



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**ALIMENTOS**



**RAQUEL CLASEN PICH**

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO SECO DA PIMENTA ROSA**  
**(*Schinus terebinthifolius* R.) POR *CAST TAPE DRYING***

PATOS DE MINAS

2019

RAQUEL CLASEN PICH

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO SECO DA PIMENTA ROSA**  
**(*Schinus terebinthifolius* R.) POR CAST TAPE DRYING**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos (PPGEA) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos e Produtos

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Corrêa de Santana

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marta Fernanda Zotarelli

PATOS DE MINAS

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
(CIP) Sistema de Bibliotecas da UFU, MG,  
Brasil.

---

P593o Pich, Raquel Clasen, 1976-  
2019 Obtenção e caracterização do produto seco da pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* R.) por *cast tape drying* [recurso eletrônico] / Raquel Clasen Pich. - 2019.

Orientador: Ricardo Corrêa de Santana.  
Coorientadora: Marta Fernanda Zotarelli.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.361>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Alimentos - Indústria. 2. Pimenta - Secagem. I. Santana, Ricardo Corrêa de, 1981- (Orient.). II. Zotarelli, Marta Fernanda, 1985- (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. IV. Título.

---

CDU: 664

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262



ATA

**Ata de Defesa de Dissertação de Mestrado junto ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos – PPGEA, da Faculdade de Engenharia Química – FEQUI, da Universidade Federal de Uberlândia - UFU.**

Defesa de Dissertação de Mestrado n. 05/2019 do Curso de Mestrado em Engenharia de Alimentos (1.40.09.01) - PPGEA

<b>Data:</b>	22 de fevereiro de 2019
<b>Horário de início:</b>	08:30
<b>Horário de encerramento:</b>	12:28
<b>Discente:</b>	Raquel Clasen Pich
<b>Matrícula:</b>	41712EAL009
<b>Título do Trabalho:</b>	Obtenção e caracterização do produto seco da pimenta rosa ( <i>Schinus terebinthifoliusR.</i> ) por <i>cast tape drying</i>
<b>Área de concentração:</b>	Engenharia de Alimentos
<b>Linha de pesquisa:</b>	Desenvolvimento de Processos e Produtos

Reúne-se na Sala 22 do Prédio Pavonianos, *campus* Patos de Minas da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, assim composta: Profa. Dra. Marta Fernanda Zotarelli (Coorientadora/UFU), Profa. Dra. Letícia Rocha Guidi (UFU) e Profa. Dra. Angelise Durigon (UFS/SE). Ressalta-se que a Profa. Dra. Angelise Durigon participou da defesa por meio de skype da cidade de Aracaju (Sergipe) e os demais membros da banca e o discente participaram *in loco*.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Profa. Dra. Marta Fernanda Zotarelli, apresentou a Banca Examinadora e a discente, agradeceu a presença do público e concedeu à última a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da discente se deu em conformidade às normas do Programa.

A seguir, a senhora presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a discente. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos legais, a Banca Examinadora, em sessão secreta, atribuiu o conceito final, considerando a discente **APROVADA**.

Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico integra os requisitos à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos. O competente diploma será expedido após o cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos às 12 horas e 28 minutos. Foi lavrada a presente ata que, após lida e aprovada, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Patos de Minas, 22 de fevereiro de 2019.

*Professora Doutora Marta Fernanda Zotarelli (FEQUI/UFU)*

*Professora Doutora Letícia Rocha Guidi (FEQUI/UFU)*

*Professora Doutora Angelise Durigon (UFS/SE)*



Documento assinado eletronicamente por **Marta Fernanda Zotarelli, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/02/2019, às 12:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Letícia Rocha Guidi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/02/2019, às 12:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Angelise Durigon, Usuário Externo**, em 22/02/2019, às 12:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1040803** e o código CRC **629B3C5B**.

Dedico este trabalho ao meu esposo Augusto  
e às minhas filhas Ana Laura e Luisa, meus  
eternos amores.

## AGRADECIMENTOS

Estou certa de que o Senhor tem propósitos em todas as coisas que se realizam em nossas vidas, a oportunidade de fazer parte do programa de pós-graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia não é diferente, por isso, em primeiro lugar, quero agradecer a Deus por esta oportunidade.

Agradeço também, de forma incomensurável a minha família, o meu esposo Augusto e as minhas filhas Ana Laura e Luisa que me incentivaram e contribuíram da forma que puderam para que eu chegasse ao final dessa jornada. Amo muito vocês!

Agradeço aos meus pais, que mesmo à distância, me apoiaram, me incentivaram e são, sem dúvida, exemplos de vida para mim.

Quero agradecer também de forma muito especial ao meu orientador, professor Dr. Ricardo Santana e a minha coorientadora, professora Dra. Marta Zotarelli que de forma brilhante conduziram todo o trabalho, dedicando seu tempo e seus conhecimentos à minha orientação.

Da mesma forma, agradecer as professoras que compõe a banca de avaliação, Dra. Angelise Durigon e Dra. Letícia Guidi, por todas as contribuições à realização deste trabalho.

Aos demais professores do programa de pós-graduação, muito obrigada por todos os ensinamentos, profissionalismo e contribuição para a nossa formação.

À Hebrom Produtos do Laticínio Ltda., muito obrigada por apoiar, suprir a minha ausência e incentivar a minha formação.

Ao Centro Universitário de Patos de Minas - UNIPAM, muito obrigada por todo apoio e incentivo na minha formação.

A minha companheira de todas, todas as horas, incansável em me acompanhar em todas as empreitadas e experimentos no laboratório, Lorrane de coração, muito obrigada!

Aos meus colegas do Mestrado, muito obrigada pelo companheirismo e pela troca de experiências vocês são muito especiais.

Aos técnicos dos laboratórios, muito obrigada por todos os treinamentos e todas as orientações, vocês contribuíram muito para realização deste trabalho.

A Universidade Federal de Uberlândia, em especial a Faculdade de Engenharia de Alimentos *campus* Patos de Minas pelos recursos oferecidos.

A todos aqueles que de qualquer forma contribuíram para a realização deste trabalho:

**Muito obrigada!!**

## RESUMO

A pimenta rosa é um fruto nativo da costa brasileira produzido comercialmente no estado do Espírito Santo, que apresenta propriedades medicinais, como atividade antioxidante, cicatrizante, antitumoral e antimicrobiana. A secagem é tradicionalmente definida como a operação unitária que converte um material sólido, semissólido ou líquido em um produto sólido de umidade consideravelmente baixa. Em geral, a retirada de água se dá por evaporação e envolve a aplicação de energia térmica, a qual provoca a mudança de fase da água líquida para o vapor. As pesquisas sugerem que compostos aromáticos e pigmentares ativos responsáveis por atributos sensoriais e nutricionais, característicos dos alimentos, podem ser retidos através da secagem por *cast-tape drying* (CTD). A secagem por CTD é um processo alternativo para a secagem de polpas de frutas e vegetais, que opera em temperaturas moderadas, resultando em tempos de secagem relativamente pequenos. Este trabalho tem como objetivo obter e caracterizar físico-quimicamente o pó da pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* Raddi) desidratado por *cast-tape drying*. Este estudo se divide em duas partes, a primeira abrange o estudo da metodologia adequada de redução de tamanho dos frutos da pimenta rosa, na qual os resultados demonstraram que o branqueamento dos frutos e a posterior moagem em moinho de facas é a metodologia mais adequada de preparo da pimenta rosa para secagem; a segunda abrange o estudo da cinética de secagem das amostras e a avaliação da influência das condições de processo, espessura da amostra e temperatura da água circulante na cinética de secagem. Os resultados sugerem que 95 °C e 2 mm é a combinação de condições que alcançou o menor tempo de secagem, a menor umidade e a menor atividade de água dos pós produzidos. As imagens da microscopia eletrônica de varredura (MEV) demonstraram a irregularidade das partículas dos pós produzidos por CTD.

**Palavras-chave:** *cast-tape drying*. Propriedades físico-químicas dos pós. Cinética de Secagem. Pimenta Rosa.

## Abstract

Pink pepper is a native Brazilian fruit produced commercially in the state of Espírito Santo, which has medicinal properties such as antioxidant, healing, antitumor and antimicrobial activity. Drying is traditionally defined as the unitary operation that converts a solid, semi-solid or liquid material into a solid product of considerably low moisture. In general, water removal occurs by evaporation and involves the application of thermal energy, which causes the phase change from liquid to vapor. The research suggest that active aromatic and pigmentary compounds responsible for sensory and nutritional attributes, characteristic of food, can be retained through cast-tape drying (CTD). CTD drying is an alternative process for drying fruit and vegetable pulps, operating at moderate temperatures, resulting in relatively small drying times. The objective of this work is to obtain and characterize physically-chemically the powder of the pink pepper fruits (*Schinus terebinthifolius* Raddi) dehydrated by cast-tape drying. This study is divided into two parts, the first covers the study of the appropriate size reduction methodology fruits of the pink pepper, in which the results demonstrated that the blanching of the fruits and the later grinding in knife mill is the most appropriate methodology of preparation of the pink pepper for drying; the second one covers the study of the drying kinetics of the samples and the evaluation of the influence of the process conditions, sample thickness and circulating water temperature in the drying kinetics. The results suggest that 95 °C and 2 mm is the combination of conditions that achieved the lowest drying time, the lowest humidity and the lowest water activity of the powders produced. The scanning electron microscopy (SEM) images showed the irregularity of the particles of the powders produced by CTD.

**Keywords:** cast-tape drying. Physicochemical properties of powders. Kinetics of drying. Pink pepper.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	16
OBJETIVO .....	19
Objetivo geral .....	19
Objetivos específicos.....	19
Estrutura do trabalho .....	19
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
1.1 Pimenta rosa .....	20
1.1.1 Composição Química .....	22
1.2 Atividade antioxidante.....	23
1.2.1 Compostos fenólicos .....	24
1.3 Branqueamento.....	25
1.4 Secagem.....	26
1.4.1 Fundamentos da transferência de calor .....	27
1.4.1.1 Condução .....	27
1.4.1.2 Convecção .....	27
1.4.1.3 Radiação .....	28
1.4.2 Fundamentos da secagem .....	30
1.4.3 <i>Refractance window</i> .....	32
1.4.4 <i>Cast-tape drying</i> .....	38
1.5 Produção de alimentos em pó.....	39
1.5.1 Atividade de água ( $a_w$ ).....	41
1.5.2 Cor .....	41
1.6 Referências .....	43
2 PREPARO DOS FRUTOS DA PIMENTA ROSA PARA SECAGEM POR <i>CAST-TAPE DRYING</i> .....	54
2.1 Introdução.....	54
2.2 Material e Métodos.....	55
2.2.1 Coleta e armazenamento das amostras .....	55
2.2.2 Preparo das amostras .....	56
2.2.3 Redução de tamanho da pimenta rosa .....	57
2.2.4 Preparo dos frutos triturados de pimenta rosa para secagem.....	58
2.2.5 Unidade experimental utilizada para a secagem por <i>cast-tape drying</i> .....	58
2.2.6 Metodologia de determinação da cinética de secagem por <i>cast-tape drying</i> .....	59
2.2.7 Medida de temperatura .....	60
2.2.8 Determinação da umidade .....	60

2.2.9 Determinação da cor.....	61
2.2.10 Determinação do diâmetro médio de Sauter.....	61
2.3 Resultados e Discussão.....	62
2.3.1 Redução de tamanho dos frutos de pimenta rosa .....	62
2.3.2 Distribuição granulométrica da pasta triturada e cinéticas de secagem .....	63
2.3.3 Preparo dos frutos triturados de pimenta rosa para secagem.....	65
2.3.4 Testes preliminares de secagem .....	66
2.3.5 Curvas de Secagem.....	68
2.3.6 Tratamento térmico dos frutos da pimenta rosa .....	71
2.3.7 Medida de temperatura .....	76
2.4 Conclusão .....	77
2.5 Referências .....	78
3 CINÉTICA DE SECAGEM DOS FRUTOS DA PIMENTA ROSA POR <i>CAST-TAPE</i> <i>DRYING</i> E CARACTERIZAÇÃO DO PÓ OBTIDO .....	81
3.1 Introdução.....	81
3.2 Material e Métodos.....	82
3.2.1 Preparo das amostras .....	82
3.2.2 Caracterização dos frutos de pimenta rosa .....	82
3.2.2.1 Atividade de água ( $a_w$ ).....	83
3.2.2.2 Cor .....	83
3.2.2.3 Umidade .....	83
3.2.2.4 Compostos fenólicos totais.....	83
3.2.2.5 Morfologia das partículas .....	84
3.2.3 Planejamento experimental.....	85
3.2.4 Cinética de secagem .....	86
3.3 Resultados e Discussão.....	87
3.3.1 Caracterização dos frutos de pimenta rosa .....	87
3.3.2 Cinética de secagem .....	91
3.4 Conclusão .....	103
3.5 Referências .....	104
4 CONCLUSÕES FINAIS .....	108
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
APÊNDICES .....	111
APÊNDICE A - CURVA PADRÃO DE ÁCIDO GÁLICO.....	111
APÊNDICE B - PARÂMETROS OBTIDOS PELOS MODELOS DA LITERATURA.....	112
APÊNDICE C - ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SUPERFÍCIES DE RESPOSTA.....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Variação de temperatura e umidade final das amostras de pimenta rosa de acordo com a metodologia de redução de tamanho .....	62
Tabela 2.2 - Diâmetro médio de Sauter das amostras .....	63
Tabela 2.3 - Umidades iniciais das amostras após a adição de água.....	66
Tabela 2.4 - Taxa de secagem da pasta dos frutos de pimenta rosa das amostras trituradas em multiprocessador.....	69
Tabela 2.5 - Umidade das amostras de pimenta rosa no preparo das amostras.....	72
Tabela 2.6 - Variação de temperatura e umidade final da amostra branqueada moída em moinho de facas .....	72
Tabela 2.7 - Parâmetros de cor dos frutos de pimenta rosa moídos em moinho de facas .....	74
Tabela 2.8 - Taxa constante de secagem da pasta de pimenta rosa branqueada, moída em moinho de facas, com e sem exaustão à temperatura da água circulante de 95 °C.....	75
Tabela 2.9 - Tempo e umidade final de secagem da pasta dos frutos de pimenta rosa a temperatura da água circulante de 95 °C .....	76
Tabela 2.10 - Variação de temperatura da superfície do filme <i>mylar</i> <sup>®</sup> durante a secagem por <i>cast-tape drying</i> .....	77
Tabela 3.1 Fatores e níveis do planejamento fatorial .....	85
Tabela 3.2 - Planejamento fatorial 3 <sup>2</sup> .....	85
Tabela 3.3 - Modelos da literatura para cinética de secagem .....	87
Tabela 3.4 - Caracterização dos frutos de pimenta rosa .....	88
Tabela 3.5 - Comparativo da taxa de secagem da pasta dos frutos de pimenta rosa a temperatura da água circulante de 95 °C .....	89
Tabela 3.6 - Planejamento fatorial e umidade final.....	92
Tabela 3.7 - Parâmetros obtidos pelo modelo de Page (1949) .....	93
Tabela 3.8 - Parâmetros obtidos pelo modelo de Overhults et al. (1973) .....	93
Tabela 3.9 - Taxa de secagem dos frutos de pimenta rosa no período de taxa constante .....	94
Tabela 3.10 - Umidade final, atividade de água ( <i>a<sub>w</sub></i> ) e parâmetros de cor dos pós dos frutos de pimenta rosa obtidos em diferentes condições de secagem por CTD .....	96
Tabela 1B - Parâmetros obtidos pelo modelo de Lewis (1921) .....	112
Tabela 2B - Parâmetros obtidos pelo modelo de Henderson; Henderson (1968) .....	112
Tabela 3B - Parâmetros obtidos pelo modelo de Brooker et al. (1974) .....	113

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Espectro eletromagnético .....	28
Figura 1.2 - Fenômenos que ocorrem quando a radiação térmica incide numa superfície .....	29
Figura 1.3 - Curva típica da taxa de secagem .....	31
Figura 1.4 - Diagrama esquemático do secador RW industrial contínuo.....	34
Figura 1.5 - Fotografias de (a) Secador RW em escala industrial (Modelo RWD5, MCD Technologies, EUA), (b) seção de alimentação do secador por via úmida e (c) seção de saída do produto seco.....	36
Figura 1.6 - Esquema representativo do circuito térmico no RW .....	37
Figura 2.1 - Pimenta rosa ( <i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi) – Patos de Minas - MG .....	55
Figura 2.2 - Fotografias das amostras de pimenta rosa: a) após a colheita, b) lavada, c) sobre papel toalha e d) embalada .....	56
Figura 2.3 - Fluxograma dos experimentos realizados com a pimenta rosa.....	57
Figura 2.4 - Esquema da unidade experimental para secagem por <i>cast-tape drying</i> . .....	59
Figura 2.5 - Medida de temperatura do filme <i>mylar</i> <sup>®</sup> .....	60
Figura 2.6 – Fotografias das amostras de pimenta rosa sem branqueamento após a redução de tamanho em a) multiprocessador, b) liquidificador industrial, c) moinho de facas .....	63
Figura 2.7 – Distribuição granulométrica das amostras de pimenta rosa após secagem por CTD .....	64
Figura 2.8 - Fotografias da amostra de pimenta rosa triturada em multiprocessador adicionada de a) 30% de água, b) 40% de água e c) 50% de água .....	65
Figura 2.9 - Curvas de secagem da pimenta rosa sem branqueamento submetidas à secagem por <i>cast-tape drying</i> a 95 °C, 2 mm de espessura e 40 % de água em peso na amostra .....	67
Figura 2.10 - Curvas de secagem dos frutos de pimenta rosa moídos em multiprocessador em função da espessura da camada espalhada e da adição de água com variação da temperatura nas seguintes condições: a) 2 mm de espessura sem adição de água na amostra, b) 2 mm de espessura e adição de 40% em peso de água na amostra, c) 3 mm de espessura sem adição de água na amostra, d) 3 mm de espessura e adição de 40% em peso de água na amostra .....	68
Figura 2.11 - Frutos de pimenta rosa: a) sem branqueamento ( <i>in natura</i> ), b) com branqueamento.....	71
Figura 2.12 - Pimenta rosa após redução de tamanho em moinho de facas: a) sem branqueamento, b) com branqueamento.....	73

Figura 2.13 - Curvas de secagem da pimenta rosa a 95 °C, 2 mm e 3 mm, 0% de adição de água em peso na amostra com branqueamento (CB) e com branqueamento e exaustão (CBE) moídas em moinho de facas .....	74
Figura 3.1 - Sistema de exaustão do ar de secagem adaptado à unidade experimental.....	86
Figura 3.2 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 1.000 vezes para as amostras dos frutos de pimenta rosa. ....	90
Figura 3.3 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 300 vezes para as amostras dos frutos de pimenta rosa.....	91
Figura 3.4 - Curvas da cinética de secagem dos frutos de pimenta rosa por CTD: (a) experimentos de 1 a 3, (b) experimentos de 4 a 6, (c) experimentos de 7 a 9 e (d) experimentos de 5, 10 e 11. ....	95
Figura 3.5 - Umidade final dos pós secos por <i>cast-tape drying</i> .....	98
Figura 3.6 - Atividade de água ( $a_w$ ) dos pós secos por <i>cast-tape drying</i> .....	99
Figura 3.7 - $L^*$ - Luminosidade dos pós secos por <i>cast-tape drying</i> .....	100
Figura 3.8 - $a^*$ - croma no eixo vermelho-verde dos pós secos por <i>cast-tape drying</i> .....	100
Figura 3.9 - Fotografias dos pós dos frutos de pimenta produzidos segundo planejamento experimental. ....	101
Figura 3.10 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 1.000 vezes para as amostras dos frutos de pimenta rosa desidratados por CTD .....	102
Figura 3.11 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 300 vezes para as amostras dos frutos de pimenta rosa desidratados por CTD .....	103
Figura 1A - Curva padrão de ácido gálico utilizada para quantificação dos compostos fenólicos totais com reagente Folin-Ciocalteu .....	111

## INTRODUÇÃO

A pimenta rosa, *Schinus terebinthifolius* R. (aroeira-pimenteira) é uma árvore perene nativa da costa do Brasil. De sabor doce e aromático, seus frutos têm sido utilizados nos mercados externo e interno como condimento *gourmet* (DEGÁSPARI et al., 2005).

Além do uso como condimento, a aroeira é utilizada na indústria farmacêutica (INCAPER, 2016), e o óleo essencial extraído dos frutos apresenta bom potencial na indústria de cosméticos (NEVES et al., 2016). Muitas propriedades medicinais têm sido atribuídas a pimenta rosa, como atividade antioxidante, antitumoral e antimicrobiana. No Brasil ela é utilizada na medicina popular como um anti-inflamatório e cicatrizante, além de possuir qualidades adstringentes, tônicas e estimulantes (BERTOLDI, 2006).

Neste sentido, a pimenta rosa se mostra um fruto atrativo para estudos, pois a constante busca por uma alimentação saudável e pela redução ou eliminação dos aditivos artificiais nos alimentos faz com que matérias-primas naturais convencionais com propriedades funcionais sejam testadas nos alimentos, conferindo aos mesmos, características que vão além da sua função principal. Assim, é um condimento que tem demonstrado interesse científico devido à presença de componentes com propriedades antioxidantes e antimicrobianas, podendo agir como um conservante natural dos alimentos.

A utilização dos frutos da pimenta rosa ou "aroeirinha" é bastante difundida no Brasil e no mundo. A produção nacional é obtida, em sua maior parte, da exploração extrativista de plantas nativas, como o projeto do Instituto Engenho na cidade de Piaçabuçu no estado de Alagoas (GAZETA, 2017), sendo que somente no Espírito Santo existem registros de produção comercial de pimenta rosa (INCAPER, 2016). No país, os frutos da aroeira são utilizados apenas em sua forma desidratada e comercializados, na maioria das vezes, a granel (ANDRADE, 2015).

Na literatura, em trabalhos desenvolvidos recentemente, a utilização dos frutos da pimenta rosa ocorre na forma de seus óleos essenciais aplicados diretamente nos alimentos, o que, embora tenha demonstrado atividade antimicrobiana frente à patógenos de alimentos nos testes *in vitro* e *in situ* (queijo), tal efeito ocorreu com indesejável interferência sensorial devido à aplicação direta no alimento (DANNENBERG et al., 2016).

A extração de seu óleo essencial viabiliza sua utilização industrial, conferindo sabor peculiar ao produto ao qual é adicionado (BAGGIO, 1988; FAES SENAR, 2009; SILVA-LUZ; PIRANI, 2015). No entanto, sua composição, atividade antimicrobiana e ação antioxidante precisam ser mais bem investigadas. Óleos essenciais de orégano, alecrim e

louro têm sido utilizados com sucesso para controlar reações de oxidação em alimentos (DAMODARAN et al., 2010; ARAÚJO, 2011; OLMEDO et al., 2013). Entretanto faltam na literatura trabalhos que reportem a obtenção e caracterização do produto seco dos frutos da pimenta rosa. Os frutos de pimenta rosa quando recém colhidos apresentam elevadas umidade, atividade de água e concentração de substratos, o que favorece a ação das enzimas e alterações fisiológicas tendo como consequências perdas de princípios ativos e de compostos voláteis, além das alterações de cor e textura. Desta forma, para garantir a qualidade sensorial e microbiológica da pimenta rosa, os frutos devem ser comercializados na forma desidratada (BERTOLDI, 2006).

A secagem é um dos métodos mais antigos de conservação de alimentos que possibilita a redução das perdas pós-colheita e no excedente da produção, facilita o transporte e o armazenamento, e promove o aumento da vida útil do alimento, através da redução e inibição da atividade microbiológica e redução da velocidade das reações enzimáticas e químicas pela remoção total ou parcial da umidade presente no alimento (PARK et al., 2001; TONON et al., 2009; DIÓGENES et al., 2013, ARAÚJO et al., 2015).

Mais de 85% dos secadores industriais são convectivos, com ar quente ou gases de combustão como meio de transferência de calor (ZAREIN et al., 2015); muitas vezes resultando em níveis significativos de mudanças na qualidade do produto em relação a sua forma fresca. Na maioria dos casos, os métodos convencionais de secagem produzem produtos de qualidade inferior e exigem tempos de secagem mais elevados (MOSES et al., 2013, 2014). Por isso, há uma forte necessidade de desenvolver tecnologias de secagem alternativas, considerando a capacidade operacional, controle de processo, tempo, redução de custos, qualidade do produto, segurança e aspectos ambientais. As novas tecnologias de secagem são combinações inteligentes de métodos convencionais, necessárias pelas mudanças nas exigências do consumidor e do mercado.

Secagem por micro-ondas, secagem por infravermelho, secagem por bomba de calor, secagem em leito fluidizado, secagem por radiofrequência e secagem por *refractance window* (RW) são considerados métodos de secagem de quarta geração, baseados no tipo de matérias-primas a serem desidratadas e nas características de qualidade dos produtos secos (CHOU; CHUA, 2001).

Entre estes métodos, a secagem por RW é um método de secagem aplicado à alimentos (FORERO et al., 2015), incluindo purês (NINDO et al., 2003a) e fatias (OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2011) de frutas e vegetais sensíveis ao calor. Rostami et al. (2018) relataram o potencial de usar a secagem por RW para fabricação carne em pó. Com inúmeras

vantagens, tais como: melhora na retenção de cor, aroma, sabor, vitaminas e antioxidantes, este método de secagem direta encontrou várias aplicações em algas, produtos farmacêuticos, nutracêuticos, indústrias de cosméticos e pigmentos (NINDO et al., 2003b; CAPARINO et al., 2012; ORTIZ-JEREZ et al., 2015).

Recentemente, após estudos quantificando a contribuição da transferência de calor por radiação na secagem por RW, os pesquisadores concluíram que a mesma pode ser desprezada (ORTIZ-JEREZ et al., 2015; ZOTARELLI et al., 2015). Desta forma, o processo de secagem por RW é um caso particular da secagem por *cast-tape drying* (CTD) (ZOTARELLI et al., 2017). Neste processo, apenas a transferência de energia térmica por condução e por convecção contribuem na remoção da umidade do alimento.

As pesquisas sugerem que compostos aromáticos e pigmentares ativos responsáveis por atributos sensoriais e nutricionais, característicos dos alimentos, podem ser retidos através da secagem por *refractance window* (RW), utilizando temperaturas de secagem abaixo da temperatura de ebulição da água (RAGHAVI et al., 2018). A secagem por CTD é um processo alternativo para a secagem de polpas de frutas e vegetais, que opera em temperaturas moderadas, resultando em tempos de secagem relativamente pequenos. Além disso, esse processo proporciona elevadas taxa de secagem e capacidade evaporativa, permitindo a produção de filmes, flocos ou pós de frutas, após a moagem (DURIGON et al., 2017). Entretanto, Raghavi et al. (2018), verificaram que ainda existe uma compreensão limitada sobre os efeitos da secagem por *refractance window* em diferentes tipos de alimentos.

Apesar do apelo nutricional e medicinal da pimenta rosa, ela ainda é subutilizada pela indústria de alimentos, principalmente porque seus frutos são comercializados basicamente *in natura* ou secos por métodos convencionais sem uniformidade, controle adequado e otimização das condições do processo, o que prejudica fortemente a preservação de suas propriedades. Também, a literatura apresenta poucos estudos sobre a pimenta rosa, sobretudo relacionados à obtenção do produto seco dos frutos, sendo que a maioria dos trabalhos realizados investigaram a extração e caracterização dos óleos essenciais. Neste cenário, percebe-se a importância e relevância do estudo da secagem da pimenta rosa por *cast-tape drying*, bem como da determinação das melhores condições das variáveis de processo, na busca por um melhor aproveitamento deste fruto.

## OBJETIVO

### Objetivo geral

Obter e caracterizar físico-quimicamente o pó da pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* Raddi) desidratado por *cast-tape drying*.

### Objetivos específicos

- Estudar a metodologia adequada de preparo da amostra pimenta rosa, ou seja, tratamento térmico e redução de tamanho.
- Estudar a cinética de secagem dos frutos triturados e avaliar a influência das condições de processo, espessura da amostra, temperatura da água circulante, adição de água à amostra na cinética de secagem.
- Analisar o efeito das variáveis de processo (como temperatura de secagem e espessura da amostra de pimenta rosa *in natura* espalhada sobre o filme do equipamento) nas características do material seco obtido.
- Caracterizar e comparar o produto seco em relação ao fruto *in natura* quanto à: atividade de água, cor, umidade, compostos fenólicos e morfologia das partículas.

## ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado de forma que descreve as etapas desenvolvidas em sequência lógica. Desta forma os capítulos estão assim divididos:

Capítulo 1 - Revisão da Literatura.

Capítulo 2 - Preparo das amostras dos frutos de pimenta rosa para secagem por *cast-tape drying*.

Capítulo 3 - Determinação da cinética de secagem e caracterização dos frutos secos da pimenta rosa secos por *cast-tape drying*.

Capítulo 4 - Conclusões finais e propostas para trabalhos futuros.

## 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os conteúdos, na forma de tópicos que fundamentam este trabalho. No primeiro tópico são apresentadas as principais informações relacionadas à matéria-prima pimenta rosa, *Schinus terebinthifolius* Raddi; a atividade antioxidante e os compostos fenólicos. Na sequência, é apresentada uma revisão sobre branqueamento; os fundamentos da secagem de alimentos incluindo os princípios da secagem por *cast-tape drying* e, concluindo o capítulo, é abordada a produção de alimentos em pó e algumas características como atividade de água e cor.

### 1.1 Pimenta rosa

A pimenta rosa, *Schinus terebinthifolius* Raddi, é uma árvore perene nativa da costa do Brasil que foi introduzida em outras regiões da América do Sul, América Central, Europa, Ásia e África. É conhecida por uma variedade de nomes como aroeira-vermelha, aroeira-pimenteira, pimenta brasileira, pimenta rosa, *poivre rose*, aroeira-do-campo, aroeira-de-goiás, aroeira-do-amazonas, aroeira-do-rio-grande, aroeira-rasteira, aroeira-mansa, aroeira-brava, aroeira-preta, entre outros (LACA-BUENDIA et al., 1992; CLEMENTE, 2006).

No Brasil, ocorre de forma natural nos estados de Sergipe, Paraíba, Alagoas, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Bahia, Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Santa Catarina e São Paulo (NEVES et al., 2016).

É uma árvore de pequeno a médio porte, de 4 a 10 m de altura e os frutos apresentam propriedades adstringentes, cicatrizantes e anti-inflamatórias (GUERRA et al., 2000; BIAVATTI et al., 2007; AGRA et al., 2008). É normalmente encontrada em beiras de rios, córregos e em várias várzeas úmidas de formação secundária, entretanto, desenvolve-se também em solos pobres, argilosos, rochosos, ácidos e secos. É muito utilizada na arborização de cidades, como árvore ornamental, apresentando caule um pouco tortuoso, de tronco com casca espessa e fissurada. As folhas são imparipinadas, com 8 a 12 cm de comprimento e 7 a 13 folíolos verdes, elípticos a abovados, de bordas serreadas, e suas flores pequenas, de cor amarelo-clara florescem de setembro a janeiro. São aromáticas e atrativas para abelhas e outros animais (LORENZI, 2000; CLEMENTE, 2006).

A pimenta rosa é o principal produto obtido pelo cultivo da aroeira-vermelha. Esta, após o processo de industrialização, é utilizada no mercado interno e externo como condimento *gourmet*. Também é utilizada em substituição à pimenta do reino por ter

componentes químicos semelhantes, segundo as análises químicas relatadas na literatura (LACA-BUENDIA et al., 1992).

Grande parte da produção de pimenta rosa tem origem na exploração extrativista de plantas nativas de aroeira-vermelha em áreas de restinga, principalmente dos estados do Espírito Santo e do Rio de Janeiro e, também, em ilhas do Rio São Francisco, na divisa entre Alagoas e Sergipe. Nesses locais, a colheita dos frutos é feita de forma coletiva pelas comunidades. Somente no Estado do Espírito Santo existem registros de plantio de aroeira, voltado para produção de pimenta rosa. Esse plantio ainda não apresenta um sistema de produção definido, mas já contempla a aplicação de insumos e um trabalho inicial para a seleção de matrizes voltado à produção de frutos (NEVES et al., 2016).

Nacionalmente, os frutos da aroeira são utilizados apenas em sua forma desidratada e comercializados, na maioria das vezes, a granel. Geralmente, 3 kg de sementes frescas produzem 1 kg de material processado. A produção industrial de pimenta rosa no Brasil está regulamentada pela resolução RDC nº 276, de 22 de setembro de 2005, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), onde foi aprovado o “Regulamento Técnico para Especiarias, Temperos e Molhos” (BERTOLDI, 2006; BANDES, 2008).

Kaistha e Kier (1962 a, b) estudaram a pimenta rosa quanto à composição química de seus frutos e folhas, verificando a ocorrência de compostos como hidrocarbonetos terpênicos, cetonas e ácidos. Também, segundo Bertoldi (2006), as folhas possuem propriedades balsâmicas e antirreumáticas, sendo empregadas na cura de feridas e úlceras. Já os ramos novos, além de serem usados com a mesma finalidade, possuem a propriedade de branquear e limpar os dentes.

Este fruto está entre as espécies vegetais listadas na Relação Nacional de Plantas Medicinais de Interesse ao Sistema Único de Saúde (RENISUS, nº 60), o qual é constituído de um conjunto de espécies vegetais com potencial de gerar produtos de interesse ao Sistema Único de Saúde (SUS). Tem por finalidade, subsidiar o desenvolvimento de toda cadeia produtiva da planta, bem como orientar estudos e pesquisas que possam contribuir na elaboração da Relação Nacional de Plantas Medicinais e Fitoterápicos (RENAFITO), dando suporte ao desenvolvimento e a inovação na área de plantas medicinais e fitoterápicos.

As propriedades medicinais atribuídas à pimenta rosa têm sido associadas à presença de polifenóis. Substâncias como terebinthona, ácido hidroximasticadienóico, ácido terebinthifólico e ácido ursólico, presentes no fruto da aroeira, apresentam atividade antimicrobiana (DEGÁSPARI et al., 2005; JOHANN et al., 2008; PAIVA et al., 2010; MACHADO et al., 2012; GOMES et al., 2013). Os principais componentes terpenóides

encontrados nos extratos de frutos maduros são  $\alpha$ -pineno,  $\beta$ -felandreno, trans-ocimeno (AMORIM; SANTOS, 2003; BERTOLDI, 2006). Estudos recentes comprovaram atividade antifúngica (FENNER et al., 2006; SANTOS et al., 2010; KHAN, 2013), anti-inflamatória (MEDEIROS et al., 2007; VARELA-BARCA et al., 2007), inseticida (SANTOS et al., 2013) e antitumoral (QUEIRES et al., 2013).

### 1.1.1 Composição Química

A análise fitoquímica da pimenta rosa revelou a presença de taninos, alcalóides, flavonóides, saponinas esteroidais, esteróis, terpenos e uma grande quantidade de óleo essencial. Os óleos essenciais presentes nas folhas, frutos e casca são uma fonte importante de substâncias químicas. As folhas podem conter 1% de óleo essencial, enquanto esse valor pode chegar a 5% nos frutos (CARVALHO et al., 2003). A presença de polifenóis como a apigenina, o ácido elágico e a naringina nos frutos de pimenta rosa tem sido associada às atividades antinevrálgicas, adstringentes, tônicas e estimulantes (DEGÁSPARI et al., 2005).

A atividade antioxidante da pimenta rosa está relacionada à presença de compostos polares, principalmente os fenólicos. Tais propriedades podem ser potencializadas através da aplicação do extrato fenólico, ou oleorresina e óleo essencial dos frutos, em produtos farmacêuticos, cosméticos e alimentos (BERTOLDI, 2006).

Dourado (2012) determinou as características físico-químicas dos frutos maduros e verdes da pimenta rosa antes da secagem, o pH para os frutos verdes foi de 5,55 e para os frutos maduros foi de 5,46, a umidade para os frutos verdes foi de 70,40% e para os frutos maduros foi de 34,05%, o percentual de cinzas para os frutos verdes foi de 1,22% e para os frutos maduros foi de 3,18%. Os valores de umidade encontrados para os frutos verdes foram semelhantes aos encontrados por Totti e Medeiros (2006) e para os frutos maduros, os valores foram semelhantes aos encontrados por Degáspari (2005).

No decorrer dos últimos anos vários estudos têm sido publicados sobre a pimenta rosa: Dannenberg (2017) avaliou a atividade antimicrobiana do óleo essencial de pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* Raddi) e aplicação como componente ativo em filme para bioconservação de alimentos; Ribeiro (2015) avaliou o efeito da adição do óleo essencial de pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* Raddi) microencapsulado em queijo minas frescal; Andrade (2015) extraiu e encapsulou os extratos de interesse biológico provenientes da pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.) e de pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* R.); e, Dourado (2012) determinou as propriedades químicas e biológicas dos óleos essenciais e oleoresina da pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* Raddi). Novamente, nota-se que, entre os

trabalhos encontrados na literatura relacionados ao aproveitamento da pimenta rosa, têm-se uma escassez de estudos que investiguem as melhores condições de produção e as características do produto obtido desta pimenta na forma desidratada.

## 1.2 Atividade antioxidante

Antioxidantes são substâncias que reduzem a velocidade da oxidação por um ou mais mecanismos, como inibição de radicais livres e complexação de metais, desta forma retardam as reações de degradação oxidativa (PIETTA, 2000).

Entre os antioxidantes naturais, destacam-se a vitamina E, o  $\beta$ -caroteno e o ácido ascórbico (RICE-EVANS et al., 1996). Os compostos fenólicos também são antioxidantes importantes atuando nas reações de oxidação lipídica, na quelação de metais e como redutores do oxigênio singlete (SATUÉ-GARCIA et al., 1997; HOPIA; HEINONEM, 1999). Naturalmente presentes em frutas, os compostos antioxidantes podem alcançar altas concentrações de determinados grupos (DUARTE-ALMEIDA et al., 2006).

As pimentas contem uma série de compostos com propriedades antioxidantes que podem ter influência significativa sobre a evolução de doenças e serem relevantes para a saúde. Dentre tais compostos destacam-se os fenólicos, as antocianinas, o ácido ascórbico, os capsaicinoides e os carotenoides, substâncias que possuem efeitos importantes na proteção contra os efeitos oxidativos causados por radicais livres (OGISO et al., 2008). Ao avaliar a atividade antioxidante das pimentas malagueta (*C. frutescens*), cambuci (*C. baccatum* var. *pendulum*), cumari (*C. baccatum* var. *praetermissum*) e pimentão magali (*C. annuum* var. *annuum*), Costa et al., 2010 verificaram que as pimentas cumari, cambuci e malagueta podem ser utilizadas como agentes antioxidantes naturais em alimentos.

Os resultados obtidos por Andrade (2015) para a atividade antioxidante dos extratos de pimenta rosa obtidos por diferentes técnicas de extração, Soxhlet, ultrassom e extração supercrítica com CO<sub>2</sub>, demonstraram que não foi possível estabelecer uma relação de aumento ou redução da atividade antioxidante em função da polaridade do solvente. Os melhores potenciais foram determinados na extração com etanol, em ambos os métodos utilizados, sendo de 95,5% de atividade antioxidante para o extrato obtido em Soxhlet, e 66,0% para o extrato obtido utilizando ultrassom. Para o extrato obtido em Soxhlet com etanol, o valor de da concentração efetiva EC<sub>50</sub>, foi de 80  $\mu$ g/mL, inferior ao encontrado para o antioxidante padrão BHT, o que caracteriza o potencial antioxidante da amostra. Valores de EC<sub>50</sub> abaixo de 250  $\mu$ g/mL são considerados de alto potencial antioxidante (CAMPOS et al., 2005).

De acordo com Bendaoud et al. (2010) os óleos essenciais dos frutos de pimenta rosa poderiam ser usados na indústria alimentícia como antioxidantes naturais ou como aditivos aromatizantes devido às suas propriedades antioxidantes.

### 1.2.1 Compostos fenólicos

Originados do metabolismo secundário das plantas, os compostos fenólicos são essenciais para o seu crescimento e sua reprodução. Nas plantas atuam também como agente antipatogênico e contribuem na pigmentação (SHAHIDI; NACZK, 1995). Em alimentos, são responsáveis pela cor, adstringência, aroma (PELEG et al., 1998) e estabilidade oxidativa (NACZK; SHAHIDI, 2004).

Destacam-se como fontes de compostos fenólicos as frutas cítricas, como limão, laranja e tangerina, além de outras frutas à exemplo da pera, cereja, uva, ameixa, maçã e mamão, sendo encontrados em maiores quantidades na polpa da fruta. Pimenta verde, brócolis, repolho roxo, cebola, alho e tomate também são excelentes fontes destes compostos (PIMENTEL et al., 2005). Quimicamente, os fenólicos são definidos como substâncias que possuem anel aromático com um ou mais substituintes hidroxílicos, incluindo seus grupos funcionais. Possuem estrutura variável e com isso, são multifuncionais. Existem cerca de cinco mil fenóis, dentre eles, destacam-se os flavonóides, ácidos fenólicos, fenóis simples, taninos, ligninas, cumarinas e tocoferóis (SHAHIDI; NACZK, 1995).

Estão presentes nos vegetais na forma livre ou ligados a açúcares (glicosídeos) e proteínas e contém desde moléculas simples até moléculas com alto grau de polimerização (BRAVO, 1998).

Os compostos fenólicos são classificados como interruptores de radicais livres sendo muito eficientes na prevenção da autoxidação (SHAHIDI et al., 1992). Os antioxidantes fenólicos interagem, preferencialmente, com o radical peroxil por ser este predominante na etapa da autoxidação e por possuir menor energia do que outros radicais, fato que favorece a remoção do seu hidrogênio (DECKER, 1998). O radical fenoxil resultante, embora moderadamente estável, pode ter interferência na reação de propagação ao reagir com um radical peroxil, via interação entre radicais. O composto formado, por ação de temperaturas elevadas e da luz ultravioleta, poderá formar novos radicais, comprometendo a eficiência do antioxidante, que é determinada pelos grupos funcionais presentes, pelo tamanho da cadeia desses grupos e pela posição que ocupam no anel aromático (SHAHIDI et al., 1992; JADHAV et al., 1995). Este mecanismo de ação dos antioxidantes, presentes em extratos de plantas, tem um papel importante na redução da oxidação lipídica em tecidos, vegetal e

animal, pois quando associado à alimentação humana não conserva apenas a qualidade do alimento, mas também diminui o risco de desenvolvimento de patologias, como arteriosclerose e câncer (NAMIKI, 1990; JADHAV et al., 1995).

### **1.3 Branqueamento**

No processamento de frutas e vegetais normalmente a primeira etapa, anterior à secagem, congelamento, fritura ou enlatamento, é o branqueamento a fim de evitar o escurecimento e a produção de sabores indesejados (DORANTES-ALVAREZ et al., 2011). O branqueamento é uma técnica de pré tratamento térmico que tem como objetivo proporcionar a inativação enzimática mantendo os atributos de qualidade (cor, sabor e odor), obter a redução da microflora de superfície, facilitar a remoção de ar do interior do alimento e melhorar a textura. No branqueamento por imersão o alimento é submerso em água fervente por um período de tempo e após imerso em água fria rapidamente, consistindo em uma curta exposição dos alimentos em água quente (imersão) ou vapor de água geralmente realizado à temperaturas entre 85 e 100 °C (MAZZEO et al., 2015).

O branqueamento é uma operação unitária muito importante no processamento de frutas e legumes. Isso não afeta apenas a inativação da polifenol oxidase (PPO) e da peroxidase (POD), mas também afeta outros atributos de qualidade dos produtos tais como: quantidade de nutrientes e ácido ascórbico, cor e textura (XIAO et al., 2017).

O branqueamento térmico pode inativar enzimas presentes nos produtos, melhorar a taxa de desidratação, remover resíduos de pesticidas e reduzir a carga microbiana. Os métodos convencionais de branqueamento a vapor e água são tecnologias tradicionais que estão sendo aplicadas em muitos processamentos de alimentos. No entanto, utilizam muita energia, afetam negativamente o conteúdo de nutrientes e produzem águas residuais altamente poluidoras. Há outras tecnologias de branqueamento térmico emergentes, incluindo branqueamento por micro-ondas, ôhmico e infravermelho que também apresentam vantagens e desvantagens. Nas avançadas tecnologias de processamento de alimentos atuais, a tendência é minimizar a perda de nutrientes, a carga ambiental e o custo de produção, e maximizar a retenção de nutrientes, a sustentabilidade do processo e a eficiência energética para produzir produtos de melhor qualidade. Devido às variações das propriedades dos alimentos, nenhuma tecnologia de branqueamento único pode ser efetivamente aplicada a todos os produtos (XIAO et al., 2017).

## 1.4 Secagem

A secagem é definida como a operação unitária que transforma um material sólido, semissólido ou líquido em um produto sólido de umidade consideravelmente baixa, por meio da transferência de umidade do material para uma fase gasosa não saturada. Em geral, a retirada de água se dá por evaporação e envolve a aplicação de energia térmica, a qual provoca a mudança de fase da água líquida para o estado gasoso. A liofilização é uma exceção, uma vez que o vapor de água é formado diretamente da sublimação do gelo (TADINI et al., 2016).

Devido a vantagens como custos e facilidade de operação, a secagem é a operação comercial mais utilizada para preservar os alimentos, quando comparada com outros métodos de preservação para períodos longos, como a centrifugação, o enlatamento, os tratamentos químicos, a irradiação, entre outros. Seu principal objetivo consiste na remoção de grande parte do líquido de um produto por evaporação, mediante a ação do calor, podendo realizar-se por meio natural, expondo o produto ao sol, e artificial por meio de secadores mecânicos (GARCIA et al., 2004).

Por meio da cinética de secagem, determina-se o comportamento da perda de umidade (em função do tempo) do material sólido que é seco, sendo que este comportamento é representado pelas curvas de secagem e de taxa de secagem. O comportamento da curva de secagem (variação da umidade do sólido em função do tempo) de um sólido úmido mediante um fluxo de ar a uma determinada temperatura, velocidade e umidade relativa do ar é sempre o mesmo, segundo Foust et al. (1980). Já a curva da taxa de secagem é obtida derivando-se os dados de umidade em função do tempo de secagem e, verificando a dependência desta derivada com a variação da umidade do material. A cinética de secagem de vários produtos também pode ser descrita por modelos matemáticos semiempíricos ou puramente empíricos (MADAMBA, 2003). Os modelos semiempíricos se baseiam na analogia com a Lei de Newton para o resfriamento, aplicada à transferência de massa, enquanto que, os modelos empíricos apresentam uma relação entre a umidade média e o tempo de secagem e consideram como mecanismo principal a difusão baseada na segunda Lei de Fick (ZANOELO et al., 2007).

## 1.4.1 Fundamentos da transferência de calor

### 1.4.1.1 Condução

De acordo com Welty et al. (2008), a transferência de calor por condução envolve dois mecanismos, o primeiro é o da interação molecular, na qual o maior movimento de uma molécula com um nível de energia mais elevado (temperatura) transmite energia a moléculas adjacentes em níveis de energia mais baixos. O segundo mecanismo de transferência de calor por condução é por elétrons "livres". O mecanismo "free" elétron é significativo principalmente em sólidos puramente metálicos; a concentração de elétrons livres varia consideravelmente para as ligas e torna-se muito baixa para sólidos não-metálicos. A capacidade dos sólidos de conduzir calor varia diretamente com a concentração de elétrons livres. A determinação quantitativa do fluxo de calor por condução foi postulada por Fourier, conforme Equação 1.1 (INCROPERA et al., 2007).

$$\frac{q_k}{A} = -k\nabla T \quad (1.1)$$

em que,  $q_k$  é a taxa de transferência de calor por condução [W],  $A$  é a área normal a direção do fluxo de calor [ $m^2$ ],  $k$  é a condutividade térmica [W/m.K] e  $\nabla T$  é o gradiente de temperatura [K].

### 1.4.1.2 Convecção

A transferência de calor por convecção envolve a troca de energia entre uma superfície e um fluido adjacente. Uma distinção deve ser feita entre convecção forçada, em que um fluido gerado por um agente externo é forçado a passar através da superfície sólida, como ventilador ou bomba; e convecção natural ou livre, em que o fluido próximo ao limite do sólido causa circulação por causa da diferença de densidade resultante da variação de temperatura do fluido (GEANKOPLIS, 1993).

A equação da taxa de transferência de calor convectiva foi expressa pela primeira vez por Newton em 1701, é denominada a equação de Lei de Newton do Resfriamento e é apresentada na Equação 1.2 (WELTY et al., 2008).

$$\frac{q_c}{A} = h\Delta T \quad (1.2)$$

em que,  $q_c$  é a taxa de transferência de calor por convecção [W],  $A$  é a área normal a direção do fluxo de calor [ $m^2$ ],  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/ $m^2$ .K] e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido [K].

### 1.4.1.3 Radiação

Na transferência de calor por radiação entre as superfícies não é necessário nenhum meio para propagação, de fato, a transferência de energia por radiação é máxima quando as duas superfícies que estão trocando energia são separadas por um vácuo perfeito.

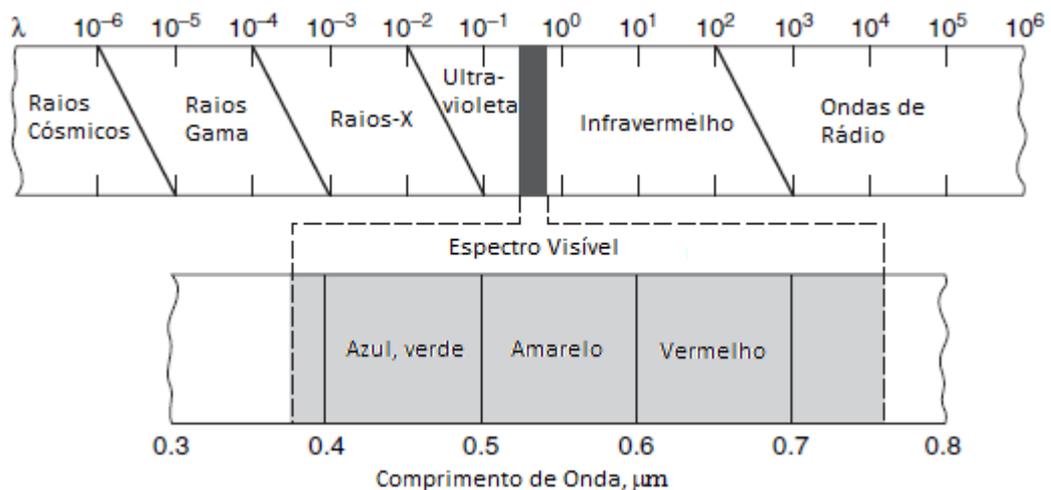
Experimentalmente foi demonstrado que a taxa de emissão de energia de um radiador perfeito ou corpo negro é dada pela Equação 1.3, conhecida como a equação de Stefan-Boltzmann (WELTY et al., 2008; BIRD et al., 2012).

$$\frac{q_r}{A} = \sigma T^4 \quad (1.3)$$

em que,  $q_r$  é a taxa de emissão de energia radiante [W],  $A$  é a área da superfície emissora [ $m^2$ ],  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann que é igual a  $5,676 \times 10^{-8}$  [ $W/m^2.K^4$ ] e  $T$  é a temperatura absoluta [K].

A radiação viaja à velocidade da luz, tendo propriedades de onda e propriedades parecidas com partículas. O espectro eletromagnético apresentado na Figura 1.1 ilustra a faixa de frequência e comprimento de onda sobre os quais a radiação ocorre.

Figura 1.1 - Espectro eletromagnético.



Fonte: Welty et al. (2008) (adaptado).

A relação entre a frequência da radiação e o comprimento de onda é dada pela velocidade da luz, expresso na Equação 1.4.

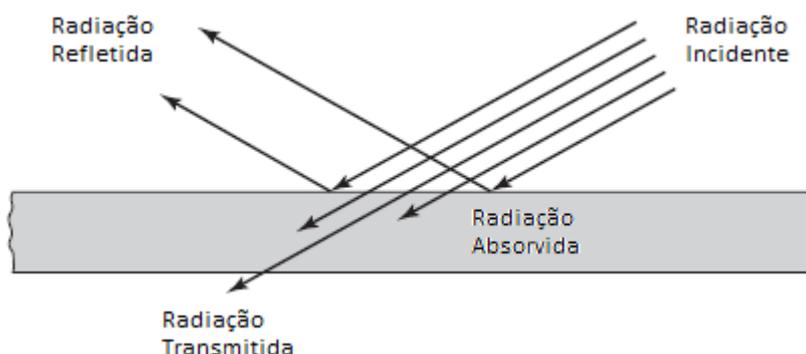
$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1.4)$$

em que,  $\lambda$  é o comprimento de onda [ $\mu m$ ],  $c$  é a velocidade da luz [m/s] e  $\nu$  é a frequência de radiação [ $s^{-1}$ ].

A radiação de comprimento de onda curto, como os raios gama e os raios X, está associada a energias muito altas e têm grande capacidade de penetração, já a radiação de comprimento de onda muito longo, como ondas de rádio, também pode passar através de sólidos; no entanto, a energia associada a essas ondas é muito menor do que a radiação de ondas curtas. Na faixa visível a radiação é considerada como tendo pouco poder de penetração, exceto em alguns líquidos, plásticos e vidros. Entre comprimentos de onda de 0,1 e 100  $\mu\text{m}$  a radiação é denominada radiação térmica, que inclui no espectro uma porção do ultravioleta e todas as regiões do infravermelho (INCROPERA, 2007).

A radiação térmica incidente numa superfície pode ser absorvida, transmitida ou refletida conforme apresentado na Figura 1.2.

Figura 1.2 - Fenômenos que ocorrem quando a radiação térmica incide numa superfície.



Fonte: Welty et al. (2008) (adaptado).

Se  $\rho$ ,  $\alpha$  e  $\tau$  são as frações da radiação incidente que são refletidas, absorvidas e transmitidas, respectivamente, então a Equação 1.5 pode ser escrita.

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (1.5)$$

em que  $\rho$  é chamado de refletividade,  $\alpha$  é chamado de absortividade e  $\tau$  é chamado de transmissividade (MCCABE et al., 1993).

Podem ocorrer dois tipos de reflexão, a especular e a difusa. Na reflexão especular, o ângulo de incidência da radiação é igual ao ângulo de reflexão. A maioria dos corpos não refletem de maneira especular, refletem a radiação em todas as direções. A reflexão difusa é, por vezes, comparada a uma situação em que a radiação térmica incidente é absorvida e, em seguida, reemitida da superfície, mantendo ainda o seu comprimento de onda inicial (WELTY et al., 2008).

A absorção da radiação térmica em sólidos ocorre em curtas distâncias, na ordem de 1  $\mu\text{m}$  nos condutores elétricos e em torno de 0,05 polegadas nos materiais não condutores, sendo a diferença causada pela diferente população de estados de energia nos condutores elétricos, que pode absorver energia em frequências de radiação térmica.

Para a maioria dos sólidos, a transmissividade é zero e, portanto, eles podem ser chamados de opacos à radiação térmica. A Equação 1.5, para um corpo opaco, torna-se a Equação 1.6.

$$\rho + \alpha = 1 \quad (1.6)$$

O corpo idealmente absorvente, para o qual  $\alpha = 1$  é chamado de corpo negro. Um corpo negro não reflete nem transmite qualquer radiação térmica. Este conceito é útil para a descrição de superfícies reais, uma vez que o corpo negro é uma superfície ideal que absorve toda a radiação incidente, independentemente do seu comprimento de onda e direção. Para uma dada temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro (INCROPERA et al., 2007).

#### 1.4.2 Fundamentos da secagem

Na secagem dos sólidos ocorrem dois processos simultâneos, a saber: transferência de calor para evaporar o líquido, normalmente no sentido da superfície do sólido para o seu interior e transferência de massa na forma de líquido ou vapor no interior do sólido e, na forma de vapor na superfície exposta do sólido. As condições que governam as velocidades destes processos determinam a velocidade de secagem. Para explicar a migração da umidade no sólido, alguns mecanismos devem ser analisados, tais como: difusão líquida, difusão de vapor em função de gradientes de pressão parcial de vapor, movimento do líquido em função de forças capilares e movimento do líquido ou vapor provocado por diferenças na pressão total (TADINI et al., 2016).

A obtenção dos dados experimentais nos processos de secagem se dá pelo registro da variação da massa do produto durante o tempo dos ensaios. Normalmente estas informações são apresentadas na forma de gráficos de variação de umidade em função do tempo e variação da taxa de secagem em função do tempo e/ou umidade. De acordo com a Equação 1.7, a umidade do produto em base seca é estabelecida pela razão entre a massa de água e a massa de sólidos secos (GEANKOPLIS et al., 2003).

$$X = \frac{M - M_s}{M_s} \quad (1.7)$$

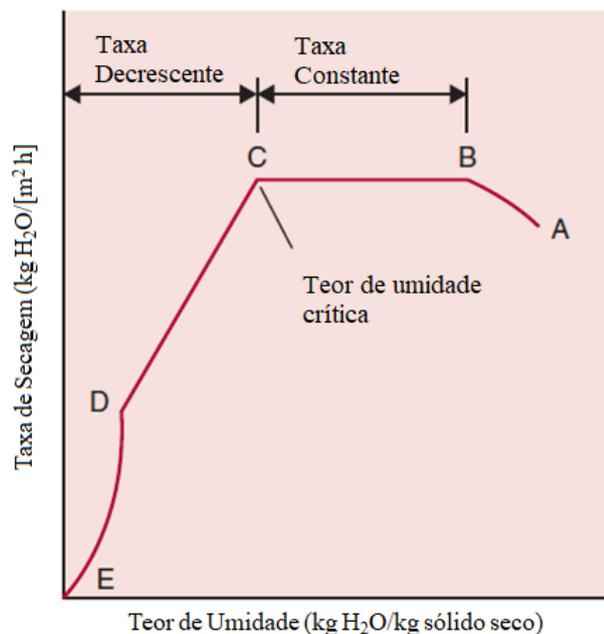
em que  $X$  é a umidade do produto em base seca [kg água/kg sólido seco],  $M$  é a massa do sólido úmido e  $M_s$  é a massa do sólido seco.

As curvas de secagem são construídas a partir dos dados de umidade em função do tempo e as taxas de secagem são obtidas a partir da derivada destas curvas fornecendo os valores de  $dX/dt$  para determinados tempos de secagem, de acordo com a Equação 1.8.

$$\dot{R}_s = -\frac{M_s}{A} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (1.8)$$

em que  $\dot{R}_s$  é a taxa de secagem [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ ],  $M_s$  é a massa de sólidos secos [kg],  $A$  é a área da superfície exposta ao ar de secagem [ $\text{m}^2$ ] e  $dX/dt$  é a velocidade de secagem em base seca [kg água/kg sól.seco.min]. A remoção de umidade de um produto alimentício típico seguirá uma série de diferentes períodos característicos de taxas de secagem, conforme apresentado na Figura 1.3.

Figura 1.3 - Curva típica da taxa de secagem.



Fonte: Singh; Heldman (2009) (adaptado).

No início do processo de secagem, trecho (AB), ocorre a fase de adaptação da temperatura em que, o produto e a água dentro do produto experimentam um leve aumento de temperatura, até atingir a temperatura de bulbo úmido do mesmo. Após os estágios iniciais de secagem, reduções significativas no teor de umidade ocorrem a taxa constante, demonstrado pelo trecho BC. O período de secagem constante ocorre com o produto na temperatura do bulbo úmido do ar. Na maioria das situações, o período de secagem com taxa constante

continua até que a umidade seja reduzida para umidade crítica. A partir da umidade crítica, a temperatura do sólido aumenta e a taxa de secagem passa a ser decrescente, sendo que um ou mais períodos de secagem com taxa decrescente (CE) ocorrem até que a umidade de equilíbrio seja alcançada (E). Este período é usualmente dividido em duas zonas de secagem, zona de superfície insaturada (CD) ou estado funicular e zona de controle de difusão interna de umidade (DE) ou estado pendular. A composição do material define a predominância destes períodos de secagem, sendo que a higroscopicidade do sólido é o fator principal que define a predominância de tais períodos (SINGH; HELDMAN, 2009; TADINI et al., 2016).

A equação que representa a taxa de transferência de calor total que chega à superfície do sólido por condução, convecção e radiação, expressa em W é dada pela Equação 1.9.

$$\dot{q} = \dot{q}_k + \dot{q}_c + \dot{q}_r \quad (1.9)$$

em que,  $\dot{q}_k$  é taxa de transferência de calor por condução através do sólido [W],  $\dot{q}_c$  é taxa de transferência de calor por convecção na superfície de evaporação do alimento [W] e  $\dot{q}_r$  é taxa de transferência de calor por radiação [W].

### 1.4.3 *Refractance window*

Os métodos de secagem frequentemente usados na indústria alimentícia para produzir alimentos em pós, grânulos, flocos, películas ou folhas a partir de material particulado, sucos, purês, pastas ou suspensões incluem leitos, tambor, esteira e secagem por atomização. Cada um desses métodos tem vantagens, bem como limitações que ditam a sua escolha para secar um determinado produto. A liofilização tem sido tradicionalmente considerada como o padrão de qualidade contra o qual outros sistemas de secagem são comparados em relação à qualidade dos produtos desidratados.

Recentemente o método de secagem *refractance window* (RW) tem ganhado destaque por preservar as características dos alimentos, utilizando temperaturas de secagem abaixo da temperatura de ebulição da água. Para a melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem durante a secagem, principalmente por RW, serão abordados os fundamentos dos processos de transferência de calor, os fundamentos da secagem, bem como os fundamentos do método de secagem por *refractance window*.

Na secagem por *refractance window*, as temperaturas do produto são mantidas baixas durante o período de taxa de secagem constante e a secagem ocorre a taxas de secagem mais elevadas quando os três modos de transferência de calor estão ativos. As aplicações desta metodologia não se limitam às indústrias alimentícias, também encontra aplicações nas indústrias farmacêutica, nutracêutica, cosmética e de manipulação de pigmentos. A secagem

por *refractance window* tem o potencial de produzir fatias, purês e sucos desidratados de alta qualidade. Pesquisas sugerem que compostos ativos aromáticos e pigmentos responsáveis pelas características sensoriais e nutricionais dos produtos podem ser preservados através desta técnica (RAGHAVI et al., 2018).

O método de desidratação *refractance window* (RW) foi patenteado por Richard Magoon (1986) e desenvolvido pela MCD Technologies, Inc. (Tacoma, Washington) com base em vários anos de pesquisa e desenvolvimento em técnicas de remoção de água. Além de sua capacidade de lidar com uma gama diversificada de produtos líquidos (ou pastosos), sua aplicação prática é transformar frutas, legumes, ervas e outros produtos relacionados em pós e concentrados de valor agregado. O método de secagem RW tornou-se atraente para aplicações na indústria de alimentos, especialmente porque os produtos secos são de alta qualidade e o equipamento é relativamente barato.

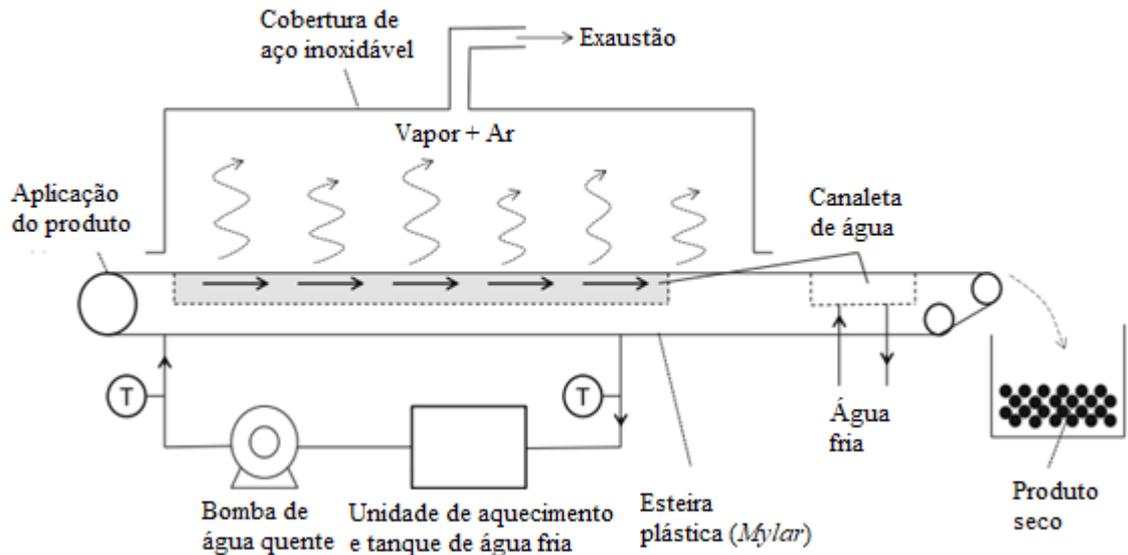
Os pós secos por RW são comparáveis em termos de qualidade aos pós obtidos por liofilização, sendo esta considerada a melhor metodologia de secagem para obtenção de pós de alta qualidade com relação à retenção de cor, teor de ácido ascórbico, compostos fenólicos totais e carotenoides (ABONYI et al., 2002; NINDO et al., 2003a; NINDO et al., 2003b; NAYAK et al., 2011; CAPARINO et al., 2012). Podem ser obtidos com custos mais baixos, maior eficiência energética e com tempos de secagem menores comparados à liofilização (NINDO et al., 2004; CELLI et al., 2016). De acordo com Nindo e Tang (2007), o secador por RW custa entre 30 e 50% do valor de um liofilizador e requer menos de 50% da energia necessária para secar a mesma quantidade de produto.

Atualmente, a tecnologia de secagem RW é usada para processar produtos tal como mistura de ovos mexidos; avocado para molhos; algas contendo elevado teor de carotenoides para tratamento da degeneração macular e câncer; extratos vegetais e suplementos nutricionais para uso humano; ingredientes alimentares como ervas, especiarias e legumes; e suplementos nutricionais para cultivo de camarão. Para uma secagem RW eficaz, as suspensões/pastas precisam ter a consistência certa para facilitar a aplicação e espalhamento uniforme. (BOLLAND, 2005).

Na secagem por RW a energia térmica da água quente é transferida para o material úmido depositado como película fina em um filme plástico que pode ser estacionário ou contínuo (esteira). Para o secador contínuo, a esteira se move em contato com a água quente e resulta numa secagem muito rápida. O produto seco é, então, removido do filme plástico utilizando uma lâmina que se estende na largura do filme.

O diagrama esquemático de um secador por *refractance window* é apresentado na Figura 1.4.

Figura 1.4 - Diagrama esquemático do secador RW industrial contínuo.



Fonte: Moses et al. (2014) adaptado de Nindo et al. (2003a).

A compreensão qualitativa do processo de secagem por RW é a seguinte: quando não há produto, a incompatibilidade do índice de refração entre a água e o ar é tão alta que a energia radiante incidente na interface água-plástico é refletida e muito pouco é transmitida para (ou perdida) o ar. Quando o produto a ser seco, contendo uma quantidade significativa (aproximadamente 90 %) de água, é colocado no filme plástico, a diferença do índice de refração entre a água e o alimento no sistema água-filme-alimento é muito reduzida. Os índices de refração tornam-se mais próximos, reduzindo a reflexão nessa interface e aumentando a transmissão da energia radiante no alimento. O material plástico utilizado é considerado um bom transmissor de radiação térmica (quase transparente à radiação térmica nos comprimentos de onda relevantes). A “janela” refrativa refere-se a essa permissão da passagem da radiação térmica através do material plástico quando um material molhado está em contato com ele, ou seja, como se o material plástico não estivesse presente, correspondendo à janela sendo aberta. Esta “janela” refrativa mencionada não fica aberta durante todo o processo de secagem. À medida que o material úmido seca, seu índice de refração aumenta criando uma incompatibilidade e, posteriormente, a maior parte da radiação térmica é refletida na água. Este é um mecanismo de autorregulação e permite que o produto seja seco suavemente durante o período de transição de uma extremidade da correia para a

outra. Isso evita a degradação do produto e mantém a qualidade do mesmo (ORTIZ-JEREZ et al., 2015).

A água exibe altas absorções e alta transmissividade à radiação infravermelha através de filmes *mylar*<sup>®</sup> em comprimentos de onda entre 3 e 8  $\mu\text{m}$  (SANDU, 1986). Segundo Nindo e Tang (2007), quando a amostra com elevada umidade é espalhada sobre o *Mylar*<sup>®</sup>, a refração na interface amostra-*Mylar*<sup>®</sup> é reduzida e a energia térmica radiante é mais facilmente transmitida do filme de poliéster para o produto. O trabalho publicado por Zotarelli et al. (2015) foi o primeiro a quantificar a contribuição da transferência de calor por radiação na secagem por RW, eles concluíram que a mesma pode ser desprezada, uma vez que, na secagem de polpa de manga, a parcela da energia utilizada no processo proveniente da transferência de calor por radiação da água aquecida foi menor que 3%. Ortiz-Jerez et al. (2015) verificaram que, no processo de secagem de polpa de abóbora por RW, 5% da energia utilizada no processo foi proveniente da transferência de calor por radiação da água aquecida através do filme *mylar*<sup>®</sup> verificando em seus estudos que o processo de secagem por RW é governado pela transferência de calor por condução. Desta forma, o processo de secagem por RW torna-se uma variação do método *cast-tape drying* que utiliza a água quente como fonte de calor. Assim, neste trabalho o método de secagem por *refractance window* será chamado de *cast-tape drying* (CTD) (SOUZA, 2015; DURIGON, 2016; FRABETTI, 2017).

A operação do equipamento de RW foi descrita por Clarke (2004) para uma planta comercial de secagem. A planta de RW é composta de módulos. Cada módulo tem aproximadamente 6 m de comprimento e 2,4 m de largura. Existe uma seção de aplicação do produto líquido, e uma seção de remoção de produto seco em cada extremidade da máquina. Módulos podem ser adicionados para aumentar a produtividade. O processo RW usa água quente para fornecer a fonte de calor para a desidratação. A água, para cada módulo, é continuamente recirculada e mantida a uma temperatura definida (o máximo é normalmente 95 °C, pois temperaturas mais altas criam bolhas de ar que interferem na transferência de energia através da correia) à medida que a energia térmica é transferida para o produto.

O produto a ser seco é pulverizado em espessuras de 0,2 a 1,0 mm em um filme na forma de correia transportadora sem fim, que abrange todo o equipamento, independentemente do número de módulos. O filme (feito de um material transparente de poliéster - *Mylar*<sup>®</sup>) literalmente flutua na superfície da água e se move a velocidades de até 3 m/min, dependendo do regime de secagem necessário. A radiação infravermelha da água é capaz de passar através do filme para o produto úmido e a água do produto é liberada no ar

acima do filme e removida pela circulação de ar acima do filme. À medida que o produto se move ao longo da correia, a quantidade de umidade diminui e o mesmo acontece com a transferência de calor da água por radiação. Na saída do secador, água de refrigeração é introduzida perto da extremidade da correia para reduzir a temperatura do pó. Isto não apenas limita ainda mais a degradação, mas também auxilia na remoção do pó da correia (CLARKE, 2004). Fotos do secador em escala industrial são apresentadas na Figura 1.5.

Figura 1.5 - Fotografias de (a) Secador RW em escala industrial (Modelo RWD5, MCD Technologies, EUA), (b) seção de alimentação do secador por via úmida e (c) seção de saída do produto seco.



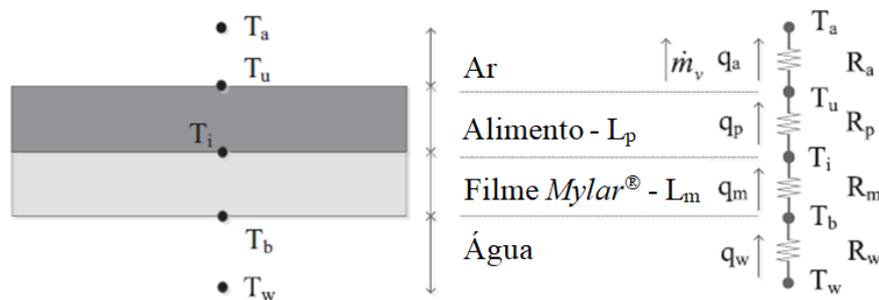
Fonte: Sabarez e Chessari (2006).

Os produtos podem ser secos com água aquecida na faixa de 25 a 95 °C. Quanto mais baixa a temperatura, mais lenta a taxa de secagem e, na maioria dos casos, menor a degradação do produto. Alguns estudos demonstraram que a temperatura da amostra permaneceu em torno de 70-75 °C quando a temperatura da água circulante foi de 95 °C e a variação das espessuras de espalhamento estiveram entre 1 e 3 mm (ABONYI et al., 2002; NINDO et al., 2003a; CAPARINO et al., 2012; PAVAN et al., 2012; CASTOLDI et al., 2015; ZOTARELLI et al., 2015). O tempo de secagem para alguns alimentos varia entre 2 e 6 minutos, dependendo da umidade do produto e da temperatura da água utilizada para secagem. Enquanto a maioria dos produtos alimentícios é seca em temperaturas entre 50 e 95 °C, a secagem por RW de preparações bioativas sensíveis ao calor ocorre a temperaturas tão

baixas quanto 30 °C, onde aspectos microbiológicos não são considerados (NINDO et al., 2003a, b; NINDO & TANG, 2007).

Durante o processo de desidratação por RW há a ocorrência dos mecanismos de transferência de calor por condução, convecção e radiação. Enquanto a condução, a convecção e a radiação ocorrem na interface água quente-filme, a condução e a radiação ocorrem através do filme e a convecção ocorre na interface ar-filme conforme apresentado na Figura 1.6 (ORTIZ-JEREZ et al., 2015; ZOTARELLI et al., 2015).

Figura 1.6 - Esquema representativo do circuito térmico no RW.



Em que,  $T_w$ ,  $T_b$ ,  $T_i$ ,  $T_u$  e  $T_a$  representam as temperaturas da água, da superfície inferior do *mylar*<sup>®</sup>, da interface *mylar*<sup>®</sup> – alimento, da superfície do alimento e do ar de secagem, respectivamente. As taxas de transferência de calor da água, do *mylar*<sup>®</sup>, do alimento e do ar são representadas por  $q_w$ ,  $q_m$ ,  $q_p$  e  $q_a$  respectivamente, e a taxa de água evaporada é representada por  $\dot{m}_v$ .  $L_m$  é a espessura do filme e  $L_p$  é a espessura do alimento.  $R_w$  é a resistência a transferência de calor convectivo entre a água e o *mylar*<sup>®</sup>,  $R_m$  é a resistência a transferência de calor através do *mylar*<sup>®</sup>,  $R_p$  é a resistência a transferência de calor através do alimento e  $R_a$  é a resistência a transferência de calor convectivo entre o alimento e o ar.

Fonte: Zotarelli et al., 2015 (adaptado).

O transporte de radiação térmica através do filme plástico pode ser estimado com base nas propriedades óticas do filme de poliéster (KRIMM, 1960). O filme *mylar*<sup>®</sup> (Dupont Teijin Films, USA) é o material mais bem sucedido para sistemas de secagem RW com condutividade térmica de 0,24 W/m.K, densidade de 1,39 g/cm<sup>3</sup> e calor específico de 0,28 Cal/g °C em condições ambientais (DuPont Teijin Filmes, 2003; OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2011; ORTIZ-JEREZ et al., 2015). Pequenas variações na espessura, composição química e procedimento de medição podem causar mudanças significativas nas propriedades óticas do filme *mylar*<sup>®</sup>.

Vários estudos utilizando a técnica de secagem por *refractance window* tem apresentado resultados importantes quanto à preservação das características dos alimentos: Caparino et al. (2012) secaram purê de manga e avaliaram a cor observando que o amarelo característico da manga foi melhor preservado em relação ao pó obtido por liofilização, também avaliaram a higroscopicidade do pó concluindo que não há diferença significativa entre a higroscopicidade dos pós obtidos por RW e por liofilização. El-Safy (2014) avaliou o conteúdo total de compostos fenólicos na secagem de fatias de nêspersas por RW e encontrou o valor de 328,24 mg/100 g na secagem a 90 °C, valor maior que os encontrados na secagem em forno de halogênio, solar e com ar quente. Baeghbali e Niakousari (2015) estudaram a secagem do suco de romã avaliando o conteúdo total de antocianinas e verificaram que a quantidade encontrada no pó obtido por RW é significativamente maior que o encontrado na secagem por atomização e por liofilização. Pavan (2010) desidratou suco de açaí por RW e avaliou a umidade e a atividade de água observando que os resultados encontrados para estas propriedades são ligeiramente maiores que os encontrados na secagem com ar quente em secador convectivo.

Recentemente, Tontul et al. (2018a, b), estudaram as propriedades funcionais das proteínas do grão-de-bico isoladas na secagem por RW, e também analisaram as propriedades físicas e microbiológicas dos pós de iogurte produzidos por RW. Azizi et al. (2016), investigaram a influência da secagem por RW nas propriedades qualitativas das fatias de kiwi. Rostami et al. (2018), avaliaram as propriedades físicas, reológicas, microbiológicas e organolépticas dos pós de carne produzidos na secagem por RW. Celli et al. (2016) pesquisaram a retenção de antocianinas e propriedades físico-químicas de *haskap berry* desidratada por RW e vários outros autores tem estudado a preservação das propriedades dos alimentos *in natura* nos pós obtidos pela secagem por RW, bem como comparado com os demais métodos de secagem e avaliado a eficiência energética desta tecnologia.

#### **1.4.4 *Cast-tape drying***

Na secagem por *cast-tape drying*, a remoção da umidade do alimento ocorre devido à energia térmica transferida por condução e convecção. A transferência de calor por condução acontece no suporte flexível, entre o suporte e o produto espalhado sobre o suporte e no interior do material a ser seco; a transferência de calor por convecção ocorre na superfície do material, entre o material e o ar de secagem, podendo ser natural ou forçada, e no interior do material por difusão. Neste processo ocorre a evaporação da água superficial ou interna no material (RAHMAN, 2007; ORTIZ-JEREZ et al., 2015).

É um processo alternativo para a secagem de polpas de frutas e vegetais, porque funciona em temperaturas moderadas, resultando em tempos de secagem relativamente pequenos. Além disso, esse processo proporciona altas taxas de secagem e capacidade evaporativa, permitindo a produção de filmes, flocos ou pós de frutas, após a moagem (DURIGON et al., 2017).

Durigon et al. (2017) verificaram na secagem de polpa de tomate que o filme de fibra de vidro revestido com *Teflon*<sup>®</sup> é um suporte adequado alternativo ao filme *mylar*<sup>®</sup>, devido à sua baixa energia superficial, evitando ou reduzindo problemas indesejáveis de aderência. Da mesma forma, concluíram que o vapor é uma opção à água quente como meio de aquecimento, pois permite um bom controle de temperatura e simplifica a construção do equipamento.

Nesse processo, a suspensão de alimentos é espalhada na face superior de um suporte flexível (filme de poliéster - *mylar*<sup>®</sup> - ou fibra de vidro revestida com *teflon*<sup>®</sup>), que é aquecida por um fluido quente (água quente ou vapor) em sua face inferior. Assim, durante a secagem, a energia para a evaporação pode ser fornecida por condução de calor (através do suporte e suspensão de alimentos) e convecção (do fluxo de ar sobre a suspensão). Desta forma, a secagem por *tape-casting* é uma alternativa para a secagem de alimentos sensíveis ao calor, como frutas, legumes e ervas. Como as temperaturas de secagem são moderadas (na faixa de 70-75 °C) e os tempos de secagem não são muito prolongados, parâmetros de qualidade como cor, retenção de vitaminas e antioxidantes são frequentemente observados, além disso, fornece altas taxas de secagem, alta eficiência energética e baixo custo (ABONYI et al., 2002; NINDO et al., 2003a; NINDO & TANG, 2007; CAPARINO et al., 2012; PAVAN et al., 2012; CASTOLDI et al., 2015; ZOTARELLI et al., 2015; DURIGON et al., 2016, 2017; FRABETTI, 2017).

### **1.5 Produção de alimentos em pó**

A alta perecibilidade dos alimentos frescos é um dos principais problemas que desafiam a produção de frutas e vegetais. A produção de pó é uma alternativa promissora para reduzir as despesas de embalagem, armazenamento e transporte, mas também para reduzir as perdas por causa da alta estabilidade do pó em comparação com a apresentação líquida. Neste sentido, a depender de operações de redução de tamanho, de separação pela dimensão e de secagem as quais são submetidos, e também em função da posterior aplicação, o pó ou material particulado, pode apresentar diferentes granulometrias, desde um material mais fino

até frações mais grossas, ou ainda, uma ampla distribuição de tamanho de partícula (CUQ et al., 2010).

Os pós produzidos, por diferentes métodos de secagem, podem ser preservados de meses a anos, dependendo do tipo de embalagem no qual são armazenados enquanto os extratos ou sucos de frutas e vegetais são preservados de semanas a meses (ESTEVE et al., 2005; WALKLING-RIBEIRO et al., 2009). Os produtos em pó oferecem conveniência e praticidade, estabilidade química e microbiológica e redução dos custos de transporte. Do ponto de vista do consumidor, a reconstituição rápida e completa dos produtos desidratados, sua aparência, bem como a preservação dos compostos e características dos produtos *in natura* são os principais indicadores de qualidade (FORNY et al., 2011).

De acordo com Cuq et al. (2010), os pós alimentares de matérias-primas agrícolas são geralmente obtidos por processos de fragmentação e separação (processos secos ou úmidos), associados a processos de estabilização (secagem). Para controlar as características funcionais dos pós, estes podem ser padronizados por redução de tamanho, peneiramento e mistura. O uso de ingredientes funcionais em pó na formulação de produtos alimentares pode ser explicado principalmente pelas características relacionadas com os seus usos: baixa atividade de água dos pós, baixo custo do transporte, facilidade no armazenamento, tipos de equipamentos de controle de dosagem dos pós e necessidade da etapa de reidratação e mistura com os demais elementos das receitas.

De maneira geral o objetivo principal da produção de alimentos em pó é sua reconstituição em um líquido para ser consumido como bebida ou a utilização do pó como ingrediente em receitas de produtos alimentares formulados para formar suspensões de uso industrial ou doméstico. A estabilidade dos alimentos em pó é muito sensível às variações do ambiente, podendo ocorrer processos indesejáveis, como colapso, *stickiness* (pegajosidade) e/ou *caking* (empedramento), durante a produção e estocagem. Assim, é de suma importância o conhecimento sobre os fatores que afetam a qualidade dos alimentos em pó para evitar que reações indesejadas ocorram, pois estes alimentos são estruturas complexas que estabelecem diferentes ligações entre suas partículas e o ambiente. Os quatro principais constituintes dos alimentos são água, lipídeos, carboidratos e proteínas, dentre estes a água é de especial interesse, uma vez que é a responsável pelas principais reações microbiológicas e bioquímicas nos alimentos (FORNY et al., 2011).

### 1.5.1 Atividade de água ( $a_w$ )

A atividade de água ( $a_w$ ) em alimentos é um conceito importante para explicar e/ou avaliar o desenvolvimento de microrganismos, que influenciam nas reações enzimáticas, oxidações de lipídeos, hidrólises e escurecimento não-enzimático. O conhecimento desta propriedade físico-química se dá pela medição da água livre no produto, uma vez que esta se encontra disponível para as reações microbiológicas, físicas, químicas e enzimáticas, tornando-se a principal responsável pela deterioração do produto. A deterioração, por sua vez, depende da atividade de água e da natureza das substâncias que compõe o alimento (TADINI et al., 2016).

A atividade de água em alimentos, uma propriedade termodinâmica, foi definida como a razão entre a pressão de vapor da água em equilíbrio no alimento e a pressão de vapor da água pura, medidas à mesma temperatura, conforme apresentado na Equação 1.10.

$$a_w = \frac{p_{v \text{ corpo}}}{p_s} \quad (1.10)$$

em que  $p_{v \text{ corpo}}$  é a pressão de vapor d'água do sólido e  $p_s$  é a pressão de vapor de saturação na sua temperatura.

Numericamente, a atividade de água varia de 0 a 1, sendo definida igual a 0 quando não existe água livre na amostra, porém se a mesma for totalmente constituída por água pura, a  $a_w$  será igual a 1 (BIAGI, 1993).

A perda da qualidade dos produtos começa a aumentar a partir de  $a_w > 0,3$  para a maioria das reações químicas e para a maioria dos alimentos secos. Um aumento da atividade de água na ordem de 0,1 reduz a vida de prateleira dos alimentos de duas a três vezes. O crescimento de bactérias é afetado em atividades de água abaixo de 0,9, enquanto que bolores e leveduras tem seu crescimento afetado abaixo de 0,8. Para todos os micro-organismos, de forma geral, o limite inferior para crescimento microbiano, é de  $a_w$  inferiores a 0,6 (RAHMAN, 2009).

### 1.5.2 Cor

A cor é um parâmetro sensorial amplamente utilizado para explicar a aceitação do consumidor aos produtos desidratados. Alguns dos frutos desidratados são extremamente duros, queimados, com sabor desagradável e sem gosto devido à secagem inadequada. A mudança de cor e a aparência física são propriedades importantes dos frutos desidratados e determinam o julgamento dos consumidores sobre a qualidade dos alimentos (CHONG et al., 2013; VITHU, MOSES, 2016).

A grande quantidade de açúcares redutores, como glicose, frutose e carboidratos determinam as mudanças de cor dos alimentos durante o processo de secagem. Estes açúcares redutores podem levar ao escurecimento não enzimático (reação de Maillard) através de sua reação com compostos amino durante a secagem (CORNWELL, WROSTAD, 1981). Outros fatores que afetam a cor durante o processamento térmico são a degradação de pigmentos, especialmente carotenoides e clorofila, pH, acidez, temperatura e duração do processamento, cultivar de frutas e contaminação por metais pesados (MASKAN, 2001).

A quantificação das diferenças de cor é representada por  $\Delta E$ , que relaciona os três parâmetros que definem a cor,  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ , onde  $L^*$  se refere à luminosidade podendo variar do preto ao branco,  $a^*$  é a medida do croma no eixo vermelho-verde e  $b^*$  é a medida do croma no eixo amarelo-azul (ABONYI et al., 2002). Quanto mais baixo for o valor de  $\Delta E$ , menores serão as alterações na cor da amostra e maior será o brilho do produto seco. Jafari et al. (2016) verificaram que, na maioria dos casos, produtos secos por RW apresentam menor  $\Delta E$  em comparação com outras técnicas de secagem.

Abonyi et al. (1999) concluíram que a degradação de cor dos produtos secos por RW eram mais comparáveis com os produtos secos por liofilização em comparação com amostras secas em secador de tambor e *spray dryer*. Em outro estudo, Abonyi et al. (2002) caracterizaram purês de morango e cenoura secos por RW e verificaram que as cores amarelo e vermelho são mais vivas e saturadas que nos produtos frescos ou secos por liofilização. Neste sentido, Nindo et al. (2003b) relataram que aspargos secos por RW tinham uma cor verde brilhante, sugerindo que a maioria dos pigmentos de clorofila ficaram retidos após o processo e as amostras ficaram mais verdes que as amostras secas em secador de bandejas, leito de jorro ou microondas combinado com leito de jorro. Caparino et al. (2012), na secagem de manga, verificaram que a metodologia de secagem interfere na cor do produto seco, as amostras secas por RW ficaram mais amarelas do que as secas por liofilização. Baeghbali e Niakousari (2015), na secagem de romã, verificaram também que as alterações de cor das amostras secas dependem da metodologia de secagem e que as amostras secas por RW apresentam menos alterações de cor comparadas as amostras secas por atomização.

Um estudo sobre o efeito da secagem por RW, liofilização, secagem em forno a ar quente e secagem convectiva natural nas características de cor da páprica mostrou que a páprica liofilizada e seca por RW apresentou melhores características de cor refletida e não houve diferença significativa no índice de escurecimento entre amostras liofilizadas e amostras secas por RW (TOPUZ et al., 2009).

A mudança de cor de um produto alimentício durante a secagem é uma indicação de quão severas são as condições de secagem e está relacionada à sua composição/concentração de pigmento. As menores alterações de cor nas amostras secas RW (comparadas com o método de secagem com ar quente) podem estar relacionadas a menor decomposição de carotenoides e/ou menor formação de pigmentos indesejáveis como resultado de condições de secagem moderadas (TOPUZ et al. 2009).

## 1.6 Referências

ABONYI, B. I. *et al.* Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window system. **Journal of Food Science**, v. 67, n. 2, p. 1051-1056, 2002.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb09452.x>

ABONYI, B. I., TANG, J., & EDWARDS, C. G. **Evaluation of energy efficiency and quality retention for the refractance window drying system**. Research Report Washington State University Pulmann WA. 1999.

AGRA, M. F. *et al.* Survey of Medicinal plants used in the region Northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 18, p. 472-508, 2008.  
<https://doi.org/10.1590/S0102-695X2008000300023>

AMORIM, M. M. R.; SANTOS, L. C. Tratamento da vaginose bacteriana com gel vaginal da aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi): ensaio clínico randomizado. **Revista Brasileira de Ginecologia e Obstetrícia**, Rio de Janeiro, RJ, v. 25, n. 2, p. 95-102, 2003.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-72032003000200004>

ANDRADE, Kátia Suzana. **Extração e microencapsulamento de extratos de interesse biológico provenientes de pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.) e de pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* R.)**. 2015. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2015.

ANVISA. AGENCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução da diretoria colegiada- RDC Nº 276, de 22 de setembro de 2015. Disponível em:  
<http://portal.anvisa.gov.br/legislacao#/visualizar/27641>. Acesso em: 02 abr. 2018.

ARAÚJO, A. D. A. *et al.* Production and spouted drying acerola juice bed containing oligosaccharides. **Food and Bioproducts Processing**, v. 9, p. 565-571, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2014.08.005>

ARAÚJO, J. M. A. **Química de Alimentos**. 5ed. Viçosa: Editora UFV. 2011. 601 p.

AZIZI, D. *et al.* The influence of refractance window drying on qualitative properties of kiwifruit slices. **International Journal of Food Engineering**, v. 13, 2016.

BAEGHBALI, V., NIAKOUSARI, M. Evaluation of a batch refractance window dryer in drying of some heat sensitive food stuff. Iran. **Journal of Food Science and Technology**, v. 13, p. 185-192, 2015.

BAGGIO, A. J. **Aroeira como potencial para usos múltiplos na propriedade rural.** Boletim de Pesquisa Florestal. Colombo, n. 17, p. 25-32, 1988.

BANDES, Banco de Desenvolvimento do Espírito Santo. Relatório da Administração referente ao 1º Semestre de 2008. 2008.

BENDAOUD, H. *et al.* Chemical composition and anticancer and antioxidant activities of *Schinus molle* L. and *Schinus terebinthifolius* Raddi berries essential oils. **Journal of Food Science**, v. 75, n. 6, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01711.x>

BERTOLDI, Michele Corrêa. **Atividade antioxidante in vitro da fração fenólica, das oleorresinas e do óleo essencial de pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* Raddi).** 2006. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2006.

BIAGI, J.; BERTOL, R. **Secagem de grãos.** Faculdade de Engenharia Agrícola. Unicamp, Campinas, 1993.

BIAVATTI, M. *et al.* Ethnopharmacognostic survey on botanical compendia for potential cosmeceutic species from Atlantic Forest. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 17, p. 640-653, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2007000400025>

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte.** 2ed, Capítulo 16, Editora LTC, 2012.

BOLLAND, K. President, MCD Technologies Inc. Personal communication. 2005.

BRAVO, L. Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism and nutritional significance. **Nutrition Reviews**. v. 56, p. 317-333, 1998. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.1998.tb01670.x>

CAMPOS, L. M. A. S. *et al.* Experimental data and modeling the supercritical fluid extraction of marigold (*Calendula officinalis*) oleoresin. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 34, p. 163-170, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2004.11.010>

CAPARINO, O.A. *et al.* Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (*Philippine 'Carabao'* var.) powder. **Journal of Food Engineering**. v. 111, p. 135-148, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.010>

CARVALHO, M.C.R.D. *et al.* Research Article Evaluation of mutagenic activity in a extract of pepper tree stem bark (*Schinus terebinthifolius* Raddi). **Environmental and Molecular Mutagenesis Journal**, v. 42, p. 185-191, 2003. <https://doi.org/10.1002/em.10183>

CASTOLDI, M. *et al.* Production of tomato powder by refractance window drying. **Drying Technology**, v. 33, n. 12, p. 1463-1473, 2015. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.989327>

CELLI, G.B. *et al.* Refractance Window™ drying of haskap berry-Preliminary results on anthocyanin retention and physicochemical properties. **Food Chemistry**, v. 194, p. 218-221, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.012>

- CHONG, C. H. *et al.* Colour, phenolic content and antioxidant capacity of some fruits dehydrated by a combination of different methods. **Food Chemistry**, v. 141, n. 4, p. 3889-3896, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.042>
- CHOU, S. K.; CHUA, K. J. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. **Trends in Food Science & Technology**, v. 12, p. 359-369, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00102-9](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00102-9)
- CLARKE, P., August. Refractance window TM-“Down under”. In: Drying proceedings of the **14th International Drying Symposium (IDS 2004)**, p. 22-25, Sao Paulo, Brazil, 2004.
- CLEMENTE, Alan Dumont. **Composição química e atividade biológica do óleo essencial da pimenta-rosa (*Schinus terebinthifolius* Raddi)**. 2006. 50 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2006.
- CORNWELL, C. J.; WROLSTAD, R. E. Causes of browning in pear juice concentrate during storage. **Journal of Food Science**, v. 46, p. 515–518, 1981. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb04899.x>
- COSTA, L. M. *et al.* Atividade antioxidante de pimentas do gênero Capsicum. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, SP v. 30, p. 51-59, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612009005000004>
- CUQ, B.; RONDET, E.; ABECASSIS, J. Food powders engineering, between knowhow and science: Constraints, stakes and opportunities. **Powder Technology**, v. 208, p. 244–251, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.08.012>
- DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O.R. **Química de Alimentos de Fennema**. Artmed, 4 ed. 900p. 2010.
- DANNEMBERG, G. S. *et al.* Antimicrobial and antioxidant activity of essential oil from pink pepper tree (*Schinus terebinthifolius* Raddi) in vitro and in cheese experimentally contaminated with *Listeria monocytogenes*. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 36, p. 120-127, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.009>
- DANNEMBERG, Guilherme Silva. **Óleo essencial de pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* Raddi): atividade antimicrobiana e aplicação como componente ativo em filme para bioconservação de alimentos**. 2017. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Pelotas, UFPel, Pelotas, 2017.
- DECKER, E. A. Strategies for manipulating the prooxidative/ antioxidant balance of food to maximize oxidative stability. **Trends in Food Science & Technology**, v. 9, p. 241-248, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(98\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(98)00045-4)
- DEGÁSPARI, C. H.; WASZCZYNSKYJ, N.; PRADO, M. R. M. Atividade antimicrobiana de *Schinus terebinthifolius* Raddi. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 3, p. 617-622, 2005.
- DIÓGENES, A. M. G. *et al.* Cinética de secagem de grãos de abóbora. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 26, n. 1, p. 71-80, 2013.

DORANTES-ALVAREZ, L. *et al.* Blanching peppers using microwaves. **Procedia Food Science**, v. 1, p. 178-183, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.028>

DOURADO, Massako Takahashi. **Óleos essenciais e oleoresina da pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* Raddi): propriedades químicas e biológicas**. 2012. 121 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Pelotas, UFPel, Pelotas, 2012.

DUARTE-ALMEIDA, J. M. *et al.* Avaliação da atividade antioxidante utilizando sistema  $\beta$ -caroteno/ácido linoleico e método de sequestro de radicais DPPH. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, SP, v. 26, p. 446-452, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612006000200031>

DUPONT. Mylar® polyester film. Disponível em: [http://usa.dupontteijinfilms.com/informationcenter/downloads/Physical\\_And\\_Thermal\\_Properties.pdf](http://usa.dupontteijinfilms.com/informationcenter/downloads/Physical_And_Thermal_Properties.pdf). Acesso em: 15 jan. 2018.

DURIGON, A. *et al.* Cast-tape drying of tomato juice for the production of powdered tomato. **Food and Bioproducts Processing**, v. 100, p. 145–155, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.06.019>

DURIGON, A. *et al.* Heat transfer and drying kinetics of tomato pulp processed by cast-tape drying. **Drying Technology**. v. 36, p. 160-168, 2017. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1304411>

EL-SAFY, F.S. Drying characteristics of loquat slices using different dehydration methods by comparative evaluation. **World Journal of Dairy & Food Science**, v. 9, p. 272-284, 2014.

ESTEVE. M. J. *et al.* Effect of storage period under variable conditions on the chemical and physical composition and colour of Spanish refrigerated orange juices. **Food and Chemical Toxicology**, v. 43, p. 1413-1422, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.03.016>

FAES; SENAR. **Informativo da Federação da Agricultura e Pecuária do Estado do Espírito Santo e Serviço Nacional de Aprendizagem Rural**. ano XIII, n. 212, 2009.

FENNER, R. *et al.* Plantas utilizadas na medicina popular brasileira com potencial atividade antifúngica. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 42, n. 3, p. 369-394, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1516-93322006000300007>

FORERO, D. P. *et al.* Chemical and sensory comparison of fresh and dried lulo (*Solanum quitoense* Lam.) fruit aroma. **Food Chemistry**, v. 169, p. 85-91, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.111>

FORNY, L.; MARABI, A.; PALZER, S. Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders. **Powder Technology**, v. 206, p. 72-78, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.07.022>

FOUST, Alan S.; WENZEL, Leonard A.; CLUMP, Curtis W.; MAUS, Louis; ANDERSEN, L. Bryce. **Princípios das operações unitárias**. Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ. 1980.

FRABETTI, Ana Caroline Cichella. **Produção e caracterização da polpa de goiaba (*Psidium guajava* L.) em pó por cast-tape drying**. 2017. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2017.

GARCIA, D. C. *et al.* A secagem de sementes. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS. v. 34, n. 2, p. 603-608, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000200045>

GAZETA Web, TV Gazeta Alagoas. **Projeto agrega valor e leva desenvolvimento para a Região do Baixo São Francisco**. 2017. Disponível em: <http://gazetaweb.globo.com/portal/especial.php?c=34000>. Acesso em: 28 out. 2018.

GEANKOPLIS, C. J. *Transport Processes and Separation Processes Principles*. 3ed, Capítulo 9, Prentice-Hall, 1993.

GUERRA, M. J. M. *et al.* Actividad antimicrobiana de un extracto fluido al 80% de *Schinus terebinthifolius* Raddi (copal) . **Revista Cubana de Plantas Medicinai**s, v. 5, p. 23- 25, 2000.

GOMES, F.S. *et al.* Antimicrobial lectin from *Schinus terebinthifolius* leaf. **Journal of Applied Microbiology**, v. 114, n. 3, p. 672-679, 2013. <https://doi.org/10.1111/jam.12086>

HOPIA, A; HEINONEM, M. Antioxidant activity of flavonol aglycones and their glycosides in methyl linoleate. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 76, p. 139-144, 1999. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0060-0>

INCAPER, Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Boas práticas de cultivo e colheita de pimenta-rosa são tema de pesquisa do Incaper**. 2016. Disponível em: <https://incaper.es.gov.br/Not%C3%ADcia/boas-praticas-de-cultivo-e-colheita-de-pimenta-rosa-sao-tema-de-pesquisa-do-incaper>. Acesso em: 31 out. 2017.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6ed, Capítulo 12, John Wiley & Sons, Inc, 2007.

JADHAV, S. J. *et al.* **Lipid oxidation in biological and foods systems**. In: Madhavi DL, Deshpande SS, Salunkhe DK, editores. *Food antioxidants: technological, toxicological and health perspectives*. New York: Marcel Dekker, p. 5-62, 1995.

JAFARI, S. M. *et al.* Comparing quality characteristics of oven-dried and refractance window-dried kiwifruits. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 40, p. 362-372, 2016. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12613>

JOHANN, S. *et al.* Inhibitory effect of extracts from Brazilian medicinal plants on the adhesion of *Candida albicans* to buccal epithelial cells. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 24, n. 11, p. 2459-2464, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11274-008-9768-5>

KAISTHA, K.K.; KIER, L.B. Structural studies on terebinthone from *Schinus terebinthifolius*. **Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 51, p. 245-248, 1962a. <https://doi.org/10.1002/jps.2600510313>

KAISTHA, K.K.; KIER, L.B. Structural studies on the triterpenes from *Schinus terebinthifolius*. **Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 51, p. 1136-1139, 1962b. <https://doi.org/10.1002/jps.2600511205>

KHAN, M. T. H. **Natural Products as Potential Resources for Antifungal Substances: A Survey**. Antifungal Metabolites from Plants. In: RAZZAGHI-ABYANEH, M.; MAHENDRA, R. Berlin: Springer. p. 157-165. 2013.

KRIMM, S. **Infrared spectra of high polymers**. Fortschritte der Hochpolymeren-Forschung. Springer, Berlin Heidelberg, p. 51-172, 1960. <https://doi.org/10.1007/BFb0050351>

LACA -BUENDIA, J. P.; BRANDÃO, M.; OLIVEIRA, L. M. da S. Utilização dos frutos de *Schinus terebinthifolius* Raddi. (Anacardiaceae) na substituição da pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.). **Daphne**, Belo Horizonte, MG, v. 2, n. 4, p. 34-36, 1992.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**. Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil. 3 ed. Nova Odessa Instituto Plantarum. v.1, 8p, 2000.

MACHADO, J.A. *et al.* In vitro evaluation of the antimicrobial potential association of *Schinus terebinthifolius* Raddi and *Syzygium aromaticum* L. **Journal of Pharmacy**, v. 2, n. 3, p. 438-443, 2012. <https://doi.org/10.9790/3013-0230438443>

MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried young coconut. **Drying Technology**, v. 21, n. 9, p. 1759-1780, 2003. <https://doi.org/10.1081/DRT-120025507>

MAGOON, R. E. Method and apparatus for drying fruit pulp and the like. **United States Patent**. Nº 4.631.837. 30.12.1986.

MASKAN, M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 169-175. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00154-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00154-0)

MAZZEO, T. *et al.* Impact of the industrial freezing process on selected vegetables - Part II. Colour and bioactive compounds. **Food Research International**, v. 75, p. 89-97, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.05.036>

MEDEIROS, K. C. P. *et al.* Effect of the activity of the Brazilian polyherbal formulation: *Eucalyptus globulus* Labill, *Peltodon radicans* Pohl and *Schinus terebinthifolius* Radd in inflammatory models. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 17, n. 1, p. 23-28. 2007. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2007000100006>

MCCABE, W. L., SMITH, J. C., HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5ed, Capítulo 14, Mc Graw-Hill International Editions, 1993.

MOSES, J. A. *et al.* Effect of microwave treatment on drying characteristics and quality parameters of thin layer drying of coconut. **Asian Journal of Food & Agro-industry**, v. 6, p. 72-85, 2013.

- MOSES, J. A. *et al.* Novel drying techniques for the food industry. **Food Engineering Reviews**, v. 6, p. 43-55, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9078-7>
- NACZK, M.; SHAHIDI, F. Extraction and analysis of phenolics in food. **Journal of Chromatography A**, v. 1054, p. 95-111, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(04\)01409-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(04)01409-8)
- NAMIKI, M. Antioxidants/antimutagens in food. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 29, p. 273-300, 1990. <https://doi.org/10.1080/10408399009527528>
- NAYAK, B. *et al.* Colored potatoes (*Solanum tuberosum* L.) dried for antioxidant-rich value-added foods. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 35, p. 571-580, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2010.00502.x>
- NEVES, E. J. M *et al.* Cultivo da aroeira-vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi) para produção de pimenta-rosa. Recurso eletrônico. Colombo, PR. Embrapa Florestas, 2016.
- NINDO, C.I. *et al.* Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 27, p. 117-136, 2003a. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2003.tb00506.x>
- NINDO, C. *et al.* Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). **LWT-Food Science and Technology**, v. 36, p. 507-516, 2003b. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(03\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(03)00046-X)
- NINDO, C.I. *et al.* Energy consumption during Refractance Window<sup>®</sup> evaporation of selected berry juices. **International Journal of Energy Research**, v. 28, p. 1089-1100, 2004. <https://doi.org/10.1002/er.1017>
- NINDO, C.I.; TANG, J. Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. **Drying Technology**, v. 25, p. 37-48, 2007. <https://doi.org/10.1080/07373930601152673>
- OCHOA-MARTINEZ, C. I. *et al.* Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window<sup>™</sup> technique. **Journal of Food Engineering**, v. 109, p. 69-75, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.032>
- OGISO, Y. *et al.* An antioxidant of dried chilli pepper maintained its activity through postharvest ripening for 18 months. **Bioscience, Biotechnololy, and Biochemistry**, v. 2, p. 3297-3300, 2008. <https://doi.org/10.1271/bbb.80464>
- OLMEDO, R.H.; NEPOTE, V.; GROSSO, N. R. Preservation of sensory and chemical properties in flavoured cheese prepared with cream cheese base using oregano and rosemary essential oils. **LWT-Food Science and Technology**, v. 53, p. 409-417, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.04.007>
- ORTIZ-JEREZ, M.J. *et al.* Quantitative understanding of refractance window<sup>™</sup> drying. **Food and Bioproducts Processing**. v. 95, p. 237-253, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.05.010>

PAIVA, P.M.G. *et al.* Antimicrobial activity of secondary metabolites and lectins from plants. *In: MENDEZ-VILLAS, A.* Current research, technology and education topics in applied microbiology and microbial biotechnology. Formatex Research Center: Espanha. p. 396-406, 2010.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção das isoterms de sorção e modelagem matemática para a pêra bartlett (*Pyrus* sp.) com e sem desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 73-77, 2001.  
<https://doi.org/10.1590/S0101-20612001000100016>

PAVAN, M.A. **Effects of Freeze Drying, Refractance Window Drying and Hot-air Drying on the Quality Parameters of Açaí** (Thesis submitted to University of Illinois at Urbana-Champaign). 2010.

PAVAN, M.A.; SCHMIDT, S.J.; FENG, H. Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air dried açaí (*Euterpe oleracea* Martius) juice. **LWT-Food Science and Technology**, v. 48, p. 75-81, 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.02.024>

PELEG, H.; BODINE, K. K.; NOBLE, A. C. The influence of acid on adstringency of alum and phenolic compounds. **Chemical Senses**, v. 23, p. 371-378, 1998.  
<https://doi.org/10.1093/chemsc/23.3.371>

PIETTA, P.G. Flavonoids as antioxidants. **Journal of Natural Products**, v. 63, n. 7, p. 1035-1042, 2000. <https://doi.org/10.1021/np9904509>

PIMENTEL, C. V. M. B.; FRANCKI, V. M.; GOLLÜCKE, A. P. B. **Alimentos funcionais: introdução às principais substâncias bioativas em alimentos**. São Paulo, Varela, 2005.

QUEIRES, L.C. *et al.* In vitro effects of polyphenols extracted from the aroeira plant (*Schinus terebinthifolius* Raddi) on the growth of prostate cancer cells (Lncap, Pc-3 and Du145). **Brazilian Journal of Medicine and Human Health**, v. 1, n. 1, p. 71-82, 2013.  
<https://doi.org/10.17267/2317-3386bjmhh.v1i1.114>

RAHMAN, M. S. **Food Properties Handbook**. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2 th ed., 861 p., 2009.

RAHMAN, M. S. **Handbook of Food Preservation**. CRC Press, Taylor and Francis Group, 1068 p., 2nd ed., 2007. <https://doi.org/10.1201/9781420017373>

RAGHAVI, L. M.; MOSES, J. A.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Refractance window drying of foods: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 222, p. 267-275, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.032>

RIBEIRO, Alessandra Casagrande. **Efeito da adição de óleo essencial de pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* Raddi) microencapsulado em queijo minas frescal**. 2015. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Alegre, 2015.

RICE-EVANS, C.; MILLER, N.J.; PAGANGA, G. Structure-antioxidant activity relationships of flavonoids and phenolic acids. **Free Radical Biology & Medicine**, New York. v. 20, n. 7, p. 933-956, 1996. [https://doi.org/10.1016/0891-5849\(95\)02227-9](https://doi.org/10.1016/0891-5849(95)02227-9)

ROSTAMI, H. *et al.* Evaluation of physical, rheological, microbial, and organoleptic properties of meat powder produced by Refractance Window drying. **Drying Technology**, v. 36, p. 1076-1085, 2018. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1377224>

SABAREZ, H.T.; CHESSARI, C. High quality fruit and vegetable ingredients for functional foods: modeling and optimisation of refractance window drying technology. Unpublished Report Prepared by CSIRO for Nutradry Pty Ltd, Brisbane, Australia, 2006.

SANDU, C. Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis. **Biotechnology Progress**, v. 2, p. 109-119, 1986. <https://doi.org/10.1002/btpr.5420020305>

SANTOS, A.C.A. *et al.* Efeito fungicida dos óleos essenciais de *Schinus molle* L. e *Schinus terebinthifolius* Raddi, Anacardiaceae, do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 20, n. 2. p. 154-159, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2010000200003>

SANTOS, M.R.A. *et al.* Composição química e atividade inseticida do óleo essencial de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae) sobre a broca-do-café (*Hypothenemus hampei*) Ferrari. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 15, n. 4, p. 757-762, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1516-05722013000500017>

SATUÉ-GARCIA, M.T.; HEINONEN, M.; FRANKEL, E.N. Anthocyanins as antioxidants on human lowdensity lipoprotein and lecithin-liposome systems. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v. 45, n. 9, p. 3362 – 3367, 1997. <https://doi.org/10.1021/jf970234a>

SHAHIDI, F.; JANITHA, P.K.; WANASUNDARA, P.D. Phenolic antioxidants. **Critical Reviews in Food Science Nutrition**, v. 32, p. 67-103, 1992. <https://doi.org/10.1080/10408399209527581>

SHAHIDI, F.; NACZK, M. Food phenolics: sources, chemistry, effects and applications. Lancaster: Technomic. 1995.

SILVA-LUZ, C.L.; PIRANI, J.R. *Anacardiaceae in. Lista de Espécies da Flora do Brasil.* Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB4401>. Acesso em: 11 nov. 2017.

SINGH, R.P.; HELDMAN, D.R. **Introduction to Food Engineering**. 4ed, Capítulo 12, Elsevier. 2009.

SOUZA, Paula Gimenez de. **Produção e caracterização de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) desidratado em pó por *cast-tape drying***. 2015. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2015.

TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; MEIRELES, A. J. A.; FILHO, P. A. P. **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**, 1ed,v. 2, Rio de Janeiro, Editora LTC, 2016.

TONON, R. V. *et al.* Water sorption and glass transition temperature of spray dried açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) juice. **Journal of Food Engineering**, v. 94, p. 215-221, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.03.009>

TONTUL, I. *et al.* Physical and microbiological properties of yoghurt powder produced by refractance window drying. **International Dairy Journal**, v. 85, p. 169-176, 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.06.002>

TONTUL, I. *et al.* A. Functional properties of chickpea protein isolates dried by refractance window drying. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 109, p. 1253-1259, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.135>

TOPUZ, A.; FENG, H.; KUSHAD, M. The effect of drying method and storage on color characteristics of paprika. **LWT-Food Science and Technology**, v. 42, p. 1667-1673, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.05.014>

TOTTI, L.C.; MEDEIROS, A.C.S. Maturação e época de colheita de sementes de aroeira-vermelha. Comunicado técnico 164, EMBRAPA. Colombo, PR. Dez. 2006.

VARELA-BARCA, F.N.T. *et al.* Base excision repair pathway is involved in the repair of lesions generated by flavonoid-enriched fractions of pepper tree (*Schinus terebinthifolius*) stem bark. **Environmental and Molecular Mutagenesis**, v. 48, n. 8, p. 672-681, 2007. <https://doi.org/10.1002/em.20334>

VITHU, P.; MOSES, J. A. Machine vision system for food grain quality evaluation: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 56, p. 13-20, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.011>

WALKLING-RIBEIRO, M. *et al.* Shelf-life and sensory evaluation of orange juice after exposure to thermo-sonication and pulsed electric fields. **Food and Bioproducts Processing**, v. 87, p. 102-107, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2008.08.001>

WELTY, J. R.; WICKS, C.E.; WILSON, R.E.; RORRER, G. L. **Fundamentals of momentum, heat and mass transfer**. 5ed. John Wiley & Sons, Inc. 2008.

XIAO, H. W. *et al.* Recent developments and trends in thermal blanching – A comprehensive review. **Information Processing in Agriculture**. v. 4, p. 101–127, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.02.001>

ZANOELO, E. F.; CELSO, G. M. D.; KASKANTZIS. Drying kinetics of mate leaves in a packed bed dryer. **Byosystems Engineering**, v. 96, n. 4, p. 487-494, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.12.006>

ZAREIN, M., SAMADI, S. H.; GHOBADIAN, B. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 14, p. 41-47, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.06.002>

ZOTARELLI, M. F.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. **Food Research International**, v. 69, p. 410–417, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.013>

ZOTARELLI, M. F. *et al.* Production of mango powder by spray drying and cast-tape drying. **Power Technology**, v. 305, p. 447–454, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.027>

## **2 PREPARO DOS FRUTOS DA PIMENTA ROSA PARA SECAGEM POR *CAST-TAPE DRYING***

Neste capítulo são apresentadas as metodologias de redução de tamanho e preparação das amostras para transformar os frutos de pimenta rosa em pasta para a secagem por *cast-tape drying*, bem como os testes preliminares de secagem, na unidade experimental em batelada montada no Laboratório de Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias do curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Patos de Minas.

### **2.1 Introdução**

O interesse das indústrias em novas tecnologias de secagem e conservação de alimentos advém da necessidade por processos ambiental e economicamente sustentáveis, da preservação das características nutricionais, funcionais e sensoriais alcançada nestas tecnologias, bem como da eficiência energética dos processos. A avaliação destes fatores é fundamental para a seleção da metodologia de secagem (MOSES et al., 2013, 2014).

Neste sentido, a secagem por *refractance window* (RW) é um recente método de secagem de alimentos (FORERO et al., 2015), incluindo purês (NINDO et al., 2003) e fatias de frutas e vegetais sensíveis ao calor (OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2011). Esta tecnologia é caracterizada por tempos de secagem reduzidos, entre 3 e 6 min e temperaturas do produto durante a secagem relativamente baixas, entre 30 e 70 °C, permitindo melhor retenção de cor, vitaminas e antioxidantes (NINDO & TANG, 2007; MOSES et al., 2014; BAEGHBALI et al., 2016).

Na secagem por *refractance window* (RW), a temperatura do produto aumenta após o período de taxa de secagem constante, podendo atingir valores acima de 80 °C (CASTOLDI, et al., 2015; ZOTARELLI et al., 2015; DURIGON, 2016; DURIGON et al., 2017; FRABETTI et al., 2018). O método tem potencial de produzir fatias, purês e sucos desidratados de alta qualidade. Zotarelli et al. (2015) e Ortiz-Jerez et al. (2015), verificaram em seus estudos que o processo de secagem por RW é governado principalmente pela transferência de calor por condução utilizando água como fonte de aquecimento do suporte. Desta forma, alguns pesquisadores passaram a nomear esse processo de secagem de *cast-tape drying* (CTD), ou seja, o princípio é o mesmo do RW, mas considera-se para esses autores que a maior contribuição energética seja da condução e não da radiação (ZOTARELLI et al., 2017; DURIGON et al., 2017).

O método de secagem por CTD é uma alternativa para secagem de polpas e vegetais e tem ganhado destaque por reter pigmentos e compostos aromáticos ativos responsáveis pelas características nutricionais e sensoriais dos alimentos, utilizando temperaturas de secagem abaixo da temperatura de ebulição da água e tempos de secagem relativamente curtos (RAGHAVI et al., 2018). Proporciona elevada taxa de secagem e capacidade evaporativa, permitindo a produção de filmes, flocos ou pós de frutas, após a moagem (DURIGON et al., 2017). Entretanto, Raghavi et al. (2018), verificaram que ainda existe uma compreensão limitada sobre os efeitos da secagem por CTD em diferentes tipos de alimentos.

Não foram encontradas publicações que descrevessem a secagem dos frutos de pimenta rosa por *cast-tape drying*, desta forma, o objetivo deste capítulo é estabelecer a metodologia de preparação das amostras de pimenta rosa para submetê-las à operação de secagem; e estudar a secagem dos frutos de pimenta rosa por *cast-tape drying*, avaliando a influência das variáveis de processo na cinética de secagem.

## 2.2 Material e Métodos

### 2.2.1 Coleta e armazenamento das amostras

As amostras dos frutos maduros de pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* R.) foram coletadas nos meses de janeiro, março e abril de 2018, de árvores adultas situadas em Patos de Minas-MG, conforme apresentado na Figura 2.1.

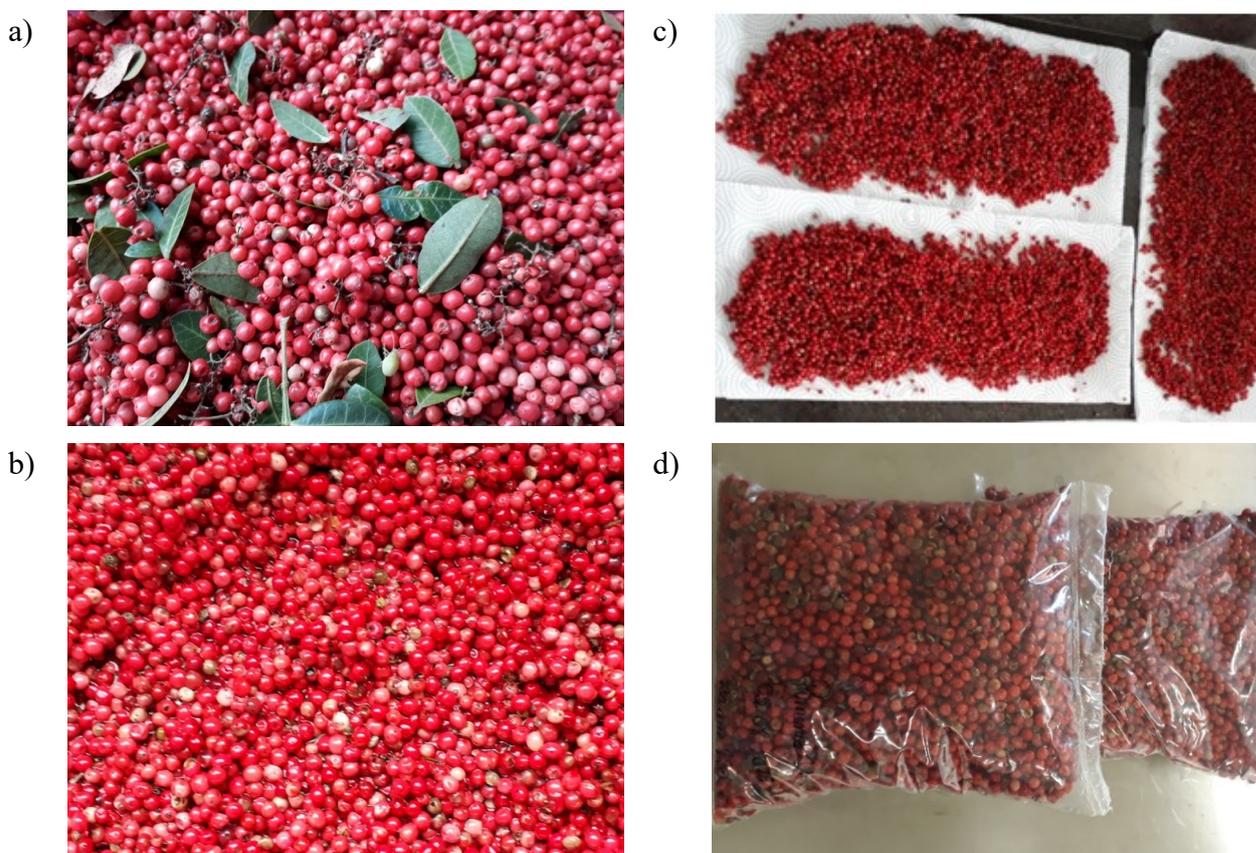
Figura 2.1 - Pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* Raddi) – Patos de Minas - MG.



Fonte: Autoria Própria

Após a colheita, os frutos foram limpos, removendo folhas, restos de galhos, poeira e demais sujidades presentes. Logo após as pimentas foram lavadas e secas com auxílio de papel toalha e então acondicionadas em embalagens de polietileno transparente, cada pacote contendo aproximadamente 200 g, e estocadas em ultrafreezer (Indrel, modelo IULT335D, Brasil) a temperatura de  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , conforme apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Fotografias das amostras de pimenta rosa: a) após a colheita, b) lavada, c) sobre papel toalha e d) embalada.



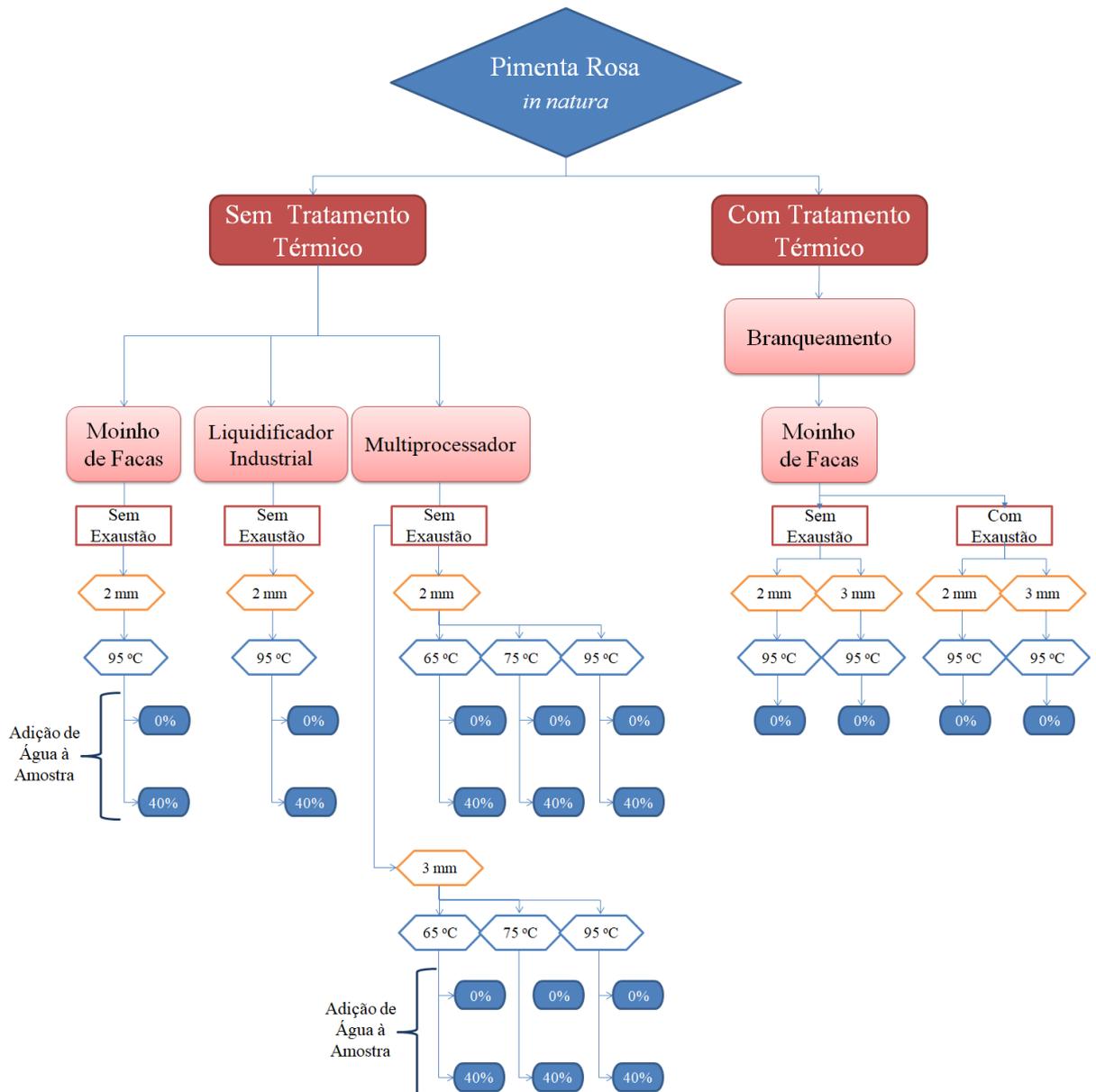
Fonte: Autoria Própria

### 2.2.2 Preparo das amostras

Em todos os experimentos as amostras congeladas dos frutos de pimenta rosa foram descongeladas em geladeira na temperatura entre  $6\text{ e }10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Consul, Brasil) durante 24 h.

As etapas realizadas para o preparo das amostras, redução de tamanho, bem como as condições de secagem por CTD estão esquematizadas na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Fluxograma dos experimentos realizados com a pimenta rosa.



Para as amostras sem tratamento térmico, avaliou-se o efeito da adição de água às amostras para facilitar a formação de uma pasta.

Para os experimentos realizados com tratamento térmico, as amostras foram branqueadas com a imersão da pimenta rosa em água quente à temperatura de  $90 \pm 2$  °C por 1 min e, logo após a imersão em água gelada à temperatura de  $10 \pm 2$  °C por 2 min.

### 2.2.3 Redução de tamanho da pimenta rosa

As metodologias de redução de tamanho dos frutos de pimenta rosa para obtenção da pimenta rosa desidratada avaliadas neste capítulo foram:

- (I) moagem em moinho de facas;
- (II) trituração em multiprocessador doméstico; e,
- (III) trituração em liquidificador industrial.

Na metodologia (I) moagem em moinho de facas, os frutos descongelados foram moídos em moinho de facas (Fortinox, modelo Star FC 50, Brasil) acoplado à uma peneira de 10 *mesh* na série Tyler. Na metodologia (II) os frutos descongelados foram triturados em multiprocessador doméstico (Arno, modelo Triton, Brasil). Já na metodologia (III), os frutos foram triturados em liquidificador industrial com capacidade de 2 L, alta rotação - 22.000 rpm (Camargo, Brasil). Em todas as metodologias as temperaturas das amostras foram medidas antes e após a redução de tamanho com termômetro de mercúrio escala -10 a 110 °C (Incotherm, Brasil).

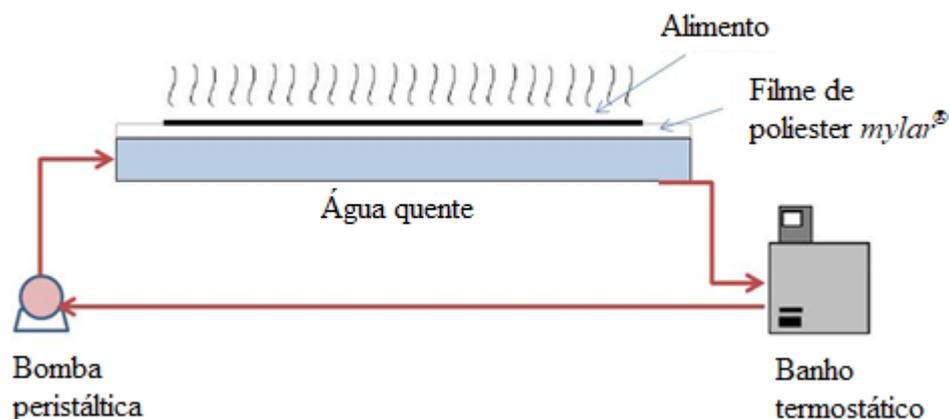
#### **2.2.4 Preparo dos frutos triturados de pimenta rosa para secagem**

Com o objetivo de obter uma pasta que proporcionasse o espalhamento de uma camada com espessura uniforme sobre o filme do equipamento, os frutos triturados de pimenta rosa, sem tratamento térmico, foram submetidos à diluição com água destilada, em testes preliminares, nos seguintes percentuais em peso: adição de 0 %, 30 %, 40 % e 50 % de água em relação à massa total de pimenta.

#### **2.2.5 Unidade experimental utilizada para a secagem por *cast-tape drying***

Para realização da secagem por *cast-tape drying* foi utilizado um equipamento operando em batelada montado no Laboratório de Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias do curso de Engenharia de Alimentos, da Faculdade de Engenharia Química, da Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Patos de Minas, utilizando o mesmo princípio do equipamento industrial. O equipamento utilizado está representado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Esquema da unidade experimental para secagem por *cast-tape drying*.



Fonte: Zotarelli et al. 2015 (adaptado)

A unidade experimental de secagem foi composta de um reservatório (bandeja de dimensões 0,7 m x 0,3 m x 0,05 m) na qual circulava água quente proveniente de um banho termostático (SOLAB, modelo SL 152/18, Brasil) associado a uma bomba peristáltica (Cole-Parmer, modelo Masterflex L/S 77250-62, USA). O filme polimérico, *mylar*<sup>®</sup> tipo "D" (Dupont, USA) de 0,25 mm de espessura, foi fixado no topo da bandeja de forma que a face inferior ficasse em contato com a água quente circulante e a face superior servisse de suporte para a pasta de pimenta rosa que foi seca. A espessura do filme *mylar*<sup>®</sup> foi escolhida de acordo com informações provenientes da literatura (NINDO et al., 2003a; ZOTARELLI et al., 2015). As amostras trituradas/moídas de pimenta rosa obtidas nas três metodologias de redução de tamanho e nas variações da quantidade de água adicionada foram espalhadas sobre o filme *mylar*<sup>®</sup> com auxílio de molduras retangulares de acrílico com as seguintes dimensões 0,34 m x 0,10 m e com duas espessuras 0,002 e 0,003 m.

### 2.2.6 Metodologia de determinação da cinética de secagem por *cast-tape drying*

A cinética de secagem dos frutos triturados de pimenta rosa por *cast-tape drying* foi determinada por meio da retirada de amostras em triplicata de pontos distintos da parte central da pasta espalhada sobre o filme *mylar*<sup>®</sup>. Para cada retirada, as amostras foram pesadas em balança analítica (Shimadzu do Brasil, modelo AUW320, Brasil) e a umidade foi determinada conforme metodologia A.O.A.C. (2005) descrita no item 2.2.8. As condições experimentais avaliadas para o processo de secagem foram: para as amostras sem tratamento térmico, temperatura da água circulante de 65 °C, 75 °C e 95 °C, espessura de espalhamento da pasta de 2 mm e 3 mm e adição de água na amostra, em testes preliminares, de 0, 30, 40 e 50 % em

peso. Para as amostras com tratamento térmico foram utilizadas as condições de temperatura da água circulante de 95 °C, espessura de espalhamento da pasta de 2 mm e 3 mm, sem adição de água e com exaustão do ar de secagem. As taxas de secagem, no período de taxa constante, foram calculadas a partir da inclinação da equação da reta obtida na regressão linear realizada com o *software* Statistica (Statsoft Inc., Tulsa, USA) nos dados experimentais de umidade da pimenta em pasta em função do tempo de secagem.

### 2.2.7 Medida de temperatura

Durante a secagem a medida de temperatura do filme *mylar*<sup>®</sup> foi realizada com o termômetro digital portátil infravermelho (Instrutherm, modelo TI-550, Brasil), com valor de emissividade de 0,95. Estas medidas foram tomadas na região central do filme *mylar*<sup>®</sup> da unidade experimental CTD sobre uma fita isolante preta conforme destacado na Figura 2.5. As medidas de temperatura ambiente e umidade relativa do ar foram realizadas com o termohigrômetro digital (Incoterm, modelo 7663.02.0.00, Brasil) com precisão da temperatura de  $\pm 1\%$  e com precisão da umidade relativa de  $\pm 5\%$ .

Figura 2.5 - Medida de temperatura do filme *mylar*<sup>®</sup>.



### 2.2.8 Determinação da umidade

A umidade das amostras foi determinada segundo a metodologia A.O.A.C. (2005). Em cadinhos de alumínio previamente aquecidos em estufa a 105 °C por 1 h, resfriados em dessecador até temperatura ambiente e com massa conhecida, as amostras foram coletadas e pesadas. Na sequência, os cadinhos de alumínio contendo as amostras foram colocados em estufa (Ethik Technology, modelo 400-TD, Brasil) a  $105 \pm 2$  °C por 24 h. Ao final das 24 h, as

amostras foram retiradas da estufa, colocadas em dessecador até atingirem a temperatura ambiente e pesadas em balança analítica (Shimadzu do Brasil, modelo AUW320, Brasil). A umidade das amostras, em base seca (b.s.), foi calculada de acordo com a Equação 1.7 apresentada no Capítulo 1.

$$X = \frac{M - M_s}{M_s} \quad (1.7)$$

em que X é a umidade do produto em base seca [kg água/kg sólido seco], M é a massa do sólido úmido e  $M_s$  é a massa do sólido seco. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

### 2.2.9 Determinação da cor

A cor foi avaliada por refletância com o colorímetro digital (CR400 – Minolta Company, Japão), com escala CIELab ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ). As análises foram realizadas em ambiente com temperatura controlada a 22 °C. As medidas de coloração foram expressas em termos da luminosidade  $L^*$  ( $L^*=0$  preto e  $L^*=100$  branco), e da cromaticidade definida por  $a^*$  (+60  $a^*$  = vermelho e - 60  $a^*$  = verde) e  $b^*$  (+ 60  $b^*$  = amarelo e - 60  $b^*$  = azul). Todas as análises foram realizadas em triplicata.

### 2.2.10 Determinação do diâmetro médio de Sauter

Para as amostras do produto seco provenientes das três metodologias de redução de tamanho, foi determinada a distribuição granulométrica e calculado o diâmetro médio de Sauter das partículas após a desaglomeração das mesmas em multiprocessador doméstico (Arno, modelo Triton, Brasil). Desta forma, amostras de 15 g foram pesadas em balança analítica e colocadas sobre um jogo de peneiras previamente pesadas, de malhas, *mesh* Tyler 10, 14, 16, 20, 28, 32, 42, 48, 60, 65, 80, 100, 115 e 150, com fundo (peneira "cega") e tampa. As peneiras foram colocadas sobre agitador vibratório (Haver & Boecker, modelo Haver EML Digital Plus, Alemanha), durante 10 min sob amplitude de vibração de 1,5 mm. Ao final do tempo as peneiras e o fundo foram cuidadosamente pesados para verificar a quantidade de pó retido em cada um deles. O diâmetro médio de Sauter foi calculado a partir das frações mássicas de pó retidas em cada peneira através da Equação 2.2.

$$\bar{D} = 1 / \sum_i \frac{\Delta x_i}{D_i} \quad (2.2)$$

em que  $\bar{D}$  é o diâmetro médio de Sauter,  $\Delta x_i$  é a fração em massa retida em cada faixa e  $D_i$  é o diâmetro médio em cada faixa da distribuição (CREMASCO, 2012; PEÇANHA, 2014). Todas as análises foram realizadas em triplicata.

## 2.3 Resultados e Discussão

### 2.3.1 Redução de tamanho dos frutos de pimenta rosa

Os resultados de temperatura das amostras antes e após a redução de tamanho e umidade de bulbo seco após a redução de tamanho, de acordo com a metodologia utilizada, são apresentados na Tabela 2.1.

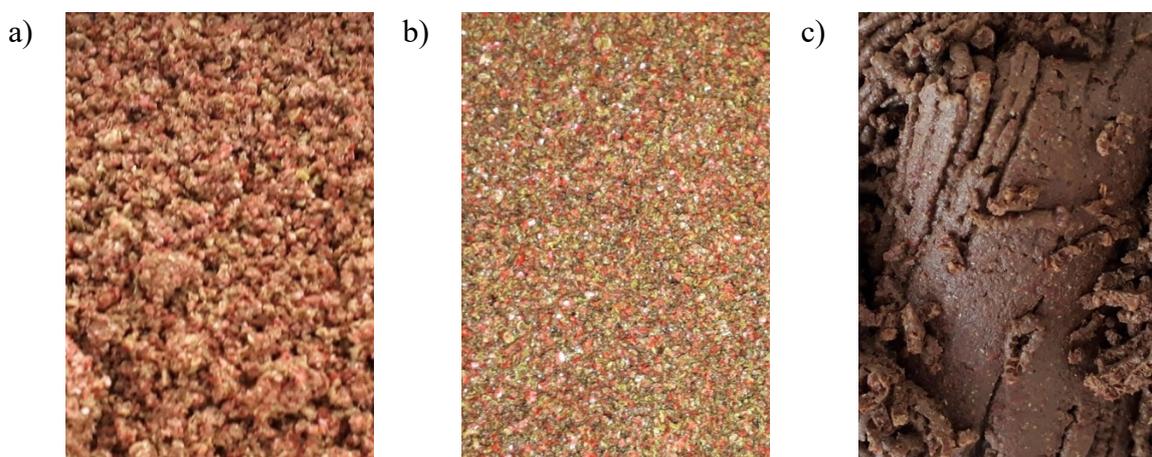
Tabela 2.1 - Variação de temperatura e umidade final das amostras de pimenta rosa de acordo com a metodologia de redução de tamanho.

<b>Pré-tratamento</b>	<b>Equipamento utilizado para redução de tamanho</b>	<b>Temperatura da amostra antes da redução de tamanho (°C)</b>	<b>Temperatura da amostra após a redução de tamanho (°C)</b>	<b>Umidade da amostra (g /g b.s.) Média ± DP</b>
Sem branqueamento	Liquidificador Industrial	24	33	0,522 ± 0,010
	Moinho de Facas	24	39	0,454 ± 0,006
	Multiprocessador	24	29	0,595 ± 0,009

De acordo com os resultados da Tabela 2.1 foi possível verificar que para as amostras sem branqueamento, a redução de tamanho no multiprocessador foi a metodologia que mais preservou a umidade da amostra e, foi também a que apresentou a menor elevação de temperatura da amostra durante a etapa de redução de tamanho. Foi possível verificar também o aumento da temperatura da amostra após a redução de tamanho em moinho de facas, bem como a redução na umidade, observada qualitativamente no momento da moagem pela formação de névoa na saída do moinho, alterando as características de cor e umidade iniciais da amostra.

As alterações na umidade das amostras provavelmente se devem à remoção mecânica de água, uma vez que ocorre a prensagem do material no interior do equipamento e ao início do processo de desidratação da amostra devido à variação da temperatura da mesma. O escurecimento da amostra após a redução de tamanho em moinho de facas pode ser observado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Fotografias das amostras de pimenta rosa sem branqueamento após a redução de tamanho em a) multiprocessador, b) liquidificador industrial, c) moinho de facas.



As alterações de cor percebidas, provavelmente, se devem ao escurecimento enzimático que inicia em resposta aos danos físicos e fisiológicos provocados pelos impactos e abrasões na etapa de moagem como resultado da oxidação de compostos fenólicos presentes na pimenta rosa. O escurecimento enzimático é causado principalmente pela ação da enzima polifenol oxidase (PPO) na presença do oxigênio atmosférico (DORANTES-ALVAREZ et al., 2011).

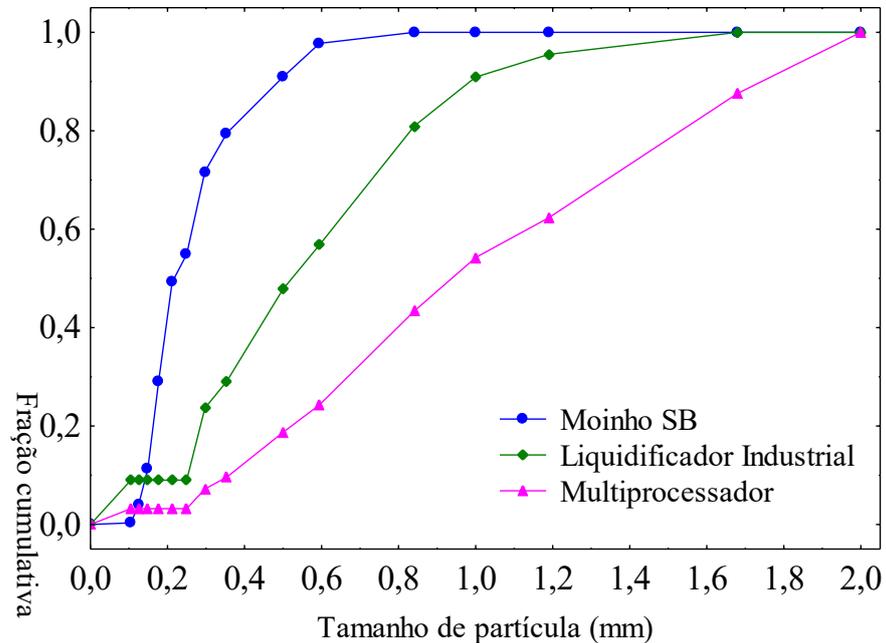
### 2.3.2 Distribuição granulométrica da pasta triturada e cinéticas de secagem

Na Tabela 2.2 estão apresentados os resultados para o diâmetro de Sauter das amostras trituradas nas três metodologias e na Figura 2.7 está apresentada a distribuição granulométrica destas amostras.

Tabela 2.2 - Diâmetro médio de Sauter das amostras.

<b>Pré-tratamento</b>	<b>Equipamento utilizado para redução de tamanho</b>	<b>Diâmetro médio de Sauter (mm) Média ± DP</b>
Sem branqueamento	Liquidificador Industrial	0,0200 ± 0,0003
	Moinho de Facas	0,0144 ± 0,0004
	Multiprocessador	0,0290 ± 0,0005

Figura 2.7 – Distribuição granulométrica das amostras de pimenta rosa após secagem por CTD.



A distribuição cumulativa apresentada na Figura 2.7, mostra que a amostra obtida no multiprocessador é mais heterogênea no que diz respeito à tamanho de partícula, isto é, apresenta uma distribuição granulométrica mais ampla, resultando também em maior tamanho médio de partícula. Já as amostras submetidas ao moinho de facas apresentaram uma redução de tamanho mais uniforme com uma distribuição granulométrica numa faixa mais estreita, apresentando menor tamanho de partícula.

O valor do diâmetro médio de Sauter confirma o resultado indicado pela distribuição cumulativa, isto é, a amostra com redução de tamanho no multiprocessador é mais grossa e a amostra com redução de tamanho no moinho de facas mais fina.

Entre os motivos para que no multiprocessador e no liquidificador a amostra seja mais heterogênea e com maior tamanho, possivelmente, foi o fato de que durante a operação as partículas são lançadas à parede do equipamento e devido à baixa elasticidade do choque dessas partículas (pouco densas) com a parede e sua dificuldade de deslizamento na parede, as mesmas tendem a se concentrar na região próxima à parede, diminuindo seu contato com o meio cortante, bem como as diferenças na construção dos equipamentos utilizados, conjunto e posição das facas; ao número de facas; as dimensões das câmaras de trituração/moagem; e à posição da amostra no interior dos equipamentos.

Embora a amostra triturada obtida pela redução de tamanho em multiprocessador seja mais heterogênea em relação ao tamanho de partícula, a metodologia que melhor preservou a umidade dos frutos *in natura* e que apresentou a menor elevação de temperatura da amostra durante a etapa de redução de tamanho foi a trituração em multiprocessador doméstico. Nestas condições, para que fosse atingida a consistência de pasta que permitisse o espalhamento foi necessária a adição de água às amostras após a redução de tamanho.

### 2.3.3 Preparo dos frutos triturados de pimenta rosa para secagem

No que diz respeito à adição de água às amostras trituradas dos frutos de pimenta rosa, foi observado nos testes preliminares, pela homogeneidade da amostra, que a adição de 30 % em peso de água não foi suficiente para a obtenção da pasta e que a adição de 50 % em peso de água comprometeu o espalhamento da amostra sobre o filme *mylar*<sup>®</sup> devido ao seu escoamento durante o nivelamento da pasta na moldura de acrílico como pode ser observado na Figura 2.8. Desta forma, no que diz respeito ao espalhamento, a quantidade adequada de água destilada adicionada na amostra foi de 40 % em peso, pois em relação às demais proporções, conduziu a uma pasta com consistência e escoabilidade operacionais mais satisfatórias. Por isso essa concentração foi eleita para a utilização em todos os experimentos posteriores.

Figura 2.8 - Fotografias da amostra de pimenta rosa triturada em multiprocessador adicionada de a) 30% de água, b) 40% de água e c) 50% de água.

a) 30 % de água



b) 40 % de água



c) 50 % de água



Na Tabela 2.3 são apresentadas as umidades iniciais das amostras adicionadas de 0 %, 30 %, 40 % e 50 % em peso de água.

Tabela 2.3 - Umidades iniciais das amostras após a adição de água.

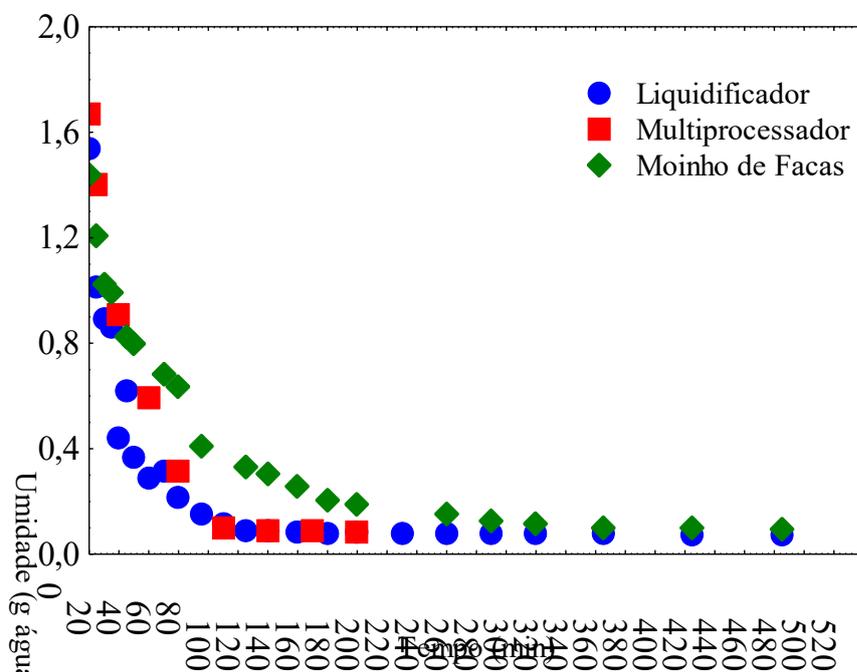
Quantidade de água adicionada (% em peso)	Metodologia de Redução de Tamanho	Umidade da amostra (g /g b.s.) Média ± DP
0	Liquidificador Industrial	0,522 ± 0,010
40		1,538 ± 0,037
50		1,986 ± 0,034
0	Moinho de Facas	0,454 ± 0,006
40		1,442 ± 0,029
0	Multiprocessador	0,595 ± 0,009
30		1,335 ± 0,117
40		1,647 ± 0,031
50		2,123 ± 0,060

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2.3 foi possível ratificar os resultados encontrados para umidade inicial das amostras após a redução de tamanho apresentados na Tabela 2.1, demonstrando que a metodologia de redução de tamanho interferiu na umidade inicial das amostras e a adição de água às mesmas manteve estas interferências.

#### 2.3.4 Testes preliminares de secagem

A partir dos testes preliminares de adição de água, a secagem por CTD foi realizada para as amostras produzidas pelas três metodologias de redução de tamanho. Na Figura 2.9 estão apresentadas as curvas de secagem das amostras de pimenta rosa, moída em moinho de facas, triturada em liquidificador industrial e triturada em multiprocessador doméstico, secas por CTD à temperatura de 95 °C (água circulante), espessura da pasta dos frutos de 2 mm e com adição de 40 % em peso de água.

Figura 2.9 - Curvas de secagem da pimenta rosa sem branqueamento submetidas à secagem por *cast-tape drying* a 95 °C, 2 mm de espessura e 40 % de água em peso na amostra.



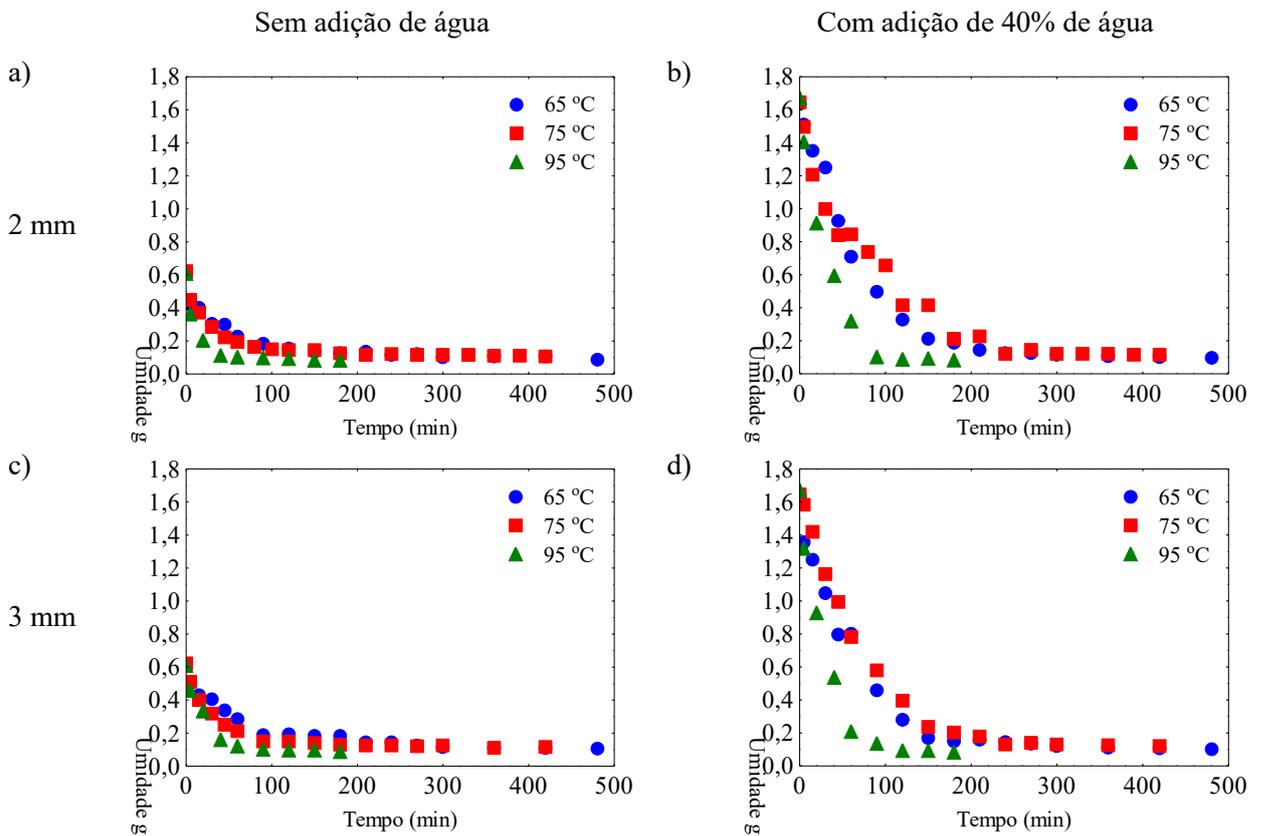
Analisando na Figura 2.9, as curvas de secagem das amostras submetidas aos diferentes métodos de redução de tamanho sem pré-tratamento, foi possível verificar que o tempo de secagem para atingir a umidade de equilíbrio da amostra moída em moinho de facas foi maior que das outras metodologias de redução de tamanho, o que indica que a homogeneidade e o menor tamanho de partícula da amostra interferiram na cinética de secagem, cerca de 200 min maior. Nos experimentos para a determinação da cinética foi possível observar que para a amostra moída em moinho de facas, a parte inferior da amostra em contato com o filme *mylar*<sup>®</sup> apresentou aspecto mais compacto, com menor friabilidade e maior dureza que os demais que, por sua vez, têm características mecânicas com tendência de esfrelamento (mais friáveis), indicando que esta formação compacta interferiu no fluxo de calor e massa para a superfície do sólido durante a secagem, justificando o maior tempo de secagem.

Assim, para a sequência de testes de secagem nas condições de temperatura da água circulante e espessura de espalhamento da amostra selecionadas nesta etapa dos estudos, a metodologia de redução de tamanho selecionada foi trituração em multiprocessador doméstico com adição de água destilada à amostra de 40 % em peso comparado às amostras sem adição de água.

### 2.3.5 Curvas de Secagem

As curvas de secagem para a pasta dos frutos de pimenta rosa nas temperaturas da água circulante de 65 °C, 75 °C e 95 °C, nas espessuras de amostra de 2 mm e 3 mm, sem adição de água e com adição de 40% em peso de água, para as amostras trituradas em multiprocessador, estão apresentadas na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Curvas de secagem dos frutos de pimenta rosa moídos em multiprocessador em função da espessura da camada espalhada e da adição de água com variação da temperatura nas seguintes condições: a) 2 mm de espessura sem adição de água na amostra, b) 2 mm de espessura e adição de 40% em peso de água na amostra, c) 3 mm de espessura sem adição de água na amostra, d) 3 mm de espessura e adição de 40% em peso de água na amostra.



A partir dos resultados apresentados, verificou-se que o aumento da temperatura da água circulante contribuiu de forma significativa para a redução do tempo de secagem, principalmente para a pasta de pimenta rosa sem adição de água com 2 mm de espessura, combinação mais favorável. Nesta condição, ao final do período de taxa de secagem constante, umidades menores que 0,12 g água/g sólido seco foram alcançadas com 240, 210 e 40 min para as amostras secas a temperatura da água circulante de 65 °C, 75 °C e 95 °C,

respectivamente. Já para as amostras com adição de 40 % de água em peso e com espessura de espalhamento de 2 mm, ao final do período de taxa de secagem constante, umidades menores que 0,12 g água/g sólido seco foram alcançadas com 300, 300 e 90 min para as amostras secas a temperatura da água circulante de 65 °C, 75 °C e 95 °C respectivamente. Estes resultados demonstram redução de mais de 80 % no tempo de secagem quando a temperatura é elevada de 75 °C para 95 °C nas amostras espalhadas com 2 mm de espessura sem adição de água e uma redução de mais de 70% quando adicionou-se 40% de água. Estes resultados também podem ser verificados pelas taxas de secagem observadas no período de taxa de secagem constante conforme apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Taxa de secagem da pasta dos frutos de pimenta rosa das amostras trituradas em multiprocessador.

Temperatura da água circulante (°C)	Espessura da pasta (mm)	Quantidade de água adicionada à pasta (%)	Taxa de secagem (g água/ g sól. seco.min)
65,0	2	0	0,0015 ± 0,0003
		40	0,0050 ± 0,0007
	3	0	0,0013 ± 0,0002
		40	0,0039 ± 0,0006
75,0	2	0	0,0018 ± 0,0004
		40	0,0046 ± 0,0005
	3	0	0,0014 ± 0,0003
		40	0,0043 ± 0,0006
95,0	2	0	0,0109 ± 0,0037
		40	0,0169 ± 0,0026
	3	0	0,0053 ± 0,0013
		40	0,0125 ± 0,0026

Também é interessante destacar o efeito da umidade incorporada às amostras, pela adição de água, no tempo de secagem. Conforme pode ser observado na Tabela 2.3 a umidade das amostras processadas em multiprocessador sem adição de água e com a adição de 40% resultou em um aumento de aproximadamente 63% na umidade nas últimas, e o tempo de secagem dessas amostras aumentou cerca de 20%, 30% e 55% quando submetidas a secagem em 65, 75 e 95°C, respectivamente, em relação as que não foram adicionadas água para a formação da pasta. Ou seja, a incorporação de água às amostras interferiu também no tempo

de secagem quando submetidas às maiores temperaturas, embora nesta condição, as taxas de secagem das amostras adicionadas de 40% de água em peso, foram maiores que as taxas de secagem das amostras que não receberam a adição de água.

Para a pasta de pimenta rosa sem adição de água espalhada sobre o filme polimérico com 3 mm de espessura, verificou-se também que o aumento da temperatura da água circulante contribuiu de forma significativa para a redução do tempo de secagem. Nesta condição, ao final da taxa de secagem constante, umidades inferiores a 0,12 g água/g sólido seco foram alcançadas com 300, 270 e 90 min para as amostras secas a temperatura da água circulante de 65 °C, 75 °C e 95 °C, respectivamente. Já para a pasta com adição de 40 % de água em peso e com 3 mm de espessura, ao final da taxa de secagem constante, umidades menores que 0,12 g água/g sólido seco foram alcançadas com 360, 360 e 120 min para as amostras secas a temperatura de 65 °C, 75 °C e 95 °C respectivamente. Estes resultados demonstram redução de mais de 60 % no tempo de secagem quando a temperatura é elevada de 75 °C para 95 °C para as amostras espalhadas com 3 mm de espessura sem adição de água.

Este comportamento pode ser justificado devido à maior diferença de temperatura entre a amostra e o ar próximo à superfície da amostra para as maiores temperaturas de secagem, havendo maior transferência de calor nesta condição, reduzindo o tempo de secagem.

Da mesma forma, foi verificado que a variação da espessura de espalhamento, nas condições dos experimentos, interferiu na cinética da secagem deste material, na secagem por CTD. O tempo de secagem para a espessura de espalhamento de 2 mm foi menor porque o caminho para a migração de umidade desde o interior até a superfície, para então se transferir para o ambiente externo, também foi menor, ou seja, menor a resistência à transferência de massa.

A partir dos resultados apresentados, verificou-se, ainda, que a adição de água à amostra, interferiu na cinética da secagem deste material, principalmente no período de taxa constante de secagem em todas as temperaturas e espessuras avaliadas nos experimentos. Este comportamento pode ser justificado devido à maior quantidade de água a ser evaporada nas amostras adicionadas de 40 % de água (em peso) em relação às amostras sem adição de água.

Ainda, com os dados apresentados na Tabela 2.4 foi possível verificar que a temperatura da água circulante, espessura da pasta e quantidade de água adicionada influenciaram na taxa de secagem. Entre estas variáveis, a temperatura da água circulante foi a de maior relevância. De forma geral, para mesma temperatura e quantidade de água adicionada, quando a espessura da pasta foi aumentada de 2 mm para 3 mm, as taxas de

secagem sofreram redução entre 10 e 50 % para as temperaturas entre 65 °C e 95 °C respectivamente, sendo as maiores reduções observadas nas temperaturas mais elevadas.

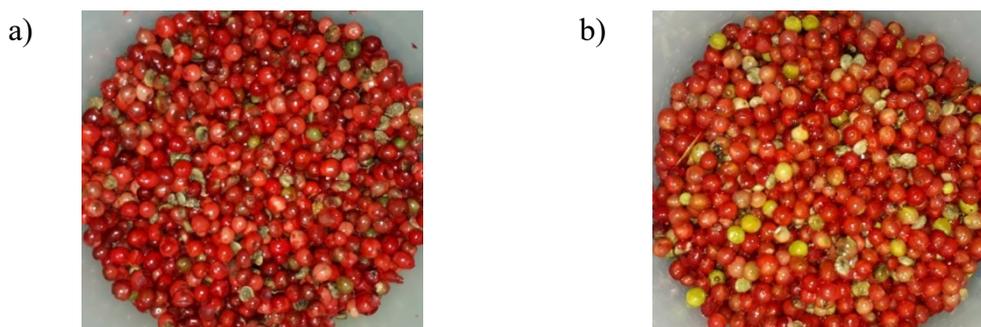
As diferenças nas taxas de secagem podem ser devido aos mecanismos de transferência de calor que ocorrem durante a secagem por *cast-tape drying*: condução e convecção. Assim, provavelmente a contribuição da transferência de calor pelos dois mecanismos, condução e convecção, na secagem das amostras dos frutos de pimenta rosa triturados com adição de 40 % em peso de água (0,63 g /g b.u.) foi maior que para as amostras sem adição de água (0,38 g /g b.u.). Este comportamento também pode ser justificado pelo gradiente de concentração de água entre a amostra e o ar, favorecendo a transferência de massa. No período de taxa de secagem constante a pressão de vapor de água na superfície da amostra é próxima da pressão de saturação e a resistência interna à transferência de massa é mínima (pequena espessura da camada de amostra) durante o processo de secagem. Assim, a secagem ocorre pela evaporação da água e é governada pela transferência de calor proveniente da água aquecida (SINGH; HELDMAN, 2009; DURIGON, 2016; TADINI et al., 2016).

A partir dos resultados alcançados na redução de tamanho da pimenta rosa, nos testes preliminares de adição de água e na cinética de secagem das amostras por CTD, o tratamento térmico das amostras por branqueamento, antes da etapa de redução de tamanho, foi proposto objetivando melhorar o preparo das amostras e a secagem por *cast-tape drying*.

### 2.3.6 Tratamento térmico dos frutos da pimenta rosa

Nos experimentos realizados, foi possível observar que houve uma pequena variação da cor das amostras, comparado à pimenta rosa *in natura*, após o tratamento térmico por branqueamento conforme apresentado na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Frutos de pimenta rosa: a) sem branqueamento (*in natura*), b) com branqueamento.



A retenção de água pela pimenta rosa durante o processo de branqueamento pode ser observada na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Umidade das amostras de pimenta rosa no preparo das amostras.

<b>Condição da amostra</b>	<b>Umidade da amostra (g /g b.s.) Média ± DP</b>
Sem branqueamento	0,413 ± 0,018
Com branqueamento	1,921 ± 0,128

Conforme esperado, as amostras submetidas a um pré-tratamento por branqueamento apresentaram maior umidade devido ao contato direto com a água aquecida, que favoreceu o fluxo de massa da água do meio para o produto. Pela Tabela 2.5, foi possível verificar que a absorção de água pela amostra no processo de branqueamento foi de 78,5 % em peso de água em base seca. O branqueamento pode facilitar a remoção do ar do interior do alimento, causar a destruição parcial de microrganismos, principalmente presentes na superfície do material, melhorar a textura e acentuar a sua coloração (GONÇALVES et al., 2010).

Desta forma, a redução de tamanho dos frutos branqueados foi realizada em moinho de facas, que foi a metodologia que apresentou a redução de tamanho mais uniforme com uma distribuição granulométrica numa faixa mais estreita, apresentando menor tamanho de partícula.

Os resultados de umidade e variação da temperatura da amostra branqueada na moagem em moinho de facas, estão apresentados na Tabela 2.6.

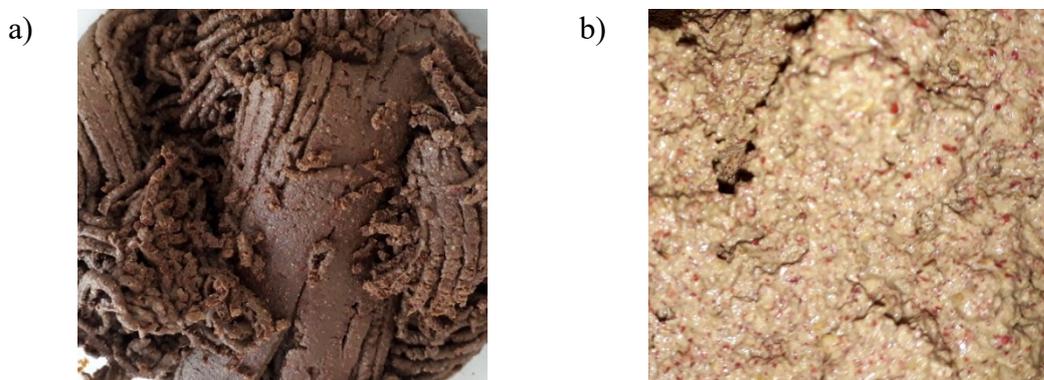
Tabela 2.6 - Variação de temperatura e umidade final da amostra branqueada moída em moinho de facas.

<b>Pré-tratamento</b>	<b>Equipamento utilizado para redução de tamanho</b>	<b>Temperatura da amostra antes da redução de tamanho (°C)</b>	<b>Temperatura da amostra após a redução de tamanho (°C)</b>	<b>Umidade da amostra (g /g b.s.) Média ± DP</b>
Com branqueamento	Moinho de Facas	26	31	2,034 ± 0,161

Na amostra branqueada, moída em moinho de facas, houve aumento da umidade da amostra após a moagem provavelmente devido à presença de gotículas de água na superfície das pimentas branqueadas e à completa homogeneização da amostra que ocorre nesta etapa.

Também é interessante ressaltar que a moagem em moinho de facas das pimentas branqueadas, aumentou a temperatura da amostra em torno de 5°C, embora de maneira menos expressiva do que sem o branqueamento, em torno de 15°C. Esse fato pode ter acontecido devido ao amolecimento dos tecidos da amostra durante o branqueamento, o que reduz o atrito durante a moagem, em comparação com a amostra *in natura*. O escurecimento da amostra sem tratamento térmico após a redução de tamanho em moinho de facas pode ser observado na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Pimenta rosa após redução de tamanho em moinho de facas: a) sem branqueamento, b) com branqueamento.



As imagens apresentadas na Figura 2.12 corroboram com a tese sobre o escurecimento enzimático que inicia em resposta aos danos físicos e fisiológicos provocados pelos impactos e abrasões na etapa de moagem como resultado da oxidação de compostos fenólicos presentes na pimenta rosa, uma vez que praticamente não houve escurecimento das amostras branqueadas. O escurecimento enzimático é causado principalmente pela ação da enzima polifenol oxidase (PPO) na presença do oxigênio atmosférico (DORANTES-ALVAREZ et al., 2011) e pode-se observar pela diferença da cor das amostras apresentadas na Figura 2.12 *a* e *b* que o branqueamento foi efetivo na inativação da PPO. Na Tabela 2.7 estão apresentados os parâmetros de cor para as amostras moídas em moinho de facas.

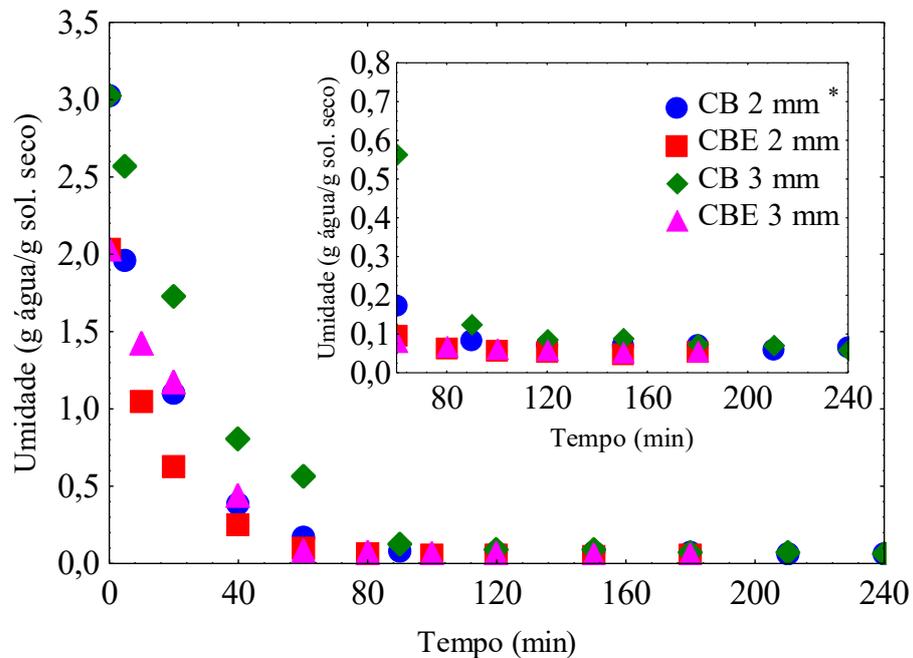
Tabela 2.7 - Parâmetros de cor dos frutos de pimenta rosa moídos em moinho de facas.

Preparação da amostra	L* Média ± DP	a* Média ± DP	b* Média ± DP
<i>In natura</i> e moída	14,15 ± 0,06	3,38 ± 0,18	8,56 ± 0,56
Branqueada e moída	17,71 ± 0,06	4,22 ± 0,08	8,27 ± 0,12

Conforme esperado e mostrado na Figura 2.12, as amostras submetidas a um pré-tratamento por branqueamento apresentaram cor mais clara e, conseqüentemente, maior valor para o parâmetro L\*.

Para as amostras com branqueamento, as condições experimentais avaliadas para o processo de secagem foram: temperatura da água circulante de 95 °C, espessura de espalhamento da pasta de 2 mm e 3 mm, com e sem exaustão do ar de secagem na unidade experimental de CTD. As curvas de secagem para a pasta dos frutos de pimenta rosa nestas condições estão apresentadas na Figura 2.13.

Figura 2.13 - Curvas de secagem da pimenta rosa a 95 °C, 2 mm e 3 mm, 0% de adição de água em peso na amostra com branqueamento (CB) e com branqueamento e exaustão (CBE) moídas em moinho de facas.



\* zoom da figura externa.

A partir dos resultados apresentados, verificou-se que a exaustão do ar na unidade experimental de secagem por CTD contribuiu para a redução da umidade da amostra no período de taxa de secagem constante, devido à convecção forçada proporcionada pelos exaustores que retiram a água evaporada durante a secagem (NINDO & TANG, 2007, KUDRA; MUJUMDAR, 2009). Neste período, a taxa de secagem para as amostras com branqueamento e exaustão do ar de secagem foi maior que para as demais condições, conforme apresentado na Tabela 2.8. Também, conforme já observado anteriormente na Tabela 2.4, menores espessuras da camada de espalhamento da pimenta sobre o equipamento resultaram em maior facilidade de transferência de calor e massa e, por consequência, maior taxa de secagem.

Tabela 2.8 - Taxa constante de secagem da pasta de pimenta rosa branqueada, moída em moinho de facas, com e sem exaustão à temperatura da água circulante de 95 °C.

Ar de Secagem	Espessura da pasta (mm)	Taxa de secagem (g água/ g sól. seco.min)
Sem Exaustão	2	0,0434 ± 0,0106
	3	0,0318 ± 0,0053
Com Exaustão	2	0,0496 ± 0,0183
	3	0,0354 ± 0,0068

A partir da Tabela 2.8, foi possível verificar que a exaustão incrementou a taxa de secagem em 14,3% para a espessura de espalhamento de 2 mm e em 11,3% para a espessura de 3 mm quando comparadas as condições de com e sem exaustão do ar de secagem. Possivelmente, este comportamento se deve ao fato de que a exaustão do ar de secagem aumentou a transferência de massa devido a maior velocidade do ar, quando comparado aos processos com convecção natural. Em todas as condições experimentais apresentadas, observou-se queda linear da umidade em função do tempo de secagem (período de taxa constante) até atingir umidades próximas de 0,12 g água/g sólido seco. Durigon (2016) verificou na cinética de secagem de polpa de tomate por CTD, espalhada sobre o suporte com 2 mm de espessura e temperatura do fluido circulante de  $90 \pm 2$  °C, que o tempo de secagem para atingir a umidade de 6% b.u. foi de 12 min quando o suporte foi o filme *mylar*<sup>®</sup> com os fluidos circulantes água aquecida ou vapor e com exaustão e, de 10 min quando o suporte foi o filme *mylar*<sup>®</sup> ou filme plástico revestido com teflon, com os fluidos circulantes água aquecida ou vapor e com exaustão e ventilação.

Na Tabela 2.9 estão apresentadas as informações de tempo e umidade final de secagem das amostras moídas em moinho de facas com branqueamento e sem exaustão (CB), bem como a condição com branqueamento e exaustão (CBE).

Tabela 2.9 - Tempo e umidade final de secagem da pasta dos frutos de pimenta rosa a temperatura da água circulante de 95 °C.

Metodologia de Redução de Tamanho	Tratamento da Amostra	Espessura da pasta (mm)	Tempo final de secagem (min)	Umidade final de secagem (g /g b.s.)
Moinho de Facas	CB	2	240	0,060 ± 0,006
	CB	3	240	0,071 ± 0,003
	CBE	2	180	0,053 ± 0,006
	CBE	3	180	0,058 ± 0,005

Com os resultados apresentados na Tabela 2.9 foi possível verificar que para a mesma temperatura da água circulante e metodologia de redução de tamanho, o tratamento térmico da amostra de pimenta rosa e a exaustão na unidade experimental de secagem por CTD influenciaram no tempo e na umidade final da secagem. A umidade final alcançada na secagem com exaustão do ar foi 11,7% menor que na condição sem exaustão para a espessura de espalhamento de 2 mm e 18,3% menor em relação à espessura de 3 mm, possivelmente pelo aumento da transferência de massa da amostra quando a condição de exaustão do ar de secagem foi utilizada, uma vez que remove o ar estagnado sobre a camada de pimenta. Da mesma forma, houve redução no tempo de secagem em 25% para as espessuras de 2 e 3 mm quando a exaustão do ar de secagem foi utilizada. Neste sentido foi possível verificar que a condição da amostra com branqueamento, moída em moinho de facas, utilizando a exaustão do ar de secagem foi a que alcançou menor umidade final e menor tempo de secagem.

Em todos os experimentos, a temperatura ambiente, a umidade relativa, a rotação da bomba peristáltica e os possíveis fluxos de ar próximos ao equipamento não foram estritamente controlados, embora na maior parte do tempo os experimentos foram conduzidos de forma que esses efeitos fossem padronizados, buscando minimizar variações.

### 2.3.7 Medida de temperatura

As variações de temperatura do filme *mylar*<sup>®</sup> observadas durante os experimentos estão apresentadas na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 - Variação de temperatura da superfície do filme *mylar*<sup>®</sup> durante a secagem por *cast-tape drying*.

Metodologia de redução de tamanho	Temp. da água circulante (°C)	Tratamento da amostra	Temp. ambiente média (°C) Média ± DV	Temp. mínima do <i>mylar</i> <sup>®</sup> (°C)	Temp. média do <i>mylar</i> <sup>®</sup> (°C) Média ± DV	Temp. máxima do <i>mylar</i> <sup>®</sup> (°C)
Multiprocessador	65,0	SB	25,4 ± 1,4	49,8	51,7 ± 0,7	52,3
	75,0	SB	27,4 ± 0,4	53,5	58,8 ± 2,3	60,8
	95,0	SB	27,1 ± 0,5	80,0	84,4 ± 1,8	85,8
Moinho de Facas	95,0	CB	29,2 ± 0,6	86,1	87,7 ± 0,9	89,3
	95,0	CBE	30,2 ± 0,2	86,0	87,7 ± 1,0	88,8

Após o espalhamento da polpa sobre o filme *mylar*<sup>®</sup>, a temperatura do filme foi incrementada gradualmente, sendo mínima logo após o espalhamento da amostra e máxima ao final da secagem, quando provavelmente se atingiu a umidade de equilíbrio e final do período de secagem à taxa decrescente. Geralmente nesse período final, há uma similaridade/equilíbrio entre a temperatura da amostra e da superfície de secagem. Zotarelli et al. (2015) verificaram na secagem de polpa de manga à temperatura de 95 °C e espessura de espalhamento sobre o filme *mylar*<sup>®</sup> de 2 mm que a temperatura da amostra se elevou a medida que a umidade da amostra diminuiu. Em outra investigação, Durigon (2016) na secagem de polpa de tomate a temperatura de 90 °C e espessura de espalhamento sobre o filme *mylar*<sup>®</sup> de 2 mm observou o mesmo comportamento na temperatura da amostra. A partir dos dados apresentados na Tabela 2.10 foi possível observar que na condição de secagem à temperatura da água circulante de 95 °C, houve uma diferença de aproximadamente 3 °C entre as temperaturas mínima e máxima do *mylar*<sup>®</sup> para as amostras branqueadas e moídas em moinho de facas quando se compara às condições de com e sem exaustão no ar de secagem. Quando comparado à amostra triturada em multiprocessador, na mesma temperatura da água circulante, este comportamento não foi observado, sendo que nesta condição, a diferença de temperatura entre a temperatura mínima e máxima do *mylar*<sup>®</sup> foi de aproximadamente 6 °C.

## 2.4 Conclusão

A redução de tamanho dos frutos de pimenta rosa foi possível nas três metodologias empregadas. Na condição das amostras sem tratamento térmico, a metodologia que melhor preservou a umidade dos frutos *in natura* e a que apresentou a menor elevação de temperatura

da amostra durante a etapa de redução de tamanho foi a trituração em multiprocessador doméstico. Nestas condições, para que as amostras atingissem a consistência de pasta que permitisse o espalhamento foi necessária a adição de água às amostras após a redução de tamanho. O branqueamento empregado nos frutos de pimenta rosa melhorou o preparo da amostra para secagem por *cast-tape drying*, sendo que, para as amostras branqueadas a metodologia mais adequada à redução de tamanho dos frutos foi a moagem em moinho de facas deixando a amostra na consistência adequada ao espalhamento.

A secagem dos frutos de pimenta rosa foi possível por *cast-tape drying*, sendo que as condições de preparo da amostra que alcançaram a maior taxa de secagem e a menor umidade final da amostra foram amostra branqueada, temperatura da água circulante de 95 °C, espessura de espalhamento de 2 mm com exaustão do ar de secagem.

## 2.5 Referências

- A.O.A.C. Association of Official Analytical Chemists. *Official Methods of Analysis*, 18th ed. Gaithersburg, Maryland, 2005.
- BAEGHBALI, V., NIAKOUSARI, M. Evaluation of a batch refractance window dryer in drying of some heat sensitive food stuff. Iran. **Journal of Food Science and Technology**, v. 13, p. 185-192, 2015.
- CASTOLDI, M. et al, Production of tomato powder by refractance window drying. **Drying Technology**, v. 33, n. 12, p. 1463-1473. 2015. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.989327>
- CREMASCO, M.A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo, Blusher, 2012.
- DORANTES-ALVAREZ, L. *et al.* Blanching peppers using microwaves. **Procedia Food Science**, v. 1, p. 178-183, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.028>
- DURIGON, Angelise. **Produção e caracterização de tomate em pó por cast-tape drying**. 2016. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2016.
- DURIGON, A. *et al.* Heat transfer and drying kinetics of tomato pulp processed by cast-tape drying. **Drying Technology**. v. 36, p. 160-168. 2017. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1304411>
- FORERO, D. P. *et al.* Chemical and sensory comparison of fresh and dried lulo (*Solanum quitoense* Lam.) fruit aroma. **Food Chemistry**, v. 169, p. 85-91, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.111>
- FRABETTI, A. C. C.; DURIGON A.; LAURINDO, J. B. Effect of process variables on the drying of guava pulp by cast-tape drying. **Food Science and Technology**, v. 96, p. 620–626, 2018.

GONÇALVES, E.M. *et al.* Carrot (*Daucus carota* L.) peroxidase inactivation, phenolic content and physical changes kinetics due to blanching. **Journal of Food Engineering**, v. 97, p. 574–581, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.005>

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. *Advanced Drying Technologies*. CRC Press, 2009. <https://doi.org/10.1201/9781420073898>

MOSES, J. A. *et al.* Effect of microwave treatment on drying characteristics and quality parameters of thin layer drying of coconut. **Asian Journal of Food & Agro-industry**, v. 6, p. 72-85, 2013.

MOSES, J. A. *et al.* Novel drying techniques for the food industry. **Food Engineering Reviews**, v. 6, p. 43-55, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9078-7>

NINDO, C.I. *et al.* Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 27, p. 117-136, 2003. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2003.tb00506.x>

NINDO, C.I.; TANG, J. Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. **Drying Technology**, v. 25, p. 37-48, 2007. <https://doi.org/10.1080/07373930601152673>

OCHOA-MARTÍNEZ, C. I. *et al.* Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. **Journal of Food Engineering**, v. 109, p. 69-75, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.032>

ORTIZ-JEREZ, M.J. *et al.* Quantitative understanding of refractance window™ drying. **Food and Bioproducts Processing**, v. 95, p. 237-253, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.05.010>

PEÇANHA, R. P. **Sistemas particulados – operações unitárias envolvendo partículas e fluidos**. 1º Edição. Elsevier, 2014.

RAGHAVI, L. M.; MOSES, J. A.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Refractance window drying of foods: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 222, p. 267-275, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.032>

SINGH, R.P.; HELDMAN, D.R. **Introduction to Food Engineering**. 4º Edição. Capítulo 12. Elsevier. 2009.

TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; MEIRELLES, A. J. A.; FILHO, P. A. P. **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**, 1º Edição, Volume 2, Rio de Janeiro, Editora LTC, 2016.

ZOTARELLI, M. F.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. **Food Research International**, v. 69, p. 410–417, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.013>

ZOTARELLI, M. F. *et al.* Production of mango powder by spray drying and cast-tape drying. **Power Technology**, v. 305, p. 447–454, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.027>

### **3 CINÉTICA DE SECAGEM DOS FRUTOS DA PIMENTA ROSA POR *CAST-TAPE DRYING* E CARACTERIZAÇÃO DO PÓ OBTIDO**

Neste capítulo é apresentado o estudo do efeito das variáveis do processo de secagem dos frutos da pimenta rosa por *cast-tape drying*, com a caracterização do pó obtido quanto a atividade de água, umidade, cor e morfologia das partículas. Além disso, apresenta-se as curvas de secagem nas condições investigadas, com o ajuste de equações da literatura aos dados para representar a cinética da perda de umidade.

#### **3.1 Introdução**

Nos últimos anos, tem crescido o interesse de pesquisadores em estudar a secagem por *cast-tape drying* aplicada a frutas e vegetais, uma vez que a literatura tem ressaltado a qualidade dos pós produzidos nesse processo em relação a métodos convencionais de secagem. Caparino et al. (2012), na secagem de purê de manga, verificaram que os pós produzidos pela secagem por refractance window (RW) mantiveram com maior intensidade a cor amarela da manga do que os pós produzidos por liofilização; El-Safy (2014) verificou na secagem de nêspersas em fatias de 5 mm de espessura o maior conteúdo de compostos fenólicos totais, a máxima retenção de carotenoides totais e a melhor intensidade de cor em relação à secagem solar e em forno de halogênio; Baeghbali e Niakousari (2015) verificaram na secagem do suco de romãs que o teor total de antocianinas foi significativamente maior no pó produzido por RW do que nos pós produzidos por liofilização e secagem por atomização; Jafari et al. (2016), na secagem de fatias de kiwi, verificaram valores menores de desvio de cor e taxa de encolhimento para as amostras secas por RW, demonstrando os benefícios da secagem por este método.

No entanto, Raghavi et al. (2018), verificaram que ainda existe uma compreensão limitada sobre os efeitos da secagem por *cast-tape drying* em diferentes tipos de alimentos destacando aqueles estruturalmente fortes como tubérculos e castanhas. Também, pouco conhecimento se tem na literatura sobre a secagem e caracterização de folhas e alguns frutos secos por esses processos, RW e CTD.

A partir da definição da metodologia de redução de tamanho, que objetivou alcançar uma pasta dos frutos triturados, com consistência que conduzisse a um melhor espalhamento sobre o filme polimérico para a secagem por CTD, apresentada no capítulo anterior, um planejamento experimental  $3^k$  foi estabelecido para estudar o efeito das condições de secagem nas características da pimenta rosa seca por CTD.

Desta forma, o objetivo deste capítulo foi estabelecer a cinética de secagem por *cast-tape drying* dos frutos da pimenta rosa tratados termicamente, com o ajuste de modelos da literatura e caracterizar os pós produzidos quanto à atividade de água, umidade, cor e morfologia das partículas.

## **3.2 Material e Métodos**

### **3.2.1 Preparo das amostras**

As amostras dos frutos maduros da pimenta rosa, coletadas e armazenadas conforme item 2.2.1, foram homogeneizadas e submetidas ao branqueamento por imersão em água quente à temperatura de  $90 \pm 2$  °C por 1 min e logo após, à imersão em água gelada à temperatura de  $10 \pm 2$  °C por 2 min. Após o branqueamento, os frutos foram moídos em moinho de facas (Fortinox, modelo Star FC 50, Brasil) acoplado a uma peneira de malha 10 *mesh* na série Tyler. As amostras foram então fracionadas em sacos plásticos devidamente identificados e armazenadas em ultrafreezer (Indrel, modelo IULT335D, Brasil) a temperatura de -60 °C. Para a realização dos experimentos, as amostras foram descongeladas em geladeira na temperatura entre 6 e 10 °C (Consul, Brasil) durante 24 h. Após a secagem, para obtenção do pó, as amostras foram desintegradas em multiprocessador doméstico (Arno, modelo Triton, Brasil).

### **3.2.2 Caracterização dos frutos de pimenta rosa**

Com o intuito de verificar suas propriedades e a presença de compostos fenólicos, os frutos *in natura* da pimenta rosa, os frutos branqueados e a pasta dos frutos de pimenta rosa obtida a partir da moagem dos frutos branqueados, antes da secagem, foram caracterizados por meio das análises de atividade de água, cor, umidade, compostos fenólicos totais e morfologia das partículas. Para as amostras que foram secas, análises de umidade foram realizadas ao longo do processo de desidratação para determinação da cinética de secagem, bem como as análises de atividade de água, cor, microscopia eletrônica de varredura e umidade dos pós produzidos em cada condição avaliada, afim de verificar a influência das variáveis de processo sobre as características dos pós produzidos. Todas as análises foram realizadas em triplicata e os procedimentos estão descritos nos próximos itens.

### 3.2.2.1 Atividade de água ( $a_w$ )

A determinação da atividade de água foi realizada com um higrômetro digital (Aqualab Lite, Decagon Devices, EUA). Uma pequena quantidade, 2 a 3 g, de amostra foi colocada numa cápsula de polietileno própria do equipamento cobrindo toda a superfície da cápsula e esta foi introduzida, em seguida, na câmara do equipamento, que realiza a leitura automaticamente em alguns minutos.

Os valores de atividade de água expressos pelo equipamento variam entre 0 e 1, sendo que o valor 1 é atribuído a atividade de água da água pura.

### 3.2.2.2 Cor

A cor das amostras foi determinada conforme descrito no item 2.2.9 do Capítulo 2.

### 3.2.2.3 Umidade

A umidade das amostras foi determinada conforme descrito no item 2.2.8 do Capítulo 2. A umidade das amostras, em base seca (b.s.), foi calculada de acordo com a Equação 1.7.

### 3.2.2.4 Compostos fenólicos totais

A extração dos compostos fenólicos dos frutos de pimenta rosa *in natura*, branqueados, moídos em moinho de facas e dos pós produzidos foi realizada segundo a metodologia proposta por Bertoldi (2006), com modificações, que determinou o sistema extrator mais eficiente, acetona 70% (v/v) acidificada com 1% (v/v) de HCl concentrado. Assim, em um béquer contendo 1 g de amostra triturada, foram adicionados 40 mL do sistema extrator, que permaneceu em repouso durante 21 horas a temperatura ambiente. Após este intervalo, a amostra foi filtrada e o volume completado a 100 mL com água destilada para a obtenção do extrato fenólico.

A quantificação de compostos fenólicos foi realizada pelo método de Folin-Ciocalteu, método que envolve a redução do reagente pelos compostos fenólicos das amostras com formação de complexo azul, cuja intensidade aumenta linearmente a 760 nm. A metodologia foi proposta por Shahidi e Naczki (1995). Para a determinação, 2 mL do extrato fenólico foram adicionados a 2 mL do reagente Folin-Ciocalteu diluído (1:10) (v/v). A mistura foi agitada e permaneceu em repouso durante 3 minutos em local escuro. A seguir foram adicionados sequencialmente 7,5 mL de uma solução de carbonato de cálcio 0,2% e 1 mL de água destilada. A solução permaneceu em ambiente escuro durante 1 hora. O branco foi preparado com a mesma composição das demais amostras, substituindo os 2 mL do

extrato fenólico por 2 mL dos solventes contidos no extrato nas mesmas proporções. Ao final do período de repouso a absorbância das amostras foi lida em espectrofotômetro (Kasuki, modelo IL-592-LC-BI, China). A curva de calibração foi construída utilizando o ácido gálico como padrão e está disponível no Apêndice A. A quantidade de compostos fenólicos totais foi expressa em g equivalente de de ácido gálico (EAG) / 100 g amostra em base seca.

### 3.2.2.5 Morfologia das partículas

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é utilizada para observar alterações na morfologia das amostras nas diferentes condições das variáveis de processo. Com o objetivo de observar qualitativamente o impacto de cada conjunto de condições de secagem avaliados, as amostras dos pós, bem como a amostra dos frutos de pimenta rosa *in natura*, foram submetidas a MEV.

Para o preparo das amostras dos frutos *in natura*, branqueados e também das pastas dos frutos *in natura* e branqueados, as amostras foram submetidas à secagem pelo método do ponto crítico (CPD - *critical point drying*), com o objetivo de preservar a morfologia das amostras. No ponto crítico, as características físicas de líquidos e gases não são distinguíveis. Os compostos que estão no ponto crítico podem ser convertidos na fase líquida ou gasosa sem atravessar as interfaces entre líquido e gás, evitando assim os efeitos prejudiciais. A desidratação de amostras usando o ponto crítico da água não é viável, uma vez que se encontra a 374 °C e 229 bar, onde qualquer amostra biológica seria destruída. Para superar este problema, a água pode ser substituída por dióxido de carbono líquido (CO<sub>2</sub>), cujo ponto crítico é de 31 °C e 74 bar e é mais apropriado para todas as aplicações biológicas e tecnicamente, relativamente fácil de manter (LEICA MICROSYSTEMS, 2013). Assim, a amostra foi levada à câmara do CPD (Leica, modelo EM CPD 300, Áustria), em um pequeno volume de acetona. A secagem ocorreu no ponto crítico do CO<sub>2</sub>.

As análises foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura (Carl Zeiss, modelo EVO MA 10, Alemanha) após as amostras serem fixadas em *stubs* com fita de carbono e recobertas com ouro no metalizador (Leica, modelo SCD 50, Áustria). As micrografias foram obtidas da superfície das amostras secas, onde uma tensão de aceleração de 5 kV foi utilizada proporcionando ampliações de até 1.000 vezes do material analisado (CELLI et al., 2016).

### 3.2.3 Planejamento experimental

Os experimentos de secagem foram conduzidos de acordo com um planejamento fatorial a três níveis ( $3^k$ ) com o objetivo de estimar os efeitos de dois fatores envolvidos no processo (temperatura da água circulante e espessura de espalhamento da amostra) sobre as variáveis resposta umidade, atividade de água, cor e morfologia das partículas. Na Tabela 3.1 estão apresentados os fatores e os níveis avaliados e na Tabela 3.2 está apresentada a matriz do planejamento fatorial  $3^2$  executado, com duas réplicas no ponto central.

Tabela 3.1 Fatores e níveis do planejamento fatorial.

Fator	Nível		
	-1	0	1
$X_1$ - Temperatura da água circulante (°C)	65	80	95
$X_2$ - Espessura de espalhamento da amostra (mm)	2	3	4

Tabela 3.2 - Planejamento fatorial  $3^2$ .

Experimentos	Variáveis Codificadas		Variáveis Reais	
	$X_1$	$X_2$	Temperatura (°C)	Espessura (mm)
1	-1	-1	65,0	2,0
2	-1	0	65,0	3,0
3	-1	+1	65,0	4,0
4	0	-1	80,0	2,0
5	0	0	80,0	3,0
6	0	+1	80,0	4,0
7	+1	-1	95,0	2,0
8	+1	0	95,0	3,0
9	+1	+1	95,0	4,0
10 C	0	0	80,0	3,0
11 C	0	0	80,0	3,0

Uma vez realizados os experimentos, segundo as orientações da ferramenta de planejamento fatorial de experimentos (BOX et al. 1978), é possível também obter equações empíricas que representem as respostas em função das variáveis relevantes que foram investigadas. Esta função permite a identificação dos efeitos das variáveis significativas, bem

como previsão de respostas futuras. A Equação 3.1, uma equação polinomial quadrática, apresenta a forma da superfície ajustada da resposta estudada em função das variáveis de interesse por meio da metodologia da superfície de resposta (MYERS, 1976).

$$Z = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{12}x_1x_2 \quad (3.1)$$

em que,  $Z$  é a resposta predita (variável dependente),  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{22}$  e  $\beta_{12}$  são os coeficientes a serem estimados.

### 3.2.4 Cinética de secagem

A cinética de secagem dos frutos triturados de pimenta rosa por *cast-tape drying* foi determinada conforme item 2.2.6. As condições experimentais avaliadas para o processo de secagem foram estabelecidas no planejamento fatorial. Todos os experimentos foram conduzidos com exaustão do ar de secagem adaptada na unidade experimental em batelada montada no Laboratório de Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias do curso de Engenharia de Alimentos, da Faculdade de Engenharia Química, da Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Patos de Minas, conforme Figura 3.1. As amostras foram espalhadas sobre o filme *mylar*® com auxílio de molduras retangulares de acrílico com as seguintes dimensões 0,14 m x 0,10 m, nas espessuras de 0,002, 0,003 e 0,004 m.

Figura 3.1 – Sistema de exaustão do ar de secagem adaptado à unidade experimental.



Em todos os experimentos de secagem, os dados da cinética foram convertidos em adimensional de umidade visando melhores visualização, avaliação e ajuste, conforme a Equação 3.2:

$$Y = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (3.2)$$

em que, Y é o adimensional de umidade, X é a umidade em um tempo qualquer (kg água/ kg sol. seco),  $X_0$  é a umidade inicial (kg água/ kg sol. seco),  $X_{eq}$  é a umidade de equilíbrio (kg água/ kg sol. seco).

Buscando encontrar a melhor equação que descrevesse a cinética de secagem, os resultados obtidos do cálculo do adimensional de umidade foram analisados segundo os principais modelos encontrados na literatura conforme apresentado na Tabela 3.3. Os parâmetros destes modelos foram estimados pelo método dos mínimos quadrados (estimativa não-linear) e a melhor equação foi selecionada de acordo com o nível de significância dos parâmetros, a grandeza do valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ).

Tabela 3.3 - Modelos da literatura para cinética de secagem.

Modelo	Equação	Referência
$Y = \exp(-kt)$	3.3	LEWIS (1921)
$Y = \exp(-kt^n)$	3.4	PAGE (1949)
$Y = A \exp(-kt) + \frac{1}{9} \exp(-kt)$	3.5	HENDERSON; HENDERSON (1968)
$Y = \exp[-(kt)^n]$	3.6	OVERHULTS et al. (1973)
$Y = A \exp(-kt)$	3.7	BROOKER et al. (1974)

As taxas de secagem, no período de taxa constante, foram calculadas a partir da inclinação da equação da reta obtida na regressão linear realizada com o *software* Statistica (Statsoft Inc., Tulsa, USA) nos dados experimentais de umidade em função do tempo.

### 3.3 Resultados e Discussão

#### 3.3.1 Caracterização dos frutos de pimenta rosa

Os resultados das análises de caracterização dos frutos de pimenta rosa *in natura*, branqueados e moídos mostraram, para o teor de umidade que durante o branqueamento

houve incorporação de água pelos frutos e que após a moagem houve a homogeneização desta água à amostra conforme apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Caracterização dos frutos de pimenta rosa.

Preparação da amostra	Umidade da amostra (%) Média ± DP	Atividade de água (a <sub>w</sub> ) Média ± DP	L* Média ± DP	a* Média ± DP	b* Média ± DP	Compostos fenólicos totais g equivalente ácido gálico (EAG) / 100 g de amostra (b.s.) Média ± DP
<i>In natura</i>	29,22 ± 0,92	0,867 ± 0,015	12,83 ± 1,35	19,40 ± 0,84	13,95 ± 0,29	7,899 ± 0,771
Branqueada	65,72 ± 1,52	0,986 ± 0,019	9,87 ± 0,17	18,79 ± 0,36	11,27 ± 0,47	9,613 ± 0,682
Branqueada e moída	71,36 ± 0,04	0,981 ± 0,013	17,71 ± 0,06	4,22 ± 0,08	8,27 ± 0,12	13,637 ± 0,360

O valor encontrado para umidade dos frutos de pimenta rosa *in natura* foi menor dos que os encontrados por Degáspari et al. (2005) que verificaram 39,00% de umidade, Andrade (2012) que obteve um teor de umidade dos frutos maduros de pimenta rosa de 34,05% e Verdi et al. (2015) que encontraram um teor de umidade de 31,87% em base úmida. Variações nas características de produção como índice pluviométrico, temperatura, solo, altitude, época da colheita, entre outros, podem interferir na quantidade e qualidade dos compostos presentes nos frutos (BERTOLDI, 2006). Os valores de atividade de água demonstraram a absorção de água que ocorreu na amostra durante o pré tratamento de branqueamento.

Para os parâmetros de cor e atividade de água, a partir das informações da Tabela 3.4 foi possível verificar que na amostra moída houve variação da cor dos frutos de pimenta rosa em relação ao fruto *in natura*, uma vez que nesta etapa houve a homogeneização do fruto que tem a cor vermelha somente na superfície. A amostra dos frutos *in natura*, sem tratamento térmico, moída em moinho de facas apresentou os seguintes parâmetros de cor: L\* = 14,15 ± 0,06; a\* = 3,38 ± 0,18 e b\* = 8,56 ± 0,56 demonstrando que a pasta dos frutos de pimenta rosa sem tratamento térmico apresentou menor luminosidade, ou seja, foi mais escura que a pasta que recebeu o branqueamento. Desta forma, de fato o branqueamento como pré tratamento para secagem por CTD dos frutos de pimenta rosa reduziu o escurecimento da amostra.

A quantidade de compostos fenólicos totais obtidos para as amostras de pimenta rosa *in natura*, branqueadas e moídas também estão apresentadas na Tabela 3.4. Bertoldi (2006)

verificou a quantidade total de compostos fenólicos de  $2,343 \pm 0,023$  g EAG/100 g de pimenta rosa em peso seco, para extratos preparados a partir da pimenta rosa desidratada adquirida em mercados da cidade de São Mateus-ES e quantificados com a mesma metodologia descrita neste trabalho. Andrade (2015) quantificou os compostos fenólicos totais dos frutos da pimenta rosa extraídos por diversas metodologias: soxhlet, extração assistida por ultrassom e extração supercrítica com CO<sub>2</sub> e encontrou os valores máximos de  $14,2 \pm 0,3$  mg EAG/g extrato,  $65 \pm 1$  mg EAG/g extrato e  $16 \pm 1$  mg EAG/g extrato respectivamente. O aumento da quantidade de compostos fenólicos na amostra branqueada em relação à amostra *in natura*, possivelmente se deve às alterações estruturais nos tecidos vegetais que o branqueamento pode causar, tais como rompimento das membranas celulares, soltura das redes de hemicelulose, celulose e pectina, e alternância da porosidade da parede celular; estas alterações podem melhorar a extração de compostos bioativos (XU et al., 2007). Hiranvarachat et al. (2013) verificaram que o conteúdo de  $\beta$ -caroteno, carotenoides totais e atividade antioxidante de cenouras branqueadas foram significativamente maiores do que nas amostras não branqueadas. O aumento do teor de compostos fenólicos totais na amostra branqueada e moída em moinho de facas em relação à amostra branqueada, provavelmente se deve à redução do tamanho de partícula da amostra que ocorre na moagem, permitindo maior superfície de contato entre o sistema extrator e a amostra.

Na Tabela 3.5 estão apresentadas as taxas de secagem da pasta dos frutos de pimenta rosa comparando a amostra sem branqueamento (SB) e com branqueamento (CB) onde foi possível verificar o aumento da taxa de secagem quando a amostra foi tratada termicamente.

Tabela 3.5 - Comparativo da taxa de secagem da pasta dos frutos de pimenta rosa a temperatura da água circulante de 95 °C.

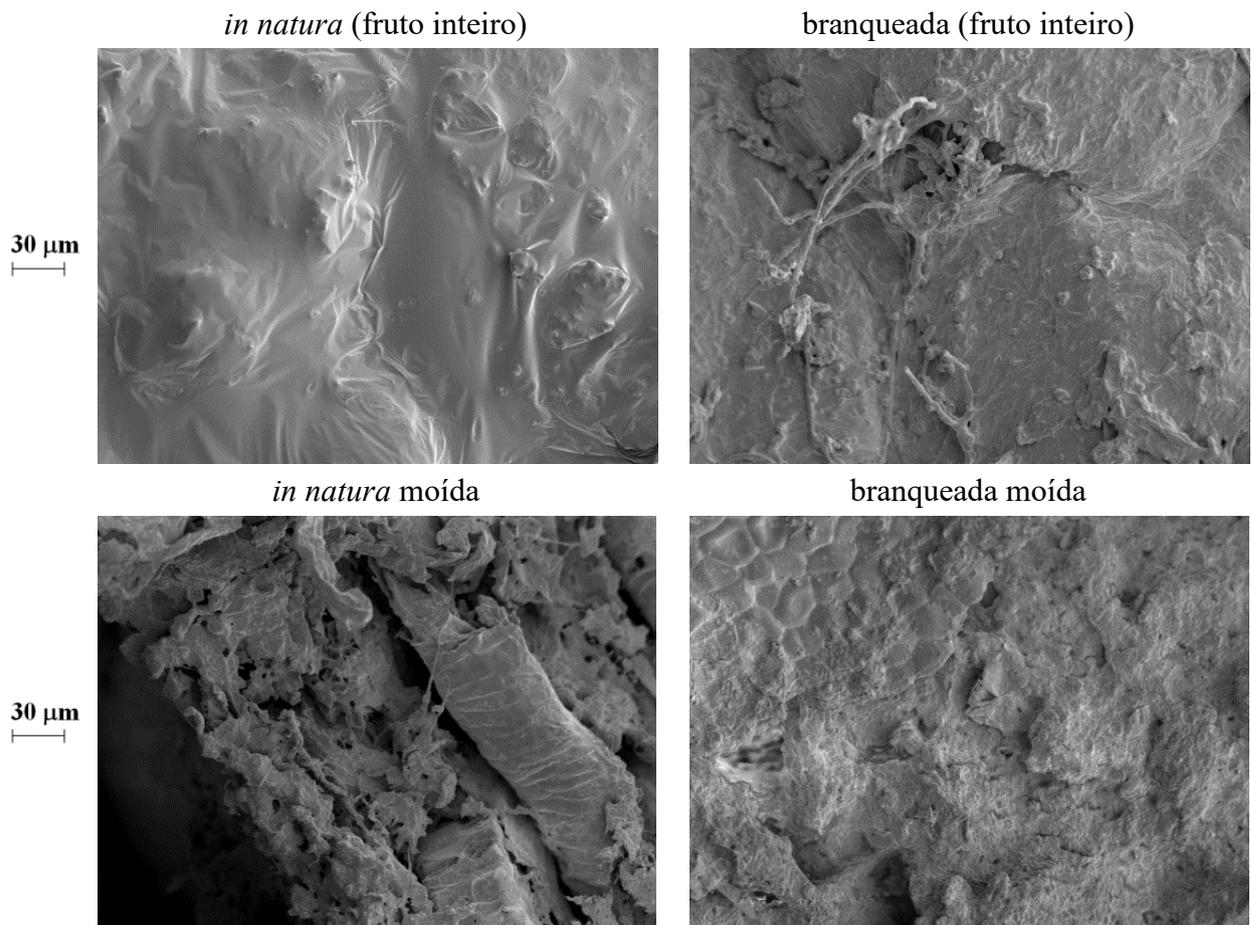
Metodologia de Redução de Tamanho	Tratamento da Amostra	Espessura da pasta (mm)	Taxa de secagem (g água/ g sól. seco.min)
			Média $\pm$ DP
Moinho de Facas	SB	2	$0,0025 \pm 0,0002$
	CB	2	$0,0434 \pm 0,0106$

De acordo com Severini et al. (2005) o branqueamento aumenta as taxas de secagem, alterando as propriedades físicas dos produtos, o que pode melhorar seus atributos de qualidade. Neste sentido, o aumento da umidade da amostra branqueada por imersão

possivelmente se deve ao aumento da permeabilidade das membranas celulares verificada nos alimentos branqueados.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras dos frutos de pimenta rosa *in natura* e após o branqueamento, bem como após a redução de tamanho estão apresentadas nas Figuras 3.2 e 3.3.

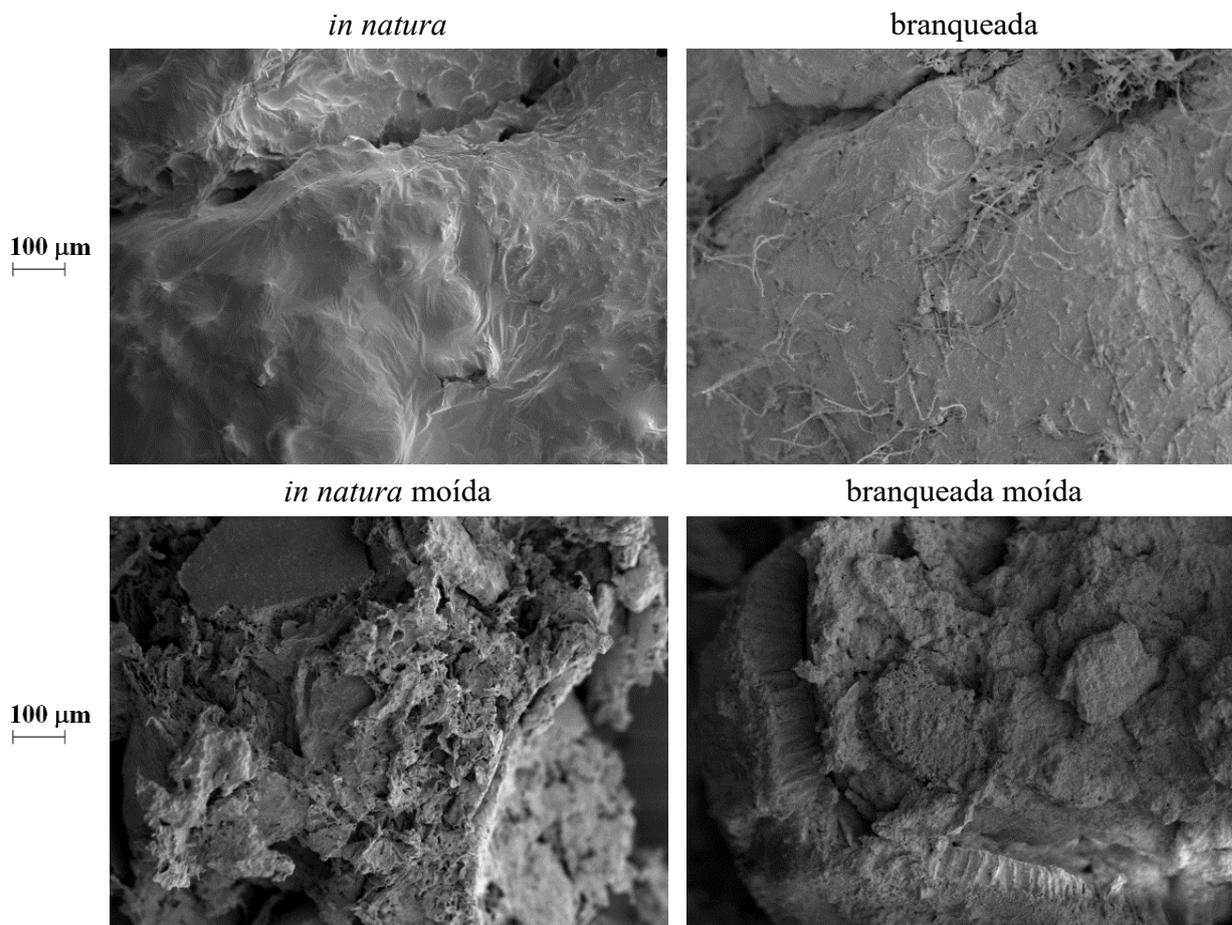
Figura 3.2 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 1.000 vezes para as amostras dos frutos de pimenta rosa.



Conforme pode ser observado, nas Figuras 3.2 e 3.3, a superfície dos frutos de pimenta rosa, tiveram sua estrutura alterada após o tratamento térmico por branqueamento. O branqueamento pode causar alterações estruturais nos tecidos vegetais. Xu et al. (2007) verificaram nos estudos com cascas de toranja que, após o branqueamento, a fração livre de ácidos fenólicos aumentou, bem como a atividade antioxidante do extrato metanólico. Em ambos os aumentos de imagem, a amostra branqueada moída apresentou característica mais homogênea do que a *in natura* moída, apresentando redução da porosidade da superfície.

Possivelmente este comportamento se deve a absorção de água pela amostra durante o branqueamento, tornando a pasta dos frutos mais homogênea.

Figura 3.3 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 300 vezes para as amostras dos frutos de pimenta rosa.



### 3.3.2 Cinética de secagem

Muitos autores têm discutido sobre qual é a umidade adequada ao armazenamento de alimentos desidratados, sendo que a maioria concorda em valores de umidade inferiores a 10% para garantir uma vida útil satisfatória (REY, 1964; ANGEL et al., 2009; COSTA, 2012).

Os experimentos realizados para secagem dos frutos de pimenta rosa seguiram o planejamento fatorial conforme o item 3.2.3, verificando a influência da temperatura da água circulante e a espessura de espalhamento da amostra em três níveis. Os níveis da avaliação foram determinados a partir de testes preliminares, objetivando a retirada da umidade até a

umidade de equilíbrio, onde o máximo possível de umidade (naquelas condições) fosse retirado e a massa do produto desidratado permanecesse constante.

Na Tabela 3.6 estão apresentados os resultados de umidade final obtidos em cada um dos experimentos. A partir dos resultados, foi possível observar que todos os experimentos apresentaram umidade final (b.u.) inferior a 10 %, valores adequados ao armazenamento do produto seco.

Tabela 3.6 - Planejamento fatorial e umidade final.

<b>Experimento</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Umidade final (b.s.) (g água/g sol. seco) Média ± DP</b>	<b>Umidade final (%) Média ± DP</b>
1	65,0	2,0	0,0858 ± 0,001	7,90 ± 0,12
2	65,0	3,0	0,0961 ± 0,001	8,76 ± 0,16
3	65,0	4,0	0,1020 ± 0,006	9,26 ± 0,45
4	80,0	2,0	0,0665 ± 0,003	6,24 ± 0,17
5	80,0	3,0	0,0757 ± 0,005	7,10 ± 0,30
6	80,0	4,0	0,0804 ± 0,001	7,44 ± 0,07
7	95,0	2,0	0,0492 ± 0,003	4,69 ± 0,26
8	95,0	3,0	0,0582 ± 0,001	5,50 ± 0,13
9	95,0	4,0	0,0797 ± 0,003	7,38 ± 0,25
10 C	80,0	3,0	0,0805 ± 0,002	7,45 ± 0,18
11 C	80,0	3,0	0,0831 ± 0,003	7,68 ± 0,22

Com os resultados obtidos, foram construídas as curvas da cinética de secagem convertendo os dados de umidade em adimensional de umidade (Y) em função do tempo. As curvas resultantes foram analisadas estatisticamente, objetivando determinar qual dos modelos propostos pela literatura, relacionados na Tabela 3.3, melhor se ajustava aos dados experimentais.

Dos modelos avaliados, os modelos de Page (1949) e Overhults et al. (1973) apresentaram os maiores valores de R<sup>2</sup>, desta forma, foram os modelos que melhor representaram a cinética de secagem dos frutos de pimenta rosa por CTD. Os parâmetros dos demais modelos avaliados, relacionados na Tabela 3.3, encontram-se disponíveis no Apêndice B. Os parâmetros obtidos para os modelos selecionados estão representados nas Tabelas 3.7 e 3.8. Este resultado era esperado pois as equações são equivalentes e na literatura o modelo de Overhults também é denominado como modelo de Page modificado (ALBINI et al., 2016).

Para verificar qual dos dois modelos melhor representou os dados de secagem, foi aplicado o teste qui-quadrado e o modelo selecionado foi o modelo de Page (1949) por apresentar o maior valor no teste.

Tabela 3.7 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Page (1949).

<b>Experimento</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b><math>\chi^2</math></b>
1	0,015522	1,209930	0,99232	0,0010
2	0,023744	0,969910	0,99627	0,0005
3	0,020819	0,949572	0,98899	0,0014
4	0,090446	0,897960	0,99817	0,0002
5	0,064689	0,825027	0,99409	0,0007
6	0,045620	0,865848	0,99236	0,0009
7	0,165016	0,780726	0,99689	0,0003
8	0,063221	0,896946	0,99809	0,0002
9	0,054238	0,879878	0,99553	0,0005
10 C	0,033145	0,912088	0,99608	0,0005
11 C	0,022221	0,978322	0,99132	0,0012

Tabela 3.8 – Parâmetros obtidos pelo modelo de Overhults et al. (1973).

<b>Experimento</b>	<b>k</b>	<b>n</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b><math>\chi^2</math></b>
1	0,031977	1,209910	0,99233	0,0010
2	0,021143	0,969905	0,99627	0,0005
3	0,016950	0,949569	0,98898	0,0014
4	0,068834	0,897960	0,99817	0,0002
5	0,036193	0,825009	0,99409	0,0010
6	0,028276	0,865835	0,99236	0,0013
7	0,099486	0,780725	0,99689	0,0003
8	0,046035	0,896945	0,99809	0,0002
9	0,036434	0,879877	0,99553	0,0005
10 C	0,023868	0,912091	0,99608	0,0000
11 C	0,020423	0,978332	0,99132	0,0016

Doymaz (2005) também verificou, no modelo de Page (1949), uma descrição satisfatória para a secagem tomates. Da mesma forma, Mwithiga e Olwal (2005), Kingsly e Singh (2007), Martinazzo et al. (2007, Orikasa et al. (2008) e Menezes et al. (2013) verificaram que a equação de Page (1949) foi a que melhor representou os dados da cinética

de secagem de couve, romã, capim limão, kiwi e bagaço de maracujá-amarelo, respectivamente.

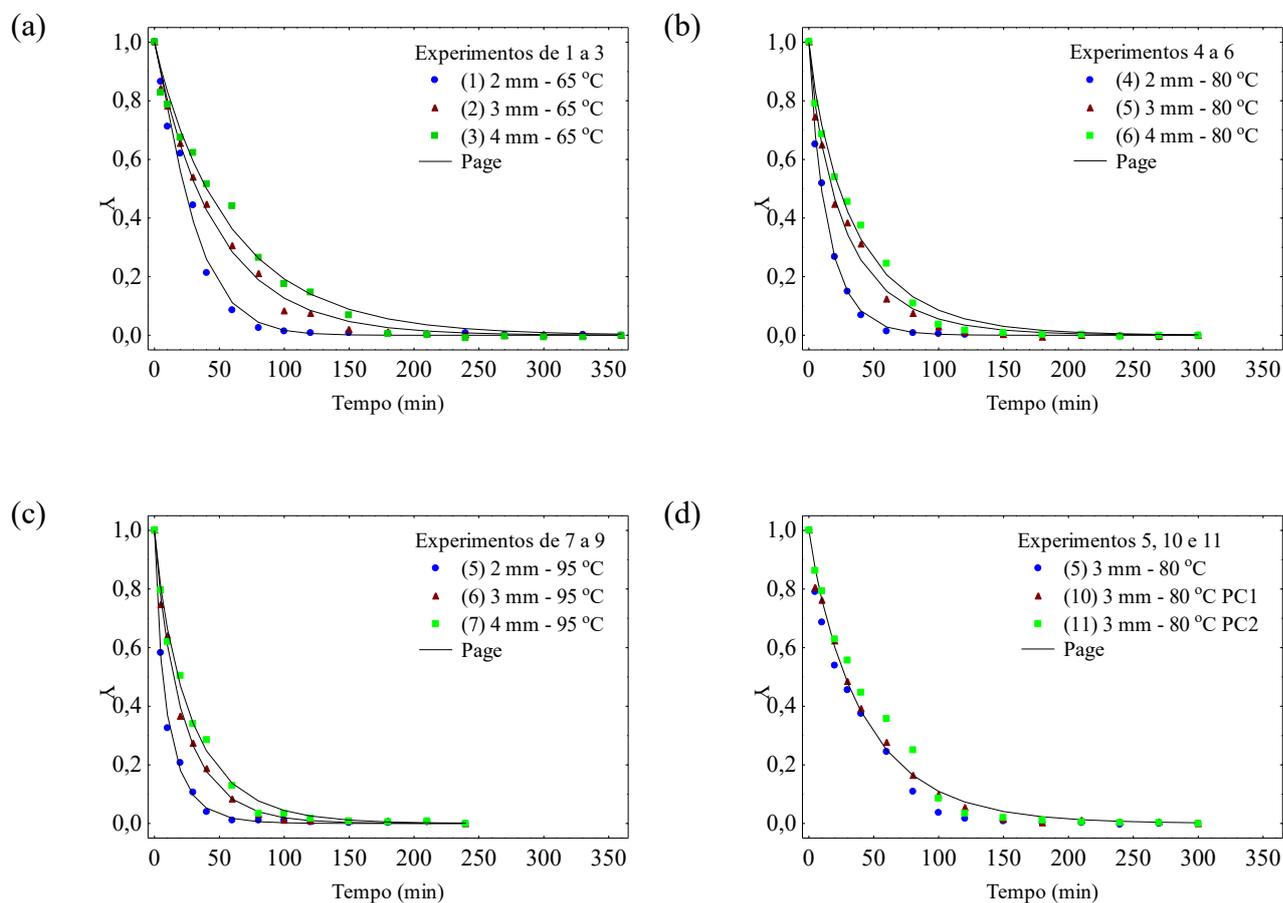
A partir dos parâmetros dos modelos foi possível construir as curvas da cinética de secagem para cada uma das condições experimentais estudadas. Nas curvas apresentadas na Figura 3.4, foi possível observar a influência da temperatura da água circulante e da espessura de espalhamento da amostra no processo de secagem, maximizando a remoção de água com a maior temperatura e com a menor espessura de espalhamento. Da mesma forma, esta constatação pode ser ratificada através das taxas de secagem no período de taxa constante para cada conjunto de condições avaliadas, conforme apresentado na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Taxa de secagem dos frutos de pimenta rosa no período de taxa constante.

Temperatura da água circulante (°C)	Espessura da pasta (mm)	Taxa de secagem (g de água/ g sól. seco.min)
		Média ± DP
65,0	2	0,0371 ± 0,0033
	3	0,0205 ± 0,0018
	4	0,0179 ± 0,0014
80,0	2	0,0521 ± 0,0094
	3	0,0315 ± 0,0049
	4	0,0209 ± 0,0025
95,0	2	0,0649 ± 0,0019
	3	0,0353 ± 0,0064
	4	0,0269 ± 0,0040

Comportamento semelhante foi observado por Zotarelli et al. (2015) na secagem de polpa de manga por RW onde elevadas temperaturas da água circulante e menores espessuras de espalhamento levaram a maiores taxas de secagem. Frabetti et al. (2018) verificaram, na secagem por CTD de polpa de goiaba a temperatura da água circulante de 98 °C, que camadas mais finas de espalhamento da polpa apresentaram maiores taxas de secagem e capacidade evaporativa.

Figura 3.4 - Curvas da cinética de secagem dos frutos de pimenta rosa por CTD: (a) experimentos de 1 a 3, (b) experimentos de 4 a 6, (c) experimentos de 7 a 9 e (d) experimentos de 5, 10 e 11.



As curvas apresentadas na Figura 3.4 validaram as condições de secagem com a máxima temperatura da água circulante, 95 °C, e a menor espessura de espalhamento, 2 mm, para alcançar o menor tempo de secagem, contribuindo para uma possível redução no consumo de energia. Neste sentido, verificou-se o impacto das condições de secagem avaliadas no planejamento fatorial no comportamento da umidade, da atividade de água, dos parâmetros de cor e na morfologia das partículas dos pós produzidos a partir da secagem.

Os resultados para as características do pó seco avaliadas, umidade, atividade de água ( $a_w$ ) e parâmetros de cor, dos pós produzidos estão apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Atividade de água ( $a_w$ ) e parâmetros de cor dos pós dos frutos de pimenta rosa obtidos em diferentes condições de secagem por CTD.

Experimento	Temperatura da água circulante (°C)	Espessura (mm)	Atividade de Água ( $a_w$ ) Média $\pm$ DP	L* Média $\pm$ DP	a* Média $\pm$ DP	b* Média $\pm$ DP
1	65,0	2,0	0,221 $\pm$ 0,004	16,41 $\pm$ 0,21	4,27 $\pm$ 0,10	10,62 $\pm$ 0,10
2	65,0	3,0	0,203 $\pm$ 0,004	17,37 $\pm$ 0,45	4,55 $\pm$ 0,18	10,68 $\pm$ 0,12
3	65,0	4,0	0,248 $\pm$ 0,003	17,45 $\pm$ 0,34	4,79 $\pm$ 0,11	11,23 $\pm$ 0,10
4	80,0	2,0	0,232 $\pm$ 0,019	14,17 $\pm$ 0,20	4,02 $\pm$ 0,13	9,71 $\pm$ 0,09
5	80,0	3,0	0,208 $\pm$ 0,009	16,29 $\pm$ 0,19	4,35 $\pm$ 0,06	10,51 $\pm$ 0,10
6	80,0	4,0	0,188 $\pm$ 0,003	16,58 $\pm$ 0,37	4,37 $\pm$ 0,05	10,62 $\pm$ 0,13
7	95,0	2,0	0,170 $\pm$ 0,001	14,32 $\pm$ 0,20	4,29 $\pm$ 0,16	10,33 $\pm$ 0,08
8	95,0	3,0	0,147 $\pm$ 0,007	15,71 $\pm$ 0,30	4,23 $\pm$ 0,06	10,29 $\pm$ 0,16
9	95,0	4,0	0,179 $\pm$ 0,002	17,01 $\pm$ 0,07	4,38 $\pm$ 0,07	10,96 $\pm$ 0,04
10 C	80,0 PC	3,0	0,189 $\pm$ 0,001	14,61 $\pm$ 0,28	3,96 $\pm$ 0,10	10,59 $\pm$ 0,07
11 C	80,0 PC	3,0	0,181 $\pm$ 0,009	15,92 $\pm$ 0,55	4,17 $\pm$ 0,12	10,91 $\pm$ 0,16

A análise estatística permite quantificar os efeitos de cada variável independente nas respostas estudadas (características do pó seco): umidade, atividade de água e parâmetros de cor. Neste sentido, os resultados experimentais de caracterização dos pós obtidos foram analisados estatisticamente com suporte do *software* Statistica (Statsoft Inc., Tulsa, EUA).

Por meio de uma regressão múltipla, além de quantificar os efeitos, parâmetros relacionados às variáveis isoladas, às interações e aos termos quadráticos foram estimados, obtendo um modelo empírico. As Equações 3.8 e 3.9 representam as variáveis independentes investigadas na forma adimensional (codificada). Estas variáveis são:  $X_1$ , que se refere à temperatura da água circulante ( $T$ ) e  $X_2$ , que se refere à espessura da camada espalhada ( $E$ ).

$$X_1 = \frac{(T [\text{°C}] - 80)}{15} \quad (3.8)$$

$$X_2 = \frac{(E [\text{mm}] - 3)}{1} \quad (3.9)$$

A determinação dos parâmetros significativos da regressão foi realizada por meio de um teste de hipótese utilizando um teste *t* de *Student* com nível de significância de 10 %, sendo desconsiderados os parâmetros com nível de significância maior que este valor.

O resultado de F calculado ( $F_C$ ) foi superior ao tabelado ( $F_T$ ), considerando um nível de significância de 1 %, para todas as respostas avaliadas. Esta comparação pode ser interpretada através de um teste de hipótese. A hipótese de nulidade ( $H_0$ ) diz que o modelo não é significativo, enquanto que a hipótese alternativa ( $H_1$ ) afirma que o modelo é significativo. Os resultados do teste F mostraram que pode-se rejeitar  $H_0$  no nível de significância de 1 %, ou seja, tem-se uma confiança de 99 % que o modelo é significativo.

As equações empíricas obtidas por regressão múltipla, para representar a variação da umidade, atividade de água e cor (parâmetros  $L^*$  e  $a^*$ ) em função das variáveis independentes estudadas são apresentadas nas Equações 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13, respectivamente.

$$Umidade = 0,0779 - 0,0161 * T + 0,0101 * E \quad R^2 = 92\% \quad (3.10)$$

$$a_w = 0,199 - 0,029 * T - 0,010 * E^2 \quad R^2 = 75\% \quad (3.11)$$

$$L^* = 16,09 - 0,70 * T - 0,43 * E + 1,02 * T^2 \quad R^2 = 82\% \quad (3.12)$$

$$a^* = 4,34 - 0,12 * T - 0,12 * E + 0,16 * T^2 \quad R^2 = 76\% \quad (3.13)$$

Para o parâmetro de cor  $b^*$ , o baixo valor do coeficiente de determinação indica que o modelo empírico obtido não foi adequado para explicar a variabilidade do croma no eixo amarelo-azul. Isso pode indicar que a variação temperatura da água circulante e da espessura de espalhamento, nas faixas investigadas, não resultou em alteração estatisticamente significativa para este parâmetro.

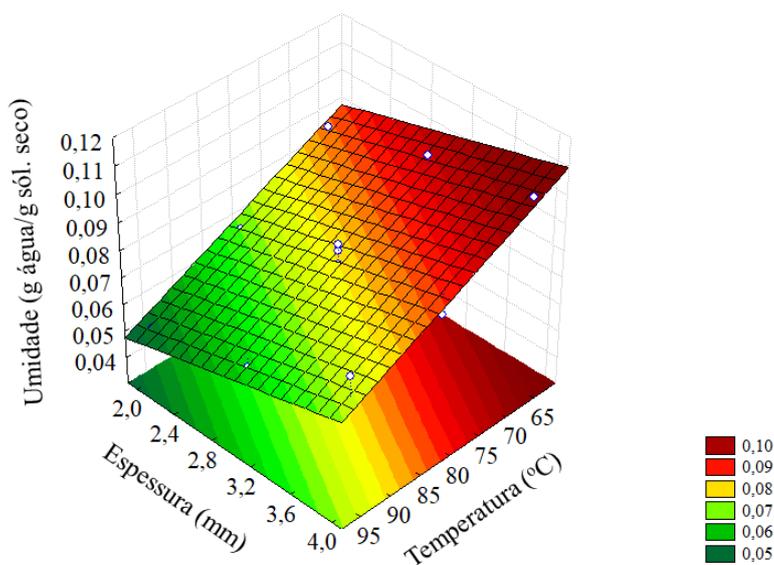
No que diz respeito à análise dos parâmetros das equações de regressão, nota-se que, com exceção do caso da resposta  $b^*$ , ambas as variáveis, temperatura da água circulante e espessura de espalhamento das amostras, influenciaram as demais respostas, seja através dos parâmetros relacionados às variáveis isoladas, ou às suas interações, ou ainda aos termos quadráticos.

Para equação do teor de umidade no produto seco foi encontrado um valor de 0,92 para o quadrado do coeficiente de correlação da regressão. Este valor indica que 92 % da variabilidade dos dados de teor de umidade no produto seco foram explicados pela Equação 3.10. Para equação da atividade de água no produto seco foi encontrado um valor de 0,89 para o quadrado do coeficiente de correlação da regressão. Este valor indica que 89 % da variabilidade dos dados da atividade de água no produto seco foram explicados pela Equação

3.11. Para os parâmetros de cor  $L^*$  e  $a^*$ , os valores encontrados para o quadrado do coeficiente de correlação da regressão foram respectivamente, 0,82 e 0,76. Estes valores indicam que 82 % e 76 % da variabilidade dos dados de luminosidade e do croma no eixo vermelho-verde no produto seco foram explicados pela Equações 3.12 e 3.13, respectivamente. Para todas as equações, os resíduos da regressão foram distribuídos de forma independente e aleatória de acordo com uma distribuição normal com média zero e variância constante. Os modelos obtidos e a análise estatística detalhada estão apresentados no Apêndice C.

O efeito das variáveis sobre o pó produzido é mais facilmente visualizado por meio de superfícies de resposta, as quais são mostradas nas Figuras 3.5 a 3.8. Estas figuras, para cada resposta, foram obtidas a partir das respectivas equações de regressão, mostradas nas Equações 3.10 a 3.13.

Figura 3.5 - Umidade final dos pós secos por *cast-tape drying*.

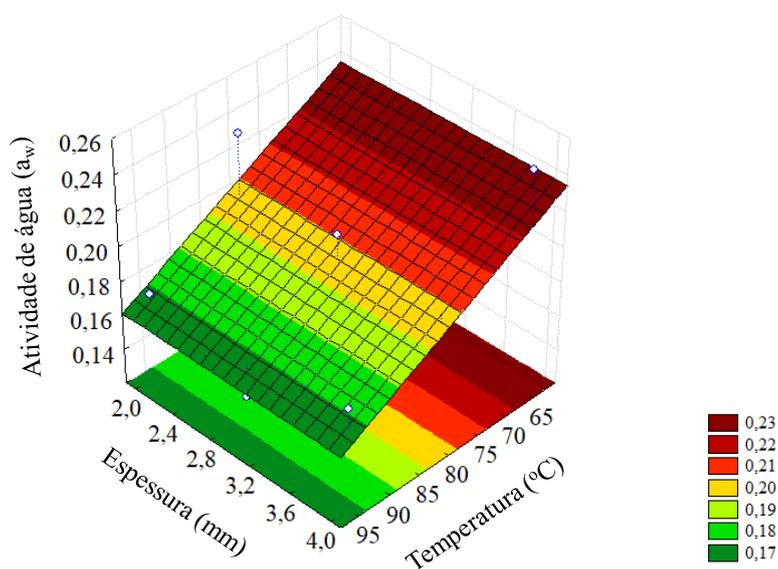


De acordo com a Figura 3.5, verificou-se que o aumento da temperatura de secagem, bem como a menor espessura de espalhamento favoreceu a produção do pó dos frutos de pimenta rosa por CTD com a menor umidade final, ou seja, para a temperatura da água circulante de 95 °C e espessura de espalhamento da amostra sobre o filme de poliéster do secador de 2 mm. Este comportamento provavelmente se deve a menor resistência à transferência de massa oferecida pela espessura de espalhamento de 2 mm, menor caminho para a migração de umidade das espessuras avaliadas, desde o interior até a superfície. Além

da transferência de calor que ocorreu entre a pasta de pimenta rosa e o ar de secagem provocada pelo maior gradiente de temperatura entre a amostra e o ar de secagem.

Para a atividade de água, conforme a Figura 3.6, os menores valores alcançados ocorreram no pó produzido na espessura de espalhamento da amostra sobre o filme de poliéster do secador de 3 mm e na temperatura da água circulante de 95 °C, embora para esta temperatura, os valores de atividade de água medidos estejam bastante próximos. Todos os resultados do planejamento para as condições avaliadas apresentaram atividade de água menor que 0,30, condição que torna todos os pós adequados ao armazenamento.

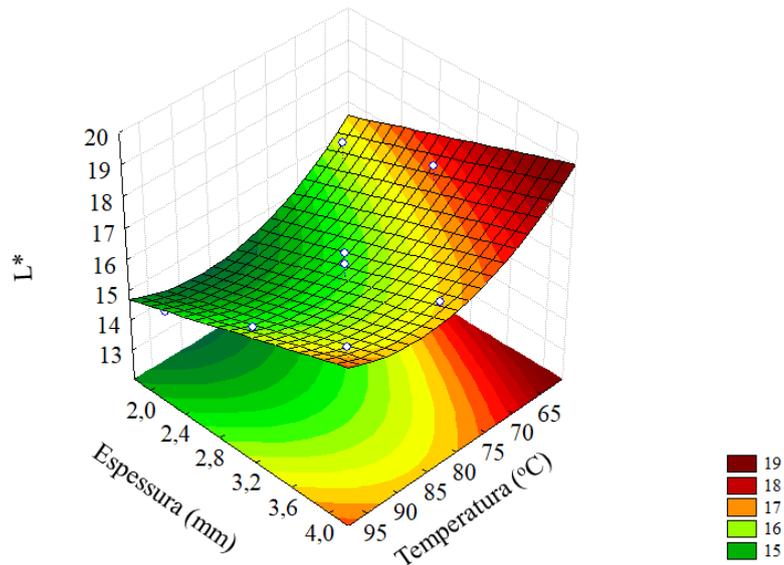
Figura 3.6 - Atividade de água ( $a_w$ ) dos pós secos por *cast-tape drying*.



O escurecimento dos alimentos processados, conforme observado na diminuição de  $L^*$  apresentada na Figura 3.7, como efeito das variáveis de processo, ocorre principalmente durante o processamento térmico e o armazenamento. O escurecimento durante o processamento térmico é devido ao escurecimento enzimático e, durante o armazenamento, é atribuído principalmente às reações não-enzimáticas, tais como: caramelização, degradação do ácido ascórbico e a reação de Maillard (BABSKEY et al., 1986; IBARZ et al., 1990). Quanto à variação dos parâmetros de cor dos pós produzidos, o pó com coloração mais clara, ou seja, maior luminosidade, foi o pó produzido a temperatura da água circulante de 65 °C e espessura de espalhamento da amostra sobre o filme de poliéster do secador de 4 mm, visto que alcançou o maior valor para o parâmetro  $L^*$  em relação aos pós produzidos nas demais condições. Neste sentido, o pó mais escuro foi produzido a temperatura da água circulante de

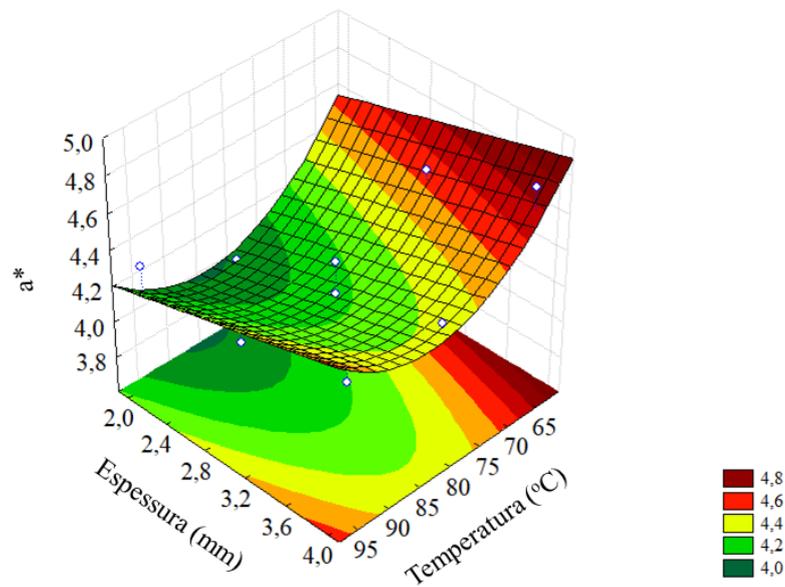
80 °C e espessura de espalhamento de 2 mm, o que demonstra que possivelmente o tempo de secagem tem influência neste parâmetro.

Figura 3.7 -  $L^*$  - Luminosidade dos pós secos por *cast-tape drying*.



Na Figura 3.8, com relação ao parâmetro  $a^*$ , o qual indica, quanto mais positivo o valor, a tendência ao vermelho, da mesma forma que o parâmetro luminosidade, o maior valor foi observado para a amostra do pó seca a temperatura da água circulante de 65 °C e espessura de espalhamento da amostra de 4 mm.

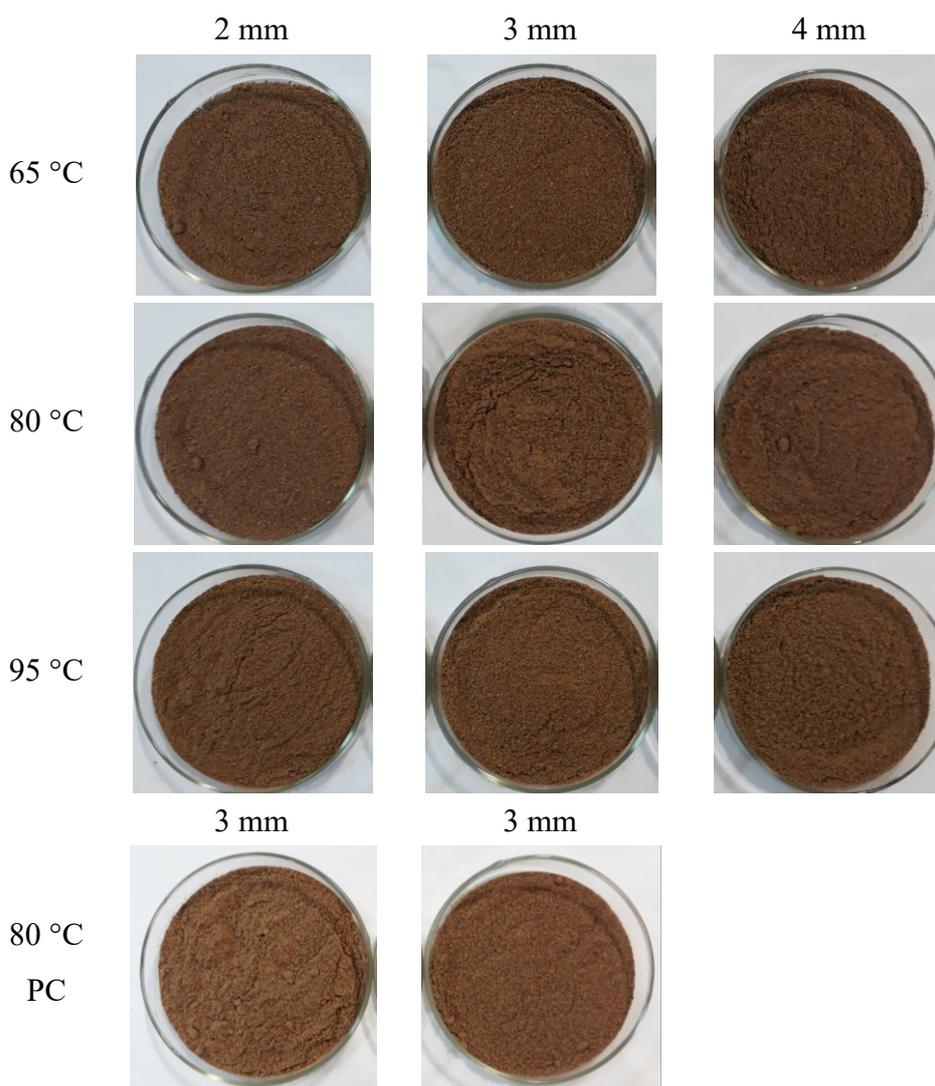
Figura 3.8 -  $a^*$  - croma no eixo vermelho-verde dos pós secos por *cast-tape drying*.



Para o parâmetro  $b^*$ , o qual indica, quanto mais positivo o valor, a tendência ao amarelo, novamente, de acordo com a Tabela 3.10, a condição de temperatura da água circulante de 65 °C e espessura de espalhamento da amostra de 4 mm, foi a que tendeu a apresentar maior valor, embora muito próximo das demais condições do planejamento.

O pó dos frutos de pimenta rosa que apresentou a maior variação nos parâmetros de cor em relação a amostra dos frutos *in natura*, com tratamento térmico, moída em moinho de facas que tem como parâmetros de cor:  $L^* = 17,71 \pm 0,06$ ;  $a^* = 4,22 \pm 0,08$  e  $b^* = 8,27 \pm 0,12$  foi produzido a temperatura da água circulante de 80 °C e espessura de espalhamento da amostra de 2 mm. Na Figura 3.9 estão apresentadas as fotografias dos pós produzidos após a secagem dos frutos de pimenta rosa por CTD.

Figura 3.9 - Fotografias dos pós dos frutos de pimenta produzidos segundo planejamento experimental.



Foi possível observar que visualmente os pós produzidos nas diferentes condições operacionais do equipamento apresentaram características muito semelhantes entre si, o que corrobora com a pouca variação dos valores dos parâmetros de cor apresentados na Tabela 3.10, e corrobora também, com o fato de o parâmetro  $b^*$  não apresentar efeito estatístico significativo para a variação das duas variáveis investigadas, nas faixas experimentais analisadas.

As amostras dos pós produzidos nas diferentes condições experimentais bem como a amostra *in natura*, branqueada, moída sem branqueamento e moída com branqueamento foram submetidas a microscopia eletrônica de varredura (MEV) conforme apresentado nas Figuras 3.10 e 3.11.

Figura 3.10 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 1.000 vezes para as amostras dos frutos de pimenta rosa desidratados por CTD.

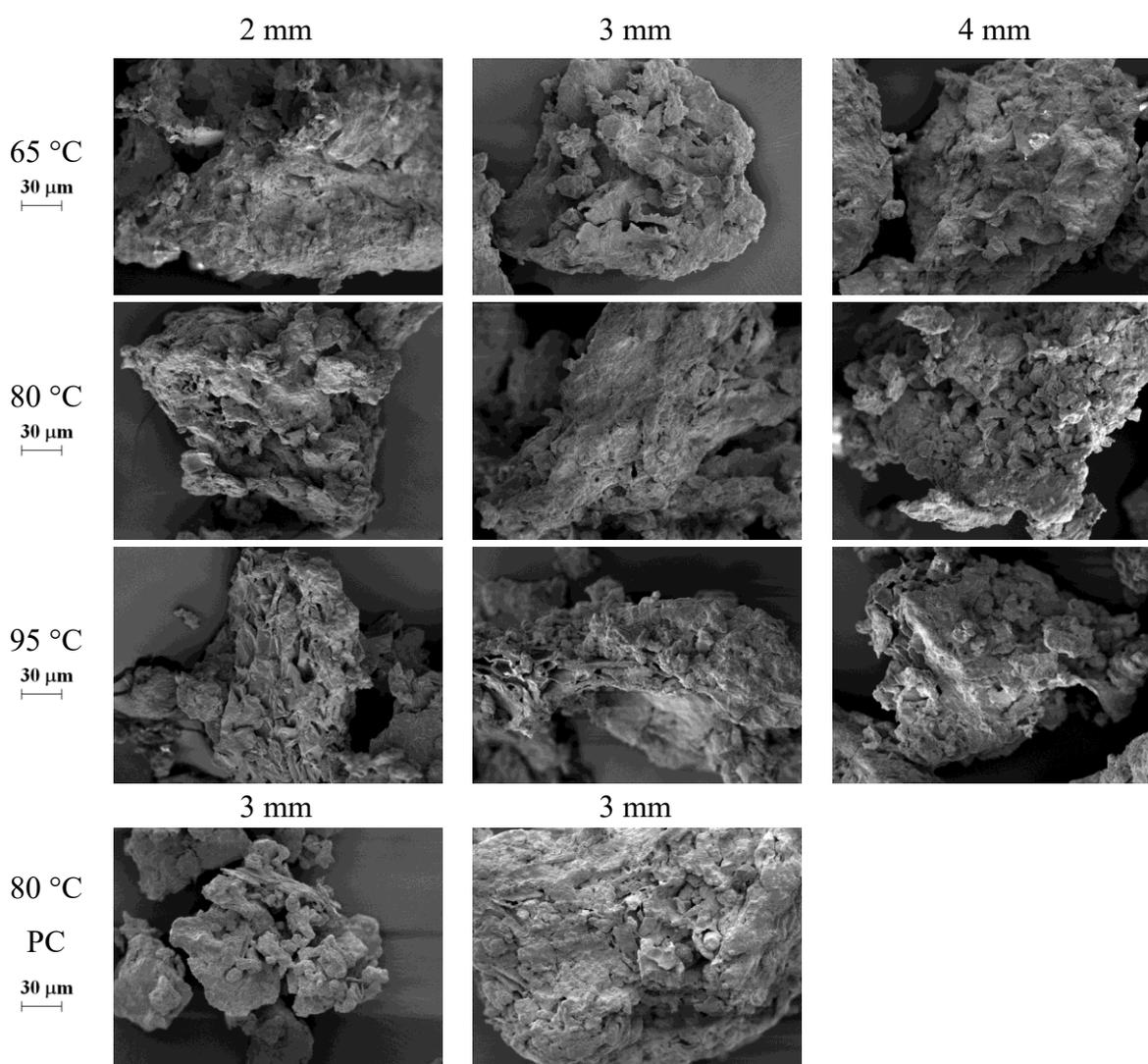
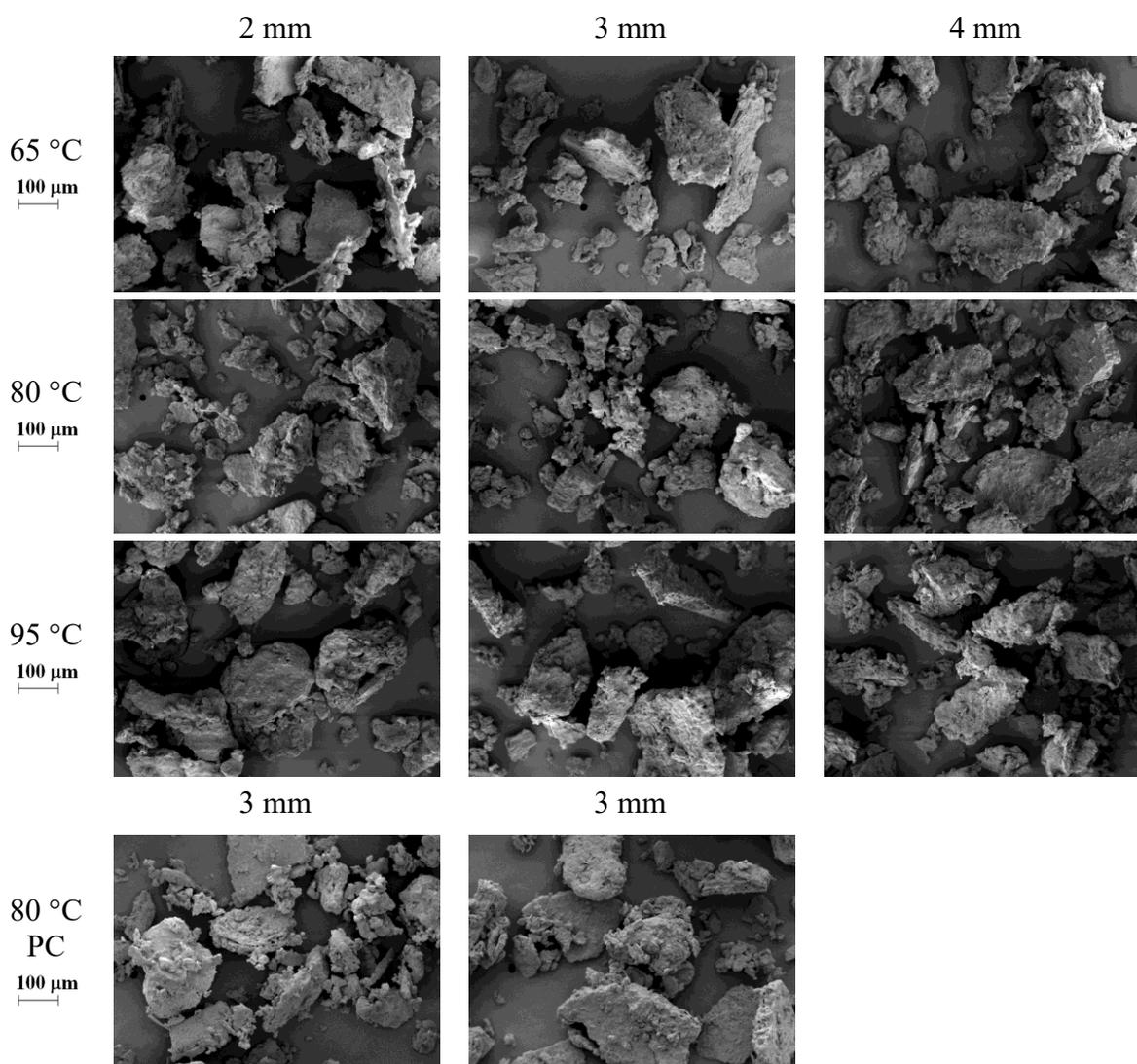


Figura 3.11 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) com ampliação de 300 vezes para as amostras dos frutos de pimenta rosa desidratados por CTD.



Conforme foi possível observar nas Figuras 3.10 e 3.11, todos os pós produzidos apresentam formato irregular uma vez que, na secagem por CTD há a necessidade da moagem/desintegração após a etapa de desidratação. Visualmente não houve diferença nas características das partículas com a variação das condições de secagem avaliadas, em todos os experimentos. Zotarelli et al. (2015), Durigon (2016) e Frabetti (2017), na secagem de polpas de manga, tomate e goiaba, respectivamente, também encontraram formato irregular nas partículas dos pós produzidos por CTD.

### 3.4 Conclusão

Os resultados demonstraram que o branqueamento de fato reduziu o escurecimento enzimático das amostras bem como aumentou a porosidade dos alimentos a partir do rompimento das membranas celulares alterando a porosidade da parede celular.

Dos modelos de cinética de secagem avaliados, o que melhor representou os resultados experimentais foi o modelo de Page (1949).

Através do planejamento experimental foi possível verificar que as variáveis estudadas influenciaram as características dos pós produzidos.

As taxas de secagem mais elevadas foram alcançadas nas condições de secagem de maior temperatura da água circulante (95 °C) e menor espessura de espalhamento da amostra (2 mm). Em todas as condições de secagem avaliadas a atividade de água e a umidade dos pós produzidos ficaram abaixo de 0,3 e 10 %, respectivamente.

Quanto à cor dos pós produzidos por CTD, a menor variação verificada em relação a amostra úmida foi a condição de secagem com a menor temperatura da água circulante e a maior espessura de espalhamento da amostra sobre o filme de poliéster.

Desta forma a secagem dos frutos de pimenta rosa por CTD é uma alternativa viável para a produção do pó de forma padronizada.

### 3.5 Referências

ALBINI, G.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Secagem de grãos de cevada (*Hordeum vulgare*) em leito fixo. **XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Fortaleza-CE, 2016.

ANDRADE, Kátia Suzana. **Extração e microencapsulamento de extratos de interesse biológico provenientes de pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.) e de pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* R.)**. 2015. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2015.

ANGEL, R. M. C. *et al.* Spray-drying of passion fruit juice using lactose maltodextrina blend as the support material. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba-PR, v. 52, n. 4, p. 1011-1018, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132009000400026>

BABSKY, N. E.; TORIBIO, J. L.; LOZANO, J. E. . Influence of storage on the composition of clarified apple juice concentrate. **Journal of Food Science**, v. 51, p. 564–567, 1986. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1986.tb13879.x>

BAEGHBALI, V., NIAKOUSARI, M. Evaluation of a batch refractance window dryer in drying of some heat sensitive food stuff. Iran. **Journal of Food Science and Technology**, v. 13, p. 185-192, 2015.

BERTOLDI, Michele Corrêa. **Atividade antioxidante in vitro da fração fenólica, das oleorresinas e do óleo essencial de pimenta rosa (*Schinus terebinthifolius* Raddi)**. 2006.

116 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2006.

BOX, G.E.P., HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. **Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building**. John Wiley and Sons Inc., New York, USA., ISBN-13: 9780471093152, 653p, 1978.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. *Drying cereals grains*. Westport. CT. USA, 265p, 1974.

CAPARINO, O.A. *et al.* Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine ‘Carabao’ var.) powder. **Journal of Food Engineering**, v. 111, p. 135-148, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.010>

CELLI, G.B. *et al.* Refractance Window™ drying of haskap berry-Preliminary results on anthocyanin retention and physicochemical properties. **Food Chemistry**, v. 194, p. 218-221. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.012>

COSTA, Juliana Nascimento da. **Estudo da estabilidade do maracujá (*Passiflora edulis* Sins f. *flavicarpa Degener*) em pó proveniente do cultivo orgânico**. 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Ceará, UFC, Fortaleza, 2012.

DEGÁSPARI, C. H.; WASZCZYNSKYJ, N.; PRADO, M. R. M. Atividade antimicrobiana de *Schinus terebenthifolius* Raddi. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 3, p. 617-622, 2005.

DOYMAZ, I. Air-drying characteristics of tomatoes. **Journal of Food Engineering**, v.78, p. 1291-1297, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.047>

DURIGON, Angelise. **Produção e caracterização de tomate em pó por cast-tape drying**. 2016. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2016.

EL-SAFY, F.S. Drying characteristics of loquat slices using different dehydration methods by comparative evaluation. **World Journal of Dairy & Food Science**, v. 9, p. 272-284, 2014.

FRABETTI, Ana Caroline Cichella. **Produção e caracterização da polpa de goiaba (*Psidium guajava* L.) em pó por cast-tape drying**. 2017. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2017.

FRABETTI, A. C. C.; DURIGON A.; LAURINDO, J. B. Effect of process variables on the drying of guava pulp by cast-tape drying. **Food Science and Technology**, v. 96, p. 620–626, 2018.

HENDERSON, J. M.; HENDERSON, S. M. A computational procedure for deep-bed drying analysis. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 13, p. 87-95, 1968. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(68\)90084-X](https://doi.org/10.1016/0021-8634(68)90084-X)

HIRANVARACHAT, B. *et al.* Structural modification by different pretreatment methods to enhance microwave-assisted extraction of  $\beta$ -carotene from carrots. **Journal of Food Engineering**, v. 115, p. 190–197, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.012>

IBARZ, I. *et al.* Nonenzymatic browning kinetics of clarified peach juice at different temperatures. **Confructa**, v. 34, p. 152 - 159, 1990.

JAFARI, S. M. *et al.* Comparing quality characteristics of oven-dried and refractance window-dried kiwifruits. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 40, p. 362-372, 2016. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12613>

KINGSLEY, A. R. P.; SINGH, D. B. Drying kinetics of pomegranate arils. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 741-744, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.033>

LEICA MICROSYSTEMS, 2013. Disponível em: [https://www.leica-microsystems.com/fileadmin/academy/2013/WF\\_Critical\\_Point\\_Drying\\_07\\_13.pdf](https://www.leica-microsystems.com/fileadmin/academy/2013/WF_Critical_Point_Drying_07_13.pdf). Acesso em: 03 fev. 2019.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solids materials. **Indian Chemical Engineer**. v. 13, p. 427, 1921.

MARTINAZZO, A. P. *et al.* Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 301-306, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000300009>

MENEZES, M. L. *et al.* Análise da cinética e ajustes de modelos matemáticos aos dados de secagem do bagaço de maracujá-amarelo. **Engevista**, v. 15, n. 2, p. 176-186, 2013. <https://doi.org/10.22409/engevista.v15i2.443>

MWITHIGA, G.; OLWAL, J. O. The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. **Journal of Food Engineering**, v. 71, p. 373-378, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.10.041>

MYERS, R. H. **Response surface methodology**. Blacksburg, VA: Author. 1976.

ORIKASA, T. *et al.* Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying. **Journal of Food Engineering**, v. 85, p. 303-308, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.07.005>

OVERHULTS, D. G. *et al.* Drying soybeans with heated air. **Transactions of the ASAE**. v. 16. p. 112-113. 1973. <https://doi.org/10.13031/2013.37459>

PAGE, G. E. Factor influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layer. Purdue University, West Lafayette. IN. USA, 1949.

RAGHAVI, L. M.; MOSES, J. A.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Refractance window drying of foods: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 222, p. 267-275, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.032>

REY, L. Fundamental aspects of lyophilization. **Aspect Théoriques et Industriels de la Lyophilization**. Paris. Hermann, p. 23-43, 1964.

SEVERINI, C. *et al.* Combined treatments of blanching and dehydration: study on potato cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 68, p. 289–296, 2005.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.045>

SHAHIDI, F.; NACZK, M. **Food phenolics: sources, chemistry, effects and applications**. 1 ed. Lancaster: Technomic Publishing Co. Inc, 331p, 1995.

VERDI, J. *et al.* Avaliação da composição centesimal, teor de fenólicos e carotenoides em pimenta – rosa (*Schinus terebinthifolius*). In: 11º SLACA. ISSN:2147-2840, v. 2, 2015.

XU, G. *et al.* Effect of heat treatment on the phenolic compounds and antioxidant capacity of citrus peel extract. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v. 55, p. 330–335, 2007.

<https://doi.org/10.1021/jf0625171>

ZOTARELLI, M. F.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. **Food Research International**, v. 69, p. 410–417, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.013>

#### 4 CONCLUSÕES FINAIS

A aroeira é uma árvore nativa da costa brasileira que tem como fruto a pimenta rosa, também conhecido internacionalmente como *brazilian pepper*. Os frutos de pimenta rosa quando recém colhidos apresentam elevadas atividade de água e substratos, o que favorece a ação das enzimas e alterações fisiológicas tendo como consequências perdas de princípios ativos e de compostos voláteis, além das alterações de cor e textura. A padronização das operações e condições de secagem leva a um produto seco de qualidade com propriedades funcionais preservadas. Baseado nas conclusões de cada capítulo, as conclusões finais que podem ser consideradas desse trabalho são:

- A redução de tamanho dos frutos de pimenta rosa foi possível nas três metodologias empregadas. Na condição das amostras sem tratamento térmico, a metodologia que melhor preservou a umidade dos frutos *in natura* e a que apresentou a menor elevação de temperatura da amostra durante a etapa de redução de tamanho foi a trituração em multiprocessador doméstico, nestas condições, para que as amostras atingissem a consistência de pasta que permitisse o espalhamento foi necessária a adição de água às amostras após a redução de tamanho.
- O branqueamento empregado nos frutos de pimenta rosa melhorou o preparo da amostra para secagem por *cast-tape drying*, sendo que, para as amostras branqueadas a metodologia mais adequada à redução de tamanho dos frutos foi a moagem em moinho de facas deixando a amostra na consistência adequada ao espalhamento e reduzindo o escurecimento enzimático.
- Dos modelos de cinética de secagem avaliados, o que melhor representou os resultados experimentais foi o modelo de Page (1949). Através do planejamento experimental foi possível verificar que as variáveis estudadas influenciaram as características dos pós produzidos.
- As taxas de secagem mais elevadas foram alcançadas nas condições de secagem de maior temperatura da água circulante e menor espessura de espalhamento da amostra. Em todas as condições de secagem avaliadas a atividade de água e a umidade dos pós produzidos ficaram abaixo de 0,3 e 10 % respectivamente.
- Quanto à cor dos pós produzidos por CTD, a menor variação verificada em relação a amostra úmida foi a condição de secagem com a menor temperatura

da água circulante e a maior espessura de espalhamento da amostra sobre o filme de poliéster.

- A secagem dos frutos de pimenta rosa por CTD é uma alternativa viável para a produção do pó de forma padronizada.

### SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

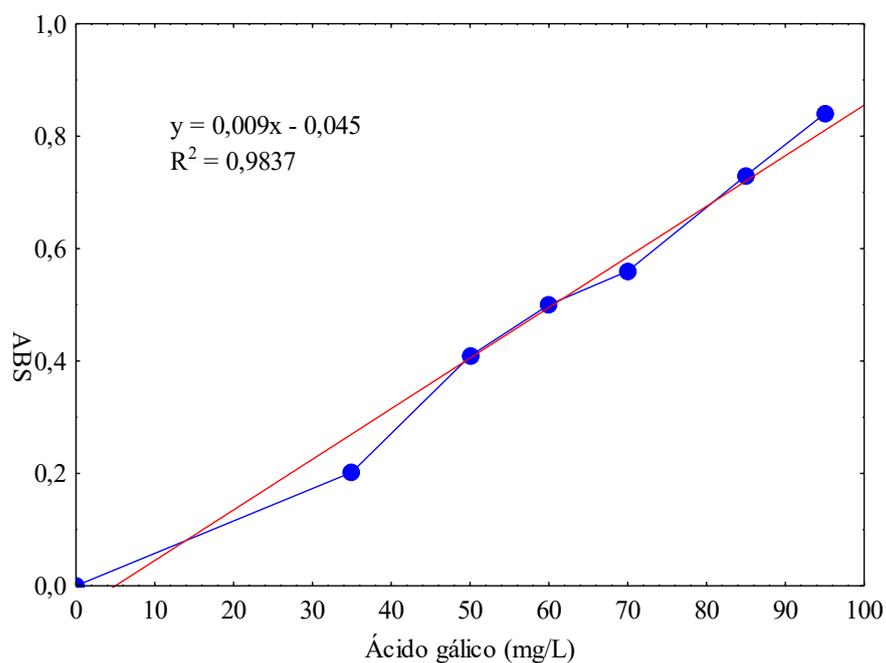
- Quantificação dos compostos fenólicos totais dos pós produzidos.
- Análise nutricional dos pós produzidos nos extremos das condições de secagem, 95 °C e 2 mm e 65 °C e 4 mm.
- Aplicação dos pós produzidos, em diferentes proporções, na fabricação de queijos condimentados e outros produtos perecíveis.
- Análise sensorial e avaliação do *shelf-life* dos queijos produzidos.
- Secagem dos frutos de pimenta rosa por outras metodologias de desidratação.
- Secagem de outras pimentas por CTD.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A - CURVA PADRÃO DE ÁCIDO GÁLICO

Nesta seção é apresentada a curva padrão de ácido gálico utilizada para a quantificação dos compostos fenólicos totais, bem como a equação e o coeficiente de correlação.

Figura 1A - Curva padrão de ácido gálico utilizada para quantificação dos compostos fenólicos totais com reagente Folin-Ciocalteu.



## APÊNDICE B - PARÂMETROS OBTIDOS PELOS MODELOS DA LITERATURA

Nesta seção são apresentados os parâmetros para os demais modelos da literatura para cinética de secagem avaliados. Estão representados também os coeficientes de determinação de cada modelo. O nível de significância adotado foi de 95 % ( $\alpha=0,05$ ).

Tabela 1B – Parâmetros obtidos pelo modelo de Lewis (1921).

<b>Experimento</b>	<b>k</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
1	0,032134	0,98803
2	0,021108	0,99610
3	0,016859	0,98844
4	0,068174	0,99663
5	0,035538	0,98714
6	0,027871	0,98824
7	0,097533	0,99007
8	0,045856	0,99618
9	0,036143	0,99248
10 C	0,023746	0,99442
11 C	0,020392	0,99122

Tabela 2B – Parâmetros obtidos pelo modelo de Henderson; Henderson (1968).

<b>Experimento</b>	<b>k</b>	<b>a</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
1	0,033046	0,921587	0,98859
2	0,020397	0,876597	0,99687
3	0,015887	0,859214	0,99110
4	0,066176	0,878493	0,99716
5	0,032629	0,844970	0,99124
6	0,025783	0,848814	0,99206
7	0,094557	0,878536	0,99061
8	0,044372	0,877565	0,99685
9	0,034329	0,865620	0,99416
10 C	0,022456	0,863038	0,99649
11 C	0,019800	0,879643	0,99186

Tabela 3B – Parâmetros obtidos pelo modelo de Brooker et al. (1974).

<b>Experimento</b>	<b>k</b>	<b>a</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
1	0,033046	1,02398	0,98859
2	0,020397	0,973997	0,99687
3	0,015887	0,015887	0,99110
4	0,066176	0,976104	0,99717
5	0,032629	0,938857	0,99124
6	0,025783	0,943127	0,99206
7	0,094557	0,976152	0,99061
8	0,044372	0,975072	0,99685
9	0,034329	0,961800	0,99416
10 C	0,022456	0,958931	0,99649
11 C	0,019800	0,977384	0,99186

## APÊNDICE C - ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS SUPERFÍCIES DE RESPOSTA

Nesta seção são apresentadas as análises estatísticas das superfícies de resposta obtidas para umidade, atividade de água, e parâmetros de cor  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ . Estão representadas as variáveis significativas e os modelos utilizados para a construção das superfícies. O nível de significância adotado foi de 90 % ( $\alpha=0,10$ ).

Figura 3.5 – Umidade.

Termos Significantes		Parâmetros	t de Student	p
Constante		0,07794	52,96359	0,000000
Temperatura	T	-0,01612	-8,08929	0,000040
Espessura	E	0,01010	5,07113	0,000964

$$Umidade = 0,07794 - 0,01612 * T + 0,01010 * E$$

$$R^2 = 0,91932$$

Figura 3.6 – Atividade de Água ( $a_w$ ).

Termos Significantes		Parâmetros	t de Student	p
Constante		0,199433	39,35872	0,000000
Temperatura	T	-0,029389	-4,40868	0,002260
Espessura <sup>2</sup>	E <sup>2</sup>	-0,010509	-2,12581	0,066224

$$a_w = 0,19943 - 0,02939 * T - 0,01050 * E^2$$

$$R^2 = 0,74965$$

Figura 3.7 – Luminosidade ( $L^*$ ).

Termos Significantes		Parâmetros	t de Student	p
Constante		16,08933	86,28358	0,000000
Temperatura	T	-0,69889	-2,84891	0,024727
Espessura	E	-0,43100	-2,36903	0,049677
Temperatura <sup>2</sup>	T <sup>2</sup>	1,02333	4,17146	0,004182

$$L^* = 16,08933 - 0,69889 * T - 0,43100 * E + 1,02333 * T^2$$

$$R^2 = 0,81643$$

Figura 3.8 – a\*.

Termos Significantes		Parâmetros	t de Student	p
Constante		4,336079	102,5065	0,000000
Temperatura	T	-0,118889	-2,1364	0,070009
Espessura	E	-0,122549	-2,9694	0,020827
Temperatura <sup>2</sup>	T <sup>2</sup>	0,160550	2,8850	0,023483

$$a^* = 4,33608 - 0,11889 * T - 0,12255 * e + 0,16055 * T^2$$

$$R^2 = 0,75613$$