

Angelise Durigon

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TOMATE EM PÓ
POR *CAST-TAPE DRYING***

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito à obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Alimentos. Área de concentração: Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Augusto Mattar Carciofi

Florianópolis
2016

Ficha de identificação
Biblioteca

Angelise Durigon

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TOMATE EM PÓ
POR *CAST-TAPE DRYING***

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

Florianópolis, 4 de março de 2016.

Prof. Marco Di Luccio, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

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

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

Prof. Paulo Jose do Amaral Sobral, Dr.
Universidade de São Paulo (Videoconferência)

Prof.^a Florencia Cecilia Menegalli, Dr.^a
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Pedro Henrique Hermes de Araújo, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Giustino Tribuzzi, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

*Dedico este trabalho aos meus pais
Hélio e Enelice, aos meus irmãos
Angela e Hélio Henrique, ao meu
amor Joaquim e aos meus avós.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus que me protege, ilumina e guia! Agradeço a Ele pela minha família, meu trabalho, minha saúde e pelas pessoas que Ele coloca na minha vida.

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

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

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

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

À minha amiga e professora Marta Zotarelli por toda ajuda durante esse trabalho, pela troca de conhecimento, pela confiança e carinho.

À Paula Gimenez e à Emanuelle Parisotto do nosso grupo de estudos, trabalhos e pesquisas pelas trocas de conhecimento, pela amizade e pelos momentos descontraídos. À Ana Caroline e à Marlena pela amizade e ajuda nos experimentos.

Aos meus pais Hélio e Enelice pelo amor, incentivo, carinho e proteção. Por entender a minha ausência, pelos conselhos e por não medir esforços para me ajudar a conquistar esse objetivo. Eu amo vocês!

Aos meus irmãos Angela e Hélio Henrique, ao Joaquim e ao Júnior todo o meu amor e minha gratidão.

Aos meus avós, Iole, Darci e Filomena por esperar ansiosos eu ir vê-los, pelo incentivo e amor.

Ao meu amor Fernando pelo apoio, pelo orgulho que sentes de mim, por entender minha profissão e pelo incentivo.

Ao meu amigo Douglas e minhas amigas Fernanda, Bianca, Jacqueline e Simone pelo amor, amizade, conselhos e momentos especiais divididos. Bia obrigada pelos longos anos de convivência diária e pela irmandade.

À turma do Programa de Pós-graduação do ano de 2012 pelos grupos de estudos, pelas trocas de conhecimento e pelas confraternizações. Pelas amizades!

À professora Neila Richards pela ajuda, incentivo, coleguismo e amizade.

Aos demais colegas do PROFÍ que de uma forma ou outra contribuíram para a realização desse estudo.

Aos alunos Fábio, Emanuelle, Ana Carolina e Filipi da disciplina de trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Alimentos os quais tive o prazer de trabalhar em parceria.

Ao Marcos meu fisioterapeuta e a Rosane minha psicóloga por todo o profissionalismo e por ajudar a aliviar minhas dores. Sem vocês essa jornada seria complicada.

A CAPES pela bolsa de estudos.

“Aprende que as circunstâncias e os ambientes têm influência sobre nós, mas nós somos responsáveis por nós mesmos. Começa a aprender que não se deve comparar com os outros, mas com o melhor que pode ser.”

(Veronica Shoffstall)

RESUMO

O *cast-tape drying* (CTD) é um processo de secagem condutivo, em que uma fina camada do alimento pastoso é espalhada sobre um suporte flexível. O objetivo central deste estudo foi investigar a aplicação da secagem por CTD na produção de tomate em pó e avaliar as propriedades do produto obtido. Vários estudos foram realizados para compreender os diferentes aspectos que influenciam o processo de secagem e as propriedades do produto desidratado. Avaliou-se o uso de vapor e água como meios de aquecimento e dois tipos de suportes (*Mylar* e *Teflon*), além da influência da convecção forçada na taxa de secagem. A fonte de aquecimento e o tipo de suporte não influenciaram as taxas de secagem e a capacidade evaporativa do processo. No entanto, a convecção forçada sobre a superfície superior da polpa aumentou as taxas de secagem e a capacidade evaporativa do processo. A influência da adição de maltodextrina na secagem do suco de tomate foi investigada. As características físico-químicas e a estabilidade dos pós de tomate obtidos por CTD (com e sem maltodextrina) foram comparadas com as de pós de tomate obtidos por *spray drying* (com maltodextrina) e por liofilização. A adição de maltodextrina reduziu a taxa de secagem, mas facilitou a remoção do produto do suporte. O pó de tomate resultante do processo CTD apresentou valores de T_g similares à do pó produzido por *spray drying* (com maltodextrina). Os pós de tomate produzidos por *spray drying* apresentaram formato das partículas esféricas e com coloração mais clara. No processo por *spray drying* ocorre com facilidade a aglomeração e aderência das partículas à parede do secador. As propriedades físico-químicas dos pós de tomate obtidos por CTD (com e sem maltodextrina), *spray drying* e liofilização e os comportamentos reológicos após reidratação foram avaliados. Os pós adicionados de maltodextrina apresentaram menor tempo de dispersão em água, com solubilidade de 95%. As polpas reconstituídas são fluidos pseudoplásticos, com tensão de residual característica de produtos de tomate. Esses resultados indicam que a produção de tomate em pó desidratado por CTD é uma alternativa viável para aplicação industrial, tendo em vista os tempos reduzidos de processo e a alta capacidade evaporativa do sistema, somadas às características físico-químicas dos pós de tomate resultantes.

Palavras chave: Secagem, tomate, pós, recobrimento, liofilização, *spray drying*.

ABSTRACT

Cast-tape drying (CTD) is a conductive drying process, in which a thin layer of a liquid material is spread on an over flexible support. The flexible support must have low surface energy to facilitate removal of the dried product. The main objective of this study was to investigate the application of drying CTD in the production of dehydrated tomato powder and evaluate the properties of the product. Studies were performed to understand the different factors that influence the drying process and the dehydrated product properties. The use of steam and water as heating sources and two supports types (Mylar and Teflon) was evaluated and was well influence of convection in the drying rate. The heating source and support type did not influence the drying rates and evaporative capacity of the process. However, the forced convection on the upper pulp surface increased the drying rates and the evaporative capacity. The influence of the addition of maltodextrin (10 DE) in the drying of tomato juice was investigated. The tomato powder physicochemical properties and stability obtained by CTD (with or without maltodextrin) were compared with those produced by freeze and spray drying (with maltodextrin). Despite reducing CTD rate, the maltodextrin added to the tomato juice reduced the powder's stickiness, thus facilitating removal from the support surface. The tomato powder obtained by CTD process showed T_g values similar those produced by spray drying (maltodextrin). The tomato powder obtained by spray drying showed spherical structure, lighter color, easier particle agglomeration and adherence to the spray dryer wall. The tomato powders physicochemical properties produced by CTD (with and without maltodextrin), freeze and spray drying (with maltodextrina) and the rheological behavior when rehydrated were investigated. Tomato powders with maltodextrin showed lower dispersion time in water, with solubility of 95%. The re-hydrated pulps showed pseudo plastic behavior, with residual shear stress, characteristic of products derived from tomato. These results indicate that CTD is a viable alternative for producing tomato powders, due to reduced process times and high evaporative capacity, together with the physicochemical properties of the tomato powders.

Keywords: Drying, tomato, powder, coating, freeze drying, spray drying.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 TOMATE.....	9
2.1.1 Tomate do tipo Italiano (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill)	11
2.2 SECAGEM.....	11
2.2.1 Fundamentos da secagem	11
2.3 PROCESSOS DE SECAGEM POR ESPALHAMENTO.....	14
2.3.1 Refractance window	14
2.3.1.1 <i>Mecanismos de transferência de calor na secagem por refractance window</i>	16
2.3.2 Tape-casting	22
2.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE EM ALIMENTOS DESIDRATADOS EMPÓ.....	23
2.4.1 Atividade de água e isothermas de sorção de umidade	23
2.4.2 Transição vítrea	25
2.4.2.1 <i>Fenômenos físicos relacionados à transição vítrea</i>	27
2.4.3 Reidratação dos alimentos em pó	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
3. INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE PROCESSO NA SECAGEM DA POLPA DE TOMATE POR CAST-TAPE	38
3.1 INTRODUÇÃO.....	38
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.2.1 Preparo da matéria-prima	40
3.2.2 Testes preliminares	49
3.2.3 Processos de secagem	40
3.2.3.1 <i>Aparato experimental</i>	41
3.2.3.2 <i>Condições de secagem</i>	43
3.2.4 Cinéticas de secagem da polpa de tomate	45
3.2.5 Evolução temporal da temperatura da polpa de tomate	45
3.2.6 Capacidade evaporativa (CE)	46
3.2.7 Determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor (h)	46
3.2.8 Fluxos de calor envolvidos no processo CTD	48
3.2.9 Atividade de água	49
3.2.10 Análise estatística	49
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49

3.3.1	Evolução temporal da umidade, taxas de secagem e capacidade evaporativa	50
3.3.2	Evolução temporal da temperatura da água, da polpa de tomate, da superfície inferior dos suportes e do ar	54
3.3.3	Coefficiente convectivo de transferência de calor e fluxos de calor.....	59
3.3.4	Atividade de água do pó de tomate.....	62
3.4	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
4.	SECAGEM, CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA ESTABILIDADE DE PÓS DE TOMATE DESIDRATADOS POR CAST-TAPE DRYING, SPRAY DRYING E LIOFILIZAÇÃO.....	68
4.1	INTRODUÇÃO	68
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	70
4.2.1	Preparo da matéria-prima	70
4.2.2	Caracterização do suco de tomate	70
4.2.3	Processos de secagem e dispositivo experimental.....	71
4.2.3.1	<i>Cast-tape drying</i>	71
4.2.3.2	<i>Spray drying</i>	72
4.2.3.3	<i>Liofilização</i>	72
4.2.4	Umidade e atividade de água	73
4.2.5	Cor.....	73
4.2.6	Carotenoides totais.....	73
4.2.7	Microscopia	74
4.2.8	Isoterma de sorção	74
4.2.9	Temperatura de transição vítrea	75
4.2.10	Análise estatística	76
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.3.1	Caracterização do suco de tomate	76
4.3.2	Secagem do suco de tomate	77
4.3.4	Caracterização dos pós	81
4.3.4.1	<i>Umidade e atividade de água</i>	81
4.3.4.2	<i>Cor, carotenoide total e micrografia dos pós</i>	82
4.3.4.3	<i>Isoterma de sorção de água, temperatura de transição vítrea e pegajosidade</i>	86
4.4	CONCLUSÃO	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
5.	REIDRATAÇÃO DOS PÓS DE TOMATE OBTIDOS POR CAST-TAPE DRYING, SPRAY DRYING E LIOFILIZAÇÃO.....	98

5.1 INTRODUÇÃO	98
5.2 MATERIAIS E MÉTODOS	99
5.2.1 Preparo das amostras.....	99
5.2.1.1 <i>Reidratação dos pós de tomate</i>	99
5.2.2 Caracterização dos pós de tomate.....	100
5.2.2.1 <i>Tempo de dispersão.....</i>	100
5.2.2.2 <i>Distribuição do tamanho da partícula</i>	100
5.2.2.3 <i>Massa específica aparente, massa específica real e</i> <i>porosidade.....</i>	100
5.2.2.4 <i>Solubilidade.....</i>	101
5.2.3 Caracterização dos pós de tomate reidratados	101
5.2.3.1 <i>Sólidos solúveis, umidade e atividade de água</i>	101
5.2.3.2 <i>pH.....</i>	102
5.2.3.3 <i>Acidez titulável</i>	102
5.2.3.4 <i>Cor.....</i>	102
5.2.3.5 <i>Microscopia óptica.....</i>	103
5.2.3.6 <i>Consistência de Bostwick.....</i>	103
5.2.3.7 <i>Comportamento reológico dos pós de tomate reidratados</i>	103
5.2.3.8 <i>Análise estatística.....</i>	104
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
5.3.1 Caracterização dos pós de tomate.....	104
5.3.2 Caracterização dos sucos de tomate (com e sem maltodextrina) e dos pós de tomate reidratados.....	109
5.3.3 Comportamento reológico dos pós de tomate reidratados	116
5.4 CONCLUSÃO.....	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	130
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	130
6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - (a) Curva típica de secagem. (b) Curva da taxa de secagem em função da umidade.....	12
Figura 2.2 - Esquema de um secador <i>refractance window</i>	14
Figura 2.3 - Representação esquemática do circuito térmico no <i>Refractance Window</i>	16
Figura 2.4 - Poder emissivo espectral de corpos negros.	19
Figura 2.5 - Dados de transmissividade do <i>Mylar</i> (0,25 mm).....	20
Figura 2.6 - Aparato experimental <i>tape-casting</i>	22
Figura 2.7 - Tipos de isotermas de sorção.....	24
Figura 2.8 - Evolução da temperatura de transição vítrea de um alimento no processo de secagem.	26
Figura 2.9 - Dispersão de partículas aglomeradas dos pós em um líquido.	29
Figura 3.1 - Esquema do aparato experimental <i>cast-tape drying</i> (CTDA-E)	41
Figura 3.2 - Aparato experimental do <i>cast-tape drying</i> (CTDV-EV e CTDVT-EV). Detalhes: (a) tanque e (b) tanque e cabine de exaustão e ventilação.	42
Figura 3.3 – Posições dos termopares para medida da temperatura da polpa (T1, T2 e T3) e do ar (T4, T5, T6, T7, T8 e T9), e da posição do anemômetro (V1, V2, V3 e V4) para a leitura de velocidade do ar.	44
Figura 3.4 - Evolução temporal da umidade da polpa de tomate seca por <i>cast-tape drying</i> em diferentes condições de processo CTDA-E, CTDV-E, CTDV-EV e CTDVT-EV. CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-E – vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão e ventilação. CTDVT-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme teflonado (suporte) e uso de exaustão e ventilação.....	51
Figura 3.5 – Perfil de velocidade do ar dos processos de secagem (a) CTDA-E, (b) CTDV-E e (c) CTDV-EV e CTDVT-EV. CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-E – vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão e ventilação. CTDVT-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme teflonado (suporte) e uso de exaustão e ventilação.	53

Figura 3.6 - Evolução temporal da temperatura da polpa de tomate (termopares: T1, T2, e T3), da superfície inferior do suporte (termopares: T10, T11, T12 e T13), do ar (termopares: T4, T5, T6, T7, T8 e T9) nos processos: (a) CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. (b) CTDV-E - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. (c) CTDV-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão e ventilação. (d) CTDVT-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme teflonado (suporte) e uso de exaustão e ventilação. 56

Figura 3.7 - Imagens termográficas da evolução da temperatura da polpa durante a secagem da polpa de tomate por CTDA-E com 2 mm de espessura da polpa e água aquecida a 90 °C. CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão..... 58

Figura 3.8 - Representação dos fluxos de calor envolvidos no processo *cast-tape drying*. 60

Figura 4.1 - Evolução temporal da umidade do suco de tomate durante o processo *cast-tape drying* (CTD). (a) suco de tomate sem maltodextrina e (b) suco de tomate com maltodextrina. Evolução temporal da umidade adimensional do suco de tomate durante o processo *cast-tape drying* (CTD). (c) suco de tomate sem maltodextrina e (d) suco de tomate com maltodextrina. 78

Figura 4.2 - Imagens termográficas da temperatura da superfície do filme poliéster (sem suco) e evolução da temperatura do suco de tomate durante o processo *cast-tape drying*: (Ia - Id) suco sem maltodextrina (CTD); e (IIa - IIe) suco com maltodextrina. Temperatura das películas desidratadas de tomate: (Ie) sem maltodextrina e (IIe) com maltodextrina após seu resfriamento..... 80

Figura 4.3 - Fotografias dos pós de tomate obtido pelos diferentes processos de secagem. 84

Figura 4.4 - Microscopia dos pós de tomate produzidos por diferentes processos. 85

Figura 4.5 - Micrografia dos pós de tomate produzidos por diferentes processos. Aumento de 300x. 85

Figura 4.6 - Diagrama de estado dos pós de tomate produzidos por (a) CTD, (b) CTDM, (c) SDM e (d) FD, em que: (○) são os dados experimentais de T_g ; (□) são os dados experimentais de umidade de equilíbrio em base seca. A linha cinza representa o modelo de Gordon-Taylor, enquanto a linha preta representa o modelo de sorção de BET. 86

Figura 4.7 - Teste de descolamento da película de tomate depois da raspagem, após resfriamento: (a) com maltodextrina e (b) sem maltodextrina.....	90
Figura 5.1 - Distribuição do tamanho da partícula dos pós de tomate produzidos por diferentes processos de secagem.	106
Figura 5.2 - Microscopia óptica dos sucos de tomate: (a) <i>in natura</i> ; e dos pós reidratados (5 °Brix) a partir dos pós produzidos por diferentes processos de secagem: <i>cast-tape drying</i> (b) sem maltodextrina (CTD) e (c) com maltodextrina (CTDM); (d) liofilização (FD) e (e) <i>spray drying</i> (SDM); imagens com aumento de 10x.....	115
Figura 5.3 – (a) Curvas de escoamento e (b) viscosidade aparente em função da taxa de deformação do suco de tomate submetido às temperaturas de (□) 20 °C e (○) 70 °C. Linhas contínuas cinza e preta são os dados obtidos pelo ajuste do modelo de Herschel-Bulkley aos dados experimentais de tensão de cisalhamento <i>vs.</i> taxa de deformação.	118
Figura 5.4 – Curvas de escoamento dos pós de tomate reidratados: até 9 % de sólidos solúveis (a) temperatura da polpa de 20 °C e (b) temperatura da polpa de 70 °C; até 18 % de sólidos solúveis (c) temperatura da polpa de 20 °C e (d) temperatura da polpa de 70 °C a partir dos pós de tomate produzidos por: (◇) CTD, (×) CTDM, (□) FD e (○) SDM. Linhas cinzas são os dados obtidos pelo ajuste do modelo de Herschel-Bulkley aos dados experimentais de tensão de cisalhamento <i>vs.</i> taxa de deformação.....	120
Figura 5.5 – Curvas da viscosidade aparente em função da taxa de deformação dos pós de tomate reidratados: até 9 % de sólidos solúveis (a) temperatura da polpa de 20 °C e (b) temperatura da polpa de 70 °C; até 18 % de sólidos solúveis (c) temperatura da polpa de 20 °C e (d) temperatura da polpa de 70 °C a partir dos pós de tomate produzidos por: (◇) CTD, (×) CTDM, (□) FD e (○) SDM.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição média do tomate da variedade Italiano.....	10
Tabela 3.1 - Taxa de secagem e capacidade evaporativa da polpa de tomate seca por <i>cast-tape drying</i> em diferentes condições de processo CTDA-E, CTDV-E, CTDV-EV e CTDVT-EV.	52
Tabela 3.2 - Temperaturas da superfície inferior dos filmes, da polpa e do ar durante o período de secagem à taxa constante nos processos CTDA-E, CTDV-E, CTDV-EV e CTDVT-EV.	57
Tabela 3.3 - Coeficiente de transferência de massa (k_c) e o coeficiente convectivo médio de transferência de calor (h) entre a água e o ar.	61
Tabela 3.4 - Fluxo de transferência de calor por convecção forçada e por evaporação dos diferentes processos de secagem da polpa de tomate.	62
Tabela 3.5 – Atividade de água dos pós de tomate obtidos por diferentes processos de secagem da polpa de tomate	62
Tabela 4.1 - Características do suco de tomate.	76
Tabela 4.2 - Taxas de secagem e capacidades evaporativas do processo de secagem do suco de tomate com maltodextrina (CTDM) e sem maltodextrina (CTD) por <i>cast-tape drying</i>	78
Tabela 4.3 – Umidade e atividade de água dos pós de tomate.	81
Tabela 4.4 - Parâmetros de cor dos pós de tomate produzidos por diferentes processos.	82
Tabela 4.5 - Carotenoides totais e perda de licopeno dos pós de tomate produzidos por diferentes processos.	82
Tabela 4.6 - Parâmetros estimados do modelo de BET ajustado aos dados experimentais de sorção de água dos pós de tomate e parâmetros estimados do modelo de <i>Gordon-Taylor</i> ajustado aos dados experimentais de temperatura de transição vítrea dos pós de tomate produzidos por diferentes processos.	87
Tabela 5.1 - Tempo de dispersão e diâmetro médio das partículas dos pós de tomate produzidos por diferentes processos de secagem.....	104
Tabela 5.2 - Massa específica aparente e real e porosidade dos pós de tomate produzidos por diferentes processos de secagem.	107
Tabela 5.3 - Solubilidade dos pós de tomate produzidos por diferentes processos de secagem.	108
Tabela 5.4 - Sólidos solúveis, umidade, atividade de água, pH e acidez titulável dos sucos (com e sem maltodextrina) e dos pós de tomate reidratados até diferentes concentrações de sólidos solúveis.....	110

Tabela 5.5 - Parâmetros de cor dos sucos de tomate (com e sem maltodextrina).	111
Tabela 5.6 - Parâmetros de cor dos pós de tomate reidratados até diferentes concentrações de sólidos solúveis.	113
Tabela 5.7 – Consistência de <i>Bostwick</i> dos pós de tomate reidratados até diferentes concentrações de sólidos solúveis.....	116
Tabela 5.8 - Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley ajustado aos dados das curvas de escoamento para o suco de tomate nas temperaturas de 20 e 70 °C.	119
Tabela 5.9 - Faixa de valores dos parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley ajustado aos dados da triplicata das curvas de tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento para o suco de tomate reconstituído até 9 e 18 °Brix nas temperaturas de 20 e 70 °C.	122

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS USADOS

A _{bs}	Absorbância	
BET	Modelo de Brunauer-Emmett-Teller	
CIELAB	Escala de cor L*, a* e b*	
CNNPA	Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos	
CTD	<i>Cast-tape drying</i>	
CTDA-E	<i>Cast-tape drying</i> ; suporte: <i>Mylar</i> ; fonte: água aquecida; com exaustão	
CTDV-E	<i>Cast-tape drying</i> ; suporte: <i>Mylar</i> ; fonte: vapor; com exaustão	
CTDV-EV	<i>Cast-tape drying</i> ; suporte: <i>Mylar</i> ; fonte: vapor; com exaustão e ventilação	
CTDVT-EV	<i>Cast-tape drying</i> ; suporte: <i>Teflon</i> ; fonte: água aquecida; com exaustão e ventilação	
CTDM	<i>Cast-tape drying</i> , suco com maltodextrina seco por CTD	
DD	<i>Drum drying</i>	
DE	Dextrose equivalente	
DP	Desvio padrão	
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>	
FAOSTAT	Divisão de estatística da FAO	
FD	Liofilização	
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento	
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura	
ND	Não foi possível determinar	
RMSE	Erro médio quadrado	
RW	<i>Refractance window</i>	
SDM	<i>Spray drying</i>	
DAS	Secretaria da Defesa Agropecuária	
SOL	Solubilidade	
AC	Ácido cítrico	%
A	Área da superfície	cm ² ou m ²
a	Constante da Equação de Antonie	16,3872 kPa
A _p	Área da placa	m ²
a _w	Atividade de água	
a*	Cromaticidade de a*	
b	Constante da Equação de Antonie	3885,7 kPa °C
b*	Cromaticidade de b*	

b. u.	Base úmida	g de água g de produto ⁻¹
b. s.	Base seca	g de água g de sólidos secos ⁻¹
C	Constante do modelo BET	
c	Constante da Equação de Antonie	230,17 °C
CAR	Carotenoides	µg g ⁻¹
CAR _{pó}	Carotenoides do pó	µg g ⁻¹
CAR _{suco}	Carotenoides do suco	µg g ⁻¹
CE	Capacidade evaporativa	kg de água m ⁻² h ⁻¹
CV	Coefficiente de variação	%
C ₁	Concentração de água no ar	mol de água m ⁻³ de ar
C ₂	Concentração de água na interface água (placa)/ar	mol de água m ⁻³ de ar
D[4,3]	Diâmetro de Brouckere	Mm
d _i	Diâmetro das partículas	Mm
dT/dx	Gradiente de temperatura na direção x	K m ⁻¹
dT	Diferença entre a temperatura da superfície do filme e a temperatura da polpa	°C
<i>dX_v/dt</i>	Taxa de secagem	g g ⁻¹ min ⁻¹ ou kg kg ⁻¹ h ⁻¹
E _{1cm} ^{1%}	Coefficiente de absorção do licopeno em éter de petróleo	
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	W m ⁻² K ⁻¹ ou W m ⁻² °C ⁻¹
h _{água}	Convectivo de transferência de calor entre a água e o filme	W m ⁻² °C ⁻¹ ou W m ⁻² K ⁻¹
h _{ar}	Coefficiente convectivo de transferência de calor do ar	W m ⁻² °C ⁻¹ ou W m ⁻² K ⁻¹
h _r	Coefficiente de radiação	W m ⁻² K ⁻¹
k	Condutividade térmica do filme ou suporte	W m ⁻² °C ⁻¹ ou W m ⁻² K ⁻¹
k _c	Índice de consistência	Pa s ⁱ
k _{ef}	Coefficiente efetivo de transferência de calor na polpa	W m ⁻¹ °C ⁻¹ ou W m ⁻¹ K ⁻¹
k _f	Condutividade térmica do filme	W m ⁻¹ °C ⁻¹ ou

		$W m^{-1} K^{-1}$
k_m	Coefficiente de transferência de massa	$m s^{-1}$
κ	Número de parâmetros do modelo	
L^*	Luminosidade	
L_p	Espessura da polpa	mm ou m
L_f	Espessura do filme	mm ou m
M_{eq}	Miliequivalente do ácido cítrico	0,064
M_s	Massa de sólido úmido	g ou kg
M_{ss}	Massa de sólidos secos	g ou kg
m_1	Massa inicial da amostra	G
m_2	Massa de amostra remanescente no filtro	G
N	Normalidade do NaOH	0,1 N
N	Número de dados experimentais	
n	Índice de comportamento ou de fluxo	adimensional
N_a	Taxa de transferência de massa	mol de água s^{-1}
n_i	Número de partículas	
ob_i	Valores dos dados experimentais	
P	Massa da amostra	G
p	Probabilidade	
pH	Potencial hidrogeniônico	
P_{vapor}	Pressão de vapor	Pa
P_{vapor}^0	Pressão de vapor da água pura	Pa
P_{vapor_ar}	Pressão de vapor da água no ar	Pa
$P_{vapor_água/ar}$	Pressão de vapor na interface água/ar	Pa
P_{sat}	Pressão de saturação	Pa
pd_i	Valores preditos pelo modelo	
$q_{água}''$	Fluxo total de transferência de calor na água	$W m^{-2}$
$q_{água/vapor}''$	Fluxo de transferência de calor na água/vapor	$W m^{-2}$
q_{ar}''	Fluxo total de transferência de calor no ar	$W m^{-2}$
q_{cond}''	Fluxo de calor condutivo	$W m^{-2}$
q_{conv}''	Fluxo de transferência de calor por convecção	$W m^{-2}$
q_{filme}''	Fluxo total de transferência de	$W m^{-2}$

	calor no filme	
q_{produto}	Fluxo total de transferência de calor no produto	W m^{-2}
q_{rad}	Fluxo de transferência de calor por radiação	W m^{-2}
q_{evap}	Fluxo de calor de evaporação	W m^{-2}
R	Fluxo de secagem	$\text{kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$
R^2	Coefficiente de correlação	
$R_{\text{água}}$	Resistência térmica convectiva entre a água e o filme	$\text{m}^2\text{°C W}^{-1}$
R_{ar}	Resistência térmica convectiva entre o ar e o filme	$\text{m}^2\text{°C W}^{-1}$
R_f	Resistência térmica condutiva e de radiação no filme	$\text{m}^2 \text{°C W}^{-1}$
$R_{f \text{ cond}}$	Resistência térmica condutiva	$\text{m}^2 \text{°C W}^{-1}$
$R_{f \text{ rad}}$	Resistência térmica de radiação no filme	$\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$
R_p	Resistência térmica condutiva e convectiva no produto	$\text{m}^2 \text{°C W}^{-1}$
$R_{p \text{ cond}}$	Resistência térmica condutiva no produto	$\text{m}^2 \text{°C W}^{-1}$
$R_{p \text{ conv}}$	Resistência térmica convectiva no produto	$\text{m}^2 \text{°C W}^{-1}$
R	Constante universal dos gases	$8,314 \text{ m}^3 \text{Pa mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
$r_{\text{água-mylar}}(0)$	Coefficiente de perda de reflexão normal na interface água-mylar	0,01073
$r_{\text{ar-mylar}}(0)$	Coefficiente de perda de reflexão normal na interface ar-mylar	0,0587
T	Temperatura do ar ou temperatura de bulbo úmido na interface água/ar	K
$T_{\text{água}}$	Temperatura da água	°C ou K
T_{ar}	Temperatura do ar	°C
T_b	Temperatura na interface água-filme	°C ou K
T_f	Temperatura do filme	°C ou K
T_g	Temperatura de transição vítrea	°C ou K
T_{gs}	Temperatura de transição vítrea da mistura sólida	°C ou K

T_{gw}	Temperatura de transição vítrea da água	$^{\circ}\text{C}$ ou K
T_i	Temperatura na interface filme-produto	$^{\circ}\text{C}$ ou K
$T_{\text{interface_água/ar}}$	Temperatura na interface água/ar (bulbo úmido)	$^{\circ}\text{C}$
T_{polpa}	Temperatura da polpa de tomate	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Temperatura na interface produto-ar	$^{\circ}\text{C}$ ou K
T_{sis}	Temperatura da superfície inferior do suporte	$^{\circ}\text{C}$ ou K
UR	umidade relativa do ar	%
V	Volume de NaOH gasto na titulação	mL
V_d	Volume de diluição	mL
X_{eq}	Umidade de equilíbrio	g g^{-1} b. s.
X_c	Umidade crítica	g g^{-1} b. s. ou kg kg^{-1} b. s.
X_m	Umidade na monocamada	g g^{-1} b. s.
X_s	Umidade em base seca	g g^{-1} b. s.
X_u	Umidade em base úmida	g g^{-1} b. u.
w_s	Fração de sólidos na mistura	$\text{g de sólidos g de produto}^{-1}$
w_w	Fração de água na mistura	$\text{g de água g de produto}^{-1}$
ΔH_{vap}	Entalpia de vaporização da água, na temperatura do filme à pressão de 1 atm	J g^{-1}
ΔE	Diferença de cor	
ϵ	Número de Euler	
ϵ	Emissividade	$0 \leq \epsilon \leq 1$
ϵ_i	Fração de cada componente do <i>Teflon</i>	
ϵ	Porosidade do leito de partículas	%
ρ	Massa específica da polpa	g cm^{-3} ou kg m^{-3}
ρ_p	Massa específica real	kg^{-3} ou g cm^{-3}
ρ_b	Massa específica aparente	kg^{-3} ou g cm^{-3}
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$5,670 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
τ	Tensão de cisalhamento	Pa
τ_0	Tensão de cisalhamento inicial	Pa

γ	Taxa de deformação	s^{-1}
\dot{m}_v	Taxa de evaporação	$kg\ m^2\ h^{-1}$
$k \parallel$	Condutividade térmica para sistemas multicomponentes em que os componentes estão dispostos como camadas paralelas ao fluxo de calor	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$ ou $W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$
\mathcal{K}_i	Condutividade térmica de cada componente do <i>Teflon</i>	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$ ou $W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$

DIAGRAMA CONCEITUAL DO TRABALHO

Por quê?

- Tomate desidratado em pó é uma alternativa às polpas de tomates, com vantagens relacionadas ao armazenamento, transporte e manuseio em indústrias e restaurantes industriais;
- O processo de secagem de alimentos líquidos por *cast-tape drying* permite obter alimentos desidratados em pó, sendo uma alternativa aos processos de secagem por *spray drying* (SDM), *drum drying* (DD) e liofilização (FD);
- Há poucos estudos sobre os fundamentos da produção de tomate em pó por técnicas de secagem por espalhamento.

O que já foi publicado na literatura?

- A maioria dos estudos sobre a produção de frutas em pó trata do uso da liofilização e do *spray drying*;
- Estudos da produção de frutas e hortaliças desidratadas em pó por *cast-tape drying* têm sido centrados na qualidade do produto.

Hipóteses da pesquisa

- O tomate em pó é uma alternativa tecnologicamente viável à polpa de tomate, podendo ser uma rota de desenvolvimento de novos produtos;
- É possível produzir tomate em pó por *cast-tape drying*, com propriedades físico-químicas semelhantes aos produzidos por *spray drying* e liofilização;
- É possível determinar as importâncias relativas dos mecanismos de transferência de calor e de massa no *cast-tape drying*.

Experimentos

- A produção dos pós de tomate foi realizada a partir do suco de fruta (*in natura*), utilizando-se *cast-tape drying*, liofilização e *spray drying*. Diferentes condições de processo foram investigadas para o processo de *cast-tape drying*.

1. INTRODUÇÃO

Há um grande consumo de tomate no mundo, na forma *in natura*, e na forma industrializada, em molhos, extratos, polpas, sucos, sopas, *ketchup* e tomate seco. Segundo a FAOSTAT, a produção mundial de tomate em 2012 foi de 161 milhões de toneladas, sendo a China o país com a maior produção, com cerca de 50 milhões de toneladas. O Brasil foi o oitavo maior produtor de tomate, com 3,8 milhões de toneladas (FAO, 2014).

Os frutos do tomateiro apresentam vida útil limitada à temperatura ambiente, devido à sua perecibilidade. O processo de secagem é uma alternativa ao processamento de tomate. O produto desidratado em pó é de fácil reidratação e mistura, apresentando vantagens em relação aos molhos e às polpas industrializadas, pela facilidade de acondicionamento, transporte e manuseio. O tomate em pó pode ser utilizado na preparação de sopas, molhos para massas e pizzas, alimentos para bebês e temperos. O processo de desidratação deve manter grande parte das propriedades nutricionais e sensoriais características do produto.

Os processos de secagem mais utilizados para a produção de alimentos em pó são a secagem em tambor (*drum drying* - DD), a secagem por atomização ou *spray drying* (SDM) e a liofilização (FD) (TANG; FENG; SHEN, 2003; GOULA; ADAMOPOULOS, 2003; GOULA; ADAMOPOULOS, 2008; FILKOVÁ; HUANG; MUJUMDAR, 2006; GEORGE; DATTA, 2002; OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012). No entanto, têm-se investigado outras tecnologias de secagem para a obtenção de filmes, flocos e pós, entre as quais se destaca o processo de secagem denominado de *refractance window* (RW) (ABONYI et al., 2001; NINDO et al., 2003; NINDO; TANG, 2007; OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012).

A secagem em tambor (*drum drying*) é um método barato, apresenta elevadas taxas de secagem e eficiência térmica, mas o produto pode apresentar sabor de cozido e escurecimento, devido às altas temperaturas em curtos períodos de tempo (BARBOSA-CÁNOVAS; VEJA-MERCADO, 1996).

A secagem por *spray drying* é amplamente utilizada para a obtenção de produtos em pó. Porém, a maioria das polpas de frutas contém açúcares, que conferem ao produto uma baixa temperatura de transição vítrea (T_g), causando pegajosidade em superfícies metálicas durante o processamento a temperaturas acima da T_g (TANG; FENG; SHEN, 2003; BHANDARI, 2007). Essa pegajosidade resulta em baixos

rendimentos e em superaquecimento do produto, com degradação das características sensoriais (BOONYAI; BHANDARI; HOWES, 2004, BHANDARI, 2007, CHEN; ÖZKAN, 2007). Esse inconveniente tem sido relatado na literatura, em estudos de secagem de sucos de frutas por *drum drying* e *spray drying* (TANG; FENG; SHEN, 2003, GOULA; ADAMOPOULOS, 2003, GOULA; ADAMOPOULOS, 2005a, GOULA; ADAMOPOULOS, 2008). Agentes carreadores, como as maltodextrinas e as gomas, aumentam a temperatura de transição vítrea (T_g) da solução e são utilizados para reduzir esse problema (BHANDARI et al., 1993, GOULA; ADAMOPOULOS, 2008).

A liofilização é um processo utilizado para a obtenção de alimentos desidratados termossensíveis. O uso de baixas temperaturas nesse processo preserva as propriedades físico-químicas e nutricionais dos produtos. Entretanto, a liofilização apresenta elevados custos operacionais e longos tempos de processo (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; LIAPIS; BRUTTINI, 2006; FILKOVÁ; HUANG; MUJUMDAR, 2006; GEORGE; DATTA, 2002).

A secagem por *refractance window* é uma tecnologia em que o produto a ser seco, em forma de suspensão líquida, é espalhado sobre uma esteira plástica de poliéster que flutua sobre um banho de água aquecida. Alguns estudos afirmam que o filme de poliéster é transparente à radiação infravermelha emitida pela água quente. Assim, o fluxo de calor proveniente da água quente chega ao produto a ser seco pelos mecanismos de condução e radiação térmica (ABONYI et al., 2001; NINDO et al., 2003; NINDO; TANG, 2007). Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) e Ortiz-Jerez et al. (2015) mostraram que a contribuição da radiação no processo de secagem por RW é menor que 5 %, e que o mecanismo de condução de calor controla a secagem neste processo. Dessa forma, esse processo de secagem pode ser tratado como um método de secagem condutivo de soluções ou suspensões espalhadas sobre um suporte.

O *tape-casting* ou *spread-casting* tem sido usado para a produção de camadas cerâmicas especiais e de filmes biodegradáveis (MOREIRA et al., 2011; MORAES et al., 2013; MORAES et al., 2015; SAINI et al., 2012; TÁPIA-BLÁCIDO et al., 2013). O método possui semelhanças com a secagem em tambor, uma vez que um filme do material a ser seco é espalhado sobre uma superfície aquecida, onde ocorre a desidratação. A superfície aquecida fornece a energia necessária para a evaporação da água contida na solução por condução e

convecção, ou radiação infravermelha sobre a superfície superior da suspensão.

Diante do exposto, o processo de secagem condutivo por espalhamento de uma camada fina de soluções ou suspensões sobre suportes aquecidos foi denominado de Secagem de Filme Líquido Espalhado Sobre um Suporte Flexível. Neste texto, usaremos a denominação em inglês, *Cast-tape Drying* (CTD), para representar esse processo.

Outro fator a ser considerado é o processamento do tomate para a produção de polpa de tomate concentrada e molhos prontos. Nesse tipo de processamento há necessidade de tratamento térmico severo, para a inativação dos fungos termorresistentes, com destaque para o *Byssochlamys fulva*, *Byssochlamys nivea*, *Bacillus coagulans* e o *Neosartorya fischeri*, que têm sido motivo de preocupação para a indústria processadora de tomate e de sucos prontos em geral (SALOMÃO; SLONGO; ARAGÃO, 2007; SLONGO; ARAGÃO, 2006; SLONGO; ARAGÃO, 2008). A desidratação da polpa de tomate diminui consideravelmente essa preocupação, pois reduz sua atividade de água para valores em que os fungos apresentam dificuldade em crescer (RAHMAN, 2008). Se o produto desidratado for reidratado e utilizado imediatamente, não há tempo para o desenvolvimento dos fungos presentes.

1.1 OBJETIVO

O objetivo central deste estudo foi investigar a aplicação da secagem por *cast-tape drying* (CTD) na produção de desidratado de tomate em pó e avaliar as propriedades do produto obtido.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Estudar as cinéticas e os mecanismos de transferência de calor e de massa na secagem de polpa de tomate por *cast-tape drying* em diferentes condições experimentais;
- Estudar as cinéticas e os mecanismos de transferência de calor e de massa na secagem de suco de tomate por *cast-tape drying* (água como fonte de aquecimento e um filme de poliéster (*Mylar*) como suporte para o espalhamento);

- Caracterizar os pós de tomate obtidos por diferentes métodos de secagem *cast-tape drying*, *spray drying* e liofilização quanto às suas propriedades físico-químicas;
- Avaliar a estabilidade dos pós de tomate pela determinação das isotermas de sorção de umidade e dos diagramas de estado.
- Caracterizar os pós de tomate reidratados quanto às propriedades físico-químicas e ao comportamento reológico;

1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Os capítulos que forma o presente documento são:

Capítulo 1 - Introdução.

Breve introdução dos assuntos abordados no presente estudo.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.

Este capítulo tem por objetivo descrever os aspectos gerais da matéria-prima utilizada (tomate) e apresentar o cenário mundial da produção de tomate. Apresenta-se uma revisão sobre os processos de secagem utilizados neste estudo para a produção de pós, bem como sobre os mecanismos de transferência de calor e de massa envolvidos. Também são descritos alguns aspectos relacionados às propriedades físico-químicas dos alimentos em pó e sobre o processo de reidratação.

Capítulo 3 - Influência das condições de processo na secagem da polpa de tomate por *cast-tape*.

Este capítulo apresenta o aparato experimental desenvolvido para secagem (*cast-tape drying*) da polpa de tomate e para o estudo dos mecanismos de transferência de calor e massa envolvidos nesse processo. Diferentes condições de processo foram avaliadas: i) água e vapor como meios de aquecimento do suporte, ii) filme de poliéster *Mylar* e filme teflonado como suporte para o espalhamento da polpa e iii) diferentes condições de convecção forçada acima da polpa. Em todos os casos foram monitoradas a evolução temporal da umidade e da temperatura da polpa e a evolução temporal da temperatura e da velocidade do ar.

Capítulo 4 - Secagem, caracterização e estudo da estabilidade de pós de tomate desidratados por *cast-tape drying*, *spray drying* e liofilização.

Neste capítulo apresenta-se um estudo sobre a secagem do suco de tomate (com e sem maltodextrina 10 DE) por *cast-tape drying* em

batelada. Nesse processo a água foi usada como meio de aquecimento, filme de poliéster (*Mylar*) como suporte para o espalhamento do suco e uso do sistema de exaustão para a convecção forçada. Pós de tomate também foram produzidos por *spray drying* (com maltodextrina) e liofilização, para fins de comparação das propriedades físico-químicas e estabilidade.

Capítulo 5 - Reidratação dos pós de tomate obtidos por *cast-tape drying*, *spray drying* e liofilização.

Este estudo foi realizado a fim de complementar a caracterização físico-química dos pós de tomate produzidos por CTD, SDM e FD apresentada no (Capítulo 4), bem como determinar as características físico-químicas e o comportamento reológico desses pós quando reidratados. Para isso os pós de tomate foram caracterizados quanto ao tamanho das partículas, tempo de dispersão, massa específica real e aparente, porosidade e solubilidade. Esses pós foram reidratados até diferentes concentrações de sólidos solúveis (9 °Brix e 18 °Brix) e avaliados quanto ao pH; acidez titulável, cor, consistência de *Bostwick* e comportamento reológico.

Capítulo 6 - Conclusões e propostas de continuidade dos estudos.

Neste capítulo foram apresentadas as principais conclusões do presente estudo e foram sugeridas propostas de continuidade dos estudos de secagem por *cast-tape drying*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABONYI, B. I.; FENG, H.; TANG, J.; EDWARDS, C. G.; CHEW, B. P.; MATIINSON, D. S.; FELLMAN, J. K. Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window system. **Journal of Food Science**, v. 67, n. 2, p. 1051-1056, 2001.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEGA-MERCADO, H. *Dehydration of Foods*. Chapman & Hall's, 1996.

BHANDARI, B. R.; SENOUSSE, A.; DUMOULIN, E. D.; LEBERT, A. Spray drying of concentrated fruit juices. **Drying Technology**, v. 11, n. 5, p. 1081-1092, 1993.

BHANDARI, B. R. *Stickiness and Caking in Food Preservation*. In: M. S. Rahman, Handbook of Food Preservation (p. 387-401). CRC Press, 2007.

BOONYAI, P., BHANDARI, B., HOWES, T. Stickiness measurement techniques of food powders: A review. **Powder Technology**, v. 145, p. 34-46, 2004.

CHEN, X. D.; ÖZKAN, N. Stickiness, functionality, and microstructure of food powders. **Drying Technology**, v. 25, p. 969-979, 2007.

FAO. FAOSTAT 2012. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em: 31mar. 2014.

FILKOVÁ, I.; HUANG, L. X.; MUJUMDAR, A. S. *Industrial spray drying systems*. In MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying. Taylor & Francis Group. 2006.

GEORGE, J. P.; DATTA, A. K. Development and validation of heat and mass transfer models for freeze-drying of vegetable slices. **Journal of Food Engineering**, v. 52, p. 89-93, 2002.

GOULA, M. A., ADAMOPOULOS, K. G. *Spray drying* performance of a laboratory spray dryer for tomato powder preparation. **Drying Technology**, v. 21, n. 7, p. 1273-1289, 2003.

GOULA, M. A.; ADAMOPOULOS, K. G. *Spray drying* of tomato pulp in dehumidified air: I The effect on product recovery. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 25-34, 2005.

GOULA, M. A.; ADAMOPOULOS, K. G. Effect of maltodextrin addition during *spray drying* of tomato pulp in dehumidified air: II. Powder properties. **Drying Technology**, v. 26, p. 726-737, 2008.

LIAPIS, A. I.; BRUTTINI, R. *Freeze Drying*. In: A. S. Mujumdar, Handbook of Industrial Drying. CRC Press, 2006.

MORAES, J. O.; SCHEIBE, A. S.; SERENO, A.; LAURINDO, J. B. Scale-up of the production of cassava starch-based films using tape-casting. **Journal of Food Engineering**, v. 119, p. 800-808, 2013.

MORAES; J. O. de; SCHEIBE, A. S.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Conductive drying of starch-fiber films prepared by tape casting: Drying rates and film properties, **LWT – Food Science and Technology**, v. 64, p. 356-366, 2015.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M. D.; SILVA, C.; PRIETO, D. M.; SOUSA, A. M. M. Drying kinetics of biofilms obtained from chestnut starch and carrageenan with and without glycerol. **Drying Technology**, v. 29, n. 9, p. 1058-1065, 2011.

NINDO, C. I.; FENG, H.; SHEN, G. Q.; KANG, D. H. Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. **Journal of Food Processing Preservation**, v. 27, p. 117-136, 2003.

NINDO, C. I.; TANG, J. Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. **Drying Technology**, v. 25, p. 37-48, 2007.

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

ORTIZ-JEREZ, M. J.; GULATI, T.; DATTA, A. K.; OCHOA MARTÍNEZ, C. I. Quantitative understanding of Refractance WindowTM Drying. **Food and Bioproducts Processing**, v. 95, p. 237-253, 2015.

SAINI, C.; SINGH, S.; SAXENA, D. C. Thin layer drying characteristics of sweet potato starch based films and mathematical modeling. **Journal of Food Process Technology**, v. 3, n. 7, p. 3 - 8, 2012.

SALOMÃO, B. C. M.; SLONGO, A. P.; ARAGÃO, G. M. F. Heat resistance of *Neosartorya fischeri* in various juices. **LWT - Food Science and Technology**, v. 40, n. 4, p. 676–680, 2007.

SLONGO, A. P.; ARAGÃO, G. M. F. de. Factors affecting the thermal activation of *Neosartorya fischeri* in pineapple and papaya nectars. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 37, n. 3, p. 312-316, 2006.

SLONGO, A. P.; ARAGÃO, G. M. F. de. Behaviour of *Neosartorya fischeri* Ascospores in pineapple juice, **Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos**, v. 26, n. 1, p. 51-60, 2008.

TANG, J.; FENG, H.; SHEN, G. *Drum Drying*. Inc: Dekker, M. Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering, 2003.

TÁPIA-BLÁCIDO, D. R.; SOBRAL, P. J. A.; MENEGALLI, F. C. Effect of drying conditions and plasticizer type on some physical and mechanical properties of amaranth flour films. **LWT – Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 392 – 400, 2013.

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.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TOMATE

O tomateiro é uma dicotiledônea da família Solanaceae, espécie *Lycopersicon esculentum* (WARNOCK, 1988; GOULD, 1992), planta originária da América do Sul, mais precisamente do Peru, Chile, Equador e Bolívia, de onde foi levado para a Europa. No século XVIII, o tomate era largamente consumido em vários países europeus. No Brasil, o tomate foi introduzido pelos italianos no final do século XIX (CURRENCE, 1963).

A produção mundial de tomate em 2012 foi de 161 milhões de toneladas, de acordo com dados da Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação, em uma área de cerca de 5,2 milhões de hectares (FAO, 2014). Os países com maior participação na produção mundial de tomate, em 2012, foram a China, Índia, EUA, Turquia, Egito, Iran, Itália, Espanha e Brasil. O Brasil produziu cerca de 3,873 milhões de toneladas em 2012, o que corresponde a 3% do total mundial, sendo o oitavo maior produtor (FAO, 2014). Em 2012 a região Sudeste foi responsável pela maior produção (1,42 milhões de toneladas), seguida da região centro-oeste (1,45 milhões de toneladas). O estado com maior produção de tomate é Goiás (1,4 milhões toneladas), seguido de São Paulo (656 mil toneladas) e de Minas Gerais (441 mil toneladas). A região Sul do Brasil produziu 645 mil toneladas, sendo o estado de Santa Catarina produtor de aproximadamente 181 mil toneladas, o que corresponde a 4,4% da produção nacional (IBGE, 2014).

O fruto do tomateiro, o tomate, possui baga carnosa, suculenta e, quando maduro, apresenta coloração avermelhada (WARNOCK, 1988; GOULD, 1992). A polpa possui umidade elevada, entre 91% e 95% (b. u.) e os 5% a 9% restantes formam a matéria seca. Os principais constituintes da matéria seca são as fibras, açúcares, ácidos orgânicos, proteínas e lipídeos. O tomate é rico em vitaminas A, C e E, e minerais como cálcio, ferro e fósforo. A composição química centesimal do tomate varia de acordo com a variedade, tipo de solo, local e cultivo da cultura e da quantidade de chuvas durante o período de cultivo (GOULD, 1992). A Tabela 1 apresenta a composição média do tomate da variedade Italiano.

Tabela 2.1 - Composição média do tomate da variedade Italiano.

Componente	Valor médio (%)
Água	95,88 ± 0,05
Proteínas	0,66 ± 0,04
Lipídios	0,12 ± 0,06
Açúcares totais	2,67 ± 0,01
Cinzas	0,41 ± 0,03
Fibras	0,26 ± 0,01

Fonte: Monteiro et al. (2008).

Os constituintes orgânicos que prevalecem são os açúcares, sendo que desses, os açúcares redutores frutose e glicose correspondem de 50 a 65% da matéria seca do fruto e a mais de 95% dos açúcares totais, enquanto a sacarose, quando presente, encontra-se em níveis muito baixos (DORAIS; GOSSELIN; PAPADOPOULOS, 2001). O sabor e aroma são conferidos principalmente pela relação entre os açúcares e os ácidos, sendo que a acidez é resultante dos ácidos orgânicos (ácido cítrico e málico). Os componentes estruturais do fruto são basicamente os constituintes fibrosos e representam cerca de 20% da matéria seca (GOULD, 1992).

Os principais carotenoides presentes no tomate são o licopeno e o β -caroteno. O licopeno é o carotenoide responsável pela coloração vermelha característica de tomates maduros e representa 83% do total (SHARMA; LE MAGUER, 1996). O licopeno é um carotenoide sem atividade de pró-vitamina A, lipossolúvel, composto por onze ligações conjugadas e duas ligações duplas não conjugadas. O licopeno tem a capacidade de se ligar ao oxigênio duas vezes maior que o β -caroteno, possivelmente devido à presença das duas ligações duplas não conjugadas, que lhe confere maior reatividade e propriedade antioxidante (RODRIGUEZ-AMAYA, 2001).

O consumo de tomates e de seus produtos derivados tem sido sugerido para reduzir o risco de doenças crônicas, como câncer de próstata, de pulmão, epitelial, do pâncreas e da bexiga. Também tem sido sugerido como protetor contra doenças cardiovasculares e contra o envelhecimento precoce (GIOVANNUCCI, 2009). A quantidade de licopeno presente no tomate varia de acordo com sua maturação, variedade e condições de cultivo da planta. Os dados encontrados na literatura são bastante genéricos e informam concentrações em faixas amplas, em tomates e seus produtos. No tomate maduro a quantidade de licopeno varia de 32,0 a 133,8 $\mu\text{g g}^{-1}$, no suco varia de 68,7 a 121,4 μg

g^{-1} , no *ketchup* varia entre 102,9 e 414,0 $\mu\text{g g}^{-1}$ e no molho de tomate varia de 65,1 a 194,5 $\mu\text{g g}^{-1}$ (SHI; LE MAGUER, 2000; SAHLIN; SAVAGE; LISTER, 2004; LIN; CHEN, 2005).

2.1.1 Tomate do tipo Italiano (*Lycopersicon esculentum Mill*)

Os tomates do tipo Italiano ou Saladete têm mostrado tendência de expansão de cultivo nos últimos anos. Segundo Filgueira (2003) o tomate Italiano foi introduzido no Brasil em 1990 e está em franca expansão de cultivo. Em geral, os frutos das cultivares híbridas desse padrão, disponíveis no mercado, apresentam excelente qualidade gustativa e versatilidade de uso culinário, podendo ser consumidos em saladas, no preparo de molhos caseiros e na forma de tomate seco (MACHADO; ALVARENGA; FLORENTINO, 2007). Os tomates do tipo Italiano são alongados (7 a 10 cm), com diâmetro transversal reduzido (3 a 5 cm), biloculares, polpa espessa, coloração vermelha intensa (FILGUEIRA, 2003). O pH desses frutos é em torno de 4,6 e o teor de sólidos solúveis de cerca de 4 °Brix (MONTEIRO et al., 2008).

2.2 SECAGEM

A secagem é uma das operações unitárias mais utilizadas para a conservação de alimentos. O objetivo da secagem é remover a umidade do produto, reduzindo sua atividade de água, o que dificulta o crescimento microbiano e reduz as reações químicas no alimento, além dos custos com transporte, embalagens e armazenamento (GEANKOPLIS, 1993; KUDRA; MUJUMDAR, 2009). A secagem ocorre por vários mecanismos, os quais dependem da estrutura do material e do período de secagem (GEANKOPLIS, 1993).

Os mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação) para o produto que está sendo desidratado serão abordados dentro de cada processo de secagem estudado.

2.2.1 Fundamentos da secagem

O processo de secagem ocorre devido ao diferencial entre a pressão de vapor da água contida em um material e a pressão de vapor da água no ar ambiente. A umidade do material sólido exerce uma pressão de vapor, que depende de como a água está ligada, da estrutura do material sólido e da temperatura. O ar ambiente possui pressão

parcial de vapor que é dependente da sua umidade relativa e da sua temperatura. Assim, durante a secagem o material (solução, suspensão ou sólido) irá perder umidade para o ambiente, até que a pressão parcial da água no material se iguale à pressão parcial da água no ar de secagem (GEANKOPLIS, 1993).

A umidade do produto (em base seca) é definida pela razão entre a massa de água e a massa de sólidos secos, conforme a Equação 2.1 (GEANKOPLIS, 1993).

$$X_s = \frac{M_s - M_{ss}}{M_{ss}} \quad (2.1)$$

em que X_s é a umidade do produto (g g^{-1} b. s.), M_s é a massa de sólido úmido (g) e M_{ss} é a massa de sólidos secos (g).

Para conhecer como a perda de umidade do material sólido para o ar ambiente ocorre, dados experimentais da variação temporal da massa do produto durante o processo são obtidos. A curva que representa esses dados é chamada de curva de secagem (Figura 2.1a), que é característica do material e das condições de secagem utilizadas. Outra forma de representar esses dados é pela curva da taxa de secagem (velocidade de secagem), em que a variação da massa do produto é representada em função do tempo ou da umidade média do produto (Figura 2.1b). A taxa de secagem é obtida derivando a curva de secagem com relação ao tempo, fornecendo os valores de dX_s/dt ($\text{kg kg}^{-1} \text{min}^{-1}$), Equação 2.2:

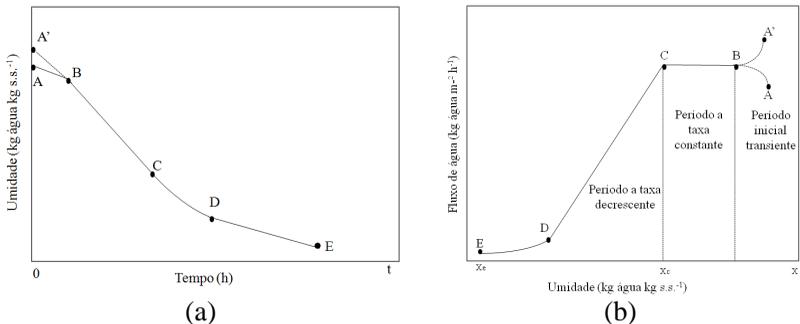
$$R = -\frac{M_{ss}}{A} \frac{dX_s}{dt} \quad (2.2)$$

em que R é o fluxo de água ($\text{kg m}^{-2} \text{min}^{-1}$), M_{ss} é a massa de sólidos secos (kg) e A é a área da superfície exposta ao ar de secagem, m^2 .

As Figuras 2.1a e 2.1b representam respectivamente a curva de secagem e da taxa de secagem de um material sólido, sendo esta última dividida em três períodos característicos. No início da secagem há um período inicial transiente (expresso por A-B e A'-B), em que o sólido está a uma temperatura maior ou menor do que a temperatura do ar de secagem. Esse período é geralmente curto e desprezado no cálculo do tempo de secagem. Assim que a temperatura do material sólido atinge a temperatura de bulbo úmido do gás (ponto B) ela permanece estável e dá-se início ao período de secagem à taxa constante (GEANKOPLIS, 1993). No período à taxa de secagem constante (B-C) toda a superfície do material sólido encontra-se saturada de água. Esta

água está completamente livre e atua como se o sólido não estivesse presente. A água livre, presente na superfície do material, evapora de maneira que a taxa de evaporação depende, diretamente, da taxa de transferência de calor para o material sendo seco. O período a taxa constante termina quando a superfície do sólido fica insaturada (GEANKOPLIS, 1993). O final desse período (ponto C) é caracterizado por uma umidade crítica do meio (X_c), a partir do qual a taxa de secagem começa a decrescer. A umidade crítica não é uma propriedade exclusiva do material sólido submetido à secagem e depende das condições de processo (temperatura, velocidade e umidade relativa do ar). Após atingir a umidade crítica, inicia-se o período de secagem à taxa decrescente, representado pelo segmento C-D na Figura 2.1b.

Figura 2.1 - (a) Curva típica de secagem. (b) Curva da taxa de secagem em função da umidade.



Fonte: Adaptado de Geankoplis (1993).

No período de secagem à taxa decrescente, a taxa de remoção de umidade é menor que no período a taxa constante, implicando em maiores tempos de secagem, pois a transferência de massa para o ar de secagem depende da migração interna de umidade. A temperatura da superfície aumenta, pois a transferência de calor não é compensada pela transferência de umidade, ou seja, a migração de umidade para a superfície não é suficiente para manter a pressão de vapor de saturação na interface sólido-gás (GEANKOPLIS, 1993). O período à taxa decrescente termina quando o material sólido atinge a umidade de equilíbrio, quando a taxa de secagem é nula. A umidade de equilíbrio corresponde à menor umidade que um sólido pode atingir no processo de secagem nas condições a que está submetido (GEANKOPLIS, 1993; BARBOSA-CÁNOVAS; IBARZ, 2003).

O período de secagem à taxa decrescente sofre influencia dos mecanismos envolvidos no movimento da umidade do interior do sólido para a superfície. A difusão de líquido é resultado da diferença de concentração de água líquida entre o interior e a superfície do sólido. A transferência de líquido por capilaridade, gerada pela tensão interfacial entre a água e o sólido, ocorre principalmente em sólidos porosos, que possuem poros e canais de diferentes tamanhos conectados (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; JANGAM; MUJUMDAR; LAW, 2010).

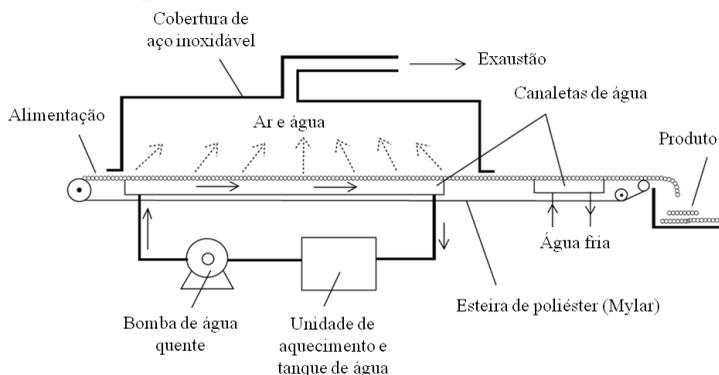
Em alguns casos, pode-se observar um segundo período à taxa decrescente (D-E), em que a taxa de difusão de vapor nos poros e a taxa de condução de calor no sólido são os mecanismos que governam a secagem (GEANKOPLIS, 1993).

2.3 PROCESSOS DE SECAGEM POR ESPALHAMENTO

2.3.1 *Refractance window*

O *refractance window* (RW) é um método de concentração e secagem de soluções, utilizado para a produção de alimentos desidratados em forma de filmes, flocos e em pó (NINDO et al., 2003). O processo RW foi patenteado por Magoon (1986) e desenvolvido pela MCD Technologies, Inc. (Tacoma, Washington, EUA) (ABONYI et al., 2001). Na Figura 2.2 está representado o esquema do equipamento de secagem por RW.

Figura 2.2 - Esquema de um secador *refractance window*.



Fonte: Adaptado de Caparino et al. (2012).

Neste processo de secagem de uma solução ou suspensão, faz-se o seu espalhamento sobre uma esteira de poliéster (suporte flexível), que é movimentada sobre um reservatório com água aquecida, tendo sua face inferior em permanente contato essa água. Uma fina camada de suspensão com espessura definida é aplicada sobre o suporte de poliéster, comercialmente chamado de *Mylar* (DuPont®). O equipamento possui uma seção de resfriamento após a secagem, para reduzir a temperatura do produto a um valor abaixo da sua T_g e facilitar a sua remoção. Um sistema de exaustão retira os vapores de água durante a secagem (NINDO; TANG, 2007; KUDRA; MUJUMDAR, 2009).

Na secagem por RW é possível manter a temperatura da polpa em torno de 21 a 25 °C inferior à temperatura da água de aquecimento. Alguns estudos demonstram que a temperatura da polpa permanece em torno de 70-75 °C quando utilizado água aquecida na temperatura de 95 °C e espessuras de espalhamento entre 1-3 mm (NINDO et al., 2003; PAVAN; SCHMIDT; FENG, 2012; ABONYI et al., 2001; CAPARINO et al., 2012; CASTOLDI et al., 2015; ZOTARELLI et al., 2015).

O investimento em um equipamento RW é de 50-70% menor do que em um liofilizador, enquanto os custos energéticos e operacionais são 50% inferiores aos da liofilização (NINDO; TANG, 2007).

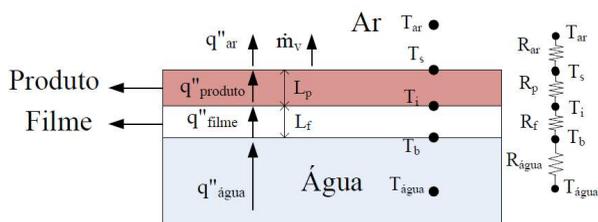
A umidade e espessura da camada do material e a temperatura da água são fatores que influenciam este processo de secagem (NINDO; TANG, 2007). A temperatura da água de aquecimento pode estar na faixa de 65 a 95 °C, dependendo das propriedades do material a ser seco. Contudo, recomenda-se que a temperatura seja inferior à de ebulição, para evitar a formação de bolhas, as quais prejudicam a transferência de calor (CLARKE, 2004; NINDO et al., 2004).

Na literatura é possível encontrar a aplicação deste processo na secagem de polpas de frutas e hortaliças, como polpa de cenoura e morango (ABONYI et al., 2001); abóbora (NINDO et al., 2003); tomate (ABUL-FADL; GHANEM, 2011; CASTOLDI et al., 2015); açaí (PAVAN; SCHMIDT; FENG, 2012); polpa de manga (CAPARINO et al., 2012; ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO, 2015) manga em fatias (OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012); e para secagem de fatias de abóbora (ORTIZ-JEREZ; OCHOA-MARTÍNEZ, 2015; ORTIZ-JEREZ et al., 2015).

2.3.1.1 Mecanismos de transferência de calor na secagem por refractance window

A Figura 2.3 apresenta um esquema do circuito térmico em um secador por RW. De fato, o processo chamado de RW exige o uso de um suporte flexível transparente à radiação infravermelha. A transferência de calor por radiação, da água quente para a solução, não é importante, como será mostrado mais adiante. No entanto, preferiu-se descrevê-la por completo para facilitar as comparações e discussões que serão apresentadas.

Figura 2.3 - Representação esquemática do circuito térmico no *Refractance Window*



onde: $T_{\text{água}}$ - temperatura da água; T_b - temperatura na interface água-filme; T_i - temperatura na interface filme-produto; T_s - temperatura na interface produto-ar; T_{ar} - temperatura do ar; q'' é o fluxo total de transferência de calor; L_p e L_f são as espessuras da polpa e do filme, respectivamente; $R_{\text{água}}$ - resistência térmica convectiva entre a água e o filme; R_f - resistência térmica condutiva e de radiação no filme; R_p - resistência térmica condutiva e convectiva no produto; R_{ar} - resistência térmica convectiva entre o produto e o ar. A taxa de evaporação é representada por \dot{m}_v . R são as resistências à transferência de calor

Fonte: Adaptado de Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015).

O processo de RW apresenta quatro resistências à transferência de calor, em série. A primeira consiste na resistência convectiva ($R_{\text{água}}$) entre a água e filme (Equação 2.3), seguida pelas resistências condutiva e radiativa, em paralelo, no filme (R_f) (Equação 2.4). A terceira resistência ocorre no produto (R_p) e inclui duas resistências em paralelo, a condutiva e aquela associada à possível presença de convecção natural (Equação 2.5). A última resistência se refere à transferência convectiva entre a superfície da polpa e o ar (R_{ar}) (Equação 2.6) (ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO, 2015).

$$R_{\acute{a}gua} = \frac{1}{h_{\acute{a}gua}} \quad (2.3)$$

em que $h_{\acute{a}gua}$ é o coeficiente convectivo de transferência de calor entre a água e o filme.

$$R_f = \left(\frac{1}{R_{f\ cond}} + \frac{1}{R_{f\ rad}} \right)^{-1} \quad (2.4)$$

onde $R_{f\ cond} = L_f/k$ é a resistência condutiva no filme (L_f é a espessura do filme e k é a condutividade térmica do filme), $R_{f\ rad} = 1/h_r$ é a resistência à transferência de calor por radiação e $h_r = \epsilon \sigma (T_b + T_i) (T_b^2 + T_i^2)$ é o coeficiente de transferência de calor por radiação. A emissividade da superfície é representada por ϵ , enquanto σ é a constante de *Stefan-Boltzmann* ($5,6704 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

$$R_p = \left(\frac{1}{R_{p\ cond}} + \frac{1}{R_{p\ conv}} \right)^{-1} = \frac{L_p}{K_{ef}} \quad (2.5)$$

em que L_p é a espessura do produto e k_{ef} é o coeficiente efetivo de transferência de calor na polpa.

$$R_{ar} = \frac{1}{h_{ar}} \quad (2.6)$$

em que h_{ar} é o coeficiente convectivo de transferência de calor do ar.

Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) não calcularam a resistência global do sistema, pois os valores de $R_{\acute{a}gua}$, R_p e R_{ar} eram desconhecidos. Porém, as resistências no filme podem ser determinadas, pela diferença de temperatura entre suas interfaces superior e inferior; conhecidas as propriedades do filme.

O fluxo de calor por condução em um meio pode ser obtido de acordo com a Lei de Fourier e expresso pela Equação 2.7 (WELTY, 1974).

$$q''_{cond} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

em que q''_{cond} é o fluxo de calor condutivo (W m^{-2}); k é a condutividade térmica do material ($\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e dT/dx é o gradiente de temperatura na direção x (K m^{-1}). Neste processo, dT é a diferença entre as temperaturas das superfícies inferior e superior do filme.

O fluxo de calor por convecção é dado pela Lei de Newton do Resfriamento (Equação 2.8).

$$q''_{conv} = h(T_s - T_{ar}) \quad (2.8)$$

em que q''_{conv} é o fluxo de transferência de calor por convecção ($W m^{-2}$); h é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W m^{-2} K^{-1}$); T_{ar} é a temperatura do fluido (K) e T_s é a temperatura dessa superfície (K), para o RW: T_s é a temperatura da superfície na interface polpa-ar. O coeficiente de transferência de calor por convecção (h) é determinado experimentalmente e seu valor é dependente das variáveis que influenciam a convecção, como da geometria da superfície, da natureza do movimento, das propriedades e da velocidade do fluido (INCROPERA et al., 2008).

O fluxo de transferência de calor líquido por radiação entre a água e a polpa é dado pela Equação 2.9.

$$q''_{rad} = \varepsilon\sigma(T_{\acute{a}gua}^4 - T_{polpa}^4) \quad (2.9)$$

em que q''_{rad} representa o fluxo de transferência de calor por radiação, ε é a emissividade da água, σ é a constante de *Stefan-Boltzmann* ($5,6704 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$), e para o caso da secagem em RW: $T_{\acute{a}gua}$ e T_{polpa} referem-se às temperaturas da água e da polpa (K), respectivamente.

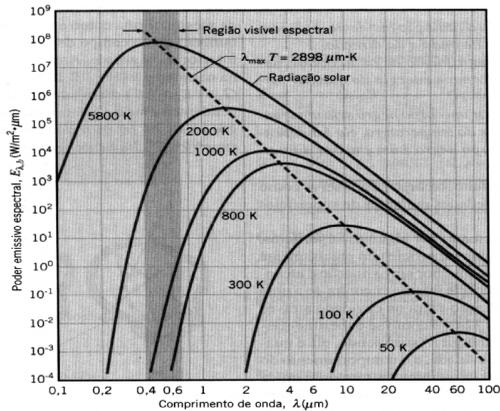
O filme de poliéster (*Mylar*) é semitransparente à radiação infravermelha. A radiação infravermelha é melhor transferida quando a face inferior do filme de poliéster (*Mylar*) está em contato com a água aquecida, enquanto a face oposta está em contato com o material úmido (NINDO; TANG, 2007). Nessa condição a refração entre a interface plástico-água e plástico-produto é reduzida e a energia da radiação infravermelha emitida pela água quente é transmitida através do filme e absorvida pela água da solução em processo de secagem.

A refração de um feixe radiante que incide em uma superfície semitransparente é governada pela Reflexão de Fresnel (SIEGEL; HOWELL, 1992). O índice de refração do filme de poliéster (*Mylar*) é de 1,64 (TSILINGIRIS, 2003), da água é de 1,33 e do ar é de 1,00 (SIEGEL; HOWELL, 1992). Assim, o feixe de radiação incidente na direção normal sofre a refração, devido ao coeficiente de perda por refração nas interfaces do sistema (SIEGEL; HOWELL, 1992). Quando o produto de elevada umidade é espalhado, o coeficiente de perda por reflexão é reduzido em cinco vezes, ou seja, na interface água-*mylar* o $r_{\acute{a}gua-mylar}(0)$ é de 0,01073, enquanto que quando a interface ar-*mylar* é mantida sem o produto o $r_{ar-mylar}(0)$ é de 0,0587 (TSILINGIRIS, 2003;

ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO, 2015). Com a redução da umidade do produto, a janela de transmissão se fecha e a transferência de calor por condução torna-se predominante (KUDRA; MUJUMDAR, 2009).

Na secagem por RW três principais aspectos necessitam serem avaliados: i) o espectro de emissão da fonte radiante (água quente), ii) o espectro de transmissão da radiação pelo meio (*Mylar*) e iii) o espectro de absorção da radiação pelo produto (polpa de frutas) (ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO, 2015). Para avaliar o espectro de emissão de energia pela água quente Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) realizaram uma analogia ao corpo negro, devido à proximidade do valor da emissividade do corpo negro ($\epsilon = 1$) com o da água ($\epsilon = 0,96$). Assim, esses autores observaram que pela Lei de Deslocamento de *Wien*, um corpo negro na temperatura de 373 K (100 °C), apresenta emissão máxima no comprimento de onda próximo a 8 μm ($10^2 \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$). Nos comprimentos de onda entre 4 μm e 40 μm a emissão de um corpo negro corresponde a mais de 10% da emissão máxima ($10^1 \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) (INCROPERA et al., 2008) (Figura 2.4).

Figura 2.4 - Poder emissivo espectral de corpos negros.

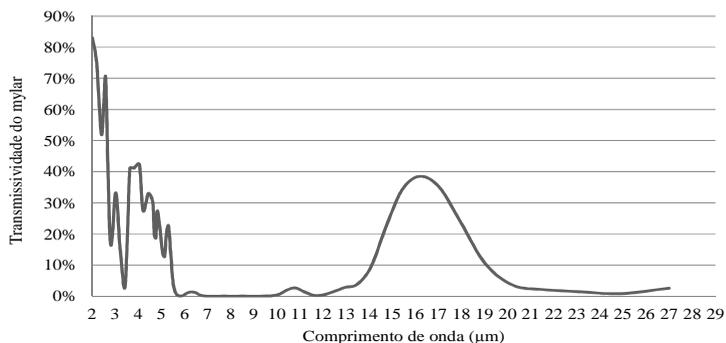


Fonte: Incropera et al. (2008).

Quanto ao espectro de transmissão da energia pelo filme de poliéster (*Mylar*) devem-se observar as características do filme utilizado. Segundo dados publicados por Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015), o filme de poliéster (*Mylar*) com espessura de 0,25 mm apresenta picos de transmissividade à radiação infravermelha,

sendo que os maiores valores de transmissividade foram entre os comprimentos de onda na faixa entre 2 a 6 μm e 14 a 19 μm . Para os comprimentos de onda em que o corpo negro emite 10% da emissão máxima (4 e 40 μm) o *Mylar* apresentou picos de transmissividade em torno de 40% (Figura 2.5).

Figura 2.5 - Dados de transmissividade do *Mylar* (0,25 mm).



Fonte: adaptado de Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015).

O terceiro aspecto a ser observado nesse sistema de secagem é o espectro de absorção da radiação pelo produto, que é dependente das características do material a ser seco no RW, tais como composição, umidade e espessura (SANDU, 1986). Os alimentos, de maneira geral, são materiais de composição e estrutura complexa, mas geralmente a água é o componente majoritário. O produto espalhado para realizar a secagem por RW é uma suspensão líquida de umidade elevada e, portanto, é interessante avaliar o espectro de absorção da radiação infravermelha pela água. A água tem elevada absorção de radiação infravermelha entre os comprimentos de onda próximos a 3,0, 4,7, 6,0 e acima de 12 μm (STERNGLANZ, 1956; SANDU, 1986). Conforme visto, essa faixa de comprimento de onda coincide com o espectro de transmissão do *Mylar* e de emissão da água quente (STERNGLANZ, 1956; SANDU, 1986). A penetração e a absorção da radiação na polpa ocorrem de acordo com a Lei de Beer (SIEGEL; HOWELL, 1992). A profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas em um material é comumente definida como a distância a partir da interface (radiação incidente) em que a radiação é reduzida $1/\epsilon$ (36,79%) da potência incidente, em que ϵ é o número de Euler (SINGH; HELDMAN, 2009). Para a água, a profundidade de penetração é de até 0,09 mm nos

comprimentos de onda entre 2 μm e 200 μm (ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO, 2015).

Ao final do processo de secagem, o produto está mais concentrado, com pouca umidade, situação em que a capacidade de absorção da radiação pela polpa é muito menor. A radiação emitida pela água é refletida pelo suporte (*Mylar*) e retorna para a fonte emissora. Segundo essa análise, neste estágio da secagem, a transferência de calor por condução tornar-se-ia predominante, com redução da taxa de secagem (CLARKE, 2004; RATTI; MUJUMDAR, 2006; NINDO; TANG, 2007; ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO, 2015). No entanto, trabalhos recentes mostraram que a transferência de calor por radiação para a polpa é desprezível, mesmo no período de secagem à taxa constante, conforme descrito a seguir.

O fluxo máximo de transferência de calor por radiação foi calculado por Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) pela equação de *Stefan-Boltzman* no período de taxa constante de secagem. Para isso esses autores consideraram emissividade do corpo negro ($\epsilon = 1$), o filme de poliéster (*Mylar*) totalmente transparente à radiação infravermelha e a temperatura da suspensão (polpa de manga) igual a 70 °C no período de taxa constante de secagem. Assim, eles demonstraram que a importância relativa da radiação nos processos de secagem por RW é pequena, da ordem de 3% do calor total transferido para a polpa. Dessa forma, a contribuição da radiação pode ser negligenciada, indicando claramente que esse processo de secagem é governado pelo mecanismo de condução. Em estudo análogo ao anterior, Ortiz-Jerez et al. (2015) relataram que apenas 1% do calor transferido à polpa de abóbora é proveniente da radiação infravermelha da água aquecida e que a maior parcela de energia térmica transferida é por condução (99%).

Um estudo detalhado sobre as importâncias relativas dos mecanismos de transferência de calor em processos de secagem por RW foi publicado por Ortiz-Jerez e Ochoa-Martínez (2015). Esses autores avaliaram os efeitos da convecção externa (natural ou forçada) e a exposição do produto à radiação infravermelha (uso do *Mylar* e de uma folha de alumínio colada ao *Mylar*). A temperatura da água aquecida foi de 90 °C (± 2 °C) e a velocidade do ar de 0,5 m s^{-1} ($\pm 0,2 \text{ m s}^{-1}$) (convecção forçada). Esses autores quantificaram as contribuições dos mecanismos de condução, convecção e radiação. A taxa de transferência de calor por radiação foi pequena (1,05 W) em relação à condução (108 W) no processo de secagem utilizando o filme de poliéster (*Mylar*), indicando claramente que o processo denominado de RW é controlado

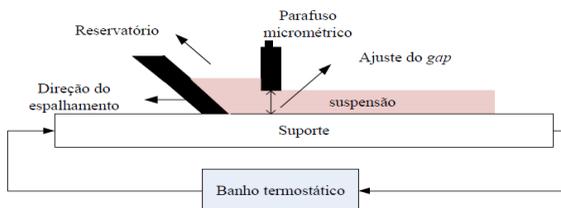
pela transferência de calor por condução. O mesmo comportamento foi observado quando utilizado o filme de poliéster com alumínio, que evita a transferência de calor por radiação infravermelha.

Diante do exposto a secagem por RW é uma secagem condutiva, em que fina camada de alimento é espalhada sobre um suporte aquecido para que ocorra a desidratação. Isso explica a denominação genérica de *cast-tape drying* usada neste estudo.

2.3.2 Tape-casting

O *tape-casting* é um processo de espalhamento de uma suspensão em um suporte plano, sobre o qual se realiza a secagem condutiva ou convectiva do filme espalhado (HOTZA, 1997). Esse processo é amplamente utilizado na produção de filmes poliméricos e cerâmicos. O estudo da secagem de suspensões para formar filmes tem sido intensificado nos últimos anos (MOREIRA et al. 2011, SAINI; SINGH; SAXENA, 2012, TÁPIA-BLÁCIDO; SOBRAL; MENEGALLI, 2013; MORAES et al., 2013; MORAES; RESZKA; LAURINDO, 2014; MORAES et al., 2015). Um dispositivo experimental de *tape-casting* está representado pela Figura 2.6 e consiste de uma superfície metálica aquecida pela circulação de água no seu interior (camisa de água quente). O material a ser seco é espalhado sobre essa superfície aquecida na forma de filme, onde ocorre a desidratação. A desidratação também pode ser realizada pela circulação de ar quente sobre a solução depositada ou fornecer o calor com uma fonte de radiação infravermelha.

Figura 2.6 - Aparato experimental *tape-casting*.



Fonte: Adaptado de Moares et al. (2015).

2.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE EM ALIMENTOS DESIDRATADOS EM PÓ

Alimentos desidratados em pó possuem estabilidade química e microbiológica, com menores custos de transporte e armazenamento que os produtos com altos teores de umidade (FORNY; MARABI; PALZER, 2011). O pó pode ser facilmente diluído em um líquido para o consumo como uma bebida, ou misturados com outros ingredientes alimentícios, para formar suspensões, para uso doméstico ou industrial. Dentro desse contexto se faz necessário conhecer as características dos alimentos em pó, como: i) microestrutura, ii) composição química e iii) estabilidade durante o armazenamento. Normalmente, esses produtos são susceptíveis às variações ambientais, aumentando a pegajosidade e/ou a aglomeração, durante a produção e armazenamento. O comportamento dos produtos em pó quando reconstituídos com água também é importante para a definição das suas possíveis aplicações (CHEN; ÖZKAN, 2007; FORNY; MARABI; PALZER, 2011).

2.4.1 Atividade de água e isotermas de sorção de umidade

A atividade de água é uma propriedade termodinâmica que indica o grau de disponibilidade da água presente no alimento para agir como solvente e participar das transformações químicas, bioquímicas e microbiológicas (FENNEMA, 1996; JANGAM; MUJUMDAR; LAW, 2010). A água, geralmente, é o constituinte majoritário presente nos alimentos, podendo encontrar-se na forma livre ou ligada. A água livre está fracamente ligada aos substratos, funcionando como um solvente e permitindo o crescimento dos microrganismos, germinação de esporos e a ocorrência de reações químicas. A água ligada ao substrato está menos disponível como solvente, dificultando o desenvolvimento microbiano e retardando as reações químicas (BOBBIO; BOBBIO, 1989). A atividade de água é dada pela Equação 2.10.

$$a_w = \frac{P_{\text{vapor}}}{P_w^0} \quad (2.10)$$

em que P_{vapor} é a pressão de vapor da água em equilíbrio com o alimento à determinada temperatura e P_{vapor}^0 é a pressão de vapor da água pura à mesma temperatura. Os valores de atividade de água variam de 0 a 1. Valores acima de 0,6 são suficientes para o crescimento de

determinados microrganismos (RAHMAN, 2008). Quando um material biológico é exposto ao ambiente com determinada umidade relativa, este tende a ajustar sua umidade até a condição de equilíbrio com o ambiente. A umidade de equilíbrio do material ocorre quando a pressão de vapor de água na sua superfície se iguala à pressão de vapor de água do ar que o envolve. A tendência de um material em adsorver água do ambiente onde se encontra define a sua higroscopicidade. A higroscopicidade é uma propriedade importante dos produtos alimentícios, que influencia os processos de manuseio, processamento, estocagem e consumo (LABUZA, 1968). A higroscopicidade pode ser avaliada através das isotermas de sorção, que relacionam a atividade de água e a umidade de equilíbrio de um alimento a uma dada temperatura. As isotermas de sorção podem ser obtidas em processos de sorção e dessorção de umidade, sendo que as curvas podem ser diferentes, devido ao fenômeno de histerese (LABUZA, 1968). A isoterma de sorção de um material pode ser dividida em três regiões distintas, as quais dependem do estado físico da água presente. A primeira região cobre uma faixa de valores de atividade de água entre zero e 0,35 e representa a adsorção de um filme de água monomolecular. A segunda região, com valores de atividade de água entre 0,35 a 0,60 representa a adsorção das camadas adicionais de água acima da monocamada. A terceira região, acima de 0,60, representa a água condensada nos poros do material, com dissolução de materiais solúveis presentes (LABUZA, 1968).

As isotermas de sorção foram classificadas por Brunauer, Emmett e Teller (1938) de acordo com a variação de umidade de equilíbrio com a atividade de água do produto e suas formas encontram-se apresentadas na Figura 2.7. As isotermas que mais caracterizam os alimentos são as do tipo II e III (BRUNAUER; EMMETT; TELLER, 1938). A de tipo III é típica de produtos ricos em componentes solúveis, tais como açúcar ou sal (RAHMAN, 2008).

Figura 2.7 - Tipos de isotermas de sorção.



Fonte: Adaptado de Brunauer, Emmett e Teller (1938).

2.4.2 Transição vítrea

Os produtos alimentícios que passam por processos de desidratação ou congelamento rápido apresentam uma matriz sólida amorfa, a qual é resultado da remoção rápida da água desses produtos ou do rápido resfriamento (ROOS, 1995). Estes sólidos que estão em um estado amorfo metaestável são sensíveis às mudanças de temperatura, de pressão e de umidade. A matriz amorfa pode existir como um material vítreo viscoso ou como uma estrutura amorfa gomosa ou borrachosa. Essa estrutura amorfa apresenta moléculas desalinhas, emaranhadas, de estrutura mais aberta e porosa (BHANDARI, 2007).

Abaixo da T_g , o material possui uma forma rígida de pouca mobilidade molecular, com viscosidade da ordem de 10^{12} Pa s, característica do estado vítreo. Logo acima da T_g o material apresenta maior mobilidade molecular e maior volume livre, e sua forma se assemelha ao de borracha (estado borrachoso). Com o aumento da temperatura esse material passa a apresentar um estado de fluido viscoso (ROOS, 1995; AGUILERA; STANLEY, 1999). A T_g é uma propriedade específica de um material amorfo e refere-se à temperatura de mudança de fase, na qual um sólido vítreo é transformado em uma forma gomosa, e vice-versa (BHANDARI; HOWES, 1999).

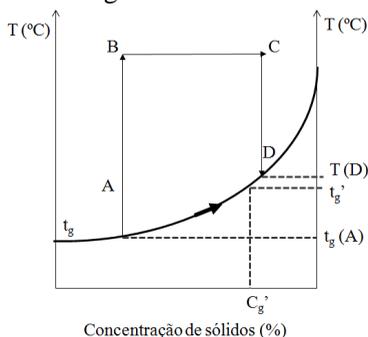
O conceito de transição vítrea é uma ferramenta importante para compreensão dos mecanismos que explicam as transformações em produtos alimentícios durante seu processamento e armazenamento (ROOS, 1995; RAHMAN, 2008). A T_g é considerada como uma temperatura de referência, pois abaixo dela espera-se que o alimento seja mais estável, enquanto acima desta temperatura as mudanças físicas, químicas e microbiológicas são mais fáceis de ocorrer (RAHMAN, 2008). Porém, algumas reações físico-químicas podem ainda ocorrer no estado vítreo, o que indica que a T_g não pode ser considerada um parâmetro único para a determinação da estabilidade de um produto alimentício (CHAMPION; LE MESTE; SIMATOS, 2000; LE MESTE et al., 2002). Relaxações sub- T_g e envelhecimento físico demonstram que a mobilidade molecular abaixo da T_g não pode ser desprezada (LE MESTE et al., 2002). A definição da transição vítrea auxilia no conhecimento das variações de propriedades mecânicas na faixa de transição vítrea, permitindo assim controlar as operações de processamento de alimentos, tais como secagem, congelamento, liofilização, extrusão e floculação (CHAMPION; LE MESTE; SIMATOS, 2000).

A transição vítrea também pode ser definida como o fenômeno no qual um sólido amorfo exibe uma variação abrupta nas derivadas de propriedades termodinâmicas, tais como no calor específico e no coeficiente de expansão térmica, em função da temperatura. A T_g pode ser medida por diversas técnicas experimentais, como a calorimetria exploratória de varredura. Na análise por DSC pode-se visualizar as mudanças de fase, de primeira e segunda ordem, dos materiais em função da temperatura (RAHMAN, 2008).

Diagramas de estados simplificados podem ser utilizados para compreender o estado físico dos produtos alimentícios (BHANDARI, 2007). Segundo Levine e Slade (1986) um diagrama que represente os estados nos quais um sistema pode existir em função da temperatura, da concentração e pressão pode ser bastante útil. O diagrama de estado é assim chamado porque representa não somente um diagrama de fases de equilíbrio, mas uma combinação desse estado e eventos metaestáveis ou cinéticos (SCHENZ, 1995).

O processo de desidratação de um alimento consiste na retirada de sua umidade. Como a evaporação da água ocorre em velocidades altas, o alimento passa a apresentar uma matriz amorfa (ROOS, 1995). Como ilustrado na Figura 2.8, no início da secagem ocorre um aumento da temperatura do produto, sem modificação de sua concentração de sólidos (segmento A'-B').

Figura 2.8 - Evolução da temperatura de transição vítrea de um alimento no processo de secagem.



Fonte: Adaptado de Genin e René (1995).

Posteriormente, a evaporação da água do produto se dá a uma temperatura quase constante (trajeto B'-C') e têm-se o aumento na concentração de sólidos do produto. Após o término da secagem, o

produto é resfriado para ser armazenado (segmento C'-D') (GENIN; RENÉ, 1995). Assim, a temperatura final do produto seco é reduzida abaixo da sua T_g , e seu estado passa a ser vítreo amorfo, evitando que ele fique pegajoso (*sticky*), facilitando sua remoção (KUDRA; MUJUMDAR, 2009).

A T_g é diferente para cada material e é influenciada por três principais fatores: i) tipo de material plastificante presente na sua composição, ii) massa molar e iii) composição do produto. Se o material plastificante for água, a T_g é significativamente reduzida, pois ela aumenta a mobilidade molecular, devido à sua baixa massa molar, o que aumenta o volume livre e diminui a viscosidade do meio (ROOS, 1995; BHANDARI, 2007).

Os alimentos em pó que contém carboidratos amorfos podem passar por mudanças físicas, tais como a cristalização, pegajosidade e compactação durante o processamento, manipulação e estocagem. Estas mudanças físicas em materiais desidratados estão diretamente relacionadas à T_g (BOONYAI; BHANDARI; HOWES, 2004).

2.4.2.1 Fenômenos físicos relacionados à transição vítrea

A compactação, a pegajosidade e a cristalização de alimentos amorfos estão relacionadas ao fenômeno do colapso da estrutura física. O colapso físico de um alimento em pó ocorre quando uma matriz não consegue suportar seu próprio peso. A compactação resulta no endurecimento e na redução do escoamento das partículas de pós, que pode prejudicar a sua reidratação. O fenômeno da pegajosidade (*stickiness*) se refere tanto à pegajosidade entre as partículas, a qual é dada por forças de coesão que as mantêm unidas, quanto à pegajosidade partícula-parede, devido às forças de adesão (propriedade interfacial) que mantêm o pó aderido à superfície de outro material (BHANDARI, 2007).

A coesão entre as partículas é desejável em processos de instantaneização, para a formação de granulados. Por outro lado, em secagem por atomização a pegajosidade tem sido relatada como um dos principais problemas que influenciam a qualidade dos pós, pois quando as partículas se encontram insuficientemente secas, colidem com outras ou com a parede do equipamento e aderem a esta. Isso pode levar a baixos rendimentos de produto, ao superaquecimento, resultando em características sensoriais indesejáveis e degradação do alimento, com aumento do tempo de processo (BOONYAI; BHANDARI;

HOWES, 2004; BHANDARI, 2007; CHEN; ÖZKAN, 2007). Em temperaturas acima de T_g e alta umidade, o produto desidratado pode passar do estado vítreo para o gomoso, provocando o fenômeno da pegajosidade (BHANDARI, 2007).

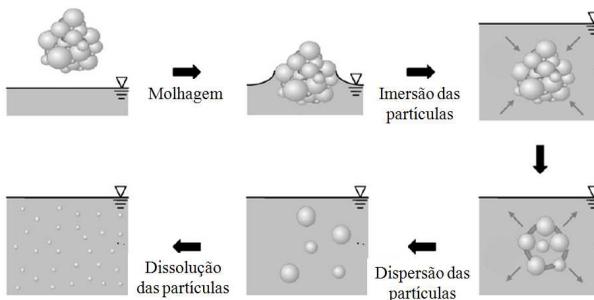
Vale ressaltar que a pegajosidade dos materiais depende de diferentes fatores, como a viscosidade, umidade, temperatura, presença de forças de compressão, estrutura e tamanho das partículas. Várias teorias são utilizadas para explicar este fenômeno, baseadas nas forças eletrostáticas e intermoleculares, adsorção e transição vítrea. No entanto, nenhum desses mecanismos tem sido suficiente para explicar e caracterizar completamente o problema da pegajosidade dos alimentos (ADHIKARI et al., 2001). Na indústria, a pegajosidade de produtos alimentícios em pós tem sido reduzida pela adição de agentes carreadores com altos valores de T_g , como maltodextrinas e gomas, resfriamento do produto abaixo da T_g com uso de ar refrigerado e seleção adequada de parâmetros de secagem (BOONYAI; BHANDARI; HOWES, 2004; CHEN; ÖZKAN, 2007).

A influência do fenômeno de transição vítrea no processo de secagem de pastas alimentícias sobre a superfície de materiais sólidos foi avaliada por Collares (2001). Segundo a autora o desprendimento de filmes de maltodextrina, melão de cana-de-açúcar e goma arábica durante a secagem sobre a superfície de materiais sólidos, tais como placas de vidro comum, de aço inoxidável, de *Nylon* e de *Teflon* são dependentes da transição vítrea do material alimentício. De acordo com a autora, para ocorrer o desprendimento da película seca, sem auxílio externo, é necessário que a sua umidade seja igual ou menor que à da transição vítrea, na temperatura de operação.

2.4.3 Reidratação dos alimentos em pó

A reconstituição dos pós por um líquido é realizada em quatro etapas, as quais são dependentes das propriedades de molhabilidade, de imersão, de dispersão e de dissolução das partículas em pó (FORNY; MARABI; PALZER, 2011). A primeira etapa consiste na molhagem do pó aglomerado, que ocorre pela penetração do líquido na sua estrutura. Após essa etapa, ocorre a imersão ou deposição dos aglomerados dos pós no líquido. Em seguida, as partículas se dispersam no líquido e, no final, há a dissolução dessas partículas do pó no líquido, se forem solúveis. Essas etapas podem ser observadas no esquema apresentado na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Dispersão de partículas aglomeradas dos pós em um líquido.



Fonte: Adaptado de Forny, Marabi e Palzer (2011).

A avaliação de molhabilidade dos pós é baseada na determinação do ângulo de contato entre o líquido e as partículas de pó. O ângulo de contato é um indicador da hidrofobicidade de um sólido em pó quando disperso em água. O ângulo de contato, entre a superfície das partículas de pós e a água, é dependente das propriedades físico-químicas do líquido, da rugosidade da superfície, da composição e orientação molecular no pó, inchamento e dissolução parcial do sólido no líquido (LAZGHAB et al., 2005; FORNY; MARABI; PALZER, 2011). Deste modo, pode-se dizer que a molhabilidade de um sólido por um líquido é dada pelas interações moleculares entre as fases em contato. As interações moleculares podem ocorrer por ligações químicas (iônicas, covalentes ou metálicas), interações ácido-base de Lewis e Brønsted, e por pontes de hidrogênio e forças de *Van der Waals* (LAZGHAB et al., 2005). A determinação do ângulo de contato entre a água e partículas não é simples, devido às diferentes formas que estas podem apresentar e às irregularidades físicas e químicas das suas superfícies. Assume-se que componentes hidrofóbicos que recobrem a superfície dos pós, tais como lipídios, proporcionam ângulos de contato maiores com a água, enquanto que componentes hidrofílicos, como carboidratos, favorecem ângulos de contato menores com a água (KIM; CHEN; PEARCE, 2002; FORNY; MARABI; PALZER, 2011).

O tempo para que um líquido penetre completamente dentro de uma partícula porosa é decisivo para o processo de reconstituição. O líquido penetra nos poros das partículas impulsionado pela pressão capilar (FORNY; MARABI; PALZER, 2011; HOGKAMP; SCHUBERT, 2003). A penetração do líquido em uma partícula é

afetada pelo seu tamanho. Partículas muito pequenas tendem a formar uma camada viscosa durante a etapa de molhagem, dificultando a dispersão. Quando o líquido penetra na partícula ou no aglomerado de partículas, a dissolução de componentes da parede forma uma solução viscosa, a qual reduz a tensão interfacial, enfraquecendo a força capilar. A formação desta camada viscosa impede a penetração de líquido, e este fenômeno causa a formação de aglomerados, os quais flutuam na superfície do líquido (CHEN; ÖZKAN, 2007; HOGEKAMP; SCHUBERT, 2003). O tamanho, o formato das partículas e o estado físico das ligações entre as partículas que formam os aglomerados são fatores que influenciam na quantidade de energia necessária para quebrar os aglomerados em partículas individuais, afetando o processo de dissolução (FORNY; MARABI; PALZER, 2011).

Após determinado tempo de contato entre as partículas e o líquido, a solubilidade pode ser utilizada para medir a quantidade de partículas não solúveis. A solubilidade depende da quantidade de lipídeos e do estado das proteínas do produto (CHEN; ÖZKAN, 2007).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABONYI, B. I.; FENG, H.; TANG, J.; EDWARDS, C. G.; CHEW, B. P.; MATIINSON, D. S.; FELLMAN, J. K. Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window system. **Journal of Food Science**, v. 67, n. 2, p. 1051-1056, 2001.

ABUL-FADL, M. M.; GHANEM, T. H. Effect of Refractance Window (RW) drying method on quality criteria of produced tomato powder as compared to the convection drying method. **World Applied Science Journal**, v. 15, n. 7, p. 93-96, 2011.

ADHIKARI, B.; HOWES, T.; BHANDARI, B. R.; TRUONG, V. Stickiness in foods: A review of mechanisms and test methods. **International Journal of Food Properties**, v. 4, p. 1-33, 2001.

AGUILERA, J. M.; STANLEY, D. W. *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering*. Am Aspen Publication, 1999.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEGA-MERCADO, H. *Dehydration of Foods*. Chapman & Hall's, 1996.

BARBOSA-CÁNOVAS G.V.; IBARZ, A. *Unit Operations in Food Engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003.

BHANDARI, B. R.; SENOUSSE, A.; DUMOULIN, E. D.; LEBERT, A. Spray drying of concentrated fruit juices. **Drying Technology**, v. 11, n. 5, p. 1081–1092, 1993.

BHANDARI, B. R.; HOWES, T. Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. **Journal of Food Engineering**, v. 40, p. 71-79, 1999.

BHANDARI, B. R. *Stickiness and Caking in Food Preservation*. In: M. S. Rahman, Handbook of Food Preservation (p. 387-401). CRC Press, 2007.

BOBBIO, F. O.; BOBBIO, P. A. *Introdução a Química de Alimentos*. 2 ed. São Paulo: Livraria Varela, 1989. 231p.

BOONYAI, P., BHANDARI, B., HOWES, T. Stickiness measurement techniques of food powders: A review. **Powder Technology**, v. 145, p. 34-46, 2004.

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

CAPARINO, O. A.; TANG, J.; NINDO, C. I.; SABLANI, S. S.; POWERS, J. R.; FELLMAN, J. K. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (*Philippine 'Carabao'* var.) powder. **Journal of Food Engineering**, v. 11, p. 135-148, 2012.

CASTOLDI, M. ZOTARELLI, M. F., DURIGON A., CARCIOFI, B. A. M., LAURINDO, J. B. Production of tomato powder by refractance window drying. **Drying Technology**, v. 33, n. 12, p. 1463-1473, 2015.

CHAMPION, D.; LE MESTE, M.; SIMATOS, M. Towards an improved understanding of glass transition and relaxations in foods: molecular mobility in the glass transition range. **Food Science and Technology**, v. 11, p. 41-55, 2000.

CHEN, X. D.; ÖZKAN, N. Stickiness, functionality, and microstructure of food powders. **Drying Technology**, v. 25, p. 969-979, 2007.

CLARKE, P. T. Refractance Window™ - “down under”. Proceedings of the 14th International Drying Symposium, IDS 2004, v. B, p. 813-820, 2004.

COLLARES, F. P. Desprendimento de filmes de pastas alimentícias durante a secagem sobre superfícies de sólidos e sua relação com a transição vítrea. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 2001, 205 p.

CURRENCE, T. M. Tomato breeding. I. Species, origin and botanical characters. **Handbuch der pflanzenzuchtung**, v. 2, p. 351-369, 1963.

DORAIS, M.; GOSSELIN, A.; PAPADOPOULOS, A. P. Greenhouse tomato fruit quality. **Horticultural Reviews**, v. 26, p. 239-306, 2001.

FAO. FAOSTAT 2012. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em: 31mar. 2014.

FENNEMA, O. R. Food Chemistry. New York: Marcel Dekker, 1996.

FILGUEIRA, F. A. R. *Solanáceas: agrotecnologia moderna na produção de tomate, batata, pimentão, pimenta, berinjela e jiló*. Lavras: UFLA, 2003. 331 p.

FILKOVÁ, I.; HUANG, L. X.; MUJUMDAR, A. S. *Industrial spray drying systems*. In MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying. Taylor & Francis Group. 2006.

FORNY, L.; MARABI, A.; PALZER, S. Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders. **Powder Technology**, v. 206, p. 72-78, 2011.

GEANKOPLIS, C. J. *Transport Processes and Unit Operations*. Prentice-Hall International, Inc. 3. th. E.U.A, 1993.

GEORGE, J. P.; DATTA, A. K. Development and validation of heat and mass transfer models for freeze-drying of vegetable slices. **Journal of Food Engineering**, v. 52, p. 89-93, 2002.

GENIN, N.; RENÉ, F. Analyse du rôle de la transition vitreuse dans les procédés de conservation agro-alimentaires. **Journal of Food Engineering**, v. 26, p. 391-408, 1995.

GIOVANNUCCI, E. Tomatoes, tomato-based products, lycopene, and cancer: review of the epidemiologic literature. **Journal of the National Cancer Institute**, v. 91, p. 317 - 31, 1999.

GOULA, M. A., ADAMOPOULOS, K. G. *Spray drying* performance of a laboratory spray dryer for tomato powder preparation. **Drying Technology**, v. 21, n. 7, p. 1273-1289, 2003.

GOULA, M. A.; ADAMOPOULOS, K. G. *Spray drying* of tomato pulp in dehumidified air: I The effect on product recovery. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 25-34, 2005.

GOULA, M. A.; ADAMOPOULOS, K. G. Effect of maltodextrin addition during *spray drying* of tomato pulp in dehumidified air: II. Powder properties. **Drying Technology**, v. 26, p. 726-737, 2008.

GOULD, W. A. *Tomato Production, Processing and Technology* (3th), CTI Publishers, Baltimore, MD, p. 107-108, 1992.

HOGKAMP, S.; SCHUBERT, H. Rehydration of food powders. **Food Science and Technology International**, v. 3, n. 9, p. 223-235, 2003.

HOTZA, D. Colagem de folhas cerâmicas. **Cerâmica**, v. 43, p. 283-284, São Paulo, 1997.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa*. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em:

http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201202.pdf. Acesso em: 31 mar. 2014.

JANGAM, S. V.; MUJUMDAR, A. S.; LAW, C. L. *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*, v. 1, 2010.

KIM, E. H.; CHEN, X. D.; PEARCE, D. Surface characterization of four industrial spray-dried dairy powders in relation to chemical composition, structure and wetting property. **Colloids and Surfaces Biointerfaces**, v. 26, p. 197-212, 2002.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. *Advanced Drying Technologies*. CRC Press, 2009.

LABUZA, T.P. Sorption phenomena in foods. **Food Technology**, v. 22, n. 3, p. 15-24, 1968.

LAZGHAB, M.; SALEH, K.; PEZRON, I.; GUIGON, P.; KOMUNJER, L. Wettability assessment of finely divided solids. **Powder Technology**, v. 157, p. 79-91, 2005.

LE MESTE, M.; CHAMPION, D.; ROUDAUT, G.; BLOND, G.; SIMATOS, D. Glass transition and food technology: A critical appraisal. **Journal of Food Science**, v. 67, n. 7, p. 2444-2458, 2002.

LEVINE, H.; SLADE, L. A Polymer physico-chemical approach to the study of commercial starch hydrolysis products (SHPs). **Carbohydrate Polymer**, v. 6, p. 213-244, 1986.

LIN, C. H.; CHEN, B. H. Stability of carotenoids in tomato juice during storage. **Food Chemistry**, v. 90, p. 837-846, 2005.

MACHADO, A. Q.; ALVARENGA, M. A. R.; FLORENTINO, C. E. T. Produção de tomate italiano (saladete) sob diferentes densidades de plantio e sistemas de poda visando ao consumo *in natura*. **Horticultura Brasileira**, v. 25, p. 149 - 153, 2007.

MAGOON, R. E. Patent No. 4,631,837. U. S. A., 1986.

MONTEIRO, C. S.; BALBI, M. E.; MIGUEL, O. G.; PENTEADO, P. T. P da S.; HARACEMIV, S. M. C. Qualidade nutricional e antioxidante do tomate “tipo italiano”. **Alimentos e Nutrição**, v.19, p. 25-31, 2008.

MORAES, J. O.; SCHEIBE, A. S.; SERENO, A.; LAURINDO, J. B. Scale-up of the production of cassava starch-based films using tape-casting. **Journal of Food Engineering**, v. 119, p. 800-808, 2013.

MORAES, J. O., RESZKA, A., LAURINDO, J. B. Espalhamento e secagem de filme de amido-glicerol-fibra preparado por *tape-casting*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 136-143, 2014.

MORAES; J. O. de; SCHEIBE, A. S.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Conductive drying of starch-fiber films prepared by tape casting: Drying rates and film properties, **LWT – Food Science and Technology**, v. 64, p. 356-366, 2015.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M. D.; SILVA, C.; PRIETO, D. M.; SOUSA, A. M. M. Drying kinetics of biofilms obtained from chestnut starch and carrageenan with and without glycerol. **Drying Technology**, v. 29, n. 9, p. 1058-1065, 2011.

NINDO, C. I.; FENG, H.; SHEN, G. Q.; KANG, D. H. Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. **Journal of Food Processing Preservation**, v. 27, p. 117-136, 2003.

NNDO, C. I.; TANG, J.; POWERS, J. R.; BOLLAND, K. Energy consumption during refractance window evaporation of selected berry juices. **International Journal of Energy Research**, v. 28, p. 1089-1100, 2004.

NINDO, C. I.; TANG, J. Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. **Drying Technology**, v. 25, p. 37-48, 2007.

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

ORTIZ-JEREZ, M. J.; GULATI, T.; DATTA, A. K.; OCHOA MARTÍNEZ, C. I. Quantitative understanding of Refractance Window™ Drying. **Food and Bioproducts Processing**, v. 95, p. 237-253, 2015.

ORTIZ-JEREZ, M. J.; OCHOA-MARTÍNEZ, C. I. Heat transfer mechanisms in conductive hydro-drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*) pieces, **Drying Technology: An International Journal**, v. 33, n. 8, p. 965-972, 2015.

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

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

RATTI, C.; MUJUMDAR, A. S. Infrared Drying. In A. S. Mujumdar. *Handbook of Industrial Drying*. **CRC Press**, p. 423-437, 2006.

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

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

SAHLIN, E.; SAVAGE, G. P.; LISTER, C. E. Investigation of the antioxidant properties of tomatoes after processing. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 17, p. 635-647, 2004.

SAINI, C.; SINGH, S.; SAXENA, D. C. Thin layer drying characteristics of sweet potato starch based films and mathematical modeling. **Journal of Food Process Technology**, v. 3, n. 7, p. 3 - 8, 2012.

SANDU, C. Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis. **Biotechnology Progress**, v. 2, n. 3, p. 109-119, 1986.

SCHENZ, T. W. Glass transitions and product stability-an overview. **Food Hydrocolloids**, v. 9, n. 4, p. 307-315, 1995.

SHARMA, S. K.; LE MAGUER, M. Kinetics of lycopene degradation in tomato pulp solids under different processing and storage conditions. **Food Research International**, v. 29, p. 309 - 315, 1996.

SHI, J.; LE MAGUER, M. Lycopene in tomatoes: chemical and physical properties affected by food processing. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 20, p. 293 - 334, 2000.

SIEGEL, R.; HOWELL, J. R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. 3th. Washington: Taylor & Francis, 1992.

SINGH, R.P.; HELDMAN, D.R. *Introduction to Food Engineering*, 4th London: Elsevier Publishing, 2009.

STERNGLANZ, H. Using water as an infrared solvent. **Journal of Applied Spectroscopy**, v. 2, p. 77-82, 1956.

TÁPIA-BLÁCIDO, D. R.; SOBRAL, P. J. A.; MENEGALLI, F. C. Effect of drying conditions and plasticizer type on some physical and mechanical properties of amaranth flour films. **LWT – Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 392 – 400, 2013.

TSILINGIRIS, P. T. Comparative evaluation of the infrared transmission of polymer films. **Energy Conversion and Management**, v. 44, p. 2839-2856, 2003.

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.

WARNOCK, S. J. A review of taxonomy and phylogeny of genus *Lycopersicon*. **Hort Science**, v. 23, n. 4, p. 669-673, 1988

WELTY, J. R. *Engineering Heat Transfer*. John Wiley & Sons, Inc, 1974.

3. INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE PROCESSO NA SECAGEM DA POLPA DE TOMATE POR CAST-TAPE

3.1 INTRODUÇÃO

O processo de secagem de uma solução líquida ou semilíquida por *refractance window* (RW), para a obtenção de alimentos desidratados na forma de filmes, flocos e em pó, tem sido amplamente investigado nas duas últimas décadas. Na literatura é possível encontrar a aplicação deste processo na secagem de polpas de frutas e hortaliças, como polpas de cenoura e morango (ABONYI et al., 2001), de abóbora (NINDO et al., 2003), de tomate (ABUL-FADL; GHANEM, 2011; CASTOLDI et al., 2015), de açaí (PAVAN; SCHMIDT; FENG, 2012), de manga (CAPARINO et al., 2012; ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO, 2015), de romã (BAEGHBALI et al., 2016), de *haskap berry* (CELLI et al., 2016). Além disso, o uso do processo de RW para a secagem de manga em fatias (OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012) e de abóbora em fatias (ORTIZ-JEREZ et al., 2015, ORTIZ-JEREZ; OCHOA-MARTÍNEZ, 2015) também tem sido relatado na literatura.

No processo industrial de secagem por RW uma fina camada do alimento é espalhada sobre uma esteira plástica de poliéster, comercialmente chamado de *Mylar* (DuPont®). A esteira (suporte flexível) é movimentada sobre um reservatório com água aquecida, que se encontra em permanente contato com a face inferior do suporte. O equipamento possui uma seção de resfriamento após a secagem, para reduzir a temperatura do produto a um valor abaixo da sua T_g e facilitar a sua remoção. Um sistema de exaustão é usado para retirar a água evaporada durante a secagem (NINDO; TANG, 2007, KUDRA; MUJUMDAR, 2009).

Segundo Nindo e Tang (2007) a energia térmica para que ocorra a secagem é oriunda da água quente, que é transferida para a solução através da interface do filme. Esse filme é semitransparente à radiação infravermelha e, assim, a energia é transferida da água para o alimento pelos mecanismos de condução e radiação. Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) demonstraram em uma análise quantitativa que a importância relativa da radiação nos processos de secagem por RW é pequena (contribuição de cerca de 3% do calor total transferido à polpa), podendo ser negligenciada. Portanto, esse processo de secagem é governado pelo mecanismo de condução. Esses mesmos autores afirmam que o RW é um processo eficiente e relataram capacidade evaporativa de $10 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para temperatura da água de aquecimento

de 95 °C e camada de polpa de manga espalhada com 2 mm de espessura. Ortiz-Jerez et al. (2015) verificaram que apenas 1% do calor transferido à polpa de abóbora é proveniente da radiação infravermelha da água aquecida e que a maior parcela de energia térmica transferida é por condução (99%), corroborando os resultados obtidos por Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015).

Ortiz-Jerez e Ochoa-Martínez (2015) estudaram os mecanismos de transferência de calor na secagem de fatias de abóbora no RW e verificaram que a taxa de transferência de calor por radiação foi pequena (1,05 W) em relação à condução (108 W) quando utilizado o filme de poliéster (*Mylar*) como suporte para o espalhamento (temperatura da água aquecida de 90 °C (± 2 °C) e espessura das fatias de 1 cm). Esses autores denominaram o processo como *conductive hydro-drying*, por se tratar de uma secagem condutiva utilizando água como fonte de aquecimento do suporte. Eles verificaram que o uso da convecção forçada (velocidade do ar de $0,5 \text{ m s}^{-1}$) contribuiu para a redução no tempo de secagem e da temperatura do produto durante a secagem (ORTIZ-JEREZ; OCHOA-MARTÍNEZ, 2015).

Diante do exposto é razoável tratar esse processo como secagem condutiva de uma fina camada de solução líquida depositada em um suporte aquecido. Esse tipo de processo é denominado *tape-casting* e é bastante utilizado pela indústria de cerâmica e para a produção de filmes poliméricos (HOTZA, 1997; MOREIRA et al., 2011, SAINI; SINGH; SAXENA, 2012, TÁPIA-BLÁCIDO; SOBRAL; MENEGALLI, 2013; MORAES et al., 2013; MORAES; RESZKA; LAURINDO, 2014; MORAES et al., 2015). Nesse processo o produto a ser seco é espalhado em uma superfície metálica aquecida, semelhante ao *drum drying*. Produtos como o tomate, que contém ácidos orgânicos e açúcares (frutose e glicose) de baixo peso molecular, aderem à superfície do metal, dificultando a sua retirada, devido à baixa T_g desses compostos, além de sofrerem superaquecimento (TANG; FENG; SHEN, 2003; ROOS; KAREL, 1991). Dessa forma, é importante investigar diferentes tipos de suporte com baixas energias de superfície, a fim de facilitar a retirada do produto.

Neste estudo uma nova denominação ao processo de secagem por espalhamento de uma camada fina de alimentos líquidos e semilíquidos sobre suporte aquecido foi denominada de *Cast-tape Drying*. Esse estudo teve como objetivo avaliar diferentes condições de processo para a secagem da polpa de tomate por *cast-tape drying*, para a

produção de tomate desidratado em pó. As influências das diferentes fontes de aquecimento do suporte e dos diferentes tipos de suporte, além da contribuição da convecção forçada na taxa de secagem da polpa de tomate também foram investigadas.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Preparo da matéria-prima

A polpa de tomate foi adquirida no mercado local (Florianópolis, SC, Brasil), contendo tomate, sal e açúcar na sua composição. A concentração de sólidos solúveis da polpa foi determinada em triplicata, com refratômetro de bancada (ATAGO, modelo PAL-BX/RI, Tóquio, Japão) estando entre 5,9 e 7,9 °Brix. A umidade inicial da polpa variou entre 9,5 e 10,5 g g⁻¹ (b. s.) e foi determinada por método gravimétrico, em estufa a vácuo (TECNAL, modelo TE-395, Piracicaba, Brasil) a 70 °C, segundo a metodologia da AOAC (2005).

3.2.2 Processos de secagem

A polpa de tomate foi seca por *cast-tape drying* (CTD) em batelada. As estratégias experimentais investigadas no processo foram:

- Água como fonte de aquecimento do suporte, filme de poliéster (*Mylar*) como suporte para o espalhamento da polpa e uso de um sistema de exaustão (CTDA-E). Aparato experimental apresentado na Figura 3.1.

- Vapor como fonte de aquecimento do suporte (aparato experimental apresentado na Figura 3.2):

- (i) filme de poliéster (*Mylar*) como suporte para o espalhamento: com uso de exaustão (CTDV-E) e com uso de exaustão e ventilação (CTDV-EV), simultaneamente;

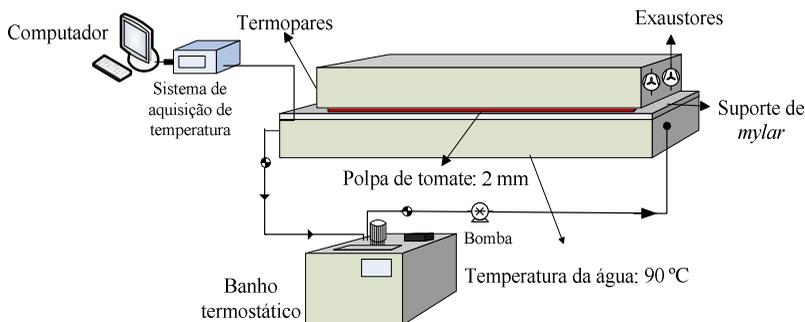
- (ii) filme teflonado como suporte para o espalhamento: com uso de exaustão e ventilação (CTDVT-EV);

A exaustão e/ou ventilação foram utilizadas para promover a convecção forçada acima da polpa. Essas estratégias experimentais permitiram investigar o efeito da convecção forçada, de diferentes fontes de aquecimento e diferentes suportes na secagem de polpa de tomate por CTD. Os detalhes sobre os procedimentos desses processos de secagem estão descritos a seguir.

3.2.2.1 Aparato experimental

Dois aparatos experimentais foram utilizados e os seus detalhes de operação estão descritos a seguir. O dispositivo experimental utilizado no processo CTDA-E está representado na Figura 3.1, o qual consiste de um reservatório de água quente (0,8 m x 0,4 m x 0,05 m) conectado a um banho ultratermostático (Quimis, modelo Q214S, Diadema, SP, Brasil). Um filme de poliéster (*Mylar*[®] tipo D, DuPont, Wilmington, DE, EUA) com 0,25 mm de espessura foi fixado na parte superior do reservatório, com sua face inferior em contato com a água quente do reservatório, enquanto a sua face superior serve de suporte para o espalhamento do suco de tomate. Dois exaustores foram instalados em um dos lados do túnel de exaustão.

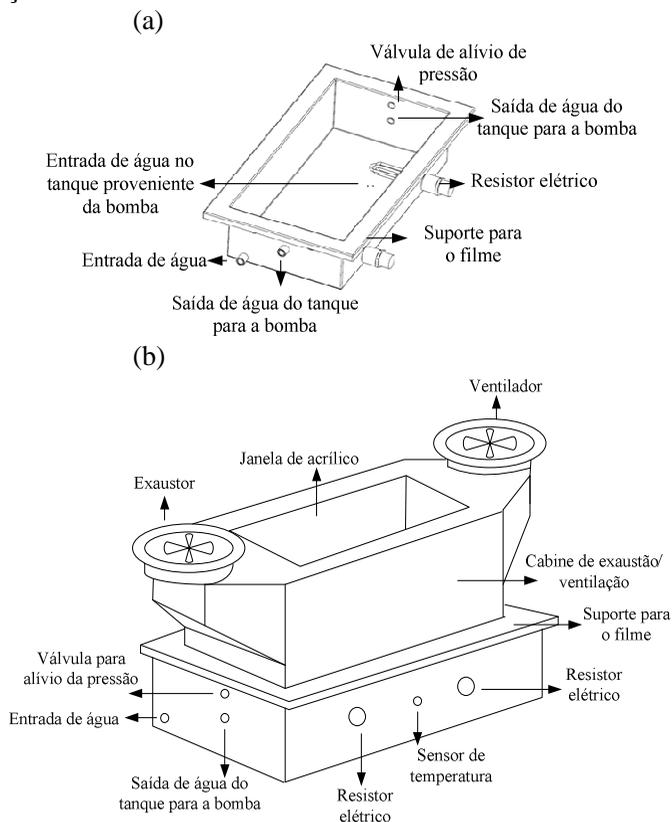
Figura 3.1 - Esquema do aparato experimental *cast-tape drying* (CTDA-E)



Na Figura 3.2 está representado o aparato experimental utilizado nos processos de secagem CTDV-E, CTDV-EV e CTDVT-EV. O aparato consiste de um reservatório de aço inoxidável (0,8 m x 0,4 m x 0,20 m) com dois resistores elétricos (Figura 3.2a). O reservatório foi parcialmente preenchido com água, que foi aquecida para a produção de vapor. A temperatura da água foi medida com um sensor tipo PT100 (Modelo TRS12, Alutal[®] Controles Industrial, Votorantim, SP, Brasil), que se encontra dentro do reservatório. Uma bomba (modelo TP 40 G3, KOMECO, Palhoça, SC, Brasil) foi utilizada

para realizar a circulação da água aquecida e facilitar a homogeneidade da água dentro do reservatório.

Figura 3.2 - Aparato experimental do *cast-tape drying* (CTDV-EV e CTDVT-EV). Detalhes: (a) tanque e (b) tanque e cabine de exaustão e ventilação.



Dois filmes poliméricos foram utilizados como suporte para o espalhamento: filme de poliéster (*Mylar*[®] tipo D, DuPont, Wilmington, DE, USA) e o filme teflonado (Lençol Armalon[®] Standard, Indaco, São Paulo, Brasil), ambos com 0,25 mm de espessura e de grau alimentício. O filme teflonado é um tecido de fibra de vidro com 59% de politetrafluoretileno (*Teflon*) depositado em sua superfície, o que proporciona antiaderência, resistência química e mecânica. Os filmes

(*Mylar* e *Teflon*) foram fixados na parte superior do reservatório. A face superior dos filmes serviu de suporte para o espalhamento da polpa de tomate. Enquanto, a face inferior foi mantida em contato com o vapor de água. A condutividade térmica do filme de poliéster (*Mylar*) é $0,15 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (DUPONT, 2016) e do filme teflonado é $0,16 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (RAO; RIZVI; DATTA, 2005). A condutividade térmica do filme teflonado, k_{\parallel} , foi determinada com um modelo (Equação 3.1) proposto para sistemas multicomponentes, em que os componentes estão dispostos como camadas paralelas ao fluxo de calor (RAO; RIZVI; DATTA, 2005).

$$k_{\parallel} = \sum \varepsilon_i \kappa_i \quad (3.1)$$

onde ε_i é a fração de cada componente, sendo 0,59 para o politetrafluoretileno e 0,41 para a fibra de vidro e κ_i é a condutividade térmica de cada componente, sendo $0,35 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (INCROPERA et al., 2008) do politetrafluoretileno e $0,038 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ da fibra de vidro (INCROPERA et al., 2008).

Uma cabine com um sistema de exaustão/ventilação foi acoplada acima do reservatório e conta com um ventilador Qualitas (Modelo FAQ8, Qualitas Indústria Eletromecânica Ltda, Itapira-SP, Brasil) em uma das extremidades e um exaustor (Modelo FAQ8, Qualitas Indústria Eletromecânica Ltda, Itapira, SP, Brasil) na outra extremidade (Figura 3.2b).

3.2.2.2 Condições de secagem

No processo CTDA-E, a temperatura da água circulante foi mantida constante e igual a $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$). Nos processos com vapor como fonte de aquecimento (CTDV-E, CTDV-EV e CTDVT-EV) a água foi mantida constante e igual a $98 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$). Essas temperaturas foram as máximas alcançadas pelos sistemas de aquecimento da água.

As temperaturas do ar e da superfície inferior dos filmes (*Mylar* e *Teflon*) foram medidas com auxílio de termopares tipo T (IOPE, modelo A-TX-TF-R-30AWG, Brasil), ligados a um sistema de aquisição de temperatura (Agilent, modelo 34970A, Bayan Lepas, Malásia). Enquanto a temperatura da superfície superior do filme de poliéster (*Mylar*) e do filme teflonado foram medidas com câmera termográfica (FLIR, modelo T360, Täby, Suécia).

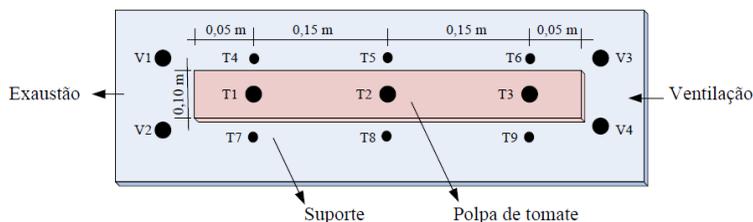
O espalhamento da polpa sobre os suportes aquecidos, em todos os processos de secagem, foi realizado com o auxílio de um espalhador manual (*doctor blade*, Tape Warehouse Fundição, modelo Doctor Blade Assembly, Morrisville, PA, EUA), permitindo o controle micrométrico da abertura pela qual a polpa escoou. A espessura de espalhamento da polpa de tomate foi definida a partir dos dados obtidos por Castoldi et al. (2015) sendo 2 mm.

A concentração da polpa de tomate utilizada neste estudo foi de 5,9% a 7,9% de sólidos solúveis. Como a concentração da polpa influencia a homogeneidade do espalhamento, um teste de espalhamento com diferentes concentrações da polpa foi realizado. Extrato de tomate com 33 % de sólidos solúveis foi diluído em diferentes concentrações (faixa entre 5,5 - 25% sólidos solúveis). O espalhamento foi homogêneo nas concentrações entre 5,9 - 13% de sólidos solúveis. Vale ressaltar que a taxa de secagem pode ser influenciada pela concentração da polpa de tomate e deve ser investigada.

As velocidades do ar de entrada (ventilador) e da saída (exaustão) (CTDV-E, CTDV-EV e CTDVT-EV) e dos dois exaustores (CTDA-E) durante a secagem foram monitoradas em quatro locais da cabine utilizando um Anemômetro Térmico Compacto (Testo, modelo 425, Lenzkirch, Alemanha). O anemômetro foi posicionado a 2 cm acima do suporte. Os experimentos foram realizados com umidade relativa do ar entre 54% e 74% e temperatura do ar ambiente de 25 °C ($\pm 3,0$ °C), mantida com ar condicionado.

A Figura 3.3 representa as posições dos termopares para medida da temperatura do ar e da polpa, e da posição do anemômetro para a leitura de velocidade do ar. No processo CTDA-E a temperatura do ar foi medida apenas com os termopares T5, T7 e T9.

Figura 3.3 – Posições dos termopares para medida da temperatura da polpa (T1, T2 e T3) e do ar (T4, T5, T6, T7, T8 e T9), e da posição do anemômetro (V1, V2, V3 e V4) para a leitura de velocidade do ar.



3.2.3 Cinéticas de secagem da polpa de tomate

A variação da umidade durante a secagem da polpa de tomate foi determinada pelo método gravimétrico em estufa a vácuo (TECNAL, modelo TE-395, Piracicaba, Brasil) a 70 °C (AOAC, 2005). Neste procedimento, amostras de três regiões da polpa espalhada foram retiradas em intervalos de tempo pré-determinados, para determinação da umidade. Os experimentos de secagem foram realizados em triplicata. As curvas de secagem apresentaram períodos de secagem constante, cujas taxas de secagem foram determinadas pelas inclinações de retas ajustadas aos dados experimentais. Para cada condição experimental foram realizados três experimentos de secagem e as taxas de secagem representativas foram expressas pelo valor médio dos coeficientes angulares das retas ajustadas às curvas de secagem.

3.2.4 Evolução temporal da temperatura da polpa de tomate

A evolução temporal da temperatura da polpa foi medida com termopares do tipo T (IOPE, modelo A-TX-TF-R-30AWG, Brasil) conectados a um sistema de aquisição de dados (Agilent, modelo 34970A, Bayan Lepas, Malásia) e registrada em um computador. Os termopares foram identificados e alocados em três regiões da polpa espalhada (Figura 3.3). Essa medida também foi realizada com imagens termográficas com auxílio de uma câmera termográfica (FLIR, modelo T360, Täby, Suécia). Para aquisição das imagens, utilizou-se procedimento experimental similar ao realizado para a avaliação das cinéticas, a polpa foi espalhada com auxílio do espalhador manual (*doctor blade*, Tape Warehouse Fundação, modelo Doctor Blade Assembly, Morrisville, PA, EUA). Para delimitar a área de aquisição das termografias utilizou-se uma moldura retangular de poliestireno. Para o registro das imagens, a câmera foi posicionada a uma distância fixa de 50 cm da superfície do filme da polpa espalhado. Devido à elevada umidade do produto (91% b. u.), o valor da emissividade (ϵ) utilizado para a polpa foi similar ao da água, de 0,96 (INCROPERA et al., 2008). As emissividades das superfícies dos filmes (*Mylar* e *Teflon*) foram determinadas conforme o método proposto por Albatici et al. (2013), com auxílio da câmera termográfica (FLIR, modelo T360, Täby, Suécia). Esse método consiste na utilização de um pedaço de fita isolante, de emissividade conhecida ($\epsilon = 0,95$) colada na

superfície do equipamento dentro da área de registro das imagens. As imagens foram analisadas através do software (FLIR QuickReport 1.2 SP2, Täby, Suécia) e a emissividade da superfície foi ajustada conforme a temperatura da fita isolante registrada.

3.2.5 Capacidade evaporativa (CE)

A capacidade evaporativa de cada processo de secagem, dada em $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, foi determinada de acordo com a Equação 3.2.

$$CE = \frac{dX_s}{dt} (1 - X_u) \rho L_p \quad (3.2)$$

em que $\frac{dX_s}{dt}$ é a taxa de secagem ($\text{kg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ b. s.), X_u é a umidade inicial da polpa (kg kg^{-1} b. u.), ρ é a massa específica da polpa (kg m^{-3}) e L_p é a espessura da polpa espalhada (m). A umidade da polpa de tomate foi de $0,91 \text{ kg kg}^{-1}$ (b. u.) e a massa específica da polpa foi de $1030,0 \text{ kg m}^{-3}$. A massa específica foi determinada em picnômetro de vidro.

3.2.6 Determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor (h)

Uma placa de alumínio (comprimento: 0,395 m; largura: 0,093 m e espessura: 1,9 mm) com uma borda de silicone (altura: 2 mm) foi preenchida com um tecido (composição: 70% viscose e 30% poliéster; massa: $1,86 \pm 0,02$ g; comprimento: 0,385 m, largura: 0,092 m e espessura: $\cong 0,22$ mm) (SuperPro, Bettanin, Esteio, RS, Brasil) e água (massa: $60,35 \pm 3,47$ g, espessura: $\cong 1,7$ mm). Esse conjunto (placa + água + tecido) foi colocado no centro do equipamento e acionado o sistema de exaustão (CTDA-E e CTDV-E) e ventilação/exaustão (CTDV-EV e CTDVT-EV) e a variação da massa foi medida ao longo do tempo em balança semianalítica (Marte, modelo AS2000C, Brasil). Esse experimento foi realizado em quintuplicata. A temperatura e a umidade relativa do ar foram registradas com uso de termo-higrômetro (Testo, modelo 610, Lenzkirch, Baden-Württemberg, Alemanha). Com isso, o coeficiente de transferência de massa (k_m) foi determinado de acordo com a Equação 3.3 (WELTY et al., 2007).

$$k_m = \frac{N_a}{A_p MM_{\acute{a}gua} (C_1 - C_2)} \quad (3.3)$$

em que N_a é a taxa de transferência de massa (mol de água s^{-1}), k_m é o coeficiente de transferência de massa ($m s^{-1}$), A_p é a área interfacial entre a água e o ar (m^2), $MM_{\acute{a}gua}$ é a massa molar da água $18,02 g mol^{-1}$, C_1 é a concentração molar de água no ar (mol de água m^{-3} de ar) e C_2 é a concentração molar de água na interface água/ar (mol de água m^{-3} de ar). C_1 e C_2 foram obtidos pela Equação 3.4 e Equação 3.5, respectivamente, considerando gás ideal (WELTY et al., 2007).

$$C_1 = \frac{P_{vapor_ar}}{RT_{ar}} \quad (3.4)$$

$$C_2 = \frac{P_{vapor_\acute{a}gua/ar}}{RT_{interface_\acute{a}gua/ar}} \quad (3.5)$$

em que P_{vapor_ar} e $P_{vapor_\acute{a}gua/ar}$ são a pressão de vapor da água no ar e na interface água/ar (Pa), respectivamente; R é a constante universal dos gases ($8,314 m^3 Pa mol^{-1} K^{-1}$); e T_{ar} e $T_{interface_\acute{a}gua/ar}$ são a temperatura do ar e a temperatura na interface água/ar, em K, respectivamente. A temperatura na interface água/ar foi medida com termômetro de infravermelho (FLUKE, modelo 62MAX, Fluke Corporation, China) usando emissividade da água de 0,96 (INCROPERA et al., 2008). A pressão de vapor da água no ar (P_{vapor_ar}) é dada pela Equação 3.6, em Pa. Enquanto, a pressão de vapor na interface água/ar ($P_{vapor_\acute{a}gua/ar}$) é igual à pressão de saturação da água, em Pa, na temperatura da interface água/ar. As pressões de saturação foram calculadas pela Equação de Antoine 3.7, em Pa (WELTY et al., 2007).

$$P_{vapor_ar} = \frac{P_{sat} \times UR}{100} \quad (3.6)$$

$$\ln P^{sat} = a - \frac{b}{T + c} \quad (3.7)$$

em que UR é a umidade relativa do ar (%), a , b e c são constantes da Equação de Antoine ($a = 16,3872 kPa$; $b = 3885,7 kPa \text{ } ^\circ C$; $c = 230,17 \text{ } ^\circ C$) e T é a temperatura do ar ou da interface água/ar (temperatura de bulbo úmido), em $^\circ C$.

O coeficiente convectivo médio de transferência de calor (h) entre a água e o ar foi calculado pela (Equação 3.8), pois no período de

taxa de secagem constante, em regime permanente, o calor fornecido pela convecção é usado na evaporação da água (WELTY et al., 2007).

$$h = \frac{k_m(C_1 - C_2)\Delta H_{vap}}{T_{interface_água/ar} - T_{ar}} \quad (3.8)$$

em que \bar{h} é o coeficiente médio de transferência de calor ($\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$), T_{ar} é a temperatura do ar (°C), $T_{interface_água/ar}$ é a temperatura na interface água/ar (temperatura de bulbo úmido), ΔH_{vap} é a entalpia de vaporização da água (J g^{-1}) na temperatura do filme à pressão de 1 atm.

3.2.7 Fluxos de calor envolvidos no processo CTD

Considerando que, o calor que chega até a polpa de tomate é utilizado para a evaporação da água, somado às perdas por convecção na parte superior da polpa, podemos calcular o fluxo de calor por evaporação (Q'') pela Equação 3.9 e o fluxo de calor convectivo pela Equação 3.11 no período de secagem a taxa constante (WELTY et al., 2007).

$$q''_{evap} = \dot{m}_v \Delta H_{vap} \quad (3.9)$$

em que, q''_{evap} é o fluxo de calor de evaporação no período de taxa de secagem constante (W m^{-2}), \dot{m}_v é a taxa de evaporação ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) calculada pela capacidade evaporativa (item 3.2.6) no período de taxa de secagem constante e ΔH_{vap} é a entalpia de vaporização da água livre à pressão atmosférica (1 atm) na temperatura do filme (T_f) (Equação 3.10).

$$T_f = \frac{(T_{ar} + T_{polpa})}{2} \quad (3.10)$$

O fluxo de calor convectivo (exaustão e/ou ventilação) foi obtido pela Lei de Resfriamento de Newton (Equação 3.11) (INCROPERA et al., 2008).

$$q''_{conv} = \bar{h}(T_{ar} - T_{polpa}) \quad (3.11)$$

em que q''_{conv} é fluxo de calor convectivo no período de taxa de secagem constante, \bar{h} é o coeficiente de transferência de calor convectivo ($\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$) determinado de acordo com a metodologia descrita no item 3.2.7 e T_{ar} é a temperatura do ar dentro da cabine de exaustão e T_{polpa} é a

temperatura da polpa de tomate (°C), no período a taxa constante de secagem.

3.2.8 Atividade de água

A atividade de água (a_w) da polpa foi medida pelo método de ponto de orvalho (Aqualab, Decagon Devices, Pullman, Washington, EUA), em triplicata.

3.2.9 Análise estatística

Os dados experimentais foram avaliados utilizando a análise de variância (ANOVA). A comparação múltipla das médias foi analisada pelo uso do teste de Tukey a 10% de probabilidade de erro ($p < 0,10$). O processamento dos dados e a análise estatística foram realizados usando o programa estatístico Statistica 8.0 (Statsoft Inc., Tulsa, EUA).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Testes preliminares

A secagem da polpa de tomate por espalhamento em uma chapa metálica aquecida, como suporte, foi realizada como um teste preliminar. Essa chapa aquecida consiste de uma placa de alumínio (80 cm x 40 cm), que permite a circulação de água aquecida em seu interior. A placa foi alimentada de água aquecida proveniente de um banho ultratermostático (Quimis, modelo Q214S, Diadema, SP, Brasil) com circulação e controle de vazão. A temperatura da chapa foi mantida a 90 °C (± 2 °C) e a polpa (com espessura de 2 mm) foi espalhada diretamente sobre a superfície metálica, o que resultou na aderência da película seca à superfície metálica, dificultando a sua retirada.

Assim, outro teste foi realizado com a placa recoberta com filme de poliéster (*Mylar*[®] tipo D, DuPont, Wilmington, DE, USA) com 0,25 mm de espessura. O filme polimérico de poliéster foi escolhido por sua baixa energia de superfície, implicando em baixa adesão da polpa a ser secada (VAN KREVELEN; TE NIJENHUIS, 2009). A adesão de um material sobre outro depende das energias de superfícies envolvidas (ADAMSON; GAST, 1997) e a energia de superfície do alumínio é de

1100 mJ m² (PADILHA, 2007), muito maior que do filme de poliéster (*Mylar*), que é de 34,95 a 39,82 mJ m² (CAMMARANO, DE LUCA e AMENDOLA, 2013). No entanto, a taxa de secagem e a capacidade evaporativa desse processo foi 36% menor ($0,41 \pm 0,03 \text{ g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ e $4,63 \pm 0,30 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectivamente) em relação aos valores observados na secagem da polpa espalhada diretamente no suporte metálico ($0,64 \pm 0,02 \text{ g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ e $7,22 \pm 0,24 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectivamente). Essa redução da eficiência da transferência de calor se deve à resistência condutiva do filme de poliéster (*Mylar*) e da resistência de contato da camada de ar presente entre a superfície da chapa e filme de poliéster (*Mylar*).

A redução da taxa de secagem e da capacidade evaporativa é um problema para produções em escalas industriais. Assim, diferentes estratégias experimentais foram investigadas para a secagem da polpa de tomate, visando reduzir a pegajosidade da polpa ao suporte aquecido, aumentar a taxa de secagem e, conseqüentemente, a capacidade evaporativa.

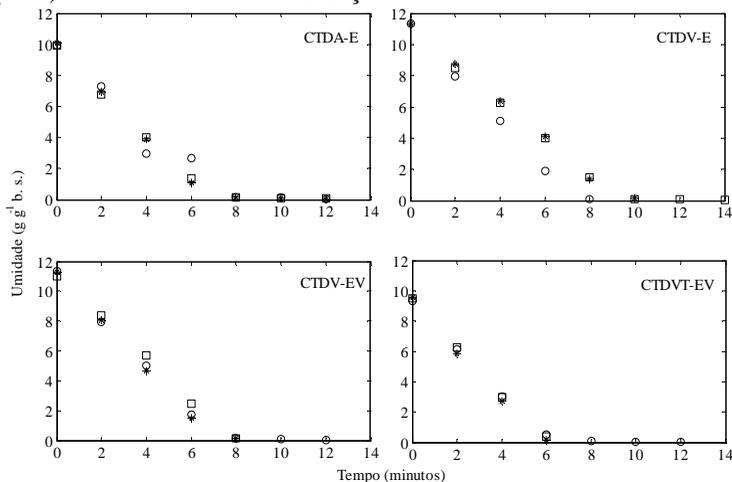
3.3.2 Evolução temporal da umidade, taxas de secagem e capacidade evaporativa

A Figura 3.2 representa a evolução temporal da umidade, em base seca, da polpa de tomate desidratada por CTD nas diferentes condições de processo investigadas. Os tempos de secagem da polpa de tomate nos processos CTDVT-EV e CTDV-EV foram similares, sendo cerca de 10 minutos, 20% inferiores em relação aos processos CTDA-E e CTDV-E (12 minutos) para atingir umidade final inferior a $0,06 \text{ g g}^{-1}$ b. s. Esse comportamento indicou que a fonte de aquecimento e o tipo de suporte não influenciaram o processo de secagem da polpa de tomate. No entanto, a convecção forçada, com uso simultâneo de exaustão e ventilação (velocidade do ar de $1,0\text{-}2,5 \text{ m s}^{-1}$ – Figura 3.5), reduziu o tempo de secagem, influenciando na taxa de secagem.

Ortiz-Jerez e Ochoa-Martínez (2015) estudaram a secagem de fatias de abóbora em um sistema denominado de *conductive hydro-drying* (processo RW). Nesse sistema as fatias de abóbora (1 cm de espessura) foram colocadas sobre dois suportes, um de filme de poliéster (*Mylar*) e o outro uma folha de alumínio foi colada no filme de poliéster (*Mylar*), e aquecidos por água ($90 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$). Esses autores relataram que o tipo de suporte (*Mylar* e *Mylar*+alumínio) não influenciou significativamente na secagem das fatias de abóbora, assim como

observado no presente estudo. No entanto, o uso da convecção forçada (velocidade do ar de $0,5 \text{ m s}^{-1}$) influenciou significativamente os tempos de secagem, uma vez que aumentou a transferência de massa, devido à maior velocidade do ar em relação aos processos com convecção natural.

Figura 3.4 - Evolução temporal da umidade da polpa de tomate seca por *cast-tape drying* em diferentes condições de processo CTDA-E, CTDV-E, CTDV-EV e CTDVT-EV. CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-E - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão e ventilação. CTDVT-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme teflonado (suporte) e uso de exaustão e ventilação.



Os valores das taxas de secagem e das capacidades evaporativas de todos os processos de secagem avaliados estão expressos na Tabela 3.1. O período de taxa de secagem constante, em todos os processos investigados, ocorreu até umidades próximas a $0,15 \text{ g g}^{-1}$ (b. s.) (Figura 3.4). Esse comportamento se deve à alta umidade inicial da polpa ($0,91 \text{ g g}^{-1}$ b. u.) e à fina espessura da camada espalhada (2 mm). No período de secagem à taxa constante a pressão de vapor de água na superfície da amostra é próxima da pressão de saturação e a resistência à transferência de massa interna é desprezível (fina espessura da camada de polpa) durante o processo de secagem. Assim, a desidratação da polpa ocorre pela evaporação da água e é controlada

pela transferência de calor proveniente da água aquecida. Castoldi et al. (2015) reportou comportamento similar da taxa de secagem quando secou suco de tomate ($0,95 \text{ g g}^{-1} \text{ b. u.}$) por espalhamento sobre o filme de poliéster (*Mylar*) com espessura de 2 mm e usando água quente a $95 \text{ }^\circ\text{C}$. O mesmo comportamento foi relatado por Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) para a secagem da polpa de manga ($0,86 \text{ g g}^{-1} \text{ b. u.}$) por espalhamento sobre filme de poliéster (espessura da polpa de 2 e 3 mm e água quente a 75, 85 e $95 \text{ }^\circ\text{C}$). Esses estudos foram realizados com uso da convecção natural.

Tabela 3.1 - Taxa de secagem e capacidade evaporativa da polpa de tomate seca por *cast-tape drying* em diferentes condições de processo CTDA-E, CTDV-E, CTDV-EV e CTDVT-EV.

Processo de secagem	Taxa de secagem	Capacidade evaporativa
	($\text{g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$)	($\text{kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)
	Média±DP	Média±DP
	CV (%)	CV (%)
CTDA-E	$1,25 \pm 0,03^c$	$13,94 \pm 0,34^b$
	2,46	2,46
CTDV-E	$1,31 \pm 0,10^{bc}$	$14,60 \pm 1,11^b$
	7,60	$7,60^c$
CTDV-EV	$1,38 \pm 0,04^{ab}$	$15,39 \pm 0,46^{ab}$
	2,96	2,96
CTDVT-EV	$1,53 \pm 0,05^a$	$16,97 \pm 0,51^a$
	2,99	2,99

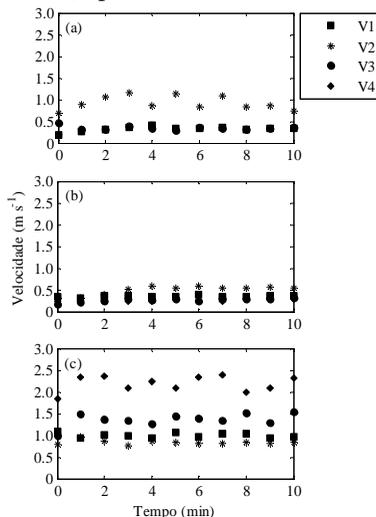
CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-E - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão e ventilação. CTDVT-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme teflonado (suporte) e uso de exaustão e ventilação. DP- desvio padrão; CV- coeficiente de variação; a-d Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey ($p < 0,10$).

Os valores da taxa de secagem e da capacidade evaporativa do processo CTDVT-EV ($1,53 \text{ g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ e $16,97 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectivamente) foram significativamente iguais aos do CTDV-EV ($1,38 \text{ g g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ e $15,39 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectivamente) demonstrando que o tipo de suporte não influenciou no processo de secagem da polpa de tomate. Esse comportamento indica que a substituição do filme de poliéster (*Mylar*) por um filme opaco, de grau alimentício, de fibra de vidro com 59% de politetrafluoretileno (*Teflon*) pode ser realizada

sem que ocorra a redução da taxa de secagem e da capacidade evaporativa. Outras vantagens do uso do filme teflonado é a sua baixa energia de superfície, que confere baixa aderência do material a ser seco à sua superfície, além de menor custo e disponibilidade no mercado nacional. A interação do produto a ser seco com o suporte deve ser avaliada com cuidado, pois alimentos com alta umidade podem molhar pouco o suporte, levando à fragmentação espontânea do filme de suspensão a ser secado.

A taxa de secagem da polpa de tomate por CTDVT-EV foi 16,79% superior à taxa por CTDV-E e 22,40% superior à taxa por CTDA-E indicando que a convecção forçada, com uso simultâneo da exaustão e ventilação (velocidade do ar de 1,0-2,5 m s⁻¹ – Figura 3.5), aumenta a transferência de massa da polpa para o ar, pois a maior da velocidade do ar aumenta a remoção dos vapores de água formados durante a secagem, evitando a saturação do ar e mantendo uma maior diferença de pressão de vapor de água entre a superfície da polpa e o ar.

Figura 3.5 – Perfil de velocidade do ar dos processos de secagem (a) CTDA-E, (b) CTDV-E e (c) CTDV-EV e CTDVT-EV. CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-E – vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão e ventilação. CTDVT-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme teflonado (suporte) e uso de exaustão e ventilação.



O processo CTDA-E e CTDV-E apresentaram taxas de secagem e capacidade evaporativa similares, indicando que a fonte de aquecimento do suporte não influenciou o processo de secagem da polpa de tomate. Isso se deve à proximidade das temperaturas inferiores do filme de poliéster (*Mylar*) sendo de 92 °C (Tabela 3.2) em ambos os processos. No entanto, valem ressaltar as vantagens do uso do vapor no aquecimento do suporte, associadas à disponibilidade e baixo custo de produção industrial, além da simplificação do projeto de construção do equipamento operando em contínuo.

Na literatura é possível encontrar diferentes valores de taxa de secagem e de capacidade evaporativa em processos de secagem por espalhamento sobre o filme de poliéster (*Mylar*), devido às diferenças nas condições de processos estudadas, mas que demonstram que esse processo apresenta alta capacidade de produção. Castoldi et al. (2015) reportaram taxas de secagem de 1,20 e 0,84 g g⁻¹ min⁻¹ ao secar polpa de tomate com espessura de espalhamento de 2 e 3 mm, respectivamente (temperatura da água de 95 °C). Abonyi, Tang e Edwards (1999) relataram valores de capacidade evaporativa de 6 kg m⁻² h⁻¹ para a secagem de purê de cenoura e polpa de morango (temperatura da água aquecida de 95 °C e espessura de espalhamento de 1 mm). Nindo et al. (2003) observaram capacidade evaporativa de 10 kg m⁻² h⁻¹ para a secagem de purê de abóbora por RW contínuo (escala piloto) e entre 3,1 e 4,6 kg m⁻² h⁻¹ (escala industrial) com o uso da temperatura da água aquecida de 95 °C e espessura do purê entre 0,4 e 0,6 mm. Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) verificaram taxa de secagem e capacidade evaporativa de 0,342 g g⁻¹ min⁻¹ e 10,86 kg m⁻² h⁻¹, respectivamente, na secagem de polpa de manga (temperatura da água aquecida de 95 °C e espessura de espalhamento de 2 mm).

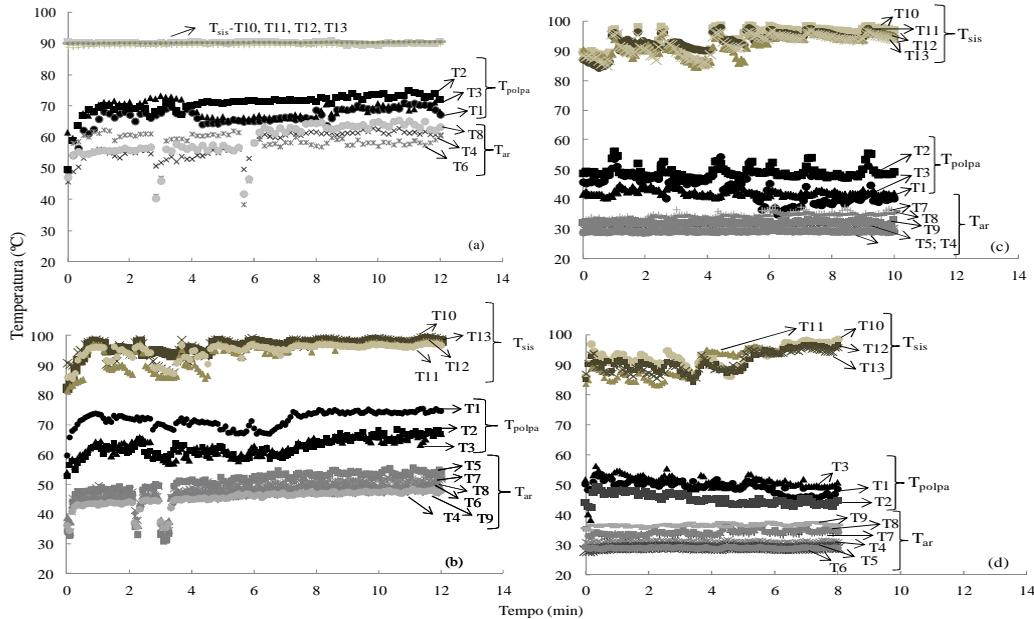
3.3.3 Evolução temporal da temperatura da água, da polpa de tomate, da superfície inferior dos suportes e do ar

Na Figura 3.6 estão apresentadas as evoluções temporais das temperaturas da polpa, da superfície inferior dos filmes (*Mylar* e *Teflon*), da água quente e do ar, em cada processo de secagem da polpa de tomate. No processo de secagem por CTDA-E a temperatura da superfície inferior do filme de poliéster foi considerada igual à da água, devido o contato íntimo de ambos, sendo em torno de 89,84 (±0,69 °C) (Tabela 3.2). Nos demais processos de secagem as temperaturas da superfície inferior dos filmes foram maiores e oscilaram em torno de

92 °C (CTDV-E e CTDVE-EV) e 90 °C (CTDVT-EV) aumentando até cerca de 95 °C (CTDV-EV e CTDVT-EV) e de 98 °C (CTDV-E) no final do processo de secagem.

No início dos processos de secagem a polpa é espalhada sobre a superfície dos suportes aquecidos (*Mylar* e *Teflon*) e sua temperatura se eleva (em todos os processos). Após esse período inicial de adaptação térmica do produto, inicia-se o período de secagem à taxa constante, em que ocorre a evaporação da água livre. Como a polpa é relativamente fina e não possui uma estrutura rígida, praticamente toda a água é removida sob este período à taxa constante e a temperatura da polpa permanece constante.

Figura 3.6 - Evolução temporal da temperatura da polpa de tomate (termopares: T1, T2, e T3), da superfície inferior do suporte (termopares: T10, T11, T12 e T13), do ar (termopares: T4, T5, T6, T7, T8 e T9) nos processos: (a) CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. (b) CTDV-E - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. (c) CTDV-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão e ventilação. (d) CTDVT-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme teflonado (suporte) e uso de exaustão e ventilação.



Os valores médios das temperaturas das superfícies inferiores dos filmes, da polpa e do ar durante o período de secagem à taxa constante estão apresentados na Tabela 3.2. As temperaturas da polpa de tomate nos processos de secagem por CTDV-EV e CTDVT-EV foram inferiores em relação aos processos CTDA-E e CTDV-E. Esse comportamento se deve ao uso da ventilação, que circulou ar a 23 ± 1 °C no interior da câmara, que resfriam a polpa por convecção e retira os vapores de água produzidos pela secagem. Esse comportamento foi similar ao reportado por Ortiz-Jerez e Ochoa-Martínez (2015), que verificaram redução da temperatura das fatias de abóbora seca por *conductive hidro-drying* (suporte de filme de poliéster) com a aplicação da convecção forçada (velocidade do ar de $0,5 \text{ m s}^{-1}$), em relação aos processos com convecção natural.

Tabela 3.2 - Temperaturas da superfície inferior dos filmes, da polpa e do ar durante o período de secagem à taxa constante nos processos CTDA-E, CTDV-E, CTDV-EV e CTDVT-EV.

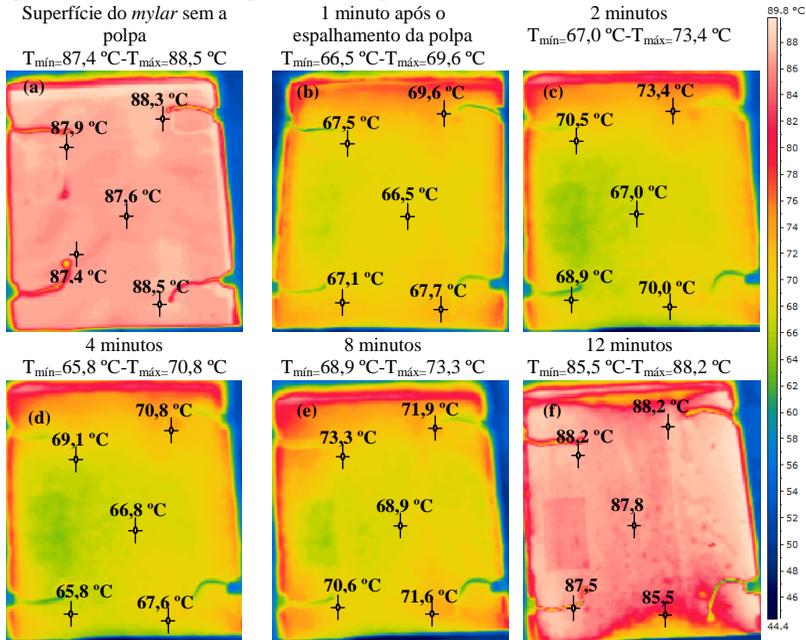
Processos	Temperatura média no período de taxa constante de secagem \pm DP (°C)		
	CV (%)		
	Superfície inferior do suporte	Polpa	Ar
CTDA-E	89,84 \pm 0,69 ^b	67,63 \pm 2,98 ^a	56,74 \pm 1,13 ^a
	0,77	4,40	2,00
CTDV-E	92,91 \pm 3,22 ^a	64,89 \pm 2,49 ^b	48,06 \pm 2,05 ^b
	3,47	3,85	4,35
CTDV-EV	92,22 \pm 3,54 ^a	46,26 \pm 1,29 ^d	31,72 \pm 0,89 ^c
	3,84	2,78	2,80
CTDVT-EV	90,20 \pm 2,59 ^b	50,00 \pm 1,84 ^c	31,40 \pm 2,33 ^c
	2,87	3,684	7,42

CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-E - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão e ventilação. CTDVT-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme teflonado (suporte) e uso de exaustão e ventilação. DP- desvio padrão; CV- coeficiente de variação; a-d Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey ($p < 0,10$).

A Figura 3.7 mostra os dados da evolução temporal da temperatura da polpa, determinada por imagens termográficas durante o processo de secagem CTDA-E. A emissividade da polpa foi assumida como igual à do seu componente majoritário (água): 0,96

(INCROPERA et al., 2008) e a emissividade da superfície do *Mylar* igual a 0,92.

Figura 3.7 – Imagens termográficas da evolução da temperatura da polpa durante a secagem da polpa de tomate por CTDA-E com 2 mm de espessura da polpa e água aquecida a 90 °C. CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão.



Assim como observado com os termopares, no início dos processos de secagem por CTDA-E a temperatura da polpa se eleva e, após a adaptação térmica a temperatura permanece constante (média de $69,74 \pm 2,31\text{ °C}$, até o 8º minuto – Figura 3.7e). A temperatura da polpa permaneceu constante devido à remoção da água à taxa constante, como discutido anteriormente. Nas termografias seguintes foi registrado o aumento da temperatura do produto para valores próximos de 88 °C (Figuras 3.7f), o que não foi observado com as medidas dos termopares. O mesmo comportamento da evolução da temperatura da polpa foi observado nos processos de secagem por CTDV-E, CTDV-EV e CTDVT-EV (Anexo A). A temperatura da polpa seca por CTDV-E permaneceu constante até o oitavo minuto ($70,36 \pm 4,51\text{ °C}$ – Anexo A,

Figura A), enquanto nas amostras secas por CTDV-EV e CTDVT-EV a temperatura foi constante até o quarto minuto ($63,77 \pm 3,29$ °C – Anexo A, Figura B; e $64,12 \pm 3,48$ °C – Anexo A, Figura C). Após esse período, a temperatura da polpa aumentou acima de 92 °C, nesses três processos de secagem.

Na literatura foi relatado que é possível manter a temperatura relativamente baixa (25 °C inferior à temperatura da água quente) na polpa submetida à secagem por espalhamento sobre o filme de poliéster (*Mylar*) (RW). Castoldi et al. (2015) relataram temperatura média da polpa de tomate de 70 °C durante a secagem por espalhamento (espessura da polpa de 3 mm) sobre o suporte de filme de poliéster (*Mylar*) aquecido com água a 95 °C; valor semelhante ao reportado por Nindo et al. (2003) durante a secagem de purê de abóbora por RW a 90 °C e 0,65 mm. Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) observaram temperaturas entre de 70 e 75 °C para a polpa de manga seca por espalhamento (2 mm de espessura) sobre o filme de poliéster aquecido com água a 95 °C. Souza (2015) relatou que a temperatura média da polpa de açaí (2 mm de espessura da polpa) permaneceu em torno de 55, 70 e 72 °C para as condições de temperatura da água de aquecimento de 65, 80 e 90 °C, respectivamente.

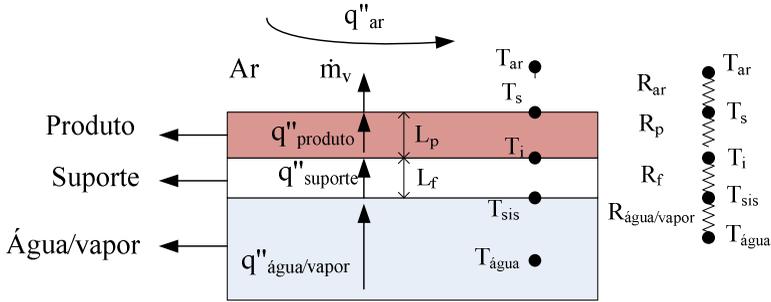
As temperaturas das polpas de tomate registradas pelos termopares durante a secagem divergiram em até 15 °C das registradas pelas termografias. Diferenças de 5 °C entre essas metodologias de medida de temperatura foram relatadas por Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) no monitoramento das temperaturas da polpa de manga seca por espalhamento (espessura de 2 mm) sobre o filme de poliéster (*Mylar*) com temperatura da água de aquecimento a 95 °C. Os autores atribuíram essas diferenças à falta de precisão na avaliação da emissividade da polpa durante o processo de desidratação e ao erro intrínseco associado ao deslocamento e descolamento dos termopares durante a secagem. O descolamento dos termopares da polpa de tomate também foi observado no presente estudo.

3.3.4 Coeficiente convectivo de transferência de calor e fluxos de calor

Na Figura 3.8 estão representados os fluxos de calor envolvidos no processo de secagem por *cast-tape drying*. Segundo Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) a avaliação detalhada das resistências é dificultada pela imprecisão dos valores das resistências na água

($R_{\text{água/vapor}}$ – Equação 2.3) e na polpa (R_p - Equação 2.5). Essas equações foram descritas no item 2.3.1.1 do Capítulo 2.

Figura 3.8 - Representação dos fluxos de calor envolvidos no processo *cast-tape drying*.



$$q''_{\text{água}} = q''_{\text{suporte}} = q''_{\text{produto}} = q''_{ar} + \dot{m}_v \Delta H$$

em que $T_{\text{água}}$ é a temperatura da água, T_{sis} é a temperatura inferior do suporte, T_i é a temperatura da interface suporte-polpa, T_s é a temperatura da interface polpa-ar, T_{ar} é a temperatura do ar, $q''_{\text{água/vapor}}$ é o fluxo de calor proveniente da água ou vapor para a superfície do suporte, q''_{suporte} é o fluxo de calor através do suporte, q''_{produto} é o fluxo de calor através do produto (polpa de tomate), q''_{ar} é o fluxo de calor entre a superfície da polpa e o ar; L_p é a espessura do produto (polpa de tomate), L_f é a espessura do suporte (*Mylar* ou *Teflon*); \dot{m}_v é a taxa de evaporação e ΔH é o calor latente de vaporização da água à pressão atmosférica.

Fonte: Adaptado de Zotarelli; Carciofi e Laurindo (2015).

Considerando que o calor fornecido à polpa através do filme de poliéster (proveniente da água quente ou do vapor de água), descontada a parcela perdida por convecção, é usado para a evaporação da água da polpa, pode-se estimar a quantidade de calor fornecida à polpa através da taxa de secagem no período à taxa constante. Para determinar o calor de convecção (Equação 3.11) foi necessário conhecer o coeficiente de transferência de massa (Equação 3.3) e o coeficiente de transferência de calor (Equação 3.8), valores dados na Tabela 3.3. O coeficiente de transferência de calor foi maior nos processos em que se utiliza convecção forçada com uso simultâneo da ventilação e exaustão, devido à maior velocidade do ar de secagem (velocidade do ar de 1,0-2,2 m s⁻¹). No entanto, esse valor foi significativamente igual ao processo CTDA-E, devido ao maior desvio padrão da média (59,5165±1,7076 W m⁻² °C⁻¹). Nesse processo um dos exaustores possui maior rotação das pás o que

implica em maior velocidade do ar (V2 – Figura 3.5a) o que influenciou nas medidas do k_c .

Tabela 3.3 - Coeficiente de transferência de massa (k_c) e o coeficiente convectivo de transferência de calor (h) entre a água e o ar.

Processos	$k_c \pm DP$ ($m s^{-1}$) CV (%)	$h \pm DP$ ($W m^{-2} °C^{-1}$) CV (%)
CTDA-E	0,0468±0,0011 ^a 2,50	59,5165±1,7076 ^a 2,86
CTDV-E	0,0342±0,0031 ^b 9,07	43,9000±3,94935 ^b 8,98
CTDV-EV e CTDVT-EV	0,0446±0,0036 ^a 8,21	58,1970±5,0357 ^a 8,65

CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-E - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão e ventilação. CTDVT-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme teflonado (suporte) e uso de exaustão e ventilação. DP- desvio padrão; CV- coeficiente de variação; a-b Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey ($p < 0,10$).

Conhecendo o coeficiente de transferência de calor e as temperaturas da polpa e do ar (Tabela 3.2) foi possível calcular o fluxo de calor por convecção de cada processo de secagem e seus valores estão apresentados na Tabela 3.4. Na Tabela 3.4 também foram apresentados os valores do calor associado à evaporação da água (Equação 3.8). A perda de calor por convecção e o calor usado para a evaporação foram maiores nos processos CTDVT-EV e CTDV-EV. A perda de calor por convecção é proporcional aos gradientes de temperatura entre o ar e a polpa, que são maiores nesses processos (CTDVT-EV e CTDV-EV), além do maior coeficiente de transferência de calor convectivo.

Tabela 3.4 - Fluxo de transferência de calor por convecção forçada e por evaporação dos diferentes processos de secagem da polpa de tomate.

Processos	$q''_{conv} \pm DP$ (W m ⁻²)	$q''_{evap} \pm DP$ (W m ⁻²)
	CV (%)	CV (%)
CTDA-E	648,04±18,59 ^c 2,86	9112,58±224,01 ^b 2,46
CTDV-E	693,44±40,77 ^c 5,88	9616,13±730,99 ^b 7,60
CTDV-EV	846,27±73,75 ^b 8,71	10303,79±305,48 ^{ab} 2,96
CTDVT-EV	1082,02±94,30 ^a 8,71	11338,40±338,74 ^a 2,98

CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-E - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão e ventilação. CTDVT-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme teflonado (suporte) e uso de exaustão e ventilação. DP- desvio padrão; CV- coeficiente de variação; a-c Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey ($p < 0,10$).

3.3.5 Atividade de água do pó de tomate

Na Tabela 3.5 estão apresentados os valores de atividade de água dos pós de tomate obtidos por diferentes processos de secagem da polpa de tomate.

Tabela 3.5 – Atividade de água dos pós de tomate obtidos por diferentes processos de secagem da polpa de tomate

Processos	Atividade de água*
CTDA-E	0,399±0,058 ^a
CTDV-E	0,306±0,027 ^b
CTDV-EV	0,324±0,008 ^{ab}
CTDVT-EV	0,323±0,010 ^{ab}

CTDA-E - água (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-E - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão. CTDV-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme de poliéster (suporte) e uso de exaustão e ventilação. CTDVT-EV - vapor (fonte de aquecimento), filme teflonado (suporte) e uso de exaustão e ventilação. *média e desvio padrão. a-b Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey ($p < 0,10$).

Os pós de tomate apresentaram valores de atividade de água abaixo de 0,4. Todos os valores de atividade de água das amostras de pós secos pelos diferentes processos são considerados adequados à preservação da qualidade do produto obtido (RAHMAN, 2008). Os dados observados para os pós de tomate no presente estudo estão em acordo com os valores relatados na literatura para diferentes alimentos em pó. Castoldi et al. (2015) relataram valores de atividade de água de pós de tomate obtidos por RW abaixo de 0,3 (temperatura da água aquecida de 65, 75, 85 e 95 °C e espessura de espalhamento da polpa de 2 e 3 mm).

3.4 CONCLUSÃO

A produção de tomate em pó desidratado por *cast-tape drying* tem possibilidades de aplicação industrial, tendo em vista os tempos reduzidos de processo e a alta capacidade evaporativa do sistema. A convecção forçada, com uso simultâneo de exaustão e ventilação, contribui para a maior redução do tempo de secagem, aumentando a taxa de secagem, devido à maior remoção dos vapores de água do ambiente, e para a redução da temperatura da polpa. O uso do vapor como fonte de aquecimento do suporte é recomendado devido à facilidade de uso e controle da temperatura e ao baixo custo de produção para as indústrias. Além disso, seu uso simplifica o projeto de construção do equipamento contínuo. O tipo de suporte não influencia as taxas de secagem e a capacidade evaporativa do processo, no entanto o filme teflonado é uma alternativa ao uso do poliéster (*Mylar*) para secagem de alimentos pegajosos, uma vez que sua baixa energia de superfície confere menor capacidade de adesão do material, facilitando a sua remoção quando seco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AOAC. Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis, 18 ed. Gaithersburg, Maryland, 2005.

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, Pullman WA, 1999.

ABONYI, B. I.; FENG, H.; TANG, J.; EDWARDS, C. G.; CHEW, B. P.; MATINSON, D. S.; FELLMAN, J. K. Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window system. **Journal of Food Science**, v. 67, n. 2, p. 1051-1056, 2001.

ABUL-FADL, M. M.; GHANEM, T. H. Effect of Refractance Window (RW) drying method on quality criteria of produced tomato powder as compared to the convection drying method. **World Applied Science Journal**, v. 15, n. 7, p. 93-96, 2011.

ADAMSON, A. W.; GAST, A. P. *Physical Chemistry of Surfaces*. 6th. Nova York: A Wiley-Interscience Publication, 1997.

ALBATI, R.; PASSERINI, F.; TONELLI, A. M.; GIALANELLA, S. Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 33-40, 2013.

BAEGHBALI, V.; NIAKOUSARI, M.; FARAHNAKY, A. Refractance Window drying of pomegranate juice: Quality retention and energy efficiency. **LWT - Food Science and Technology**, v. 66, p. 34-40, 2016

CAMMARANO, A.; DE LUCA, G.; AMENDOLA, E. Surface modification and adhesion improvement of polyester films. **Central European Journal of Chemistry**, v. 11, n. 1, p. 35-45, 2013.

CAPARINO, O. A.; TANG, J.; NINDO, C. I.; SABLANI, S. S.; POWERS, J. R.; FELLMAN, J. K. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. **Journal of Food Engineering**, v. 11, p. 135-148, 2012.

CASTOLDI, M.; ZOTARELLI, M. F.; DURIGON A.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Production of tomato powder by refractance window drying. **Drying Technology**, v. 33, n. 12, p. 1463-1473, 2015.

CELLI, G. B.; KHATTAB, R.; GHANEM, A.; BROOKS, M. S. Refractance WindowTM drying of haskap berry – preliminary results on anthocyanin retention and physicochemical properties. **Food Chemistry**, v. 194, p. 218–221, 2016.

DUPONT. Mylar[®] polyester film. Disponível em: http://usa.dupontteijinfilms.com/informationcenter/downloads/Physical_And_Thermal_Properties.pdf. Acesso em: 2 fev. 2016.

HOTZA, D. Colagem de folhas cerâmicas. **Cerâmica**, v. 43, p. 283-284, São Paulo, 1997.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa*. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. *Advanced Drying Technologies*. CRC Press, 2009.

MORAES, J. O.; SCHEIBE, A. S.; SERENO, A.; LAURINDO, J. B. Scale-up of the production of cassava starch-based films using *tape-casting*. **Journal of Food Engineering**, v. 119, p. 800-808, 2013.

MORAES, J. O., RESZKA, A., LAURINDO, J. B. Espalhamento e secagem de filme de amido-glicerol-fibra preparado por *tape-casting*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 136-143, 2014.

MORAES; J. O. de; SCHEIBE, A. S.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Conductive drying of starch-fiber films prepared by tape casting: Drying rates and film properties, **LWT – Food Science and Technology**, v. 64, p. 356-366, 2015.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M. D.; SILVA, C.; PRIETO, D. M.; SOUSA, A. M. M. Drying kinetics of biofilms obtained from chestnut starch and carrageenan with and without glycerol. **Drying Technology**, v. 29, n. 9, p. 1058 - 1065, 2011.

NINDO, C. I.; FENG, H.; SHEN, G. Q.; KANG, D. H. Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. **Journal of Food Processing Preservation**, v. 27, p. 117-136, 2003.

NINDO, C. I.; TANG, J. Refractance window dehydration technology: A novel contact drying method. **Drying Technology**, v. 25, p. 37-48, 2007.

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

ORTIZ-JEREZ, M. J.; GULATI, T.; DATTA, A. K.; OCHOA MARTÍNEZ, C. I. Quantitative understanding of refractance window™ drying. **Food and Bioproducts Processing**, v. 95, p. 237-253, 2015.

ORTIZ-JEREZ, M. J.; OCHOA-MARTÍNEZ, C. I. Heat Transfer Mechanisms in Conductive hydro-drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*) pieces, **Drying Technology: An International Journal**, v. 33, n. 8, p. 965-972, 2015.

PADILHA, A. F. *Materiais de Engenharia*. Brasil: Hemus Livraria, Distribuidora e Editora. 2007.

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

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

RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. *Engineering properties of foods*, 3th, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 738 p. 2005.

ROOS, Y.; KAREL, M. Water and molecular weight effects on glass transitions on amorphous carbohydrates and carbohydrate solutions. **Journal of Food Science**, v. 56, p. 1676-1681, 1991.

SAINI, C.; SINGH, S.; SAXENA, D. C. Thin layer drying characteristics of sweet potato starch based films and mathematical modeling. **Journal of Food Process Technology**, v. 3, n. 7, p. 3-8, 2012.

SOUZA, P. G., Produção e caracterização de açai (*Euterpe oleracea Mart.*) desidratado em pó por cast-tape drying. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina. 2015.

TANG, J.; FENG, H.; SHEN, G. *Drum Drying*. Inc: Dekker, M. Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering, 2003.

TÁPIA-BLÁCIDO, D. R.; SOBRAL, P. J. A.; MENEGALLI, F. C. Effect of drying conditions and plasticizer type on some physical and mechanical properties of amaranth flour films. **LWT – Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 392 – 400, 2013.

VAN KREVELEN, D. W.; TE NIJENHUIS, K. *Properties of polymers: their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions*. 4th, Amsterdam: Elsevier B.V, 2009. 1031 p.

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.

WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E.; RORRER, G. L. *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. 5th edition, 2007.

4. SECAGEM, CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA ESTABILIDADE DE PÓS DE TOMATE DESIDRATADOS POR *CAST-TAPE DRYING*, *SPRAY DRYING* E LIOFILIZAÇÃO.

4.1 INTRODUÇÃO

A produção dos alimentos em pó é uma alternativa para estender a vida útil de alguns alimentos e para o desenvolvimento de produtos de fácil acondicionamento, transporte e manuseio, e com maior valor agregado (CUQ; RONDET; ABECASSIS, 2011). Para o caso do tomate, é importante preservar suas propriedades nutricionais e sensoriais, com destaque para a cor. A capacidade de reidratação dos pós-desidratados também deve ser garantida pelo processo de secagem. Para a dieta humana, os tomates são a principal fonte de licopeno, que confere a cor vermelha ao fruto, sendo um carotenoide termolábil, com uma atividade antioxidante eficaz e associada à redução de doenças crônicas, como o câncer (COHEN; KRISTAL; STANFORD, 1999; HACKETT et al., 2004; COLLE et al., 2010). Tomate desidratado em pó pode ser usado na formulação industrial de sopas, molhos e condimentos. Depois de reconstituído, também pode ser usado em molhos para pizzas e massas. Em qualquer um desses produtos mencionados, a coloração vermelha e a capacidade de reidratação são propriedades fundamentais para o produto desidratado.

Os principais processos de secagem utilizados para a produção de alimentos em pó são a secagem em tambor (*drum drying*), a secagem por atomização (*spray drying*), a liofilização (*freeze-drying*) e o que denominados neste documento de *cast-tape drying* (TANG et al., 2003; GOULA; ADAMOPOULOS, 2008; LIAPIS; BRUTINI, 2006; NINDO; TANG, 2007; PAVAN et al., 2012; CAPARINO et al., 2013; ZOTARELLI et al., 2015). No entanto, o elevado teor de açúcar no suco de tomate leva a uma baixa T_g , aumentando a pegajosidade do produto, sobretudo em superfícies metálicas dos secadores em tambor e de atomização, como consequência do elevado teor de água (início da secagem) ou altas temperaturas (final da secagem) (TANG; FENG; SHEN, 2003; BHANDARI, 2007; GOULA; ADAMOPOULOS, 2005a).

Alimentos pegajosos reduzem o rendimento e a produtividade da secagem, além de favorecerem o superaquecimento do produto que fica em contato com as superfícies quentes. Isso resulta em degradação

das características nutricionais e sensoriais do produto (BOONYAI; BHANDARI; HOWES, 2004, BHANDARI, 2007, CHEN; ÖZKAN, 2007). Agentes carreadores, como as maltodextrinas, aumentam a temperatura da transição vítrea da solução e são utilizados para reduzir esse problema (BHANDARI et al., 1993, GOULA; ADAMOPOULOS, 2008). Entretanto, sua adição modifica a composição do produto e modifica características nutricionais e sensoriais do tomate. Goula e Adamopoulos (2005c) relataram perdas de licopeno entre 8,1 e 20,9% em pós de tomate secados por *spray drying*, como consequência das altas temperaturas (110-140 °C) e da presença de luz e oxigênio. Goula e Adamopoulos (2008) produziram pós de tomate (com maltodextrina) em *spray drying* e verificaram que a higroscopicidade e a aglomeração dos pós reduziram, enquanto a solubilidade em água aumentou.

Nos últimos 15 anos, o *cast-tape drying* (CTD) tem sido reportado como adequado para a produção de alimentos desidratados em flocos e em pó (ABONYI et al., 2001; NINDO et al., 2003; ABUL-FADL; GHANEM, 2011; PAVAN; SCHMIDT; FENG, 2012; CAPARINO et al., 2012; CASTOLDI et al., 2015; ZOTARELLI; CARCIOFI; LAURINDO, 2015; CELLI et al., 2016; BAEGHBALI et al., 2016). Filmes a base de amido e de proteínas também têm sido produzidos e secados por esta técnica (MOREIRA et al., 2011; MORAES et al., 2013; MORAES et al., 2015; SAINI et al., 2012; TÁPIA-BLÁCIDO et al., 2013). Há também publicações científicas sobre o uso de *tape-casting drying* para secagem de frutas fatiadas (OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012; ORTIZ-JEREZ et al., 2015, ORTIZ-JEREZ; OCHOA-MARTÍNEZ, 2015).

O RW (caso de CTD) consiste no espalhamento de uma suspensão (polpa de fruta, por exemplo) sobre a face superior de um filme de poliéster, semitransparente à radiação infravermelha (comercialmente conhecido como *Mylar*[®]), enquanto a parte inferior deste filme é integralmente tocada pela água quente. Nindo e Tang (2007) afirmaram que a secagem por RW apresenta transferência de calor por condução e radiação através da película polimérica. Todavia, Zotarelli, Carciofi e Laurindo (2015) e Ortiz-Jerez et al. (2015) mostraram que a contribuição da radiação térmica representa menos do que 3% do calor total transferido para a suspensão sendo secada, podendo ser desprezada.

A produção de tomate em pó por CTD foi estudada por Abul-Fadl e Ghanem (2011) pelo espalhamento da polpa sobre uma placa de

vidro e por Castoldi et al. (2015) pelo espalhamento de suco de tomate em um sistema de RW. Abul-Fadl e Ghanem (2011) usaram água quente (60, 75 e 90 °C) para aquecer o vidro e a polpa de tomate foi espalhada com espessura de 1,0-1,5 mm. Comparando com a secagem convectiva com ar quente, eles relataram menores tempos de secagem, menores custos, maiores taxas de reidratação e solubilidade. Além disso, relataram maiores retenções de licopeno, ácido ascórbico e flavonoides. Castoldi et al. (2015) usou água quente (65, 75, 85 e 95 °C) para secar polpa de tomate com espessura de 2 e 3 mm em dispositivo de secagem por RW. Os autores observaram baixos tempos de dispersão dos pós de tomate produzidos (menor que 9 s), solubilidade maior que 87%.

O objetivo deste estudo foi avaliar a cinética da secagem de suco de tomate por *cast-tape drying*, com e sem adição de maltodextrina. As propriedades físico-químicas dos pós de tomate obtidos foram comparadas com as propriedades dos produzidos por liofilização e por *spray drying*.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Preparo da matéria-prima

Tomates da variedade Italiano (*Lycopersicon esculentum* Mill), foram adquiridos no mercado local (Florianópolis, SC, Brasil) e selecionados pela sua concentração de sólidos solúveis (entre 4,2 e 4,6 °Brix), medida com um refratômetro manual (ATAGO, modelo PAL-BX/RI, Tóquio, Japão). Depois de lavadas, as frutas foram trituradas em mixer (Arno, São Paulo, SP, Brasil) e filtradas em peneira de 16 mesh, para retirar os pedaços de cascas maiores e as sementes. Esse suco foi usado como matéria-prima para a secagem.

4.2.2 Caracterização do suco de tomate

O suco de tomate foi caracterizado quanto à: umidade, cinzas, proteínas, extrato etéreo, fibra bruta e açúcares totais, de acordo com as Normas do Instituto Adolfo Lutz (2008). Essas análises foram realizadas no Laboratório de Análises Físico-químicas da Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil. O suco foi caracterizado quanto ao pH e acidez titulável de acordo com as Normas do Instituto Adolfo Lutz (2008) e

quanto ao teor de carotenoides totais de acordo com a metodologia de Rodriguez-Amaya (2001).

4.2.3 Processos de secagem e dispositivo experimental

O suco de tomate foi desidratado por *cast-tape drying* (CTD) e por liofilização (FD). Para comparação, o suco de tomate adicionado de maltodextrina (10DE, Loremalt 2002, Lorenz, Quatro Pontas, PR, Brasil) foi seco por *cast-tape drying* (CTDM) e *spray drying* (SDM). A razão de maltodextrina utilizada foi de 50% de sólidos secos (1 g de sólidos secos da polpa : 1 g de maltodextrina). A escolha deste agente carreador se deve o seu baixo custo e ampla utilização na secagem de frutas por *spray drying*.

4.2.3.1 *Cast-tape drying*

O aparato experimental utilizado nesse estudo está descrito no item 3.2.3.1 do Capítulo 3. Para todos os experimentos de secagem no CTD a água aquecida circulante (meio de aquecimento do suporte) foi mantida a 90 °C (± 2 °C). A temperatura e a UR do ar externo foi de 25,4 °C ($\pm 1,0$ °C) e entre 57% e 67,1%, respectivamente. O suco de tomate (com e sem maltodextrina) foi espalhado sobre o filme de poliéster (suporte) com uso de um espalhador manual (*doctor blade*, Tape Warehouse Fundação, modelo Doctor Blade Assembly, Morrisville, PA, EUA), usando 2 mm de espaçamento (*doctor blade gap*).

A variação da umidade durante a secagem do suco de tomate foi determinada de acordo com a metodologia descrita no item 3.2.4 do Capítulo 3. A evolução temporal da temperatura do suco de tomate foi medida utilizando imagens termográficas de acordo com a metodologia descrita no item 3.2.5 do Capítulo 3. O valor da emissividade (ϵ) utilizado para o suco foi de 0,96 (INCROPERA et al., 2008), devido à elevada umidade do produto (95% b. u.), enquanto para a superfície do filme de poliéster (*Mylar*) assumiu-se o valor de 0,92.

A facilidade do desprendimento das películas de tomate desidratadas (com e sem maltodextrina) do filme de poliéster foi avaliada visualmente. Para isso, realizou-se o resfriamento da película desidratada molhando a superfície inferior do filme de poliéster com água à temperatura ambiente (aproximadamente 22 °C). Depois de

1 minuto de resfriamento, a temperatura da película seca de tomate foi medida, seguida de sua retirada com uma espátula de metal. Imagens termográficas da película foram adquiridas durante todo o teste (câmera termográfica FLIR, modelo T360, Täby, Suécia) e as imagens foram analisadas (FLIR QuickReport 1.2 SP2, Täby, Suécia).

A capacidade evaporativa de cada processo de secagem do suco de tomate, com e sem maltodextrina, foi determinada de acordo com a metodologia descrita no item 3.2.6 do Capítulo 3. A umidade da polpa de tomate foi de $0,94 \text{ g g}^{-1}$ (b. u.) e da polpa de tomate adicionada de maltodextrina foi de $0,89 \text{ g g}^{-1}$ (b. u.). A massa específica da polpa de tomate foi de $0,975 \text{ g cm}^{-3}$ ($\pm 0,001 \text{ g cm}^{-3}$) e da polpa de tomate adicionada de maltodextrina foi de $1,031 \text{ g cm}^{-3}$ ($\pm 0,020 \text{ g cm}^{-3}$). A massa específica foi realizada em picnômetro de vidro.

Após a secagem por CTD, os flocos secos de tomate (com e sem maltodextrina) foram submetidos ao processo de moagem em moinho de facas (TECNAL, modelo TE 631/2, TECNAL, Piracicaba, SP, Brasil). Os pós de tomate moídos foram peneirados em peneira de malha de 20 e 25 mesh.

4.2.3.2 *Spray drying*

Suco de tomate adicionado de maltodextrina (1 g de sólidos secos : 1 g de maltodextrina) foi seco em *spray dryer* (modelo MSD 3.0, capacidade nominal máxima de 3 L h^{-1} , LabMaq, Ribeirão Preto, SP, Brasil) para a produção de tomate em pó. O secador consiste de uma câmara de secagem de aço inoxidável e um bico atomizador do tipo duplo fluido (pneumático), com orifício de 1,0 mm de diâmetro. Durante a secagem, uma bomba peristáltica alimentou a câmara com suco de tomate na vazão de 1 L h^{-1} e a vazão do ar de secagem foi de $3,70 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ a $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$). A temperatura do ar de saída foi de $99 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$). A secagem em *spray drying* foi realizada somente com suco adicionado de maltodextrina.

4.2.3.3 *Liofilização*

Suco de tomate foi congelado a $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ por 12 h, posteriormente foi seco em liofilizador (Liotop L101, Liobrás, São Carlos, Brasil) por 48 h e 0,020 kPa. Após a liofilização, os flocos foram submetidos ao processo de moagem em moinho de facas (modelo TE 631/2, TECNAL,

Piracicaba, SP, Brasil). Os pós de tomate moídos foram peneirados em peneira de malha de 20 e 25 mesh. A liofilização foi aplicada apenas para o suco sem adição de maltodextrina.

4.2.4 Umidade e atividade de água

As umidades do suco e dos pós de tomate foram determinadas pelo método gravimétrico em estufa sob vácuo (TECNAL, modelo TE-395, Piracicaba, Brasil), a 70 °C (AOAC, 2005). A a_w foi medida pelo método descrito no item 3.2.9 do Capítulo 3. Para cada experimento, a umidade e a atividade de água foram determinadas em triplicata.

4.2.5 Cor

A cor foi determinada em escala CIELAB com colorímetro HunterLab (MiniScan EZ 4500L, HunterLab, Reston, Virginia, USA) resultando em valores de luminosidade (L^* , faixa entre o preto e branco, 0-100) e cromaticidade (a^* , grau de verde à vermelho, -60 para +60; e b^* , grau de azul à amarelo, -60 para +60).

4.2.6 Carotenoides totais

Os carotenoides totais (CAR) foram determinados de acordo com a metodologia descrita por Rodriguez-Amaya (2001). Realizou-se a extração dos carotenoides com acetona, seguida de separação em éter de petróleo e diluição em água (100 mL). A absorbância foi medida em espectrofotômetro (SP-1100 Series, modelo SP-105, Spectrum Instruments Co, Shanghai, China), em comprimento de onda de 472 nm, usando éter de petróleo puro como branco. Os carotenoides totais (CAR) foram expressos como equivalente de licopeno ($\mu\text{g g}^{-1}$), por ser este o carotenoide mais abundante em tomates e maior responsável pela coloração vermelha (SHARMA; LE MAGUER, 1996), como dado pela Equação 4.1.

$$CAR = \frac{V_d \times A_{bs} \times 10^4}{E_{1cm}^{1\%} \times m_1} \quad (4.1)$$

em que V_d é o volume da diluição (mL), A_{bs} é a absorbância e $E_{1cm}^{1\%} = 3450$ é a absorvidade do carotenoide predominante no éter de petróleo (licopeno, no presente caso), m_1 é a massa de sólidos secos das amostras (g) descontada da massa de sólidos secos de maltodextrina. A perda de licopeno (%) foi calculada de acordo com a Equação 4.2.

$$\text{Perda de licopeno} = 100 - \left(\frac{CAR_{pó}}{CAR_{suco}} \times 100 \right) \quad (4.2)$$

em que $CAR_{pó}$ e CAR_{suco} são os carotenoides totais determinados para cada pó e para o suco de tomate ($\mu\text{g g}^{-1}$).

4.2.7 Microscopia

Microscopia óptica: as amostras dos pós foram colocadas em lâminas e dispersas em glicerol para formar suspensões. As suspensões foram cobertas com lamínulas de vidro e observadas em um microscópio ótico Olympus (Olympus, modelo Bx41, Gottingen, Alemanha), com aumentos de 40 x.

Microscopia eletrônica de varredura: as microscopias dos pós de tomate foram obtidas utilizando um microscópio eletrônico de varredura convencional (JEOL JSM, modelo 6390LV, Peabody, MA, EUA) no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina. O recobrimento das amostras com ouro foi realizado utilizando um metalizador (LEICA, modelo SCD 500, Buffalo Grove, IL, EUA) e um feixe de elétrons de 10 kV.

4.2.8 Isoterma de sorção

As isotermas de sorção de umidade dos pós foram determinadas através do método gravimétrico estático, usando soluções salinas saturadas para obter ambientes com diferentes UR (Labuza e Ball, 2000). Amostras de aproximadamente 0,5 g de pó de tomate foram colocadas dentro de potes herméticos contendo as soluções salinas, a 25 °C. As massas das amostras foram determinadas em balança analítica, em intervalos de tempo regulares, até atingirem o equilíbrio (metodologia descrita no item 4.2.4). O modelo matemático de BET (Equação 4.3) foi ajustado aos dados das isotermas de sorção de umidade dos diferentes pós de tomate (RAHMAN, 2008).

$$X_{eq} = \frac{X_m C a_w}{[(1 - a_w)(1 + (C - 1)a_w)]} \quad (4.3)$$

onde X_{eq} é a umidade de equilíbrio (g g^{-1} b. s.), X_m é a umidade na monocamada (g g^{-1} b. s.), e C é a constante do modelo de BET relacionada ao excesso de entalpia de sorção. Esses parâmetros foram estimados por uma regressão não linear usando o software MATLAB (MathWorks, modelo R2010a, Natick, MA, USA).

4.2.9 Temperatura de transição vítrea

Após as amostras atingirem a condição de equilíbrio com as soluções saturadas (45 dias), as amostras de pó com diferentes umidades (diferentes a_w) foram colocadas em cápsulas de alumínio, pesadas e fechadas hermeticamente, e submetidas à calorimetria diferencial de varredura (DSC, modelo Jade DSC, Perkin Elmer, Massachusetts, EUA). O equipamento de DSC foi calibrado com Índio e Zinco e operado com nitrogênio gasoso com vazão de 20 mL min^{-1} . Dentro do equipamento de DSC as amostras foram resfriadas até $-70 \text{ }^\circ\text{C}$, e em seguida aquecidas até $120 \text{ }^\circ\text{C}$, à taxa constante de $10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$. As análises foram realizadas em duplicata e os dados foram analisados utilizando o software Pyris 1 (Perkin Elmer, Norwalk, EUA), para determinar a T_g para cada atividade de água. O modelo de Gordon-Taylor (GORDON; TAYLOR, 1952), Equação 4.4, foi usado para descrever matematicamente os dados de T_g em função da atividade de água dos pós.

$$T_g = \frac{w_s T_{gs} + k w_w T_{gw}}{w_s + k w_w} \quad (4.4)$$

em que T_{gs} e T_{gw} são as temperaturas de transição vítrea da mistura sólida e da água ($^\circ\text{C}$), respectivamente, w_s e w_w são as frações de mássicas dos sólidos ($\text{g de sólidos g}^{-1}$ de produto) e da água (g de água g^{-1} de produto) na mistura e k é a constante do modelo de Gordon-Taylor. Assumiu-se T_{gw} de $-135 \text{ }^\circ\text{C}$ (JOHARI; HALLBRUCKER; MAYER, 1987). Os parâmetros da Equação (4.5) foram obtidos através da regressão não linear dos dados experimentais, com auxílio do software MATLAB (MathWorks, modelo R2010a, Natick, MA, USA). A adequação do modelo aos dados experimentais foi avaliada utilizando o coeficiente de determinação (R^2 - Equação 4.5) e o erro médio quadrático (RMSE - Equação 4.6) (SOPER et al., 1917).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (pd_i - ob_i)^2}{N - \kappa}} \quad (4.5)$$

$$R^2 = 1 - \left[\frac{N - 1}{N - \kappa - 1} \right] \left\{ 1 - \frac{[\sum_{i=1}^N (pd_i - \bar{pd})(ob_i - \bar{ob})]^2}{\sum_{i=1}^N (pd_i - \bar{pd})^2} \right\} \quad (4.6)$$

onde pd_i são os valores preditos pelo modelo, ob_i são os valores dos dados experimentais, N é o número de dados experimentais, e κ is é o número de parâmetros do modelo.

4.2.10 Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada de acordo com a metodologia descrita no item 3.2.10 do Capítulo 3.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Caracterização do suco de tomate

As características do suco de tomate utilizado nos ensaios de secagem são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características do suco de tomate.

Componentes	Suco de tomate
Umidade (g 100 g ⁻¹)	94,42 ± 0,03
Fibras (g 100 g ⁻¹)	0,84 ± 0,03
Lipídios (g 100 g ⁻¹)	0,12 ± 0,02
Cinzas (g 100 g ⁻¹)	0,21 ± 0,01
Proteínas (g 100 g ⁻¹)	0,63 ± 0,02
Açúcares totais (g 100 g ⁻¹)	3,64 ± 0,29
Atividade de água	0,995 ± 0,001
Sólidos solúveis (°Brix)	4,1 ± 0,2
pH	4,40 ± 0,06
Acidez (% AC)	0,315 ± 0,014
Carotenoides totais (µg g de suco ⁻¹)	44,45 ± 4,00

A água é componente majoritário do suco de tomate, seguida pelos açúcares totais e proteínas. Esses resultados estão em acordo aos obtidos por Monteiro et al. (2008) (Tabela 4.1) para tomates inteiros da

variedade Italiano. A quantidade de fibras observadas no suco de tomate ($0,84 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$) foi maior do que o relatado por Monteiro et al. (2008) ($0,26 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$), explicado em parte ao modo de preparo do suco de tomate, em que a casca e as sementes foram trituradas e reincorporadas ao suco.

Os valores de pH e acidez do suco de tomate estão em acordo com os valores encontrados por Rosa et al. (2011) em tomates italianos do tipo Heirloom inteiro (pH entre 4,46 e 4,60 e acidez entre 0,272 e 0,410%). A concentração de sólidos solúveis representada por 4,1 °Brix está próxima à observada por Machado, Alvarenga e Florentino (2007) para suco de tomate da variedade Roma.

O suco de tomate apresentou $44,45 \mu\text{g g}^{-1}$ (b. u.) ou $108,4 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (b. s.) de carotenoides totais, semelhante ao encontrado por Machado, Alvarenga e Florentino (2007) para o suco de tomate da variedade Roma ($119,2 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$ (b. s.)). No suco de tomate, a quantidade de licopeno varia de 68,7 a $121,4 \mu\text{g g}^{-1}$, variação explicada pela diferença de estágio de maturação do fruto, variedade e condições de cultivo da planta (SHI; LE MAGUER, 2000; LIN; CHEN, 2005).

4.3.2 Secagem do suco de tomate

Na Figura 4.1 são apresentadas triplicatas das curvas de secagem de suco de tomate por *cast-tape drying* (com e sem maltodextrina). Os valores das taxas de secagem no período à taxa constante e das capacidades evaporativas dos processos são apresentados na Tabela 4.2. O período de secagem à taxa constante ocorreu até umidades próximas a $0,1 \text{ g g}^{-1}$ (b. s.). Esse comportamento foi similar ao reportado por Castoldi et al. (2015) para secagem de suco de tomate ($0,95 \text{ g g}^{-1}$ b. u.) por espalhamento sobre filme de poliéster (*Mylar*) com espessura de 2 mm, usando água quente à $95 \text{ }^\circ\text{C}$, sem uso de exaustão. Apesar da menor umidade inicial do suco de tomate ($8,08 \pm 0,28 \text{ g g}^{-1}$ b. s.), resultado da adição de maltodextrina, o tempo de secagem requerido para a mistura suco-maltodextrina (CTDM) foi maior (12 min) do que (8 min) para o suco de tomate puro (CTD), para atingir a umidade de $0,03 \text{ g g}^{-1}$ b. s. (capacidade evaporativa cerca de 57% superior para o CTD). Além disso, CTDM apresentou taxa constante de secagem 3 vezes inferior à taxa observada para o CTD.

Figura 4.1 - Evolução temporal da umidade do suco de tomate durante o processo *cast-tape drying* (CTD). (a) suco de tomate sem maltodextrina e (b) suco de tomate com maltodextrina. Evolução temporal da umidade adimensional do suco de tomate durante o processo *cast-tape drying* (CTD). (c) suco de tomate sem maltodextrina e (d) suco de tomate com maltodextrina.

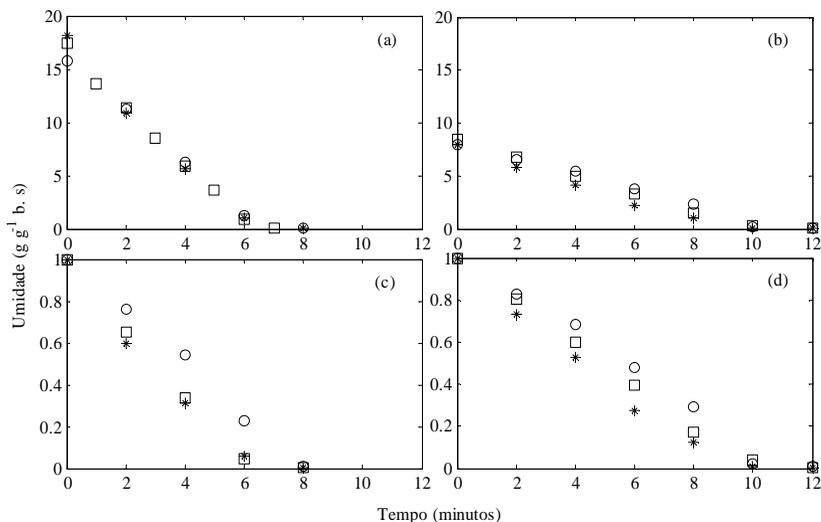


Tabela 4.2 - Taxas de secagem e capacidades evaporativas do processo de secagem do suco de tomate com maltodextrina (CTDM) e sem maltodextrina (CTD) por *cast-tape drying*.

Processo de secagem	Taxa de secagem		Capacidade evaporativa (kg m ⁻² h ⁻¹)
	Valor médio ± DP (g g ⁻¹ min ⁻¹)	CV (%)	
CTD	2,64 ± 0,22 ^a	8,30	17,02
CTDM	0,80 ± 0,04 ^b	4,49	10,84

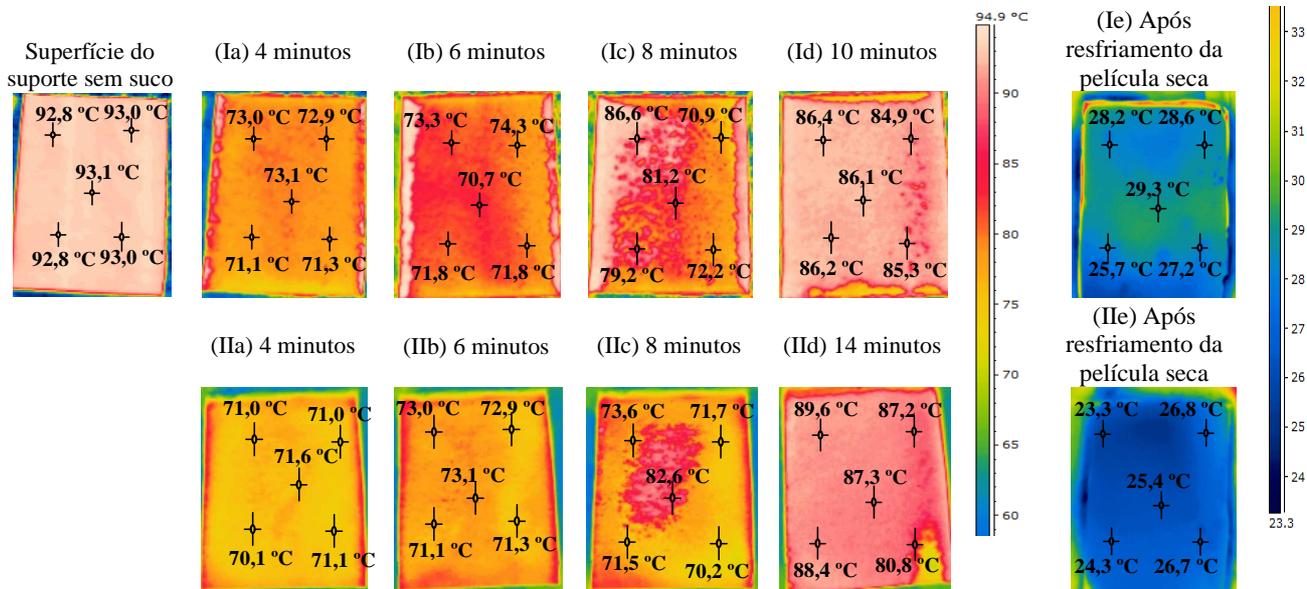
DP- desvio padrão; CV- coeficiente de variação; a-b Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey (p<0,10).

Abul-Fadl e Ganem (2011), estudando a secagem de suco de tomate (0,935 g g⁻¹ b. u.) espalhado (espessura de 1,0-1,5 mm) sobre a superfície de um vidro aquecido por água quente (60, 75 e 90 °C),

observaram tempos de secagem de 75, 60 e 40 min para atingir umidade final de 0,12-0,15 g g⁻¹ b. s., respectivamente. Assumindo que a composição do material a ser seco seja similar à da matéria-prima em ambos os estudos, o tempo de secagem requerido para atingir a mesma umidade final é de 6 vezes menor no dispositivo usado no presente estudo (cerca de 7 minutos, a qual foi estimada pela taxa de secagem), apesar da camada mais espessa do produto. Castoldi et al. (2015) reportaram tempo de secagem de 15 min para atingir umidades de aproximadamente 0,03 g g⁻¹ (b. s), que é duas vezes maior que o presente estudo, correspondendo à metade do valor da taxa de secagem. A secagem mais rápida nesse estudo é devida ao uso do vidro no estudo de Abul-Fadl e Ganem (2011), que tem maior resistência à transferência de calor por condução. Na comparação com os resultados de Castoldi et al. (2015), a ausência de convecção forçada no estudo relatado por esses autores explica a menor taxa de secagem observada por eles.

A Figura 4.2 mostra a evolução da temperatura do suco de tomate durante os processos de secagem CTD (Figura 4.2 Ib-f) e CTDM (Figura 4.2 IIa-f), respectivamente.

Figura 4.2 – Imagens termográficas da temperatura da superfície do filme poliéster (sem suco) e evolução da temperatura do suco de tomate durante o processo *cast-tape drying*: (Ia - Id) suco sem maltodextrina (CTD); e (IIa - IIe) suco com maltodextrina. Temperatura das películas desidratadas de tomate: (Ie) sem maltodextrina e (Iie) com maltodextrina após seu resfriamento.



A temperatura na superfície do *Mylar*, antes do espalhamento da polpa, foi de $92,94 \pm 0,13$ °C. No início dos processos de secagem o suco foi espalhado sobre a superfície do *Mylar* e sua temperatura se elevou rapidamente no primeiro minuto e permaneceu entre de 70-73 °C durante todo o período de secagem à taxa constante. Esse período se manteve até o sexto minuto para CTD (Figura 4.2Ib) e até o oitavo minuto para CTDM (Figura 4.2IIc). Castoldi et al. (2015) reportaram termografias relativas a experimentos de secagem de tomate por *cast-tape drying (refractance window)*, com água circulante a 95 °C e espessura de espalhamento de 3 mm. A temperatura do suco de tomate permaneceu na faixa de 70-75 °C durante o período de secagem à taxa constante. Nas termografias seguintes observaram-se maiores diferenças de temperatura entre diferentes regiões da superfície do suco (mais evidente nas Figuras 4.2Ic e IIc), devido às heterogeneidades de espessura da polpa espalhada. No final da secagem as temperaturas do suco se elevaram até temperaturas próximas à da superfície do filme flexível.

4.3.4 Caracterização dos pós

4.3.4.1 Umidade e atividade de água

A Tabela 4.3 mostra os valores finais de umidade e atividade de água dos pós de tomate produzidos por CTD, CTDM, SDM e FD. Esses valores são consequência das condições operacionais e do ar ambiente, resultando em umidades dos pós de tomate inferiores a $0,057 \text{ g g}^{-1}$ (b. s.) e atividades de água inferiores a 0,34. Os valores de umidade e de atividade de água dos pós de tomate obtidos por CTD estão em acordo com o reportado por Goula e Adamopoulos (2008) e Castoldi et al. (2015), mas isso depende do tempo de secagem.

Tabela 4.3 – Umidade e atividade de água dos pós de tomate.

Amostra	Umidade (g g^{-1} b. s.)	a_w
CTD	$0,028 \pm 0,001^c$	$0,195 \pm 0,007^c$
CTDM	$0,048 \pm 0,001^b$	$0,339 \pm 0,004^a$
FD	$0,057 \pm 0,001^a$	$0,255 \pm 0,006^b$
SDM	$0,008 \pm 0,001^d$	$0,129 \pm 0,007^d$

a-d Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey ($p < 0,10$).

4.3.4.2 Coloração, carotenoide total e micrografia dos pós

Os resultados dos parâmetros de cor dos pós (parâmetros L*, a* e b*) e dos carotenoides (carotenoides totais e relativas perdas) estão apresentados na Tabela 4.4 e Tabela 4.5, respectivamente.

Tabela 4.4 - Parâmetros de cor dos pós de tomate produzidos por diferentes processos.

Amostra	L*	a*	b*
CTD	51,04±0,86 ^c	32,72±0,21 ^a	30,54±0,56 ^a
CTDM	56,81±0,83 ^b	28,26±0,58 ^b	29,20±0,35 ^a
FD	52,25±0,48 ^c	33,19±0,64 ^a	30,04±0,45 ^a
SDM	82,29±2,59 ^a	15,48±1,22 ^c	19,28±1,12 ^b

a-c Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey ($p < 0,10$).

Tabela 4.5 - Carotenoides totais e perda de licopeno dos pós de tomate produzidos por diferentes processos.

Amostra	Carotenoides totais ($\mu\text{g g}^{-1}$ b. s.)	Perda de carotenoides (%)
Suco	1084,14±97,50 ^a	-
CTD	263,00±0,58 ^c	75,74
CTDM	239,89±8,46 ^c	77,87
FD	515,07±3,52 ^b	52,49
SDM	123,57±1,40 ^d	88,60

a-d Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey ($p < 0,10$).

A presença da maltodextrina resulta em um aumento significativo dos valores de L* para os pós (CTDM e SDM) quando comparado com os sem maltodextrina (CTD e FD). O processo SDM resultou em pó com maior valor de L* e menor valor de a* e b*, devido à presença de maltodextrina (“branca”) ao suco e do curto tempo de exposição às altas temperaturas. Por outro lado, os pós de tomate obtidos pelos processos CTD e FD apresentaram parâmetros de cor significativamente iguais, indicando que CTD é tão bom quanto o FD para a preservação da cor em tomates em pó.

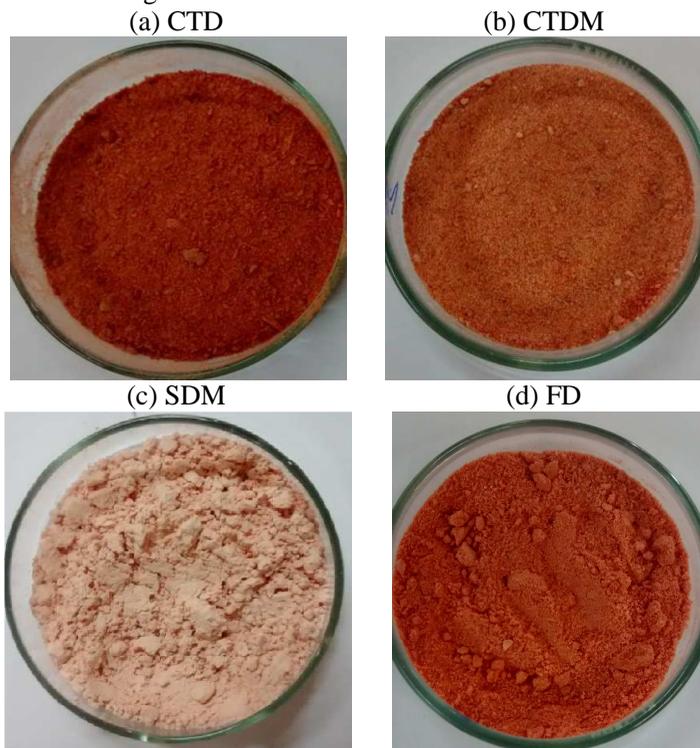
A cor vermelha é predominante no suco de tomate, devido à presença dos carotenoides como o licopeno. Quando esse fruto é processado termicamente, o licopeno é liberado da matriz celular e sofre

uma isomerização reversível de *trans*-licopeno para *cis*-licopeno, o que o torna mais oxidativo (TOOR; SAVAGE, 2006; HEREDIA et al., 2010; DEMIRAY; TULEK; YILMAZ, 2013). Como consequência disso, o parâmetro a^* diminuiu, como observado para o processo SDM, o qual apresenta a maior perda de licopeno e menores valores de a^* .

Por outro lado, o FD foi o processo que mais preservou o licopeno, devido à menor temperatura e concentração de oxigênio (vácuo) como sugerido por Liapis e Brutini (2006). Mesmo assim, a perda foi de 52,5% em relação ao suco de tomate, o que sugere que a moagem e exposição do produto desidratado à atmosfera ambiente são suficientes para causar grandes perdas de licopeno, independentemente do processo de secagem. Segundo Shi e Le Maguer (2000), a isomerização e a oxidação do licopeno são as principais causas da sua degradação, sendo influenciada pela presença de oxigênio e de luz, pela temperatura, umidade e concentração de lipídeos. De fato, a umidade dos pós de tomate (Tabela 4.3) são inferiores a umidade da monocamada (X_m) (Tabela 4.6), o que contribui para que ocorra reações de oxidação reduzindo o licopeno. Além disso, mudanças na coloração amarela são relatadas devido às reações de escurecimento e de *Maillard*, e oxidação do ácido ascórbico, resultado da exposição ao ar por longos tempos (POTTER; HOTCHKISS, 1995), e são evidenciadas pelo decréscimo dos valores de b^* (SDM). Abul-Fadl e Ghanem (2011) relataram perdas de licopeno dos pós de tomate obtidos por CTD menores do que no presente estudo (38,82 a 35,55%), mesmo para maiores tempos de secagem (maior exposição ao oxigênio) se comparados ao presente estudo.

Na Figura 4.3 estão apresentadas as fotografias dos pós de tomate obtidos pelos diferentes processos de secagem.

Figura 4.3 - Fotografias dos pós de tomate obtido pelos diferentes processos de secagem.



Micrografias ópticas e MEV dos pós produzidos pelos diferentes processos de secagem estão demonstradas na Figura 4.4 e 4.5, respectivamente. As partículas produzidas por SDM e mostradas nas imagens das Figuras 4.4c e 4.5c apresentam formato esférico, resultado desse tipo de processo e tendem a se aglomerar. Os pós de tomate obtidos por CTD, CTDM e FD apresentaram formatos irregulares, resultado do processo de moagem (Figura 4.4a,b,d e 4.5a,b,d). Os pós de tomate produzidos sem maltodextrina apresentaram superfícies rugosas, o que aumenta a área exposta à oxidação, reduzindo a estabilidade ao armazenamento (CAPARINO et al., 2012). A matriz do suco de tomate é formada por cromoplastos, que contêm cristais de carotenoides dispersos na água (ROSSO, 1968; GUPTA et al., 2011; KUBO; AUGUSTO; CRISTIANINI, 2013). Após a secagem foi possível observar esses cristais como indicado pelas setas na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Microscopia dos pós de tomate produzidos por diferentes processos.

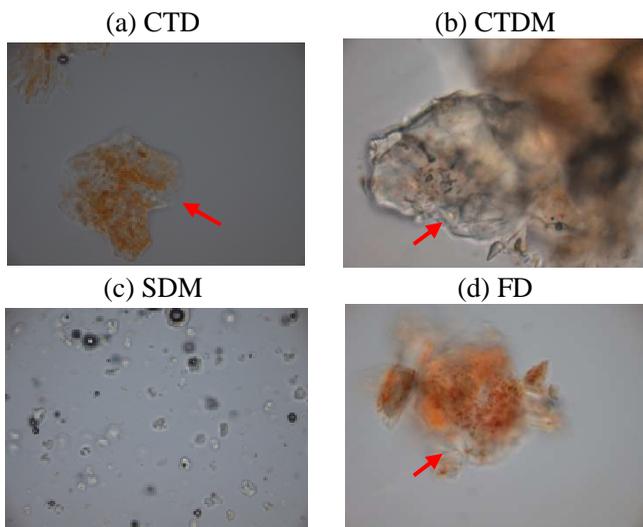
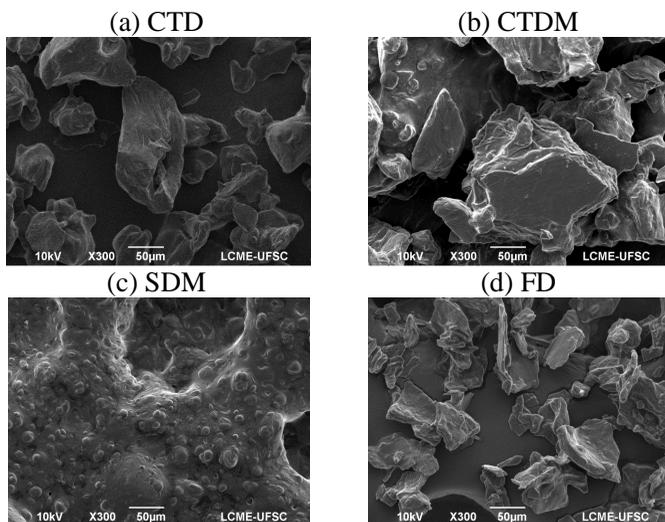


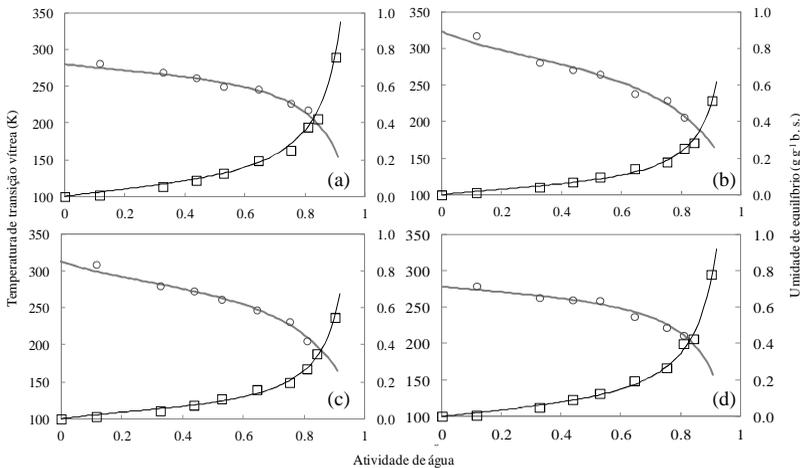
Figura 4.5 - Micrografia dos pós de tomate produzidos por diferentes processos. Aumento de 300x.



4.3.4.3 Isoterma de sorção de água, temperatura de transição vítrea e pegajosidade

Na Figura 4.6 estão representados os valores de umidade de equilíbrio e da T_g em função da atividade de água.

Figura 4.6 - Diagrama de estado dos pós de tomate produzidos por (a) CTD, (b) CTDM, (c) SDM e (d) FD, em que: (○) são os dados experimentais de T_g ; (□) são os dados experimentais de umidade de equilíbrio em base seca. A linha cinza representa o modelo de Gordon-Taylor, enquanto a linha preta representa o modelo de sorção de BET.



Os dados experimentais de umidade de equilíbrio em função da atividade de água foram bem descritos pelo modelo de Brunauer-Emmett-Teller (BET) (Figura 4.6, Tabela 4.6). O modelo BET é adequado para representar curvas de sorção do tipo III, observadas em materiais com alto conteúdo de açúcares (RAHMAN, 2008), como pós de frutas (TONON et al., 2009; CAPARINO et al., 2013; CASTOLDI et al., 2015). Os valores do coeficiente de correlação (R^2) foram superiores a 0,9947 e os valores do RMSE foram inferiores a 0,0188, em todos os casos (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 - Parâmetros estimados do modelo de BET ajustado aos dados experimentais de sorção de água dos pós de tomate e parâmetros estimados do modelo de *Gordon-Taylor* ajustado aos dados experimentais de temperatura de transição vítrea dos pós de tomate produzidos por diferentes processos.

Parâmetros	CTD	CTDM	SDM	FD
C	2,1929	3,9762	4,3184	2,3971
X_m (g g ⁻¹ b. s.)	0,0785	0,0504	0,0552	0,0760
R ²	0,9947	0,9947	0,9955	0,9959
RMSE	0,0188	0,0122	0,0122	0,0161
T _{gs} (°C)	7,30	50,41	40,08	5,09
K	1,50	4,97	3,70	1,56
R ²	0,9643	0,9796	0,9767	0,9648
RMSE	4,6947	5,7987	5,6571	5,0344

Os pós com maltodextrina (SDM e CTDM) adsorvem menos umidade do que os pós sem maltodextrina (CTD e FD) na mesma UR, devido aos poucos grupos hidrofílicos presentes nas maltodextrinas (TONON et al., 2009). Os valores de umidade da monocamada molecular foram próximos de 0,05 g g⁻¹ (b. s.) para os pós de tomate com maltodextrina e de 0,07 g g⁻¹ (b. s.) para os pós sem maltodextrina. Consequentemente, maiores valores de T_g foram observados, para a mesma a_w, quando a maltodextrina foi adicionada. Castoldi et al. (2015) reportaram valores de X_m de 0,09 g g⁻¹ (b. s.) para pós de tomate obtidos por RW. Goula et al. (2008) reportaram umidade de equilíbrio entre 0,16-0,17 g g⁻¹ (b. s.) para pós de tomate produzidos por *spray drying* com diferentes condições de processamento.

Os valores de C obtidos pelo modelo de BET para os pós de tomate desidratados variaram entre 2,1929 e 4,3184. Esses valores são similares aos reportados por Goula et al. (2008) para pós de tomate obtidos por *spray drying* e por Castoldi et al. (2015) para pós de tomate obtidos por RW.

O modelo de *Gordon-Taylor* apresentou um bom ajuste aos dados experimentais de temperatura de transição vítrea em função da atividade de água (R² > 0,96). Os parâmetros desse modelo foram apresentados na Tabela 4.6. O alimento desidratado exposto a altas UR aumenta a mobilidade molecular, como uma consequência da sorção de água, pois a água é um agente plasticizante (T_g em torno de -135 °C)

(ROOS, 1995). Esse fenômeno pode causar a transição do estado vítreo para o gomoso (ROOS, 1995).

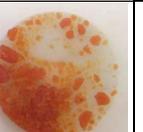
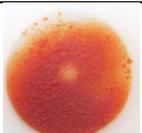
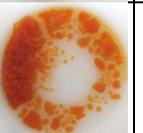
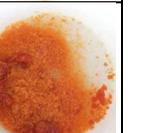
Os valores de T_g de todos os pós de tomate produzidos no presente estudo foram baixos. Isso está relacionado à presença de ácidos orgânicos e açúcares de baixa massa molar (glicose, $T_g = 31\text{ }^\circ\text{C}$, e frutose, $T_g = 5\text{ }^\circ\text{C}$) no suco de tomate (ROOS; KAREL, 1991).

A partir do modelo de Gordon-Taylor (Figura 4.6) pode observar-se que a $20\text{ }^\circ\text{C}$ a transição vítrea ocorre a $a_w = 0,24$ e umidade de $0,04\text{ g g}^{-1}$ (b. s.) para os pós CTDM, e a $a_w = 0,18$ e umidade de $0,03\text{ g g}^{-1}$ (b. s.) para os pós SDM. Tomates secos sem maltodextrina (FD e CTD) expostos a temperatura ambiente não se mantêm no estado vítreo, tendo característica pegajosa.

No Quadro 4.1 estão apresentadas as fotografias dos pós expostos a diferentes UR. Em umidades de 11 e 33% as partículas estão mais soltas (CTD e CTDM) e mais agregadas (SDM e FD). Em umidades intermediárias, a aglomeração das partículas aumentou gradativamente, até a compactação dos pós (*caking* e estrutura rígida) e uma coloração mais escura. O *caking* é um fenômeno que ocorre em pós, com formação de torrões, que evoluem para um aglomerado sólido e um material adesivo, o que provoca a perda de funcionalidade e degradação da qualidade (AGUILERA; DEL VALLE; KAREL, 1995).

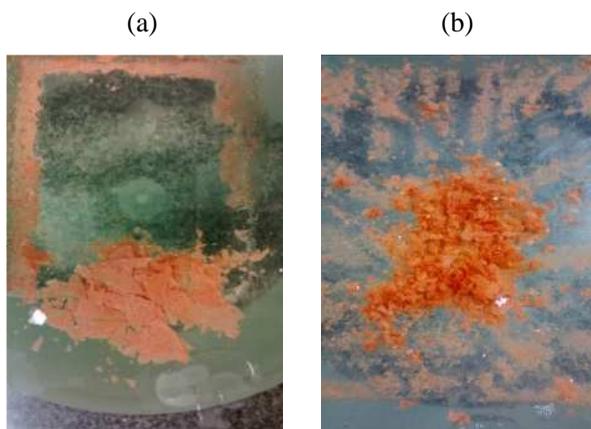
Em umidades acima de 81% observou-se a formação de um exsudado com aparência viscosa, sendo mais evidente nos pós com maltodextrina. Em umidades elevadas ocorre solubilização das frações de baixa massa molar (AGUILERA; DEL VALLE; KAREL, 1995). Zotarelli (2014) relatou comportamento semelhante em diferentes umidades relativas, durante o armazenamento de pós de manga obtidos por RW e SD, com e sem adição de maltodextrina.

Quadro 4.1. Pós de tomate produzidos por diferentes métodos de secagem, armazenados em diferentes umidades relativas, a 25 °C.

UR	Amostras			
	CTD	CTDM	SDM	FD
11,6%				
32,7%				
43,2%				
52,9%				
64,5%				
81,0%				
90,2%				

O processo *spray drying* é bem conhecido por produzir pós pegajosos que aglomeram e aderem às paredes do secador, principalmente quando a matéria-prima processada contém altos teores de açúcares. Isso é consequência de os pós atingirem temperaturas superiores à T_g , o que leva à pegajosidade que reduz o rendimento do processo (BOONYAI et al., 2004; GOULA; ADAMOPOULOS, 2005a; BHANDARI, 2007; CHEN; ÖZKAN, 2007). No final da secagem por CTD os pós de tomate (com e sem maltodextrina) são pegajosos e aderem fortemente na superfície do poliéster. A Figura 4.7 mostra imagens dos pós de tomate produzidos por CTD com (Figura 4.7a) e sem (Figura 4.7b) maltodextrina, removidos com uma espátula de metal após 1 minuto de contato da superfície inferior do poliéster com a água à temperatura ambiente (22 °C). Como discutido anteriormente, a maltodextrina aumenta o valor de T_g , reduzindo a adesividade dos pós.

Figura 4.7 - Teste de descolamento da película de tomate depois da raspagem, após resfriamento: (a) com maltodextrina e (b) sem maltodextrina.



Collares, Finzer e Kieckbusch (2004) afirmam que um filme seco permanece pegajoso até atingir a umidade correspondente à transição vítrea, a uma dada temperatura. O equipamento industrial de RW opera continuamente com uma seção de resfriamento no fim da esteira de poliéster (MAGOON, 1986), a fim de facilitar a remoção do pó (NINDO; TANG, 2007; KUDRA; MUJUMDAR, 2009). No presente

estudo, após o procedimento de resfriamento, a temperatura dos pós foi entre 22 e 29 °C (Figura 4.2), próximos dos valores de T_g dos pós de tomate adicionados de maltodextrina (0,041 g g⁻¹ b. s.) e ligeiramente distante dos valores de T_g para os pós de tomate sem maltodextrina.

4.4 CONCLUSÃO

A secagem do suco de tomate por *cast-tape drying* ocorre a altas taxas de secagem, implicando em capacidades evaporativas também elevadas. A maltodextrina adicionada no suco de tomate reduz a pegajosidade dos pós, facilitando a remoção dos flocos secos da superfície do suporte. Outro efeito positivo é o aumento da estabilidade do pó durante o armazenamento, como consequência do aumento da sua temperatura de transição vítrea. O pó de tomate resultante do processo CTD apresenta valores de T_g similares ao do pó produzido por *spray drying* (ambos adicionados de maltodextrina). No entanto, o pó obtido por *spray drying* apresenta estrutura esférica (em vez de flocos) e coloração mais clara, facilidade de aglomeração e aderência das partículas a parede do secador. Portanto, o processo de secagem por *cast-tape drying* é uma alternativa viável e tecnologicamente competitiva para a produção de tomate em pó.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABONYI, B. I.; FENG, H.; TANG, J.; EDWARDS, C. G.; CHEW, B. P.; MATIINSON, D. S.; FELLMAN, J. K. Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window system. **Journal of Food Science**, v. 67, n. 2, p. 1051-1056, 2001.

ABUL-FADL, M. M.; GHANEM, T. H. Effect of Refractance Window (RW) drying method on quality criteria of produced tomato powder as compared to the convection drying method. **World Applied Science Journal**, v. 15, n. 7, p. 93-96, 2011.

AGUILERA, J. M.; VALLE, J. M.; KAREL, M. Caking phenomena in amorphous food powders. **Trends in Food Science and Technology**, v. 6, n. 5, p. 149-155, 1995.

AOAC. Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis, 18th. Gaithersburg, Maryland, 2005.

BARRETT, D. M.; SOMOGYI, L.; RAMASWAMY, H. *Processing fruit*, 2th. USA: CRC Press LLC, 2005.

BHANDARI, B. R.; SENOUSSI, A.; DUMOULIN, E. D.; LEBERT, A. *Spray drying* of concentrated fruit juices. **Drying Technology**, v. 11, n. 5, p. 1081-1092, 1993.

BHANDARI, B. R.; HOWES, T. Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. **Journal of Food Engineering**, v. 40, p. 71-79, 1999.

BHANDARI, B. R. *Stickiness and Caking in Food Preservation*. In: M. S. Rahman, Handbook of Food Preservation (p. 387-401). CRC Press, 2007.

BOONYAI, P., BHANDARI, B., HOWES, T. Stickiness measurement techniques of food powders: A review. **Powder Technology**, v. 145, p. 34-46, 2004.

CAPARINO, O. A.; TANG, J.; NINDO, C. I.; SABLANI, S. S.; POWERS, J. R.; FELLMAN, J. K. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (*Philippine 'Carabao'* var.) powder. **Journal of Food Engineering**, v. 11, p. 135-148, 2012.

CAPARINO, O. A.; SABLANI, S. S.; TANG, J.; SYAMALADEVI, R. M.; NINDO, C. I. Water sorption, glass transition, and microstructures of refractance window and freeze-dried mango (*Philippine "Carabao" Var.*) powder. **Drying Technology**, v. 31, n. 16, p. 1969-1078, 2013.

CASTOLDI, M.; ZOTARELLI, M. F.; DURIGON A.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Production of tomato powder by refractance window drying. **Drying Technology**, v. 33, n. 12, p. 1463-1473, 2015.

CELLI, G. B.; KHATTAB, R.; GHANEM, A.; BROOKS, M. S. Refractance WindowTM drying of haskap berry – Preliminary results on anthocyanin retention and physicochemical properties. **Food Chemistry**, v. 194, p. 218–221, 2016.

CHEN, X. D.; ÖZKAN, N. Stickiness, Functionality, and Microstructure of Food Powders. **Drying Technology**, v. 25, p. 969-979, 2007.

COHEN, J. H.; KRISTAL, A. R.; STANFORD, J. L. Fruit and vegetable intakes and prostate cancer risk. **Journal of the National Cancer Institute**, v. 92, n. 1, p. 61-68, 1999.

COLLARES, F. P.; FINZER, J. R. D.; KIECKBUSCH, T. G. Glass transition control of the detachment of food pastes dried over glass plates. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 261-267, 2004.

COLLE, I. J. P.; LEMMENS, L.; TOLESA, G. N.; BUGGENHOUT, S. V.; VLEESCHOUWER, K.; VAN LOEY, A. M.; HENDRICKX, M. Lycopene degradation and isomerization kinetics during thermal processing of an olive oil/tomato emulsion. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v. 58, n. 24, p.12784–12789, 2010.

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.

DEMIRAY, E.; TULEK, Y.; YILMAZ, Y. Degradation kinetics of lycopene, β -carotene and ascorbic acid in tomatoes during hot air Drying. **Food Science and Technology**, v. 50, n. 1, p. 172-176, 2013.

GOULA, M. A., ADAMOPOULOS, K. G. Spray drying performance of a laboratory spray dryer for tomato powder preparation. **Drying Technology**, v. 21, n. 7, p. 1273-1289, 2003.

GOULA, M. A.; ADAMOPOULOS, K. G. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: I The effect on product recovery. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 25-34, 2005a.

GOULA, A. M.; ADAMOPOULOS, K. G. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 1, p. 35-42, 2005b.

GOULA, M. A.; ADAMOPOULOS, K. G. Stability of lycopene during *spray drying* of tomato pulp. **LWT – Food Science and Technology**, v. 38, p. 479-487, 2005c.

GOULA, M. A.; ADAMOPOULOS, K. G. Effect of maltodextrin addition during spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. Powder properties. **Drying Technology**, v. 26, p. 726-737, 2008.

GOULA, A. M.; KARAPANTSIOS, T. D.; ACHILIAS, D. S.; ADAMOPOULOS, K. G. Water sorption isotherms and glass transition temperature of spray dried tomato pulp. **Journal of Food Engineering**, v. 85, n. 1, p. 73-83, 2008.

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

GUPTA, R.; KOPEC, R. K.; SCHWARTZ, S. J.; BALASUBRAMANIAM, V. M. Combined pressure-temperature effects on carotenoid retention and bioaccessibility in tomato juice. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v. 59, n. 14, p. 1-20, 2011.

HACKETT, M. M.; LEE, J. H.; FRANCIS, D.; SCHWARTZ, S. J. Thermal stability and isomerization of lycopene in tomato oleoresins from different varieties. **Journal of Food Science**, v. 69, p. C536-C541, 2004.

HEREDIA, A.; PEINADO, I.; ROSA, E.; ANDRES, A. Effect of osmotic pre-treatment and microwave heating on lycopene degradation and isomerization in cherry tomato. **Food Chemistry**, v. 123, n. 1, p. 92-98, 2010.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa*. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2008.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1 ed. Digital.

JOHARI, G.P.; HALLBRUCKER, A.; MAYER, E. The glass-liquid transition of hyperquenched water. **Nature**, v. 330, n. 10, p. 552-553, 1987.

KUBO, M. T. K.; AUGUSTO, P. E. D.; CRISTIANINI, M. Effect of high pressure homogenization (HPH) on the physical stability of tomato juice. **Food Research International**, v. 51, p. 170-179, 2013.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. *Advanced Drying Technologies*. CRC Press, 2009.

LABUZA, T. P.; BALL, L. N. *Moisture sorption-practical aspects of isotherm measurement and use*. 2th ed., Egan: American Association of Cereal Chemist, 122p, 2000.

LIAPIS, A. I.; BRUTTINI, R. *Freeze Drying*. In: A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press, 2006.

LIN, C. H.; CHEN, B. H. Stability of carotenoids in tomato juice during storage. **Food Chemistry**, v. 90, p. 837-846, 2005.

LÓPEZ, P.; SANCHEZ, A. C.; VERCET, A.; BURGOS, J. Thermal resistance of tomato polygalacturonase and pectinmethylesterase at physiological pH. **Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung A**, v. 204, p. 146-50, 1997.

MACHADO, A. Q.; ALVARENGA, M. A. R.; FLORENTINO, C. E. T. Produção de tomate italiano (saladete) sob diferentes densidades de plantio e sistemas de poda visando ao consumo *in natura*. **Horticultura Brasileira**, v. 25, p. 149-153, 2007.

MAGOON, R. E. Patent No. 4,631,837. U. S. A., 1986.

MONTEIRO, C. S.; BALBI, M. E.; MIGUEL, O. G.; PENTEADO, P. T. P da S.; HARACEMIV, S. M. C. Qualidade nutricional e antioxidante do tomate “tipo italiano”. **Alimentos e Nutrição**, v.19, p. 25-31, 2008.

NINDO, C. I.; FENG, H.; SHEN, G. Q.; KANG, D. H. Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. **Journal of Food Processing Preservation**, v. 27, p. 117-136, 2003.

NINDO, C. I.; TANG, J. Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. **Drying Technology**, v. 25, p. 37-48, 2007.

ORTIZ-JEREZ, M. J.; GULATI, T.; DATTA, A. K.; OCHOA MARTÍNEZ, C. I. Quantitative understanding of Refractance Window™ Drying. **Food and Bioproducts Processing**, v. 95, p. 237-253, 2015.

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

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

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

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

ROSA, C. L. S.; SOARES, A. G.; FREITAS, D. D. G. C.; ROCHA, M. C.; FERREIRA, J. C. S.; GODOY, R. L. O. Caracterização físico-química, nutricional e instrumental de quarto acessos de tomate Italiano (*Lycopersicon esculentum* Mill) do tipo “Heirloom” produzido sob manejo orgânico para elaboração de polpa concentrada. **Alimentos e Nutrição**, v. 22, n. 4, p. 649-656, 2011.

ROOS, Y.; KAREL, M. Water and molecular weight effects on glass transitions on amorphous carbohydrates and carbohydrate solutions. **Journal of Food Science**, v. 56, p. 1676-1681, 1991.

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

ROSSO, S. W. The ultrastructure of chromoplast development in red tomatoes. **Journal of Ultrastructure Research**, v. 25, p. 307–322, 1968.

SHARMA, S. K.; LE MAGUER, M. Kinetics of lycopene degradation in tomato pulp solids under different processing and storage conditions. **Food Research International**, v. 29, p. 309 - 315, 1996.

SHI, J.; LE MAGUER, M. Lycopene in Tomatoes: chemical and physical properties affected by food processing. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 20, p. 293 - 334, 2000.

SOPER, H. E.; YOUNG, A. W.; CAVE, B. M.; LEE, A.; PEARSON, K. On the distribution of the correlation coefficient in small samples. Appendix II to the papers of "Student" and R. A. Fisher. *Biometrika*, v.11, p. 328 - 413, 1917

TANG, J.; FENG, H.; SHEN, G. *Drum Drying*. Inc: Dekker, M. Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering, 2003.

TELIS, V. R. N.; SOBRAL, P. J. A. Glass transitions for freeze-dried and air-dried tomato. **Food Research International**, v. 35, p. 435 - 443, 2002.

TONON, R. V.; BARONI, A. F.; BRABET, C.; GIBERT, O.; PALLET, D.; HUBINGER, M. D. Water sorption and glass transition temperature of spray dried açai (*Euterpe oleracea Mart.*) juice. **Journal of Food Engineering**, v. 94, p. 215-221, 2009.

TOOR, R. K.; SAVAGE, G. P. Effect of semi-drying on the antioxidant components of tomatoes. **Food Chemistry**, v. 94, n. 1, p. 90-97, 2006.

ZOTARELLI, M. F. Produção e caracterização de manga desidratada em pó por diferentes processos de secagem. Tese de Doutorado apresentada no Curso de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2014.

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.

5. REIDRATAÇÃO DOS PÓS DE TOMATE OBTIDOS POR CAST-TAPE DRYING, SPRAY DRYING E LIOFILIZAÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da capacidade de reidratação e do comportamento reológico de pós reidratados é essencial para o desenvolvimento de produtos e para os processos industriais. A reidratação dos pós deve ocorrer de forma rápida e completa para que eles não flutuem sobre a superfície do líquido e não formem grumos (CHEN; ÖZKAN, 2007; FORNY; MARABI; PALZER, 2011). A capacidade de reidratação dos pós depende das suas propriedades, como a composição, umidade, distribuição de tamanho e morfologia das partículas, que estão associadas ao produto e ao método de produção (HOGEKAMP; SCHUBERT, 2003).

A literatura relata algumas características físico-químicas dos pós de tomate que influenciam a sua reidratação. Castoldi et al. (2015) verificaram que pós de tomate produzidos por CTD (temperatura da água aquecida de 65, 75, 85 e 95 °C e espessura de espalhamento da polpa de 2 e 3 mm) apresentam solubilidade acima de 87% e tempos de dispersão abaixo de 9 segundos. Abul-Fadl e Ganem (2011) verificaram valores de solubilidade de pós de tomate produzidos por CTD (com suporte de vidro que foi aquecido por água a 60, 75 e 90 °C) na faixa de 63,13 – 65,94% e taxa de reidratação entre 3,14 – 3,24%. Por outro lado, relataram solubilidade de 62,81% e taxa de reidratação de 2,95% para pós de tomate produzidos em secador.

A viscosidade é outra característica importante em produtos reconstituídos, sendo um dos parâmetros avaliados em produtos derivados de tomate, como molhos, sucos, polpas, extratos concentrados e *ketchup*. A viscosidade desses produtos é dependente das substâncias pécticas presentes no fruto, da temperatura e da concentração de sólidos do produto (GOULD, 1992).

Na literatura são reportados alguns estudos que investigaram o comportamento reológico de tomates em pó reconstituídos (BARBANA; EL-OMRI, 2009; ABU-JDAYIL et al., 2004). Barbana e El-Omri (2009) estudaram o comportamento reológico de polpas de tomate obtidas da reidratação de pós de tomate liofilizados em concentrações de 9,7; 12,9; 20,5 e 26,8%. A viscosidade aparente de cada amostra foi medida nas temperaturas de 20, 30, 40, 50 e 60 °C, com taxas de cisalhamento variando de 0 a 1291 s⁻¹. Os autores relataram que

o pó reidratado apresenta comportamento pseudoplástico e que a consistência aumentou com o acréscimo da concentração de sólidos solúveis, e reduziu com a elevação da temperatura. Abu-Jdayil et al. (2004) realizaram um estudo comparativo das características reológicas da polpa de tomate e de tomate em pó (obtido por SDM) reidratado até a faixa de 5,57 a 25% (b. u.). Para as amostras com 25% (b. u.) foi verificada a influência da temperatura (10, 20, 25, 30, 40 e 50 °C) nas propriedades reológicas do pó reidratado. A viscosidade aparente dos produtos de tomate reidratados aumentou com o acréscimo da concentração de sólidos solúveis e reduziu com a elevação da temperatura. Os produtos reidratados em 5,57 e 6,92% (b. u.) apresentaram comportamento de fluído newtoniano, enquanto as polpas reidratadas com 9,11, 13,36 e 25% (b. u.) apresentaram comportamento plástico de Bingham.

O objetivo deste estudo foi avaliar as propriedades físico-químicas dos pós de tomate obtidos por *cast-tape drying*, *spray drying* e liofilização e seus comportamentos reológicos quando reidratados.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1 Preparo das amostras

Os pós de tomate foram produzidos por *cast-tape drying*, com e sem maltodextrina (CTDM e CTD, respectivamente), *spray drying* com maltodextrina (SDM) e liofilização (FD), de acordo com as metodologias descritas nos itens 4.2.1, 4.2.3 (4.2.3.1, 4.2.3.2, 4.2.3.3) do Capítulo 4. A maltodextrina foi adicionada no suco na proporção 1 g de sólidos secos do suco de tomate: 1 g de sólidos da maltodextrina.

5.2.1.1 Reidratação dos pós de tomate

Os pós foram reidratados com a adição de água destilada até concentrações de sólidos solúveis de 9% e 18%, as quais permitem classificá-los como purê de tomate (9%) e concentrado simples de tomate (18%), segundo a Resolução CNNPA n. 12, de 24 de julho de 1978 (BRASIL, 1978).

5.2.2 Caracterização dos pós de tomate

5.2.2.1 Tempo de dispersão

O tempo de dispersão foi determinado em um aparato experimental desenvolvido e adaptado por Dacanal (2005), baseado no esquema apresentado por Hoge Kamp e Schubert (2003). Ele consiste de um recipiente contendo 80 mL de água destilada, sobre o qual há uma lâmina deslizante presa por um elástico, na qual a amostra de pó é colocada. A liberação do elástico provoca o rápido deslocamento da lâmina, que causa a queda da amostra de pó na água destilada. Os testes foram realizados com a água na temperatura entre 27 e 29 °C, monitorando-se o tempo para imersão completa da camada de partículas.

5.2.2.2 Distribuição do tamanho da partícula

A distribuição do tamanho das partículas dos pós de tomate foi determinada por um analisador de tamanho de partículas por difração a laser (Malvern Mastersizer 2000, Malvern Instrument Ltd., UK). Etanol (99,5%) foi utilizado como meio para dispersão dos pós. O diâmetro médio de Brouckere (D[4,3]) foi determinado de acordo com a Equação 5.1.

$$D[4,3] = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^4}{\sum_{i=1}^n n_i d_i^3} \quad (5.1)$$

onde d_i é o diâmetro das partículas (mm) e n_i é o número de partículas. A distribuição do tamanho das partículas foi determinada em triplicata.

5.2.2.3 Massa específica aparente, massa específica real e porosidade

Uma massa de 5 g do pó de tomate foi vertida em uma proveta graduada (1 mL), a qual foi repetidamente batida sobre uma superfície reta até que diferenças desprezíveis de altura do leito entre as batidas sucessivas foram observadas (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2005; GOULA; ADAMOPOULOS, 2008). A massa específica aparente do leito de partículas foi calculada pela razão de massa e o volume de pó. Os experimentos foram realizados em triplicata na temperatura ambiente (25 ± 1 °C) e a massa específica aparente foi expressa por g cm^{-3} .

O volume absoluto de cada amostra de pó de tomate foi determinado usando um picnômetro de gás (Micromeritics, AccuPyc II 1340, EUA) hélio (99,995% pureza). Para determinar o volume das amostras pela medida da mudança de pressão do gás em relação ao volume calibrado. O volume foi medido em dez leituras. A massa específica real foi determinada pela razão da massa previamente determinada pelo volume absoluto e foi expresso em g cm^{-3} .

A porosidade do leito de partículas (ϵ) pode ser calculada segundo a Equação 5.2 (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 2005).

$$\epsilon = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p} \quad (5.2)$$

em que ρ_p é a massa específica real (g cm^{-3}) e ρ_b é a massa específica aparente (g cm^{-3}).

5.2.2.4 Solubilidade

A solubilidade (SOL) dos pós de tomate foi determinada pela adição de 1 g de amostra de pó em 100 mL de água destilada a 25 °C, de acordo com a metodologia proposta por Dacanal e Menegalli (2009), com algumas modificações. O teste consiste na determinação da porcentagem de material não solubilizado após 1 minuto de agitação. Após a agitação as amostras foram filtradas, em papel filtro, e o material retido foi seco em estufa a 105 °C, por 24 h. A solubilidade foi determinada de acordo com a Equação 5.3.

$$\text{SOL} = 100 - \left[\frac{m_2}{m_1(1 - X_u)} \times 100 \right] \quad (5.3)$$

em que m_1 é a massa inicial da amostra, m_2 é a massa de amostra remanescente no filtro e X_u é a umidade inicial da amostra analisada, em base úmida. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

5.2.3 Caracterização dos pós de tomate reidratados

5.2.3.1 Sólidos solúveis, umidade e atividade de água

A concentração de sólidos solúveis, umidade e atividade de água dos sucos e dos pós de tomate reidratados foram determinadas de acordo com a metodologia descrita no item 4.2.4 do Capítulo 4.

5.2.3.2 pH

As medidas de pH dos sucos e dos pós de tomate reidratados foram realizadas utilizando um potenciômetro digital da marca Quimis® (modelo Q400MT), previamente calibrado com soluções padrão de pH ácido (pH 4) e básico (pH 7). Os experimentos foram realizados em triplicata (AOAC, 1995).

5.2.3.3 Acidez titulável

As medidas de acidez foram determinadas pela titulação do suco e do pó de tomate reidratado (até concentrações de sólidos solúveis de 9 °Brix e 18 °Brix). A titulação foi realizada com solução de hidróxido de sódio (0,1 N) até a viragem do pH em 8,1 (AOAC, 1995). O pH foi monitorado com potenciômetro digital, de acordo com a metodologia descrita no item 5.2.3.2. A acidez titulável pode ser expressa em porcentagem de ácido cítrico, de acordo com a Equação 5.4.

$$AC = \frac{V \times N \times M_{eq}}{P} \quad (5.4)$$

em que AC é ácido cítrico (%), V é o volume de NaOH gasto na titulação (mL), N é a normalidade do NaOH (0,1 N), Meq miliequivalente do ácido, sendo 0,064 para o ácido cítrico e P é a massa da amostra de pó reidratado (g).

5.2.3.4 Cor

A cor foi determinada usando a escala CIELAB, de acordo com a metodologia descrita no item 4.2.5 do Capítulo 4. A diferença de cor (ΔE) foi determinada de acordo com a Equação 5.5.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (5.5)$$

onde ΔE é a variação da cor dos pós reidratados com relação ao suco de tomate e o subscrito “0” representa a cor original do suco.

5.2.3.5 *Microscopia óptica*

As amostras dos pós foram reidratadas (até concentração de sólidos solúveis de 5 °Brix) com água destilada, colocadas em lâminas, cobertas com lamínulas de vidro e observadas em um microscópio ótico Olympus (modelo Bx41, Gottingen, Alemanha), com aumentos de 10 x.

5.2.3.6 *Consistência de Bostwick*

A consistência de Bostwick é uma medida rápida, determinada pelo escoamento de uma quantidade estabelecida de material através de uma calha de aço inoxidável com fundo graduado. Essa análise foi realizada para o suco de tomate (com e sem maltodextrina) e para seu pó reidratado até 5, 9 e 18% de sólidos solúveis. Após o nivelamento do instrumento na bancada, 50 mL de amostra foram adicionados no compartimento do instrumento fechado por uma comporta. Quando a comporta foi aberta, o cronômetro foi acionado e o material deixado escoar sobre a calha por 30 segundos. Após esse tempo a leitura do deslocamento da amostra no instrumento foi efetuada diretamente na escala graduada (cm).

5.2.3.7 *Comportamento reológico dos pós de tomate reidratados*

O comportamento reológico do suco e dos pós de tomate reidratados foi determinado em reômetro (Thermo Scientific HAAKE MARS, Thermo Scientific Inc., Karlsruhe, Alemanha) de tensão controlada. Os pós de tomate reidratados a 9 °Brix e 18 °Brix foram submetidos à análise em duas temperaturas: i) temperatura próxima a ambiente (20 °C) e ii) temperatura que simula um aquecimento (70 °C). As temperaturas das amostras foram mantidas pela circulação de água no reômetro, proveniente de banho ultratermostático. As curvas de escoamento foram determinadas com auxílio de uma geometria cone-placa (diâmetro = 60 mm e ângulo 2 °). Para avaliar a existência de tixotropia as amostras dos sucos de tomate reconstituídos foram submetidas a três rampas de tensão de cisalhamento. A primeira e a terceira rampa foram submetidas a um aumento de tensão de cisalhamento e a segunda rampa à redução dessa tensão. A taxa de deformação utilizada foi de 0 a 300 s⁻¹. O modelo Herschel-Bulkley (Equação 5.6) foi ajustado aos dados experimentais de tensão de cisalhamento vs taxa de deformação.

$$\tau = \tau_0 + k_c(\dot{\gamma})^n \quad (5.6)$$

em que τ é a tensão de cisalhamento (Pa), τ_0 é a tensão de cisalhamento inicial (Pa), $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação (s^{-1}), k_c é o índice de consistência ($Pa\ s^n$) e n índice de comportamento ou de fluxo. O modelo Herschel-Bulkley compreende os modelos de Newton, de Bingham e da Lei da Potência e permite classificar os fluidos como newtonianos, plásticos de Bingham, pseudoplásticos e pseudoplásticos com tensão residual inicial e dilatantes. Se $\tau_0 = 0$ Pa e $n = 1$ o fluido apresenta comportamento Newtoniano; se $n = 1$ o fluido segue o comportamento de Bingham; se $\tau_0 = 0$ Pa o fluido pode apresentar comportamento pseudoplástico ($n < 1$) ou dilatante ($n > 1$); se o fluido apresentar tensão residual inicial ($\tau_0 \neq 0$ Pa) e $n < 1$ segue o comportamento de fluido pseudoplástico com tensão residual inicial.

5.2.3.8 Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada de acordo com a metodologia descrita no item 3.2.10 do Capítulo 3.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Caracterização dos pós de tomate

Na Tabela 5.1 estão apresentados os valores de tempo de dispersão e do diâmetro médio das partículas D[4,3] dos pós de tomate produzidos pelos diferentes processos de secagem.

Tabela 5.1 - Tempo de dispersão e diâmetro médio das partículas dos pós de tomate produzidos por diferentes processos de secagem.

Amostras	Tempo de dispersão (s)	Diâmetro médio D[4,3] (μm)
CTD	17,09±0,81 ^b	364,58±57,55 ^a
CTDM	19,76±1,90 ^b	318,51±28,72 ^b
FD	29,70±1,93 ^b	231,94±18,53 ^c
SDM	632,33±18,58 ^a	69,48±36,88 ^d

a-d Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey ($p < 0,10$).

Os tempos de dispersão dos pós de tomate produzidos por CTD, CTDM e FD foram significativamente iguais, porém menores que o observado para o pó obtido por spray-drying. Os baixos valores de

tempos de dispersão indicam que esses pós apresentam boas características de molhabilidade.

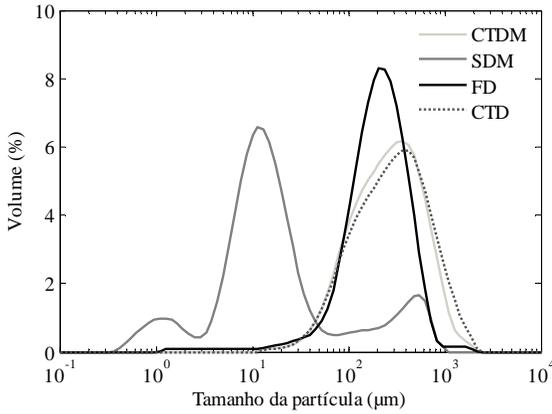
Os tempos de dispersão dos pós em água são influenciados pela composição, morfologia, tamanho e geometria das partículas, além da porosidade (HOGEKAMP; SCHUBERT, 2003; DACANAL; MENEGALLI, 2010; FORNY; MARABI; PALZER, 2011). Segundo HogeKamp e Schubert (2003), o tempo de dispersão é menor quanto maior o diâmetro e a porosidade das partículas, pois facilita a penetração da água em função da maior quantidade de espaços vazios. Por outro lado, pós com partículas pequenas possuem interstícios pequenos que prejudicam a penetração da água (VISSOTTO et al., 2006).

Os pós de tomate produzidos por CTD, CTDM e FD foram submetidos ao mesmo processo de moagem em moinho de facas, o qual resulta em pós com formatos irregulares (morfologias dos pós estão apresentadas na Figura 4.6 do Capítulo 4) e com partículas maiores quando comparadas às partículas resultantes do processo de secagem por *spray-drying*. De fato, o tempo de dispersão dos pós foi menor quanto maior o diâmetro médio ($D[4,3]$) (Tabela 5.1), enquanto que os maiores tempos de dispersão dos pós de tomate produzidos por SDM se devem ao menor tamanho das suas partículas ($D[4,3] = 69,48 \mu\text{m}$). A formação de aglomerados dos pós de tomate produzidos por SDM quando em contato com a água foi observada no presente estudo (imagem não apresentada). Castoldi et al. (2015) relataram tempos de dispersão de pós de tomate produzidos por CTD menores que os observados no presente estudo, sendo menores que 9 segundos.

As distribuições dos tamanhos das partículas dos pós de tomate obtidos pelos diferentes processos de secagem podem ser observadas na Figura 5.1. As distribuições de tamanho das partículas dos pós de tomate apresentaram amplitudes abrangentes. O pó produzido por SDM apresentou distribuição multimodal, sendo a faixa de tamanho da partícula de 0,12 a 954 μm . O tamanho das partículas de pós de tomate produzidos em *spray drying* depende do tamanho das gotículas atomizadas (tamanho do orifício do bico aspersor), das características físico-químicas e da vazão do produto alimentado. Em geral, o tamanho da partícula aumenta à medida que aumenta a concentração e a viscosidade do produto alimentado, e diminui com aumento do fluxo e da pressão do ar no bico aspersor (GOULA; ADAMOPOULOS; KAZAKIS, 2004). As partículas formadas em processos de atomização não são homogêneas e apresentam tamanhos variados (MASTERS, 1985). Tamanhos de partículas variados, como no caso da

distribuição multimodal, acarretam em maior compactação do pó no armazenamento, devido à ocupação dos espaços vazios presentes entre as partículas maiores, pelas partículas menores, ocupando menor volume (TONON; BRABET; HUBINGER, 2008).

Figura 5.1 - Distribuição do tamanho da partícula dos pós de tomate produzidos por diferentes processos de secagem.



Os pós de tomate obtidos por CTD, sem e com maltodextrina, e por FD, apresentaram comportamento monomodal. As faixas de tamanho para os pós de tomate foram de 13,18 a 2187 μm para o CTD, de 11,48 a 2187 μm para o CTDM e de 1,10 a 2187 μm FD. No processo de secagem por *cast-tape drying* e liofilização os pós sofrem a ação da moagem e, nesse caso, o tempo de moagem e a velocidade das facas utilizadas, bem como as características do produto que está sendo moído, influenciam a geometria e o tamanho das partículas (CASTOLDI et al., 2015).

Na literatura é possível encontrar diferentes tamanhos de partículas de alimentos em pó, devido aos diferentes métodos de produção e composição do produto. Castoldi et al. (2015) verificaram que os pós de tomate produzidos por RW apresentaram comportamento monomodal, com faixa de tamanho das partículas entre 1,25 a 2187 μm e diâmetro médio das partículas ($D_{[4,3]}$) de $204,70 \pm 10,50 \mu\text{m}$, valores similares aos encontrados neste estudo. Goula e Adamopoulos (2004) observaram que o aumento na concentração de sólidos do suco de tomate alimentado no *spray dryer* acarretou no aumento do tamanho da partícula dos pós. Para a concentração de 14% de sólidos, temperatura

do ar de entrada igual a 140 °C, vazão de ar de 22,75 m³ h⁻¹ e vazão de alimentação de suco igual a 800 L h⁻¹, o tamanho da partícula dos pós de tomate observado por esses autores foram em torno de 25 µm, menores que o observado no presente estudo.

Na Tabela 5.2 estão apresentados os valores de massa específica aparente, massa específica real e porosidade do leito das partículas dos pós de tomate produzidos pelos diferentes processos de secagem.

Tabela 5.2 - Massa específica aparente e real e porosidade dos pós de tomate produzidos por diferentes processos de secagem.

Amostras	Massa específica aparente (g cm ⁻³)	Massa específica real (g cm ⁻³)	Porosidade (%)
CTD	0,79±0,06 ^a	1,5418±0,0008 ^b	48
CTDM	0,77±0,06 ^a	1,5382±0,0013 ^c	50
FD	0,39±0,01 ^c	1,5740±0,0011 ^a	75
SDM	0,64±0,023 ^b	1,5185±0,0003 ^d	58

a-d Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey (p<0,10).

A massa específica aparente leva em consideração os espaços vazios entre as partículas de pó, o que acarreta em valores menores do que os observados para a massa específica real. Os pós de tomate produzidos no CTD, com e sem maltodextrina, apresentaram maiores massas específicas aparentes e menores valores de porosidade. Alimentos em pó que apresentam maior massa específica aparente e menor porosidade ocupam menor volume no armazenamento. Pós com essas características apresentam menores quantidades de ar entre as partículas, o que reduz a oxidação de alguns compostos durante o armazenamento (TONON; BRABET; HUBINGER, 2010).

Na literatura é possível encontrar diferentes valores de massa específica aparente de tomate em pó, devido às diferenças nos métodos de produção, nas condições de secagem empregadas e na composição do produto. Abul-Fadl e Ghanem (2011) verificaram massa específica aparente de 0,74 g cm⁻³ para pós de tomate obtidos por RW (suporte de vidro, temperatura da água aquecida de 90 °C e espessura de espalhamento da polpa entre 1,0 - 1,5 mm), valor similar ao encontrado nesse trabalho para o pó CTD. Goula, Adamopoulos e Kazakis (2004) observaram que o aumento da vazão de ar comprimido no atomizador resultou no aumento da massa específica aparente do leito (0,10 –

0,26 g cm⁻³) e da massa específica do leite compactado (0,12 – 0,35 g cm⁻³) de pós de tomate obtidos em diferentes condições de secagem por SDM. Em um estudo semelhante, Goula e Adamopoulos (2005) verificaram que o aumento da temperatura do ar de secagem resultou na redução da massa específica do pó (0,365 – 0,199 g cm⁻³) obtido por SDM modificado (ar de entrada seco em desumidificador).

Na Tabela 5.3 estão apresentados os valores de solubilidade dos pós de tomate produzidos pelos diferentes processos de secagem.

Tabela 5.3 - Solubilidade dos pós de tomate produzidos por diferentes processos de secagem.

Amostras	Solubilidade (%)
CTD	86,57±1,00 ^b
CTDM	96,06±1,87 ^a
FD	85,50±1,64 ^b
SDM	98,43±1,93 ^a

a-b Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey ($p < 0,10$).

O conhecimento da solubilidade dos alimentos em pó na água é importante, pois a sua dissolução (etapa do processo de reidratação) no meio líquido depende do quão solúvel é a partícula (FORNY; MARABI; PALZER, 2011). Como pode ser observado na Tabela 5.3, que os valores de solubilidade dos pós de tomate produzidos por CTDM e SDM foram significativamente maiores ($p \geq 0,1$) que os valores de solubilidade dos pós de tomate obtidos por CTD e FD. A maltodextrina adicionada ao suco seco por CTDM e SDM levou ao aumento da solubilidade dos pós em aproximadamente 10%. Cano-Chauca et al. (2005), em estudo sobre a influência de diferentes agentes carreadores na secagem de manga por *spray drying*, concluíram que a maltodextrina contribuiu para o aumento da solubilidade dos pós. Caparino et al. (2012) verificaram que a adição de maltodextrina aumentou a solubilidade de pós de manga produzidos por *spray drying* (solubilidade próxima a 95%). De forma geral, a solubilidade da maltodextrina é aproximadamente 95% e aumenta com aumento do número de dextrose equivalente (COUTINHO; CABELLO, 2008).

Na literatura são reportados alguns valores de solubilidade de pós de tomate. Castoldi et al. (2015) verificaram que a solubilidade dos pós de tomate produzidos por RW foi influenciada pela espessura de

espalhamento da polpa, sendo entre 90,54 - 94,76% (2 mm de espessura) e entre 87,11 - 89,31% (3 mm de espessura). Abul-Fadl e Ganem (2011) verificaram valores de solubilidade dos pós de tomate inferiores ao presente estudo.

5.3.2 Caracterização dos sucos de tomate (com e sem maltodextrina) e dos pós de tomate reidratados

A Tabela 5.4 apresenta os valores de sólidos solúveis, umidade, atividade de água, pH e acidez titulável dos sucos (com e sem maltodextrina) e dos pós de tomate reidratados até diferentes concentrações de sólidos solúveis (9 °Brix e 18 °Brix).

Os pós foram reidratados com a adição de água destilada até concentrações de sólidos solúveis de 9% e 18%, as quais permitiram classificá-los como purê de tomate e concentrado simples de tomate (BRASIL, 1978), respectivamente.

A atividade de água dos pós de tomate reidratados (9 °Brix e 18 °Brix) foram maiores que 0,973 e próximas às dos sucos de tomate (com e sem maltodextrina).

Tabela 5.4 - Sólidos solúveis, umidade, atividade de água, pH e acidez titulável dos sucos (com e sem maltodextrina) e dos pós de tomate reidratados até diferentes concentrações de sólidos solúveis.

Amostras (processo)	Sólidos solúveis (°Brix)	Umidade (g g⁻¹ b. s.)	a_w	pH	Acidez titulável (% AC)
Suco de tomate	4,1±0,2	17,67±0,43	0,996±0,001	4,40±0,07	0,31±0,01
Solução de suco de tomate + maltodextrina (CTDM e SDM)	10,8±0,5	8,09±0,28	0,985±0,001	4,43±0,01	0,33±0,01
Pó de tomate reidratado (CTD)	9,4±0,1 18,2±0,1	7,31±0,03 3,46±0,02	0,988±0,001 0,976±0,004	4,29±0,24 4,01±0,10	0,66±0,03 1,22±0,02
Pó de tomate reidratado (CTDM)	9,8±0,2 18,8±0,1	8,09±0,06 4,02±0,35	0,995±0,001 0,985±0,001	3,89±0,57 4,17±0,45	0,49±0,08 0,76±0,05
Pó de tomate reidratado (FD)	9,7±0,1 18,6±0,2	8,82±0,06 4,39±0,01	0,987±0,001 0,973±0,001	4,25±0,12 4,32±0,54	0,40±0,01 0,75±0,05
Pó de tomate reidratado (SDM)	9,7±0,1 18,5±0,1	7,00±0,17 3,44±0,02	0,998±0,001 0,990±0,001	3,86±0,40 4,09±0,12	0,89±0,01 1,49±0,04

Os valores de pH dos pós de tomate reidratados variaram entre 3,85 e 4,29, sendo ligeiramente inferiores aos dos sucos de tomate (com e sem maltodextrina). Porém, esses valores de pH estão dentro da faixa esperada para o tomate e para produtos derivados de tomate (LIU et al., 2010; ABUL-FADL; GHANEM, 2011; BARBANA; EL-OMRI, 2009). A acidez titulável de todos os pós de tomate reidratados aumenta em função do aumento da concentração de sólidos solúveis. A acidez titulável do suco de tomate da variedade Italiano está dentro dos dados relatados na literatura 0,272 – 0,410% ácido cítrico (ROSA et al., 2011).

Na Tabela 5.5 estão apresentados os parâmetros de cor dos sucos de tomate, com e sem maltodextrina, utilizados como matéria-prima para os diferentes processos de secagem.

Tabela 5.5 - Parâmetros de cor dos sucos de tomate (com e sem maltodextrina).

Sucos	L*	a*	b*
Tomate	46,07±0,42 ^b	39,28±2,33 ^a	34,04±0,94 ^a
Tomate com maltodextrina	61,97±0,82 ^a	26,05±1,62 ^b	23,67±1,93 ^b

a-b Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey (p<0,10).

Na Tabela 5.6 apresentam-se os parâmetros de cor dos pós de tomate reidratados. A comparação estatística das médias foi realizada para cada concentração de sólidos solúveis dos pós de tomate reidratados, a fim de verificar a influência do processo de secagem dos pós (Tabela 5.6).

A análise global de diferença de cor (ΔE) entre os pós de tomate reidratados e o suco de tomate é mais adequada e evita equívocos que podem ser realizados quando os parâmetros são avaliados individualmente. Os valores de ΔE para os produtos de tomate reidratados sem maltodextrina (CTD e FD) foram menores que os observados para os produtos com maltodextrina (CTDM e SDM), o que indica maior proximidade de cor com o suco original. Os valores de ΔE para os pós CTD e FD (reidratados a 9 °Brix e 18 °Brix) foram semelhantes. De outra forma, os valores de ΔE para o pó CTDM reidratado foram superiores aos valores de ΔE para os pós de tomate reidratados SDM, em todas as concentrações de sólidos solúveis investigadas. No processo CTDM o mix de suco de tomate com

maltodextrina permanece em contato direto com o suporte aquecido por mais tempo (Figura 4.2 do Capítulo 4) e as reações de oxidação no produto são favorecidas o que pode ter alterado sua coloração, quando reidratado.

Tabela 5.6 - Parâmetros de cor dos pós de tomate reidratados até diferentes concentrações de sólidos solúveis.

Sólidos solúveis (°Brix)	Processo	L*	a*	b*	$\Delta E_{\text{suco de tomate}}$	$\Delta E_{\text{suco de tomate com maltodextrina}}$
9	CTD	37,17±0,31 ^b	38,72±0,44 ^b	44,42±0,34 ^b	13,69±0,09	
	CTDM	39,25±0,50 ^b	36,60±0,36 ^c	49,33±0,65 ^a	-	35,87±0,27
	FD	34,26±0,50 ^c	40,31±0,44 ^a	36,90±0,97 ^d	12,23±0,40	-
	SDM	45,90±3,03 ^a	25,49±1,51 ^d	39,95±3,59 ^c	-	23,06±3,85
18	CTD	34,25±1,26 ^b	36,82±0,04 ^c	41,31±0,20 ^a	14,12±0,97	-
	CTDM	34,04±0,05 ^b	39,36±0,18 ^a	41,53±0,16 ^a	-	35,73±0,11
	FD	31,78±0,05 ^c	38,99±0,15 ^b	35,81±0,43 ^b	14,42±0,21	-
	SDM	39,74±0,39 ^a	35,08±0,32 ^d	41,21±0,44 ^a	-	29,73±0,10

a-d Médias seguidas das mesmas letras sobrescritas na coluna indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey ($p < 0,10$).

No Quadro 5.1 estão apresentadas as imagens dos sucos e dos pós de tomate reconstituídos até diferentes concentrações de sólidos solúveis.

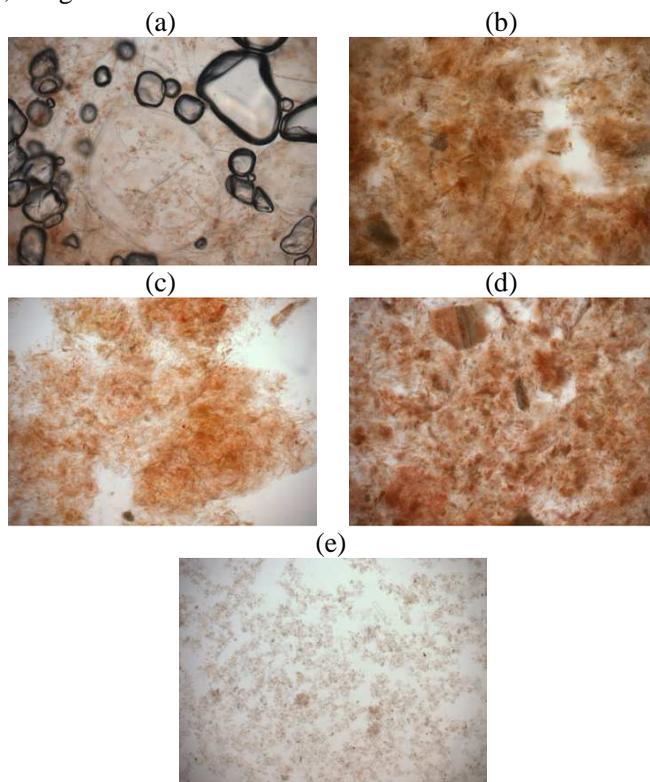
Quadro 5.1 - Imagens dos sucos e dos pós de tomate reidratados até diferentes concentrações de sólidos solúveis.

(a) Suco de tomate (CTD e FD)		(b) Suco de tomate com maltodextrina (CTDM e SDM)	
			
(c) CTD	(d) CTDM	(e) FD	(f) SDM
9 °Brix			
			
18 °Brix			
			

Visualmente pode-se afirmar que os pós de tomate reidratados apresentaram coloração típica de produtos derivados de tomate, como sucos, polpas e extratos de tomate. Esse resultado é importante, pois o aspecto visual é um fator preponderante para a escolha do produto pelo consumidor. O aumento da concentração de sólidos solúveis dos pós de tomate reidratados acarretou em colorações mais vermelhas para todos os pós, enquanto as polpas reconstituídas que contêm maltodextrina em sua composição apresentaram coloração mais clara que os demais.

A Figura 5.2 apresenta as microscopias registradas do suco de tomate e dos pós de tomate reidratados.

Figura 5.2 - Microscopia óptica dos sucos de tomate: (a) *in natura*; e dos pós reidratados (5 °Brix) a partir dos pós produzidos por diferentes processos de secagem: *cast-tape drying* (b) sem maltodextrina (CTD) e (c) com maltodextrina (CTDM); (d) liofilização (FD) e (e) *spray drying* (SDM); imagens com aumento de 10x.



Como relatado no item 4.3.4.2 do Capítulo 4, a matriz do suco de tomate é formada por cromoplastos, o qual contém os pigmentos carotenoides (licopeno) disperso em água (ROSSO, 1968; SHARMA; LE MAGUER, 1996; KUBO; AUGUSTO; CRISTIANINI, 2013). Como pode ser observado no suco (Figura 5.2a) e nos pós de tomate reidratados (CTD – Figura 5.2b e FD – Figura 5.2d), o licopeno encontra-se disperso na água, formando uma matriz de coloração vermelha. O aspecto da solução reidratada CTDM foi diferente (Figura 5.2c), pois o licopeno ficou disperso na água juntamente com a maltodextrina, com coloração vermelha mais clara. Nos pós SDM

reidratados (Figura 5.2e) a presença do licopeno foi menos evidente, devido à presença da maltodextrina, que pode ter encapsulado o licopeno.

5.3.3 Comportamento reológico dos pós de tomate reidratados

Na Tabela 5.7 estão apresentados os dados de consistência de *Bostwick* dos pós de tomate reidratados até diferentes concentrações de sólidos solúveis.

Tabela 5.7 – Consistência de *Bostwick* dos pós de tomate reidratados até diferentes concentrações de sólidos solúveis.

Amostras (processo)	Consistência de <i>Bostwick</i> (cm)	
Suco de tomate (CTD e FD)	3,17±0,29	
Suco de tomate (CTDM e SDM)	8,00±0,87	
	9 °Brix	18 °Brix
Pó reidratado (CTD)	10,20±5,80 ^{cB}	0,13±0,06 ^{dC}
Pó reidratado (CTDM)	18,87±0,32 ^{aA}	6,60±0,36 ^{bB}
Pó reidratado (FD)	16,17±0,29 ^{bB}	0,80±0,10 ^{cC}
Pó reidratado (SDM)	ND	21,47±0,06 ^a

ND – não foi possível determinar: consistência de *Bostwick* >24 cm; ^{a-d} Médias seguidas das mesmas letras minúsculas sobrescritas na coluna e letras maiúsculas sobrescritas na linha indicam que não há diferença estatística pelo teste de Tuckey ($p < 0,10$).

A consistência de *Bostwick* mede o escoamento de uma solução em um plano, em um determinado tempo (TEHRANI; GHANDI, 2007). A distância de escoamento do suco adicionado de maltodextrina foi maior (2,5 vezes superior) em relação ao suco sem maltodextrina (Tabela 5.7), o que indica que a adição da maltodextrina reduziu a consistência da suspensão. Esse comportamento também pode ser verificado para os pós de tomate reidratados. O pó reidratado SDM é o que apresenta o maior valor de distância de escoamento, para todas as concentrações de sólidos solúveis investigadas, seguido do pó reidratado CTDM. De outra forma, o pó reidratado CTD (sem maltodextrina) apresentou os menores valores de distância de escoamento, em todas as concentrações de sólidos solúveis investigadas, o que indica ser a

solução mais consistente em relação aos demais pós, seguida do pó reidratado FD.

Como esperado, o aumento da concentração de sólidos solúveis em todos os pós de tomate reidratados reduziu o valor da distância de escoamento da solução, indicando que na concentração maior a solução foi mais consistente.

A consistência de *Bostwick* é usada pela indústria de processamento de tomate como uma análise rápida, simples e de baixo custo (MARSH; BUBLERT; LEONARD, 1980; TEHRANI; GHANDI, 2007). No entanto, o comportamento reológico dos pós também foi determinado por reometria. Os pós de tomate reconstituídos até 9 °Brix e 18 °Brix foram submetidos a um aumento de tensão de cisalhamento (subida 1), seguido por uma redução na tensão (descida) e, posteriormente, uma nova rampa crescente (subida 2) de tensão cisalhamento (dados não apresentados), a fim de verificar a existência de tixotropia no sistema. O suco de tomate e os pós de tomate reidratados apresentaram comportamento tixotrópico. A característica desse tipo de fluido é que a viscosidade aparente diminui à medida que a taxa de deformação e o tempo de cisalhamento aumentam, devido à orientação das moléculas na direção do escoamento e à quebra de agregados, que tornam a resistência ao movimento cada vez menor (FELLOWS, 2000; CHEN; MUJUMDAR, 2008). Em todos os casos o último ciclo de cisalhamento (subida 2) coincidiu com o ciclo anterior (descida), indicando que a tixotropia do sistema foi eliminada após a primeira rampa de tensão de cisalhamento (dados não apresentados).

Na Figura 5.3 (a e b) estão apresentadas as curvas de escoamento e da viscosidade aparente em função da taxa de deformação (subidas 2) do suco de tomate de 4,1 °Brix submetido às temperaturas de 20 e 70 °C. Na Tabela 5.8 estão apresentados os valores dos parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley que foi ajustado aos dados da curva de escoamento. O modelo Herschel-Bulkley se ajustou bem aos dados experimentais ($R^2 > 0,90$ e $RMSE < 0,50$).

Figura 5.3 – (a) Curvas de escoamento e (b) viscosidade aparente em função da taxa de deformação do suco de tomate submetido às temperaturas de (□) 20 °C e (○) 70 °C. Linhas contínuas cinza e preta são os dados obtidos pelo ajuste do modelo de Herschel-Bulkley aos dados experimentais de tensão de cisalhamento vs. taxa de deformação.

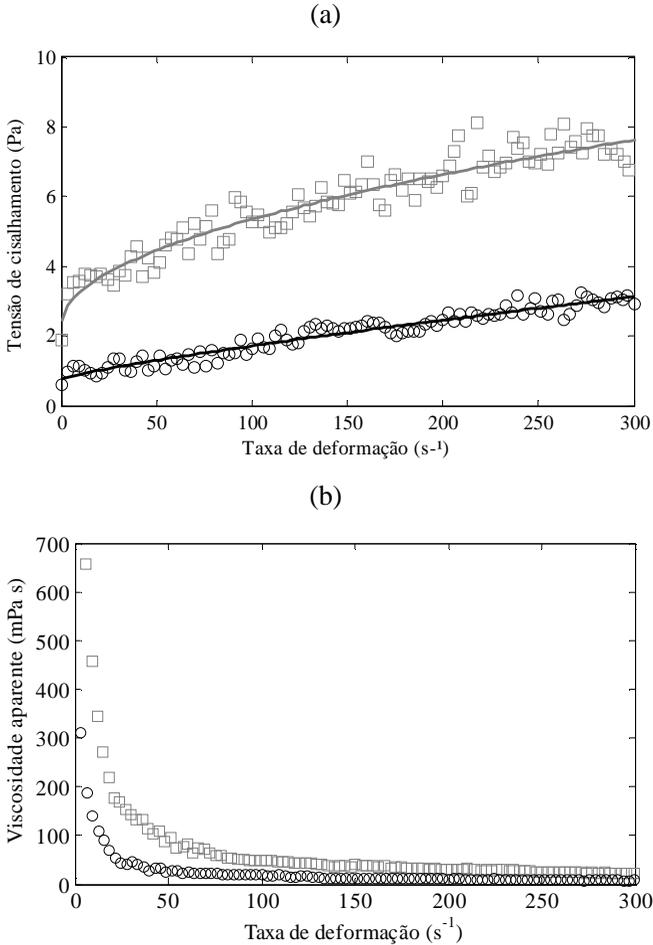


Tabela 5.8 - Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley ajustado aos dados das curvas de escoamento para o suco de tomate nas temperaturas de 20 e 70 °C.

Amostras/temperatura (°C)	Parâmetros				
	τ_0 (Pa)	k_c (Pa s ⁿ)	n	R ²	RMSE
Suco de tomate (20 °C)	2,352	0,283	0,512	0,900	0,430
Suco de tomate (70 °C)	0,020	0,773	0,837	0,927	0,1885

A viscosidade do tomate é altamente dependente das suas substâncias pécticas, nas quais outras partículas estão fisicamente aprisionadas (GOULD, 1992). Como pode ser visto na Tabela 5.8, o suco a 20 °C apresentou comportamento de fluido pseudoplástico com tensão de escoamento inicial. Isso sugere que o suco possui uma estrutura de rede formada por substâncias pécticas e que necessita de maior tensão para romper essa estrutura (SHARMA; LE MAGER, 1996). O suco na temperatura de 70 °C apresentou comportamento de fluido pseudoplástico com tensão residual próxima de zero, o que indica que nessa temperatura a estrutura do suco foi alterada. Esse efeito é devido às alterações nas cadeias de pectina e de outros carboidratos de cadeia longa pela ação do calor, resultando em cadeias menores. Com o aumento da taxa de deformação ocorreu redução na viscosidade aparente do suco de tomate, em ambas as temperaturas (Figura 5.3b). Nas altas taxas de deformação, a viscosidade aparente tendeu a um valor estável, confirmando o comportamento pseudoplástico do suco de tomate.

Na Figura 5.4 estão apresentadas as curvas de escoamento e na Figura 5.5 as curvas da viscosidade aparente em função da taxa de deformação (subida 2) dos pós de tomate reidratados até 9 °Brix e 18 °Brix e submetidos às temperaturas de 20 e 70 °C. As curvas de escoamento apresentadas são representativas dos comportamentos observados nas triplicatas.

Na Tabela 5.9 estão apresentadas as faixas de valores dos parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley ajustado aos dados de cada curva de escoamento (triplicata), obtidas para os pós de tomate reidratados até 9 e 18 °Brix, nas temperaturas de 20 e 70 °C. O modelo de Herschel-Bulkley apresentou bom ajuste aos dados experimentais, com valores de R² próximos a 1 (R² > 0,9) e baixos valores do erro médio quadrático.

Figura 5.4 – Curvas de escoamento dos pós de tomate reidratados: até 9% de sólidos solúveis (a) temperatura da polpa de 20 °C e (b) temperatura da polpa de 70 °C; até 18% de sólidos solúveis (c) temperatura da polpa de 20 °C e (d) temperatura da polpa de 70 °C a partir dos pós de tomate produzidos por: (◇) CTD, (×) CTDM, (□) FD e (○) SDM. Linhas cinzas são os dados obtidos pelo ajuste do modelo de Herschel-Bulkley aos dados experimentais de tensão de cisalhamento vs. taxa de deformação.

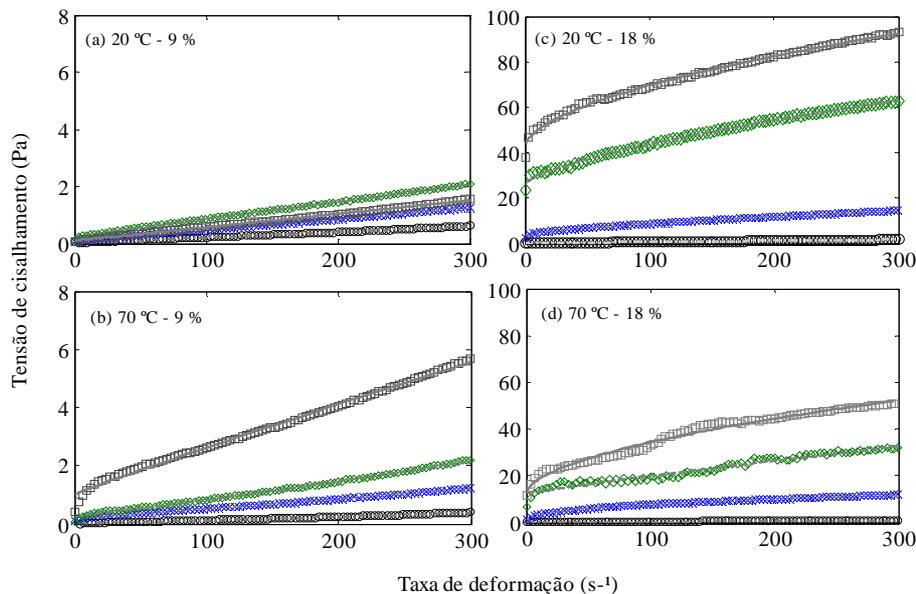


Figura 5.5 – Curvas da viscosidade aparente em função da taxa de deformação dos pós de tomate reidratados: até 9% de sólidos solúveis (a) temperatura da polpa de 20 °C e (b) temperatura da polpa de 70 °C; até 18% de sólidos solúveis (c) temperatura da polpa de 20 °C e (d) temperatura da polpa de 70 °C a partir dos pós de tomate produzidos por: (◇) CTD, (×) CTDM, (□) FD e (○) SDM.

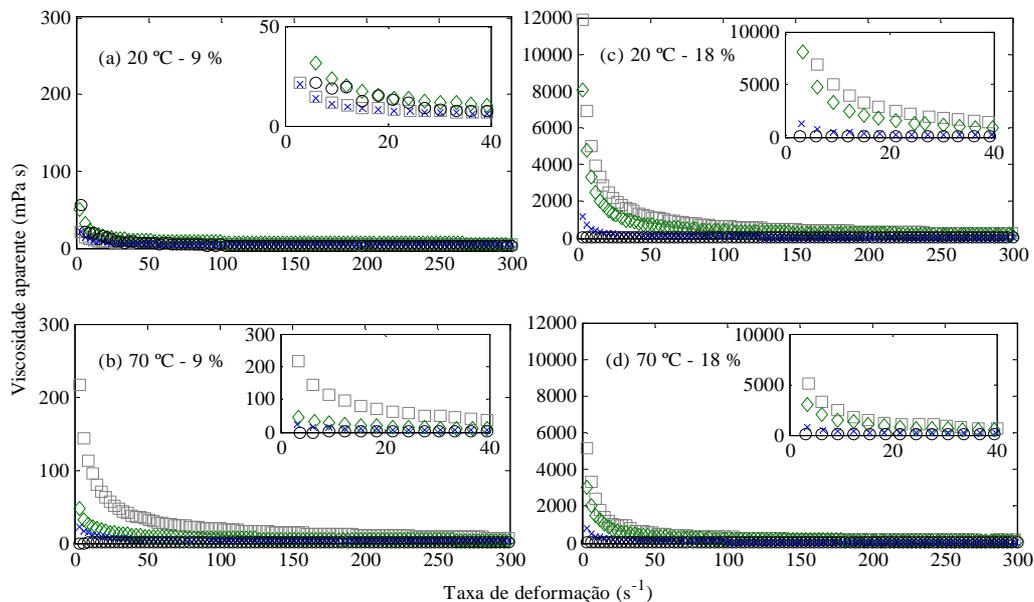


Tabela 5.9 - Faixa de valores dos parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley ajustado aos dados da triplicata das curvas de tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento para o suco de tomate reconstituído até 9 e 18 °Brix nas temperaturas de 20 e 70 °C.

Processos	Sólidos solúveis (°Brix)	T (°C)	Parâmetros				
			τ_0 (Pa)	k_c (Pa s ⁿ)	n	R ²	RMSE
CTD	9	20	0,139-0,225	0,009-0,008	0,912-0,974	0,976-0,999	0,016-0,074
		70	0,227-0,276	0,002-0,003	1,128-1,141	0,996-0,997	0,026-0,034
	18	20	23,606-26,312	0,677-0,686	0,696-0,759	0,992-0,996	0,605-0,824
		70	12,360-14,943	0,044-0,121	0,898-1,075	0,929-0,957	1,248-1,681
CTDM	9	20	0,086-0,102	0,004-0,005	0,975-0,983	0,999-0,999	0,010-0,011
		70	0,125-0,200	0,003-0,009	0,891-1,039	0,996-0,998	0,011-0,020
	18	20	3,312-3,673	0,204-0,282	0,642-0,708	0,998-0,999	0,111-0,131
		70	0,661-1,008	0,874-0,908	0,433-0,436	0,998-0,999	0,097-0,109
SDM	9	20	0,038-0,042	0,001-0,433	1,067-1,075	0,997-0,999	0,009-0,005
		70	0,001-0,029	0,001-0,002	1,021-1,035	0,956-0,992	0,001-0,002
	18	20	0,131-0,149	0,008-0,009	0,905-0,934	0,999-0,999	0,009-0,011
		70	0,086-0,103	0,001-0,005	0,922-1,021	0,998-0,999	0,005-0,006
FD	9	20	0,097-0,114	0,004-0,004	1,016-1,027	0,998-0,999	0,015-0,017
		70	0,856-1,013	0,009-0,020	0,950-1,064	0,994-0,997	0,085-0,100
	18	20	33,027-42,208	1,790-1,850	0,551-0,595	0,995-0,997	0,705-0,930
		70	12,106-18,240	0,486-1,868	0,538-0,726	0,923-0,978	1,480-2,408

Os valores de índice de consistência (k_c), de modo geral, reduziram com o aumento da temperatura de 20 para 70 °C, para todos os pós de tomate reidratados (comparados entre a mesma concentração de sólidos solúveis). Abu-Jdayil et al. (2004) avaliaram o efeito de diferentes temperaturas (10 - 50 °C) no comportamento reológico de pasta de tomate com 25% (b. u.). Esses autores verificaram que o aumento da temperatura reduz os valores do índice de consistência (1,986 Pa sⁿ - 10 °C para 0,462 Pa sⁿ - 50 °C) e da tensão de cisalhamento inicial (105,4 Pa - 10 °C para 98,1 Pa - 50 °C). Goula e Adamopoulos (2008) estudaram o comportamento reológico de pós de tomate atomizados (variáveis de processo: temperatura do ar de secagem de 130, 140 e 150 °C; maltodextrina com diferentes concentrações de dextrose equivalente: 21, 12 e 6 DE; e diferentes razões de maltodextrina: 4:1, 1:1 e 1:4 (g de maltodextrina:g de sólidos secos)). Os pós foram reidratados até 14% de sólidos secos e avaliados a 25, 35, 50 e 60 °C. Esses autores reportaram que a viscosidade da polpa de tomate diminui com o aumento da temperatura em todos os pós de tomate reidratados, devido às alterações das cadeias de pectinas pela ação do calor, quando submetidas a temperaturas maiores. Todos os pós de tomate reidratados apresentaram comportamento de Bingham, com tensão inicial de escoamento.

O acréscimo na concentração de sólidos solúveis de 9 °Brix para 18 °Brix aumentou o valor do índice de consistência para todos os pós de tomate reidratados (comparados na mesma temperatura). Abu-Jdayil et al. (2004) estudaram o comportamento reológico de polpa de tomate e dos pós de tomate atomizados, reidratados em diferentes concentrações de sólidos de 5,7; 6,92; 9,11; 13,36 e 25%, à temperatura de 25 °C. Esses autores relataram que o acréscimo na concentração de sólidos aumentou o índice de consistência dos pós de tomate reidratados de 0,01 Pa sⁿ (5,7% b. u.) para 0,022 Pa sⁿ (25% b. u.). Os pós de tomate reidratados com 5,57 e 6,92% apresentaram valores de tensão residual próximas de zero. Nas demais concentrações esses valores de σ_0 foram maiores (fluido plástico de Bingham).

Barbana e El-Omri (2009) estudaram o comportamento reológico de pós de tomate liofilizados reidratados. Os pós de tomate liofilizados foram reidratados até 9,7; 12,9; 20,5 e 26,8% e a tensão de cisalhamento e viscosidade aparente foram medidas a 20, 30, 40, 50 e 60 °C, em taxas de cisalhamento variando de 0 a 1291 s⁻¹. Esses autores relataram que os pós de tomate reidratados apresentaram comportamento de fluido pseudoplástico em todas as concentrações e temperaturas avaliadas. Os valores do índice de consistência reduziram

com o acréscimo da temperatura, e aumentaram com o acréscimo das concentrações de sólidos solúveis, para todas as amostras reidratadas. O pó reidratado até 9,7% de sólidos solúveis apresentou k_c de 2,17 Pa sⁿ (20 °C) e 0,18 Pa sⁿ (60 °C), enquanto para os pós de tomate reidratados até 20,5% de sólidos solúveis os valores de k_c foram de 14,08 Pa sⁿ (20 °C) e 7,16 Pa sⁿ (60 °C).

Os pós de tomate produzidos por SDM e reidratados, com 9 °Brix, submetidos às temperaturas de 20 e 70 °C, e os pós produzidos por FD (9 °Brix a 20 °C) apresentaram baixos valores de tensão de escoamento inicial ($\tau_0 < 0,097$) e índices de comportamento próximos a 1, característicos de fluido plástico de Bingham. Goula e Adamopoulos (2008) também observaram esse comportamento para pós de tomate atomizados, como mencionado anteriormente. O pó reidratado CTD 9 °Brix, a 20 °C, apresentou comportamento de fluido dilatante ($n > 1$).

Os demais pós de tomate reidratados apresentam valores de índice de comportamento menores que 1 ($n < 1$) e de tensão de escoamento inicial maiores que 0, sendo assim classificados como fluidos pseudoplásticos com tensão residual. O comportamento não Newtoniano dos pós de tomate pode ser atribuído à presença de material de elevado peso molecular, tais como pectinas (ABU-JDAYIL et al., 2004; TIZIANI; VOLD, 2005; BARBANA; EL-OMRI, 2009). O comportamento pseudoplástico desses pós de tomate reidratados pode ser confirmado ao observar a Figura 5.5, em que o aumento da taxa de deformação reduz a viscosidade aparente, sendo que nas altas taxas de deformação a viscosidade aparente tendeu à estabilidade.

De forma geral, os valores de tensão de escoamento inicial e de índice de consistência dos produtos reidratados a partir dos pós CTDM e SDM são menores do que dos produtos reidratados a partir dos pós FD e CTD. De fato, a maltodextrina reduz a viscosidade dos pós de tomate reidratados, o que está de acordo com os dados observados na análise de consistência de *Bostwick*. Goula e Adamopoulos (2008) também verificaram que os pós com maltodextrina após reidratação (1 g de maltodextrina: 1 g de sólidos secos de polpa) apresentam valores de tensão de escoamento inicial e índice de consistência ($\cong 16$ Pa e $\cong 0,13$ Pa s, respectivamente) menores do que os pós sem maltodextrina ($\cong 18$ Pa e $\cong 0,14$ Pa sⁿ, respectivamente), à temperatura de 25 °C. A baixa viscosidade de soluções de maltodextrina foi reportada por Grabowski, Truong e Daubert (2008) ao reconstituir o pó de maltodextrina com água até 18% de sólidos secos. O comportamento

reológico dessa solução foi avaliado em diferentes temperaturas (25, 75 e 95 °C) e verificado que essa solução apresentou comportamento de fluido Newtoniano com viscosidades menores que 0,04 Pa sⁿ.

Na literatura foram encontrados poucos estudos sobre o comportamento reológico de pós de tomate reidratados e sobre os parâmetros que influenciam a sua viscosidade. (ABU-JDAYIL et al., 2004; GOULA; ADAMOPOULOS, 2008; BARBANA; EL-OMRI, 2009). Os resultados reportados apresentam grande variação entre os dados.

5.4 CONCLUSÃO

Os pós de tomate produzidos por *cast-tape drying*, com e sem maltodextrina, apresentam os menores valores de tempo de dispersão, indicando boas propriedades de instantâneização e menores valores de porosidade de leito, implicando em menor presença de oxigênio nos espaços vazios. A adição da maltodextrina ao suco de tomate submetido à *cast-tape drying* aumenta a solubilidade dos pós. Essas propriedades do pó com maltodextrina corroboram com os dados apresentados no Capítulo 4, que indicam que o uso desse agente carreador no processo de secagem por *cast-tape drying*. No entanto, a cor da polpa reconstituída é mais clara que a observada para produtos sem maltodextrina. O pó atomizado é mais solúvel em água, porém o tempo de dispersão é maior que o observado para os demais pós, o que não é desejável.

De forma geral, as polpas reconstituídas (9 e 18 °Brix) se comportam como fluidos pseudoplásticos, com tensão de cisalhamento residual característica de produtos derivados de tomate. Como esperado, o índice de consistência aumenta com o aumento na concentração de sólidos solúveis das polpas reconstituídas e reduz com o aumento da temperatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-JDAYIL, B.; BANAT, F.; JUMAH, R.; AL-ASHEH, S.; HAMMAD, S. A comparative study of rheological characteristics of tomato paste and tomato powder solutions. **International Journal of Food Properties**, v. 7, n. 3, p. 483-497, 2004.

ABUL-FADL, M. M.; GHANEM, T. H. Effect of Refractance Window (RW) drying method on quality criteria of produced tomato powder as compared to the convection drying method. **World Applied Science Journal**, v. 15, n. 7, p. 93-96, 2011.

AOAC. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - Official Methods of Analysis. 16th. Washington, DC, 1995.

BARBANA, C.; EL-OMRI, A. Viscometric behavior of reconstituted tomato concentrate. **Food Bioprocess Technologies**, v. 5, p. 209-215, 2009.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; ORTEGA-RIVAS, E.; JULIANO, P.; YAN, H. *Food Powders - Physical Properties, Processing, and Functionality*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2005.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução nº. 12**, Brasília, 1978.

CANO-CHAUCA, M.; STRINGHETA, P. C.; RAMOS, A. M.; CALVIDAL, J. Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 5, n. 4, p. 420-428, 2005.

CAPARINO, O. A.; TANG, J.; NINDO, C. I.; SABLANI, S. S.; POWERS, J. R.; FELLMAN, J. K. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (*Philippine 'Carabao'* var.) powder. **Journal of Food Engineering**, v. 11, p. 135-148, 2012.

CASTOLDI, M.; ZOTARELLI, M. F.; DURIGON A.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Production of tomato powder by refractance window drying. **Drying Technology**, v. 33, n. 12, p. 1463-1473, 2015.

CHEN, X. D.; ÖZKAN, N. Stickiness, functionality, and microstructure of food powders. **Drying Technology**, v. 25, p. 969-979, 2007.

CHEN, X. D., MUJUMDAR, A. S. *Drying Technologies in Food Processing*. 1th. Blackwell Publishing Ltda, 2008.

COUTINHO, A. P. C.; CABELLO, C. Características estruturais e físico-químicas de maltodextrinas de mandioca e batata-doce. **Revista Energia na Agricultura**, v. 23, n. 3, p. 16-32, 2008

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.

DACANAL, G. C. Estudo da granulação de suco de acerola desidratado em leito fluidizado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2005.

DACANAL, G. C.; MENEGALLI, F. C. Experimental study and optimization of the agglomeration of acerola powder in a conical fluid bed. **Powder Technology**, v. 188, n. 3, p. 187-194, 2009.

DACANAL, G.C.; MENEGALLI, F.C. Selection of operational parameters for the production of instant soy protein isolate by pulsed bed agglomeration. **Power Technology**, v. 203, n. 3, p. 565–573, 2010.

FELLOWS, P. *Food Processing technology principles and practice*. 2th, CRC Press LLC, Boca Raton – USA, 2000.

FORNY, L.; MARABI, A.; PALZER, S. Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders. **Powder Technology**, v. 206, p. 72-78, 2011.

GOULD, W. A. *Tomato production, processing and technology* (3th), CTI Publishers, Baltimore, MD, p. 107-108, 1992.

GOULA, M. A.; ADAMOPOULOS, K. G. Spray drying of tomato pulp: Effect of feed concentration. **Drying Technology**, v. 22, n. 10, p. 2309-2330, 2004.

GOULA, A. M.; ADAMOPOULOS, K. G.; KAZAKIS, N. A. Influence of spray drying conditions on tomato powder properties. **Drying Technology**, v. 22, n. 5, p. 1129-1151, 2004.

GOULA, A. M.; ADAMOPOULOS, K. G. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 1, p. 35-42, 2005b.

GOULA, M. A.; ADAMOPOULOS, K. G. Effect of maltodextrin addition during spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. Powder properties. **Drying Technology**, v. 26, p. 726-737, 2008.

GRABOWSKI, J.A.; TRUONG, V.D.; DAUBERT, C.R. Nutritional and rheological characterization of spray dried sweet potato powder. **LWT – Food Science and Technology**, v. 41, p. 206-216, 2008.

HOGEKAMP, S.; SCHUBERT, H. Rehydration of food powders. **Food Science and Technology International**, v. 3, n. 9, p. 223-235, 2003.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Métodos físico-químicos para análise de alimentos. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1 ed. Digital.

KUBO, M. T. K.; AUGUSTO, P. E. D.; CRISTIANINI, M. Effect of high pressure homogenization (HPH) on the physical stability of tomato juice. **Food Research International**, v. 51, p. 170-179, 2013.

LIU, F.; CAO, X.; WANG, H.; LIAO, X. Changes of tomato powder qualities during storage. **Powder Technology**, v. 204, p. 159-166, 2010.

MARSH, G. L.; BUBLERT, J. E.; LEONARD, S. J. Effect of composition upon Bostwick consistency of tomato concentrate. **Journal Food Science**, v. 45, n. 3, p. 703-706, 1980.

MASTERS, K. *Spray Drying Handbook*. New York: John Wiley & Sons, 1985.

ROSA, C. L. S.; SOARES, A. G.; FREITAS, D. D. G. C.; ROCHA, M. C.; FERREIRA, J. C. S.; GODOY, R. L. O. Caracterização físico-química, nutricional e instrumental de quarto acessos de tomate Italiano (*Lycopersicon esculentum* Mill) do tipo “Heirloom” produzido sob manejo orgânico para elaboração de polpa concentrada. **Alimentos e Nutrição**, v. 22, n. 4, p. 649-656, 2011.

ROSSO, S. W. The ultrastructure of chromoplast development in red tomatoes. **Journal of Ultrastructure Research**, v. 25, p. 307–322, 1968.

SHARMA, S. K.; LE MAGUER, M. Kinetics of lycopene degradation in tomato pulp solids under different processing and storage conditions. **Food Research International**, v. 29, p. 309 - 315, 1996.

TEHRANI, M. M.; GHANDI, A. Modification of Bostwick method to determine tomato concentrate consistency, **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 1483-1486, 2007.

TONON, R. V.; BRABET, C.; HUBINGER, M. D. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. **Journal of Food Engineering**, v. 88, n. 3, p. 411-418, 2008.

TONON, R. V.; BRABET, C.; HUBINGER, M. D. Anthocyanin stability and antioxidant activity of spray-dried açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice produced with different carrier agents. **Food Research International**, v. 43, p. 907-914, 2010.

VISSOTTO, F. Z.; MONTENEGRO, F. M.; SANTOS, J. M.; OLIVEIRA, S. J. R. Avaliação da influência dos processos de lecitinização e de aglomeração nas propriedades físicas de achocolatado em pó. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 3, p. 666-671, 2006.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais conclusões do estudo são destacadas a seguir:

- A produção de tomate em pó desidratado por *cast-tape drying* é uma alternativa com possibilidades de aplicação industrial, tendo em vista os tempos reduzidos de processo e a alta capacidade evaporativa do sistema.

- A convecção forçada, com uso simultâneo de exaustão e ventilação, contribui para a redução do tempo de secagem, aumentando a taxa de secagem. Sua presença é imprescindível em equipamentos industriais. No entanto, a velocidade do ar de secagem deve ser investigada, a fim de evitar formação de uma camada impermeável no produto a ser seco.

- O uso do vapor como fonte de aquecimento do suporte é recomendado pela facilidade de controle da temperatura e baixo custo de produção industrial. Seu uso simplifica o projeto de construção do equipamento.

- O tipo de suporte não influencia as taxas de secagem e a capacidade evaporativa do processo. O filme teflonado é uma alternativa ao uso do *Mylar* para secagem de alimentos pegajosos.

- Apesar de reduzir a taxa de secagem do *cast-tape drying*, a maltodextrina adicionada no suco de tomate reduz a pegajosidade dos pós, facilitando remoção dos flocos secos da superfície do suporte. Além disso, seu uso aumenta a estabilidade do pó durante o armazenamento e reduz o tempo de dispersão em água.

- O pó de tomate obtido por *spray drying* apresenta facilidade de aglomeração e aderência das partículas na parede do secador, estrutura esférica (em vez de flocos) e coloração mais clara.

- O pó de tomate liofilizado apresenta a menor perda de carotenoides totais, no entanto o tempo de secagem é longo.

- De modo geral, as polpas reconstituídas (9 e 18 °Brix) se comportam como fluidos pseudoplásticos com tensão de cisalhamento residual característica de produtos derivados de tomate. O índice de consistência é maior para maiores concentrações de sólidos solúveis das polpas reconstituídas.

Considerando o exposto, conclui-se que o processo de secagem por *cast-tape drying* é uma alternativa viável e tecnologicamente competitiva para a produção de tomate desidratado em pó.

6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a secagem por *cast-tape drying* de outros produtos, como banana, mirtilo, pimentão, beterraba, gengibre;
- Estudar a interação do produto úmido com o suporte, determinando o ângulo de contato, bem como desenvolver um método de medida da força necessária para remoção da película seca da superfície do suporte;
- Estudar os custos energéticos e de produção no processo *cast-tape drying*;
- Estudar diferentes concentrações de maltodextrina no suco de tomate;
- Estudar um sistema de secagem que permita aplicação de vácuo, a fim de aumentar as taxas de secagem e reduzir as temperaturas do processo;
- No processo de secagem da polpa de tomate por *cast-tape drying*, o primeiro produto resultante é um filme. Esse filme pode ser usado em pratos gastronômicos, bem como para o recobrimento de outros alimentos. Portanto, recomenda-se o estudo das propriedades físico-químicas dos filmes e suas possíveis aplicações.

ANEXO A

Figura A - Imagens termográficas da evolução da temperatura da polpa durante a secagem da polpa de tomate por CTDV-E com 2 mm de espessura da polpa.

(a) Superfície do mylar sem suco;
Tmín=94,3 °C
Tmáx=96,1 °C

(b) 2 minutos;
Tmín=63,4 °C
Tmáx=66,8 °C

(c) 4 minutos
Tmín=68,4 °C
Tmáx=73,3 °C

(d) 8 minutos
Tmín=69,3 °C
Tmáx=90,1 °C

(e) 10 minutos
Tmín=85,5 °C
Tmáx=94,0 °C

(f) 12 minutos
Tmín=91,7 °C
Tmáx=94,2 °C

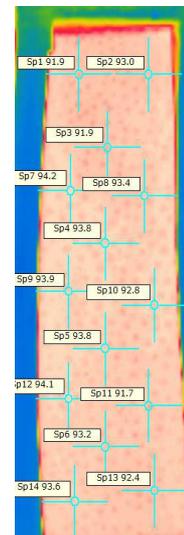
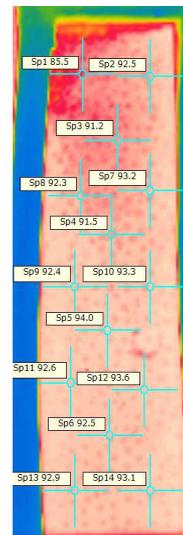
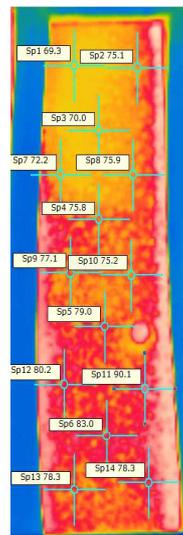
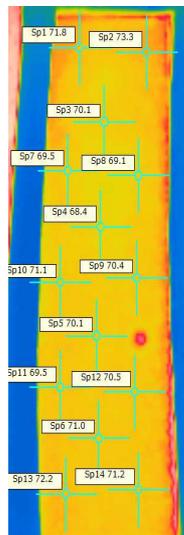
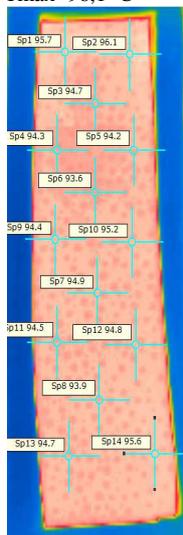


Figura B - Imagens termográficas da evolução da temperatura da polpa durante a secagem da polpa de tomate por CTDV-EV com 2 mm de espessura da polpa.

(a) Superfície do mylar sem suco; T_{mín}=91,6 °C
T_{máx}=95,7 °C

(b) 2 minutos; T_{mín}=48,1 °C
T_{máx}=67,4 °C

(c) 4 minutos T_{mín}=53,3 °C
T_{máx}=70,1 °C

(d) 6 minutos T_{mín}=71,0 °C
T_{máx}=90,7 °C

(e) 8 minutos T_{mín}=86,6 °C
T_{máx}=94,4 °C

(f) 10 minutos T_{mín}=85,7 °C
T_{máx}=93,9 °C

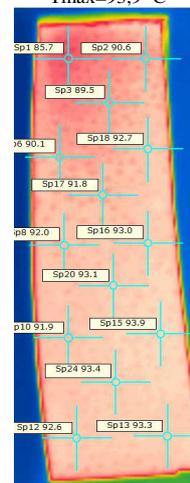
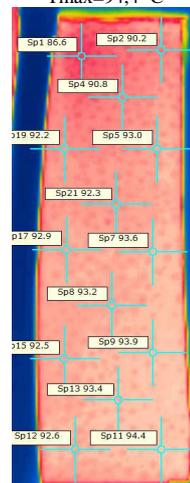
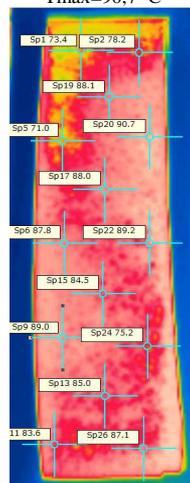
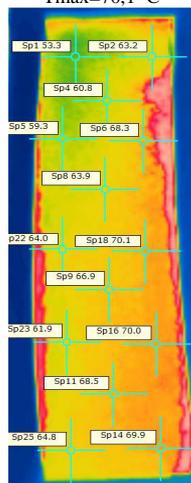
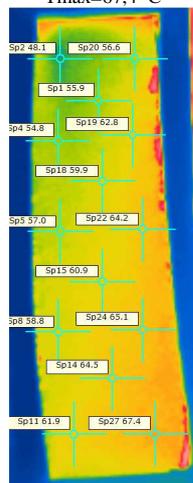
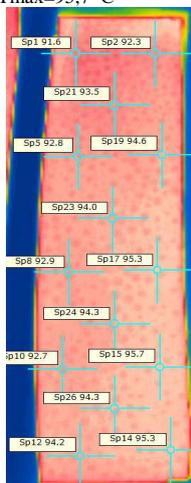
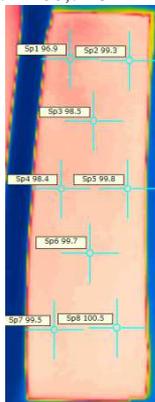
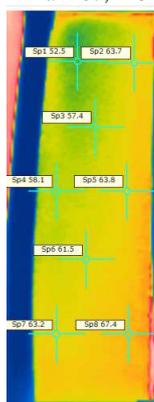


Figura C - Imagens termográficas da evolução da temperatura da polpa durante a secagem da polpa de tomate por CTDVT-EV com 2 mm de espessura da polpa.

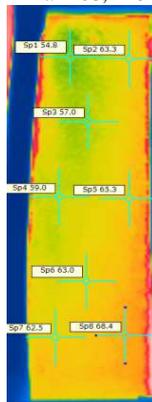
(a) Superfície do mylar sem suco; T_{mín}=98,4 °C
T_{máx}=100,7 °C



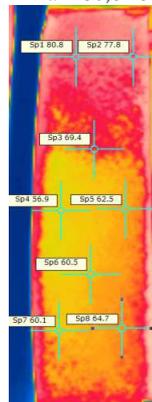
(b) 2 minutos; T_{mín}=52,5 °C
T_{máx}=67,4 °C



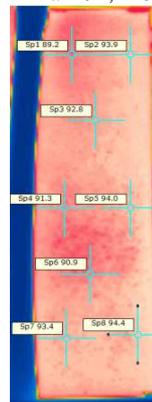
(c) 4 minutos; T_{mín}=54,8 °C
T_{máx}=68,4 °C



(d) 6 minutos; T_{mín}=56,9 °C
T_{máx}=80,8 °C



(e) 8 minutos; T_{mín}=89,2 °C
T_{máx}=94,4 °C



(f) 10 minutos; T_{mín}=89,0 °C
T_{máx}=94,7 °C

