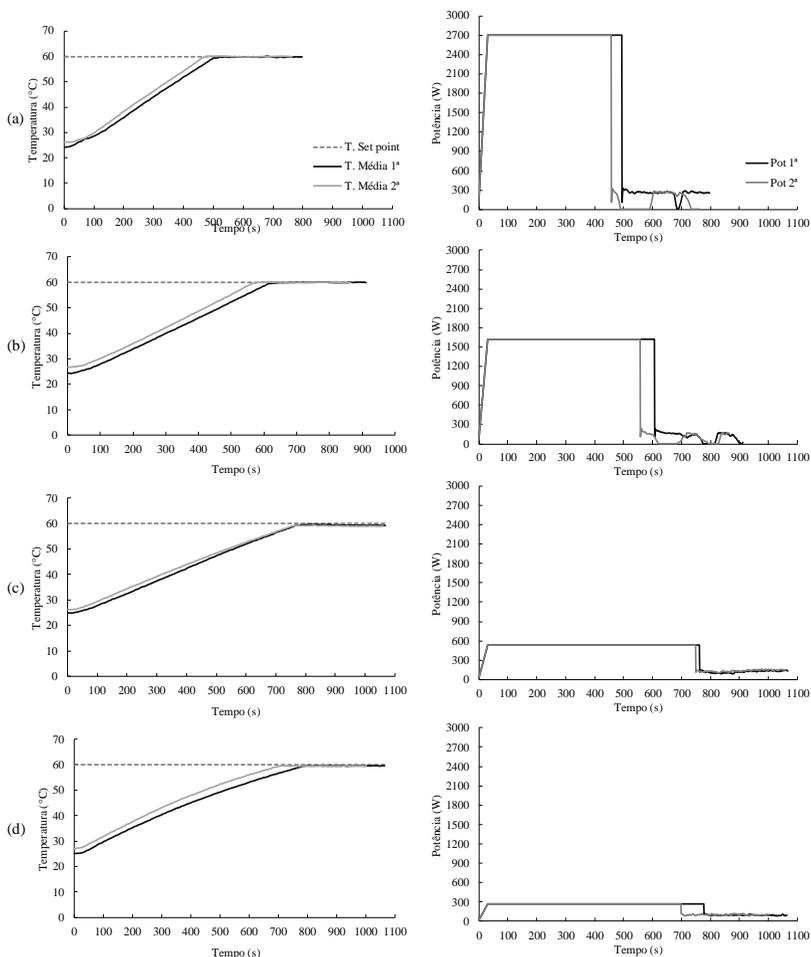
Igualmente, foi possível controlar a temperatura da água utilizando uma rampa de controle de temperatura de 70 °C para 80 °C. A Figura 4.10 apresenta as curvas representativas da evolução temporal da temperatura durante o aquecimento e o controle da temperatura de 70 °C e 80 °C para 5000 g de água, bem como a potência aplicada durante o processo (máxima potência aplicada 2700 W). O controlador apresentou boa reprodutibilidade do processo, controlando ambas as temperaturas (70 °C e 80 °C).

Também foi possível controlar a temperatura da água utilizando a densidade de potência de 0,54 W g<sup>-1</sup> para o controle de temperatura de 70 °C e 80 °C, com diferentes massas de água, como mostrado na Figura 4.11. No entanto, não foi possível atingir a temperatura de 80 °C para amostras de 500 g de água, devido à falta de energia fornecida (potência máxima de 270 W) juntamente com perdas de calor para o ambiente.

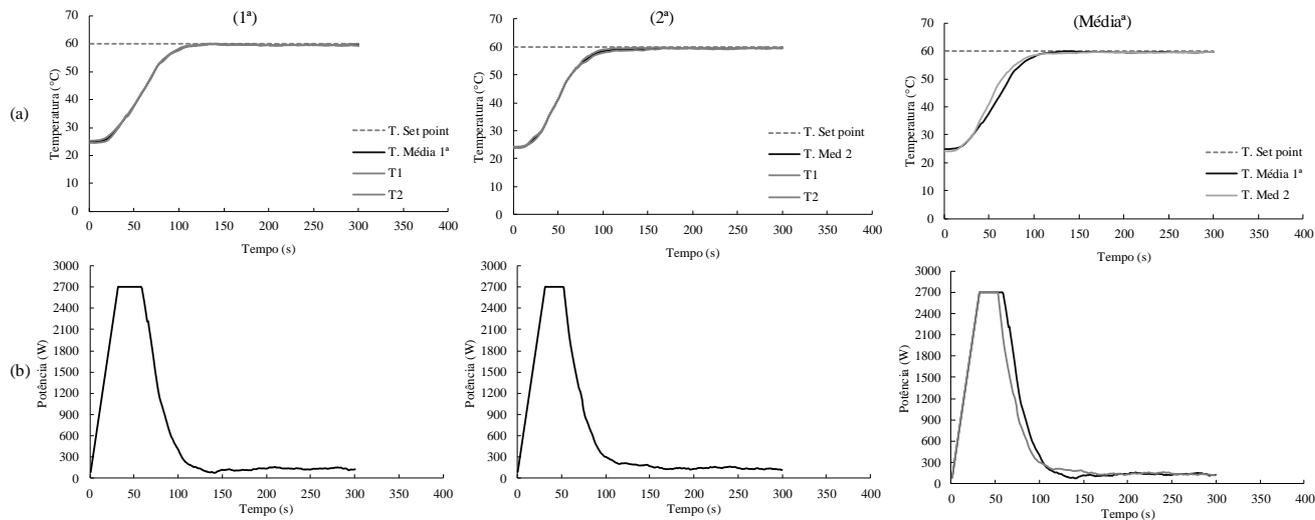
**Figura 4.7 -** a) Evolução temporal da temperatura durante o aquecimento e controle da temperatura (*setpoint* 60 °C ) de 5000 g de água. b) Potência aplicada durante o processo (máxima potência aplicada 2700 W). O processo foi realizado em duplicata (1ª e 2ª coluna).



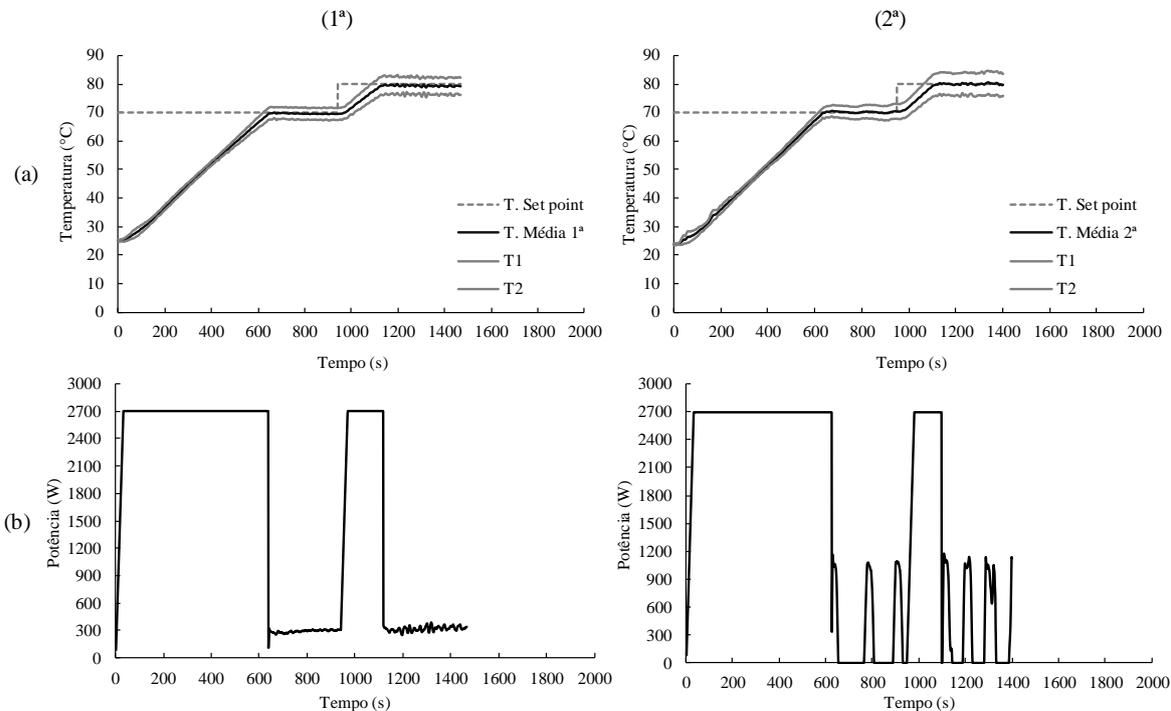
**Figura 4.8** - Evolução temporal da temperatura e da potência durante o aquecimento e controle da temperatura da água (*setpoint* 60 °C). Duplicata de processo (média dos controles). Massa de água: a) 5000 g; b) 3000 g; c) 1000 g; d) 500 g. Foi mantida a densidade de potência máxima nos processos.



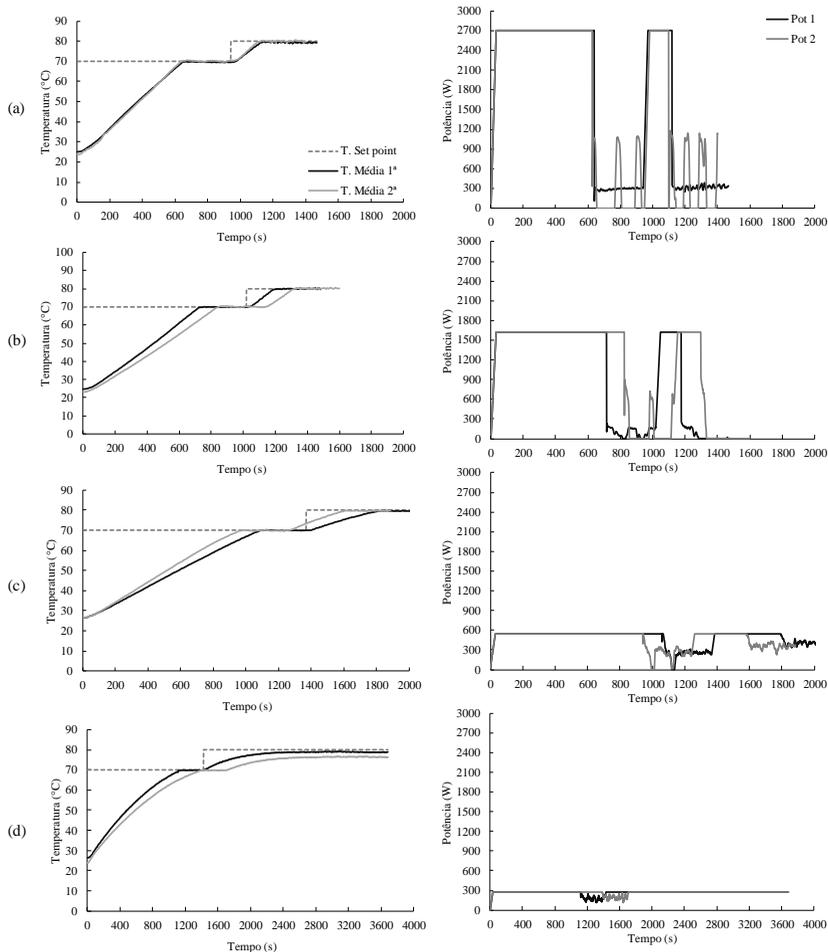
**Figura 4.9** - a) Evolução temporal da temperatura durante o aquecimento e controle da temperatura (*setpoint* 60 °C) de 500 g de água. b) Potência aplicada durante o processo (máxima potência aplicada 2700 W). O processo foi realizado em duplicata (1ª e 2ª coluna). 3ª coluna: duplicata de processo (média dos controles).



**Figura 4.10** - a) Evolução temporal da temperatura durante o aquecimento e controle da temperatura (*setpoint* 70 °C e 80 °C) de 5000 g de água. b) Potência aplicada durante o processo (máxima potência aplicada 2700 W). O processo foi realizado em duplicata (1ª e 2ª coluna).



**Figura 4.11** - Evolução temporal da temperatura e da potência durante o aquecimento e controle da temperatura da água (*setpoint* 70 °C e 80 °C). Duplicata de processo (média dos controles). Massa de água: a) 5000 g; b) 3000 g; c) 1000 g; d) 500 g. A densidade de potência máxima nos processos foi mantida.



A partir destes resultados foi calculada, por calorimetria, a potência absorvida pela água durante a etapa de aquecimento e a eficiência do equipamento de micro-ondas, através da potência nominal emitida pelo equipamento e a potência absorvida pela amostra (Tabela 4.1). A eficiência do sistema variou entre 60% a 40%, dependendo da quantidade de água utilizada no processo. A maior quantidade de água utilizada apresentou maior eficiência, para ambas as temperaturas de controle (60 °C e 70 °C).

**Tabela 4.1** - Potência nominal absorvida ( $P_{abs}$ ) e eficiência do sistema durante o aquecimento por micro-ondas com diferentes quantidades de água.

Massa de água (g)	T (°C)	$P_{em}$ (W)	$P_{abs}$ (W)	Eficiência (%)
5000	60	2700	1609±46	60±2
3000	60	1620	788±14	49±1
1000	60	540	216±3	40±1
500	60	270	120±3	45±1
5000	70	2700	1562±25	58±1
3000	70	1620	775±64	48±4
1000	70	540	211±21	39±4
500	70	270	114±11	42±4

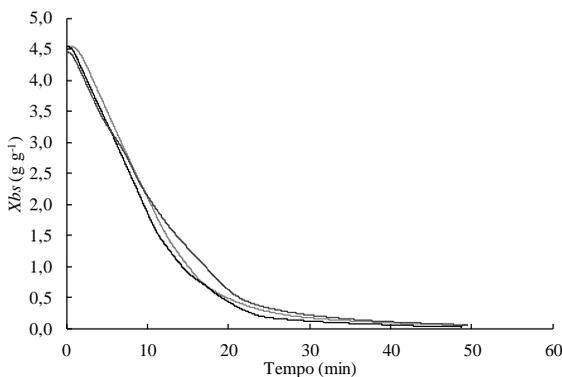
$P_{em}$ : Potência nominal emitida;  $P_{abs}$ : Potência absorvida; T: Temperatura de controle.

#### 4.2.3 Secagem *MWVD* com controle de temperatura e agitador de ondas

As amostras de batata-doce *in natura* utilizadas neste estudo apresentaram umidade inicial média de  $3,314 \text{ g g}^{-1} \pm 0,172 \text{ g g}^{-1}$  (bs) e  $a_w$  de  $0,993 \pm 0,002$  (média  $\pm$  desvio padrão). Após o branqueamento, as amostras apresentaram umidade de  $4,509 \text{ g g}^{-1} \pm 0,129 \text{ g g}^{-1}$  (bs) e  $a_w$  de  $0,995 \pm 0,002$ .

Neste estudo foi avaliada a influência do sistema de controle de temperatura pela manipulação da potência das micro-ondas na secagem das amostras. Na Figura 4.12 são apresentadas as curvas de secagem por *MWVD* com controle de temperatura, utilizando a potência máxima de 1500 W (*MWVDC-1500 W*). A secagem foi realizada em triplicata, resultando em boa reprodutibilidade. As amostras de batata-doce após a secagem *MWVDC-1500 W* apresentaram umidade média de  $0,060 \text{ g g}^{-1} \pm 0,002 \text{ g g}^{-1}$  (bs) e  $a_w$  de  $0,518 \pm 0,018$ .

**Figura 4.12** - Curvas de secagem das amostras de batata-doce durante a secagem por *MWVDC* com controle da temperatura (1500 W), realizada em triplicata.



A evolução temporal da temperatura da amostra e evolução temporal da pressão no sistema, durante a secagem por *MWVDC-1500 W*, bem como a potência aplicada durante a secagem e a evolução temporal da densidade de potência, estão apresentados na Figura 4.13. O controle da temperatura das amostras foi adequado e reprodutivo. O sistema exibiu bom funcionamento, modulando a potência com o passar do tempo e controlando a temperatura em 60 °C. A máxima densidade de potência que o sistema atingiu foi de 6-7 W g<sup>-1</sup>.

As curvas de secagem deste estudo apresentaram três períodos, conforme observado nas Figuras (4.14a,b,c). Segundo Zhang et al. (2006), as secagens por micro-ondas apresentam 3 períodos: I) período de aquecimento e adequação; II) período de taxa constante e III) período de taxa decrescente de secagem.

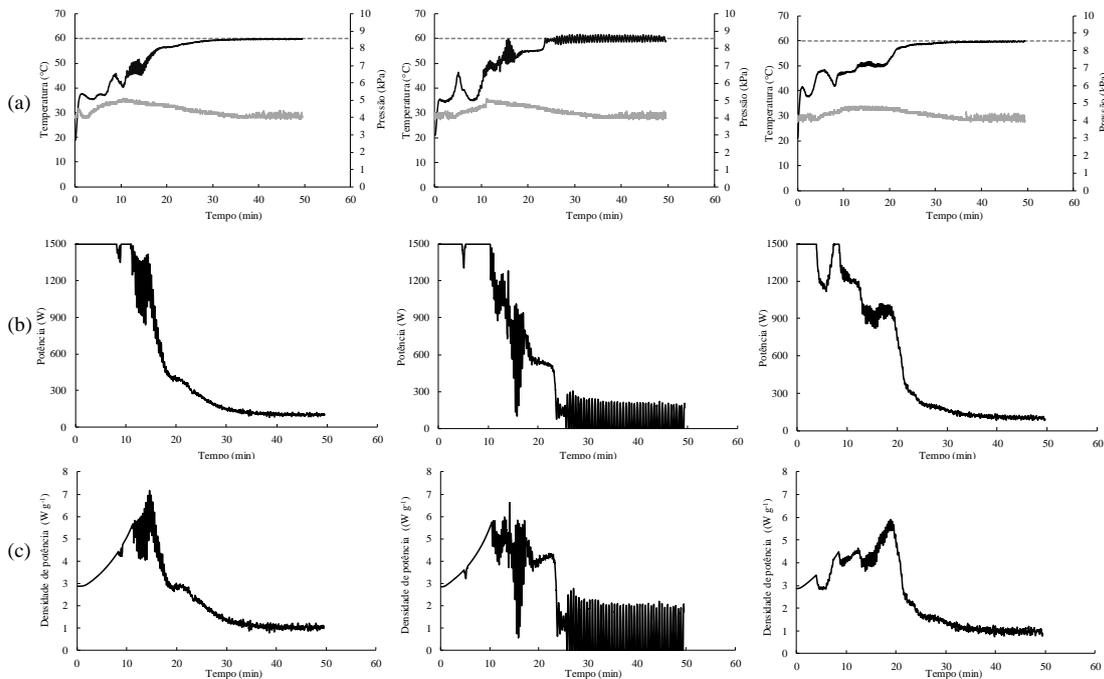
I - Período de aquecimento: conhecido como fase de adequação, a energia de micro-ondas é convertida em energia térmica nos materiais úmidos, aumentando a temperatura do produto com o tempo. Esse período é relativamente curto (100 s), pois o produto atinge rapidamente a temperatura de ebulição na pressão de 4 kPa ( $\approx 30$  °C).

II - Taxa de secagem constante: um perfil estável de temperatura é estabelecido, e a energia das micro-ondas convertida em energia térmica é usada para a vaporização da água livre. No presente estudo, esse período durou até aproximadamente 12 min, com um perfil de temperatura que variou entre 35 °C e 49 °C, sendo próximo da temperatura de ebulição da água na pressão de 4 kPa. Esse período foi representado por uma linha reta, obtido a partir de uma regressão linear, com exigência de coeficiente

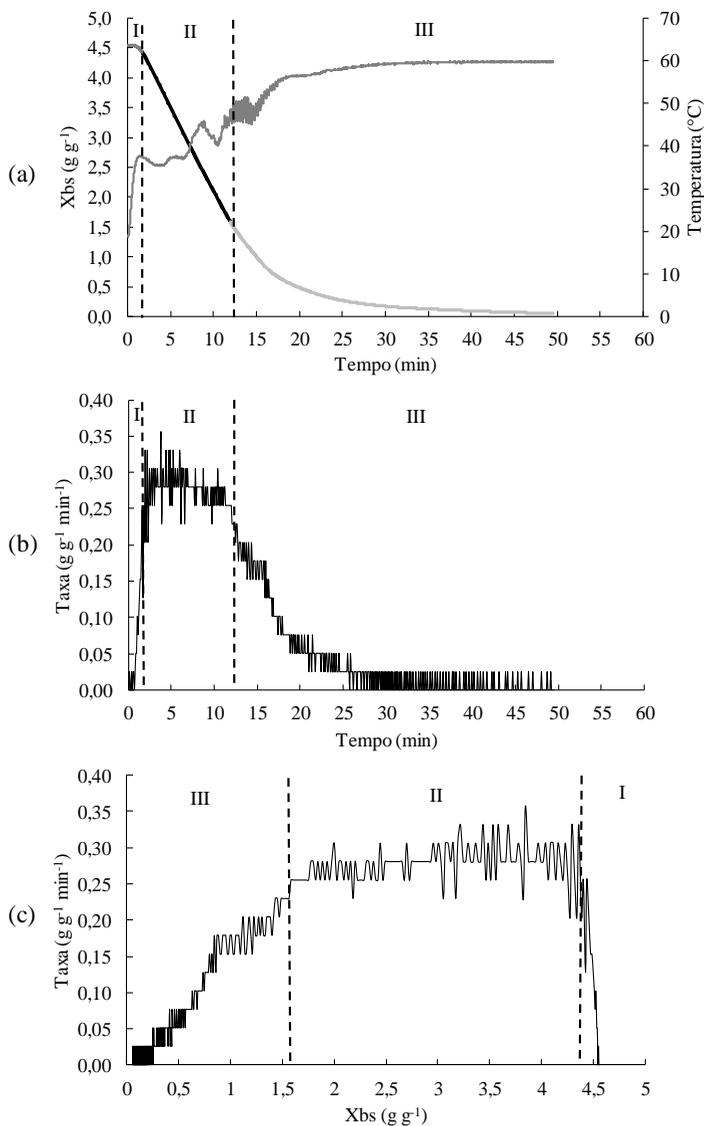
de determinação  $R2 > 0,99$  (Figura 4.14a). A taxa de secagem constante foi de aproximadamente  $0,28 \text{ g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ , e a umidade crítica encontrada no final da fase de taxa constante foi de  $1,58 \text{ g g}^{-1}$  (bs), quando 65% da umidade inicial havia sido evaporada. Nesse período, a potência nominal emitida foi praticamente constante em 1500 W.

III - Taxa de secagem decrescente: o teor de umidade é reduzido 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 do produto eleva-se acima da temperatura de ebulição da água na pressão do interior da câmara. No entanto, a temperatura das amostras não excedeu  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , indicando a boa capacidade de controle do sistema que foi montado, com base na manipulação da potência emitida.

**Figura 4.13** - a) Evoluções da temperatura (—) da amostra e da pressão no sistema (—) durante a secagem por *MWVD*; b) Potência aplicada durante a secagem; c) Evolução temporal da densidade de potência. Cada linha representa as triplicatas.



**Figura 4.14** - Evolução temporal da (a) umidade em base seca, da temperatura (—) e da (b) taxa de secagem em função do tempo; c) Taxa de secagem em função da umidade, com controle de temperatura (1500 W). I - Período de aquecimento; II - Taxa de secagem constante; III - Taxa de secagem decrescente.



A Figura 4.15 apresenta as curvas representativas dos processos de secagem das batatas secadas por *MWVD* sem o controle de temperatura (300 W, 1500 W e 2700 W) e com o controle de temperatura (1500 W). Todos os processos apresentaram um período de aquecimento, um período de secagem à taxa constante e um período à taxa decrescente.

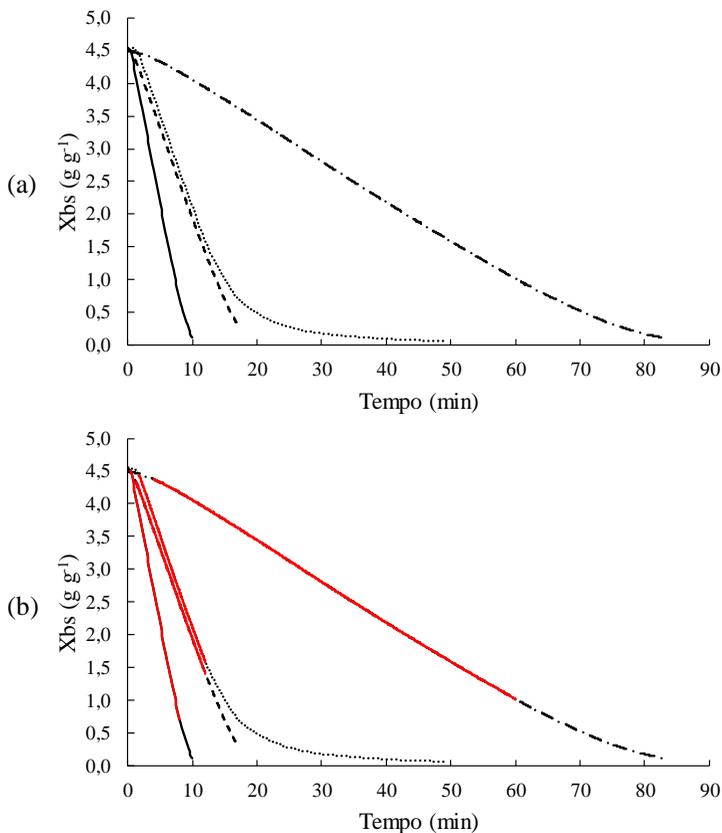
As batatas-doces secas sem controle de temperatura, *MWVDS-300 W*, *MWVDS-1500 W* e *MWVDS-2700 W*, apresentaram umidade média (bs) de  $0,104 \text{ g g}^{-1} \pm 0,033 \text{ g g}^{-1}$ ,  $0,362 \text{ g g}^{-1} \pm 0,076 \text{ g g}^{-1}$  e  $0,116 \text{ g g}^{-1} \pm 0,013 \text{ g g}^{-1}$ , respectivamente. O tempo de secagem foi de 83,33 min (*MWVDS-300 W*), 17,13 min (*MWVDS-1500 W*), 10 min (*MWVDS-2700 W*) e 49,5 min (*MWVDC-1500 W*). Na Figura 4.15b, o período de velocidade de secagem constante é representado por uma linha reta, obtido a partir de regressão linear, com restrição de coeficiente de determinação  $R^2 > 0,99$ . Na Tabela 4.2 são apresentadas as taxas de secagem e os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) encontrados pela linearização dos períodos de taxa constante ilustrados na Figura 4.15b.

**Tabela 4.2** - Taxas de secagem e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os ajustes lineares ao período de taxa constante.

Processo de Secagens	Taxa de secagem ( $\text{g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ )	$R^2$
<i>MWVDS-300 W</i>	-0,06	0,99
<i>MWVDS-1500 W</i>	-0,28	0,99
<i>MWVDS-2700 W</i>	-0,51	0,99
<i>MWVDC-1500 W</i>	-0,28	0,99

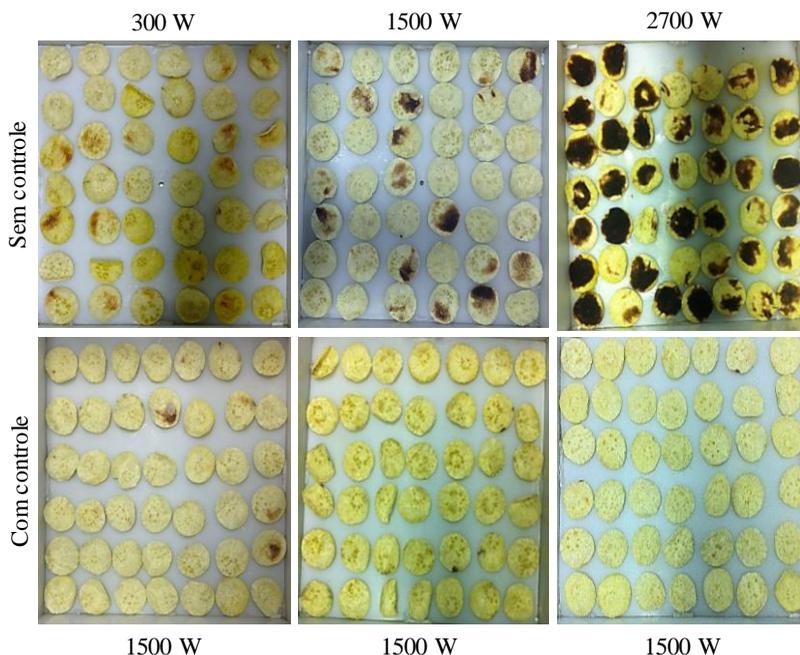
O processo *MWVDS-2700 W* apresentou maior taxa de secagem no período constante, que foi 8,5, 1,8 e 1,8 vezes maior do que as taxas de secagem observadas para as secagens *MWVDS-300 W*, *MWVDS-1500 W* e *MWVDC-1500 W*, respectivamente. As taxas de secagem mais elevadas nos processos *MWVD* são relacionadas às maiores potências aplicadas no processo.

**Figura 4.15** - a) Curvas de secagem de amostras de batata-doce durante os diferentes processos de secagem por *MWVD*. b) Período de secagem à taxa constante para os diferentes processos de secagem está representado por uma linha reta (—). *MWVDS-300 W* (-.-); *MWVDS-1500 W* (---); *MWVDS-2700 W* (—); *MWVDC-1500 W* (···).



Na Figura 4.16 estão apresentadas as imagens das amostras de batata-doce desidratadas pelas diferentes estratégias de secagem por *MWVD*, com e sem controle de temperatura. Ao final de cada processo de secagem foi realizada a classificação das amostras quanto à presença de degradações térmicas, evidenciadas pela formação de zonas escuras (Tabela 4.3).

**Figura 4.16** - Fotografia representativas das batatas secas por *MWVD* sem controle de temperatura (300 W, 1500 W e 2700 W) e com o controle de temperatura (1500 W).



**Tabela 4.3** - Classificação das amostras quanto à presença de amostras queimadas, pontos escuros e não queimadas, após os processos de secagem por *MWVD*.

Processo	Não queimadas (%)	Pontos escuros (%)	Queimadas (%)
<i>MWVDS-300W</i>	70 ± 20	14 ± 7	16 ± 14
<i>MWVDS-1500 W</i>	46 ± 7	24 ± 7	30 ± 7
<i>MWVDS-2700 W</i>	0	5	95
<i>MWVDC-1500 W</i>	95 ± 7	3 ± 3	2 ± 4

Ao analisar a Figura 4.16 e a Tabela 4.3 pode-se observar que a secagem *MWVDC-1500 W*, com controle de temperatura, apresentou amostras com coloração mais uniforme, bem diferentes do observado nos outros processos, sem o controle de temperatura, mesmo quando utilizado baixa potência (300 W).

Li et al. (2006) desenvolveram um microcontrolador para micro-ondas convencional (magnetron *on-off*), baseado no sistema de controle de potência através do *feedback* da temperatura por fibra óptica, termopar e infravermelho. Esses autores estudaram a secagem de cenoura e observaram que a secagem por micro-ondas com controle de temperatura evita que as amostras queimem durante a secagem.

O controle de temperatura realizado na secagem por *MWVDC-1500 W* foi eficiente na grande redução da incidência de regiões escuras nas amostras. Alguns pontos escuros não puderam ser evitados com o controle de temperatura, indicando a presença de alguns *hot spots* na cavidade de secagem. Além disso, o *feedback* de temperatura foi realizado somente a partir de uma fibra óptica, reduzindo a representatividade da temperatura do conjunto das amostras. Apesar disso, os ganhos de uniformidade de umidade final e de cor que resultaram do uso do sistema de controle durante a secagem de fatias de batatas-doces por micro-ondas sob vácuo (*MWVDC-1500 W*) foram significativos.

#### 4.3 CONCLUSÃO

O agitador de ondas melhora a distribuição das ondas eletromagnéticas no interior da cavidade, diminuindo a intensidade de *hot spots* nas amostras. O controle de temperatura pela manipulação da potência, utilizando como *feedback* da temperatura um sensor de fibra óptica, é eficiente no controle da temperatura de amostras líquidas (água). Além disso, o controle de temperatura para amostras sólidas (fatias de batata-doce) melhora significativamente a homogeneidade e a qualidade do produto final, quando se compara com produtos secados com o processo sem o uso do controle de temperatura pela manipulação da potência.

No entanto, o controle de temperatura em sistemas estáticos (sem movimentação das amostras de batata-doce) não evitou totalmente a degradação térmica das amostras. Uma alternativa para solucionar esse problema é a realização da secagem das amostras em tambor rotativo. Para isso, deve-se usar um sensor de temperatura de infravermelho para medir a temperatura média das amostras que são movimentadas no interior do tambor. Essa alternativa é discutida no Capítulo 5.



## 5 DESIDRATAÇÃO DE BATATA-DOCE EM SECADOR DE TAMBOR ROTATIVO, AQUECIDO POR MICRO-ONDAS SOB VÁCUO, COM CONTROLE DA TEMPERATURA PELA MANIPULAÇÃO DA POTÊNCIA

---

Neste estudo investigou-se a secagem de batatas-doces em secador piloto de micro-ondas a vácuo com sistema rotativo e controle da temperatura pela manipulação da potência. Foi realizada a comparação entre diferentes processos de secagem (secagem convectiva, liofilização e secagem condutiva por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo *conductive multiflash drying*, *KMFD*) e entre os produtos desidratados resultantes.

### 5.1 MATERIAL E MÉTODOS

Nesse estudo utilizou-se um secador de micro-ondas piloto, com tambor rotativo, operando sob vácuo. As amostras de batata-doce foram somente descascadas e fatiadas aproveitando totalmente a matéria-prima, simulando uma produção em escala industrial. As batatas-doces selecionadas apresentaram um comprimento de  $186,7 \text{ mm} \pm 35,0 \text{ mm}$  e diâmetros de  $D_1 = 47,4 \text{ mm} \pm 7,8 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 50,6 \text{ mm} \pm 7,0 \text{ mm}$  e  $D_3 = 46,7 \text{ mm} \pm 6,2 \text{ mm}$ . As batatas-doces foram lavadas, descascadas manualmente e cortadas em fatias de aproximadamente  $4,1 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$  de espessura, usando um mandolin profissional (Progressive, Modelo - PL8®, Estados Unidos). O diâmetro médio das fatias de batata-doce foi de  $45,9 \text{ mm} \pm 7,4 \text{ mm}$ . Após o corte, as fatias foram branqueadas ( $97 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C} - 5 \text{ min}$ ) e resfriadas ( $6 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C} - 3 \text{ min}$ ) em água destilada com uma razão amostra/água de 1:13,5 (g:mL). Após o branqueamento as amostras foram colocadas em contato por 1 min com papel filtro, para absorção do excesso de água.

As amostras foram secadas por diferentes métodos: liofilização, (*FD*), secagem convectiva (*AD*), secagem condutiva por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo - *conductive multi-flash drying* (*KMFD*) e secagem por micro-ondas a vácuo com tambor rotativo (*MWVD*). Todos os experimentos de secagem foram realizados em triplicata e as amostras desidratadas pelos diferentes processos foram caracterizadas conforme as metodologias descritas no Capítulo 3, item 3.1.3.

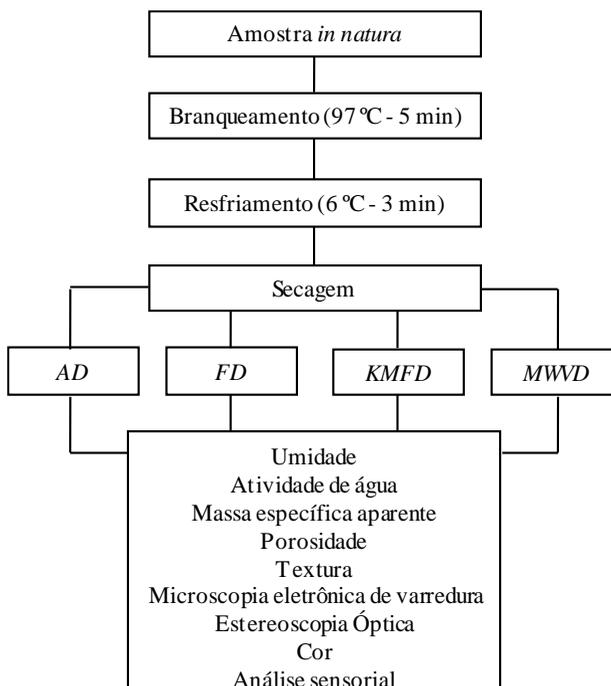
Com o objetivo de observar a estrutura resultante do processo combinado de branqueamento e secagem, foram obtidas imagens das amostras secas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Essas

microscopias foram realizadas no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME-UFSC). Para as imagens de MEV (JEOL, modelo - JSM 6390LV, Japão), as amostras desidratadas foram recobertas com ouro utilizando um metalizador (LEICA, Modelo - EM SCD500, Alemanha). Imagens da amostra fraturada manualmente foram capturadas com ampliação de 40 e 100 vezes.

As amostras de batatas-doces desidratadas pelos diferentes processos de secagem (*FD*, *AD*, *KMFD* e *MWVD*) foram avaliadas sensorialmente quanto à aceitação, intenção de compra e preferência das amostras.

Na Figura 5.1 está representado o esquema do procedimento experimental utilizado neste estudo.

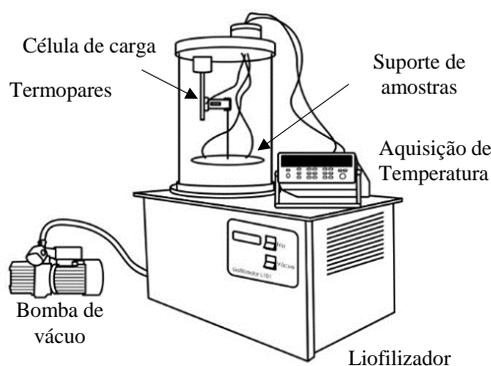
**Figura 5.1** - Procedimento experimental.



### 5.1.1 Liofilização (FD)

A secagem das amostras por liofilização foi realizada utilizando um liofilizador laboratorial (Liotop, Modelo - L101, Brasil), adaptado para registrar a variação temporal da massa usando uma célula de carga do tipo *single point* (Alfa Instrumentos, Modelo - GL, Brasil) com capacidade de 2 kg e exatidão de 0,1 g, sustentada por um suporte metálico inserido na câmara de vácuo (Figura 5.2). A célula de carga foi ligada a um sistema de aquisição de dados conectado a um computador por uma interface eletrônica (Alfa Instrumentos, Modelo - 3102, Brasil). O sistema de condensação do liofilizador mantém a temperatura na superfície do condensador a  $-60 \pm 1$  °C e o vácuo é produzido por uma bomba de vácuo (D.V.P, Vacuum Technology, Modelo - RC.8D, Itália), que atinge a pressão final de  $0,02 \pm 0,005$  kPa. Os detalhes completos sobre a adaptação do liofilizador podem ser encontrados em Tribuzi e Laurindo (2014). Para a realização dos experimentos, aproximadamente 70 g de amostras foram congeladas por 3 h à temperatura de  $-60 \pm 1$  °C e imediatamente desidratadas até massa constante.

**Figura 5.2** - Liofilizador de laboratório adaptado para determinação on-line da curva de desidratação.

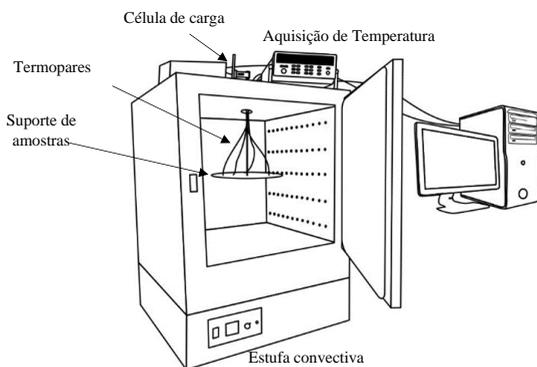


### 5.1.2 Secagem convectiva (AD)

A secagem convectiva das amostras foi realizada em estufa com circulação forçada de ar (TECNAL, Modelo - TE 394/2, Brasil) à temperatura de 60 °C, umidade relativa de aproximadamente 33%, medida por um termohigrômetro (TESTO, Modelo - Testo 610,

Alemanha) e velocidade do ar de secagem de  $0,4 \text{ m.s}^{-1}$  (anemômetro portátil, Modelo – Testo 425, Alemanha). A variação temporal da massa foi registrada com o mesmo sistema usado na liofilização, adaptado à estufa convectiva. Foram utilizados aproximadamente 130 g de amostra para cada experimento. A temperatura das amostras foi monitorada com termopares do tipo T (Iope, Modelo A-TX-TF-TF-R30AWG, Brasil), inseridas em três amostras. Um sistema de aquisição de dados (Agilent Technologies, Modelo – 34970A, Estados Unidos) foi usado para adquirir e registrar essas informações. O dispositivo experimental da estufa convectiva está representado esquematicamente na Figura 5.3.

**Figura 5.3** - Dispositivo experimental da estufa convectiva.



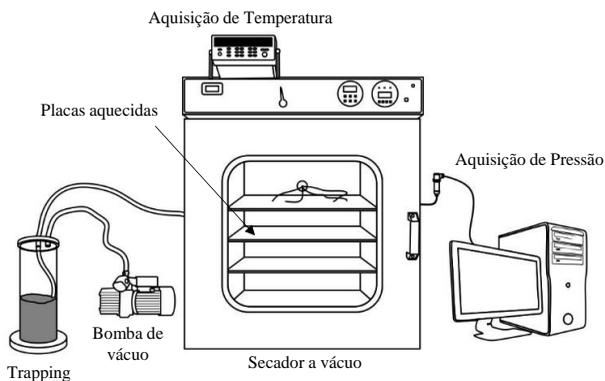
### 5.1.3 Secagem condutiva por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (*Conductive multi-flash drying - KMFD*)

O processo de secagem das amostras por *KMFD* foi realizado em uma câmara de secagem de 100 L (Ethik Technology, Modelo - 440-DE, Brasil) conectada a uma bomba de vácuo (D.V.P, Vacuum Technology, Modelo - LC.305, Itália) (Figura 5.4) (PORCIUNCULA et al., 2016; LINK, 2016). No interior da câmara de secagem, as amostras foram colocadas sobre placas aquecidas por resistências elétricas, com temperatura mantida próxima de  $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  por um controlador *PID*. Durante os experimentos de secagem, a pressão do sistema foi monitorada com um manômetro digital (Velki, Modelo - VKP-062, Brasil), enquanto, as temperaturas das amostras foram monitoradas com termopares, do tipo T (Iope, Modelo A-TX-TF-TF-R30AWG, Brasil), inseridos em cinco amostras, em diferentes posições do secador. Os termopares foram

hermeticamente conectados à estufa a vácuo por um flange (General Eletric, Modelo - Kaye feed thru, - Estados Unidos). Um sistema de aquisição de dados (Agilent Technologies, Modelo – 34970A, Estados Unidos) foi usado para adquirir e registrar essas informações.

Aproximadamente 450 g de amostras de batata-doce foram usadas em cada experimento de secagem. Para evitar a adesão das amostras sobre as placas metálicas aquecidas, estas foram recobertas com filmes de poliéster (Mylar®), que possuem baixa energia de superfície. O processo de secagem foi iniciado por três ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. Para isso, as amostras foram aquecidas até 60 °C à pressão atmosférica, seguido da aplicação de um pulso de vácuo ( $P \approx 2$  kPa - 3 kPa), com duração de 5 min. Em seguida, a pressão atmosférica foi reestabelecida na câmara e um novo ciclo de aquecimento-pulso de vácuo foi aplicado. Após o terceiro ciclo de aquecimento-pulso de vácuo, as amostras foram aquecidas novamente até 60 °C e secas sob vácuo ( $P \approx 2$  kPa) durante aproximadamente 179 min. O teor de umidade das amostras submetidas ao processo *KMFD* foi determinado após cada ciclo de aquecimento-pulso de vácuo, e a cada 30 min durante o período de secagem sob vácuo.

**Figura 5.4** - Dispositivo experimental do *KMFD*.

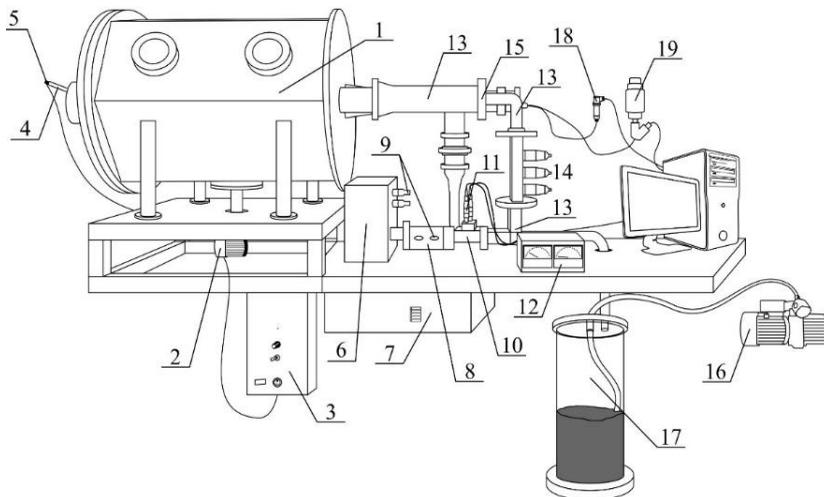


#### 5.1.4 Secagem por micro-ondas a vácuo com tambor rotativo (*MWVD*)

A secagem por micro-ondas a vácuo das amostras foi realizada em um secador micro-ondas a vácuo, conforme a metodologia descrita no Capítulo 4, item 4.1.1, com algumas adaptações (Figura 5.5). O secador de micro-ondas foi adaptado com um tambor rotativo de polipropileno

(Figura 5.6) para melhorar a homogeneidade da absorção das micro-ondas pelo material submetido à secagem. O maior volume do secador (escala piloto) permite a secagem de uma maior quantidade do material.

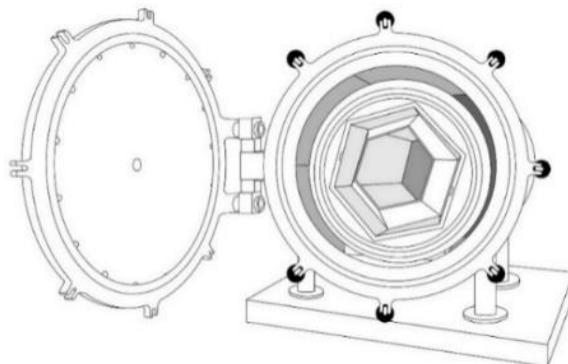
**Figura 5.5** - Dispositivo experimental do secador semi-industrial de micro-ondas a vácuo.



(1) Cavidade prismática hexagonal al; (2) Motor do tambor rotativo; (3) Acionamento e controle de velocidade do tambor rotativo; (4) Guia de onda; (5) Termômetro de infravermelho; (6) Gerador de micro-ondas; (7) Fonte de alta tensão; (8) Circulador de 3 portas e *Short Dummy Load*; (9) Conexão para água refrigerada; (10) Acoplamento direcional duplo; (11) Detectores de onda emitida e refletida; (12) Monitor visual duplo de potência emitida e refletida; (13) Guia de Onda; (14) 3-Sintonizadores de precisão; (15) Janela de quartzo; (16) Bomba de vácuo; (17) *Trapping*; (18) Transdutor de pressão; (19) Válvula de controle de pressão.

O tambor, onde as amostras foram colocadas, foi revestido com um tecido de fibra de vidro revestido com PTFE Teflon®, que apresenta adesivo em uma das faces (Lençol Indaco® Armalon® Standard Adesivado, Modelo- 253U, Brasil). A rotação do tambor é realizada por um motor e um conjunto de engrenagens cônicas de dentes retos de polipropileno, que permitem controlar a velocidade de rotação.

**Figura 5.6** - Secador piloto de tambor rotativo, operando com micro-ondas, sob vácuo.



Aproximadamente 2000 g de amostras foram inseridas no interior do tambor rotativo em cada experimento de secagem. A temperatura das amostras durante a secagem por *MWVD* foi controlada pela manipulação da potência das micro-ondas, utilizando termômetro de infravermelho (Contemp, Modelo - CT-SF15-C3, Brasil) conectado ao computador. O sensor de infravermelho permite informar o valor da emissividade do material que terá sua temperatura medida. Ajustou-se o valor de emissividade igual a 1 (corpo negro), que representa um valor conservativo para o período inicial de secagem.

Para evitar danos ao sensor de infravermelho pelas ondas eletromagnéticas, este foi inserido no interior de um guia de onda circular, que atenua a maior parte das micro-ondas na seção em que o sensor foi posicionado. O comprimento do tubo (guia de onda) foi calculado a partir do diâmetro da tubulação, como descrito por Monteiro et al. (2015).

A temperatura de controle de secagem foi 60 °C, para a pressão absoluta da câmara de secagem igual a aproximadamente 4 kPa (vácuo). A velocidade de rotação do tambor foi ajustada em 2-3 rotações por minuto (rpm). As cinéticas de secagem foram realizadas pesando o conjunto (tambor rotativo e amostras) em intervalos de 20 min, até massa constante, utilizando uma balança com capacidade de 60 kg e precisão de 1 g (KNWAAGEN, Modelo - KNCD60/1, BRASIL).

Na secagem por *MWVD* foi utilizado o controle *PID* desde o início da secagem, e a máxima potência utilizada durante a secagem foi de 1700 W. Entretanto, duas estratégias de controle foram adotadas:

### MWVD com controle instantâneo (MWVD)

Durante a secagem MWVD a temperatura medida pelo termômetro de infravermelho foi enviada instantaneamente para o controle.

### MWVD com controle ajustado (MWVD-AJ)

Durante a secagem MWVD-AJ, a taxa de aquisição da temperatura pelo termômetro de infravermelho foi de uma medida por segundo. O valor da temperatura enviado ao sistema de controle foi o maior entre as últimas 10 medições. A cada nova medida, eliminava-se a temperatura mais antiga, avaliando-se o novo maior valor, entre os remanescentes, para ser enviado ao controlador. Esta estratégia serve para compensar a redução da massa da amostra durante a secagem, que expõe maiores áreas de polipropileno, que aquece pouco durante o processo. Como a temperatura da amostra é sempre maior do que a temperatura do polipropileno (baixas propriedades dielétricas), o modo como a temperatura é medida e enviada ao sistema de controle é de extrema importância para garantir o seu controle pela manipulação da potência.

#### 5.1.5 Análises sensoriais

Para a realização das análises sensoriais, esta pesquisa foi submetida ao comitê de ética em pesquisa da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e está de acordo com a Resolução Nº 466, de 12 de dezembro de 2012 e suas complementares, sob protocolo 51164015.9.0000.0121. Foram recrutados, no campus da UFSC, 55 voluntários não treinados. Antes de iniciar as análises sensoriais, todos os participantes assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (Anexo A).

As batatas-doces desidratadas pelos diferentes processos de secagem (*AD*, *FD*, *KMFD* e *MWVD-AJ*) foram submetidas aos testes de aceitação, preferência e intenção de compra. As amostras foram servidas simultaneamente em copos plásticos descartáveis e brancos, codificados com três dígitos aleatórios, contendo uma fatia do produto sob teste. Foi solicitado aos avaliadores que provassem as amostras da esquerda para direita, obedecendo a ordem de apresentação.

A avaliação da aceitação foi realizada utilizando escala hedônica estruturada de 9 pontos, variando de “desgostei muitíssimo” (nota 1) a “gostei muitíssimo” (nota 9). A aceitação foi avaliada em relação aos atributos: aparência, cor, sabor, textura e impressão global.

A avaliação da preferência foi realizada a partir do teste de ordenação, solicitando aos provadores que ordenassem as amostras em ordem crescente de acordo com sua preferência.

Para a intenção de compra, utilizou-se a escala estruturada de 5 pontos, variando de “certamente eu não compraria” (nota 1) a “certamente eu compraria” (nota 5). As fichas da análise sensorial de aceitação, de intenção de compra e de preferência estão no Anexo B.

#### 5.1.6 **Análise estatística**

Os dados obtidos nos testes de aceitação e intenção de compra foram analisados estatisticamente com o programa *Statistica 7.0* (StatSoft, Tulsa, Estados Unidos), por análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Os resultados obtidos no teste de ordenação-preferência foram avaliados pelo teste de Friedman para verificar se existe diferença significativa na preferência. Em caso de diferença, foi realizado o teste de Christensen para comparar as amostras. Para tanto, foi determinada a diferença crítica significativa entre os totais de ordenação, ao nível de 5% de probabilidade, segundo tabela de Christensen et al. (2006) (Anexo C).

Para ilustrar as relações entre as amostras secas pelos diferentes métodos de secagem (*AD*, *FD*, *KMFD* e *MWVD-AJ*) e as variáveis avaliadas pela caracterização das amostras desidratadas (área abaixo da curva de força *versus* deformação, número de picos de força, força máxima, *SPL*<sub>10</sub>, *SPL*<sub>máx</sub>, número de picos acústicos,  $\epsilon$ ,  $\rho_{ap}$  e análise sensorial: aparência, cor, sabor, textura, impressão global e intenção de compra) foi utilizada a técnica da análise das componentes principais (PCA). Para a realização dessa análise estatística foi utilizado o programa XLSTAT (versão gratuita 2018), formando uma matriz 14 x 14 (4 amostras e 14 variáveis), utilizando a média dos valores das variáveis.

## 5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.2.1 Curvas experimentais de secagem

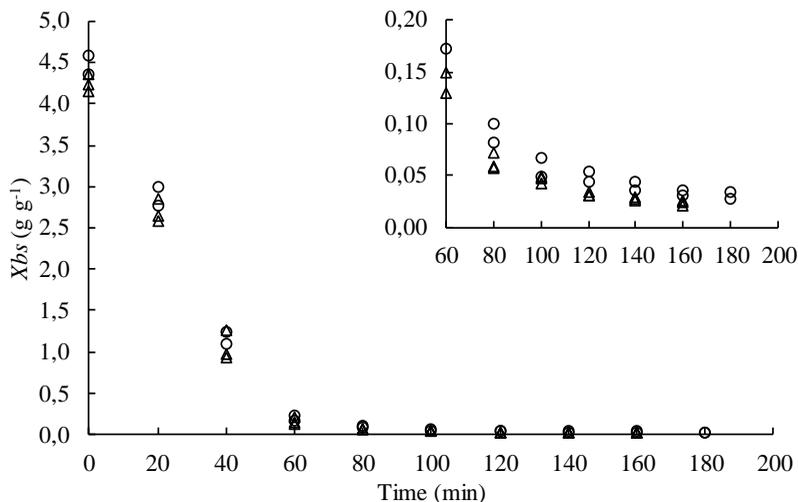
As batatas-doces *in natura* foram caracterizadas antes de cada processo de secagem, quanto à umidade média ( $X_{bs}$ , base seca). Para todos os experimentos, a umidade a batata-doce *in natura* variou entre  $3,2 \text{ g g}^{-1}$  (bs) e  $3,4 \text{ g g}^{-1}$  (bs).

Nesse estudo foi avaliada a secagem de batata-doce em secador piloto de micro-ondas a vácuo com sistema rotativo, com controle da temperatura pela manipulação da potência. Na Figura 5.7 são apresentadas as curvas de secagem relativas à secagem por *MWVD* e por *MWVD-AJ*. A secagem por *MWVD* foi realizada em triplicata, enquanto a secagem por *MWVD-AJ* foi realizada em duplicata. Ambos os processos resultaram em curvas de secagem reprodutivas e similares. As amostras secas pela secagem *MWVD* apresentaram umidade em base seca e atividade de água de  $0,025 \text{ g g}^{-1}$  e  $0,322$ , respectivamente, enquanto, para o *MWVD-AJ*, esses valores foram  $0,028 \text{ g g}^{-1}$  e  $0,353$ , respectivamente.

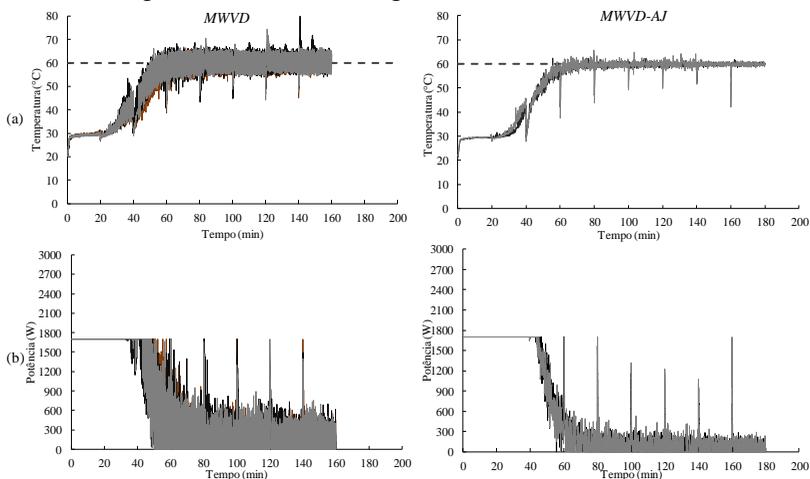
A evolução temporal da temperatura das amostras, durante as secagens por *MWVD* e *MWVD-AJ*, para o controle de temperatura em  $60^\circ\text{C}$ , assim como a potência aplicada durante a secagem, estão expressos na Figura 5.8. As quedas de temperatura e os aumentos da potência verificados a cada 20 min foram devidos ao período em que o sistema foi desligado para retirada do tambor para pesagem (obtenção das curvas de secagem). O sistema de controle de temperatura funcionou adequadamente, modulando a potência para controlar a temperatura em  $60^\circ\text{C}$ . No entanto, a secagem *MWVD-AJ* apresentou maior estabilidade do processo, resultando em menores oscilações de temperatura e da potência emitida, não excedendo  $60^\circ\text{C}$ . Na secagem *MWVD*, as temperaturas das amostras foram controladas em  $60^\circ\text{C}$ , mas as amostras foram submetidas a temperaturas próximas a  $70^\circ\text{C}$ . Dessa forma, as amostras *MWVD* necessitaram de 20 min a menos de secagem para atingirem o mesmo teor de umidade e atividade de água das amostras *MWVD-AJ*.

Nesses dois processos também foi possível observar os três períodos de secagem (período de aquecimento, período de taxa constante e período de taxa decrescente) (ZHANG et al., 2006).

**Figura 5.7** - Evolução temporal da umidade em base seca das amostras durante as secagens *MWVD* ( $\Delta$ ) e *MWVD-AJ* ( $\circ$ ). Os processos foram realizados em triplicata para o processo *MWVD* e duplicata para o processo *MWVD-AJ*. As curvas de secagem foram ampliadas para uma melhor visualização do final dos processos.



**Figura 5.8** - a) Evolução temporal da temperatura da amostra, durante as secagens *MWVD* e *MWVD-AJ*, para o controle de temperatura em  $60^{\circ}C$ ; b) Potência aplicada durante a secagem.



Pode-se observar uma maior estabilidade do processo e do controle, quando utilizado o termômetro de infravermelho do que o termômetro de fibra óptica (Capítulo 4). Isso fica evidente através da Figuras 5.8a, que mostra a temperatura das amostras no estudo descrito neste capítulo. A amostra foi aquecida até temperatura de ebulição de 29 °C para pressão de 4 kPa (período de aquecimento), atingindo uma temperatura estável (29°C), que permaneceu neste valor por aproximadamente 40 min (período de taxa constante). Após esse período, o teor de umidade foi reduzido lentamente e a temperatura local foi elevada acima da temperatura de ebulição da água (período de taxa decrescente). O sistema de controle de temperatura manipulou a potência com eficácia, evitando que as amostras atingissem temperaturas maiores que 60 °C.

Por outro lado, na Figura 4.13a do Capítulo 4, fica evidente que ocorreram maiores variações de temperatura durante o período de taxa constante (35 °C a 49 °C). Isso se explica pela medição da temperatura da amostra com um sensor de contato (sensor de fibra ótica), que mediu a temperatura pontual e interna de somente uma das amostras. Essa medida pode ocorrer em uma microrregião com maior densidade de campo (formando *hot spots*) ou com menor densidade de campo (formando *coldspot*). No experimento com o tambor rotativo, o termômetro de infravermelho determina a temperatura superficial média das amostras, reduzindo o problema de amostragem espacial de temperatura.

A Tabela 5.1 mostra o teor médio de umidade ( $X_{bs}$ ) das batatas-doces *in natura*, branqueadas e desidratadas utilizadas nos diferentes processos de secagem (*MWVD*, *MWVD-AJ*, *KMFD*, *FD* e *AD*), bem como, a atividade de água ( $a_w$  final) das amostras secas e tempo final de secagem ( $t_f$ ).

**Tabela 5.1** - Teor de umidade inicial ( $X_{bs}$ ) das batatas-doces *in natura*, após o branqueamento e após serem desidratadas pelos diferentes processos de secagem. Atividade de água ( $a_w$  final) das amostras secas e tempo final de secagem ( $t_f$ ).

Processo	$X_{bs}$ <i>innatura</i> (g g <sup>-1</sup> )	$X_{bs}$ branqueada (g g <sup>-1</sup> )	$X_{bs}$ final (g g <sup>-1</sup> )	$a_w$ final	$t_f$ (min)
<i>MWVD</i>	3,166 ± 0,351	4,117 ± 0,401	0,025 ± 0,002	0,322 ± 0,026	160
<i>MWVD-AJ</i>	3,325 ± 0,376	4,386 ± 0,425	0,028 ± 0,001	0,353 ± 0,003	180
<i>KMFD</i>	3,299 ± 0,200	4,306 ± 0,338	0,036 ± 0,011	0,407 ± 0,023	179
<i>FD</i>	3,239 ± 0,006	4,278 ± 0,192	0,027 ± 0,005	0,131 ± 0,026	720
<i>AD</i>	3,441 ± 0,322	4,419 ± 0,306	0,023 ± 0,006	0,432 ± 0,033	720

As batatas-doces secas mostraram  $X_{bs \text{ final}}$  (bs) inferior a  $0,036 \text{ g g}^{-1} \pm 0,011 \text{ g g}^{-1}$  e  $a_w \text{ final}$  inferior a  $0,407 \pm 0,023$ . As diferenças entre os tempos de secagem são um parâmetro de comparação entre diferentes processos. A comparação entre os processos estudados indica que os processos *MWVD*, *MWVD-AJ* e *KMFD* apresentaram tempos de secagem 4 vezes menores que os tempos observados para os processos *AD* e *FD*.

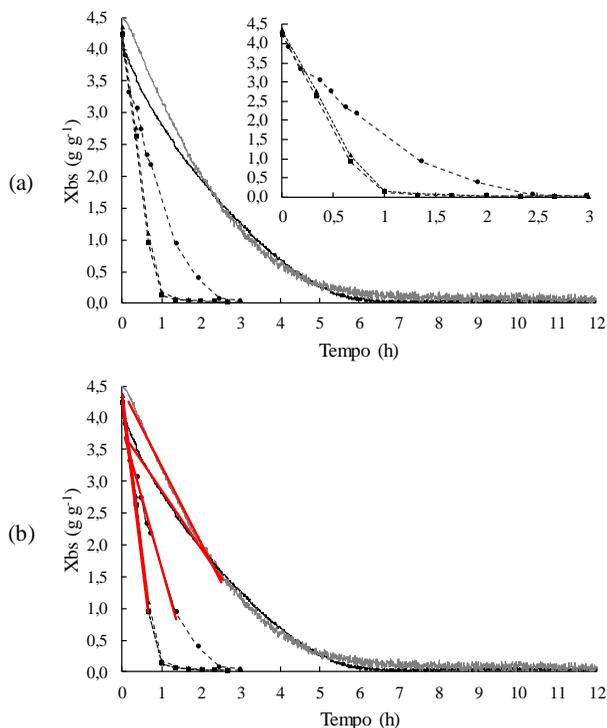
Na Figura 5.9a são apresentadas curvas representativas das secagens para as amostras de batata-doce desidratadas pelos diferentes métodos. As triplicatas dos processos indicaram boa reprodutibilidade. As taxas de secagem referentes ao período de taxa constante nos diferentes processos foram calculadas. Na Figura 5.9b o período de taxa de secagem constante é representado por uma linha reta, obtido a partir de uma regressão linear e estimado com base no coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Os processos de secagem usando micro-ondas sob vácuo mostraram valores de taxas de secagem 5 vezes maiores do que os processos *FD* e *AD*, no período à taxa constante. Os processos *MWVD* e *MWVD-AJ* apresentaram praticamente a mesma taxa de secagem neste período, explicada pela emissão de uma potência de 1700 W, em ambos os casos.

Os processos *KMFD*, *MWVD-AJ* e *MWVD* mostraram tempos de secagem à taxa constante de aproximadamente 1,04 h, 0,58 h e 0,55 h, respectivamente. As umidades críticas encontradas no final da fase de taxa constante foram de aproximadamente  $1,54 \text{ g g}^{-1}$  (bs), com evaporação de 64% - 66% da umidade inicial.

A Tabela 5.2 apresenta a taxa de secagem e os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) encontrados pela linearização dos períodos de taxa constante ilustrados na Figura 5.9b. Todos os processos apresentaram um período de aquecimento ou adaptação, um período de secagem à taxa constante e um período à taxa decrescente. Os processos *MWVD* e *MWVD-AJ* apresentaram maiores taxas constantes de secagem, que foram de 2,2; 4,1 e 5,4 vezes maior do que as observadas para as secagens *KMFD*, *AD* e *FD*, respectivamente.

As taxas de secagem mais elevadas nos processos *MWVD* e *MWMD-AJ* são relacionadas a dois fatores: i) ao aquecimento por micro-ondas, que causa o aquecimento volumétrico e seletivo dos materiais e, ii) à baixa pressão, com formação e expansão de vapores no interior do produto, gerando um gradiente interno de pressão entre o interior e a superfície do sólido, que força a saída da água e aumenta as taxas de secagem (ZHANG et al., 2006).

**Figura 5.9** - a) Evolução temporal da umidade das amostras de batata-doce durante os diferentes processos de secagem. b) Período de secagem à taxa constante está representado por uma linha reta (—). *MWVD* (■); *MWVD-AJ* (▲); *KMFD* (●); *FD* (—); *AD* (—). As linhas pontilhadas ligando os pontos foram usadas para facilitar a comparação dos processos. As curvas de secagem foram ampliadas para uma melhor visualização do início dos processos *KMFD*, *MWVD* e *MWVD-AJ*.



**Tabela 5.2** - Taxa de secagem e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), para os ajustes lineares ao período de taxa constante.

Processo de Secagens	Taxa de secagem ( $g\ g^{-1}\ min^{-1}$ )	$R^2$
<i>MWVD</i>	-4,95	0,99
<i>MWVD-AJ</i>	-4,89	0,99
<i>KMFD</i>	-2,21	0,98
<i>FD</i>	-0,92	0,99
<i>AD</i>	-1,22	0,99

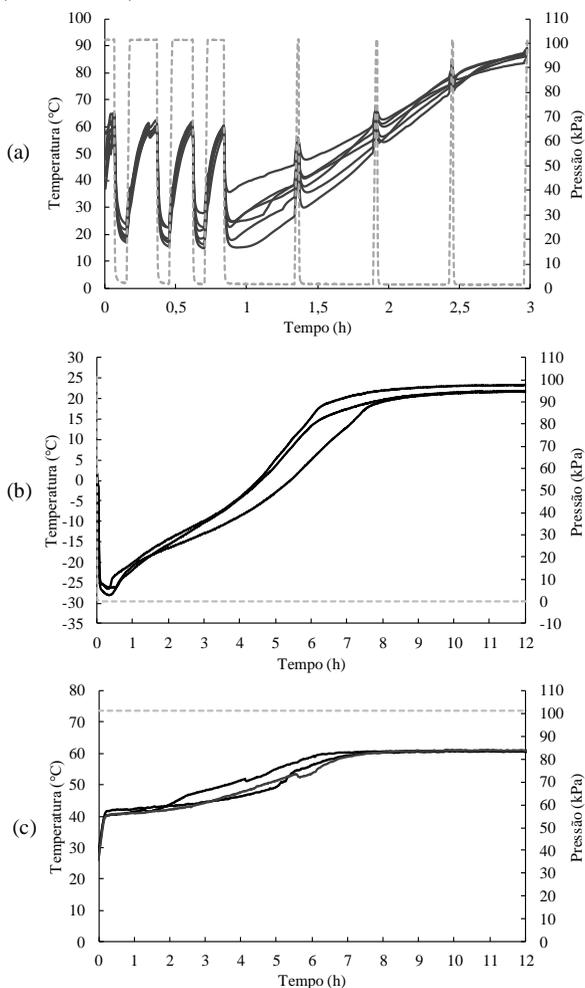
Os três ciclos de aquecimento-pulso de vácuo no processo *KMFD* foram responsáveis por remover aproximadamente 50 % da umidade inicial da batata-doce em cerca de 43 min. O mesmo comportamento também foi observado por Link et al. (2018), na secagem por *KMFD* de mangas. A rápida evaporação da água durante a aplicação dos pulsos de vácuo ocorre devido à brusca mudança da temperatura de saturação causada pela descompressão da câmara. A quantidade de vapor gerado está diretamente relacionada à diferença de temperatura do sólido submetido à secagem, antes e após a descompressão do sistema. O calor latente para evaporação é fornecido pelo próprio alimento que sofre resfriamento (ZOTARELLI et al., 2012; MONTEIRO et al., 2018).

As evoluções temporais da temperatura das amostras e da pressão do sistema para os diferentes métodos de secagem estão apresentadas na Figura 5.10. Na secagem por *KMFD*, as amostras são aquecidas até 60 °C, antes da aplicação do pulso de vácuo. A água livre evapora das amostras de forma rápida (evaporação *flash*), com o resfriamento do produto até temperaturas próximas de 20 °C (temperatura de ebulição da água na pressão final de  $\approx 2$  kPa). À medida que a umidade do produto diminui, a temperatura da amostra aumenta gradualmente. Esse aumento é mais perceptível após 1,04 h, com o fim do período de secagem à taxa constante, com redução da disponibilidade de água livre. Com consequência, no final do processo, a temperatura do produto se aproximou da temperatura das placas aquecidas (90 °C). As temperaturas registradas apresentaram diferenças entre si, o que pode ser atribuído ao deslocamento dos termopares durante os pulsos de vácuo e a heterogeneidades no aquecimento das amostras.

Na secagem por *FD*, os estágios envolvidos são o congelamento, secagem primária e secagem secundária (SMITH, 2011). Inicialmente, ocorre o período de secagem primária, na qual ocorre a sublimação da água congelada e a formação da estrutura porosa no material (LIAPIS e BRUTTINI, 2006). Classicamente, a primeira fase do processo de secagem por liofilização é regulada por dois mecanismos de transporte, a transferência de calor, que fornece calor latente de sublimação do gelo (aproximadamente  $2.805 \text{ kJ kg}^{-1}$ , a temperaturas de -21 a -30 °C) e a difusão do vapor sublimado para a superfície do produto, de onde ele é removido pelo sistema de vácuo (OETJEN, 2004, TRIBUZI e LAURINDO, 2016). A secagem primária ocorreu nas primeiras  $\approx 2,5$  h. Após esse período, se iniciou o estágio de secagem secundária, que envolve a remoção de água que não foi congelada (água ligada), que representa cerca de 10 a 35% do teor de umidade inicial, dependendo do produto. A secagem secundária não é totalmente independente da

secagem primária, pois uma pequena quantidade de água ligada pode ser removida por dessorção da camada seca, durante a fase de secagem primária (LIAPIS e BRUTTINI, 2006).

**Figura 5.10** - Evolução temporal da temperatura (—) e da pressão (---) das amostras de batatas-doce desidratadas pelos diferentes métodos de secagem. a) *KMFD*, b) *FD* e c) *AD*.



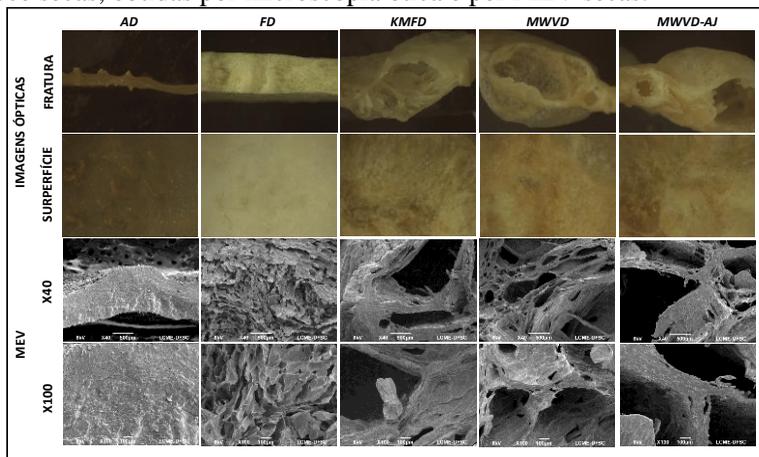
Na secagem convectiva (*AD*) foi possível observar um pequeno período de adaptação da batata-doce, em que ocorreu o seu aquecimento desde a temperatura inicial até a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem. Após o aquecimento, iniciou-se o período de taxa constante, em que a temperatura do produto permaneceu próxima de 41 °C. Essa temperatura é a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, que estava a 60 °C, com UR  $\approx$  33%. O período de secagem à taxa constante terminou quando o produto atingiu aproximadamente 1,54 g g<sup>-1</sup> (bs), depois de aproximadamente 2,5 h de secagem. A partir desse ponto a temperatura da amostra se elevou, com início do período de secagem à taxa decrescente.

### 5.2.2 **Imagens das amostras obtidas por microscopia ótica e por microscopia eletrônica de varredura**

A Figura 5.11 apresenta imagens das superfícies e de fraturas de amostras de batata-doce secas, obtidas com um microscópio ótico (estereomicroscópio), juntamente com imagens de fraturas, obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As batatas-doces secas por *AD* apresentaram encolhimento pronunciado, o que gerou uma estrutura compacta. As amostras desidratadas por *FD* mantiveram a estrutura original, resultando em uma estrutura esponjosa, com pequenos poros de tamanhos uniformes. Contrariamente, as amostras desidratadas por *KMFD*, *MWVD-AJ* e *MWVD* apresentaram uma matriz com a presença de poros grandes.

A aplicação dos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo causa importantes mudanças na estrutura celular de frutas e hortaliças, formadas pela rápida expansão do vapor, causada pelo vácuo (MONTEIRO et al., 2016). A evaporação *flash* resulta em forças que provocam a expansão ou ruptura da matriz sólida, cuja intensidade depende das condições de operação, como temperatura da amostra (antes e após o pulso de vácuo), pressão (inicial e final) e taxa de descompressão (LOUKA e ALLAF, 2002; ZOTARELLI et al., 2012; PORCIUNCULA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2016; LINK, 2018). Na secagem por micro-ondas a vácuo (*MWVD* e *MWVD-AJ*) a formação da estrutura porosa se deve ao aquecimento volumétrico causado pelas micro-ondas e a baixa pressão, que força a saída de vapor do interior à superfície, provocando o efeito de expansão (*puffing effect*) (ZHANG et al., 2006; MONTEIRO et al., 2015; MONTEIRO et al., 2016; MONTEIRO et al., 2018).

**Figura 5.11** - Imagens das superfícies e fraturas de amostras de batata-doce secas, obtidas por microscopia ótica e por MEV secas.



### 5.2.3 Porosidade e massa específica aparente

A Tabela 5.3 apresenta o valor médio e o desvio padrão da massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ) e da porosidade ( $\varepsilon$ ) de amostras de batata-doce desidratadas por *FD*, *AD*, *KMFD*, *MWVD* e *MWVD-AJ*. Fica evidente que as propriedades físicas são influenciadas pelo método de secagem utilizado, conforme já relatado por Krokida e Maroulis (1997), para secagem convectiva, secagem a vácuo, desidratação osmótica, liofilização e secagem por micro-ondas de amostras de banana, maçã, cenoura e batata.

**Tabela 5.3** - Porosidade e massa específica aparente das batatas-doces obtidas pelos diferentes métodos de secagem.

Processo	$\varepsilon$ (%)	$\rho_{ap}$ (g cm <sup>-3</sup> )
<i>In natura</i>	4,3 ± 2,1 <sup>a*</sup>	1,077 ± 0,007 <sup>c</sup>
<i>Branqueada</i>	2,6 ± 1,4 <sup>a</sup>	1,048 ± 0,032 <sup>c</sup>
<i>MWVD</i>	44,1 ± 4,6 <sup>c</sup>	0,708 ± 0,065 <sup>ab</sup>
<i>MWVD - AJ</i>	44,2 ± 4,2 <sup>c</sup>	0,708 ± 0,054 <sup>ab</sup>
<i>KMFD</i>	38,7 ± 2,6 <sup>d</sup>	0,806 ± 0,063 <sup>b</sup>
<i>FD</i>	58,4 ± 2,9 <sup>e</sup>	0,667 ± 0,063 <sup>a</sup>
<i>AD</i>	18,4 ± 3,9 <sup>b</sup>	1,340 ± 0,110 <sup>d</sup>

\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

Amostras de batata-doce *in natura* apresentaram massa específica aparente de  $1,077 \text{ g cm}^{-3}$  e porosidade de 4,2%. Após o processo de branqueamento, uma pequena absorção de água é observada, acompanhada de uma diminuição da porosidade,  $\varepsilon$ , para 2,6%.

Amostras desidratadas por *AD* apresentaram um aumento da massa específica aparente quando comparadas às amostras *in natura*. Por outro lado, batatas-doces desidratadas por *FD*, *KMFD*, *MWVD* e *MWVD-AJ* mostraram comportamento inverso. O aumento da  $\rho_{ap}$  também foi observado na secagem convectiva de banana, cenoura, batata e abóbora (KROKIDA e MAROULIS, 1997; GARCIA et al., 2007). Esse comportamento está relacionado com o encolhimento provocado pela secagem convectiva, causado pelas tensões geradas pelo aumento da pressão capilar durante a secagem. O encolhimento reduz o volume do material, resultando em estruturas porosas mais compactas (LIU et al., 2012). As condições de secagem (umidade relativa, temperatura e tempo de processo), bem como o teor de umidade no final do processo de secagem, influenciam o encolhimento e a massa específica aparente dos produtos desidratados (KROKIDA e MAROULIS, 1997; GARCIA et al., 2007).

As amostras produzidas por *FD* apresentaram valores de porosidade de 3,2 vezes maiores que as amostras desidratadas por *AD*. As porosidades das amostras liofilizadas também foram 1,5 vezes maiores do que o observado para amostras produzidas por *KMFD* e 1,3 maiores do que o observado para amostras produzidas por micro-ondas a vácuo (*MWVD* e *MWVD-AJ*). As porosidades e as massas específicas aparentes das amostras secadas por *MWVD* e *MWVD-AJ* não apresentaram diferenças significativa entre elas.

A porosidade é um parâmetro que representa a fração de vazios em um sólido, sem informar sobre a distribuição de tamanhos dos poros presentes na estrutura porosa. Sólidos com a mesma porosidade podem apresentar distribuições de tamanhos de poros muito diferentes, o que pode ter grande influência sobre suas propriedades mecânicas e sobre suas texturas. Neste estudo, observou-se uma grande diferença entre as estruturas e os tamanhos dos poros das amostras produzidas por *MWVD*, *MWVD-AJ* e *KMFD* e as amostras liofilizadas e produzidas por secagem convectiva (Figura 5.11).

Os menores valores das massas específicas aparentes das amostras secadas pelos processos *FD*, *MWVD* e *MWVD-AJ* são explicados pela estrutura mais porosa formada durante a secagem. Foi discutido anteriormente que a liofilização preserva a estrutura original do sólido, devido ao congelamento e à sublimação, produzindo produtos com grande

número de poros (KROKIDA e MAROULIS, 1997; RATTI, 2001). Por outro lado, a secagem por micro-ondas a vácuo produz amostras porosas devido ao aquecimento volumétrico sob vácuo, resultando na expansão do material. Por outro lado, a estrutura porosa formada pelo processo *KMFD* não se deve somente a secagem a vácuo, mas também ao efeito de expansão rápida dos vapores formados durante os pulsos de vácuo (*puffing effect*) (ZOTARELLI et al., 2012; PORCIUNCULA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2016). Nos processos *MWVD*, *MWVD-AJ* e *KMFD*, os estresses gerados pelo aumento da pressão capilar, devido a diminuição de água no interior dos poros, causam o encolhimento (SEGURA et al., 2014). No entanto, as forças que causam encolhimento são parcialmente compensadas pelas forças associadas à expansão dos vapores formados dentro do produto durante a descompressão (MONTEIRO et al., 2016).

#### 5.2.4 Cor

Na Figura 5.12 apresentam-se imagens das amostras de batata-doce desidratadas por *AD*, *FD*, *KMFD*, *MWVD* e *MWVD-AJ*. Na Tabela 5.4 apresentam-se valores médios ( $\pm$  desvio padrão) dos parâmetros de cor da escala CIELab ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  e  $\Delta E^*$ ) da batata-doce *in natura*, branqueada e secas por diferentes métodos de secagem.

As amostras branqueadas apresentaram escurecimento em relação às amostras *in natura*, como verificado pelo parâmetro  $L^*$ . As amostras secas por *AD*, *KMFD*, *MWVD* e *MWVD-AJ* apresentaram coloração mais escura em comparação as batatas-doces *in natura*, demonstrado pelos menores valores do parâmetro  $L^*$ . As amostras *AD* sofreram maior escurecimento, devido às maiores temperaturas de processo durante o longo período de secagem.

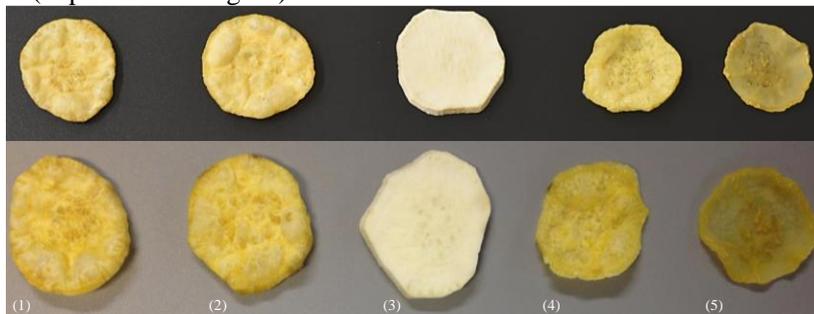
As amostras produzidas por *FD* apresentaram maiores valores do parâmetro  $L^*$ , indicando que essas amostras são as mais luminosas, quando comparadas às outras batatas desidratadas (Figura 5.12). Maiores resultados na luminosidade também têm sido relatados para a liofilização de abóbora (GUINÉ e BARROCA, 2012), de cenoura (MONTEIRO et al., 2015), de batata (SETIADY et al., 2009) e de manga (LINK et al., 2017).

A luz que atinge a superfície de sólidos pode ser absorvida, refletida e transmitida (HALLIDAY et al., 2012). A transmissão é insignificante para alimentos sólidos, sendo a reflexão e a absorção os fenômenos físicos responsáveis pela cor dos alimentos. O encolhimento e a deformação da superfície durante a secagem afetam a reflexão da luz (LEWICKI e DUSZCZYKA, 1998). Dessa forma, a estrutura compactada

das amostras produzidas por *AD* muda sua superfície e a parcela de luz refletida. Todos os processos de secagem resultaram no aumento dos parâmetros,  $a^*$  e  $b^*$ , quando comparados às amostras branqueadas. Setiady et al. (2009) examinaram a diferença de cor das batatas-doces desidratadas por micro-ondas a vácuo, secagem convectiva e por liofilização e relataram resultados que corroboram os resultados obtidos no presente estudo. Amostras produzidas por *FD* apresentaram menores alterações de cor em relação às batatas-doces *in natura*, seguidas pelas amostras produzidas por *MWVD*, *MWVD-AJ* e *KMFD*, que não apresentaram diferenças significativas entre si ( $p \leq 0,05$ ) para parâmetro  $\Delta E^*$ .

Os resultados obtidos nesse estudo mostraram também que os processos de secagem por *KMFD*, por micro-ondas a vácuo e por *FD* produzem batatas-doces desidratadas com coloração uniforme e ausência de partes queimadas.

**Figura 5.12** - Fotografia das batatas-doces secas por diferentes métodos de secagem. (1) *MWVD*, (2) *MWVD-AJ*, (3) *FD*, (4) *KMFD* e (5) *AD* (duplicata de imagens).



**Tabela 5.4** - Parâmetros de cor ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E^*$ ) da batata-doce *in natura*, *branqueada* e secas por diferentes métodos de secagem.

Amostras	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$
<i>in Natura</i>	$82,60 \pm 1,25^{e**}$	$-1,71 \pm 0,72^b$	$24,31 \pm 3,04^b$	-
<i>Branqueada</i>	$55,36 \pm 3,58^a$	$-4,42 \pm 3,10^c$	$16,75 \pm 2,36^a$	$28,67 \pm 3,05^e$
<i>MWVD</i>	$71,19 \pm 1,95^d$	$0,67 \pm 0,70^c$	$31,69 \pm 1,81^d$	$14,02 \pm 2,01^b$
<i>MWVD-AJ</i>	$69,57 \pm 2,80^d$	$0,96 \pm 0,57^c$	$31,72 \pm 2,16^d$	$15,53 \pm 2,55^{bc}$
<i>KMFD</i>	$66,54 \pm 3,36^c$	$-1,73 \pm 0,75^b$	$29,05 \pm 3,21^c$	$17,12 \pm 3,11^c$
<i>FD</i>	$87,95 \pm 1,06^f$	$-1,79 \pm 0,26^b$	$16,81 \pm 1,83^a$	$9,29 \pm 1,83^a$
<i>AD</i>	$61,91 \pm 3,43^b$	$-1,49 \pm 0,83^b$	$29,56 \pm 4,55^{cd}$	$21,87 \pm 3,31^d$

\*\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

### 5.2.5 Análises sensoriais

As batatas-doces desidratadas pelos diferentes processos de secagem (*AD*, *FD*, *KMFD* e *MWVD-AJ*) foram submetidas aos testes sensoriais de preferência, aceitação e intenção de compra. Como as amostras produzidas pelos processos *MWVD* e *MWVD-AJ*, não apresentaram diferenças nas análises de textura, cor, *MEV*, porosidade e massa específica aparente, somente a secagem por *MWVD-AJ* foi selecionada para realizar as análises sensoriais.

Na Tabela 5.5 é apresentada a soma das ordens e a média da análise de ordenação para as batatas-doces desidratadas pelos diferentes métodos de secagem. As amostras produzidas por *MWVD-AJ* e por *KMFD* foram igualmente preferidas, apresentando uma soma total de ordenação de 172.

**Tabela 5.5** - Soma das ordens e média da análise de ordenação para as batatas-doces desidratadas pelos diferentes métodos de secagem.

<b>Amostra</b>	<b><i>FD</i></b>	<b><i>AD</i></b>	<b><i>KMFD</i></b>	<b><i>MWVD-AJ</i></b>
<b>Soma</b>	104 <sup>a*</sup>	102 <sup>a</sup>	172 <sup>b</sup>	172 <sup>b</sup>
<b>Média</b>	1,9 ± 1,1 <sup>a</sup>	1,9 ± 0,9 <sup>a</sup>	3,1 ± 0,9 <sup>b</sup>	3,1 ± 0,9 <sup>b</sup>

\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Christensen.

Na Tabela 5.6 são apresentados os resultados obtidos no teste de aceitação da aparência, cor, sabor, textura e impressão global, bem como a intenção de compra das batatas-doces desidratadas pelos diferentes métodos de secagem. Na Figura 5.13 é mostrado o gráfico de aceitação em relação aos atributos de aparência, que permite uma melhor visualização dos resultados. As amostras secadas por *KMFD* e por *MWVD-AJ* não apresentaram diferenças significativas entre elas, em todos atributos avaliados. Além disso, essas amostras apresentaram melhor aceitação nos atributos sensoriais avaliados em comparação às amostras produzidas por *AD* e por *FD*. LIN et al. (1998) observaram uma maior aceitação (aparência, cor, sabor, textura e impressão global) de amostras de cenouras secas por micro-ondas a vácuo do que de amostras obtidas por secagem convectiva e por liofilização.

Apesar das amostras liofilizadas (*FD*) apresentarem menores alterações de cor instrumental ( $\Delta E^*$ ) em relação às batatas-doces *in natura*, estas foram as amostras que apresentaram menor aceitação no atributo cor. Amostras com estruturas mais expandidas, como as produzidas por *MWVD-AJ* e *KMFD*, tiveram maior aceitação para o atributo de textura. Alguns provadores associaram essa preferência à

crocância dessas amostras. Além disso, a aparência e a cor das amostras expandidas (*MWVD-AJ* e *KMFD*) mostraram aceitação acima de 6,9. LIN et al., (1998) também observaram que a secagem de cenouras por micro-ondas a vácuo produziu amostras de textura expandidas (*puffed texture*), sendo preferida pelos painelistas sensoriais.

Na Figura 5.14 estão apresentados os percentuais de respostas em relação à intenção de compra das amostras de batatas-doces desidratadas pelos diferentes métodos de secagem. Sessenta e dois por cento (62%) dos consumidores disseram que certamente ou provavelmente comprariam as batatas desidratadas por *KMFD*, enquanto 46% deles opinaram em favor das batatas-doces desidratadas por *MWVD-AJ*.

Para uma escala de 5 pontos, as intenções de compra das amostras produzidas por *KMFD* e *MWVD-AJ* foram de 3,7 e 3,3, respectivamente, o que não representou uma diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ). Esses valores correspondem a intenções de compra na escala entre “Provavelmente compraria” e “Talvez compraria”. Por outro lado, amostras de batatas-doces produzidas por *FD* e *AD* foram rejeitadas pelos consumidores, com média de intenção de compra na escala situada em “Provavelmente não compraria”.

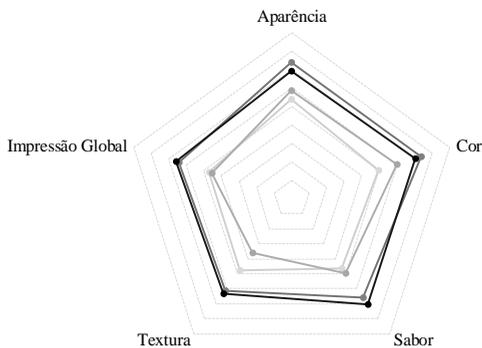
A liofilização tem sido considerada como o melhor processo de secagem para a obtenção de produtos desidratados de alta qualidade sensorial (RATTI, 2001; MUJUMDAR, 2007; OIKONOMOPOULOU et al., 2011; ZOTARELLI et al., 2012). No entanto, o presente estudo demonstrou que a secagem por micro-ondas a vácuo com tambor rotativo e com controle de temperatura (*MWVD-AJ*), bem como a secagem condutiva por múltiplos ciclos de aquecimento pulso de vácuo (*KMFD*) são alternativas viáveis para a produção de produtos desidratados expandidos de alta qualidade sensorial. Essa conclusão é baseada nas vantagens econômicas e operacionais desses processos de secagem e nos testes de preferência, intenção de compra e aceitação por parte dos painelistas.

**Tabela 5.6** - Resultados do teste de aceitação e intenção de compra para as batatas-doces desidratadas pelos diferentes métodos de secagem.

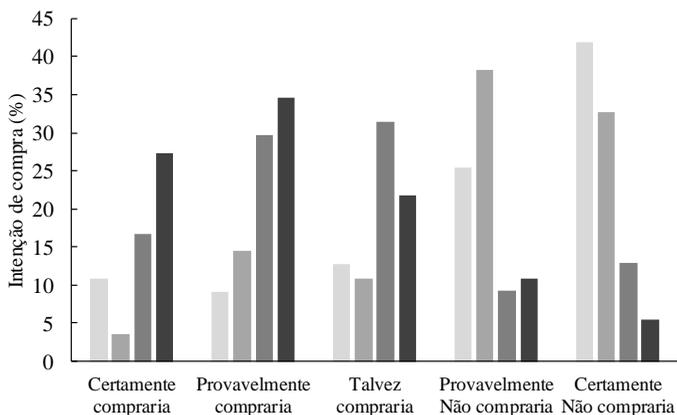
<b>Amostras</b>	<b>Aparência</b>	<b>Cor</b>	<b>Sabor</b>	<b>Textura</b>	<b>Impressão global</b>	<b>Intenção de compra</b>
<i>FD</i>	5,4 ± 2,0 <sup>a*</sup>	4,9 ± 2,0 <sup>a</sup>	4,6 ± 2,0 <sup>a</sup>	4,7 ± 2,3 <sup>b</sup>	4,7 ± 2,0 <sup>a</sup>	2,2 ± 1,4 <sup>a</sup>
<i>AD</i>	5,9 ± 2,0 <sup>a</sup>	6,0 ± 1,9 <sup>b</sup>	4,9 ± 2,1 <sup>a</sup>	3,6 ± 2,0 <sup>a</sup>	4,5 ± 1,8 <sup>a</sup>	2,2 ± 1,2 <sup>a</sup>
<i>KMFD</i>	6,9 ± 1,6 <sup>b</sup>	7,0 ± 1,6 <sup>c</sup>	7,0 ± 1,5 <sup>b</sup>	6,1 ± 2,0 <sup>c</sup>	6,6 ± 1,7 <sup>b</sup>	3,7 ± 1,2 <sup>b</sup>
<i>MWVD-AJ</i>	7,4 ± 1,4 <sup>b</sup>	7,4 ± 1,2 <sup>c</sup>	6,6 ± 1,7 <sup>b</sup>	6,3 ± 2,1 <sup>c</sup>	6,4 ± 1,5 <sup>b</sup>	3,3 ± 1,2 <sup>b</sup>

\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

**Figura 5.13** - Gráfico de aceitação em relação aos atributos de aparência, cor, sabor, textura e impressão global das amostras de batata-doce desidratadas pelos diferentes métodos de secagem, utilizando a escala hedônica estruturada de 9 pontos. *FD* (○), *AD* (●), *MWVD* (●) e *KMFD* (●).



**Figura 5.14** - Frequência dos valores da escala estruturada de 5 pontos atribuídos pelos provadores à intenção de compra das amostras de batatas-doces desidratadas pelos diferentes métodos de secagem. *FD* (■), *AD* (■), *MWVD* (■) e *KMFD* (■).



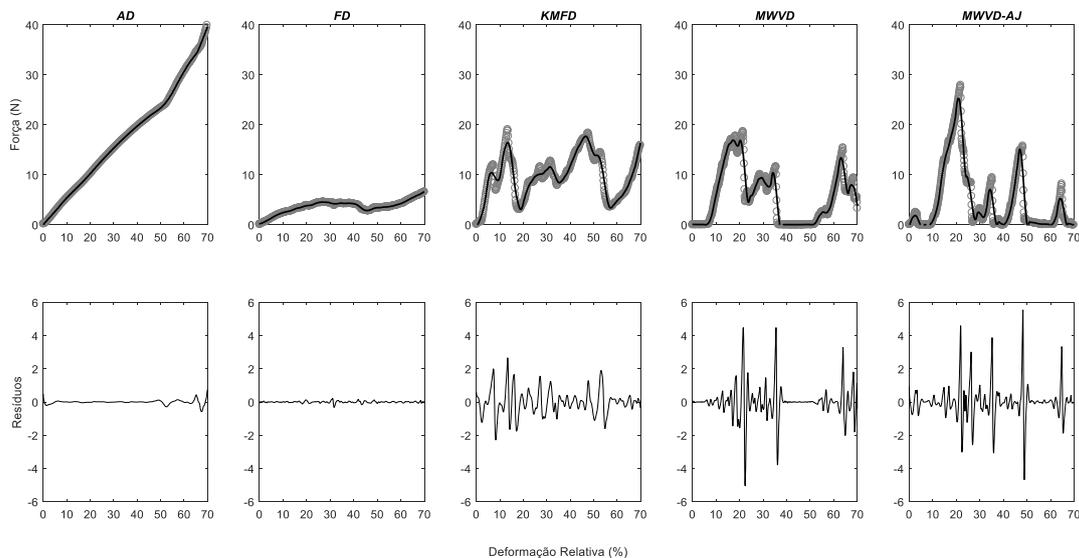
### 5.2.6 Propriedades mecânicas

A Figura 5.15 apresenta os resultados de força x deformação dos testes mecânicos de perfuração realizados com amostras secas pelos diferentes métodos de secagem estudados (*AD*, *FD*, *KMFD*, *MWVD* e *MWVD-AJ*). A crocância de produtos desidratados está relacionada com a irregularidade das curvas de força-deformação, que por sua vez é associada ao número e intensidade dos picos presentes (LAURINDO e PELEG, 2007; LAURINDO e PELEG, 2008; MONTEIRO et al., 2016). As amostras secadas pelos processos *KMFD*, *MWVD* e *MWVD-AJ* apresentaram curvas irregulares, características de produtos crocantes.

No entanto, as amostras produzidas por *AD* apresentaram um aumento contínuo da força com a distância de penetração. Esse comportamento é típico de estruturas compactadas e pouco porosas, o que realmente foi observado nas imagens obtidas por MEV (Figura 5.15, linha superior). Os resultados dos testes realizados com amostras liofilizadas (*FD*) apresentaram comportamento típico de produtos esponjosos (amostra porosa com poros pequenos e uniformes), com forças de baixo valor e oscilações de força de baixa amplitude.

As curvas dos dados experimentais de força-deformação foram suavizadas e os resíduos normalizados foram calculados pela diferença entre a força registrada e a força ajustada (Figura 5.15, linha inferior), na qual as curvas suavizadas representam o comportamento global da força-deformação (GONZALEZ MARTINEZ et al., 2003; LAURINDO e PELEG, 2007; LAURINDO e PELEG, 2008). O número de picos e as amplitudes dos picos nas curvas de resíduos podem ser correlacionados à crocância das amostras. A partir desses ensaios mecânicos foi possível observar que os processos *MWVD* e *KMFD* resultaram em amostras com estruturas mais quebradiças, com maior número de picos e maior amplitude da força desenvolvida durante a penetração a sonda. O mesmo comportamento foi observado por Monteiro et al. (2016) para secagem de bananas.

**Figura 5.15** - Amplitude da oscilação da força a partir de resultados representativos dos testes de penetração das amostras de batata-doce desidratadas pelos diferentes métodos de secagem. Primeira Linha: Dados de força-deformação (○) e ajuste não-paramétrico (—); Segunda Linha: curvas dos resíduos



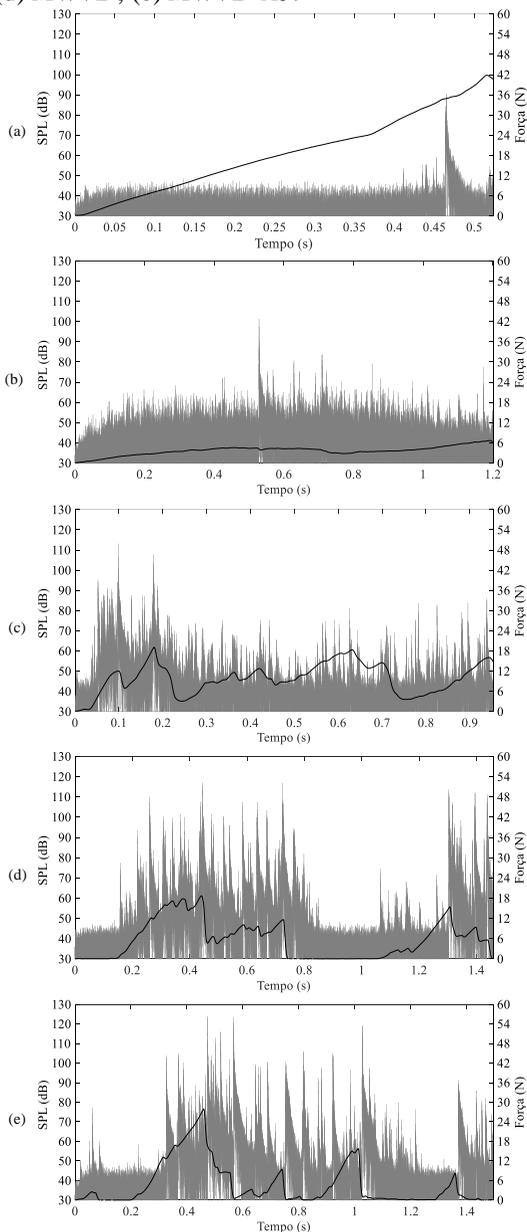
### 5.2.7 Propriedades acústico-mecânicas

Na Figura 5.16 apresentam-se as curvas representativas da força desenvolvida e do nível de pressão sonora ( $SPL$ ) emitidos durante ensaios mecânicos (teste de penetração) com amostras desidratadas pelos diferentes processos de secagem. Os sinais mecânicos e sonoros foram sincronizados, permitindo a comparação simultânea dos dados mecânicos e acústicos. Os parâmetros obtidos a partir do teste instrumental acústico-mecânico são apresentados na Tabela 5.7.

As áreas sob as curvas de força-deformação de amostras desidratadas pelos diferentes processos não apresentaram diferenças significativas entre si. No entanto, a força máxima necessária para penetrar amostra produzidas por  $FD$  foi bem menor que as amostras produzidas por  $AD$  e  $MWVD-AJ$ . O número de picos mecânicos apresentou diferença significativa com relação à secagem  $AD$  e os demais processos, apresentando menores picos mecânicos. A secagem  $AD$  proporcionou amostras com baixos números de picos de força e baixos picos acústicos, com alta intensidade mecânica e acústica, sendo característicos de amostras compactas e rígidas, sendo corroborado pelas análises de porosidade, massa específica aparente e MEV.

As curvas acústicas mostraram que as amostras secadas por  $MWVD$ ,  $MWVD-AJ$ ,  $FD$  e  $KMFD$  apresentaram maior número de picos acústicos. As amostras liofilizadas ( $FD$ ) mostraram-se bastante frágeis, com muitos picos acústicos e mecânicos de baixa intensidade. Por outro lado, as batatas-doces desidratadas por  $MWVD$ ,  $MWVD-AJ$  e  $KMFD$  apresentaram maiores números de picos de força com picos acústicos elevados ( $SPL_{10}$  e  $SPL_{máx}$ ), sendo esses parâmetros associados a estruturas quebradiças e rígidas, sugerindo característica de crocância.

**Figura 5.16** - Evolução da Força aplicada (—) e nível de Pressão Sonoro (SPL) (---) versus o tempo de penetração das amostras: (a) *AD*, (b) *FD*, (c) *KMFD*, (d) *MWVD*, (e) *MWVD-AJ*.



**Tabela 5.7** - Valores médios e desvios padrões dos parâmetros obtidos nos testes acústico-mecânico, para amostras secas pelos diferentes processos de secagem.

Amostra	Parâmetros instrumentais mecânicos			Parâmetros instrumentais acústicos		
	Área (N.mm)	Número de picos de força	Força máxima (N)	$SPL_{10}$ (dB)	$SPL_{máx}$ (dB)	Número de picos acústicos
<i>MWVD</i>	14,2 ± 13,9 <sup>a</sup>	18,5 ± 8,0 <sup>c</sup>	24,9 ± 11,6 <sup>ab</sup>	118,1±5,7 <sup>c</sup>	122,5 ± 5,9 <sup>c</sup>	3605 ± 1402 <sup>b</sup>
<i>MWVD-AJ</i>	22,1 ± 14,1 <sup>a</sup>	14,8 ± 4,3 <sup>c</sup>	30,4 ± 17,3 <sup>b</sup>	114,4±3,3 <sup>c</sup>	118,8 ± 4,1 <sup>bc</sup>	2962 ± 1188 <sup>b</sup>
<i>KMFD</i>	14,4 ± 11,8 <sup>a</sup>	8,3 ± 3,4 <sup>b</sup>	28,1 ± 18,1 <sup>ab</sup>	111,0±7,2 <sup>bc</sup>	116,5 ± 6,7 <sup>bc</sup>	2081 ± 577 <sup>ab</sup>
<i>FD</i>	12,9 ± 5,4 <sup>a</sup>	13,2 ± 4,0 <sup>bc</sup>	7,8 ± 4,4 <sup>a</sup>	84,0±11,2 <sup>a</sup>	88,9 ± 12,4 <sup>a</sup>	3482 ± 2555 <sup>b</sup>
<i>AD</i>	21,7 ± 16,3 <sup>a</sup>	2,8 ± 2,1 <sup>a</sup>	43,70 ± 36,9 <sup>b</sup>	105,8±10,9 <sup>b</sup>	112,2 ± 10,9 <sup>b</sup>	591 ± 322 <sup>a</sup>

\*Letras diferentes representam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ) no teste de Tukey.

### 5.2.8 Análise de correlações entre propriedades estruturais, acústico-mecânicas e sensoriais

A análise dos componentes principais (*Principal Component Analysis - PCA*) foi realizada para avaliar as correlações entre os diferentes parâmetros obtidos por análises de estrutura, análises acústico-mecânicas e análises sensoriais, para as amostras desidratadas pelos diferentes métodos de secagem.

A matriz de correlação de Pearson é apresentada na Tabela 5.8 e indicou que existem correlações significativas entre as propriedades estruturais, mecânicas, acústicas e sensoriais. A adequação da análise fatorial foi verificada por meio do teste de KMO, que resultou no valor de 0,561. Valor de KMO acima de 0,5 é considerado satisfatório por alguns autores para confirmar o uso da análise fatorial para avaliar correlação entre parâmetros (HAIR, et al. 1998).

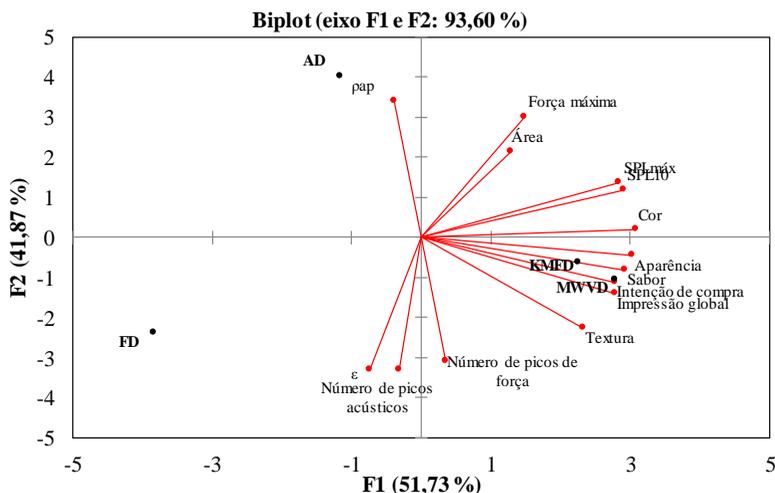
Os dois primeiros componentes principais explicaram 93,60 % da variabilidade total dos dados (Figura 5.17), sendo 51,73% explicada pelo primeiro componente (F1) e 41,87% explicada pelo segundo componente (F2). O primeiro componente foi principalmente influenciado pelos parâmetros  $SPL_{10}$ ,  $SPL_{máx}$ , cor, aparência, sabor, textura, impressão global e intenção de compra. O segundo componente foi fortemente influenciado pela força máxima e  $\rho_{ap}$ . A partir da Figura 5.17 observa-se que alguns parâmetros, como o número de picos de força, o número de picos acústicos e  $\varepsilon$ , estão correlacionados negativamente com F2.

Os atributos sensoriais apresentaram correlações lineares entre si ( $r \geq 0,711$ ). Além do atributo de textura sensorial apresentar altas correlações com os demais atributos sensoriais, este apresentou correlações com o número de picos de força ( $r = 0,663$ ) e o número de picos acústicos ( $r = 0,555$ ).

As amostras produzidas por AD não foram bem aceitas pelos consumidores, apresentando correlação negativa com o F1. Essas amostras apresentaram elevados valores de  $\rho_{ap}$ , que está negativamente correlacionado com a aceitação da textura ( $r = -0,746$ ), indicando que o aumento dessa propriedade ( $\rho_{ap}$ ) pode favorecer a rejeição da textura do produto. Além disso, a  $\rho_{ap}$  está correlacionada negativamente com a  $\varepsilon$  ( $r = -0,933$ ), com número de picos acústicos ( $r = -0,959$ ) e com número de picos de força ( $r = -0,927$ ) e está correlacionada positivamente com a força máxima ( $r = 0,800$ ). Isso refletiu na maior força máxima (dureza) e  $\rho_{ap}$  e menores valores de  $\varepsilon$ , de número de picos acústicos e de número de picos de força observados para as amostras produzidas por AD.

As propriedades acústicas  $SPL_{10}$  ( $r = 0,692$ ),  $SPL_{máx}$ , ( $r = 0,658$ ) influenciaram de forma positiva a aceitação do produto. Quanto maior a intensidade desses parâmetros, maior é a tendência de aceitação por parte dos consumidores. Isso explica a maior aceitação das amostras *KMFD* e *MWVD-AJ*, que apresentaram maiores intensidades dessas propriedades acústicas.

**Figura 5.17** - *Biplot* do PCA. Variáveis analisadas (●). Amostras desidratadas pelos diferentes processos de secagens analisados (●);



**Tabela 5.8 - Matriz de coeficientes de correlação (r) entre variáveis investigadas determinada a partir do PCA.**

Variáveis	Área	Nº picos força	Força máxima	<i>SPL</i> <sub>10</sub>	<i>SPL</i> <sub>máx</sub>	Nº picos acústicos	$\varepsilon$	$\rho_{ap}$	Aparência	Cor	Sabor	Textura	Impressão global	Intenção compra
Área	1													
Nº picos força	-0,223	1												
Força máxima	0,796	-0,693	1											
<i>SPL</i> <sub>10</sub>	0,639	-0,176	0,753	1										
<i>SPL</i> <sub>máx</sub>	0,644	-0,238	0,787	0,998	1									
Nº picos acústicos	-0,486	0,955	-0,874	-0,412	-0,467	1								
$\varepsilon$	-0,636	0,880	-0,951	-0,548	-0,596	0,981	1							
$\rho_{ap}$	0,522	-0,927	0,800	0,217	0,273	-0,959	-0,933	1						
Aparência	0,422	0,294	0,365	0,882	0,852	0,065	-0,089	-0,264	1					
Cor	0,499	0,099	0,530	0,956	0,938	-0,133	-0,280	-0,077	0,980	1				
Sabor	0,100	0,227	0,227	0,794	0,769	0,084	-0,014	-0,342	0,927	0,912	1			
Textura	-0,116	0,663	-0,219	0,478	0,430	0,555	0,457	-0,746	0,820	0,711	0,875	1		
Impressão global	0,010	0,399	0,058	0,692	0,658	0,268	0,169	-0,509	0,910	0,858	0,983	0,949	1	
Intenção compra	-0,028	0,266	0,120	0,713	0,687	0,156	0,075	-0,418	0,879	0,852	0,992	0,898	0,988	1

Diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ).

### 5.3 CONCLUSÃO

A secagem por micro-ondas a vácuo em tambor rotativo e com controle de temperatura melhora a homogeneidade da absorção das micro-ondas pelo material. Isso resulta em produtos desidratados sem regiões escuras, indicando importante redução de *hot spots*.

Os processos de secagem por micro-ondas a vácuo (*MWVD-AJ*) e e por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (*KMFD*) permitem a obtenção de batatas-doces desidratadas em apenas 3 h. As batatas *chips* resultantes possuem maior preferência, intenção de compra e aceitação da aparência, cor, sabor e textura, se comparada às amostras produzidas pelos outros processos. Essa preferência pode ser explicada pela alta porosidade das batatas, com poros grandes, que resultam em curvas acústico-mecânicas irregulares, características de produtos crocantes. A intenção de compra dos consumidores tem correlação fortemente positiva com parâmetros acústicos como,  $SPL_{max}$  e  $SPL_{10}$  e correlação negativa com  $\rho_{ap}$  das amostras.

Considerando o exposto, conclui-se que os processos de secagem por micro-ondas sob vácuo, em tambor rotativo (*MWVD-AJ*) e pela aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (*KMFD*) têm grande potencial para produção industrial de *chips* de batatas-doces crocantes, porosas e livres de óleo, com alta aceitação sensorial.



## 6 CONCLUSÃO GERAL

---

A desidratação de fatias de batata-doce é uma alternativa muito promissora e viável para agregar valor e permitir a maior inserção desse produto no mercado de produtos industrializados.

O agitador de ondas melhora a distribuição das ondas eletromagnéticas no interior da cavidade, diminuindo a intensidade de *hot spots* nas amostras. O controle *PID* de temperatura pela manipulação da potência, medindo a temperatura com sensores de fibra óptica ou com um termômetro de infravermelho, é eficiente e factível. No entanto, a utilização do termômetro de infravermelho é mais adequada para o controle da temperatura, pois mede-se a temperatura superficial média das amostras.

Análises acústico-mecânicas das amostras desidratadas ajudam a discrimina-las quanto à aceitação. A correlação com análises sensoriais é importante para definir o processo de secagem que produz amostras desidratadas de melhor aceitação, intenção de compra e preferência por parte dos consumidores.

É possível produzir *chips* de batata-doce em escala industrial, utilizando a secagem por micro-ondas a vácuo, em tambor rotativo, e com controle da temperatura pela manipulação da potência. As batatas desidratadas resultantes possuem alta qualidade, estrutura porosa e crocante. O uso do processo de secagem por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (*KMFD*) também é uma alternativa viável para a produção de *chips* de batata-doce.



## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao estudo da secagem de alimentos em micro-ondas a vácuo, com controle da temperatura pela manipulação da potência, sugere-se os seguintes estudos:

- Estudo da secagem por *MWVD-AJ* para outros produtos de interesse comercial;
- Estudo dos múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo *multi-flash drying (MFD)* na secagem de alimentos em micro-ondas a vácuo, com controle da temperatura pela manipulação da potência (*MWMFD*);
- Análise da viabilidade econômica e custos energéticos do processo de secagem por micro-ondas a vácuo. Comparação com processos existentes no mercado;
- Análise da influência de outras temperaturas de controle (50°C, 70°C e 80°C) no tempo de processo e nas propriedades físico-químicas dos produtos desidratados;
- Análise nutricional (eg. vitaminas) após a secagem por *MWVD-AJ*;
- Análise do índice glicêmico das batatas-doces *in natura*, branqueadas e desidratada por diferentes processos de secagem (*AD*, *FD*, *KMFD* e *MWVD-AJ*);
- Monitoramento *online* das temperaturas das amostras a partir de termopares, durante a secagem por micro-ondas a vácuo e prato giratório.



## REFERÊNCIAS

- A.O.A.C. - **Association of Official Analytical Chemists**. Official methods of analysis (18th ed.). Gaithersburg, Maryland: A.O.A.C. INTERNATIONAL, 2005.
- AGUILERA, J.M.; CHIRALT, A.; FITO, P. Food dehydration and product structure. **Trends in Food Science & Technology**, v. 14, n. 10, p. 432-437, 2003.
- AINA, A. J.; FALADE, K. O.; AKINGBALA, J. O.; TITUS, P. Physicochemical properties of twenty-one Caribbean sweet potato cultivars. **International journal of food science & technology**, v. 44, n. 9, p. 1696-1704, 2009.
- ALIBAS, I. Energy Consumption and colour characteristics of nettle leaves during microwave, vacuum and convective drying. **Biosystems Engineering**, v.96, p. 495–502, 2007.
- ALLEN, J. C.; CORBITT, A. D.; MALONEY, K. P.; BUTT, M. S.; TRUONG, V. D. Glycemic index of sweet potato as affected by cooking methods. **Open Nutrition Journal**, v. 6, p. 1-11, 2012.
- ARIMI, J. M.; DUGGAN, E.; O’SULLIVAN, M.; LYNG, J. G.; O’RIORDAN, E. D. Effect of water activity on the crispiness of a biscuit (Crackerbread): Mechanical and acoustic evaluation. **Food Research International**, v. 43, n. 6, p. 1650-1655, 2010.
- BARRETO, I. M. A. Estudo da secagem com aplicação de micro-ondas para obtenção de batatas *chips* crocantes. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Alimentos) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.
- CALÍN-SÁNCHEZ, A.; FIGIEL, A.; WOJDYŁO, A.; SZARYCZ, M.; CARBONELL-BARRACHINA, A. A. Drying of garlic slices using convective pre-drying and vacuum-microwave finishing drying: kinetics, energy consumption, and quality studies. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 2, p. 398-408, 2014.

CARCIOFI, B.A.M.; PRAT, M.; LAURINDO, J.B. Dynamics of vacuum impregnation of apples: Experimental data and simulation results using a VOF model. **Journal of Food Engineering**, v. 113, n. 2, p. 337-343, 2012.

ÇARŞANBA, E.; DUERRSCHMID, K.; SCHLEINING, G. Assessment of acoustic-mechanical measurements for crispness of wafer products. **Journal of Food Engineering**, 2017.

CASTRO-PRADA, E. M.; LUYTEN, H.; LICHTENDONK, W.; HAMER, R. J.; VAN VLIET, T. An improved instrumental characterization of mechanical and acoustic properties of crispy cellular solid food. **Journal of Texture Studies**, v. 38, n. 6, p. 698-724, 2007.

CHANDRASEKARAN S.; RAMANATHAN S.; BASAK T. Microwave food processing - A review. **Food Research International**, v. 52, n.1 , p. 243–261, 2013.

CHANVRIER, H.; JAKUBCZYK, E.; GONDEK, E.; GUMY, J. C. Insights into the texture of extruded cereals: Structure and acoustic properties. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 24, p. 61-68, 2014.

CHAUVIN, M. A.; YOUNCE, F.; ROSS, C.; SWANSON, B. Standard scales for crispness, crackliness and crunchiness in dry and wet foods: relationship with acoustical determinations. **Journal of Texture Studies**, v. 39, n. 4, p. 345-368, 2008.

CHEN L.; OPARA, U. L. Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods—A review. **Journal of Food Engineering**, v. 119, n. 3, p. 497-507, 2013.

CHEN, J.; KARLSSON, C.; POVEY, M. Acoustic envelope detector for crispness assessment of biscuits. **Journal of Texture Studies**, v. 36, n. 2, p. 139-156, 2005.

CHRISTENSEN, Z. T.; OGDEN, L. V.; DUNN, M. L.; EGGETT, D. L. Multiple comparison procedures for analysis of ranked data. **Journal of Food Science**, v. 71, n. 2, 2006.

CLARY, C. D.; MEJIA-MEZA, E.; WANG, S.; PETRUCCI, V. E. Improving grape quality using microwave vacuum drying associated with temperature control. **Journal of Food Science**, v. 72, n. 1, p. E023-E028, 2007.

COHEN, J.S.; YANG, T.C.S. Progress in food dehydration. **Trends in Food Science & Technology**, v. 6, n. 1, p. 20-25, 1995.

CUCCURULLO, G.; GIORDANO, L.; ALBANESE, D.; CINQUANTA, L.; DI MATTEO, M. Infrared thermography assisted control for apples microwave drying. **Journal of food engineering**, v. 112, n. 4, p. 319-325, 2012.

CUCCURULLO, G.; GIORDANO, L.; METALLO, A.; CINQUANTA, L. Influence of mode stirrer and air renewal on controlled microwave drying of sliced zucchini. **biosystems engineering**, v. 158, p. 95-101, 2017.

DATTA, A.K.; ANANTHESWARAN, R.C. **Handbook of Microwave Technology for Food Applications**. New York: Marcel Dekker Inc., 2001.

DEBYE, P. **Polar molecules**. Nova York: The Chemical Catalog Company, 1929. 172p.

DISSA A.O.; DESMORIEUX H.; BATHIEBO J.; KOULIDIATI J. Convective drying characteristics of Amelie mango (*Mangifera Indica* L. cv. 'Amelie') with correction for shrinkage. **Journal of food Engineering**, v. 88, n. 4, p. 429-437, 2008.

DOMINGUEZ-TORTAJADA, E.; PLAZA-GONZALEZ, P.; DIAZ-MORCILLO, A.; BALBASTRE, J. V. Optimisation of electric field uniformity in microwave heating systems by means of multi-feeding and genetic algorithms. **International Journal of Materials and Product Technology**, v. 29, n. 1-4, p. 149-162, 2007.

DROUZAS, A. E.; SCHUBERT, H. Microwave application in vacuum drying of fruits. **Journal of food Engineering**, v. 28, n. 2, 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, n. 1, p. 17-24, 2001.

ESEHAGHBEYGI, A.; PIRNAZARI, K.; SADEGHI, M. Quality assessment of electrohydrodynamic and microwave dehydrated banana slices. **LWT - Food Science and Technology**, v. 55, p. 565- 571, 2014.

FALADE, K. O.; SOLADEMI, O. J. Modelling of air drying of fresh and blanched sweet potato slices. **International journal of food science & technology**, v. 45, n. 2, p. 278-288, 2010.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Statistics of fruits and vegetables world production. Disponível em: <http://faostat.fao.org>, acessado em 21 de março de 2017.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. Porto Alegre: Artmed, 2<sup>a</sup> ed, 2006.

FENG, H.; TANG, J.; CAVALIERI, R. P. Dielectric properties of dehydrated apples as affected by moisture and temperature. **Transactions-American Society of Agricultural Engineers**, v. 45, n. 1, p. 129-136, 2002.

FIGIEL, A. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices. **Journal of Food Engineering**, v. 94, n. 1, p. 98-104, 2009.

FILLION, L.; KILCAST, D. Consumer perception of crispness and crunchiness in fruits and vegetables. **Food Quality and Preference**, v. 13, n. 1, p. 23-29, 2002.

GARCIA, C. C.; MAURO, M. A.; KIMURA, M. Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (*Cucurbita moschata*). **Journal of Food Engineering**, v. 82, n. 3, p. 284-291, 2007.

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

GEEDIPALLI, S. S. R.; RAKESH, V.; DATTA, A. K. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens. **Journal of Food Engineering**, v. 82, n. 3, p. 359-368, 2007.

GOLDBLITH, S. A. Basic principles of microwaves and recent developments. **Advances in food research**, v. 15, p. 277-301, 1966.

GONZALEZ MARTINEZ, C.; CORRADINI, M. G.; PELEG, M. Effect of moisture on the mechanical properties of pork rind (Chicharrón). **Food Science and Technology International**, v.9, n.4, 249-255, 2003.

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

GUINÉ, R. P.; BARROCA, M. J. Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper). **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n.1, p. 58-63, 2012.

GUNASEKARAN, S. Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. **Drying Technology**, v. 17, n. 3, p. 395-412, 1999.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Multivariate data analysis**. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall, 1998.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física, Vol 4: Óptica e Física Moderna**. 9ª ed., 2012.

HOFSETZ, K.; LOPES, C.C.; HUBINGER, M.D.; MAYOR, L.; SERENO, A.M. Changes in the physical properties of bananas on applying HTST pulse during air-drying. **Journal of Food Engineering**, v. 83, n. 4, p. 531-540, 2007.

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, n. 2, p. 144-153, 2010.

HORTIBRASIL. **Instituto Brasileiro de Qualidade em Horticultura**. Normas de Classificação - batata-doce - Programa Brasileiro para a Modernização da Horticultura. Disponível em: <[http://www.hortibrasil.org.br/images/stories/folders/batata\\_doce\\_folder.pdf](http://www.hortibrasil.org.br/images/stories/folders/batata_doce_folder.pdf)>. São Paulo, v. 12, n. 12, 2014.

IBGE. **Instituto brasileiro de geografia e estatística**. Produção Agrícola Municipal – Culturas temporárias e permanentes. Rio de Janeiro, v. 40, p.1-102, 2013.

IÇIER, F.; BAYSAL, T. Dielectrical properties of food materials - 1: Factors affecting and industrial uses. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 44, n. 6, p. 465-471, 2004.

IDRIS, A.; KHALID, K.; OMAR, W. Drying of silica sludge using microwave heating. **Applied thermal engineering**, v. 24, n. 5-6, p. 905-918, 2004.

IKEDIALA, J. N.; TANG, J.; DRAKE, S. R.; NEVEN, L. G. Dielectric properties of apple cultivars and codling moth larvae. **Transactions of the ASAE**, v. 43, n. 5, p. 1175, 2000.

IMRE, L. **Handbook of Industrial Drying**. Cap. 13: Solar Drying. Editado por MUJUMDAR, A. S. Taylor & Francis Group, LLC, p. 304-346, 2014.

ISHIDA, H.; SUZUNO, H.; SUGIYAMA, N.; INNAMI, S.; TADOKORO, T.; MAEKAWA, A. Nutritive evaluation on chemical components of leaves, stalks and stems of sweet potatoes (*Ipomoea batatas* poir). **Food Chemistry**, v. 68, n. 3, p. 359-367, 2000.

JAYARAMAN, K. S.; GUPTA, D. K. **Handbook of Industrial Drying**. Cap. 25: Drying of Fruit and Vegetables. Editado por MUJUMDAR, A. S. Taylor & Francis Group, LLC, p. 612-633, 2014.

KAATZE, U. Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature. **Journal of Chemical and Engineering Data**, v. 34, n. 4, p. 371-374, 1989.

KARAM, M. C.; PETIT, J.; ZIMMER, D.; DJANTOU, E. B.; SCHER, J. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable

powders: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 188, p. 32-49, 2016.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES (2015). Keysight N1501A. Dielectric Probe Kit 10 MHz to 50 GHz - Technical Overview. Disponível em: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/59920264EN.pdf?id=2605692>. Acessado em 11 de janeiro de 2017.

KIM, E. H. J.; CORRIGAN, V. K.; WILSON, A. J.; WATERS, I. R.; HEDDERLEY, D. I.; MORGENSTERN, M. P. Fundamental fracture properties associated with sensory hardness of brittle solid foods. **Journal of Texture Studies**, v. 43, n. 1, p. 49-62, 2012.

KIM, E. J.; CORRIGAN, V. K.; HEDDERLEY, D. I.; MOTOI, L.; WILSON, A. J.; MORGENSTERN, M. P. Predicting the sensory texture of cereal snack bars using instrumental measurements. **Journal of texture studies**, v. 40, n. 4, p. 457-481, 2009.

KOMAROV, V.; WANG, S.; TANG, J. Permittivity and measurements. Encyclopedia of RF and microwave engineering, 2005.

KOZEMPEL, M. F.; SULLIVAN, J. F.; CRAIG, J. C.; KONSTANCE, R. P. Explosion puffing of fruits and vegetables. **Journal of food science**, v. 54, n. 3, p. 772-773, 1989.

KROKIDA, M.K.; MAROULIS, Z.B. Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products. **Drying technology**, v. 17, n. 3, p. 449-466, 1999.

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

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.

LAURINDO, J.B.; PELEG, M. Mechanical characterization of shredded wheat. **Journal of texture studies**, v. 39, n. 5, p. 444-459, 2008.

LAURINDO, J.B.; PELEG, M. Mechanical measurements in puffed rice cakes. **Journal of texture studies**, v. 38, n. 5, p. 619-634, 2007.

LAURINDO, J.B.; STRINGARI, G.B.; PAES, S.S.; CARCIOFI, B.A.M. Experimental Determination of the Dynamics of Vacuum Impregnation of Apples. **Journal of Food Science**, v.72, n. 8, p. E470-E475, 2007.

LEWICKI, P. P.; DUSZCZYK, E. Color change of selected vegetables during convective air drying. **International journal of food properties**, v. 1, n. 3, p. 263-273, 1998.

LI, Z. Design of a microcontroller-based, power control system for microwave drying. **Dissertação** (Mestrado em Bioresource Engineering) Department of Bioresource Engineering McGill University, Montreal, 2004.

LI, Z. Y.; WANG, R. F.; KUDRA, T. Uniformity issue in microwave drying. **Drying Technology**, v. 29, n. 6, p. 652-660, 2011.

LI, Z.; RAGHAVAN, G. S. V.; ORSAT, V. Optimal power control strategies in microwave drying. **Journal of Food Engineering**, v. 99, n. 3, p. 263-268, 2010c.

LI, Z.; RAGHAVAN, G. S. V.; ORSAT, V. Temperature and power control in microwave drying. **Journal of Food Engineering**, v. 97, n. 4, p. 478-483, 2010a.

LI, Z.; RAGHAVAN, G. V.; WANG, N. Carrot volatiles monitoring and control in microwave drying. **LWT-Food Science and Technology**, v. 43, n. 2, p. 291-297, 2010b.

LI, Z.; WANG, N.; RAGHAVAN, G. S. V.; CHENG, W. A microcontroller-based, feedback power control system for microwave drying processes. **Applied engineering in agriculture**, v. 22, n. 2, p. 309-314, 2006.

LIAPIS, A.I.; BRUTTINI, R. Freeze drying. In **Handbook of Industrial Drying**, 3 ed., MUJUMDAR, A.S. Florida: CRC/Taylor & Francis. p. 257-281, 2006.

LIN, J.H.; WANG, S.W.; CHANG, Y.H. Effect of molecular size on gelatinization thermal properties before and after annealing of rice starch with different amylose contents. **Food Hydrocolloids**, v. 22, n. 1, p. 156-163, 2008.

LIN, T.M.; DURANCE, T.D.; SCAMAN, C.H. Characterization of vacuum microwave air and freeze dried carrot slices. **Food Research International**, v. 31, n. 2, p. 111-117, 1998.

LINK, J. V. Aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo para a produção de fatias de manga (*Mangifera indica* L.) desidratadas. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Alimentos) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

LINK, J.V.; TRIBUZI, G.; LAURINDO, J.B. Conductive multi-flash drying of mango slices: Vacuum pulse conditions on drying rate and product properties. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 42, n. 2, 2018.

LINK, J.V.; TRIBUZI, G.; LAURINDO, J.B. Improving quality of dried fruits: A comparison between conductive multi-flash and traditional drying methods. **LWT-Food Science and Technology**, v. 84, p. 717-725, 2017.

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

LOUKA, N.; ALLAF, K. 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, n. 2, 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, n. 8, p. 3033-3038, 2002.

LOUKA, N.; JUHEL, F.; ALLAF, K. Quality studies on various types of partially dried vegetables texturized by controlled sudden decompression:

General patterns for the variation of the expansion ratio. **Journal of food engineering**, v. 65, n. 2, p. 245-253, 2004.

MADIOULI, J.; SGHAIER, J.; LECOMTE, D.; SAMMOUDA, H. Determination of porosity change from shrinkage curves during drying of food material. **Food and bioproducts processing**, v. 90, n.1, p. 43-51, 2012.

MEDA, V. **The microwave processing of foods**. Cap. 4: Microwave heating and the dielectric properties of foods. Editado por SHUBERT, H.; REGIER, M. Flórida: CRC Press LLC, v.1, 2005.

MEREDITH, R. **Engineers' handbook of industrial microwave heating**. The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1998.

MONTEIRO, R. L.; LINK, J. V.; TRIBUZI, G.; CARCIOFI, B. A.; LAURINDO, J. B. Microwave vacuum drying and multi-flash drying of pumpkin slices. **Journal of Food Engineering**, v. 232, p. 1-10, 2018.

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

MONTEIRO, R.L.; CARCIOFI, B.A.M.; MARSAIOLI JR. A.; LAURINDO, J.B. How to make a microwave vacuum dryer with turntable. **Journal of Food Engineering**, v. 166, p. 276-284, 2015.

MOTEVALI, A.; MINAEI, S.; BANAKAR, A.; GHOBADIAN, B.; KHOSHTAGHAZA, M.H. Comparison of energy parameters in various dryers. **Energy Conversion and Management**, v. 87, p. 711-725, 2014.

MOUNIR, S.; TÉLLEZ-PÉREZ, C.; ALONZO-MACÍAS, M.; ALLAF, K. Instant controlled pressure drop (DIC) in food processing. **Food Engineering Series**. Springer New York, New York, NY, 2014.

MOUNIR, S; ALLAF, K. Three-stage spray drying: new process involving instant controlled pressure drop. **Drying Technology**, v. 26, n. 4, p. 452-463, 2008

MOUSA, N.; FARID, M. Microwave vacuum drying of banana slices. **Drying Technology**, v. 20, n. 10, p. 2055-2066, 2002.

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

MURTA, B. H. P.; ANDREANI, P.; CARCIOFI, B. A. M; GIUSTINO TRIBUZI, MORAES, J.O.; PAUL, S. Challenges on developing an acoustical measurement system for applications in food engineering. **Anais do 15º Congresso de Engenharia de Áudio da AES Brasil**, 2017.

NELSON, S. O. **Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications**. Athens: Elsevier Inc., 2015.

NELSON, S.; FORBUS, W.; LAWRENCE, K. Permittivities of fresh fruits and vegetables at 0.2 to 20 GHz. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v. 29, n. 2, p. 81-93, 1994.

NELSON, S.A.; DATTA, A.K. **Handbook of Microwave Technology for Food Applications**. Cap. 3: Dielectric Properties of Food Materials and Electric Field Interactions. Editado por DATTA, A.K.; ANANTHESWARAN, R.C. New York: Marcel Dekker Inc., 2001.

NELSON, S. O. Microwave dielectric properties of fresh fruits and vegetables. **Transactions of the ASAE**, v. 23, n. 5, p. 1314-1317, 1980.

OETJEN, G. W.; HASELEY, P. **Freeze Drying Second, Completely Revised and Extended Edition**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN, v. 978, p. 3-527, 2004.

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.

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

ORIKASA, T.; KOIDE S.; OKAMOTO S; IMAZUMI T.; MURAMATSU Y.; TAKEDA J.; SHIINA T.; TAGAWA A. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices. **Journal of Food Engineering**, v. 125, p. 51-58, 2014.

OSUNDAHUNSI, O. F.; FAGBEMI, T. N.; KESSELMAN, E.; SHIMONI, E. Comparison of the physicochemical properties and pasting characteristics of flour and starch from red and white sweet potato cultivars. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 8, p. 2232-2236, 2003.

PANASONIC. Tecnologia Inverter. Disponível em: <http://www.panasonic.com/br/consumidor/eletrodomesticos-learn/technology/inverter.html>. Acessado em 1 de fevereiro de 2016.

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.

PAULA, A. M.; CONTI-SILVA, A. C. Texture profile and correlation between sensory and instrumental analyses on extruded snacks. *Journal of Food Engineering*, v. 121, p. 9-14, 2014.

PELEG, M. On fundamental issues in texture evaluation and texturization—A view. **Food Hydrocolloids**, v. 20, n. 4, p. 405-414, 2006.

PEYRE, F.; DATTA, A.; SEYLER, C. Influence of the dielectric property on microwave oven heating patterns: application to food materials. **Journal of microwave power and electromagnetic energy**, v. 32, n. 1, p. 3-15, 1997.

PHILIPP, C.; BUCKOW, R.; SILCOCK, P.; OEY, I. Instrumental and sensory properties of pea protein-fortified extruded rice snacks. **Food Research International**, v. 102, p. 658-665, 2017.

PIAZZA, L.; GIOVENZANA, V. Instrumental acoustic-mechanical measures of crispness in apples. **Food Research International**, v. 69, p. 209-215, 2015.

PORCIUNCULA, B. D. A.; SEGURA, L. A.; LAURINDO, J. B. Processes for controlling the structure and texture of dehydrated banana. **Drying Technology**, v. 34, n. 2, p. 167-176, 2016.

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

PRAKASH, O.; KUMAR, A. Solar greenhouse drying: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 905-910, 2014.

PUSCHNER, P. **The microwave processing of foods**. Cap. 14: Improving microwave process control. Editado por SCHUBERT, H.; REGIER, M. Flórida: CRC Press LLC, v.1, 2005.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. **Journal of food engineering**, v. 49, n. 4, p. 311-319, 2001.

RISMAN, P.O. Confined modes between a lossy slab load and a metal plane as determined by a waveguide trough model. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, v. 29, n. 3, p. 161-170, 1994.

RYYNÄNEN, S.; RISMAN, P.O.; OHLSSON, T. Hamburger composition and microwave heating uniformity. **Journal of food science**, v. 69, n. 7, p. 187-196, 2004.

SACA, S.A.; LOZANO, J.E. Explosion puffing of bananas. **International journal of food science & technology**, v. 27, n. 4, p. 419-426, 1992.

SADIKU, M.N.O. **Elementos de eletromagnetismo**. 5ª ed. Porta Alegre: Bookman, 2012.

SAELEAW, M.; SCHLEINING, G. A review: Crispness in dry foods and quality measurements based on acoustic-mechanical destructive techniques. **Journal of Food Engineering**, v. 105, n. 3, p. 387-399, 2011.

SALGADO, S. M.; FARO, Z. P. D.; GUERRA, N. B.; LIVERA, A. V. S. Aspectos físico-químicos e fisiológicos do amido resistente. **Boletim CEPPA**, v. 23, n. 1, p. 109-122, 2005.

SALVADOR, A.; VARELA, P.; SANZ, T.; FISZMAN, S. M. Understanding potato chips crispy texture by simultaneous fracture and acoustic measurements, and sensory analysis. **LWT-Food Science and Technology**, v. 42, n. 3, p. 763-767, 2009.

SANZ, T.; PRIMO-MARTÍN, C.; VAN VLIET, T. Characterization of crispness of French fries by fracture and acoustic measurements, effect of pre-frying and final frying times. **Food Research International**, v. 40, n. 1, p. 63-70, 2007.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M.J.E. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical chemistry**, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, 1964.

SCAMAN, C.H.; DURANCE, T.D. **Emerging Technologies for Food Processing**. Cap. 19: Combined Microwave Vacuum-drying. Editado por SUN, D. W. London: Elsevier Academic Press, 2014.

SCHUBERT, H.; REGIER M. **The Microwave Processing of Foods**. Cap.1 Introducing microwave processing of food: principles and technologies. Editado por SCHUBERT, H.; REGIER M. Florida: CRC Press. v.1, 2005.

SEAMAN, R.; SEALS, J. Fruit pulp and skin dielectric properties for 150 MHz to 6400 MHz. **Journal of microwave power and electromagnetic energy**, v. 26, n. 2, p. 72-81, 1991.

SEBERA, V.; NASSWETTROVÁ, A.; NIKL, K. Finite element analysis of mode stirrer impact on electric field uniformity in a microwave applicator. **Drying Technology**, v. 30, n. 13, p. 1388-1396, 2012.

SEGURA, L. A.; BADILLO, G. M.; ALVES-FILHO, O. Microstructural Changes of Apples (Granny Smith) During Drying: Visual Microstructural Changes and Possible Explanation from Capillary Pressure Data. **Drying technology**, v. 32, n. 14, p. 1692-1698, 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, n. 3, p. 455-469, 2007.

SETIADY, D.; TANG, J.; YOUNCE, F.; SWANSON, B. A.; RASCO, B. A.; CLARY, C. D. Porosity, color, texture, and microscopic structure of russet potatoes dried using microwave vacuum, heated air, and freeze

drying. **Applied engineering in agriculture**, v. 25, n. 5, p. 719-724, 2009.

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.

SULLIVAN, J. F.; KONSTANCE, R. P.; ACETO, N. C.; HEILAND, W. K.; CRAIG, J. C. Continuous explosion-puffing of potatoes. **Journal of Food Science**, v. 42, n. 6, p. 1462-1463, 1977.

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

ŠUMIC, Z.; TEPIC, A.; VIDOVIC, S.; JOKIC, S.; MALBAŠA, R. Optimization of frozen sour cherries vacuum drying process. **Food chemistry**, v. 136, n. 1, p. 55-63, 2013.

TANG, J. **The microwave processing of foods**. Cap. 2: Dielectric properties of foods. Editado por SHUBERT, H.; REGIER, M. Flórida: CRC Press LLC, v.1, 2005.

TANG, J.; FENG, H.; LAU, M. **Advances in bioprocessing engineering**. Cap 1: Microwave heating in food processing. Editado por YANG. X.H.; TANG. J. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., v.1, p.1-44, 2002.

TRIBUZI, G.; LAURINDO, J. B. Dehydration and Rehydration of Cooked Mussels. **International Journal of Food Engineering**, v.12, n.2, p. 173-180, 2016.

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, n. 9, p. 1119-1124, 2014.

TULASIDAS, T. N.; RAGHAVAN, G. S. V.; NORRIS, E. R. Effects of dipping and washing pre-treatments on microwave drying of grapes. **Journal of Food Process Engineering**, v. 19, n. 1, p. 15-24, 1996.

VAN ARSDEL, W.B. **Food Dehydration**. Vol. I. Principles. AVI Publishing Company, Inc., Westport, CT., 1963.

VAN HECKE, E.; ALLAF, K.; BOUVIER, J. M. Texture and structure of crispy-puffed food products part ii: mechanical properties in puncture. **Journal of texture studies**, v. 29, n. 6, p. 617-632, 1998.

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, n. 4, p. 361-367, 2001.

VICKERS, Z. M. Pleasantness of food sounds. **Journal of Food Science**, v. 48, n. 3, p. 783-786, 1983.

VICKERS, Z. M. Sensory, Acoustical, and Force-Deformation Measurements of Potato Chip Crispness. **Journal of Food Science**, v. 52, n. 1, p. 138-140, 1987.

VON HIPPEL, A. **Dielectrics and Waves**, New York: Wiley, 1954.

WAËPPLING-RAAHOLT, B.; OHLSSON. T. **The microwave processing of foods**. Cap. 15: Improving the heating uniformity in microwave processing. Editado por SHUBERT, H.; REGIER, M. Flórida: CRC Press LLC, v.1, 2005.

WANG, S.; YANG, R.; HAN, Y.; GU, Z. Effects of magnetron arrangement and power combination on temperature field uniformity of microwave drying of carrot. **Drying Technology**, v. 34, n. 8, p. 912-922, 2016.

YAM, K. L.; LAI, C. C. **Handbook of food science, technology, and engineering**. Cap 113: Microwavable frozen food or meals. Editado por HUI, Y. H. et al., New York: CRC press. v.1, 2006.

YAN, Z.; SOUSA-GALLAGHER, M. J.; OLIVEIRA, F. A. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. **Journal of food engineering**, v. 84, n. 3, p. 430-440, 2008.

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.

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, n. 10, p. 524-534, 2006.

ZHANG, H.; DATTA, A.K.; **Handbook of Microwave Technology for Food Applications**. Cap. 2: Electromagnetics of Microwave Heating: Magnitude and Uniformity of Energy Absorption in an Oven. Editado por DATTA, A.K.; ANANTHESWARAN, R.C. New York: Marcel Dekker Inc., 2001.

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

ZLOTORZYNSKI, A. The application of microwave radiation to analytical and environmental chemistry. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, v. 25, n. 1, 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. 108, n. 4, p. 523-531, 2012.



## Anexo A



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

### TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

**Título do estudo:** Medidas simultâneas mecânicas e acústicas de frutas e hortaliças texturizadas por diferentes métodos e correlação com medidas sensoriais.

**Pesquisador responsável:** João Borges Laurindo, Departamento de Engenharia Química e de Alimentos - EQA. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Centro Tecnológico – CTC. Campus Universitário – Trindade. Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI). Telefone: 3721-6442.

Eu João Borges Laurindo, responsável pela pesquisa “Medidas simultâneas mecânicas e acústicas de frutas e hortaliças texturizadas por diferentes métodos e correlação com medidas sensoriais”, o convido a participar como voluntário deste nosso estudo. Esta pesquisa pretende realizar medidas mecânicas e acústicas de forma simultânea de batata-doce texturizada por diferentes métodos de secagem e correlacionar estes resultados instrumentais com medidas sensoriais. A medida da crocância de alimentos secos é importante como uma avaliação da qualidade do produto, bem como, uma exigência do consumidor. Para sua realização será feito o teste sensorial com uma escala hedônica de 9 pontos. Sua participação consistirá em provar as amostras de batata-doce desidratadas, e preencher a ficha sensorial de acordo com suas opiniões sobre o produto. Os produtos oferecidos são seguros, processados obedecendo às normas de Boas Práticas de Fabricação, portanto de boa qualidade, porém pessoas com alergia ou hipersensibilidade a batata-doce, acometidos de congestão nasal e alguma indisposição momentânea não poderão realizar a análise. Os provadores, muito raramente, poderão apresentar desconforto estomacal devido à intolerância ao ingerir o produto desidratado. A participação na pesquisa não resultará em benefício direto para você, bem como não haverá benefício financeiro pela participação e nenhum custo. Esta pesquisa trará benefícios para o conhecimento de

Comitê de Ética em Pesquisa da UFSC: Prédio Reitoria II R:  
Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 401, Trindade, Florianópolis/SC  
CEP 88.040-400 Contato: (48) 3721-6094 cep.propesq@contato.ufsc.br

diferentes técnicas de secagem e de correlação entre análises mecânicas e sensoriais de textura.

Durante todo o período da pesquisa você terá a possibilidade de tirar qualquer dúvida ou pedir qualquer outro esclarecimento. Para isso, entre em contato com algum dos pesquisadores ou com o Conselho de Ética em Pesquisa. Em caso de algum problema relacionado com a pesquisa, você terá direito à assistência gratuita que será prestada no HUSC da UFSC.

Você tem garantido de que receberá uma via do TCLE, de acordo com o item IV.3 (f) da Resolução 466/2012 e a possibilidade de não aceitar participar ou de retirar sua permissão a qualquer momento, sem nenhum tipo de prejuízo pela sua decisão. As informações desta pesquisa serão confidenciais e poderão ser divulgadas, apenas, em eventos ou publicações, sem a identificação dos voluntários, a não ser entre os responsáveis pelo estudo, sendo assegurado o sigilo sobre sua participação. Também serão utilizadas imagens para mera ilustração. Os gastos necessários para a sua participação na pesquisa serão assumidos pelos pesquisadores. Fica, também, garantida indenização em casos de danos comprovadamente decorrentes da participação na pesquisa.

Esta pesquisa foi submetida ao comitê de ética em pesquisa da UFSC e está de acordo com a Resolução N° 466, de 12 de dezembro de 2012 e suas complementares, sob protocolo 51164015.9.0000.0121.

Eu, João Borges Laurindo, responsável pela pesquisa declaro o cumprimento das exigências contidas na Resolução CNS 466/2012.

### **Autorização**

Eu, \_\_\_\_\_,  
após a leitura ou a escuta da leitura deste documento e ter tido a oportunidade de conversar com o pesquisador responsável, para esclarecer todas as minhas dúvidas, estou suficientemente informado, ficando claro que minha participação é voluntária e que posso retirar este consentimento a qualquer momento sem penalidades ou perda de qualquer benefício. Estou ciente também dos objetivos da pesquisa, dos procedimentos aos quais serei submetido, dos possíveis danos ou riscos deles provenientes e da garantia de confidencialidade, bem como de esclarecimentos sempre que desejar. Diante do exposto e de espontânea vontade, expresso minha concordância em participar deste estudo.

\_\_\_\_\_  
Assinatura do voluntário

\_\_\_\_\_  
João Borges Laurindo  
(Responsável pela pesquisa)

Comitê de Ética em Pesquisa da UFSC: Prédio Reitoria II R:  
Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 401, Trindade, Florianópolis/SC  
CEP 88.040-400 Contato: (48) 3721-6094 cep.propesq@contato.ufsc.br

## Anexo B

Fichas da análise sensorial de aceitação, de intenção de compra e de preferência.

Nome: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

Sexo: ( ) M ( ) F

Idade: \_\_\_\_\_

### TESTE DE ACEITAÇÃO

Você está recebendo quatro amostras codificadas de batata-doce desidratadas. Por favor, avalie os atributos na tabela abaixo de acordo com a escala apresentada. Entre uma amostra e outra beba água.

- (9) Gostei muitíssimo
- (8) Gostei muito
- (7) Gostei regularmente
- (6) Gostei ligeiramente
- (5) Indiferente
- (4) Desgostei ligeiramente
- (3) Desgostei regularmente
- (2) Desgostei muito
- (1) Desgostei muitíssimo

AMOSTRA	APARÊNCIA	COR	SABOR	TEXTURA	IMPRESSÃO GLOBAL

Comentário: \_\_\_\_\_

### TESTE DE ORDENAÇÃO DE PREFERÊNCIA

Avalie cada uma das amostras e coloque seus códigos em ordem crescente de preferência.

Menos Gostou

\_\_\_\_\_

Mais Gostou

### AVALIAÇÃO SENSORIAL DE INTENÇÃO DE COMPRA

Por favor, indique na tabela abaixo qual seria sua atitude em relação à compra dos produtos que acabou de experimentar de acordo com a seguinte escala:

- (5) Certamente eu compraria
- (4) Provavelmente eu compraria
- (3) Talvez sim/ Talvez não
- (2) Provavelmente eu não compraria
- (1) Certamente eu não compraria

AMOSTRA	INTENÇÃO DE COMPRA

Obrigado por participar da avaliação! Sua colaboração é muito importante para este estudo!

## Anexo C

## Tabela de Christensen et al. (2006).

Critical ranges for ranked data . . .

**Table 2 – Maximum distance between samples (continued from previous page)**Critical values of differences between rank sums,  $P = 0.05$ 

Nr of panelists	Nr of samples										
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
47	22	32	40	52	62	72	82	92	103	113	
48	23	32	41	52	62	72	82	93	104	115	
49	23	33	41	52	62	73	84	94	105	116	
50	23	33	41	53	64	74	85	96	105	117	
51	24	34	42	54	64	75	86	96	108	119	
52	24	34	42	54	64	75	86	97	108	121	
53	24	34	43	55	66	76	87	97	110	121	
54	24	35	43	55	66	77	88	99	110	122	
55	24	35	43	56	66	78	89	100	112	123	
56	24	35	44	56	67	78	90	101	113	124	
57	25	36	44	57	67	79	90	103	114	125	
58	25	35	44	57	68	79	91	103	115	128	
59	25	36	45	57	70	80	92	103	116	128	
60	25	36	45	58	70	82	93	104	116	129	
61	26	37	45	58	71	82	93	106	117	130	
62	26	37	47	59	71	83	95	107	118	130	
63	26	37	46	60	72	83	95	107	119	131	
64	27	37	47	60	72	84	96	107	120	133	
65	27	38	47	60	73	84	96	109	121	135	
66	27	38	47	61	72	85	96	110	123	136	
67	27	38	48	61	74	85	97	110	123	137	
68	27	39	48	62	74	87	99	111	124	138	
69	27	39	49	62	75	87	100	112	124	138	
70	28	39	49	63	75	87	100	113	126	139	
71	28	40	50	64	75	88	101	114	127	139	
72	28	40	50	64	76	90	102	115	127	142	
73	28	40	50	64	76	90	102	115	129	142	