

Isadora Monteiro Andrade Barreto

**OBTENÇÃO DE BATATAS *CHIPS* CROCANTES E LIVRES DE
ÓLEO EM SECADOR DE MICRO-ONDAS A VÁCUO**

Tese 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. Área de concentração: Transferência de Calor e Massa na Indústria de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi

Florianópolis
2016

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

Barreto, Isadora Monteiro Andrade

Obtenção de Batatas *Chips* Crocantes e Livres de Óleo em Secador de Micro-ondas a Vácuo / Isadora Monteiro Andrade Barreto ; orientador, João Borges Laurindo ; coorientador, Bruno Augusto Mattar Carciofi. - Florianópolis, SC, 2016.

130 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Alimentos. 2. Secagem. 3. Micro-ondas. 4. Batata *chips*. 5. Textura. I. Laurindo, João Borges. II. Carciofi, Bruno Augusto Mattar. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Alimentos. IV. Título.

Isadora Monteiro Andrade Barreto

**OBTENÇÃO DE BATATAS *CHIPS* CROCANTES E LIVRES DE
ÓLEO EM SECADOR DE MICRO-ONDAS A VÁCUO**

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

Florianópolis, 19 de outubro de 2016.

Prof. Bruno Augusto Mattar Carciofi Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. João Borges Laurindo, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Bruno Augusto Mattar Carciofi Dr.
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Luiza Helena Meller da Silva, Dr.^a
Universidade Federal do Pará (Videoconferência)

Prof. Antonio Manoel da Cruz Rodrigues, Dr.
Universidade Federal do Pará (Videoconferência)

Prof.^a Alcilene Rodrigues Monteiro Fritz, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. José Carlos Cunha Petrus, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. José Antonio Ribeiro de Souza, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família, em especial a minha mãe, Ana Cristina.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus que me ilumina, me guia e me abençoa com uma vida repleta de pessoas e experiências maravilhosas.

Ao professor João Borges Laurindo pela orientação, pelos ensinamentos, pela paciência, e pelo apoio à realização desse estudo.

Ao professor Bruno Carciofi pela coorientação, pelos ensinamentos repassados e pelas colaborações a esse estudo.

Ao relator e aos membros da banca examinadora por aceitar avaliar esse estudo e pelas suas contribuições.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos pela contribuição na minha formação.

À professora Neila Richards pela ajuda, incentivo e amizade durante um dos momentos mais difíceis dessa etapa.

Às minhas queridas ICs, Mariane Fabiane e Natália Buratto, pela parceria, incentivo e ajuda nos experimentos. Vocês tornaram nossos finais de semana de trabalho mais alegres.

Ao João Paulo pela disponibilidade, boa vontade e paciência na montagem dos equipamentos.

Às minhas irmãs de coração, Leandra Constantino, Manuela Balen, Marlene Bampi, Jacqueline Pires e Priscilla Prattes pela amizade, conselhos e momentos especiais divididos. Obrigada por muitas vezes serem minha família aqui.

À minha mãe Ana Cristiana pelo amor, carinho e incentivo. Por ser meu pilar e por não medir esforços para me ajudar a conquistar meus objetivos.

À minha grande família, minha avó querida, as tias, os irmãos, primos e sobrinhos todos, pelo apoio, preocupação, atenção e amor.

Ao Tadeu pelos lanches nas madrugadas de estudo, pela companhia nos finais de semana de laboratório, pelo apoio e carinho a mim dedicado durante parte dessa jornada.

À turma do Programa de Pós-graduação do ano de 2012 pelos grupos de estudos, pelas muitas amizades e pelas confraternizações. Levarei vocês comigo sempre!

Aos demais colegas do PROFI que muitas vezes contribuíram para a realização desse estudo.

A CAPES pela bolsa de estudos.

“Saiba que você é um eterno aprendiz. Não subestime ninguém. Cada ocasião e cada pessoa tem algo a ensinar. O mundo é seu professor.”

(Sri Sri Ravi Shankar)

RESUMO

Processos de branqueamento e secagem com micro-ondas foram estudados para a obtenção de batatas *chips* crocantes e livres de óleo de fritura. As secagens com micro-ondas foram realizadas em diferentes condições de vácuo para esse fim. Para isso, um secador de micro-ondas de 3 kW de potência foi construído e validado, de maneira a permitir a determinação experimental de temperaturas e curvas de secagem em tempo real. O secador construído pode operar com amostras em bandejas ou em tambor rotativo, além de permitir a aplicação de vácuo contínuo (processo MV) ou de vácuo intermitente (aplicação de múltiplos pulsos de vácuo, processo MPV). Fatias de batata inglesa (*Solanum Tuberosum L.*) de 5 mm de espessura foram branqueadas e secadas por MV e MPV, utilizando densidades de potência entre 2 e 6 W/g. O processo MV foi realizado a pressão de 3 kPa. Para o processo MPV as amostras foram aquecidas no campo de micro-ondas até aproximadamente 80 °C, com aplicação de três pulsos de vácuo de 3 kPa. Os efeitos dos processos sobre a cinética de secagem, atividade de água, cor, porosidade, microestrutura e propriedades mecânicas foram investigados. Os processos de branqueamento influenciaram nas características de textura e microestrutura do produto final desidratado. O teor de umidade de $0,229 \pm 0,056$ foi atingido após cerca de 60 ± 6 min de secagem para ambos os processos. A cor das amostras não foi influenciada pelo processo de secagem, devido à baixa temperatura mantida durante o processamento e o curto tempo de secagem. Ensaios mecânicos realizados com as batatas *chips* obtidas por MPV mostraram curvas força-deformação com um elevado número de picos de alta amplitude. Este comportamento é considerado característico de produtos crocantes. As variáveis de processo obtidas para a secagem com bandeja foram utilizadas na secagem em tambor rotativo em escala piloto. O tempo de secagem foi reduzido em 29% quando comparado com a secagem em bandeja, mantendo-se a qualidade do produto. Os resultados obtidos mostram que a produção de batata *chips* crocante e livre de óleo desidratada por secagem por micro-ondas com múltiplos ciclos de aquecimento – pulso de vácuo (MPV) é uma alternativa com possibilidades de aplicação industrial, tendo em vista os tempos reduzidos de processo e a possibilidade de produção em grande escala.

Palavras-chave: Secagem, micro-ondas, batata *chips*, textura, microscopia, ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.

ABSTRACT

In this study, the blanching and drying processes were investigated to obtain crispy and oil free potato chips. With this aim, microwave vacuum drying was used. A microwave dryer, with nominal power of 3 kW, that allow the experimental determination of temperature and drying curves was constructed. Dryer can be operated with samples disposed in trays or in a rotary drum, it also allows the continuous (process MV) or intermittent (application of multiple vacuum pulses, MPV process) application of vacuum. Sliced potato (*Solanum tuberosum L.*), 5 mm thick, were blanched and dried by MV and MPV drying processes using power densities between 2 and 6 W/g. The MV process was carried out at a pressure of 3 kPa. For the MPV process the samples were heated in the microwave field up to approximately 80 °C, thus a vacuum pulse (3 kPa) was applied, this heating-vacuum pulses cycle was performed three times. The effects of the process conditions on the drying kinetics, water activity, color, porosity, microstructure and mechanical properties were investigated. The blanching processes influence on the microstructure and texture characteristics of the final product dried. A moisture content of 0.229 ± 0.056 was reached after about 60 ± 6 min of drying for both processes. The color of the samples was not influenced by drying process due to the low temperature maintained during processing and to the short drying time. Mechanical tests performed with the potato chips obtained by MPV process showed a force-strain curves with a large number of peaks with high amplitude. This behavior is considered characteristic of crispy products. The process variables obtained by drying potato chips on the tray were used in the pilot scale tumble microwave drier. The drying time was reduced by 29% when compared to the drying on tray, maintaining the same product quality. The results obtained show that the crispy, oil-free potato chips production by microwave drying with multiple heating cycles - vacuum pulse (MPV) is an alternative to the industrial application, considering the reduced time of process and the possibility of large scale production.

Keywords: Drying, microwave, potato chips, texture, microscopy, multi-flash drying.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	29
INTRODUÇÃO.....	29
1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31
CAPÍTULO 2.....	33
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
2.1 BATATA INGLESA (<i>Solanum tuberosum L.</i>).....	33
2.2 BATATA CHIPS.....	34
2.3 PRÉ-TRATAMENTOS.....	35
2.3.1 Branqueamento.....	35
2.3.2 Impregnação a vácuo.....	37
2.4	
SECAGEM.....	38
2.4.1 Secagem por micro-ondas.....	39
2.4.1.1 Propriedades dielétricas.....	40
2.4.1.2 Secagem por micro-ondas sob vácuo.....	41
2.4.2 Secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV).....	42
2.5 TEXTURA.....	43
2.6 POROSIDADE.....	43
2.7 MICROESTRUTURA DE ALIMENTOS.....	44
2.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
CAPÍTULO 3.....	51
CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE SECADOR EM ESCALA PILOTO COM AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS E APLICAÇÃO DE VÁCUO.....	51
3.1 INTRODUÇÃO.....	51
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	52
3.2.1 Descrição do dispositivo experimental.....	52

3.2.2 Montagem do sistema de resfriamento do magnetron e <i>dummy load</i>	54
3.2.3 Instrumentação do secador com sistema de pesagem <i>on-line</i> e sensores de temperatura de fibra óptica.....	55
3.2.4 Verificação da eficiência do secador.....	58
3.2.5 Monitoramento <i>on-line</i> da temperatura e da perda de massa na secagem por micro-ondas sob vácuo.....	59
3.2.6 Estudo da descarga de plasma.....	60
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
3.3.1 Eficiência do secador.....	60
3.3.2 Validação do sistema <i>on-line</i> de pesagem e determinação da temperatura.....	61
3.3.2.1 Testes em branco.....	61
3.3.2.2 Testes com produto e determinação das condições de operação.....	65
3.3.2.3 Estudo da descarga de plasma.....	67
3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS.....	69
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
CAPÍTULO 4.....	73
INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PRÉ-TRATAMENTOS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MICROESTRUTURAIS DE FATIAS DE BATATAS.....	73
4.1 INTRODUÇÃO.....	73
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	74
4.2.1 Preparo das amostras.....	74
4.2.2 Pré-tratamentos das amostras.....	76
4.2.3 Equipamento experimental.....	76
4.2.4 Caracterização do produto branqueado.....	76

4.2.4.1 Cor.....	76
4.2.4.2 Índice de escurecimento (\emptyset).....	77
4.2.4.3 Teor de umidade.....	77
4.2.4.4 Atividade de água (a_w).....	77
4.2.4.5 Volume aparente (V_{ap}) densidade aparente (ρ_{ap}).....	78
4.2.4.6 Volume real.....	79
4.2.4.7 Porosidade (ε).....	80
4.2.4.8 Determinação da variação de massa (Δm).....	80
4.2.4.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	81
4.2.4.10 Análise estatística.....	81
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	82
4.3.1 Efeito do tempo de tratamento e dos diferentes processos de branqueamento no escurecimento enzimático.....	82
4.3.2 Variação de massa nas amostras branqueadas.....	84
4.3.3 Caracterização física e estrutural.....	86
4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS.....	88
4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
CAPÍTULO 5.....	91
ESTUDO DA SECAGEM COM MICRO-ONDAS SOB VÁCUO PARA OBTENÇÃO DE BATATAS CHIPS CROCANTES E LIVRES DE ÓLEO.....	91
5.1 INTRODUÇÃO.....	91
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	92
5.2.1 Obtenção da matéria-prima e preparo das amostras.....	92
5.2.2 Pré-tratamentos das amostras.....	92
5.2.3. Descrição dos experimentos.....	92
5.2.4. Cinética de Secagem.....	95
5.2.5. Caracterização do produto desidratado.....	95

5.2.5.1. Teor de umidade, atividade de água (a_w) e Cor.....	95
5.2.5.2 Determinação das propriedades mecânicas de textura.....	96
5.2.5.3 Volume aparente (V_{ap}), densidade aparente (ρ_{ap}), volume real (V_r) e porosidade (ϵ).....	96
5.2.5.4 Estereoscópio Óptico.....	96
5.2.5.5 Análise estatística.....	97
5.3.1. Caracterização da matéria-prima.....	97
5.3.2. Cinética de secagem.....	98
5.3.3 Caracterização das batatas <i>chip</i>.....	101
5.3.3.1 Propriedades físicas.....	101
5.3.3.2 Propriedades mecânicas de textura.....	104
5.3.3.3 Propriedades estruturais.....	108
5.4. CONCLUSÕES PARCIAIS.....	112
5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
CAPÍTULO 6.....	117
CONSTRUÇÃO DE TAMBOR ROTATIVO PARA PRODUÇÃO DE BATATA <i>CHIPS</i> EM LARGA ESCALA.....	117
6.1 INTRODUÇÃO.....	117
6.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	117
6.2.1 Obtenção da matéria-prima e preparo das amostras e pretratamento.....	118
6.2.2. Descrição dos experimentos.....	118
6.2.3 Dispositivo experimental.....	119
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	121
6.4. CONCLUSÕES PARCIAIS.....	125
6.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	125
CAPÍTULO 7.....	127

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	127
7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	127
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1– Batata inglesa (<i>Solanum tuberosum L.</i>).....	33
Figura 3. 1- Diagrama esquemático do dispositivo experimental.....	53
Figura 3. 2 - Configuração da cavidade para aplicação de micro-ondas, com localização dos principais itens. A- vista superior e B – vista frontal com corte transversal.....	54
Figura 3. 3 - Equipamentos com sistemas de resfriamento. Gerador de micro-ondas (A) e carga de água (dummy load) (B).....	55
Figura 3. 4 - Dispositivo experimental utilizado para investigar a cinética de secagem por micro-ondas.....	56
Figura 3. 5 - Tampa superior adaptada em aço inox.	57
Figura 3. 6 - Suporte-bandeja de polipropileno (a) localização dos sensores de fibra óptica (b).....	58
Figura 3. 7 - Suporte de polipropileno, bequer com água e sensores de temperatura de fibra óptica.....	59
Figura 3. 8 - Potência absorvida pela água em função da potência nominal do secador de micro-ondas.	61
Figura 3. 9 - Validação do sistema de pesagem durante aplicação de vácuo constante (a) e de pulsos de vácuo (b) sem suporte-bandeja – Teste 1.....	62
Figura 3. 10 - Validação do sistema de pesagem durante aplicação vácuo constante (a) e de pulsos de vácuo (b) com suporte-bandeja – Teste 2.	63
Figura 3. 11 - Temperatura da célula de carga durante o teste de secagem. Análise em duplicata.	65
Figura 3. 12 - Evolução temporal da (a) massa e (b) pressão de vácuo para secagem micro-ondas com aplicação de vácuo constante a 1 kPa.	66
Figura 3. 13 - Evolução temporal da (a) massa e (b) pressão de vácuo para secagem micro-ondas com aplicação de pulsos de vácuo.	67
Figura 3. 14 - Curva da potência crítica de descarga de plasma (PCDP) versus massa de batatas in natura, a 1 kPa de pressão.....	68
Figura 3. 15 - Curva da potência crítica de descarga de plasma (PCDP) versus pressão de vácuo do sistema, com 400g de amostras de batata in natura.....	69
Figura 4. 1- Fluxograma esquemático dos processos de impregnação a vácuo com aquecimento micro-ondas (IM), branqueamento convencional com água quente (BC) e branqueamento micro-ondas (BM).....	75
Figura 4. 2- Cesta para medição de amostras em solvente.....	78
Figura 4. 3 - Balança analítica, com gancho acoplado para medições em solventes.....	78

Figura 4. 4 - Diagrama esquemático do picnômetro de ar comprimido.	79
Figura 4. 5 - Fotografia ilustrativa do picnômetro construído no PROFI-UFSC.	80
Figura 4. 6 - Valores de L^* , medidos em batatas imediatamente depois dos processos de branqueamento (BC, BM e IM) e durante 5 h de armazenamento a temperatura de 25 °C. Efeito do escurecimento enzimático x tempo.	83
Figura 4. 7 - Valores de L^* , medidos em batatas imediatamente depois dos processos de branqueamento (BC, BM e IM) e durante 5 h de armazenamento a temperatura de 25 °C. Efeito do escurecimento enzimático x tempo.	83
Figura 4. 8 - Imagens das fatias de batatas após 5 h de armazenamento a temperatura de 25 °C.	84
Figura 4. 9 - Variação da massa das batatas em cada tratamento de branqueamento (em relação à amostra não branqueada) expressa em g por 100 g de batata in natura.	85
Figura 4. 10- Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do corte transversal de fatias de batata in natura com aumento de 30× (a1), 100× (a2) e 500× (a3).	87
Figura 4. 11- Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos cortes transversais de fatias de batatas branqueadas BC (b), BM (c) e IM (d) com aumento de 30 × (1), 100 × (2) e 500 × (3).	87
Figura 5. 1 - Fluxograma esquemático dos processos estudados neste capítulo. BC+MV – Branqueamento + Secagem por micro-ondas a vácuo. BC+MPV – Branqueamento + Secagem por micro-ondas com pulso de vácuo. BC+IM+MPV – Branqueamento + Impregnação a vácuo + Secagem por micro-ondas com pulso de vácuo e IM+MPV – Impregnação a vácuo + Secagem por micro-ondas com pulso de vácuo.	93
Figura 5. 2 - Diagrama esquemático do perfil pressão-temperatura-tempo para o processo de secagem por micro-ondas pulsos de vácuo (MPV).	94
Figura 5. 3 - Suporte-bandeja com amostras de batatas no interior da câmara do secador.	95
Figura 5. 4 - Ilustração da localização das perfurações nas amostras de batata durante os ensaios mecânicos.	96
Figura 5. 5 - Evolução temporal da umidade em base seca (Xbs) (a) e da taxa de secagem (dX/dt) (b) das amostras de batata durante a secagens BC+MV, BC+MPV, BC+IM+MPV e IM+MPV, realizadas em triplicata.	99

Figura 5. 6 - Evolução temporal da temperatura interna das fatias de batatas e da potência nominal de micro-ondas (-) durante as secagens MV e MPV.....	100
Figura 5. 7 - Fotografias de amostras de batatas chips obtidas por BC+MV, BC+MPV, IM+PV e BC+IM+MPV, respectivamente.	103
Figura 5. 8 - Curvas de força (N) x deformação relativa (%) de amostras de batata submetidas às técnicas de secagem por BC+MV, BC+MPV, IM+PV e BC+IM+MPV.	106
Figura 5. 9 - Número de eventos de força (picos) com intensidades maiores que 2,0 N e 8,0 N de força aplicada até a fratura, obtidos para as batatas chips BC+MV, BC+MPV, IM+PV e BC+IM+MPV.....	107
Figura 5. 10 - Força máxima de quebra (N) obtida para as batatas chips nos processos de BC+MV, BC+MPV, IM+PV e BC+IM+MPV.....	108
Figura 5. 11 - Imagens de MEV com ampliação de $\times 30$ e $\times 100$ para batata in natura , branqueada (BC), impregnada a vácuo (IM) e os processos combinados (BC+IM).....	110
Figura 5. 12 - Imagens de MEV com ampliação de $\times 30$ e $\times 100$ das batatas chips obtidas pelos processos de BC+MV, BC+IM+MPV e IM+PV.	111
Figura 5. 13 - Imagens do estereoscópio de amostras de batata chips obtidas pelos processos de secagem.....	112
Figura 6. 1 - Fluxograma esquemático dos processos estudados.....	118
Figura 6. 2 - Esquema do secador rotativo com aplicação de micro-ondas e vácuo.	120
Figura 6. 3- Desenhos do sistema de secagem com tambor rotativo. Vista lateral (a), vista isométrica do tambor dentro da câmara de secagem (b) e vista isométrica das peças do tambor rotativo (c).	120
Figura 6. 4- Imagens do tambor rotativo.	121
Figura 6. 5- Evolução temporal da umidade em base seca (Xbs) (a) e da taxa de secagem (dX/dt) (b) das 400 g e 1500 g amostras de batata obtidas pelo processo BC+IM+MPV, realizadas em triplicata.	122
Figura 6. 6 - Evolução temporal da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) das amostras de batata durante a secagens BC+IM+MPV (a), densidade de potência (DP (W/g)) (b) e potência nominal (W) aplicadas na secagem, realizadas em triplicata.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Composição média da batata (<i>Solanum tuberosum</i> L.), por g/100 g da parte comestível.....	34
Tabela 4. 1- Propriedades físicas das amostras de batata (<i>Solanum tuberosum</i> L.) in natura e branqueadas em diferentes por processos.....	86
Tabela 5. 1 - Caracterização físicas das amostras de batata in natura, branqueadas e impregnadas à vácuo.....	98
Tabela 5. 2 – Umidade final e atividade de água das amostras de batata chips desidratadas pelas diferentes técnicas estudadas.	101
Tabela 5. 3 - Dados de cor das amostras de batata in natura, branqueadas e desidratadas pelas técnicas estudadas.....	102
Tabela 5. 4 - Propriedades físicas das amostras de batatas in natura e desidratadas obtidas pelas diferentes técnicas de secagem.	103
Tabela 6. 1- Parâmetros dos processos de secagem MPV em tambor rotativo utilizados a obtenção das batatas chips em duas escalas de produção.....	119
Tabela 6. 2 - Tempo final do processo (t_f) e, atividade de água (a_w) e umidade em base seca (X_{bs}) das batatas obtidas pelos diferentes processos.	125

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A.O.A.C	<i>Association of Official Analytical Chemists</i>
BC	Branqueamento convencional (água quente)
BC+IM	Impregnação a vácuo e branqueamento convencional
BC+MPV	Secagem por micro-ondas com aplicação de múltiplos ciclo de aquecimento-pulsos de vácuo com amostras branqueadas convencionalmente
BC+IM+MPV	Secagem por micro-ondas com aplicação de múltiplos ciclo de aquecimento-pulsos de vácuo com amostras impregnadas a vácuo e branqueadas convencionalmente
BM	Branqueamento por aquecimento com micro-ondas
BC+MV	Secagem por micro-ondas a vácuo com amostras branqueadas convencionalmente
CAPV	Secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo
CMFD	<i>Convective multi-flash drying</i>
DP	Descarga de plasma
FAOSTAT	Divisão de estatística da FAO
FD	Liofilização
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IM	Impregnação a vácuo e aquecimento por micro-ondas
IM+MPV	IM+MPV - secagem por micro-ondas com aplicação de múltiplos ciclo de aquecimento-pulsos de vácuo com amostras impregnadas a vácuo

IV	Impregnação a vácuo
KMFD	<i>Conductive-multi-flash drying</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MWMFD	<i>Microwave multi-flash drying</i>
PID	Proporcional-integral-derivativo
PDCP	Potência crítica de descarga de plasma
PV	Pulso de vácuo
VD	Secagem a vácuo clássica
V	Vácuo constante

LISTA DE SÍMBOLOS

a_w	Atividade de água
a^*	Tonalidade vermelha/verde
b^*	Tonalidade amarela/azul
C_{pH_2O}	Calor específico da água (J/Kg.K)
dX/dt	Taxa de secagem (m/s)
ϵ	Porosidade
ϵ^*	
ϵ'	
ϵ''	
ΔE^*	Varição total da cor
FP	Força de penetração (kgf)
ΔH_v	Entalpia específica de vaporização da água na pressão final de trabalho (kJ kg^{-1})
L^*	Luminosidade entre o preto e branco
m	Massa da amostra (Kg)
m_0	Massa de amostra no início (kg)
$m_{c,b}$	Massa da cesta com a amostra (Kg)
m_c	Massa da cesta vazia (Kg)
$m_{c,m,h}$	Massa da cesta com a amostra imersa em <i>n</i> -heptano (Kg)
$m_{c,h}$	Massa da cesta vazia imersa em <i>n</i> -heptano (Kg)
m_d	Massa da amostra desidratada (Kg)
m_2	Massa de amostra após o experimento (kg)
m_1	Massa da amostra antes do experimento (g)
m_0	Massa inicial do produto (kg)
m_{H_2O}	Massa de água (Kg)

Δm	Varição da massa (Kg)
P	Pressão (kPa)
$(P_w^v)_{si}$	Pressão de vapor do sistema (kPa)
P_w^v	Pressão de vapor da água pura (kPa)
ρ_{ap}	Densidade aparente (kg cm^{-3})
ρ_r	Densidade real (kg m^{-3})
ρ_s	Densidade do solvente <i>n</i> -heptano (kg m^{-3})
ρ_v	Densidade do vapor na temperatura após a decompressão do sistema (g m^{-3})
t	Tempo de processo (s)
T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT	Varição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
UR	Umidade Relativa (%)
V_{ap}	Volume aparente da amostra (m^3)
V_r	Volume real da amostra (m^3)
ΔV	Varição do volume do sistema por unidade de massa (m^3/kg)
X_{bs}	Umidade em base seca (kg kg^{-1})
\emptyset	Ângulo Hue (adimensional)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A batata é a quinta *commodity* mais produzida no mundo (FAOSTAT, 2014). A sua industrialização gera uma variedade de produtos, como batata pré-cozida, batata palito pré-frita congelada, batata *chips*, batata palha, batata em cubo desidratada, fécula, flocos de batata, entre outros (PEDRESCHI, 2012). Dentre estes, a batata *chips* se destaca por sua popularidade mundial, sabor característico e textura crocante (SINGH e KAUR, 2016).

Batatas *chips* geralmente são produzidas por branqueamento em água em ebulição seguida de fritura em óleo vegetal, a temperaturas de 160 °C a 180 °C (PEDRESCHI e MERY, 2016). Neste processamento há uma rápida transferência de calor e massa, de forma simultânea, resultando na perda de água e absorção de óleo, obtendo-se um produto final com aproximadamente 40% de teor de gordura (GUPTA et al., 2010). Este efeito do processo é indesejável, pois a ingestão excessiva de gordura tem sido apontada como nociva para a saúde humana (KROKIDA e MAROULIS, 2001).

Desta forma, considerando-se a crescente demanda por produtos saudáveis, a investigação de processos alternativos à fritura convencional, que resultem em produtos saborosos e crocantes, com reduzido teor de óleo, é necessária (SONG et al., 2007). A secagem é uma alternativa para produção de produtos sem gordura, mas o encolhimento do tecido da batata durante a secagem com ar quente pode resultar em produtos com textura indesejável (TRONCOSO e PEDRESCHI, 2009).

Buscando uma solução para o problema do encolhimento excessivo de frutas e hortaliças desidratadas, Laurindo et al. (2011) desenvolveram processos para a produção desses produtos desidratados e crocantes. Os processos desenvolvidos por esses autores têm sido chamados de secagem por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (MPV) ou *Multi-flash drying* (MWMFD). Estes são baseados na aplicação de sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo aos alimentos em processo de secagem, sendo possível a obtenção de produtos desidratados com estrutura porosa e textura crocante. O aquecimento pode ser condutivo, convectivo, por radiação térmica ou por micro-ondas (ZOTARELLI et al., 2012; PORCIUNCULA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2016).

O objetivo deste estudo foi desenvolver um processo alternativo para a obtenção de batatas *chips* livre de óleo, com textura crocante, utilizando métodos de secagem por micro-ondas em condições de vácuo. A avaliação dos efeitos combinados do processo de branqueamento (pré-secagem) com o processo de secagem, na microestrutura e nas características de textura das batatas *chips* obtidas também fez parte dos objetivos centrais do estudo.

O documento está organizado em mais seis capítulos, como segue.

No Capítulo 2 apresenta-se a revisão da literatura sobre os temas explorados: descrição geral da matéria-prima e da batata *chips* convencional; princípios de secagem com aplicação de micro-ondas sob vácuo; o funcionamento do aquecimento por micro-ondas e quais os fenômenos nele envolvidos; descrição da secagem por múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (MPV) e, por fim, as alterações nas características de textura e de microestrutura dos materiais submetidos à secagem.

No Capítulo 3 apresentam-se a descrição, instrumentação e validação do secador em escala piloto utilizado neste trabalho, além das melhores condições de potência nominal e pressão de vácuo aplicadas para secagem de fatias de batata.

O Capítulo 4 apresenta dados do estudo da influência de diferentes métodos de branqueamento nas características físicas e microestrutura da batata. Os objetivos desta etapa da pesquisa foram selecionar os melhores processos de branqueamento com relação à inativação da polifenoloxidase e avaliar modificações da cor e da microestrutura das fatias de batatas.

O Capítulo 5 é dedicado ao estudo da combinação dos métodos de branqueamento com estratégias de secagem por micro-ondas, na obtenção de *chips* de batata crocantes e livre de óleo. Também foi estudada a influência das diferentes combinações nas características das cinéticas de secagem e do produto final desidratado.

O Capítulo 6 foi dedicado à construção de um tambor rotativo para secagem das batatas por micro-ondas e para o estudo das condições mais favoráveis dos processos descritos nos capítulos anteriores. Esse estudo é importante para o comportamento do processo de obtenção da batata *chips* em maior escala.

E por fim, no Capítulo 7 foram apresentadas as principais conclusões do presente estudo e foram sugeridas propostas de continuidade dos estudos de secagem por micro-ondas sob vácuo.

1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.faostat.fao.org> (acesso em 17.09.15.), 2014.

GUPTA, P.; SHIVHARE, U.S.; BAWA, A.S. Studies on frying kinetics and quality of French fries. **Drying Technology**, v. 18, n. 1–2, p. 311–321, 2010.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B. Structural properties of dehydrated products during rehydration. **International Journal Food Science Technology**, v. 36, n. 5, p. 529–538, 2001.

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 1107173-7, 2011.

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.

PEDRESCHI, F. Frying of potatoes: physical, chemical, and microstructural changes. **Drying Technology**, v.30, p. 707-725, 2012.

PEDRESCHI, F.; MERY, D. Quality Evaluation and Control of Potato *Chips*. In: *Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation*, Ed. 2, p. 591–613, 2016.

TRONCOSO, E.; PEDRESCHI, F. Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. **LWT—Food Science and Technology**, v. 42, p. 1164–1173, 2009.

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

SINGH J.; KAUR L. *Advances in Potato Chemistry and Technology*, Ed.2. 2016.

SONG, X-j.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S. Effect of vacuum-microwave pre-drying on quality of vacuum-fried potato *chips*. **Drying Technology**, v. 25, p. 2021–2026, 2007.

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

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

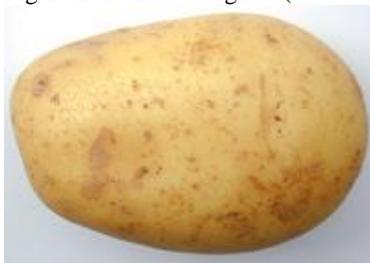
2.1 BATATA INGLESA (*Solanum tuberosum L.*)

A produção de batata inglesa tem aumentado rapidamente ao longo dos últimos anos, devido ao seu alto rendimento e valor nutricional (Figura 2.1) (ABBA, 2014). Em 2013 a batata alcançou uma produção mundial superior a 376 milhões de toneladas, sendo que a produção de países em desenvolvimento excede à dos países desenvolvidos (FAOSTAT, 2015).

Segundo dados do IBGE (2012), na primeira década do século XXI o Brasil produziu, em média, 3 milhões e duzentas mil toneladas de batata, uma quantidade 5,5 vezes maior do que na década de 40. Nesse período, a produtividade média de batata no Brasil cresceu de 4,95 toneladas por hectare para 21,37 toneladas por hectare, superando pela primeira vez a média mundial de 16,93 toneladas por hectare.

Batatas podem ser cultivadas a partir de sementes botânicas ou propagação vegetativa. Os “olhos” na superfície do tubérculo, que são, na verdade, gemas dormentes, dão origem a novos ramos (brotos), quando cultivados em condições adequadas. Uma batata germinada não é aceitável para consumo e processamento. Mas uma boa germinação é um atributo desejado quando os tubérculos são usados para propagação.

Figura 2. 1– Batata inglesa (*Solanum tuberosum L.*).



Fonte: Autor.

O tubérculo se desenvolve como um caule subterrâneo e é rico em amido e proteínas, vitaminas, minerais e oligoelementos. A composição média da batata é apresentada na Tabela 2.1.

A industrialização da batata cresceu a partir da década de 90, primeiramente para a fabricação de batata *chips* e posteriormente na

forma de batata palha. Em 2006 surgiu a industrialização em larga escala da batata na forma de palitos pré-fritos congelados, visando diminuir a importação que em 2010 foi de cerca de 200 mil toneladas. Atualmente a batata processada atinge 30% dos produtos consumidos no país (SHIMOYAMA, 2011).

Tabela 2.1- Composição média da batata (*Solanum tuberosum L.*), por g/100 g da parte comestível.

Constituinte	Valor por g/100 g
Umidade	82,9 %
Proteína	1,8 g
Lipídeos	Tr
Carboidratos	14,7 g
Fibra alimentar	1,2 g
Cinzas	0,6 g

Tr – traços

Fonte: NEPA-UNICAMP, 2011.

2.2 BATATA CHIPS

A indústria de lanches (*snacks*) produz dois tipos de batatas *chips*: batatas *chips* tradicionais feitos da batatas frescas e batatas *chips* reestruturadas, à base de ingredientes que contenham amido, como a farinha, grânulos e misturas de batata (BOUCHON e PYLE, 2004). Batatas *chips* reestruturadas não têm característica de sabor e textura semelhantes à batata *chips* tradicional; no entanto, elas têm como vantagens a uniformidade e ausência de defeitos (Canet e Alvarez, 2011).

Batatas *chips* tradicionais são finas fatias de batatas com teor de óleo e umidade final de aproximadamente 35% e 1,7%, respectivamente (MOREIRA et al., 1999). No processamento, batatas frescas são lavadas, descascadas e fatiadas, cuja forma e largura variam de acordo com as preferências dos consumidores. Em seguida, as fatias são lavadas para remover o excesso de amido e secas para eliminar a umidade superficial. Algumas indústrias utilizam branqueamento para melhorar a cor do produto final. Em seguida, as fatias são fritas, até atingir um teor de umidade final de aproximadamente 1,8%, e o excesso de óleo sobre as batatas *chips* é removido e o sal é adicionado. Por fim, as batatas *chips* são resfriadas, classificadas de acordo com seu tamanho e embaladas (BOUCHON et al., 2001).

Alimentos fritos são altamente saborosos, devido à formação de uma crosta crocante e do desenvolvimento de sabor único. No entanto, a batata *chips* contém uma significativa quantidade de gordura, chegando em muitos casos a um terço do peso do produto total (MELLEMA, 2003).

Além disso, devido às elevadas temperaturas e exposição ao oxigênio, a fritura causa efeitos indesejáveis ao produto, como a geração de moléculas tóxicas. A acrilamida e o furano, formados na reação de *Maillard*, além de produtos da oxidação de lipídios, constituem um elevado risco à saúde dos consumidores, indicados como causadores do câncer (PEDRESCHI, 2012).

Outras substâncias tóxicas formadas durante a fritura de batatas são carbamato de etila, aminas heterocíclicas, 5-hidroxiacetilfurfural, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e nitrosaminas (MARIOTTI et al, 2013).

Neste sentido, o branqueamento, combinado com o processamento térmico que ocorre em condições de secagem, é uma alternativa à fritura convencional, resultando em produtos mais saudáveis e de qualidade.

2.3 PRÉ-TRATAMENTOS

2.3.1 Branqueamento

O branqueamento é uma operação unitária utilizada durante a preparação de vegetais frescos antes de processos de conservação, como congelamento, fritura e desidratação. Seu principal objetivo é a inativação de enzimas responsáveis por reações de deterioração.

Em batatas, a duração do processo de branqueamento varia de acordo com o método utilizado, a variedade e tamanho do tubérculo. Entretanto, o principal fator que afeta tempo de processamento é a temperatura de branqueamento. Oxidases, peroxidases, catalases, e as lipoxigenases são inativadas durante o branqueamento, e a eficácia do tratamento é normalmente monitorada por medição da atividade da peroxidase, tendo em conta a sua elevada resistência ao calor (CANET, 1989). Entretanto, o branqueamento pode causar importantes perdas nutricionais e de outras características de qualidade do produto, tais como a textura, sabor e cor. (AUGUSTIN et al., 1979). O consumo de energia associado ao processo de branqueamento também é um aspecto a ser considerado.

Na produção de batatas fritas ou *chips*, o branqueamento é muito utilizado para reduzir o escurecimento enzimático, pela inativação da polifenoloxidase (SEVERINI et al., 2003), mas também tem efeitos sobre a textura e a absorção de óleo, que é reduzida (MIRANDA e AGUILERA, 2006). Com o aquecimento, ocorre a gelatinização do amido, que é um evento microestrutural importante no tecido da batata, pois afeta fortemente a lixiviação de alguns solutos importantes, tais como açúcares redutores, ácido ascórbico, e asparagina antes da fritura (AGUILERA et al., 2001). A redução do teor de açúcares, possibilita o controle da reação de *Maillard* durante a fritura, evitando o escurecimento excessivo das batatas *chips* (PEDRESCHI et al., 2004).

Os benefícios do uso de branqueamento diferem entre os autores. Moreira et al. (1999) afirmaram que fatias de batata frita quando branqueadas apresentam cor mais uniforme, além de formar uma camada de amido gelatinizada que limita a absorção de óleo e melhora a textura. Segundo Rimac-Brneić et al. (2004) o branqueamento afeta significativamente o teor de óleo de batatas fritas. Já Alvarez et al. (2000) observaram que o branqueamento leva à perda de firmeza e de outros atributos de qualidade do produto, como nutrientes, *flavor* e cor. Outros autores afirmam que o branqueamento promove também a redução da umidade da superfície e selagem dos poros intercelulares, devido à expansão celular, além de reduzir a carga microbiana (ONER e WALKER, 2011).

Severini et al. (2003) ao avaliarem como o tempo de tratamento e concentrações de cloreto de sódio ou de cálcio e ácido láctico afetaram no branqueamento de fatias de batata. Observaram que as amostras branqueadas apresentaram maiores valores de luminosidade (L^*) em comparação com as amostras que não foram branqueadas. Como desvantagem, concluíram que o branqueamento pode levar a uma redução da firmeza, devido à perda da pressão de turgor, pois o tratamento muda os constituintes das paredes da célula e leva ao amolecimento do produto. Além disso, mudanças em outros atributos de qualidade do produto, como nutrientes, sabor e cor podem ocorrer (ALVAREZ et al., 2000).

A indústria alimentícia tem se concentrado geralmente na inativação de microrganismos e enzimas pelo uso de eficientes métodos físicos que muitas vezes envolvem calor. O tratamento térmico ajuda na preservação do alimento, mas pode causar deteriorações, como perda de nutrientes, de massa e degradação das propriedades organolépticas do alimento (HE e LUO, 2007). Por isso, tem-se buscado métodos

alternativos para preservação de alimentos usando diferentes estratégias ou princípios físicos.

2.3.2 Impregnação a vácuo

Os alimentos sólidos, em geral, podem ser descritos como meios porosos. A matriz porosa que constitui o alimento possui regiões que podem estar preenchidas por líquidos e gases. No processamento de alimentos, define-se impregnação a vácuo (IV) o método de processamento pelo qual grande parte do ar e da solução nativa é removida do espaço poroso, presente no interior do alimento, e substituídos por uma solução externa (FITO, 1994; ZHAO e XIE, 2004).

O processo de impregnação a vácuo é caracterizado pela substituição dos fluidos aprisionados dentro dos poros por um líquido externo, devido aos gradientes de pressão promovidos pela aplicação de vácuo seguida da recuperação da pressão atmosférica. Assim, na impregnação a vácuo, o produto imerso na solução de interesse é submetido ao abaixamento de pressão por um determinado intervalo de tempo, suficiente para a degaseificação parcial (e/ou eliminação parcial de líquido) do alimento. Após este período, a pressão atmosférica é restabelecida, permanecendo o alimento submerso por outro intervalo de tempo. O fluido impregnante infiltra na matriz sólida até o estabelecimento do equilíbrio das pressões interna e externa à matriz porosa (FITO e PASTOR, 1994; FITO et al., 1996; MARTÍNEZ-MONZÓ et al., 1998).

Durante o período de aplicação de vácuo, os gases presentes nos poros se expandem, fluindo para fora do alimento até que a pressão interna se iguale à pressão externa a matriz. A ação das forças capilares promove a entrada de certa quantidade da solução impregnante para dentro dos poros. Após o retorno à pressão atmosférica, o gás que ainda permaneceu no interior dos poros é comprimido, com a impregnação dos poros do produto pela solução externa, até uma nova condição de equilíbrio de pressões. Este mecanismo implica numa rápida modificação da composição do produto, alterando as condições para a transferência de massa (SALVATORI et al., 1998).

A IV pode ser aplicada em inúmeros processos nos quais as interações entre um sólido poroso e um líquido estão presentes, tais como: i) salga (de presunto, aves, peixes, queijos), ii) desidratação osmótica de frutas, iii) acidificação, iv) adição de conservantes, v) adição de probióticos e prebióticos, vi) adição de reforçadores estruturais, vii) adição de agentes para redução do escurecimento

enzimático, viii) adição de componentes nutricionais, entre outros (FITO et al., 1996; GUAMIS et al., 1997; MARTÍNEZ-MONZÓ et al., 1998; SALVATORI et al., 1998; GONZALEZ et al., 1999; MARTÍNEZ-MONZÓ, et al., 2000; FITO et al., 2001; CHÁFER et al., 2002; BARAT et al., 2003; BETORET et al., 2003;; DEUMIER et al., 2003; BARAT et al., 2005; HOFMEISTER, et al., 2005; SCHMIDT, 2006; SCHMIDT et al., 2008).

As alterações promovidas na amostra durante a impregnação a vácuo são resultado não só do preenchimento dos poros pela solução externa, mas também da deformação da amostra, provocada pela variação da pressão sobre o sistema (FITO et al., 2001). Este preenchimento dos poros implica: a) no aumento da área de contato entre as células e a solução externa; b) numa abrupta mudança na força motriz do processo de transferência de massa, já que a composição total da amostra se modifica intensamente com a impregnação da solução e c) num aumento da área disponível para a transferência de massa por difusão para água e solutos (PAES, 2005).

Gras et al. (2002) estudaram a IV em vários vegetais cortados (beterraba, cenoura, berinjela, abobrinha, cogumelos), em termos de deformação do volume da amostra e de níveis de impregnação. Eles avaliaram as alterações na microestrutura de diferentes vegetais por microscopia eletrônica, e descobriram que a IV pode ser usada para preencher os espaços intercelulares na matriz vegetal. A IV de matrizes de alimentos porosos com soluções ou suspensões de compostos fisiologicamente ativos tem sido apontada como uma forma de obtenção de novos produtos, sem destruir a matriz alimentar inicial, mas apenas ocupando a sua fração porosa inicial com uma fase líquida (Fito et al., 2001).

No que diz respeito a IV de batatas, apenas dois estudos foram encontrados. Neles, batatas inteiras foram enriquecidas com ácido ascórbico (HIRONAKA et al., 2011) e com ferro (ERICHEMU, 2014). No entanto, não existem estudos sobre a influência do uso da impregnação a vácuo como pré-tratamento, na textura e microestrutura de fatias de batatas desidratadas.

2.4 SECAGEM

A secagem é um processo em que o principal objetivo é a remoção de água de um produto (alimento) através da evaporação. Para este fim, se faz necessário o fornecimento de calor através de um meio de secagem externo, para evaporar a umidade do produto. A secagem

aumenta a estabilidade microbiológica e bioquímica do produto e reduz seu peso e volume, diminuindo os custos com embalagem e transporte (GEANKOPLIS, 1993).

Na secagem com ar quente, a saída de umidade do produto é função do gradiente de umidade e de pressão de vapor, da difusividade mássica nas fases líquida e vapor, da distância difusiva do interior do produto para a superfície e da temperatura. Paralelamente, a transferência de calor do exterior para o interior do produto influencia diretamente a transferência de massa, caracterizando a secagem como um processo de transferência simultânea de calor e massa (SINGH e HELDMAN, 2009).

Os processos de secagem são diversos e muito utilizados no processamento de alimentos (KOYUNCU et al., 2007). Os processos estudados neste trabalho são apresentados a seguir.

2.4.1 Secagem por micro-ondas

Nas últimas décadas a literatura tem reportado cada vez mais pesquisas que utilizam micro-ondas em processos de secagem (OZKOC et al, 2014). O aquecimento na secagem por micro-ondas é causado pela capacidade dos materiais em absorver a energia das ondas eletromagnéticas e convertê-la em calor. Em alimentos, o aquecimento ocorre principalmente devido a mecanismos dipolares e iônicos.

A presença da água no alimento provoca o aquecimento dielétrico, devido à natureza dipolar da água, pois quando um campo elétrico oscilante é incidente sobre as moléculas de água, elas tentam realinhar-se na direção do campo elétrico. Devido à elevada frequência do campo elétrico, este realinhamento ocorre um milhão de vezes por segundo e provoca atrito interno das moléculas resultantes no aquecimento volumétrico do material. O aquecimento por micro-ondas também pode ocorrer devido à migração de íons no alimento, que geram calor na presença de um campo elétrico oscilante de alta frequência (DATTA e DAVIDSON, 2000).

O calor interno gerado durante o aquecimento por micro-ondas modifica a pressão de vapor dentro do produto, e este drena a umidade do interior para a superfície do alimento (TURNER e JOLLY, 1991). Assim, há o aumento das taxas de secagem sem aumento da temperatura da superfície, obtendo-se produtos de melhor qualidade.

No entanto, a adoção de secagem por micro-ondas em nível industrial tem sido relativamente lenta, por causa do elevado investimento inicial exigido. A não-uniformidade de aquecimento

relacionado às mudanças nas propriedades dielétricas do material com a diminuição do teor de umidade, e danos a estrutura relacionados a alta taxa de secagem, são outros problemas que dificultam a aplicação comercial de secagem por micro-ondas (ZHANG et al., 2006).

No entanto, estudos utilizando a combinação do aquecimento por micro-ondas com diferentes técnicas de secagem têm reportado vantagens, tanto em relação ao processo quanto à qualidade do produto. A combinação das micro-ondas com vácuo reduz o tempo de secagem e o encolhimento dos alimentos durante a secagem (ANDRES et al., 2004; CONTRERAS et al., 2008; HEREDIA et al., 2012; CLARY et al., 2005; ZHANG et al., 2003, 2005).

2.4.1.1 Propriedades dielétricas

A capacidade de um material de converter a energia de micro-ondas em calor pode ser compreendida pelo conhecimento de suas propriedades dielétricas. Com base na absorção de micro-ondas, os materiais são classificados em (i) absorvedores ou materiais com elevadas perdas dielétricas, que são intensos absorvedores de micro-ondas (ii) materiais transparentes ou de baixa perda dielétrica, que deixam a energia das micro-ondas passar através deles com pouca atenuação e (iii) opacos ou condutores, que refletem as micro-ondas (CHANDRASEKARAN et al., 2013).

Estas propriedades, juntamente com as propriedades térmicas, físicas, e as características dos campos eletromagnéticos de micro-ondas, determinam a absorção das ondas e o consequente aquecimento dos alimentos processados por micro-ondas (DATTA; ANANTHESWARAN, 2001).

As propriedades dielétricas de interesse são a constante dielétrica (ϵ') e a constante de perda dielétrica (ϵ''), que são, respectivamente, a parte real e imaginária da permissividade relativa, dada pela Equação 1:

$$\epsilon^* = \epsilon' - \epsilon'' \sqrt{-1} \quad (1)$$

A parte real (ϵ'), permissividade (ou constante) dielétrica, determina a capacidade de um material armazenar energia elétrica, por unidade de volume, e a parte imaginária (ϵ''), fator (ou constante) de perda, indica a capacidade do material de dissipar energia elétrica na forma de calor (DATTA; ANANTHESWARAN, 2001).

Em materiais higroscópicos, como produtos agrícolas, a quantidade de água no material é geralmente o fator dominante sobre

suas propriedades dielétricas. Além disso, as propriedades dielétricas também dependem da frequência do campo elétrico aplicado, da temperatura, densidade, composição e estrutura do material (NELSON, 2015).

Alguns autores estudaram as propriedades dielétricas de batatas e produtos de batata. Regier et al. (2001) realizaram um estudo para medir as propriedades dielétricas de purê de batatas em função da temperatura da amostra. A faixa de temperaturas utilizada foi entre 10 e 80 °C. Propriedades dielétricas foram medidas por reflexão (reflectory-line), usando cabo coaxial aberto, um dispositivo que utiliza o coeficiente de reflexão complexa do sistema. Para isso, a sonda fica em contato com a amostra durante a aplicação de um sinal elétrico em uma frequência de interesse (2,45 GHz). A onda refletida é usada para determinar a constante dielétrica complexa do material. Os autores observaram que ambos os valores medidos ϵ' e ϵ'' foram influenciados pela preparação de amostras e pela temperatura.

Guan et al. (2004) estudaram a influência da frequência, do teor de umidade e do teor de sal nas propriedades dielétricas do purê de batatas. As propriedades dielétricas foram medidas utilizando uma sonda semelhante ao descrito. O sistema de medição consistia principalmente de um analisador de radiofrequência equipado com um kit de calibração (4291B, Agilent Technologies), um kit de sonda dielétrica (85070B, Hewlett Packard Corp., Paio Alto, CA, EUA), e um banho de óleo. Este sistema foi usado para medir as propriedades dielétricas em frequências variando entre 1 e 1800 MHz, temperatura entre 10 e 130 °C. Após a calibração, cada amostra foi medida a 201 frequências discretas entre 1 e 1800 MHz a 20, 40, 60, 80, 100, e 120 °C. Ajustes das equações foram feitas para temperatura, umidade e teor de sal em 27, 40, 433, e 915 MHz. Os autores observaram que tanto ϵ' e ϵ'' diminuíram com o aumento da frequência. Além disso, a adição de sal ao purê de batata aumentou o fator de perda dielétrica.

2.4.1.2 Secagem por micro-ondas sob vácuo

A associação do aquecimento por micro-ondas com a aplicação de vácuo é um método de desidratação rápido e eficiente, que pode originar características diferenciadas, superiores às dos produtos secos por ar quente. A energia de micro-ondas penetra nos alimentos, onde é convertida em energia térmica, proporcionando o aquecimento rápido. Simultaneamente, o vácuo reduz o ponto de ebulição da água, mantendo a temperatura do produto relativamente baixa e criando um gradiente de

pressão que melhora a taxa de secagem (SHAM, 2001). Devido ao vácuo, a amostra é mantida em atmosfera com pouco oxigênio, reduzindo as reações dos compostos sensíveis à oxidação, em comparação com a secagem por ar quente (TALBURT e SMITH, 1967). O tempo do processo de secagem é da ordem de 10-30 min, enquanto outros métodos de secagem, como liofilização ou secagem convectiva, podem durar até 12-15 h.

A secagem por micro-ondas sob vácuo pode ser utilizada para criar uma textura crocante, desejáveis em alimentos que são consumidos sob a forma desidratada, tais como *snacks* ou *chips*. Isto contrasta com as texturas esponjosas ou duras que caracterizam materiais liofilizados ou secos por convecção.

Um dos primeiros relatos sobre secagem por micro-ondas sob vácuo foi realizado por Huxsoll e Morgan (1968). Pedacos de batatas e maçãs foram secas por ar quente até cerca de 45% e 25% de umidade (base úmida), respectivamente. As amostras foram, em seguida, aquecidas a 99 °C, utilizando micro-ondas e a pressão dentro do forno foi rapidamente reduzida para 6,7 kPa, criando um produto que foi descrito como poroso e crocante.

Durance e Liu (1996), estudaram a secagem por micro-onda sob vácuo para produção de batata *chips*. Neste processo, a vaporização da água gera uma força que forma uma estrutura celular expandida, resultando em produtos com textura crocante, com excelentes taxas de reidratação.

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

Uma alternativa aos métodos convencionais de secagem, na obtenção de produtos crocantes, é a secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) ou *Multi-flash drying*. O CAPV é apresentado no documento de patente PII107173-7, depositado por Laurindo et al. (2011). O princípio do processo de secagem é termomecânico, baseado no aquecimento à pressão atmosférica das amostras, seguido de uma descompressão instantânea do sistema, para a obtenção de frutas e hortaliças com diferentes propriedades de textura. Vários ciclos de aquecimento-pulso de vácuo podem ser aplicados para concretizar o processo de secagem. O aquecimento das amostras secas por CAPV pode ocorrer por diferentes fontes, como condução, convecção, radiação térmica, além do aquecimento por micro-ondas, ou pela presença simultânea de algumas delas.

Zotarelli et al. (2012) secaram amostras de bananas e mangas pela técnica de sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo utilizando ar quente como principal fonte de aquecimento das amostras. Porciuncula (2014) investigou uma alternativa de aquecimento de bananas secas pela técnica CAPV usando a transferência de calor por condução, através do contato de fatias das frutas diretamente com uma placa aquecida. Este processo foi denominado de *Conductive-multi-flash drying* (KMFD). Monteiro (2016) estudou a secagem de banana por micro-ondas a vácuo (MV) e com aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo (MPV) utilizando um micro-ondas doméstico adaptado para operar sob vácuo. As técnicas se apresentaram como alternativas viáveis para a obtenção de frutas desidratadas crocantes e com alta porosidade.

2.5 TEXTURA

A textura é um dos atributos mais importantes nos alimentos, afetando sua aceitação pelo consumidor e a sua preferência na escolha de produtos concorrentes (SZCZESNIAK, 1990). Uma textura crocante é o resultado de um tecido estrutural quebradiço, formado por cavidades cheias de ar (VICKERS e BOURNE, 1976).

Sham et al. (2001), em estudos com *chips* de maçã obtidos por secagem a vácuo, relataram que a baixa pressão da câmara de secagem durante a desidratação produziu maior *puffing* e textura crocante nas amostras. A vaporização da água foi facilitada, resultando em produtos crocantes.

Lefort et al. (2003), em estudo com batatas, observaram que as características físico-químicas das amostras afetam os parâmetros de textura, concluindo que batatas com baixa densidade e baixo teor de amido produzem *chips* com uma textura desejável, pois é necessária uma menor força para causar a expansão da amostra.

2.6 POROSIDADE

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

classificado como ideal. Por outro lado, se a redução de volume é menor que o volume de água evaporada, a operação de secagem gera um aumento da porosidade do material.

O fenômeno de encolhimento tem sido amplamente estudado em amostras de batatas utilizando diferentes técnicas de secagem. Wang e Brennan (1995) mostraram que as camadas superficiais das batatas secas por convecção são severamente danificadas em curtos intervalos de tempo, ao passo que a estrutura interna parece intacta. A secagem prolongada induz a formação de fissuras, o tecido interno é separado e numerosos orifícios são produzidos (LEWICKI e PAWLAK, 2005). A perda de água e a separação dos componentes que ocorrem durante a secagem pode causar rigidez e rompimento das paredes das células, e até mesmo o colapso de tecido celular, acarretando a uma redução no volume do produto final (PEDRESCHI e TRONCOSO, 2009).

2.7 MICROESTRUTURA DE ALIMENTOS

O encolhimento das células é o fenômeno que causa maiores modificações estruturais no produto durante a secagem e está diretamente relacionado com a perda de água (RAMOS et al., 2003). O encolhimento das frutas e vegetais tem sido muitas vezes estudado por medições diretas ou inferido a partir de alterações nos parâmetros relacionados, tais como a porosidade e a densidade. A dificuldade nessas medições reside nas alterações das dimensões estruturais durante a secagem, que não são isotrópicas (AGUILERA e STANLEY, 1999).

A microestrutura de alimentos é definida pela organização dos seus componentes e suas interações. Ao longo da desidratação de alimentos, a microestrutura pode ser destruída e posteriormente reconstituída, resultando em uma reestruturação e reorganização da mesma. Com o uso de imagens de qualidade como ferramenta de análise, como microscopia eletrônica de varredura (MEV), informações adicionais podem ser obtidas para a avaliação das propriedades estruturais dos alimentos (AGUILERA e STANLEY, 1999).

2.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILERA, J.M.; STANLEY, D.W. *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering*, Ed. 2. Aspen Publishers, Gaithersburg, Maryland, 1999.

AGUILERA, J.M., CADOCHÉ, L., LOPEZ, C., GUTIERREZ, G. Microstructural changes of potato cells and starch granules heated in oil. **Food Research International**, v. 34, p. 939–947, 2001.

ALVAREZ, M. D., MORILLO, M. J., & CANET, W. Characterization of frying process of fresh and blanched potato strips using surface response methodology. **European Food Research and Technology**, v. 211, p. 326–335, 2000.

ANDRES, A.; BILBÃO, C.; FITO, P. Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air-microwave dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 63, p. 71 - 78, 2004.

AUGUSTIN, J. Variations in the nutritional composition of fresh potatoes. **Journal of Food Science**, v. 40 (6), p. 1295–1299, 1975.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA BATATA (ABBA). Processamento e rendimento industrial da batata *chips* e palha. Disponível em: <<http://www.abbabatatabrasileira.com.br/minas2014/19%20%20Processamento%20da%20batata%20chips%20e%20palha%2001.pdf>>, acessado em 15 dez., 2015.

BARAT, J. M. et al. Cod salting manufacturing analysis. **Food Research International**, v. 36, p. 447-453, 2003.

BARAT, J. M. et al. Post-salting studies in Spanish cured ham manufacturing. Time reduction by using brine thawingsalting. **Meat Science**, v. 69, p. 201-208, 2005.

BETORET, N. et al. Development of probiotic-enriched dried fruits by vacuum impregnation. **Journal of Food Engineering**, v. 56, p. 273-277, 2003.

BOUCHON, P.; AGUILERA, J. M. Microstructural analysis of frying potatoes. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 36, p. 669 - 676, 2001.

BOUCHON, P.; PYLE, D.L. Studying oil absorption in restructured potato *chips*. **Journal of Food Science**, v. 69, p. E115 - E122, 2004.

CLARY, C.D.; WANG, S.J.; PETRUCCI, V.E. Fixed and incremental levels of microwave power application an drying grapes under vacuum. **Journal of Food Science**, v. 70, p. 344 – 349, 2005.

CONTRERAS, C.; MARTIN-ESPARZA, M.E.; CHIRALT, A.; MARTINEZ-NAVARRETE, N. Influence of microwave application on convective drying: effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry. **Journal of Food Engineering**, v. 88, p. 55 - 64, 2008.

CHÁFER, M. et al. Effect of blanching and vacuum pulse application on osmotic dehydration of pear. **Food Science and Technology International**, v. 9, p. 321-328, 2002.

DEUMIER, F. et al. Pulsed vacuum brining of poultry meat: experimental study on the impact of vacuum cycles on mass transfer. **Journal of Food Engineering**, v. 58, p. 75-83, 2003.

DATTA, A. K.; DAVIDSON, P. M. Microwave and radio frequency processing. **Journal of Food Science**, v. 65, p. 32–41, 2000.

DURANCE, T. D.; LIU, F. Production of potato *chips*, **US patent 5,676,989**, US Patent Office, Washington DC, 1996.

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>>, acessado em 02 de outubro de 2015.

FITO, P. Modelling of vacuum osmotic dehydration of food. **Journal of Food Engineering**, v. 22, n. 1-4, p. 313-328, 1994.

FITO, P. et al. Coupling of hydrodynamic mechanism and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems. **Journal of Food Engineering**, v. 27, n. 3, p. 229-240, 1996.

GEANKOPLIS, CHRISTIE J. *Transport Process and Unit Operations*. 3. ed. New Jersey: Ptr Prentice-hall, 1993.

GONZALEZ, C. et al. Effectiveness of vacuum impregnation brining of Manchego-type curd. **International Dairy Journal**, v. 9, p. 143-148, 1999.

GRAS, D. M. L. et al. The response of some vegetables to vacuum impregnation. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v.3, p. 263-269, 2002.

GUAMIS, B. et al. Ripening control of Manchego type cheese salted by brine vacuum impregnation. **International Dairy Journal**. v. 7, p. 185-192, 1997.

HE, Q.; LUO, Y. Enzymatic browning and its control in fresh-cut produce. **Stewart Postharvest Review**, v. 6, n. 03, p. 1-7, 2007.

HEREDIA, A.; PEINADO, I.; ROSA, E.; ANDRES, A.; ESCRICHE, I. Volatile profile of dehydrated cherry tomato: influences of osmotic pre-treatment and microwave power. **Food Chemistry**, v. 130, p. 889 - 895, 2012.

HOFMEISTER, L. C.; SOUZA, J. A. R.; LAURINDO, J. B. Use of dyed solutions to visualize different aspects of vacuum impregnation of Minas cheese. **LWT-Food and Science Technology**, v. 38, n. 4, p. 379-386, 2005.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa da produção de batata (*Solanum tuberosum L.*). Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pdf/-a.quisicao/comentarios.pdf>> Acesso em: 03/04/2015.

KOYUNCU, T.; TOSUN, I.; PINAR, Y. Drying characteristics and heat energy requirement of cornelian cherry fruits (*Cornus mas L.*). **Journal of Food Engineering**, v. 78 (2), p. 735–739. 2007.

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

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 1107173-7, 2011.

LEFORT, J. F.; DURANCE, T. D.; UPADHYAYA, M. K. Effects of tuber storage and cultivar on the quality of vacuum microwave-dried potato *chips*. **Journal of Food Science**, v. 68, p. 690–696, 2003.

LEWICKI, P.P., PAWLAK, G. Effect of mode of drying on microstructure of potato. **Drying Technology**, v. 23, 2005.

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

MARIOTTI, M.S.; GRANBY, K.; ROZOWSKI, J.; PEDRESCHI, F. Furan: a critical heat induced dietary contaminant. **Food and Function** v. 4, p. 1001–1015, 2013.

MARTÍNEZ-MONZÓ, J. et al. Changes in thermal properties of apple due to vacuum impregnation. **Journal of Food Engineering**, v. 43, p. 213, 2000.

MARTÍNEZ-MONZÓ, J. et al. Mechanical properties and structural changes in apple (Var. Granny Smith) due to vacuum impregnation with cryoprotectants. **Journal of Food Science**, v. 63, 1998.

FITO, P. et al. Vacuum impregnation for development of new dehydrated products. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 297–302, 2001.

MELLEMA, M. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. **Trends in Food Science and Technology**, v. 14, p. 364–373, 2003.

MIRANDA, M.L., AGUILERA, J.M. Structure and texture properties of fried potato products. **Food Reviews International**, v. 22, p. 173–201, 2006.

MONTEIRO, R. Secagem de banana (var. prata) em campo de micro-ondas com vácuo contínuo ou intermitente. **Dissertação** - Mestrado em Engenharia de Alimentos - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2014.

MOREIRA, R. G.; CASTELL-PÉREZ, M. E.; BARRUFET, M. A. *Deep fat frying: fundamentals and applications*. Gaithersburg, MD, Aspen Publishers, 1999.

MOREIRA, R.G., CASTELL PEREZ, M.E., BARRUFET, M.A. *Deep-Fat Frying: Fundamentals and Applications*. Aspen Publishers Inc., MD 20878, USA, 1999.

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

ONER, M.E. & WALKER, P.N. Effect of Processing and Packaging Conditions on Quality of Refrigerated Potato Strips. **Journal of Food Science**, v. 76(1), p. S35-S40, 2011.

OSAKI, M.; MATSUMOTO, M.; SHINANO, T.; TADANO, T. A root-shoot interaction hypothesis for high productivity of root crops. **Soil Science and Plant Nutrition** v. 42, n. 2, p. 289–301, 1996.

OZKOC S. O.; GÜ"LU" M S.; SAHIN S. *Emerging Technologies for Food Processing*, Ed. 2, p. 361–383, 2014.

PAES, S. S.; STRINGARI, G. B.; LAURINDO, J. B. Effect of vacuum and relaxation periods and solutions concentration on the osmotic dehydration of apples. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 41, 2006.

PAES, S. S.; STRINGARI, G. B.; LAURINDO, J. B. Effect of vacuum impregnation temperature on the mechanical properties and osmotic dehydration parameters of apples. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 51, 2008.

PEDRESCHI, F. Frying of potatoes: physical, chemical, and microstructural changes. **Drying Technology**, v.30, p. 707-725, 2012.

PEDRESCHI, F.; MERY, D. Quality Evaluation and Control of Potato *Chips*. In: *Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation*, Ed. 2, p. 591–613, 2016.

PEDRESCHI, F., KAACK, K., GRANBY, K., 2004. Reduction of acrylamide formation in potato slices during frying. **LWT—Food Science and Technology**, v. 37, p. 679–685.

PORCIUNCULA, B. D. A. Processos de desidratção com controle da microestrutura e textura de frutas desidratadas usando ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Alimentos) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.

RAMOS, I.; BRANDAO, T.; SILVA, C. Structural changes during air drying of fruits and vegetables. **Food Science and Technology International**, v. 9, p. 201–206, 2003.

RIMAC-BRNEIE, S.; LELAS, V.; RADE, D.; SIMUNDIC, B. Decreasing of oil absorption in potato strips during deep fat frying. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 02, p. 237–241, 2004.

SALVATORI, D. et al. The response of some properties of fruits to vacuum impregnation. **Journal of Food Process Engineering**, v. 21, p. 59-73, 1998.

SCHMIDT, F. C. **Estudo das Trocas de Massa Durante o Tratamento de Cortes de Peito de Frango com Soluções Salinas**. 2006. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SCHMIDT, F. C.; CARCIOFI, B. M. C.; LAURINDO, J. B. Efeito da impregnação a vácuo na transferência de massa durante o processo de salga de cortes de peito de frango. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v 28(2), p. 366-372, 2008.

SEVERINI C., BAIANO A., DE PILLI T., ROMANIELLO R., DEROSI A. Prevention of enzymatic browning in sliced potatoes by blanching in boiling

saline solutions. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, v. 36 , p. 657–665, 2003.

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

TALBURT W.F.; SMITH O. *Potato Processing*. Westport: AVI Publishing Co., pp. 431–432, 1967.

TRONCOSO, E.; PEDRESCHI, F. Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. **LWT—Food Science and Technology**, v. 42, p. 1164–1173, 2009.

TURNER, I.W., JOLLY, P. Combined microwave and convective drying of a porous material. **Drying Technology**, v. 9, p. 1209 e 1270, 1991.

VICKERS, Z. M.; M. C. BOURNE. Crispness in foods – a review. **Journal Food Science**, v. 41, p. 1153–1157. 1976.

SHAM, P. W. Y.; SCAMAN, C. H.; DURANCE, T. D. Texture of vacuum microwave dehydrated apple *chips* as affected by calcium pre-treatment, vacuum level, and apple variety. **Journal Food Science**, v. 66, n. 9, p. 1341-134, 2001.

ZHANG, M.; TANG, J., MUJUMDAR, A.S., WANG, S. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology* 17, 524-534, 2006.

ZHANG, M.; LI, C.L.; DING, X.L. Optimization for preservation of selenium in sweet pepper under low-vacuum dehydration. **Drying Technology**, v. 21, p. 569 – 579, 2003.

ZOTARELLI, M. F. Desenvolvimento de processo combinado de desidratação e modificação da textura de manga por secagem convectiva e pulsos de vácuo. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Alimentos) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.

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

WANG, N., BRENNAN, J.G. A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato. **Journal of Food Engineering**, v. 24, p. 47–60, 1995.

CAPÍTULO 3

CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE SECADOR EM ESCALA PILOTO COM AQUECIMENTO POR MICRO-ONDAS E APLICAÇÃO DE VÁCUO

3.1 INTRODUÇÃO

O aquecimento por micro-ondas tem vastas aplicações na área de processamento de alimentos, como na secagem, pasteurização, esterilização, descongelamento, têmpera e cozimento (GUPTA e WONG, 2007).

A secagem por micro-ondas apresenta como principal vantagem a rápida taxa de remoção de água, podendo resultar em produtos secos de elevada qualidade nutricional e sensorial. As ondas eletromagnéticas promovem o aquecimento volumétrico, causando a geração de vapores no interior do produto e formação de gradientes internos de pressão, que irão forçar a saída da água por escoamento (ZHANG et al., 2006).

Embora o aquecimento por micro-ondas da amostra seja mais uniforme, em comparação a métodos de aquecimento tradicionais, a distribuição de temperatura dentro da câmara de secagem não é uniforme, sendo esse um dos principais problemas encontrados nos equipamentos que usam micro-ondas (CHANDRASEKARAN, et al. 2013). Durante o aquecimento dielétrico, a distribuição do campo elétrico dentro de uma cavidade ocorre a partir de uma propagação multimodal, ocasionada por inúmeras reflexões provenientes das paredes metálicas da cavidade, gerando regiões de maiores e menores intensidades do campo elétrico (CAMPOS, 1986).

A associação da aplicação de micro-ondas com o vácuo pode gerar outro problema, conhecido como descarga de plasma - DP (LOMBRANA et al., 2001). A DP é um processo que ocorre a baixas pressões, tendo como causa principal a ionização do ar. Essa descarga é indesejável, pois consome grande parte da energia das micro-ondas e pode levar à queima do material. Além disso, pode contribuir com a não-uniformidade de distribuição do campo eletromagnético na cavidade ressonante e produzir forte eco de ondas eletromagnéticas, que pode danificar o magnetron (LOMBRAÑA et al., 2001). Há poucos estudos sobre os fatores que influenciam a descarga de plasma em equipamentos de micro-ondas.

A maioria dos estudos da cinética de secagem por micro-ondas a vácuo encontrados na literatura apresentam dados experimentais medidos de forma descontínua, com um número limitado de pontos experimentais. A utilização de um sistema de pesagem *on-line*, integrado ao secador, é uma ferramenta útil para investigar a taxa de secagem de um material (BARRESI et al., 2005).

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi realizar a construção e validação de um secador em escala piloto, com aquecimento por micro-ondas, com cavidade que permite melhor uniformidade no aquecimento. Além disso, a instrumentação do equipamento com um sistema de monitoramento *on-line* da variação da massa e da temperatura das amostras, e o controle da pressão do sistema ao longo do tempo da secagem também fez parte dos objetivos.

Objetivos específicos foram:

- ✓ Estabelecer as condições de operação que serão utilizadas para secagem das fatias de batata: i) temperatura interna da amostra, ii) pressão de vácuo da câmara, iii) massa inicial de amostras e iv) potência nominal de micro-ondas;
- ✓ Realizar estudos sobre a reprodutibilidade e segurança do sistema.
- ✓ Estudar a relação entre a potência crítica de descarga de plasma (PCDP), a pressão de vácuo e a massa de amostra, a fim de evitar formação de descarga de plasma durante o processo de secagem.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

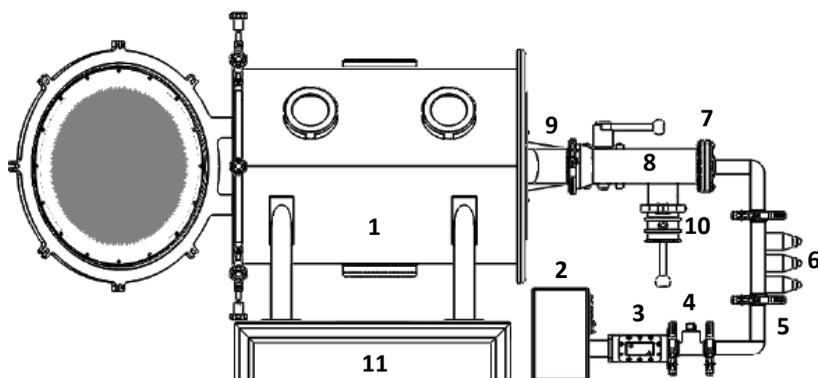
3.2.1 Descrição do dispositivo experimental

O dispositivo experimental utilizado neste trabalho foi um secador por micro-ondas, com cavidade prismática de volume de 175 L, desenvolvido para secagem de frutas e hortaliças (Figura 3.1).

A secagem foi realizada na cavidade multimodo de micro-ondas [1], de geometria prismática de seção sextavada, que reduz a heterogeneidade do campo elétrico no seu interior. Tal cavidade está representada nas Figuras 3.1 e 3.2, com vista superior (A) e vista frontal obtida por corte transversal (B). Um gerador de micro-ondas [2] de 2,45 GHz (3000 W) (Gerling Applied Eng., EUA) gera e transmite as micro-ondas para a cavidade por meio de um guia de ondas. Um sistema

transição e monitoramento de potência nominal de micro-ondas, posicionado entre o gerador e a cavidade, é constituído dos seguintes componentes: um circulador de 3 portas [3] conectado a um banho termostático, um acoplador duplo [4] ligado a um monitor de potência nominal de micro-ondas transmitidas e refletidas, guia de onda [5], um sintonizador ou casador de impedâncias de 3 tocos [6], janela de vácuo[7]; guia de transição retangular [8]; e o guia de onda tubular circular curvo [9] em curva de 20° até a entrada da cavidade do micro-ondas.

Figura 3. 1- Diagrama esquemático do dispositivo experimental.

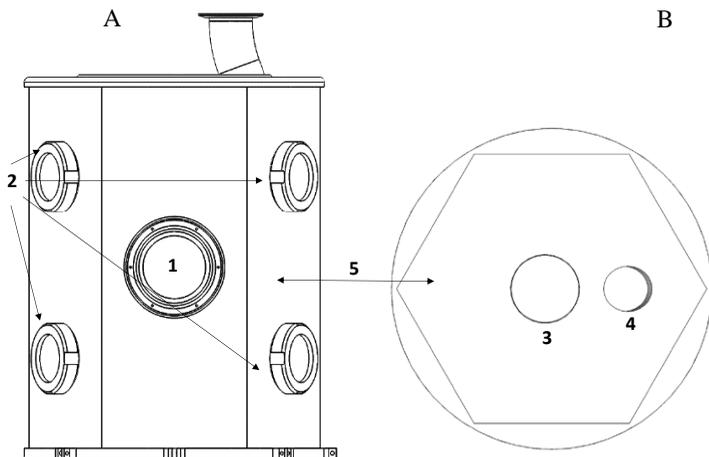


1- Cavidade multimodo de micro-ondas; 2 – gerador de micro-ondas (magnetron); 3 – circulador de 3 portas; 4 – acoplador duplo e wattímetro; 5 – guia de onda em L; 6 – sintonizador de 3 tocos; 7 – Janela de vácuo (quartzo); 8 – guia de transição retangular/circular; 9 – guia tubular circular curvo; 10 – linha de vácuo; 11 – mesa suporte.

FONTE: Autor.

O equipamento com a cavidade de aplicação de micro-ondas e seus equipamentos periféricos foi montado para verificação de vazamentos. Após a montagem, foram realizados ajustes que permitiram a vedação da câmara (cavidade ressonante), possibilitando a manutenção da pressão do sistema durante a secagem e assegurando a ausência de vazamentos de micro-ondas. Para isso, foram adicionadas cordoalhas nas portas da cavidade e nas conexões [1 e 3] e *o-rings* em todas as entradas da cavidade.

Figura 3. 2 - Configuração da cavidade para aplicação de micro-ondas, com localização dos principais itens. A- vista superior e B – vista frontal com corte transversal.



1- Tampa superior removível; 2- janelas de vidro; 3- entrada para vácuo; 4- entrada das micro-ondas; 5- cavidade de micro-ondas (prismática de seção hexagonal).

FONTE: Autor.

3.2.2 Montagem do sistema de resfriamento do magnetron e *dummy load*

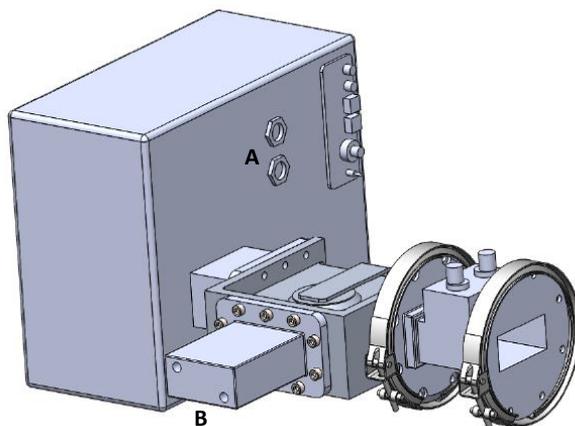
O dispositivo exige dois sistemas de resfriamento para seu correto funcionamento, um para resfriamento do sistema elétrico do magnetron (Figura 3.3 – A) e o outro para abastecer a carga de água (*dummy load*) que absorve a onda refletida (Figura 3.3 – B), garantindo a proteção do magnetron (Figura 3.3).

Cada sistema de resfriamento é composto por um banho termostático (marca QUIMIS) com volume de 10 L, ligado a um filtro de linha (3M-Aqualar) com célula filtrante de 5 micra. O sistema exige vazão, pressão e temperatura máxima da água de $6,31 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, 482,6 kPa e 35 °C, respectivamente.

No primeiro sistema, a água é resfriada a 10 °C no banho termostático, passa pelo filtro de linha e em seguida pelo sistema de resfriamento do magnetron, resfriando o sistema e voltando para o banho termostático, em circuito fechado. No segundo sistema, a água

resfriada sai do banho, passa pelo filtro e *dummy load*, absorvendo as ondas refletidas pelo sistema.

Figura 3. 3 - Equipamentos com sistemas de resfriamento. Gerador de micro-ondas (A) e carga de água (*dummy load*) (B).



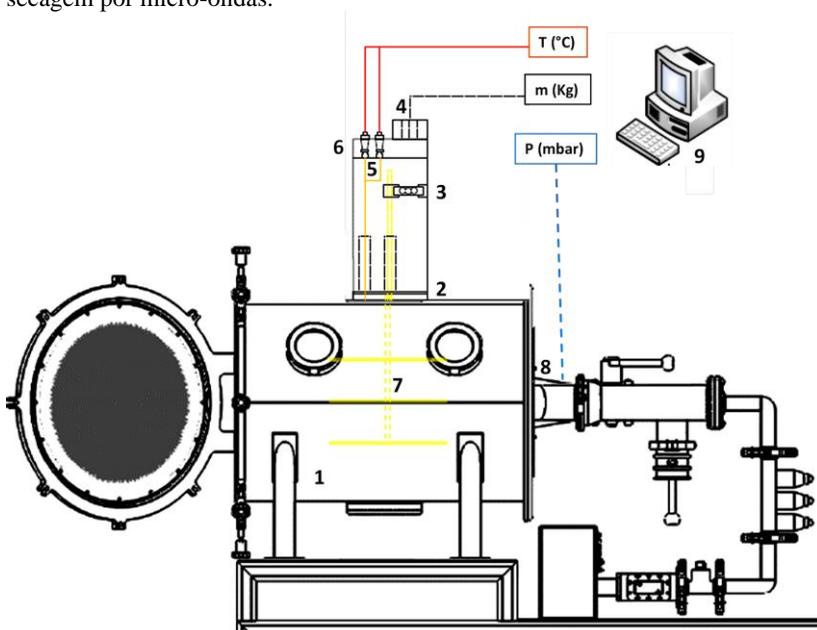
O filtro de 5 micra é exigido para manter a qualidade da água, evitando incrustações na tubulação do sistema. O filtro tem uma perda de carga de 200 kPa e as tubulações do sistema tem diâmetro de $6,35 \cdot 10^{-3}$ m, conferindo uma alta perda de carga ao sistema.

3.2.3 Instrumentação do secador com sistema de pesagem *on-line* e sensores de temperatura de fibra óptica.

O secador de micro-ondas foi instrumentado para permitir o monitoramento *on-line* da variação de massa e da temperatura das amostras, além do controle da pressão do sistema durante a secagem. Foram instalados: sistema de pesagem de célula de carga, sensores de temperatura de fibra óptica e válvula proporcional de controle de pressão na câmara do equipamento. Um esquema deste dispositivo é mostrado na Figura 3.4.

Na parte superior da camara de vácuo, a tampa de aço inox (item [2] Figura a 3.4 e Figura 3.5) do sistema foi adaptada com três tubos projetados para evitar fuga de onda, e para a passagem do eixo do suporte-bandeja [7] e dos sensores de fibra óptica [5] (Figura 3.4).

Figura 3. 4 - Dispositivo experimental utilizado para investigar a cinética de secagem por micro-ondas.



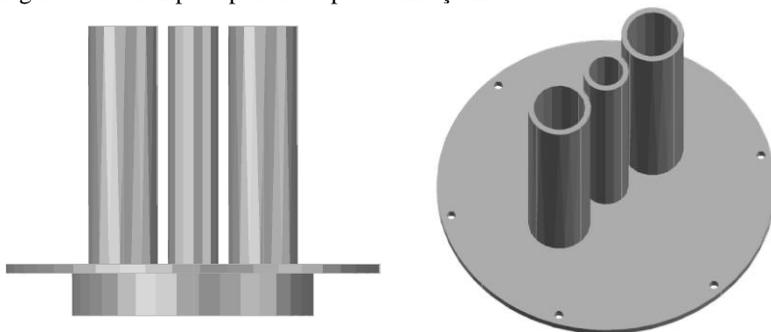
1 – Câmara de vácuo, 2 - tampa superior adaptada, 3 – célula de carga, 4 – conectores da célula de carga, 5 – sensores de temperatura de fibra óptica, 6 – tampa de acrílico, 7- suporte e bandejas, 8 - transdutor de pressão, 9 – computador para aquisição de dados.

FONTE: Autor.

Na parte superior da câmara de secagem, foi apoiado o sistema de monitoramento *on-line*, formado por: um cilindro transparente de acrílico (polimetil – metacrilato PMMA), que permite a observação da célula de carga [3] e os sensores de fibra óptica [5], e uma tampa do cilindro, também de acrílico [6], com diâmetro de 194 mm e espessura de 22 mm, utilizada para apoiar o sistema de medição de massa (célula de carga *single-point*) e os parafusos de passagem da fibra óptica. A célula de carga (modelo GL, Alfa Instrumentos, Brasil), com capacidade nominal de 5 kg e sensibilidade de 0,0005 kg, foi conectada a um sistema de condicionamento de sinal (modelo 3101C, Alfa Instrumentos, Brasil), que por sua vez foi ligado a um computador [9]. Esse sistema é uma versão modificada de Tribuzi e Laurindo (2014), onde um liofilizador comercial foi adaptado para registro da variação temporal da

massa e temperatura utilizando uma célula carga *single - point* e termopares.

Figura 3. 5 - Tampa superior adaptada em aço inox.



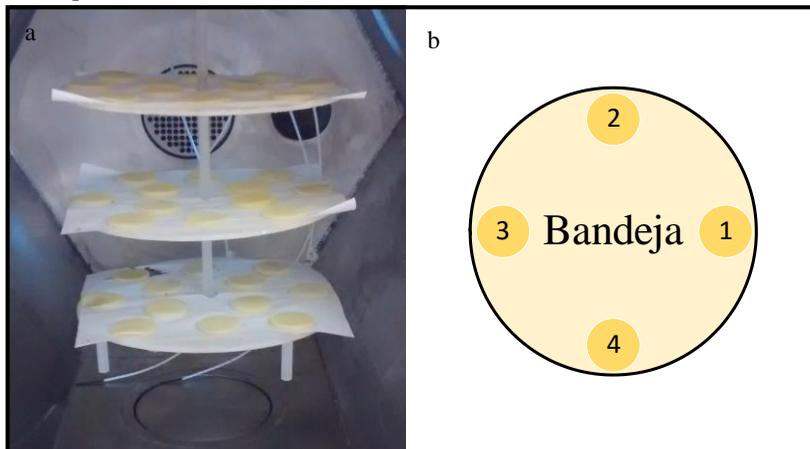
FONTE: Autor.

O secador foi conectado a uma bomba de vácuo, de vazão nominal de $350 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Marva DVP, modelo LC.305, Itália), à um *trapping*, à uma válvula de controle proporcional e a um transmissor de pressão (Marca Warme, modelo WTP 4010). O transmissor de pressão [8] encontra-se ligado a um controlador externo, e este ligado a uma válvula de controle do tipo solenoide proporcional. Um computador [9] com um aplicativo desenvolvido especialmente para o experimentos, possibilitou o controle e o monitoramento *on-line* da pressão através de um programa de aquisição de dados. O sistema permite atingir a pressão final de $0,8 \text{ kPa} \pm 0,05 \text{ kPa}$.

A Figura 3.6 mostra o suporte formado por três bandejas e o esquema utilizado para padronização das posições dos sensores de fibra óptica, possibilitando o monitoramento da temperatura das amostras. O suporte – bandejas foi fabricado em polipropileno com o diâmetro de 275 mm e espessura de 5 mm, conectado à célula de carga por uma haste rígida de polipropileno de 10 mm de diâmetro.

Os sensores de temperatura foram calibrados com um termômetro de mercúrio, ASTM vidro (modelo ASTM, Incoterm, Brasil), na faixa de temperatura de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $100 \text{ }^\circ\text{C}$. A calibração da célula de carga foi efetuada antes de todos experimentos. O sistema foi testado sob condições de secagem, sem amostras, para avaliar o comportamento operacional em condições de vácuo. Vários ciclos de secagem foram realizados com aplicação de vácuo constante (V) e de pulsos de vácuo (PV).

Figura 3. 6 - Suporte-bandeja de polipropileno (a) localização dos sensores de fibra óptica (b).



FONTE: Autor.

Após instrumentação do secador de micro-ondas, foram realizados testes de vazamento de ondas com medidor de micro-ondas (Ets-Lindgren, modelo - Holaday EMF Measurement, USA) e verificou-se que o secador micro-ondas não apresenta vazamentos importantes de ondas eletromagnéticas, nunca ultrapassando 5 mW.cm^{-2} , medido a uma distância de 0,05 m.

3.2.4 Verificação da eficiência do secador

Previamente ao início dos experimentos de secagem, foi verificada a eficiência do secador de micro-ondas pelo teste de medida da potência de micro-ondas disponível para o produto, de acordo com método IEC 60705 (IEC, 2004).

Utilizou-se um bquer de vidro de 1,5 L, posicionado num suporte de polipropileno localizado no centro da câmara, com aproximadamente 1000 g de água destilada (Figura 3.7). A água foi aquecida até aproximadamente $60 \text{ }^\circ\text{C}$, e mediu-se a variação da temperatura da água submetida a diferentes potências nominais, de 500 W, 1000 W, 1500 W e 2000 W. Para cada potência nominal o experimento foi realizado em triplicata. Assumindo que toda a potência fornecida pelo forno micro-ondas (potência nominal) foi transformada

em energia térmica na água e no vidro, calculou-se a potência absorvida pela amostra (P_{abs}) para cada potência nominal, pela Equação (1):

$$P_{abs} = \frac{[m_{H2O} \cdot c_{pH2O} + m_{vidro} \cdot c_{pvidro}] \cdot (\Delta T)}{t} \quad 1)$$

onde m_{H2O} é a massa da água, c_{pH2O} é o calor específico da água, m_{vidro} é a massa do vidro, c_{pvidro} é o calor específico do vidro, ΔT é a variação da temperatura (°C) e t é o tempo.

Através de regressão linear, os dados foram ajustados e o coeficiente de correlação (R^2) foi determinado.

Figura 3. 7 - Suporte de polipropileno, bequer com água e sensores de temperatura de fibra óptica.



FONTE: Autor.

3.2.5 Monitoramento *on-line* da temperatura e da perda de massa na secagem por micro-ondas sob vácuo

Testes em branco foram realizados para verificar a confiabilidade do sistema desenvolvido. Primeiramente, o sistema foi testado (i) vazio

e (ii) com o suporte - bandejas, com aplicação de vácuo constante e com pulsos de vácuo, durante 30 min. Em seguida foi testado o sistema com amostras de batatas.

Os testes com 400 g fatias de batatas foram realizados sob as condições de: (i) vácuo constante (1 kPa) e (ii) com pulsos de vácuo, à potência nominal de 800 W, estabelecida em testes preliminares. As fatias de batatas (espessura= 5mm e diâmetro = 60 mm) foram distribuídas uniformemente na bandeja localizada no centro da cavidade. As temperaturas internas de quatro amostras foram monitoradas em diferentes posições do suporte. As posições foram padronizadas em todos os experimentos (Figura 3.7).

A temperatura interna da batata, pressão da cavidade e massa da amostra foram monitoradas a cada segundo por um sistema de aquisição de dados (item 3.2.4).

3.2.6 Estudo da descarga de plasma

A relação entre a massa inicial das amostras de batata, a pressão do sistema e a potência crítica de descarga de plasma (PCDP) foram estudadas. Três diferentes massas foram testadas (200 g, 300 g e 400 g de batata). As amostras foram colocadas na câmara de micro-ondas e aquecidas com pressão constante de 1 kPa. Quando a pressão se manteve estável, iniciou-se a aplicação de energia de micro-ondas com potência nominal de 150 W, aumentando-se em passos de 50 W até a descarga de plasma ocorrer. Este nível de potência de micro-ondas foi definido como Potência Crítica de Descarga de Plasma (PCDP) (DUAN et al., 2010).

Além disso, para estudar a relação entre pressão de vácuo do sistema e PCDP, três diferentes pressões de vácuo foram testadas (1, 2 e 3 kPa), com massa constante de 400 g. O mesmo método de aplicação micro-ondas foi aplicado para identificar a PCDP.

A variação de peso da amostra não foi considerada, pois os ciclos de experiência tinham curtos períodos, aproximadamente 2 min.

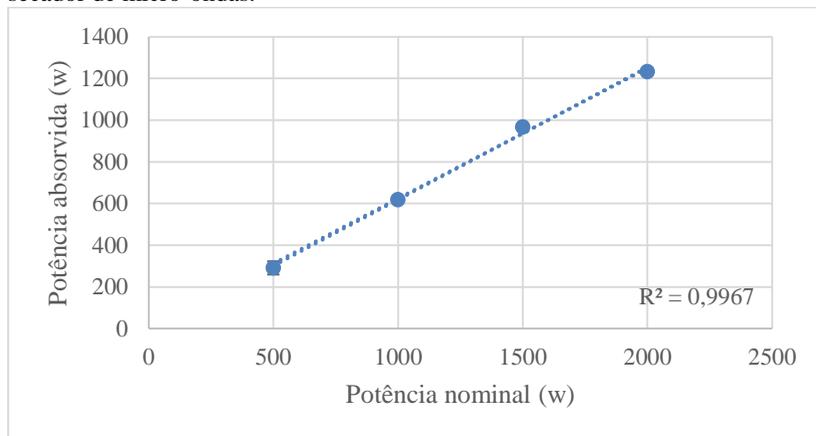
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Eficiência do secador

A Figura 3.8 apresenta a relação entre a potência nominal (potência emitida pelo magnetron) e a potência absorvida pela massa de água (P_{abs}). A potência absorvida pela massa de água foi diretamente

proporcional à potência nominal. O valor de R^2 foi 0,997, indicando que o ajuste linear representa bem os dados experimentais. O teste constatou que 65% da potência estava disponível para o produto dentro da cavidade.

Figura 3. 8 - Potência absorvida pela água em função da potência nominal do secador de micro-ondas.



Monteiro (2014) estudou a secagem de fatias de banana por micro-ondas com aplicação de vácuo, utilizando um micro-ondas doméstico adaptado. Na verificação da eficiência do equipamento, relatou que a potência absorvida era de aproximadamente 60 %, valor próximo do encontrado neste trabalho.

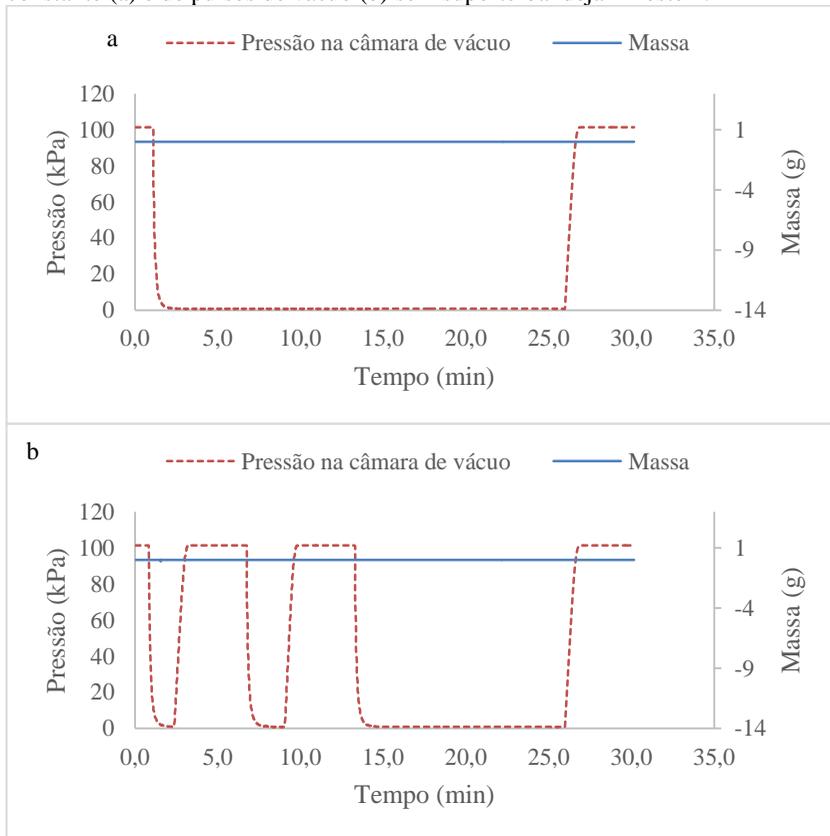
3.3.2 Validação do sistema *on-line* de pesagem e determinação da temperatura

3.3.2.1 Testes em branco

Testes em branco foram realizados em diferentes configurações para verificar a confiabilidade do sistema de pesagem instalado na câmara de vácuo. A Figura 3.9 apresenta um teste em branco de 30 min para o sistema vazio (Teste 1) e a Figura 3.10, para o sistema com um suporte-bandeja de 320 g (Teste 2). Os dados da variação da massa foram avaliados (a) com aplicação de vácuo constante e (b) com aplicação de 3 pulsos de vácuo.

No Teste 1, a pressão na câmara de vácuo foi reduzida para 1 kPa em aproximadamente 72 s, permanecendo a pressão constante por 25 min, seguida da recuperação da pressão do sistema em 70 s. Durante todo o processo, o sistema de pesagem não apresentou nenhuma variação, em ambas aplicações de vácuo, mantendo-se linear e constante

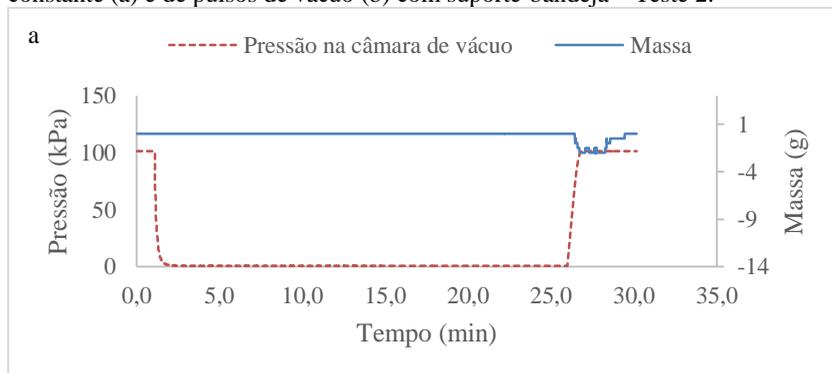
Figura 3. 9 - Validação do sistema de pesagem durante aplicação de vácuo constante (a) e de pulsos de vácuo (b) sem suporte-bandeja – Teste 1.

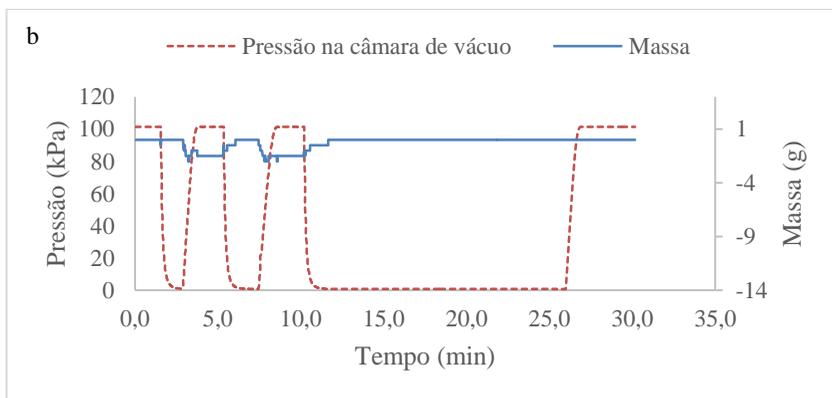


No Teste 2 o sistema de pesagem mostrou uma diminuição temporária de cerca de 1,5 g, provavelmente devido ao fluxo de ar causado pela recuperação da pressão da câmara de secagem. Uma vez que a pressão operacional (1 kPa) foi atingida na câmara de vácuo, houve a diminuição do fluxo de ar e o sistema retornou rapidamente para o peso original (0 g). Durante os 30 min de teste, a variação

máxima registrada pelo sistema de pesagem foi de $\pm 1,5$ g, mostrando que o comportamento da célula de carga não foi significativamente afetado pelas variações de pressão. Considerando que 400 g de fatias de batata foram utilizadas no presente trabalho, uma variação de peso de aproximadamente 320 g durante todo o processo de secagem era esperada. Portanto, o erro máximo para o peso final foi de aproximadamente 0,5%. Uma vez que a capacidade da célula de carga é de 5 kg (peso do suporte-bandeja com amostras), é possível aumentar a quantidade de amostra de batatas, aumentando assim a quantidade de água evaporada e diminuindo o erro relativo da medição. Os resultados encontrados corroboram os obtidos por TRIBUZI e LAURINDO (2014), na adaptação de liofilizador comercial com sistema *on-line* de aquisição de dados. Poucos estudos foram encontrados na literatura sobre secadores com micro-ondas com sistemas de monitoramento *on-line* de massa e temperatura durante a secagem, particularmente quando as micro-ondas são associadas com vácuo e com pulsos de vácuo.

Figura 3. 10 - Validação do sistema de pesagem durante aplicação vácuo constante (a) e de pulsos de vácuo (b) com suporte-bandeja – Teste 2.





Rovero et al. (2001) relataram que a confiabilidade de um sistema de pesagem pode ser afetada pela sua temperatura. Assim, para verificar a variação da temperatura da célula de carga durante o processamento, foi preciso que a ponta do termômetro de fibra ótica (Figura 3.4, o componente 5) fosse fixada na base da célula de carga e um ciclo de secagem realizado. A temperatura da célula de carga está apresentada na Figura. 3.11 e manteve-se estável a $19\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante todo o processo. A variação de $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pode ser atribuída à variação da temperatura ambiente. A estabilidade da temperatura da célula de carga pode ser explicada considerando que foi posicionada fora da câmara de secagem e isolada da ação das micro-ondas pela tampa suporte adaptada, o suficiente para evitar qualquer influência da temperatura sobre a célula de carga.

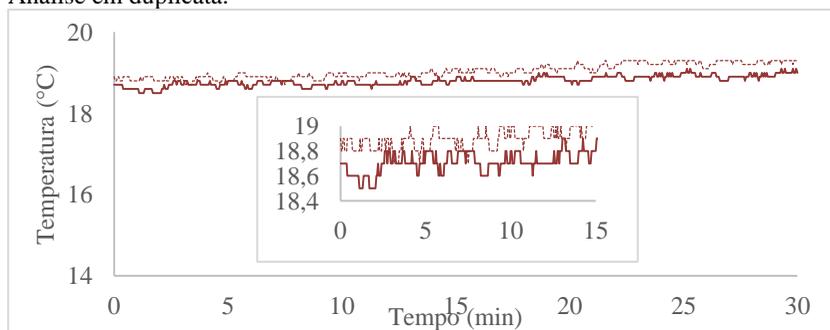
Outros parâmetros importantes que influenciam a precisão da medida de peso são a instabilidade elétrica e as vibrações transmitidas ao sistema. Por isso, se a rede elétrica apresentar instabilidade, o sistema de pesagem deve ser ligado a um estabilizador de corrente e o secador deve ser posicionado longe da bomba de vácuo ou outras fontes de vibração.

Após ensaios de validação, iniciaram-se os testes da secagem de batatas com aplicação de micro-ondas e vácuo. Por meio de testes preliminares fixou-se a potência nominal de trabalho em 800 W, a temperatura máxima de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (evitando degradação térmica da amostra), e a pressão de vácuo de 1 kPa (mínima pressão alcançada pelo sistema).

Os dados experimentais registrados pelo sistema *on-line* apresentaram boa reprodutibilidade e mostraram a utilidade deste

dispositivo para investigar as diferentes condições de desidratação de batata sob vácuo ou pulso de vácuo em secagem por micro-ondas.

Figura 3. 11 - Temperatura da célula de carga durante o teste de secagem. Análise em duplicata.

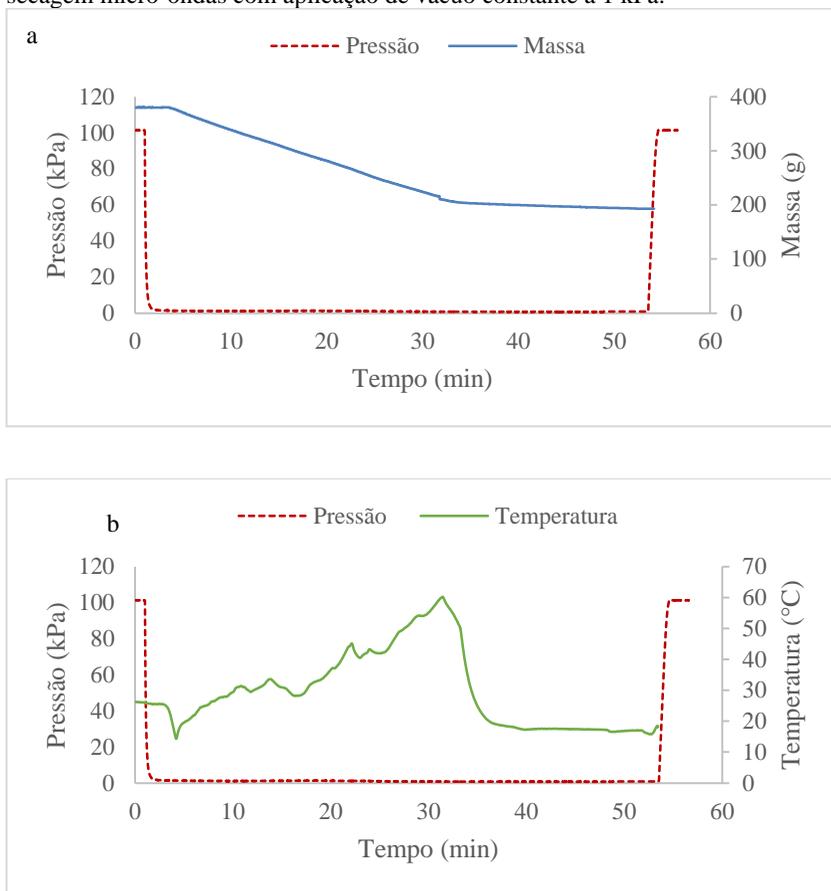


3.3.2.2 Testes com produto e determinação das condições de operação

As figuras 3.12a, e 3.12b apresentam, respectivamente, a variação de massa com o tempo e perfis de temperatura interna das amostras na secagem a vácuo constante a 1 kPa, com aplicação de 800 W. Observa-se que após 3 min de processo a temperatura da amostra atingiu um valor próximo ao de saturação, para a pressão do sistema (1 kPa), alcançando 10 °C. Neste instante, iniciou-se a emissão de micro-ondas, provocando o aumento gradual da temperatura e evaporação da água com taxa constante. Após 30 min, quando a massa alcançou 209 g, observou-se a formação da descarga de plasma, e o efeito disso foi a interrupção da perda de massa, a diminuição da temperatura, e o aumento instantâneo das ondas refletidas.

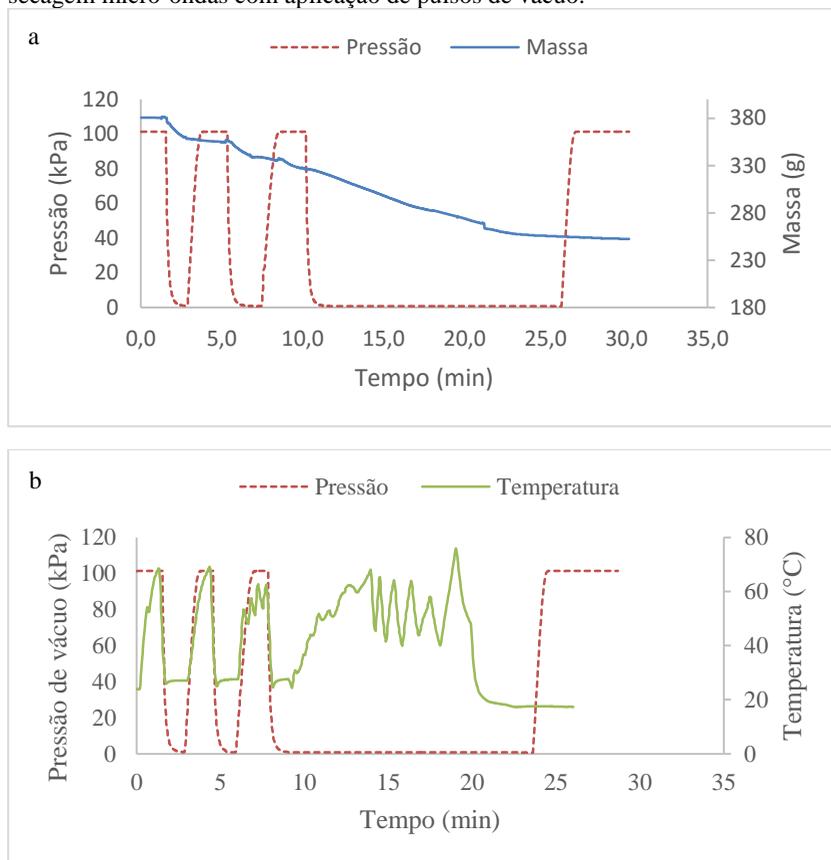
O aquecimento das amostras e a secagem foi interrompido porque uma vez formado o plasma, grande parte da energia micro-ondas emitida é utilizada para manter o plasma, impossibilitando a continuação do processo de secagem.

Figura 3. 12 - Evolução temporal da (a) massa e (b) pressão de vácuo para secagem micro-ondas com aplicação de vácuo constante a 1 kPa.



A figura 3.13a e b apresenta, respectivamente, a variação de massa com o tempo e os perfis de temperatura interna das amostras na secagem com aplicação de 3 pulsos de vácuo, seguido de vácuo constante a 1 kPa. No item a, observa-se as contribuições relativas ao aquecimento por micro-ondas e aos pulsos de vácuo, que causam perda de massa pela evaporação *flash*. Após aplicação dos pulsos de vácuo, nota-se o mesmo comportamento obtido na secagem a vácuo constante, onde a secagem ocorreu até a formação da descarga de plasma, impossibilitando a realização da secagem até a umidade desejada.

Figura 3. 13 - Evolução temporal da (a) massa e (b) pressão de vácuo para secagem micro-ondas com aplicação de pulsos de vácuo.



3.3.2.3 Estudo da descarga de plasma

A descarga de plasma é um problema em sistemas a vácuo que limita o desenvolvimento desta tecnologia. A formação de plasma em secador por micro-ondas afeta negativamente o processo de secagem, isso foi verificado no experimento apresentado, onde a secagem foi interrompida a 37 % U_{bu} (100 g de amostra).

Há pouca pesquisa sobre os fatores que influenciam a descarga de plasma e sua interação com os processos de secagem por micro-ondas a vácuo. A relação entre a potência crítica de descarga de plasma (PDCP), pressão de vácuo e massa de amostra (crítica), deve ser

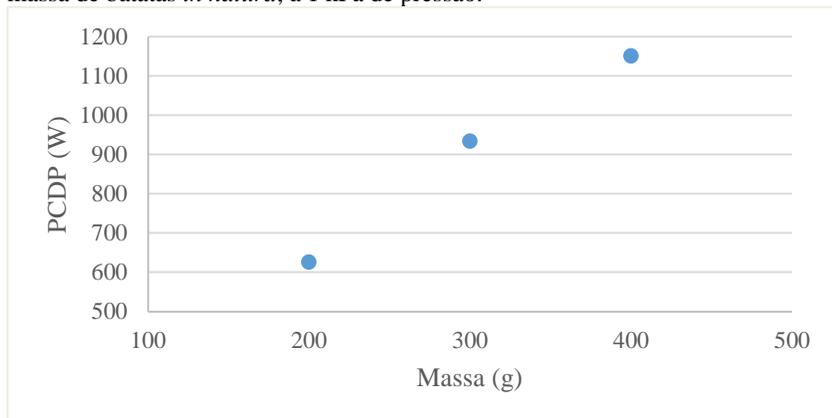
estudada para obtenção de uma estratégia adequada de aplicação de níveis de potência de micro-ondas durante os processos de secagem por micro-ondas sob vácuo, a fim de se evitar a descarga de plasma (MUJUMDAR et al., 2004). Desta forma, danos são evitados ao magnetron, possibilitando a secagem completa do material e mantendo melhor uniformidade na distribuição de campo elétrico na câmara de secagem.

A relação entre a massa inicial de amostra de batata e a PCDP é apresentada na Figura 3.14. Foram estudadas três massas iniciais distintas (200 g, 300 g e 400 g). Cada massa foi colocada na câmara de micro-ondas e aquecida a pressão de 1 kPa. A energia de micro-ondas foi aplicada a partir da potência nominal de 150 W e aumentada em passos de 50 W até a descarga de plasma ocorrer (DUAN et al, 2010).

Observa-se que a PCDP aumentou com o aumento da massa inicial de amostra, apresentando uma relação diretamente proporcional com a mesma. Para a massa de 200 g, 300 g e 400g de amostra, foram obtidas as PCDP de 610 W, 933 W e 1150 W, respectivamente. Quanto maior quantidade de água livre for removida, menor é a PCDP, assim a potência emitida de micro-ondas deve ser reduzida durante o processo de secagem (DUAN et al.,2010).

Duan et al., (2010), estudaram a secagem de pepino do mar (*Stichopus japonicus*) por micro-ondas sob vácuo e recomendaram a redução da energia de micro-ondas em condições de baixa umidade uma vez que a descarga de plasma pode ocorrer devido a um teor de umidade decrescente.

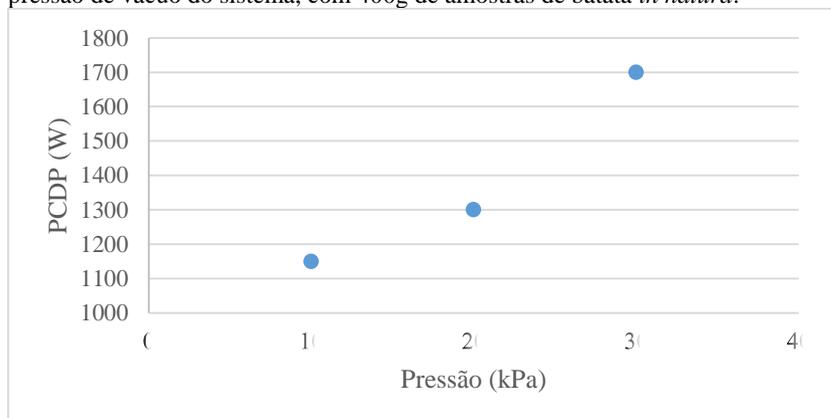
Figura 3. 14 - Curva da potência crítica de descarga de plasma (PCDP) versus massa de batatas *in natura*, a 1 kPa de pressão.



A relação diretamente proporcional entre pressão de vácuo do sistema e PCDP pode ser observada na figura 3.15. Apesar do uso de baixas pressões de vácuo no processo possibilitar um aumento na taxa de secagem, a pressão de trabalho neste estudo deve ser fixada em 3 kPa, pois tal pressão assegura a não formação de descarga de plasma no intervalo de 50 W a 1700 W de potência nominal.

Os resultados indicam que a aplicação de 3 kPa pressão de vácuo e o uso de 400 g de amostra foram as melhores condições estudadas para evitar a descarga de plasma, possibilitando o estudo da secagem de batatas.

Figura 3. 15 - Curva da potência crítica de descarga de plasma (PCDP) versus pressão de vácuo do sistema, com 400g de amostras de batata *in natura*.



3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

O sistema permite realizar secagem com aplicação de micro-ondas em condições de vácuo, em completa segurança, apresentando vazamento de micro-ondas abaixo do limite de segurança. O sistema de pesagem *on-line* instalado no secador é uma ferramenta importante para a investigação da secagem por micro-ondas à vácuo. Além disso, a utilização de uma célula de carga oferece a possibilidade de mudar a sensibilidade e a capacidade do sistema de pesagem e sua adaptação a diferentes necessidades.

A utilização dos sensores de fibra ótica permitiu o monitoramento da temperatura interna das amostras de batata em tempo real, com boa reprodutibilidade, fornecendo informações úteis para o controle da potência.

A fim de evitar a formação da descarga de plasma durante a secagem por micro-ondas a vácuo, constata-se que a pressão da cavidade deve ser aplicada acima de 3 kPa. Além disso, quanto maior a massa de amostras utilizada, menor a probabilidade de ocorrer a descarga de plasma. Os resultados obtidos, permitiram a determinação das faixas operacionais para secagem de batatas. Tais faixas serão utilizadas no estudo da cinética de secagem discutidas no capítulo 5.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPOS, M.S. Influência da energia de micro-ondas na qualidade tecnológica do trigo. **Dissertação de Mestrado**, Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, UNICAMP, Campinas, SP, 120 p. 1986.

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

DUAN X., ZHANG M.; MUJUMDAR A. S.; WANG S. Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus japonicus*). **Journal of Food Engineering**, v. 96, p. 491–497, 2010.

GUPTA, M.; WONG, W. L. E. *Microwaves and metals*. Singapore: John Wiley & Sons, Asia, Pte. Ltd. 2007.

IEC – International Electrotechnical Commission (2004). International Standard: Household microwave ovens – Methods for measuring performance, Edition 3.1, Switzerland, 17.

LOMBRAÑA, J.I.; ZUAZO, I.; IKARA, J. Moisture diffusivity behavior during freeze drying under microwave heating power application. **Drying Technology**, v. 19, n. 8, p. 1613–1627, 2001.

METAXAS, A. C.; MEREDITH, R. J. *Industrial microwave heating*. London, Peter Peregrinus Ltd, 1983.

ROVERO, G.; GHIO, S.; BARRESI, A. Development of a prototype capacitive balance for freeze-drying studies. **Chemical Engineering Science**, v. 56, p. 3575–3584, 2001.

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

ZHANG, M.; TANG, J.; MUJUMDAR, A. S.; WANG, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. **Trends in Food Science & Technology**, v. 17, p. 524–534.

CAPÍTULO 4

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PRÉ-TRATAMENTOS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MICROESTRUTURAIS DE FATIAS DE BATATAS

4.1 INTRODUÇÃO

O branqueamento é um tratamento térmico muito utilizado antes do congelamento, produção de conservas e secagem de frutas e vegetais (CANET e ALVAREZ, 2006). Tem como objetivo a redução da carga microbiana, inativação de enzimas e a remoção de gases do material, como o oxigênio, que podem provocar reações químicas durante o armazenamento. Assim, o branqueamento é auxiliar na preservação da textura, sabor e cor do produto (CHEN e ROSENTHAL, 2015).

A água quente e o vapor são os meios de aquecimento mais utilizados no processo de branqueamento na indústria de alimentos. Estas técnicas têm algumas desvantagens, tais como lixiviação de vitaminas e nutrientes solúveis, amolecimento do tecido e geração de águas residuais (GONÇALVES et al., 2007).

Nos últimos anos, o branqueamento por micro-ondas tem sido usado para minimizar estes problemas. As vantagens de branqueamento por micro-ondas incluem aquecimento volumétrico da amostra, reduzidos tempos de processamento e rápida inativação de complexos enzimáticos que causam degradação da qualidade. Além disso, o processo não exige quantidade adicional de água, resultando numa lixiviação mínima de vitaminas, aromas, pigmentos, hidratos de carbono e outros componentes solúveis em água (DE ANCOS et al., 1999).

No entanto, assim como os métodos convencionais, o branqueamento por micro-ondas causa danos à estrutura das amostras, causando perda de massa, fissuras e colapso da estrutura vegetal. Existem muitos estudos comparativos entre branqueamento por micro-ondas e pelos métodos tradicionais, que evidenciam esses problemas (KIDMOSE e MARTENS, 1999, LATORRE et al., 2012, LATORRE et al., 2013). De acordo com Kratchanova, et al. (2004), o branqueamento por micro-ondas leva a alterações destrutivas no tecido da planta e essas mudanças alteram a característica capilar-porosa e a capacidade de sorção de água do material vegetal.

Por outro lado, o processo de impregnação a vácuo consiste na imersão de um produto poroso em uma solução impregnante com aplicação de vácuo por um dado período de tempo, ocasionando a saída de parte dos gases oclusos nos poros. Após o período de vácuo, a

pressão atmosférica é restabelecida no sistema e a amostra permanece imersa na solução por um período de tempo, resultando na entrada da solução externa pela ação do mecanismo hidrodinâmico (FITO e PASTOR, 1994). Este mecanismo gera alterações significativas nas propriedades físico-químicas e estruturais de alimentos (FITO e CHIRALT, 2000), além de favorecer o aquecimento por micro-ondas.

Neste contexto, o objetivo deste capítulo foi estudar a impregnação a vácuo combinada com aquecimento por micro-ondas (IM) como um método alternativo de branqueamento, comparando-os com branqueamentos convencionais por água quente (BC) e por micro-ondas (BM).

Os objetivos específicos foram:

✓ Estudar a cinética de escurecimento e o índice de escurecimento como meio de avaliação indireta da inativação enzimática;

✓ Caracterizar e comparar as propriedades físicas e estruturais das fatias de batatas obtidas pelos diferentes processos;

✓ Escolher os tratamentos que promovam alta porosidade e melhor distribuição estrutural dos poros para serem estudados no próximo capítulo de secagem de batatas *chips*.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram estudados diferentes processos de branqueamento: i) impregnação a vácuo seguida de aquecimento por micro-ondas (IM), ii) branqueamento por imersão em água quente (convencional, BC) e iii) branqueamento por imersão em água, com aquecimento por micro-ondas (BM). Os efeitos desses tratamentos nas características físicas e estruturais das fatias de batata foram investigados. A Figura 4.1 apresenta o fluxograma da estratégia de investigação científica adotada neste trabalho.

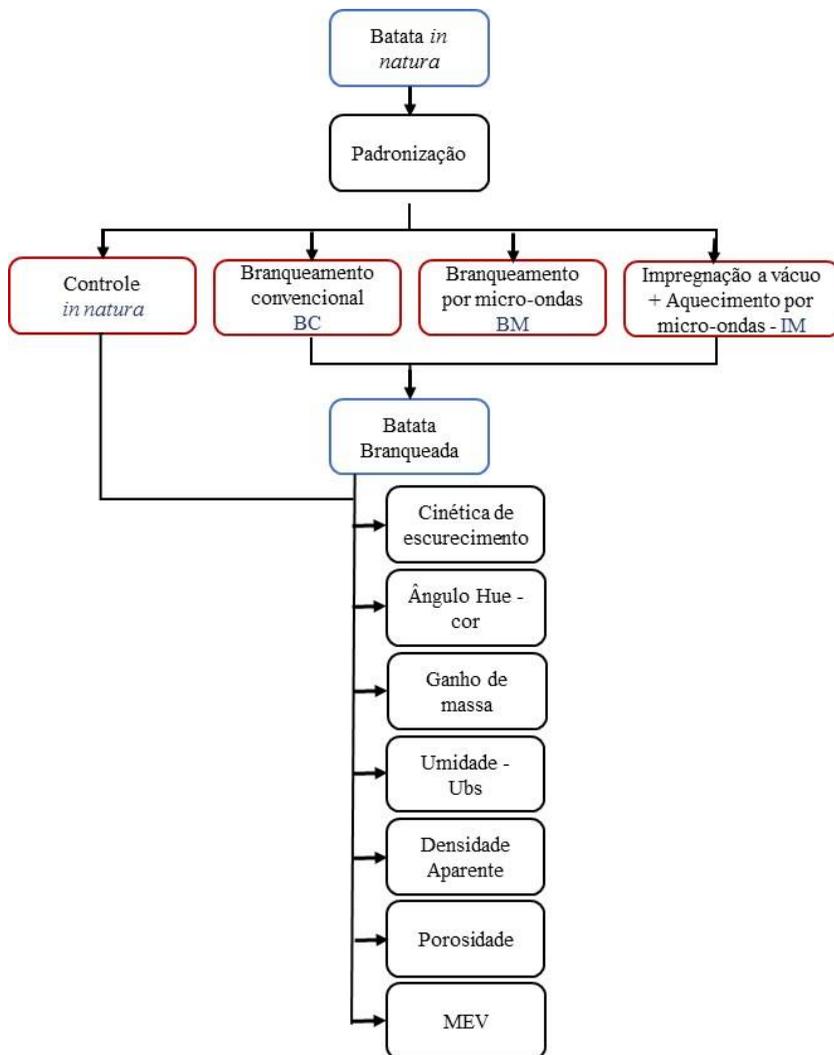
4.2.1 Preparo das amostras

As amostras de batata (*Solanum tuberosum* L.) foram adquiridas no comércio local (Florianópolis, SC, Brasil). A seleção das amostras foi realizada pelo tamanho e análise visual da casca. Na seleção levou-se em conta a presença de cortes, defeitos, furos e fungos.

As batatas selecionadas foram lavadas em água corrente, descascadas manualmente e posteriormente cortadas em fatias de 5 mm \pm 0,5 mm de espessura. Em seguida as fatias foram cortadas com um

molde de metal na forma de cilindro oco com 60 mm de diâmetro, para obter amostras de geometrias uniformes.

Figura 4. 1- Fluxograma esquemático dos processos de impregnação a vácuo com aquecimento micro-ondas (IM), branqueamento convencional com água quente (BC) e branqueamento micro-ondas (BM).



4.2.2 Pré-tratamentos das amostras

As 400 g de fatias de batata foram submetidas a três diferentes processos de branqueamento. As condições dos branqueamentos por micro-ondas foram estabelecidas em testes preliminares:

BC - Por imersão em água destilada a 95 °C / 5 min (Bizzarri, Andreotti, e Massini,1981).

BM - Por micro-ondas (2,4 GHz) à 2,25 W/g por 3 min, após imersão em água destilada.

IM -Por impregnação à vácuo seguida de aquecimento por micro-ondas (2,4 GHz) à 2,25 W/g por 1 min.

Na impregnação a vácuo as amostras foram imersas em água destilada, contida num bequer de vidro com capacidade de 4 L. A pressão de 5 kPa foi aplicada utilizando uma bomba de vácuo (LC205-DVP Vacuum Technology, Itália). Após 10 min à temperatura ambiente (25° C) a pressão atmosférica foi restabelecida. As amostras foram drenadas sobre uma grade de malha de aço inoxidável (5 mm) à temperatura ambiente (25° C) durante 5 min.

Após o branqueamento, as amostras foram resfriadas em água a temperatura de 25 °C e drenadas. A razão de produto/água destilada foi padronizada em 1:5 (p/v). Fatias de batata *in natura* foram mantidas como controle.

4.2.3 Equipamento experimental

O dispositivo experimental utilizado para a realização do processo de impregnação a vácuo e aquecimento micro-ondas é o secador micro-ondas apresentado no capítulo 3.

4.2.4 Caracterização do produto branqueado

4.2.4.1 Cor

As medidas de cor das amostras de batata *in natura* e branqueadas pelos diferentes métodos foram determinadas por um colorímetro MiniScan (HunterLab, Modelo - EZ, USA) operando no sistema CIELAB (L^* , a^* , b^* , ΔE^*), utilizando sistema de iluminação D65. O índice “ L^* ” mede a luminosidade variando de preto a branco ($L^* = 0$ preto e $L^* = 100$ branco); “ a^* ” mede a tonalidade verde/vermelha ($+a^* =$ vermelho e $-a^* =$ verde); e “ b^* ” mede a tonalidade amarela/azul ($+b^* =$ amarelo e $-b^* =$ azul).

A diferença de cor (ΔE) foi obtida por meio da Equação 2.

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_o - L)^2 + (a_o - \bar{a})^2 + (b_o - \bar{b})^2} \quad (2)$$

onde ΔE^* é a mudança total na cor das batatas branqueadas com relação a batata *in natura*, representada pelo índice “o”. A leitura foi realizada em quadruplicata.

4.2.4.2 Índice de escurecimento (\emptyset)

O valor do ângulo Hue pode ser considerado como um índice do escurecimento enzimático (Nicoli et al., 1994), sendo calculado como (Equação 3):

$$\emptyset = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (3)$$

O índice de escurecimento foi realizado imediatamente após os processos de branqueamento (BC, BM e IM) em intervalos regulares de tempo (1 h). O estudo foi realizado ao longo de um período de 5 h de armazenamento a 25 °C, sob as mesmas condições de luz para verificar a eficiência do branqueamento.

4.2.4.3 Teor de umidade

O teor de umidade foi determinado por gravimetria em estufa a vácuo (TECNAL, TE-395) a 70 °C, segundo a metodologia da A.O.A.C. (2005). O percentual de umidade das amostras, em base seca (UBS) e base úmida (UBU), foi calculado de acordo com as equações 4 e 5:

$$U_{BS} = \frac{(m_o - m_f)}{m_s} \times 100 \quad (4)$$

$$U_{BU} = \frac{(m_o - m_f)}{m_o} \times 100 \quad (5)$$

onde m_o e m_f são a massa da amostra antes e depois da secagem em estufa, e m_s é a massa seca.

4.2.4.4 Atividade de água (a_w)

A atividade de água (a_w) foi determinada em higrômetro digital (Aqualab Modelo – Series 3 TE, Decagon Devices, Inc., Pullman,

EUA), a 25 °C. A a_w foi determinada para cada tratamento e para as amostras *in natura*. As análises foram realizadas em triplicata.

4.2.4.5 Volume aparente (V_{ap}) densidade aparente (ρ_{ap})

O volume aparente (V_{ap}) foi determinado indiretamente pela medida da força de empuxo da amostra imersa em *n*-heptano (LOZANO et al., 1980). A cesta (Figura 4.3) foi suspensa na parte inferior de uma balança analítica (Figura 4.4) com precisão de 0,0001 g (Marte, Modelo-AY220, Filipinas). A massa da cesta foi registrada no ar (m_c) e imersa em *n*-heptano ($m_{c,h}$). Uma amostra de batata foi colocada na cesta e suas massas no ar ($m_{c,m}$) e em *n*-heptano ($m_{c,m,h}$) foram registradas. O volume aparente foi calculado de acordo com a Equação 6. O *n*-heptano utilizado possui densidade igual a 0,68 g.cm⁻³ a 25 °C. A análise foi realizada em quadruplicata.

$$V_{ap} = \frac{(m_{c,m} - m_c) - (m_{c,m,h} - m_{c,h})}{\rho_s} \quad (6)$$

Figura 4. 2- Cesta para medição de amostras em solvente.



Fonte: PORCIUNCULA (2014).

Figura 4. 3 - Balança analítica, com gancho acoplado para medições em solventes.



Fonte: PORCIUNCULA (2014).

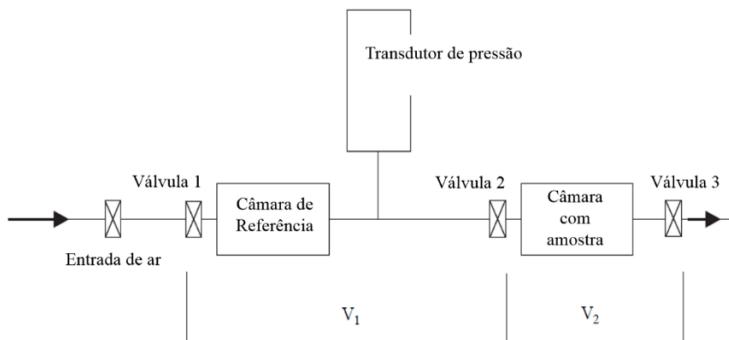
A densidade aparente (ρ_{ap}) das amostras foi determinada pela razão entre a massa da amostra (m_m) e o volume aparente (V_{ap})(Equação 7).

$$\rho_{ap} = \frac{m_m}{V_{ap}} \quad (7)$$

4.2.4.6 Volume real

O volume real (V_r) foi medido utilizando um picnômetro de ar comprimido, construído para trabalhar com sólidos úmidos ou secos, de acordo com metodologia proposta por Sereno et al. (2007). O diagrama esquemático e a ilustração do picnômetro construído no Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI-UFSC) estão apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6, respectivamente.

Figura 4. 4 - Diagrama esquemático do picnômetro de ar comprimido.



Fonte: SERENO et al. (2007).

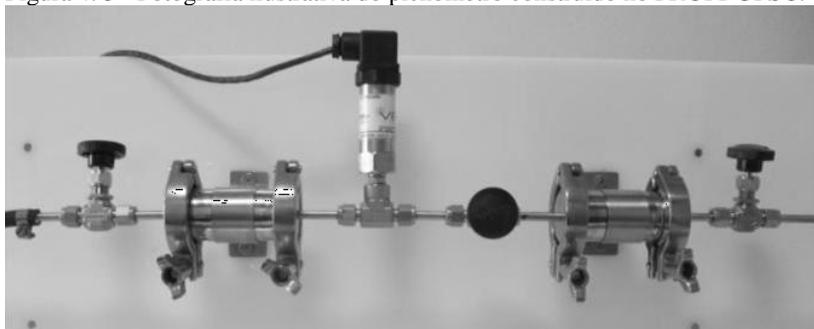
O picnômetro é um instrumento que utiliza ar comprimido como fluido de preenchimento dos espaços vazios. O restante da amostra, na qual o gás não penetra, é considerado como volume de sólido. O picnômetro mede a mudança na pressão do experimentado por uma quantidade conhecida de gás comprimido numa câmara de referência (volume constante). Quando o gás se expande para uma segunda câmara contendo a amostra, ocorre uma mudança na pressão e temperatura. Assumindo comportamento de gás ideal é possível calcular o volume

real da amostra. O V_r foi calculado utilizando a Equação 8, sendo a análise realizada em quadruplicata.

$$V_r = \frac{V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}{\left(\frac{P_{atm}}{P_2} \cdot \frac{T_2}{T_{amb}} - 1 \right)} + V_2 \quad (8)$$

onde P_{atm} e T_{amb} são a pressão e a temperatura medidas com o 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 válvulas 1 e 3 fechadas.

Figura 4. 5 - Fotografia ilustrativa do picnômetro construído no PROFI-UFSC.



Fonte: PORCIUNCULA (2014).

4.2.4.7 Porosidade (ε)

A porosidade foi calculada a partir dos valores de volume real (V_r) e volume aparente (V_{ap}), conforme a equação 9.

$$\varepsilon [\%] = \left(1 - \left(\frac{V_r}{V_{ap}} \right) \right) * 100 \quad (9)$$

4.2.4.8 Determinação da variação de massa (Δm)

A transferência de massa foi caracterizada pela determinação do parâmetro de variação de massa (Δm). A determinação do parâmetro Δm foi realizada para as amostras BC, BM e IM. As amostras foram pesadas antes e depois de cada processo. Para reduzir o erro nessa determinação, o excesso de solução aderida na superfície da amostra foi removido com o uso de papel filtro absorvente por 5 s de cada lado da amostra (procedimento realizado antes de cada pesagem). Na etapa de branqueamento, as amostras foram acondicionadas à temperatura de 25 °C em estufa (Marca DIST, modelo BOD DI 312-240 M) durante 20 min, para estabilizar a temperatura.

A variação de massa foi determinada pela seguinte Equação (10):

$$\Delta m = \frac{m_2 - m_1}{m_o} \quad 10)$$

onde m_o é a massa inicial da amostra, m_2 é a massa ao final de cada tratamento e m_1 é a massa no tratamento anterior.

4.2.4.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens de microscopia das amostras de batata foram realizadas no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) - UFSC. As imagens foram utilizadas para analisar possíveis alterações na microestrutura da batata após os processos de branqueamento BC, BM e IM. As amostras obtidas por MEV foram previamente liofilizadas, e foi assumido que o processo de liofilização não modificou as estruturas das amostras. O recobrimento das amostras com ouro foi realizado utilizando um metalizador LEICA (EM SCD500). O microscópio utilizado foi o de varredura (JEOL JSM 6390LV) com fonte de elétrons de tungstênio e detector de elétrons secundários e retro espalhados. As imagens capturadas foram da parte interna das amostras fraturadas manualmente, com ampliações de 30 e 100 vezes.

4.2.4.10 Análise estatística

Os resultados obtidos durante as análises de cor foram analisados estatisticamente com o programa *Statistica 7.0* (StatSoft, Tulsa, Estados Unidos), através de análise de variância (ANOVA) e pelo teste de Tukey a 95% de confiança.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Efeito do tempo de tratamento e dos diferentes processos de branqueamento no escurecimento enzimático

A atividade da polifenoxidase (PPO) está estritamente relacionada com as alterações de cor, devido à formação de polímeros coloridos (WAKAYAMA, 1994). Portanto, as medidas de cor, como ângulo Hue (\emptyset) e L^* são utilizadas para avaliar o tratamento térmico (NICOLI, et al. 1994). Severine et al. (2003) investigaram os efeitos do tempo de tratamento no branqueamento de fatias de batata, como prevenção do escurecimento enzimático. Análises de cor foram utilizadas como índices de eficácia dos tratamentos térmicos aplicados nas amostras.

Para avaliar os efeitos do tempo no escurecimento das batatas após os processos de branqueamento, valores de L^* e \emptyset foram medidos durante o armazenamento de 5 h a temperatura de 25 °C. Os resultados estão evidenciados na Figura 4.6 e 4.7. As barras de erro mostram os desvios padrão da média de 9 amostras. Observou-se uma diminuição progressiva do parâmetro L^* da amostra *in natura*, caracterizando o escurecimento das amostras. Por outro lado, amostras branqueadas pelos três tratamentos estudados tiveram comportamento constante durante as 5 h de observação, sem alteração da luminosidade, indicando inativação da enzima PPO.

Nas Figuras 4,6 a 4.11 as seguintes nomenclaturas foram usadas:

- BC - Branqueamento convencionalmente (água quente);
- BM - Branqueamento micro-ondas;
- IM - Impregnação a vácuo e aquecimento por micro-ondas.

As mudanças de cor do início do armazenamento (t=0 h) e no instante final (t=5 h) das fatias de batatas podem ser observadas na Figura 4.8 comprovando os resultados obtidos pela curva de escurecimento e pelo ângulo hue.

Figura 4. 6 - Valores de L*, medidos em batatas imediatamente depois dos processos de branqueamento (BC, BM e IM) e durante 5 h de armazenamento a temperatura de 25 °C. Efeito do escurecimento enzimático x tempo.

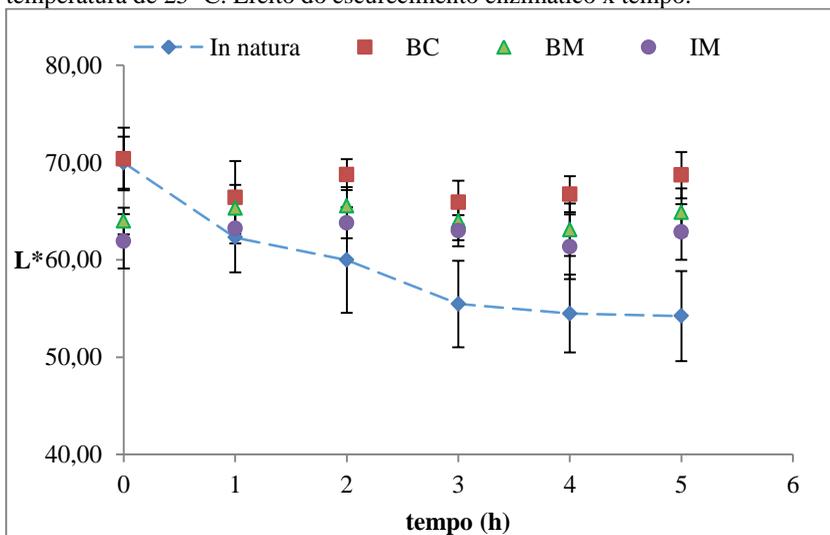


Figura 4. 7 - Valores de L*, medidos em batatas imediatamente depois dos processos de branqueamento (BC, BM e IM) e durante 5 h de armazenamento a temperatura de 25 °C. Efeito do escurecimento enzimático x tempo.

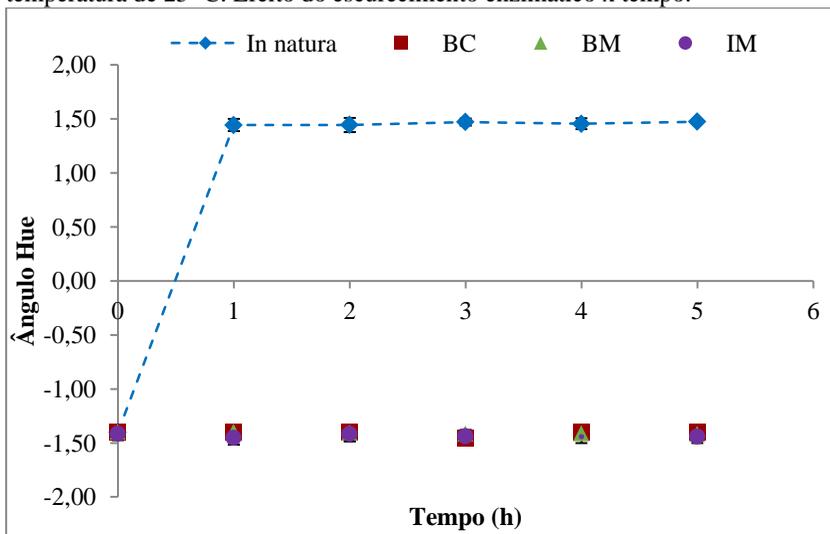
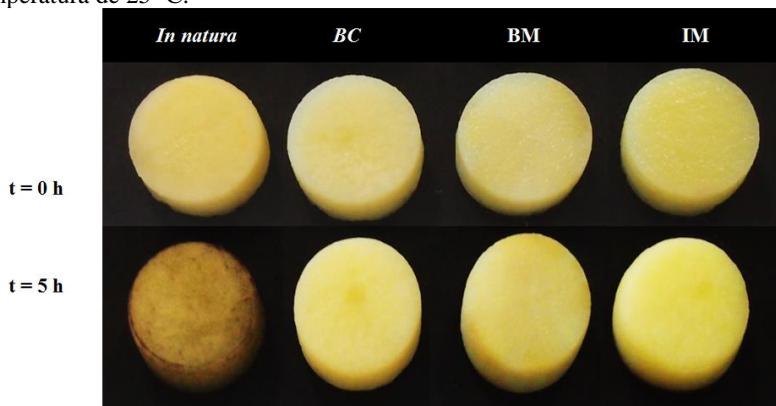


Figura 4. 8 - Imagens das fatias de batatas após 5 h de armazenamento a temperatura de 25 °C.



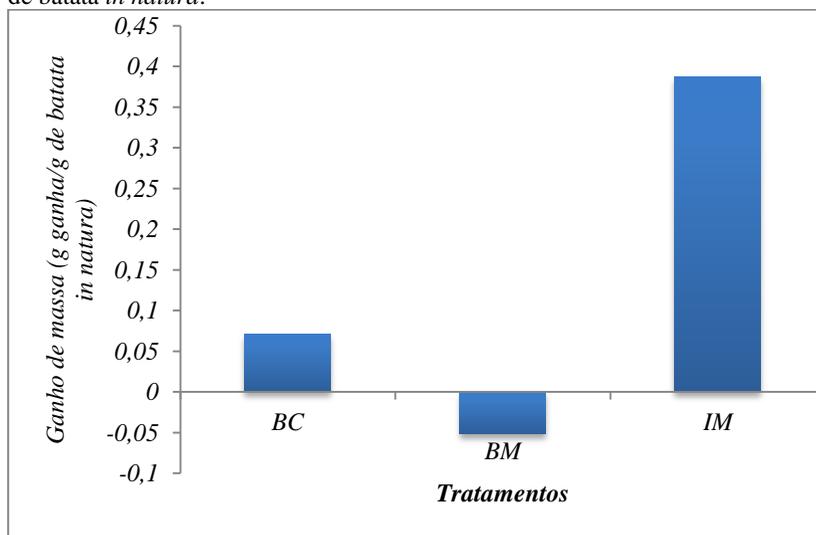
4.3.2 Variação de massa nas amostras branqueadas

A variação de massa das amostras (Δm) causadas pelos processos de branqueamento BC, BM e IM estão apresentadas na Figura 4.9. No processo BC houve um aumento de 7,09 % da massa da amostra em relação à massa da amostra *in natura*. Este aumento pode ser atribuído ao aumento da capacidade de retenção de água dos colóides do vegetal, resultados que corroboram os de Muftugil, (1986). A gelatinização do amido contribui para o processo de absorção de água. A faixa de temperatura de gelatinização do amido da batata é de 56-66 °C, quando a batata é aquecida acima dessa faixa, os grânulos de amido absorvem uma grande quantidade de água e incham, alterando a massa inicial da amostra (JARVIS et al., 1992).

O tratamento BM reduziu a massa em 5,16 %, comportamento relatado em muitos estudos de branqueamento de hortaliças por micro-ondas (RUIZ-OJEDA e PENÁS, 2013; SEVERINI, 2013; RAMESH, 2002; KIDMOSE e KAACK, 1999). Latorre et al. (2012) investigaram o branqueamento de beterraba por micro-ondas, com e sem imersão em água. Eles observaram que os dois tratamentos causaram perda de massa, sendo que o branqueamento por micro-ondas sem imersão em água apresentou uma maior perda de massa, retração e encolhimento das amostras de beterraba. Severine et al. (2003) estudaram o branqueamento de cubos de batatas por micro-ondas, imersos em água e em três diferentes soluções salinas. Verificou-se uma redução no

escurecimento enzimático e na atividade da PPO. Isso aconteceu em função do aumento da gelatinização do amido e da perda de massa, sendo que todos tratamentos ocasionaram perda de massa dos cubos de batata.

Figura 4. 9 - Variação da massa das batatas em cada tratamento de branqueamento (em relação à amostra não branqueada) expressa em g por 100 g de batata *in natura*.



O processo de IM apresentou um ganho de massa de 39 % em relação à amostra *in natura*. Esse resultado foi devido ao preenchimento dos poros da amostra com água, no processo de impregnação a vácuo, o que conservou a estrutura física da fatia de batata. Dessa forma não houve colapso da estrutura, além de aumentar a eficácia do aquecimento por micro-ondas, por favorecer maior ganho de água pela amostra. O tratamento BM ocasionou uma perda de 6 % de massa. O atrito intermolecular produzido por aquecimento por micro-ondas pode elevar a pressão interna na célula, levando à ruptura e perda do conteúdo celular.

4.3.3 Caracterização física e estrutural

Cada tipo de branqueamento gera danos diferentes à estrutura vegetal, tornando importante o conhecimento da microestrutura e propriedades físicas, como porosidade e densidade aparente (FEMENIA, et al., 1998; CANET et al., 2005). Na Tabela 4.1 estão apresentados os dados das propriedades físicas das fatias de batata *in natura* e branqueadas pelos processos BC, BM e IM.

Tabela 4. 1- Propriedades físicas das amostras de batata (*Solanum tuberosum* L.) *in natura* e branqueadas em diferentes por processos.

Tratamentos	Umidade (g água/ g ss)	Densidade aparente (g/cm ³)	Porosidade (%)
<i>In natura</i>	4,22 ± 0,03 ^b	1,044 ± 0,043 ^a	6,37 ± 3,56 ^a
BC	5,65 ± 0,04 ^c	1,037 ± 0,074 ^a	7,27 ± 3,83 ^a
BM	3,02 ± 0,03 ^a	1,050 ± 0,051 ^a	5,51 ± 4,55 ^a
IM	6,58 ± 0,04 ^d	1,049 ± 0,038 ^a	8,80 ± 3,25 ^a

BC = Branqueamento convencional (água quente); BM = Branqueamento micro-ondas; IM = Impregnação a vácuo + aquecimento micro-ondas.

Os teores de umidade das amostras submetidas ao diferentes tratamentos diferiram estatisticamente ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey, sendo que amostras tratadas por BC e IM apresentaram umidades que foram, respectivamente, 34 % e 56 % maiores que a amostra *in natura*. A porosidade apresentou uma relação diretamente proporcional com a umidade, tendo as amostras BC e IM apresentado os maiores valores. O tratamento BM apresentou menores resultados para umidade (3,02 g água/100g ss) e porosidade (5,51%), confirmando os resultados de variação de massa (Δm) discutidos no item anterior. Os resultados da densidade aparente da batata *in natura* corroboram com os de Mhemdi et al. (2013), que encontraram o valor de $1,08 \pm 0,04$ g/cm³.

Nas Figuras 4.10 e 4.11 estão apresentadas as micrografias do corte transversal das amostras antes (*in natura*) e após os tratamentos de branqueamento BC, BM e IM. Evidenciou-se diferentes características nos tecidos das batatas branqueadas pelos diferentes métodos.

Nas imagens da amostra *in natura* (Figura 4. 10) observa-se a parede celular da batata (parênquimas), contendo aglomerados de grânulos de amido não gelatinizado. Segundo Liu, et al. (2012), o amido da batata geralmente exibe forma redonda ou oval, superfície lisa e granulometria variada (10-100 μ m).

Figura 4. 10- Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do corte transversal de fatias de batata in natura com aumento de $30\times$ (a1), $100\times$ (a2) e $500\times$ (a3).

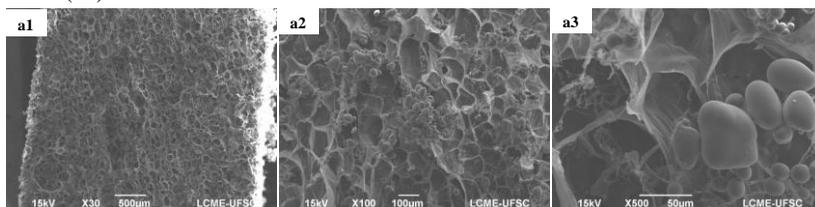
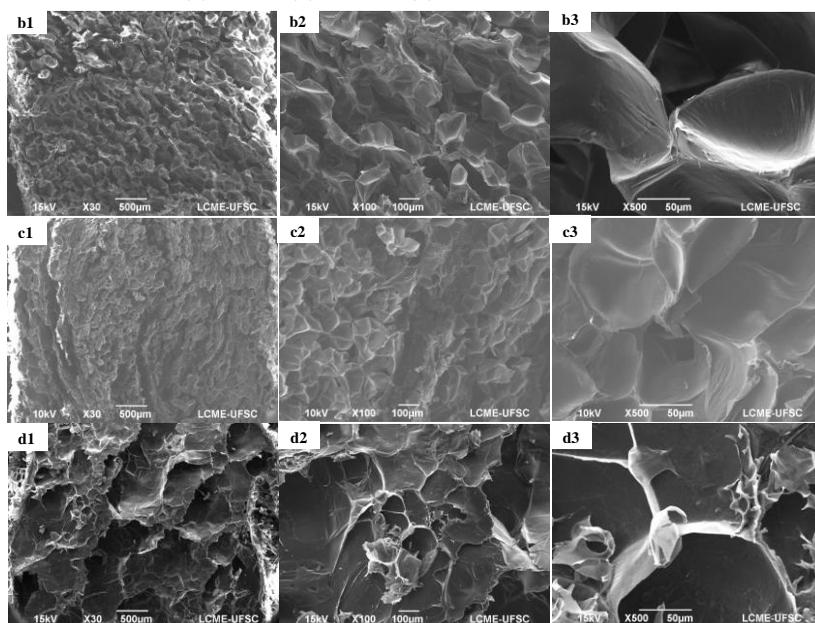


Figura 4. 11- Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos cortes transversais de fatias de batatas branqueadas BC (b), BM (c) e IM (d) com aumento de $30\times$ (1), $100\times$ (2) e $500\times$ (3).



Nos tratamentos onde as amostras foram imersas em água (BC e BM- Figura 4.11 b e c), as características morfológicas observadas foram semelhantes, onde ocorreu a gelatinização do amido, sendo impossível distinguir suas frações nas paredes celulares. Porém, amostras branqueadas por micro-ondas (BM) apresentaram fendas longitudinais profundas distribuídas pela amostra, evidenciando o colapso da estrutura, com perda de massa.

Kidmose e Martens (1999) estudaram o branqueamento por micro-ondas de fatias de cenoura e observaram que o processamento térmico produziu mudanças significativas na estrutura da parede celular, resultando em amaciamento do tecido (*softening*). Essas alterações produziram rupturas da membrana celular e células colapsadas com estrutura semelhante às obtidas neste estudo.

Batatas branqueadas por IM apresentaram aparência significativamente diferente daquelas branqueadas pelos outros tratamentos. Algumas características do tecido foram preservadas, pois as células parênquimas ainda podem ser identificadas e apresentaram uma aparência enrugada. Observa-se também cavidades rasas e aleatórias distribuídas por toda a estrutura, que provavelmente devem-se ao efeito do vácuo durante a impregnação.

4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Os resultados do presente estudo evidenciam que o branqueamento IM pode ser utilizado como um novo método de branqueamento de fatias de batata, inativando a PPO, evitando a perda de massa e preservando a estrutura física do produto.

O branqueamento por BM apresentou maior modificação da microestrutura, com diminuição da porosidade e perda de massa.

Os processos BC e IM apresentaram melhores resultados com relação à porosidade, perda de massa e microestrutura. Desta forma, serão utilizados como pré-tratamentos na secagem de batatas *chips*, assunto tratado no capítulo 5.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOAC. Association of Official Analytical Chemists. *Official methods of analysis*. Ed. 16, Washington, DC, 1094p, 2005.

BIZZARRI, G.; ANDREOTTI, R.; MASSINI, R. *Industria Conserve*, v. 56, p. 97–102, 1981.

CANET, W.; ALVAREZ, M. D. Quality and Safety of Frozen Vegetables. In: S. Da-Wen (Ed.), *Handbook of Frozen Food Processing and Packaging*, CRC Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, Chap. 18, 2006.

CHEN J.; ROSENTHAL, A. Processamento de alimentos. In: CAMPBELL-PLATT G. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Barueri: Manole, p.215-255. 2015.

ERLE, U. The microwave processing of foods. Cap. 8: *Drying using microwave processing*. Editado por Helmar Shubert e Marc Regier, CRC Press LLC, Flórida, EUA, 2005.

FEMENIA, A.; SANCHEZ, E. S.; SIMAL, S.; ROSSELLO, C. Effects of drying pretreatments on the cell wall composition of grape tissues. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 46, p. 271-276, 1998.

FITO, P.; PASTOR, R. Non-diffusional mechanisms occurring during vacuum osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 21, n. 4, p. 513-519, 1994.

FITO P; CHIRALT, A. Vacuum impregnation of plant tissue. In: *Minimally processed fruits and vegetables*, Maryland: Aspen publication, Cap. 11, p. 189-204, 2000.

KIDMOSE, U.; MARTENS, H. J. Changes in texture, microstructure and nutritional quality of carrot slices during blanching and freezing. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 79, p. 1747-1753, 1999.

KRATCHANOVA, M.; PAVLOVA, E.; PANCHEV, I. The effects of microwave heating of fresh orange peels on the fruit tissue and quality of extracted pectin. **Carbohydrate Polymers**, v. 56, p. 181-185, 2004.

LATORRE, M. E.; BONELLI, P.; ROJAS, A. M.; GERSCHENSON, L. N. Microwave inactivation of red beet (*Beta vulgaris L.* var. *conditiva*) peroxidase and polyphenol oxidase and the effect of radiation on vegetable tissue quality. **Journal of Food Engineering**, v. 109, p. 676-684, 2012.

LIU, J.; MING, J.; LI, W.; ZHAO, G. Synthesis, characterization and in vitro digestibility of carboxymethyl potato starch rapidly prepared with microwave-assistance. **Food Chemistry**, 133, 1196–1205, 2012.

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

MCCOMBER, D. R.; OSMAN, E. M.; LOHNES, R. A. Factors related to potato mealiness. **Journal of Food Science**, v. 53, p. 1423–1426, 1988.

NICOLI, M. C.; ANESE, M.; SEVERINI, C. Combined effects in preventing enzymatic browning reactions in minimally processed fruits. **Journal of Food Quality**, v. 17, p. 221–229, 1994.

PORCIUNCULA, B. D. A. Processos de desidratção com controle da microestrutura e textura de frutas desidratadas usando ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Alimentos) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.

SERENO A. M.; SILVA M.A.; MAYOR, L. Determination of particle density and porosity in foods and porous materials with high moisture content. **International Journal of Food Properties**, v.10, p.455-469, 2007.

WAKAYAMA, T. Polyphenol oxidase activity in Japanese apples: differences among cultivars and prevention by heat, ascorbic acid and reduced oxygen. In L. Y. Chang & J. R. Whitaker (Eds.), *Proceedings of the Symposium "Enzymatic browning and its prevention"* (pp. 251–266). **208th National Meeting of the American Chemical Society**, August 21–26. Washington, DC, 1994.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DA SECAGEM COM MICRO-ONDAS SOB VÁCUO PARA OBTENÇÃO DE BATATAS *CHIPS* CROCANTES E LIVRES DE ÓLEO

5.1 INTRODUÇÃO

Batatas *chips* estão entre os lanches mais consumidos no mundo (LOON et al., 2005). No processamento, as batatas podem ser cortadas em diferentes formatos, com destaque industrial para as fatias, muito consumidas como *snacks*. Na indústria, as fatias são lavadas com água para remover o excesso de amido superficial e reduzir a aderência, ou branqueadas para reduzir o nível de açúcares redutores e o escurecimento antes da fritura (WRIGLEY et al., 2016). Esses açúcares redutores participam da reação de *Maillard* com aminoácidos livres durante a fritura, produzindo batatas *chips* escuras e com grandes quantidades de acrilamida, composto que tem sido associado a diversos tipos de câncer (CHUDA et al, 2003; HOGERVORST et al, 2007).

Após o branqueamento, as fatias são fritas em diferentes tipos de óleos vegetais. A área superficial elevada das fatias favorece a absorção e retenção superficial de gordura, resultando em aproximadamente 40-45% em fritura doméstica e em 36% em fritura industrial (SINGH e KAUR, 2016). Após a fritura, antes do produto esfriar e solidificar a gordura superficial, os *chips* recebem uma aplicação de sais e/ou temperos. A ingestão destes alimentos com alto teor de gordura é indesejável devido aos efeitos nocivos para a saúde (KROKIDA et al., 2001).

Diante disto, cresce a demanda por produtos livres de óleo de fritura, estáveis à temperatura ambiente e com características sensoriais diferenciadas. Isso tem impulsionado a investigação de técnicas alternativas para substituir a fritura convencional na obtenção de produtos saudáveis, com textura e sabor agradáveis aos consumidores (SONG et al., 2007).

A secagem por micro-ondas com aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo (MPV) é um processo alternativo na obtenção de produtos desidratados de alta porosidade e textura crocante (LAURINDO et al, 2011). Neste processo, o produto é aquecido à pressão atmosférica utilizando as micro-ondas como fonte de aquecimento. Quando o produto atinge a temperatura desejada, uma súbita redução da pressão (pulso de vácuo) é aplicada, levando à

evaporação da água (secagem *flash*) e resfriamento do produto. Vários ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo podem ser aplicados para alcançar as características desejadas do produto desidratado (PORCIUNCULA, 2014).

O objetivo desse estudo foi obter batata *chips* livre de óleo usando secagem por micro-ondas com aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo (MPV), combinado com diferentes pré-tratamentos: branqueamento convencional (BC), impregnação a vácuo (IM) e os pré-tratamentos combinados (BC+IM). A secagem por micro-ondas a vácuo (MV) também foi estudada. As características físicas, microestruturais e de textura das batatas *chips* obtidas pelos processos foram comparadas.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 5.1 apresenta o fluxograma esquemático da estratégia de investigação científica adotada neste trabalho.

5.2.1 Obtenção da matéria-prima e preparo das amostras

As amostras de batata inglesa (*Solanum tuberosum* L.) foram obtidas e preparadas como citado no item 4.2.2.

5.2.2 Pré-tratamentos das amostras

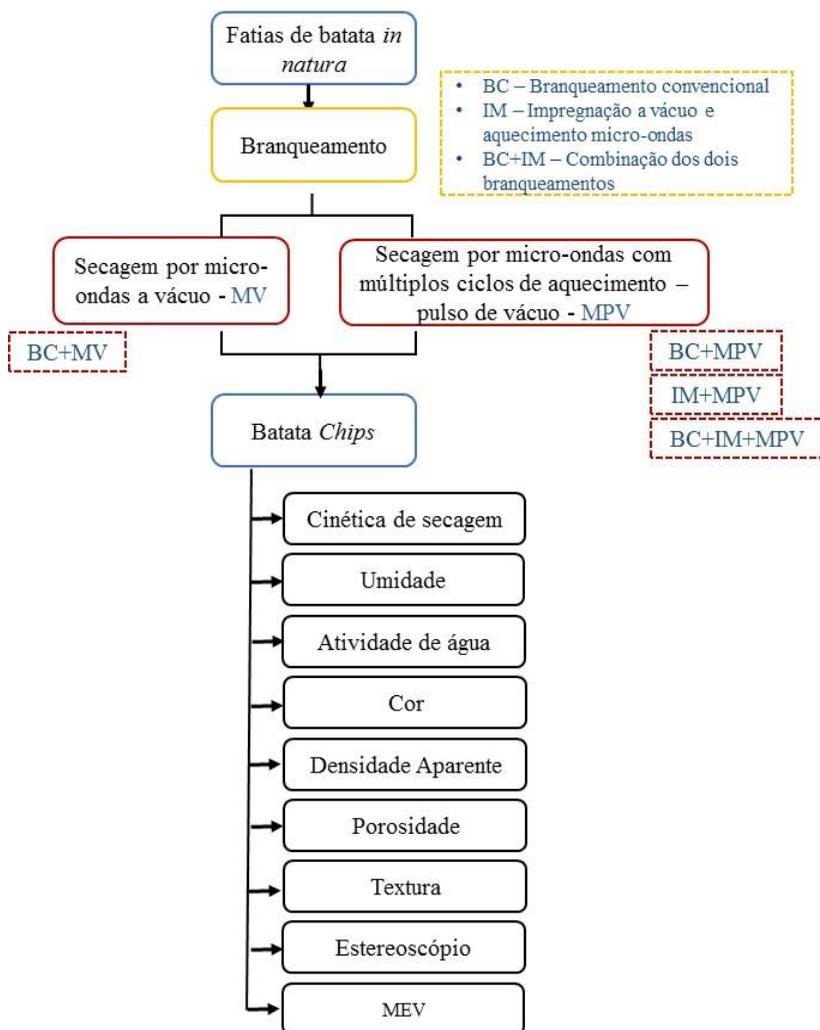
Previamente ao processo de secagem (BC+MV, BC+MPV e BC+IM+MPV) as fatias de batata foram submetidas ao processo de branqueamento convencional por imersão em água quente (BC, capítulo 4), como citado no item 4.2.3.

Nas secagens IM+MPV e BC+IM+MPV as fatias de batata foram impregnadas (IM) como citado no item 4.2.3.

5.2.3. Descrição dos experimentos

Os experimentos de secagem foram realizados em secador com micro-ondas, apresentado no item 3.2.1. Foram realizados dois tipos de secagem por micro-ondas: a vácuo (BC+MV) e com pulsos de vácuo (BC+MPV, BC+IM+MPV e IM+MPV). Ambos os experimentos foram realizados em triplicata.

Figura 5. 1 - Fluxograma esquemático dos processos estudados neste capítulo. BC+MV – Branqueamento + Secagem por micro-ondas a vácuo. BC+MPV – Branqueamento + Secagem por micro-ondas com pulso de vácuo. BC+IM+MPV – Branqueamento + Impregnação a vácuo + Secagem por micro-ondas com pulso de vácuo e IM+MPV – Impregnação a vácuo + Secagem por micro-ondas com pulso de vácuo.

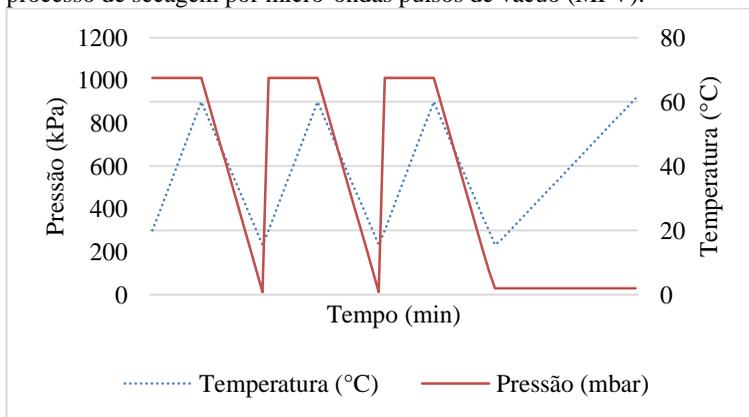


Por meio de testes preliminares, foi estabelecido limite máximo de temperatura de 80 °C para que não houvesse queima da amostra. Na secagem por micro-ondas a vácuo MV (BC+MV), a câmara de secagem foi mantida à pressão atmosférica durante a etapa de aquecimento. Assim o processo foi iniciado à potência nominal de 800 W, e quando o *set point* (80 °C) foi alcançado, a potência foi diminuída em 200 W. Assim durante todo o processo foram utilizadas as potências nominais de 800 W, 600 W, 400W e 200 W. A câmara de secagem foi mantida a pressão de 3 kPa durante toda a secagem.

Para as secagens com ciclos de aquecimento-pulso de vácuo MPV (BC+MPV, BC+IM+MPV e IM+MPV), o processo foi iniciado na potência nominal de 800 W e mantido à pressão atmosférica durante a etapa de aquecimento. Atingido-se 80 °C no interior da batata, o sistema foi despressurizado pela aplicação de um pulso de vácuo. Atingindo 3 kPa, a pressão do sistema foi reestabelecida e um novo ciclo de aquecimento-pulso de vácuo aplicado. Neste processo, foram aplicados três ciclos de aquecimento-pulso de vácuo, seguidos por uma secagem a vácuo mantendo os mesmos parâmetros da secagem MV (temperatura interna das amostras abaixo de 80 °C e a pressão da câmara igual a 3 kPa).

Na Figura 5.2 está representado um diagrama esquemático do perfil pressão-temperatura-tempo. Nestes processos foram aplicados 3 ciclos de aquecimento-pulso de vácuo.

Figura 5. 2 - Diagrama esquemático do perfil pressão-temperatura-tempo para o processo de secagem por micro-ondas pulsos de vácuo (MPV).



A Figura 5.3 mostra a bandeja de polipropileno e a disposição das amostras de batata dentro da câmara de secagem por micro-ondas.

Figura 5. 3 - Suporte-bandeja com amostras de batatas no interior da câmara do secador.



Fonte: Autor.

5.2.4. Cinética de Secagem

As curvas de secagem foram determinadas de forma contínua, medindo-se e registrando-se a massa da amostra no interior da câmara durante o processo. As amostras foram secas até atingirem peso constante.

Nos processos estudados, cerca de $400 \pm 0,5$ g de batata inglesa foram distribuídas homogeneamente sobre a bandeja-suporte, secas sob vácuo contínuo ou com pulsos de vácuo, seguido de vácuo contínuo, à pressão de ≈ 3 kPa. A pesagem das amostras durante a secagem foi realizada pelo sistema de pesagem *online* apresentado no item 3.2.4.

5.2.5. Caracterização do produto desidratado

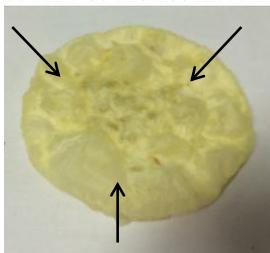
5.2.5.1. Teor de umidade, atividade de água (a_w) e Cor.

O teor de umidade, a_w e cor (valores de L^* , a^* e b^*) das amostras foram determinados segundo o item 4.2.5.

5.2.5.2 Determinação das propriedades mecânicas de textura

Os ensaios mecânicos foram realizados por meio de teste de perfuração com sonda (*probe*) cilíndrica de 2 mm de diâmetro em um analisador de textura (Stable Micro System, Modelo - TA-HD-Plus, Reino Unido). Ao final de cada processo de desidratação foram analisadas três amostras, sendo realizadas no mínimo três perfurações em diferentes regiões das mesmas (Figura 5.4). Em todos os testes, as amostras foram deformadas em 70% da sua espessura inicial.

Figura 5. 4 - Ilustração da localização das perfurações nas amostras de batata durante os ensaios mecânicos.



Fonte: Autor

5.2.5.3 Volume aparente (V_{ap}), densidade aparente (ρ_{ap}), volume real (V_r) e porosidade (ϵ)

V_{ap} , ρ_{ap} , V_r e ϵ foram determinados segundo as metodologias descritas nos itens 4.2.5.

5.2.5.4 Estereoscópio Óptico

As imagens foram realizadas nas partes internas das amostras fraturadas manualmente, utilizando um estereoscópio óptico (Optech, Germany) com uma câmera (Opticam, OPT 10000, Brasil). As imagens capturadas foram analisadas utilizando um *software* dedicado para esse fim (TSview, Tucsen, V 7.3.1.7, China)

5.2.5.5 Análise estatística

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente com o programa *Statistica* 7.0 (StatSoft, Tulsa, Estados Unidos), através de análise de variância (ANOVA) e pelo teste de Tukey a 95% de confiança.

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1. Caracterização da matéria-prima

Antes de cada processo de secagem, cada lote de batata foi caracterizado quanto à umidade em base seca (X_{bs}) (g água / g sólidos secos) e atividade de água (a_w). Os valores médios e os desvios padrões estão apresentadas na tabela 5.1.

Nas Tabelas 5.1 a 5.4 as seguintes nomenclaturas foram usadas:

- BC - branqueamento convencional (água quente);
- IM - impregnação a vácuo.
- BC+IM - impregnação a vácuo e branqueamento convencional.
- BC+MV - secagem por micro-ondas a vácuo com amostras branqueadas convencionalmente;
- BC+MPV - secagem por micro-ondas com aplicação de múltiplos ciclo de aquecimento-pulsos de vácuo com amostras branqueadas convencionalmente;
- IM+MPV - secagem por micro-ondas com aplicação de múltiplos ciclo de aquecimento-pulsos de vácuo com amostras impregnadas a vácuo.
- BC+IM+MPV - secagem por micro-ondas com aplicação de múltiplos ciclo de aquecimento-pulsos de vácuo com amostras impregnadas a vácuo e branqueadas convencionalmente
- a_w = atividade de água;
- X_{bs} = umidade em base seca.

A umidade das amostras *in natura* foi próxima aos valores encontrados por Fernandes et al. (2009) (6,052 g.g⁻¹). Eles estudaram a produção de batata frita a partir da batata *Ágata* (*Solanum tuberosum*).

No presente estudo, observou-se que as umidades das amostras de batata *in natura*, branqueadas e impregnadas, não diferiram significativamente entre si. Os valores das a_w medidas indicam que há grande quantidade de água disponível para transformações bioquímicas e microbiológicas. Assim, as inativações enzimáticas no branqueamento cumprem um papel fundamental nessa etapa.

Tabela 5. 1 - Caracterização físicas das amostras de batata *in natura*, branqueadas e impregnadas à vácuo.

Amostras	a_w	X_{bs}
		(g água / g sólidos secos)
<i>In natura</i>	$0,997 \pm 0,002^a$	$5,670 \pm 0,789^a$
BC	$0,998 \pm 0,002^a$	$6,182 \pm 0,609^a$
IM	$0,998 \pm 0,002^a$	$6,580 \pm 0,509^a$
BC+IM	$0,999 \pm 0,002^a$	$6,640 \pm 0,489^a$

5.3.2. Cinética de secagem

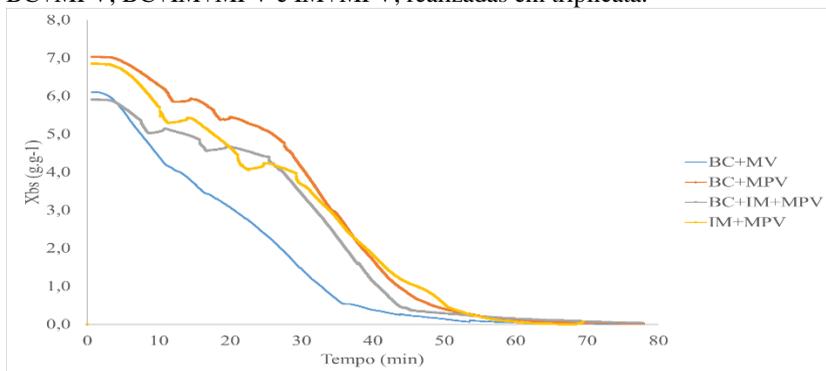
Na Figura 5.5a está apresentada a evolução temporal do teor de umidade (X_{bs}) das fatias de batatas durante os processos (BC+MV, BC+MPV, BC+IM+MPV e IM+MPV). Fatias de batatas pré-tratadas foram secas até atingirem os teores de umidade de equilíbrio. Todos os processos de secagem apresentaram curvas características de secagem, com os três períodos do processo divididos em: (1) período de adaptação na qual a temperatura do produto aumenta com a potência emitida; (2) períodos de taxa de secagem constante; (3) períodos de taxa de secagem decrescente, quando a água está mais fortemente ligada, sendo mais difícil de ser removida.

Nas Figuras 5.5 a 5.13 usaram-se as seguintes nomenclaturas:

- BC – branqueamento convencionalmente (água quente);
- IM - Impregnação a vácuo.
- BC+IM - Impregnação a vácuo e branqueamento convencional.
- BC+MV - secagem por micro-ondas a vácuo com amostras branqueadas convencionalmente
- BC+MPV - secagem por micro-ondas com aplicação de múltiplos ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo com amostras branqueadas convencionalmente;
- IM+MPV - secagem por micro-ondas com aplicação de múltiplos ciclo de aquecimento-pulsos de vácuo com amostras impregnadas a vácuo.

- BC+IM+MPV - secagem por micro-ondas com aplicação de múltiplos ciclo de aquecimento-pulsos de vácuo com amostras impregnadas a vácuo e branqueadas convencionalmente.

Figura 5. 5 - Evolução temporal da umidade em base seca (X_{bs}) (a) e da taxa de secagem (dX/dt) (b) das amostras de batata durante a secagens BC+MV, BC+MPV, BC+IM+MPV e IM+MPV, realizadas em triplicata.



As duas técnicas de secagem, MV e MPV, apresentaram tempos de secagem de 65 ± 3 min, mas as curvas apresentam comportamentos distintos. A secagem MV apresentou o terceiro período de secagem 15% mais longo e a menor taxa final de secagem, comparada com as secagens MPV, que apresentaram taxas de secagem finais maiores após aplicação dos pulsos de vácuo (após 32 min).

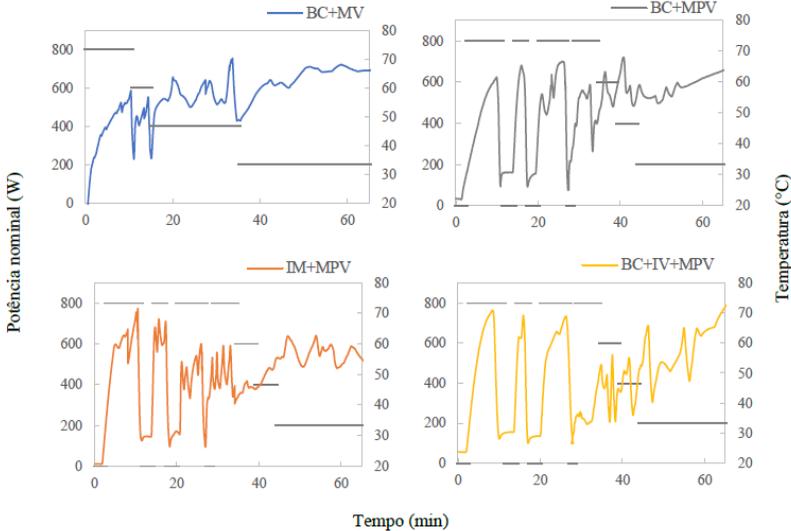
A aplicação de pulsos de vácuo, causou a expansão volumétrica e rupturas da matriz porosa da batata, facilitando a evaporação da água na etapa final.

Na Figura 5.6. estão apresentadas as evoluções das temperaturas das amostras durante o processo de secagem.

As temperaturas internas das fatias de batatas durante o processo de secagem MV (Figura 5.6) tem um aumento rápido logo no início do processo devido a aplicação das micro-ondas nas amostras com umidade elevada. Sendo a temperatura de saturação (T_{sat}) da água, a 3 kPa, $23,98$ °C, logo no início do processo a temperatura do produto excede esta temperatura e inicia-se a vaporização da água por ebulição. Após a evaporação da água livre, a temperatura aumenta, não excedendo o limite de 80 °C, que era o *set point* para que a potência nominal fosse diminuída em 200 W. Observou-se uma queda na temperatura do produto quando a potência nominal de micro-ondas foi reduzida. Isso

ocorreu nos tempos 11, 15 e 35 min de secagem. Essa redução na temperatura se deve à menor geração de energia térmica resultante da diminuição do fornecimento de micro-ondas para o produto.

Figura 5. 6 - Evolução temporal da temperatura interna das fatias de batatas e da potência nominal de micro-ondas (-) durante as secagens MV e MPV.



Na Figura 5.6 é perceptível o aquecimento progressivo da amostra até aplicação do pulso de vácuo, onde há a queda instantânea da temperatura até aproximadamente a T_{sat} sob a pressão de 3 kPa, seguida da recuperação da pressão na câmara de secagem, onde a amostra chega a temperatura de 30°C, fechando um ciclo de aquecimento-pulso de vácuo.

No período de taxa decrescente, a temperatura local é mais elevada do que a temperatura de saturação da água (na pressão do interior da câmara), podendo degradar as propriedades nutricionais e sensoriais das amostras.

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores de a_w final e umidade final das batatas *chips* obtidas pelos quatro processos de secagem estudados.

Tabela 5. 2 – Umidade final e atividade de água das amostras de batata *chips* desidratadas pelas diferentes técnicas estudadas.

Amostras	a_w	X_{bs} (g água./ g ss)
BC+MP	$0,236 \pm 0,048^a$	$0,034 \pm 0,004^a$
BC+MPV	$0,229 \pm 0,056^a$	$0,033 \pm 0,010^a$
IM+MPV	$0,347 \pm 0,056^b$	$0,046 \pm 0,016^b$
BC+IM+MPV	$0,259 \pm 0,044^a$	$0,031 \pm 0,017^a$

Analisando o efeito do pré-processamento nas curvas de secagem, verificou-se que as batatas *chips* que foram branqueadas (BC) apresentaram menor umidade e a_w , para 65 min de secagem. Este comportamento se deve ao amolecimento da estrutura da batata, ocasionado pelo processo de branqueamento, que facilita a remoção da água, diminuindo o tempo de secagem (SEVERINI et al., 2005; POTTER e HOTCHKISS, 1998). Leeratanarak et. al. (2006) estudaram a obtenção de batatas *chips* por *low-pressure superheated steam drying* (LPSSD) e secagem por ar quente, com e sem branqueamento. Eles concluíram que as amostras branqueadas secaram mais rapidamente do que as não-branqueadas.

O teor de umidade final das batatas *chips* desidratadas variou entre 0,031 e 0,046 g.g⁻¹, enquanto a a_w variou entre 0,236 e 0,347. Os valores de a_w encontrados foram satisfatórios, bem abaixo dos níveis recomendados para produtos desidratados. Segundo Sarantópoulos e Oliveira (2001), níveis abaixo de 0,6 eliminam a possibilidade de crescimento de micro-organismos e reduzem suficientemente as atividades de reação de deterioração de alimentos.

5.3.3 Caracterização das batatas *chips*

As propriedades físicas, mecânicas e estruturais das batatas *chips* desidratadas foram estudadas com objetivo de selecionar o tratamento que resulta em maior porosidade, crocância e em produtos com cor característica.

5.3.3.1 Propriedades físicas

Os parâmetros de cor (L^* , a^* , b^*) das batatas *chips* desidratadas e suas diferenças de cor (ΔE) em relação à batata *in natura* estão apresentados na Tabela 5.3. Observa-se que todas as batatas *chips* apresentaram maior luminosidade (L^*) que as amostras *in natura*. As batatas *chips* obtidas por IM+MPV apresentaram maior intensidade de

branco, pois parte amido não-gelatinizado é expelido na de impregnação a vácuo e fica depositado sob a superfície externa da amostra. Em seguida, na secagem, o amido não é gelatinizado devido à baixa umidade, e permanece depositado na superfície externa da amostra, na forma de pó. Esse resultado pode ser observado na Figura 5.7.

Tabela 5. 3 - Dados de cor das amostras de batata *in natura*, branqueadas e desidratadas pelas técnicas estudadas.

Amostras	Cor			
	L*	a*	b*	ΔE
<i>In natura</i>	72,58 ± 1,76 ^a	1,11 ± 0,56 ^{ab}	32,61 ± 1,56 ^a	-
BC+MV	73,68 ± 1,57 ^a	1,09 ± 0,67 ^{ab}	34,99 ± 1,13 ^a	2,63
BC+MPV	74,93 ± 1,60 ^a	0,77 ± 0,43 ^{ac}	34,79 ± 1,28 ^a	3,23
IM+MPV	78,54 ± 1,89 ^b	1,61 ± 0,59 ^b	32,33 ± 2,67 ^a	6,13
BC+IM+MPV	75,43 ± 2,52 ^a	0,32 ± 0,81 ^c	33,38 ± 1,92 ^a	2,97

Os sobrescritos a,b,c,d indicam que médias na mesma coluna seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si ao nível de 95% de confiança pelo teste de Tukey.

No parâmetro a*, nota-se que as amostras branqueadas (BC) apresentaram menor intensidade de vermelho do que as amostras obtidas por IM+MPV. O processo de branqueamento reduz o valor de a* das batatas devido à lixiviação de açúcares redutores. Isso acontece uma vez que são substratos da reação de *Maillard*. Estes resultados são semelhantes aos relatados por Pedreschi et al. (2005) relativos à fritura de fatias de batatas branqueadas e não-branqueadas. Os resultados de cor evidenciam que as amostras branqueadas apresentam menor teor de açúcar redutor e assim, menor intensidade de vermelho.

A porosidade é uma das características mais importantes na determinação da qualidade de um alimento seco e crocante. É uma grandeza que varia de 0 a 100% e expressa o volume relativo de ar presente no interior de um produto seco, através da razão entre o volume de espaços vazios e o volume total de uma amostra.

Na tabela 5.4, estão apresentados os valores da porosidade (ϵ), massa específica aparente (ρ_{ap}) e encolhimento S (%) das fatias de batata *in natura* e batatas *chips* obtidas pelos diferentes métodos de secagem. Os valores de densidade aparente devem ser menores que a densidade real, pois consideram espaços vazios contidos na amostra.

A ρ_{ap} da batata *in natura* foi de $1,023 \pm 0,017 \text{ g.cm}^{-3}$, valor próximo ao da massa específica da água, devido ao seu alto teor de umidade. O mesmo resultado foi obtido por RAHMAN (2008).

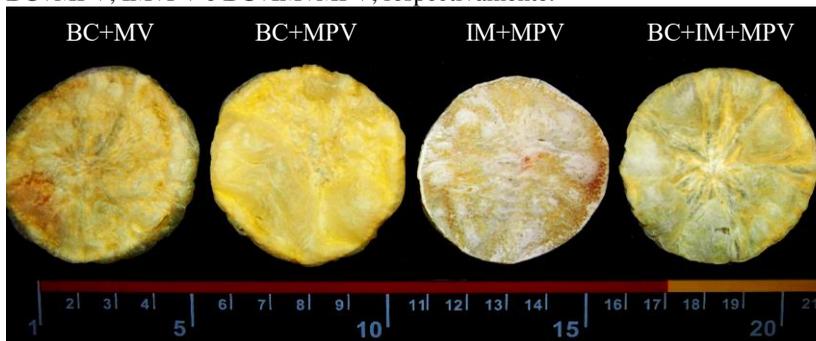
Tabela 5. 4 - Propriedades físicas das amostras de batatas *in natura* e desidratadas obtidas pelas diferentes técnicas de secagem.

Amostras	Densidade aparente (ρ_{ap})	Densidade real (ρ_r)	Porosidade ϵ (%)	Encolhimento S (%)
<i>In natura</i>	1,023 \pm 0,007	0,728 \pm 0,004	6,1	-
BC+MV	0,492 \pm 0,001	2,337 \pm 0,001	70,7	72,3
BC+MPV	0,411 \pm 0,002	2,322 \pm 0,003	76,7	71,7
IM+MPV	0,477 \pm 0,007	2,367 \pm 0,004	68,6	74,6
BC+IM+MPV	0,354 \pm 0,001	2,265 \pm 0,007	79,1	63,6

Observa-se que todas as amostras apresentaram alta porosidade, sendo as amostras BC+IM+MPV a de maior valor (79%), e as amostras IM+MPV a de menor valor (69%).

O processo BC+IM+MPV resultou em uma maior porosidade (79%) dentre os processos estudados. Isso se deve ao fato das amostras apresentarem grandes poros (espaços intercelulares), resultados dos múltiplos ciclos de aquecimento- pulso de vácuo (MPV) combinado com os pré-tratamentos BC+IM. Além disso, as altas taxas de secagem obtidas na secagem por micro-ondas criam gradientes de pressão e aceleraram consideravelmente o mecanismo de termo migração, modificando assim as propriedades físicas do produto.

Figura 5. 7 - Fotografias de amostras de batatas *chips* obtidas por BC+MV, BC+MPV, IM+PV e BC+IM+MPV, respectivamente.



O efeito dos diferentes processos de secagem pode ser observado na Figura 5.7. Nela estão apresentadas imagens das batatas *chips* obtidas pelos diferentes métodos de secagem. Visualmente, nota-se que as amostras mantiveram a cor semelhante à das amostras *in natura* e que a amostra obtida por IM+MPV apresentou maior encolhimento e com

aspecto rígido, enquanto que a obtida por BC+IM+MPV apresentou-se mais expandida e frágil (Tabela 5.4).

5.3.3.2 Propriedades mecânicas de textura

Os ensaios mecânicos de textura, representados pelas curvas de força-deformação relativa, durante os ensaios de penetração da sonda, são apresentados na Figura 5.8. Nesta Figura estão apresentadas as curvas das amostras submetidas aos processos de secagem BC+MV, BC+MPV, IM+PV e BC+IM+MPV.

O tipo de processo influenciou na textura das batatas *chips* obtidas. As curvas de força-deformação obtidas das amostras produzidas pelo processo MV não apresentaram o mesmo padrão dentado (*jaggedness*) observado para as curvas obtidas com amostras preparadas por MPV. Como as curvas de força-deformação são indicativas de crocância (LAURINDO & PELEG, 2007), pode-se afirmar que o processo MPV produz *chips* mais crocantes que o processo MV. O processo MPV altera a microestrutura da amostra durante os pulsos de vácuo, resultando em uma estrutura porosa e frágil, que resulta em textura crocante, corroborando os resultados relatados por Monteiro et al. (2015).

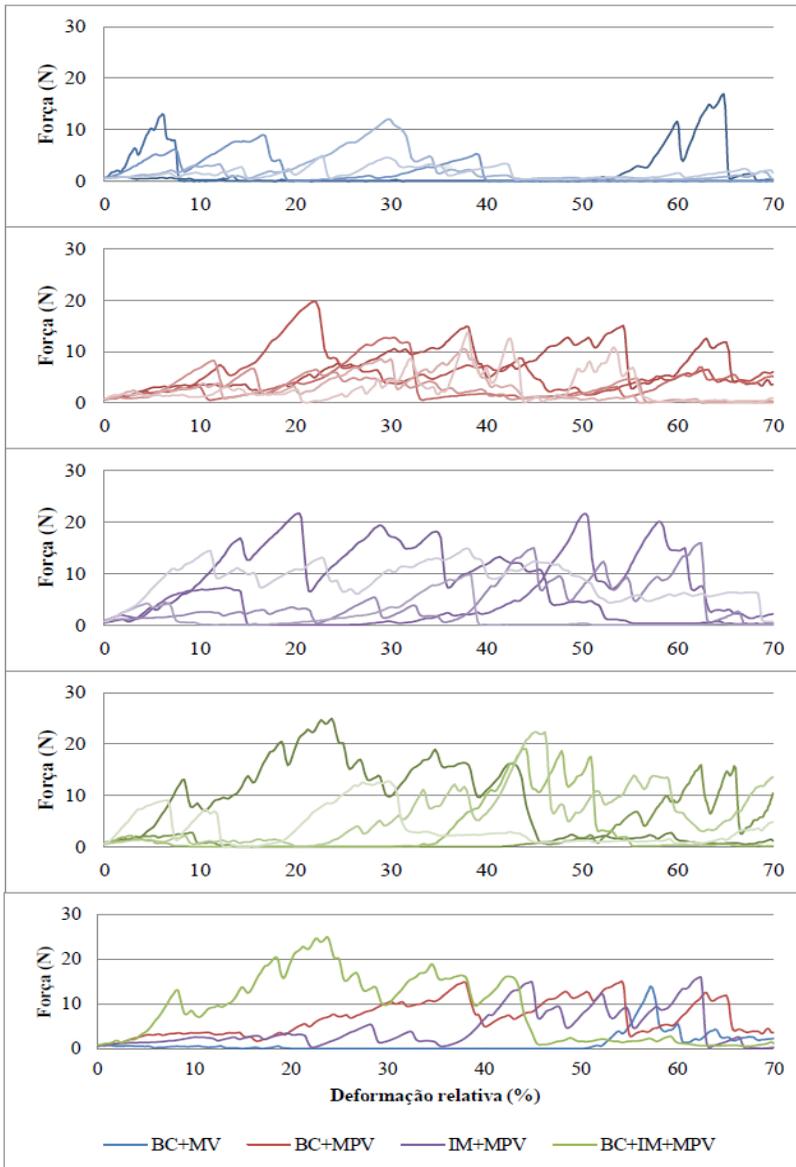
As curvas com múltiplos picos, de amplitude variável (*jaggedness*), retratam diferentes eventos de fratura e refletem o colapso progressivo da estrutura estudada (VINCENT, 1998). Estes resultados são característicos de alimentos crocantes e estão associados à estrutura frágil de matriz porosa (DIJKSTERHUIS et al., 2007).

Segundo Szczesniak (1963), variáveis mecânicas são extraídas a partir de curvas força-deformação ou tensão-deformação, em que a força máxima é utilizada para determinar a dureza do material e o número de picos de força durante o teste são utilizados como uma medida de crocância. Em geral, cada evento de fratura inicia com o aumento da força, acompanhada de uma queda instantânea da mesma. Os picos de força dependem da composição do material e da organização da estrutura (VINCENT, 1963).

O número de picos de força depende do valor limite de intensidade utilizado para quantificá-los (VAN LOON et al., 2005). Dois limites foram usados para a quantificação dos eventos, 2 N e 8 N, a fim de obter informação sobre a quantidade de eventos pequenos e grandes (Figura. 5.9). Mazumder et al. (2007) estudaram textura realizando testes de compressão uniaxial em *snacks* de milho extrusados

e apontaram que um bom indicador do comportamento crocante de uma amostra é o número de picos principais.

Figura 5. 8 - Curvas de força (N) x deformação relativa (%) de amostras de batata submetidas às técnicas de secagem por BC+MV, BC+MPV, IM+PV e BC+IM+MPV.



Os pré-tratamentos (BC, IM e BC+IM) influenciam o número de picos de força das amostras nos testes mecânicos. O uso do processo de branqueamento (BC) aumentou o número de eventos de pico de força e, com isso, a crocância instrumental característica, para amostras secas por MPV. IMPV apresentou 30% menos eventos (2 N) e não diferiu em eventos maiores (8 N). O processo de branqueamento lixivia e gelatiniza o amido da batata, resultando em *chips* mais frágeis e crocantes. Quando a amostra permanece com alto teor de amido após ser seca, evidencia-se uma maior resistência à quebra, caracterizando maior resistência mecânica do material.

A força máxima atingida na curva força-deformação caracteriza a resistência à ruptura oferecida pela amostra (SINGH et al., 2008). Na Figura 5.10 estão apresentados os dados de resistência à ruptura calculados a partir da maior força de ruptura das curvas força *versus* deformação relativa.

Comparando as batatas chips obtidas por BC+IM+MPV e IM+MPV, evidencia-se que o processo de branqueamento minimizou a resistência mecânica dos *chips* à penetração a sonda. O processo de branqueamento causa a gelatinização do amido, e o abrandamento da estrutura, levando a uma menor resistência mecânica dos produtos amiláceos desidratados (MARZEC e LEWICKI, 2006; SUWONSICHON e PELEG, 1998)

Figura 5. 9 - Número de eventos de força (picos) com intensidades maiores que 2,0 N e 8,0 N de força aplicada até a fratura, obtidos para as batatas chips BC+MV, BC+MPV, IM+PV e BC+IM+MPV.

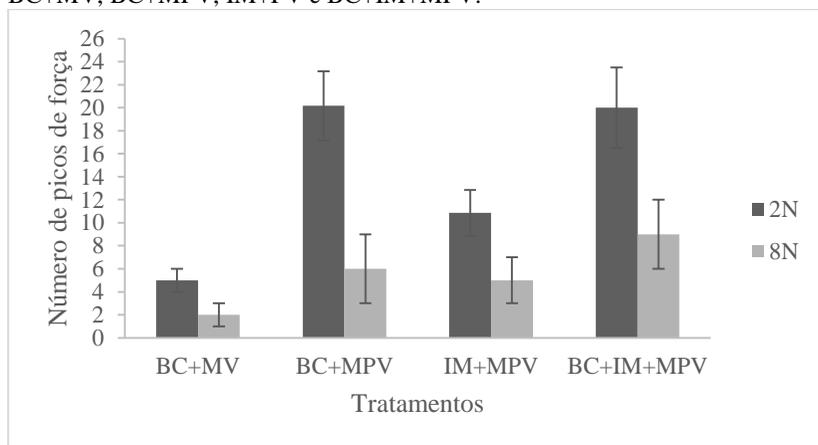
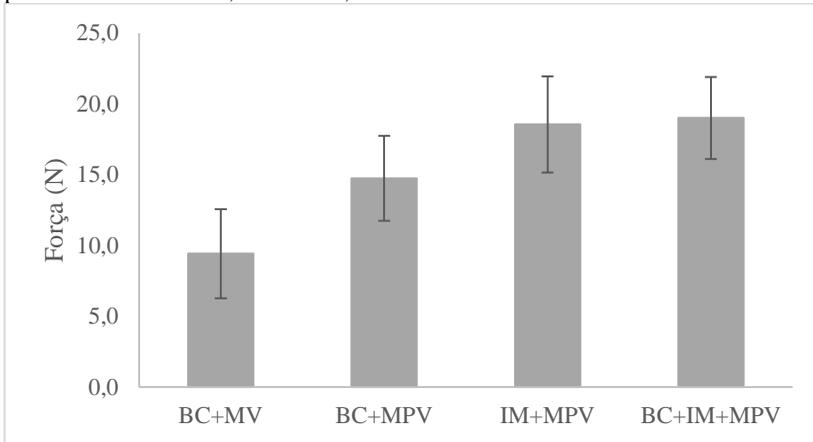


Figura 5. 10 - Força máxima de quebra (N) obtida para as batatas chips nos processos de BC+MV, BC+MPV, IM+PV e BC+IM+MPV.



5.3.3.3 Propriedades estruturais

A morfologia de um material celular pode ser parcialmente caracterizada pela sua porosidade e densidade aparente do material, e está relacionada com a fração volumétrica do ar no material. A distribuição de formas e tamanhos dos poros traz informações adicionais e importantes sobre a estrutura porosa (LUYTEN et al., 2004).

Várias técnicas microscópicas estão disponíveis para caracterizar superfícies e estruturas internas de materiais vegetais. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é muito utilizada para estudar a morfologia das paredes das células de forma mais precisa (KAUR, 2004).

A MEV foi uma eficiente ferramenta utilizada para estudar a topografia da superfície da batata *chips*. As Figuras 5.11 e 5.12 mostram as micrografias do corte transversal de fatias de batata *in natura*, branqueadas e desidratadas. Na amostra *in natura* observa-se as células parenquimatosas pequenas e irregulares. Essas células se apresentam compactas, resultando em uma estrutura relativamente dura e coesa. (KAUR, 2004). Nota-se também os aglomerados de grânulos de amido em sua forma nativa ($\times 100$). Os grânulos de amido de batata são elipsoidais, com dimensão típica entre 10 e 100 μm e contêm cerca de 23% de amilose (base seca) (CHEYNE et al., 2005). Estrutura semelhante pode ser observada nas batatas processadas por IM, porém

nota-se expansão das estruturas celulares e formação de grandes fendas na estrutura.

Na batata branqueada (BC e BC+IM) não se observa mais os grânulos de amido nativo. No branqueamento o amido foi aquecido em água e os grânulos passaram pelo processo de gelatinização, que inclui hidratação, inchaço e ruptura da estrutura (LIU e SHI, 2006).

Um produto crocante é resultado de uma estrutura porosa formada por cavidades de ar cercadas por estruturas frágeis (SCAMAN et al., 2014). Na figura 5.12 ficou evidente que apesar de todos os processos de secagem promoverem o efeito *puffing*, as microestruturas criadas nas batatas *chips* foram diferentes, o que influencia na crocância de cada amostra (PRIMO-MARTIN et al., 2008). Na amostra BC+MV, observa-se o colapso da grande parte das paredes celulares, resultando no encolhimento da amostra. Há também, poucos e pequenos poros distribuídos na estrutura.

As amostras obtidas pela secagem MPV apresentaram uma maior expansão volumétrica, sendo que BC+IM+MPV mostrou maior expansão e melhor distribuição de poros na matriz. Desta forma, evidenciou-se que o uso da impregnação a vácuo combinada com branqueamento resultou maior porosidade e crocância das amostras estudadas.

Amostras IM+MPV exibiram uma menor expansão e uma matriz composta de grandes poros e paredes espessas, características que se relacionam com os dados de textura observados. A imagem também mostra grânulos de amido depositados na superfície externa da amostra. Isso pode influenciar o movimento da água durante a secagem, resultando em menor difusividade e encolhimento da amostra (MATÉ et al., 1998).

Os mesmos comportamentos obtidos pela análise de MEV podem ser observados na Figura 5.13, que apresenta as imagens das superfícies das fraturas das amostras de batata *chips*, obtidas com o estereoscópio. Fica evidente que os processos MPV causaram maior expansão na estrutura do produto, formando maior espaçamento intercelular (maiores poros), quando comparado com micro-ondas à vácuo (MV). Resultados semelhantes foram obtidos por Monteiro et al. (2015), na secagem com múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (MVMFD) de banana (*var. prata*) utilizando micro-ondas com diferentes potências nominais

Figura 5. 11 - Imagens de MEV com ampliação de $\times 30$ e $\times 100$ para batata *in natura*, branqueada (BC), impregnada a vácuo (IM) e os processos combinados (BC+IM).

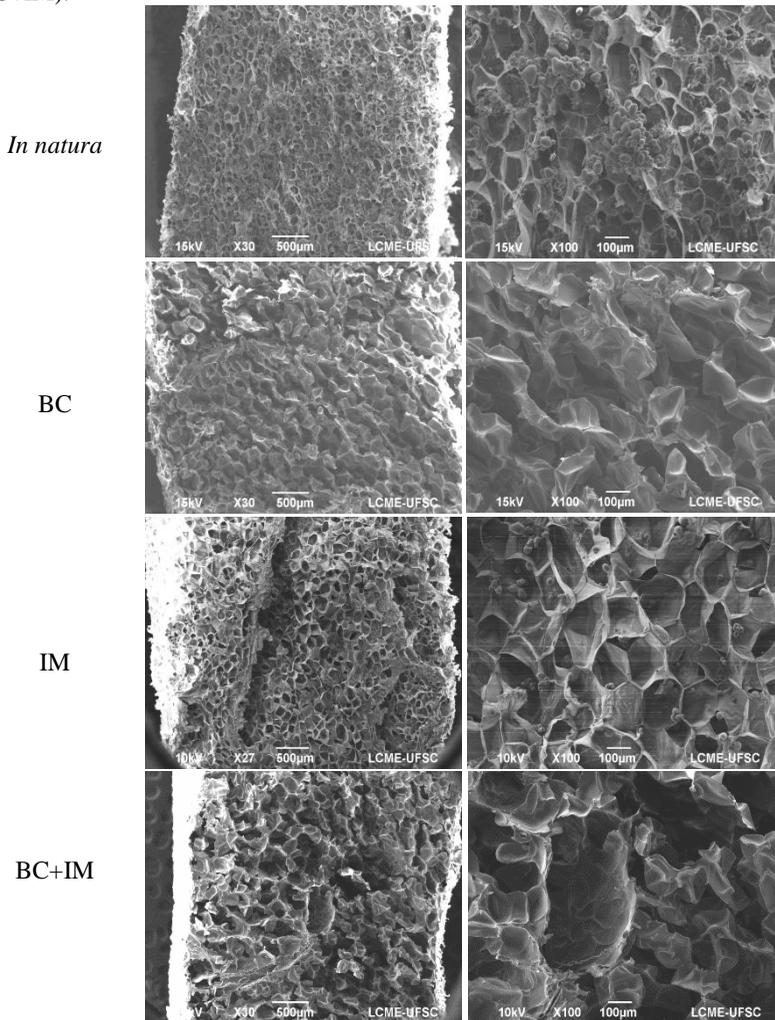


Figura 5. 12 - Imagens de MEV com ampliação de $\times 30$ e $\times 100$ das batatas *chips* obtidas pelos processos de BC+MV, BC+IM+MPV e IM+PV.

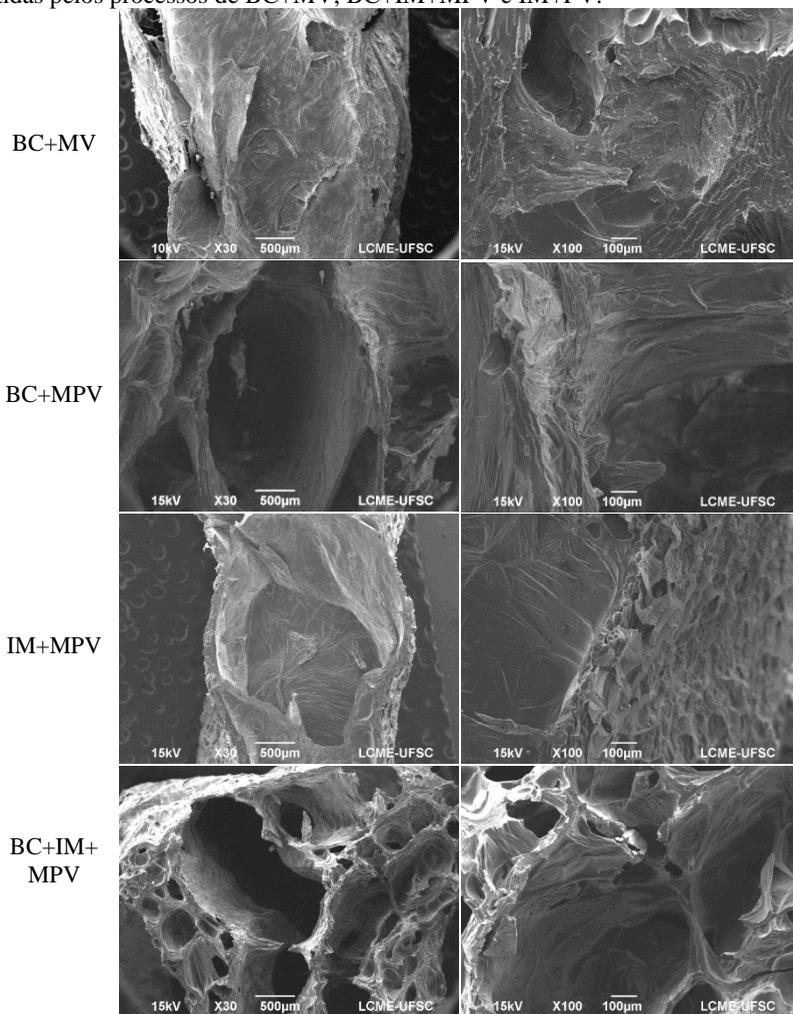
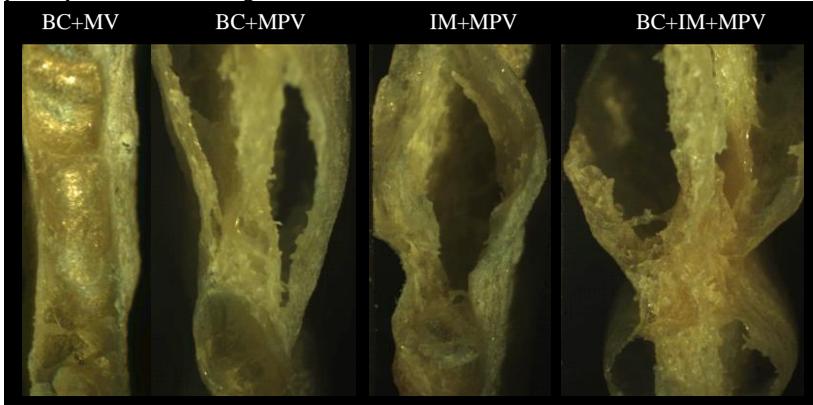


Figura 5. 13 - Imagens do estereoscópio de amostras de batata *chips* obtidas pelos processos de secagem.



5.4. CONCLUSÕES PARCIAIS

É possível obter batatas *chips* crocantes e livres de óleo utilizando micro-ondas com múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (MPV).

Os pré-tratamentos (BC, IM e BC+IM) não alteraram as curvas de secagem MPV, mas influenciaram significativamente os resultados de porosidade, textura e microestrutura das batatas *chips* obtidas. Amostras branqueadas (BC) resultaram em batatas *chips* com maior retenção da cor, menor dureza e maior crocância.

As secagens por MPV produziram batatas *chips* com maior crocância e porosidade que a secagem a vácuo convencional (MV). O processo que combinou o branqueamento convencional, impregnação a vácuo e secagem por micro-ondas com múltiplos ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo (BC+IM+MPV) foi a melhor condição para a secagem de batatas *chips* no presente estudo. Estas condições resultaram em produtos expandidos, crocantes e com índice de escurecimento moderado.

5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOURNE, M. C. *Food texture and viscosity: Concept and measurement*. San Diego, CA: Academic Press, 2002.

CHUDA, Y.; ONO, H.; YADA, H.; TAKADA, A. O.; ENDO, C. M.; MORI, M. Effects of physiological changes in potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) after low temperature storage on the level of acrylamide formed in potato *chips*. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 67, n. 5, p. 1188–1190, 2003.

FERNANDES A. M.; SORATTO R. P.; EVANGELISTA R. M.; NARDIN I. Características físico-químicas de tubérculos de cultivares de batata produzidos na safra de “inverno”. **Horticultura Brasileira**, v. 27, p. S1398-S1404, 2009.

HOGERVORST, J. G.; SCHOUTEN, L. J.; KONINGS, E. J.; GOLDBOHN, R. A.; VAN DEN BRANDT, P.A. A prospective study of dietary acrylamide intake and the risk of endometrial, ovarian, and breast cancer. **Cancer Epidemiology Biomarkers Prevention**, v. 16 n. 11, p. 2304 – 2313, 2007.

HOPKINSON, I.; JONES, R.A.L.; BLACK, S.; LANE, D.M.; MCDONALD, P.J. Fickian and Case II diffusion of water into amylose: a stray field NMR study. **Carbohydrate Polymers**, v. 34, n. 1–2, p. 39–47, 1997.

KROKIDA, M. K.; OREOPOULOU, V.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Effect of pre-drying on quality of French fries. **Journal of Food Engineering**, v. 49, n. 4, p. 347 – 354, 2001.

LAURINDO, J. B.; PELEG, M. Mechanical Measurements in Puffed Rice Cakes, **Journal of Texture Studies**, v. 38, p. 619-634, 2007.
LAURINDO, J.B.; PORCIUNCULA, B.D.A.; ZOTARELLI, M.F. Processo de secagem por sucessivos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (CAPV) para obtenção de alimentos desidratados crocantes. **Brazilian Patent**, PI 1107173-7, 2011.

LEERATANARAK, N.; DEVAHASTIN, S.; CHIEWCHAN, N. Drying kinetics and quality of potato *chips* undergoing different drying techniques. **Journal of Food Engineering**, v. 77, p. 635–643, 2006.
LIU, Y.; SHI, Y. Phase and state transitions in granular starches studied by dynamic differential scanning calorimetry. **Starch**, v. 58, p. 433–442, 2006.

LUYTEN, H., PLIJTER, J.J., VLIET, T.V. Crisp/Crunchy crusts of cellular foods: a literature review with discussion. **Journal of Texture Studies**, v. 35, n. 5, p. 445–492, 2004.

MARZEC, A.; LEWICKI, P.P. Antiplasticization of cereal-based products by water. Part I. Extruded flat bread. **Journal of Food Engineering**, v. 73, p. 1–8, 2006.

MATEJ, J. I., QUARTAERT, C., MEERDINK, G., & VAN TRIET, K. Effect of blanching on structural quality of dried potato slices. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 46, p. 676–681, 1998.

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

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.

OHTSUKA, A., WATANABE, T., SUZUKI, T. Gel structure and water diffusion phenomena in starch gels studied by pulsed field gradient stimulated echo NMR. **Carbohydrate Polymers**, v. 25, n. 2, p. 95–100, 1994.

PEDRESCHI, F.; HERNANDEZ, P.; FIGUEROA, C.; MOYANO, P. Modeling water loss during frying of potato slices. **International Journal of Food Properties**, v. 8, p. 289 e 299, 2005.

PORCIUNCULA, B. D. A. Processos de desidratção com controle da microestrutura e textura de frutas desidratadas usando ciclos de aquecimento-pulso de vácuo. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Alimentos) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.

POTTER, N.N.; HOTCHKISS, J.H. *Food Science*, 5th ed., Springer, New York, 1995.

PRIMO-MARTIN C.; DE BEUKELAER, H.; HAMER, R. J., VAN VLIET, T. Fracture behaviour of bread crust: Effect of ingredient modification. **Journal of Cereal Science**, v. 48, p. 604–612, 2008.

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

SCAMAN, C. H.; DURANCE, T. D.; DRUMMOND, L.; SUN, DA-WEN. Combined microwave vacuum drying. In: SUN, DA-WEN (Ed.). **Emerging Technologies for Food Processing**, 2° ed. Academic Press/Elsevier. San Diego, California, USA, 2014. p. 427- 445.

SARANTÓPOULOS, C. I. G. L.; OLIVEIRA, E. C. *Requisitos de conservação de alimentos em embalagens flexíveis*. Campinas: CETEA/ITAL, 215 p, 2001.

SEVERINI, C.; BAIANO, A.; DE PILLI, T.; CARBONE, B. F.; DEROSI, A. Combined treatments of blanching and dehydration: study on potato cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 68, n. 3, p. 289–296, 2005.

SERENO, A.M.; SILVA, M.A.; MAYOR, L. *Determination of particle density and porosity in foods and porous materials with high moisture content*. Int. J. Food Prop. v. 10, p. 455 – 469, 2007.

SINGH J.; KAUR L. *Advances in Potato Chemistry and Technology*, Ed.2, 2016.

SINGH, J.; KAUR, L.; MC CARTHY, O. J.; MOUGHAN, P. J.; SINGH, H. Rheological and textural characteristics of raw and par-cooked Taewa (*Maori potatoes*) of New Zealand. **Journal of Texture Studies**, v. 39, p. 210–230, 2008.

SONG, X.-J.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A.S. Optimization of vacuum microwave pre-drying and vacuum frying conditions to produce fried potato *chips*. **Drying Technology**, v. 25, n. 12, p. 2027–2034, 2007.

SUWONSICHON, T.; PELEG, M. Instrumental and sensory detection of simultaneous brittleness loss and moisture toughening in three puffed cereals. **Journal of Texture Studies**, v. 29, p. 255–274, 1998.

SZCZESNIAK, A. S. Classification of Textural Characteristics. **Journal Food Science**, v. 28, p. 385, 1963.

VAN LOON, W. A. M.; LINSSEN, J. P. H.; LEGGER, A.; POSTHUMUS, M. A.; VORAGEN, A. G. J. Identification and olfactometry of French fries flavour extracted at mouth conditions. **Food Chemistry**, v. 90, p. 417–425, 2005.

VINCENT, J. F. V. The Quantification of Crispness. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 78, p. 162 – 168, 1998.

WRIGLEY C.; CORKE H.; SEETHAEAMAN K.; FAUBION J. *Encyclopedia of Food Grains*, 2th Ed., Elsevier Ltd, Australia, 2016.

CAPÍTULO 6

CONSTRUÇÃO DE TAMBOR ROTATIVO PARA PRODUÇÃO DE BATATA *CHIPS* EM LARGA ESCALA

6.1 INTRODUÇÃO

A secagem por micro-ondas a vácuo é reconhecida pela sua alta eficiência e pela qualidade do produto final, sendo mais rápida que a secagem a vácuo convencional e mais barata que a liofilização (WANG e XI, 2005). Os produtos desenvolvidos com esta técnica produzem uma estrutura porosa e uniforme, diferentemente daqueles processados por secagem com ar quente, por exemplo (NAHIMANA e ZHANG, 2011).

Entretanto, um dos problemas de secagem por micro-ondas está relacionado à distribuição não uniforme do campo eletromagnético no interior da câmara de secagem, o que pode induzir o aquecimento heterogêneo do produto. Uma alternativa aplicável para minimizar este problema é a utilização de tambores rotativos, onde o movimento do produto no interior da cavidade permite uma distribuição mais uniforme do aquecimento (MARSAIOLI, 1991).

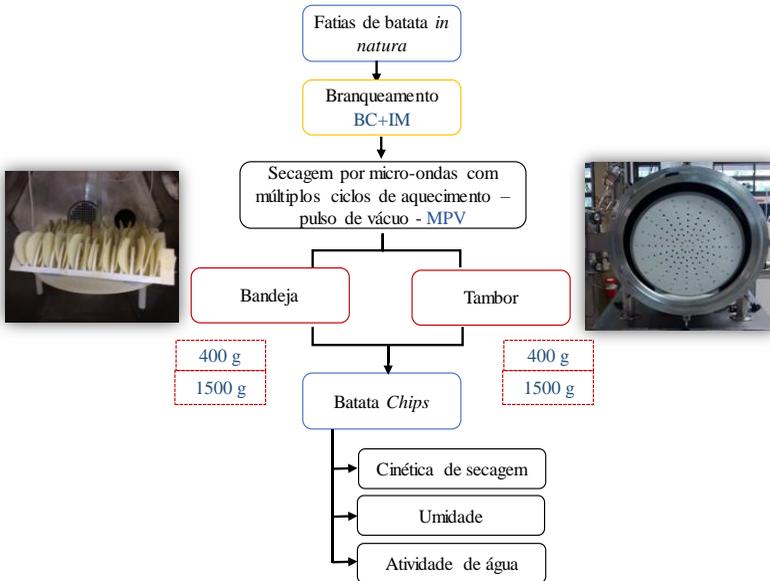
O secador de tambor rotativo é um dos equipamentos de secagem mais utilizados em processos industriais. É simples, versátil e ideal para secagem rápida de grandes quantidades de material, com baixo custo de implantação (DEL VALLE et al., 1998). Nele, a carcaça cilíndrica pode ser horizontal ou levemente inclinada. O aquecimento do material pode ser realizado por contato direto com gases aquecidos (ar ou gases de combustão) ou por vapor condensado em anéis concêntricos de tubos dispostos longitudinalmente na superfície interna da carcaça. Em um arranjo mais inovador, as micro-ondas foram utilizadas para o aquecimento do material a ser secado (MARSAIOLI, 1991).

Neste contexto, o objetivo desse capítulo foi desenvolver um tambor rotativo para possibilitar a movimentação das amostras durante a secagem por micro-ondas sob vácuo e produzir batata *chips* em escala piloto. A associação de um tambor rotativo ao secador de micro-ondas (capítulo 3) permitiu avaliar a eficácia do uso de um sistema giratório na cavidade de micro-ondas multimodo, e comparar com a eficiência do secador sem a movimentação das amostras.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 6.1 apresenta o fluxograma esquemático da estratégia de investigação científica adotada neste estudo.

Figura 6. 1 - Fluxograma esquemático dos processos estudados.



6.2.1 Obtenção da matéria-prima e preparo das amostras e pre-tratamento

Amostras de batata (*Solanum tuberosum L.*) foram obtidas e preparadas como citado no item 4.2.1.

As fatias de batata foram submetidas ao processo de branqueamento (BC + IM, capítulo 4), como citado no item 4.2.2.

6.2.2. Descrição dos experimentos

Os parâmetros experimentais obtidos na secagem com a bandeja (capítulo 5) foram padronizados e testados no tambor rotativo em escala piloto. As secagens (bandeja e tambor) foram realizadas no secador com micro-ondas apresentado no item 3.2.1. Os experimentos foram realizados em triplicata.

A secagem foi realizada em batelada, utilizando o tratamento MPV, com 400 g e 1500 g (3,75 vezes, para testar um aumento de escala) de fatias de batatas branqueadas, usando as variáveis de processo dadas na Tabela 6.1.

Tabela 6. 1- Parâmetros dos processos de secagem MPV em tambor rotativo utilizados a obtenção das batatas *chips* em duas escalas de produção.

ETAPAS	tempo por etapa (min)	400 g	1500g	Pressão de vácuo (kPa)
		Potência nominal (W)	Potência nominal (W)	
Aquecimento 1	5	800	3000	101,32
Pulso de vácuo 1	2	-	-	Até 3
Aquecimento 2	5	800	3000	101,32
Pulso de vácuo 2	2	-	-	Até 3
Aquecimento 3	5	800	3000	101,32
Pulso de vácuo 3	1,3	-	-	Até 3
Secagem Potência 1	7	800	3000	3
Secagem Potência 2	7	600	2250	3
Secagem Potência 3	7	400	1500	3
Secagem Potência 4	14	200	750	3

6.2.3 Dispositivo experimental

O esquema do secador de micro-ondas com tambor rotativo está apresentado na Figura 6.1. O tambor foi construído em polipropileno e consiste basicamente de um prisma hexagonal, instalado no interior do secador, com eixo de rotação localizado no eixo longitudinal da câmara. O tambor tem comprimento de 53 cm, diâmetro circunscrito de 30 cm e foi projetado para processar até 10 kg de amostra alimentícia.

A área lateral do tambor e a tampa frontal perfuradas permitem a circulação do ar. No seu interior existem placas móveis que subdividem a cavidade em 2 a 8 partes, possibilitando localizar as amostras em volumes específicos, possibilitando a análise de volumes distintos do tambor (Figuras 6.2 e 6.3).

A tampa inferior da câmara de secagem foi adaptada com um tubo metálico para passagem do eixo do motor, com instalação de um selo mecânico no final do tubo, o que possibilita a rotação do eixo do motor, mantendo vácuo no sistema.

Figura 6. 2 - Esquema do secador rotativo com aplicação de micro-ondas e vácuo.

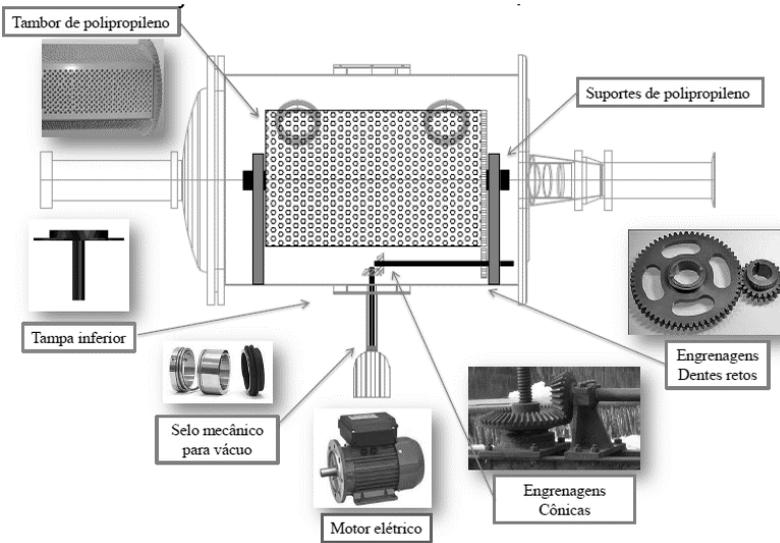


Figura 6. 3- Desenhos do sistema de secagem com tambor rotativo. Vista lateral (a), vista isométrica do tambor dentro da câmara de secagem (b) e vista isométrica das peças do tambor rotativo (c).

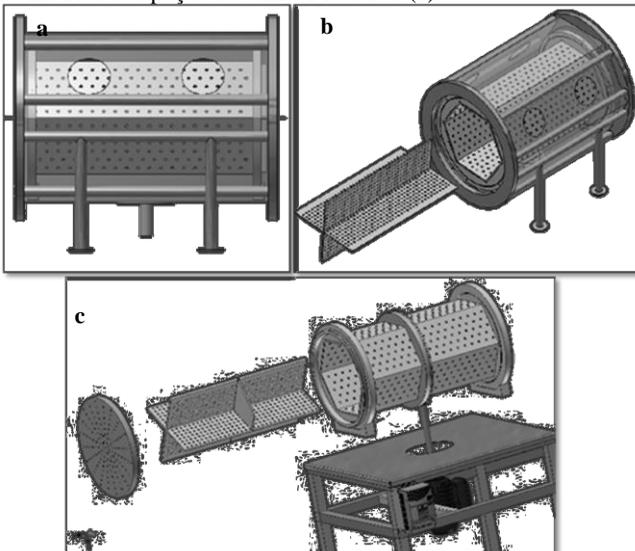


Figura 6. 4- Imagens do tambor rotativo.



O tambor é movido por um sistema de engrenagens e rolamentos ligado a um motor de torque (48 N) e um controlador de velocidades, alcançando o limite máximo de 30 rpm. Normalmente os secadores rotativos apresentam rotação que varia de 1 a 15 rpm (KNEULE, 1966).

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

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao realizar este estudo observou-se a influência da rotação das amostras no processo de secagem por micro-ondas sob vácuo. Os experimentos de secagem em escala piloto foram iniciados utilizando os melhores dados obtidos na secagem em bandeja (400 g), com a potência nominal de micro-ondas de 800 W, aplicada com os tempos apresentados na Tabela 6.1. A massa de 1500 g foi estipulada por relação direta com a densidade de potência de 2-6 W/g obtida para a secagem em bandeja, com 400 g de produto. Assim, chegou-se aos parâmetros utilizados na secagem de 1500 g no tambor rotativo.

Na Figura 6.5a estão apresentadas as curvas de secagem das 400 g e das 1500 g de fatias de batatas pelo processo MPV, utilizando bandeja e tambor.

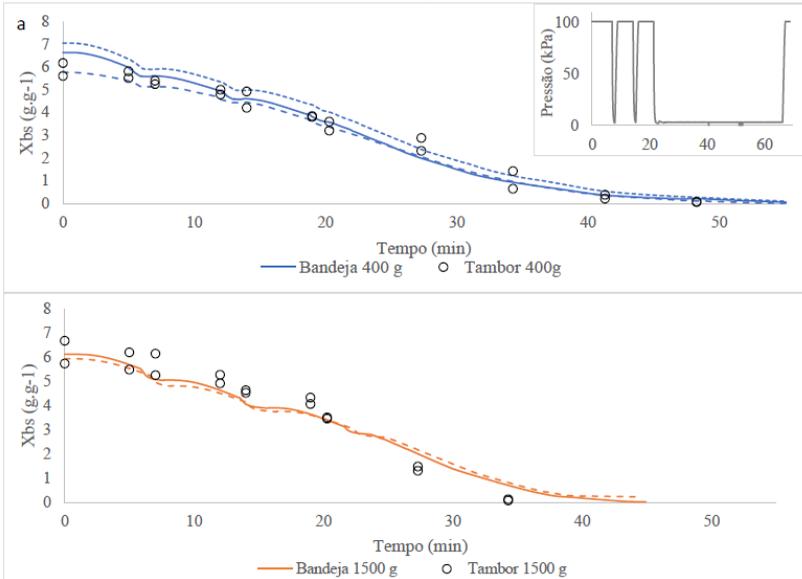
Na Figura 6.5b foram observadas maiores taxas de secagem para os processos com tambor, resultando em menores tempo de secagem. Para as secagens em bandeja, 400 g e 1500 g, as taxas de secagem foram similares até os 30 primeiros min de processo. Em seguida, a secagem em bandeja, com 400 g de amostra, apresentou uma queda da taxa de secagem ($0,0023 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) mais acentuada que o observado no processo

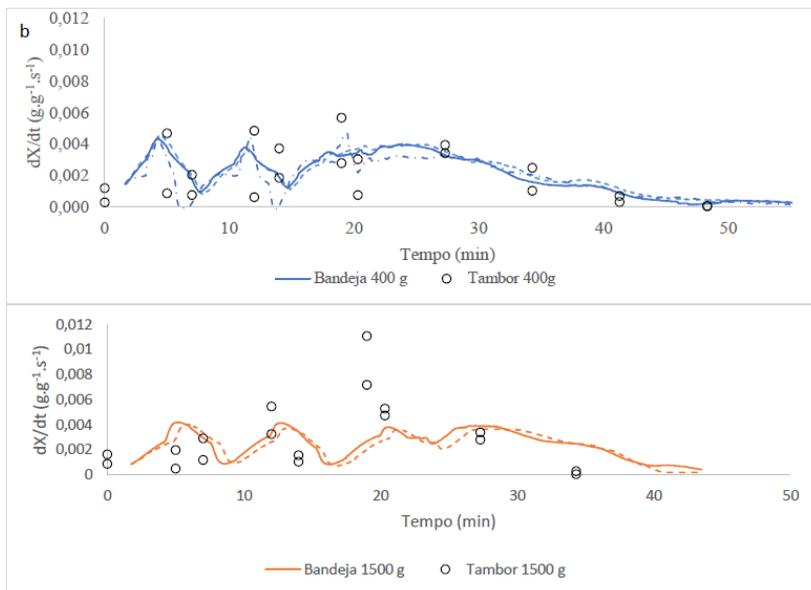
com 1500 g ($0,0011 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), resultando em menores tempos de processo para secagem em bandeja com 1500 g de amostra.

Amostras secas em bandeja (400 g e 1500 g) apresentaram maior temperatura que as secas no tambor. Isso se deve ao modo de aquisição dos dados dos diferentes processos. Na secagem em bandeja os dados eram monitorados em tempo real com termômetro de fibra ótica, enquanto no tambor, as amostras eram retiradas do sistema em tempos pré-determinados, para mensuração da temperatura com termômetro de infravermelho e de espeto.

Em ambos os processos estudados, observou-se o aumento da temperatura interna das batatas durante a etapa de aquecimento, e a queda de temperatura durante pulso de vácuo (evaporação *flash*) (Figura 6.5 e 6.6). No início do processo (três ciclos de aquecimento–pulso de vácuo) foram observadas maiores temperaturas, devido à alta potência nominal aplicada (800 W) e à alta umidade das amostras. Na etapa de secagem à pressão constante (após 25 min de secagem), observou-se um pequeno decréscimo na temperatura quando a potência nominal foi diminuída para 200 W (400 g) ou 750 W (1500 g).

Figura 6. 5- Evolução temporal da umidade em base seca (X_{bs}) (a) e da taxa de secagem (dX/dt) (b) das 400 g e 1500 g amostras de batata obtidas pelo processo BC+IM+MPV, realizadas em triplicata.

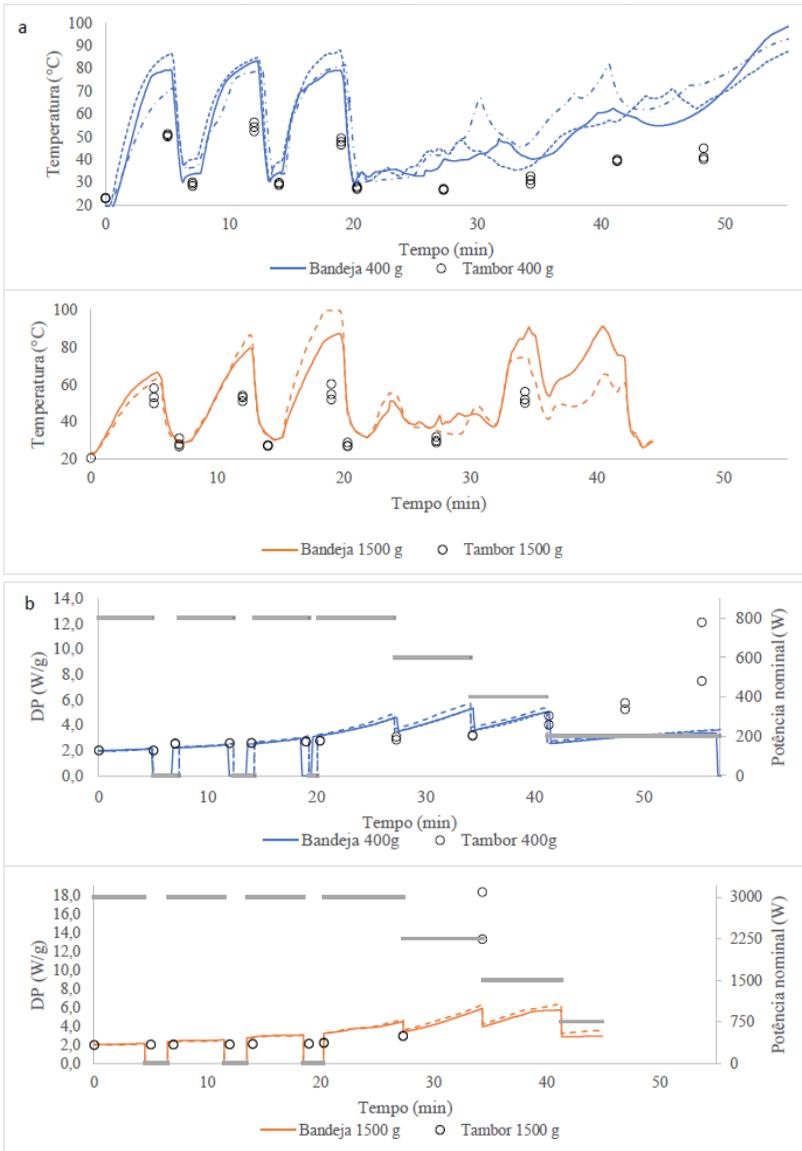




Na Figura 6.6b estão apresentadas as evoluções temporais da densidade de potência de micro-ondas (DP) e a potência nominal de cada processo estudado. Observa-se que as DP para as secagens com bandeja não variaram com o aumento de escala, permanecendo na faixa de 2 a 6 W/g para as diferentes massas de batatas estudadas. Na secagem com tambor, não foi observada variação da DP no início do processo. No entanto, após 40 min de processo, para 400 g, e após 30 min para a secagem com 1500 g, foi evidenciado um aumento repentino da DP. Esses resultados indicam que a movimentação das amostras tem influência significativa na etapa final da secagem, diminuindo o tempo de processo e resultando em amostras mais homogêneas.

Considerando o tempo de secagem para atingir a umidade de $0,03 g H_2.g^{-1} SS$ (Tabela 6.2), o aumento de escala em 3,75 vezes (1500 g) reduziu o tempo de secagem em 10 min (18%) utilizando bandeja e 14 min (29%) com o tambor. Assim, fica evidente uma melhor eficiência do secador para maiores quantidades de amostras, tendo em vista que o mesmo tem capacidade de processar 10 kg de alimentos e trabalha num intervalo de 150 a 3000 W.

Figura 6. 6 - Evolução temporal da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) das amostras de batata durante a secagem BC+IM+MPV (a), densidade de potência (DP (W/g)) (b) e potência nominal (W) aplicadas na secagem, realizadas em triplicata.



Além disso, os tempos de secagem em tambor foram 13% e 24% menores, respectivamente, que os obtidos em bandejas, para 400 g e 1500 g de amostra. A cavidade prismática foi projetada para melhorar a distribuição das micro-ondas durante a secagem, mas o sistema giratório possibilitou redução no tempo de processo e maior integridade e homogeneidade das amostras obtidas (menores quantidade de amostras danificadas por superaquecimento).

Tabela 6. 2 - Tempo final do processo (t_f) e, atividade de água (a_w) e umidade em base seca (X_{bs}) das batatas obtidas pelos diferentes processos.

Tratamentos	t_f (min)	a_w	X_{bs} ($g \cdot g^{-1}$)
Bandeja 400 g	55	$0,215 \pm 0,048^a$	$0,036 \pm 0,004^a$
Tambor 400 g	48	$0,238 \pm 0,056^a$	$0,033 \pm 0,010^a$
Bandeja 1500 g	45	$0,257 \pm 0,056^a$	$0,030 \pm 0,016^a$
Tambor 1500 g	34	$0,269 \pm 0,044^a$	$0,031 \pm 0,017^a$

6.4. CONCLUSÕES PARCIAIS

Os experimentos com tambor rotativo em escala piloto apresentaram ótima reprodutibilidade, permitindo a obtenção de batatas *chips* expandidas e crocantes.

É possível aumentar a escala de produção de batatas *chips* livre de óleo, utilizando secador por micro-ondas com tambor rotativo, sob vácuo. De fato, o secador de micro-ondas apresenta melhor eficiência na secagem de maiores quantidades de amostras, indicando um melhor aproveitamento das micro-ondas na cavidade.

6.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

DEL VALLE, J. M.; CUADROS T.R.; AGULERA, J. M. Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces. **Food Research International**, v. 31, p. 191–204, 1998.

MARSAIOLI Jr. A. Desenvolvimento de um Protótipo de Secador Cilíndrico Rotativo a Micro-ondas e Ar Quente para a Secagem Contínua de Produtos Sólidos Granulados. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 197p. **Tese** (Doutorado), 1991.

NAHIMANA, H.; ZHANG, M. Shrinkage and color change during microwave vacuum drying of carrot. **Drying Technology**, v. 29, n. 7, p. 836-847, 2011.

KNEULE, F. *El Secado*. Bilbao, Urmo. 414p., 1966.

WANG, J.; XI, Y. S. Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. **Journal of Food Engineering**, v. 68, p. 505–511, 2005.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de batata *chips* crocante, livre de óleo e desidratada por meio de secagem por micro-ondas com múltiplos ciclos de aquecimento-pulso de vácuo (MPV) é uma alternativa com viabilidade de aplicação industrial, tendo em vista os reduzidos tempos de processo, possibilidade de produção em grande escala e as ótimas características de cor e crocância.

O equipamento utilizado neste trabalho permite realizar a secagem com aplicação de micro-ondas em condições de vácuo, em completa segurança. O sistema de pesagem *on-line* e os sensores de fibra ótica instalados no secador são ferramentas importantes para a investigação da secagem por micro-ondas à vácuo, permitindo o monitoramento da temperatura interna e a variação de massa das amostras de batata em tempo real, com boa reprodutibilidade, fornecendo informações úteis para o controle da potência.

Dentre os pré-tratamentos estudados, o branqueamento associado a impregnação a vácuo (IM) pode ser utilizado como um novo método de branqueamento de fatias de batata, inativando a polifenol oxidase (PPO), evitando a perda de massa e preservando a estrutura física do produto. Além disso, este tratamento influenciou positivamente nas características das batatas *chips* obtidas por secagem, resultando em um produto de alta porosidade e textura crocante.

As secagens por micro-ondas produziram batatas *chips* com maior crocância e porosidade que a secagem a vácuo convencional (MV). O processo que combinou o branqueamento convencional, impregnação a vácuo e secagem por micro-ondas com múltiplos ciclos de aquecimento-pulsos de vácuo (BC+IM+MPV) foi a melhor condição para a secagem de batatas *chips* no presente estudo. Estas condições resultaram em produtos expandidos, crocantes e com um índice de escurecimento moderado.

Os experimentos com tambor rotativo em escala piloto apresentaram uma reprodutibilidade ótima, permitindo a obtenção de batatas *chips* expandidas e crocantes.

O aumento de escala de produção de batatas *chips* livre de óleo utilizando secador por micro-ondas com tambor rotativo, sob vácuo é

plausível. No entanto, o secador de micro-ondas apresenta melhor eficiência na secagem de maiores quantidades de amostras, indicando um aproveitamento superior das micro-ondas na cavidade.

Este estudo gerou resultados inéditos e promissores para a aplicação desta técnica em escala industrial.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a secagem MPV de outros produtos, como cenoura, beterraba, mandioca, frutas e queijos.
- Estudar a modelagem da transferência de massa no processo de secagem MV e MPV;
- Estudar os custos energéticos e de produção no processo MPV;
- Estudar diferentes tempos de branqueamento na formação da estrutura das amostras;
- Estudar a combinação da secagem por micro-ondas com ar quente;
- Estudar a aceitação, vida de prateleira e propriedades sensoriais das batatas *chips* obtidas por MPV;
- Estudar a caracterização físico-química e a biodisponibilidade do amido nas batatas *chips* processadas com diferentes variáveis de processo;
- Estudar a secagem com tambor rotativo em diferentes velocidades de rotação e massa inicial.