

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ALIMENTOS**

Milene Castoldi

**ESTUDO DO PROCESSO DE SECAGEM DE POLPA DE
TOMATE POR *REFRACTANCE WINDOW*®**

Florianópolis
2012

Milene Castoldi

**ESTUDO DO PROCESSO DE SECAGEM DE POLPA DE
TOMATE POR *REFRACTANCE WINDOW***

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

Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

Florianópolis
2012

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

Castoldi, Milene

Estudo do Processo de Secagem de Polpa de Tomate por
Refractance Window [dissertação] / Milene Castoldi ;
orientador, João Borges Laurindo - Florianópolis, SC, 2012.
119 p. ; 21cm

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

Inclui referências

1. Engenharia de Alimentos. 2. Secagem. 3. Pó de tomate.
4. Refractance Window. 5. Transmissividade. I. Laurindo,
João Borges. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. III.
Título.

Com todo amor aos meus pais Danilo e Fabíola, à minha irmã Lindsey e ao meu sempre companheiro Marcelo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas oportunidades concebidas e por me dar coragem de seguir em frente.

Aos meus pais, Danilo e Fabíola, por sempre quererem, cobrarem e proporcionarem o melhor para mim. À minha querida irmã Lindsey e meu cunhado Rogério pelos ensinamentos mesmo à distância.

Ao professor João Borges Laurindo pela brilhante orientação, pelos ensinamentos compartilhados e, principalmente, pela paciência de não desistir de mim diante de todos os percalços.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos pelos ensinamentos e carinho dedicados desde a graduação até a conclusão desse mestrado.

Ao meu grande companheiro Marcelo, por estar sempre presente me apoiando, incentivando e consolando. Por todo suporte emocional, pelo carinho e pelo amor retribuído.

À querida Martinha, minha grande parceira de trabalho, por todo carinho, empenho, ensinamentos, preocupações, pelos puxões de orelha, pelas risadas, pelo exemplo de pesquisadora e mulher, enfim, por ser a peça chave desse trabalho.

Aos queridos colegas do laboratório de Propriedades Físicas dos Alimentos, em especial à Fran, Bárbara, Darlene, Jaqueline, Bruno e Gustavo por sempre estarem dispostos a contribuir de alguma forma com meus experimentos.

Aos inesquecíveis amigos da graduação. 03.1 sempre!

Aos amigos de Jacupiranga, sem exceções.

À Beth, Afonso, Flávio e Vanessa por serem minha família de coração.

Às eternas Verbenets Nati e Tay, assim como as amigas Ana, Riveli e Bruna, por fazerem de nosso apartamento um lar em Florianópolis.

Ao CNPq pela concessão da bolsa.

À banca examinadora pela disposição e sugestões.

À todos que colaboraram direta ou indiretamente na resolução deste trabalho.

Muito Obrigada!

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a obtenção de tomate em pó através do processo de secagem por *Refractance Window*®, utilizando um aparato em regime descontínuo com os princípios do equipamento comercial. Os experimentos foram conduzidos com variação da temperatura da água de aquecimento (65, 75, 85 e 95 °C), da espessura da camada de espalhamento da polpa de tomate *in natura* (2 e 3 mm) e utilizando filme *Mylar*® transparente e pintado de preto. O menor tempo de secagem, para diminuir a umidade da polpa de 19 para 0.2 g água/ g sólido seco, foi de 15 minutos com o filme transparente, água de aquecimento de 95 °C e espessura de espalhamento de 2 mm. O baixo teor de umidade dos pós e a atividade de água em torno de 0.2 demonstraram ser favoráveis para a garantia da estabilidade dos pós. As isotermas de sorção de umidade foram bem ajustadas pelo modelo de GAB com coeficientes de correlação (R^2) superiores a 0.99. Os pós apresentaram boas propriedades de solubilidade (86 a 94 %), tempo de instantaneização (3 a 11 segundos) e cor. Ao utilizar o filme *Mylar* transparente, os pós apresentaram intensa coloração vermelha e menores valores de diferença de cor (ΔE^*), mesmo para as temperaturas de processo mais elevadas. Enquanto que para o filme pintado foi observada uma coloração acastanhada nas temperaturas mais altas e um maior valor de ΔE^* . As imagens termográficas foram capazes de demonstrar as fases da secagem e a evolução da temperatura da polpa de tomate *in natura* durante o processo. A transmissividade do filme *Mylar* pintado foi aproximadamente zero para todos os comprimentos de onda, demonstrando que a tinta preta utilizada para pintar o filme foi capaz de bloquear a transmissão da radiação infravermelha. Enquanto que o filme *Mylar* transparente apresentou picos de transmissão de IV nos comprimentos de onda em que a água possui os maiores índices de emissão e absorção dessa radiação, porém a parcela transmitida não ultrapassou os 50 %. O processo de secagem por RW também foi aplicado para a polpa de tomate industrializada. Foi observado que os pós reidratados apresentaram menor consistência que a polpa original e uma coloração semelhante, com um menor valor de ΔE^* , indicando que a inativação enzimática aplicada às polpas de tomate industrializadas pode ter contribuído para a obtenção de pós de tomate com boas propriedades de reidratação.

Palavras chave: Secagem. Pó de tomate. *Refractance Window*. Termografia. Transmissividade.

ABSTRACT

This work aimed to obtain tomato powder by *Refractance Window*® drying process, using a batch system apparatus with the commercial equipment principles. The experiments were conducted with variation of water temperature heating (65, 75, 85 and 95 °C), spreading fresh tomato pulp (thickness equivalent to 2 and 3 mm) and using transparent film and *Mylar*® film painted black. The shorter time of drying process to reduce the pulp moisture from 19 to 0.2 g water/ g dry solid was 15 minutes with the transparent film, 95 °C heating water and the thickness equivalent to 2mm. The low level of powders moisture and the water activity around 0.2 proved to be favorable for ensuring the powder stability. The moisture sorption isotherms were well fitted by the GAB model with correlation coefficients (R^2) greater than 0.99. The powders showed good solubility properties (86 to 94%), instantisation time (3 to 11 seconds) and color. By using the transparent *Mylar* film, the powder showed intense red color and lower values of ΔE^* , even for higher process temperatures. While the film painted was observed with brownish color at the higher temperatures and a higher value of ΔE^* . The thermographic images were able to demonstrate the stages of drying process and temperature changing of the fresh tomato pulp during the process. The transmissivity of *Mylar* film painted was approximately zero for all wavelengths, showing that the black paint used was able to block the infrared radiation transmission. While the transparent *Mylar* film showed IR transmission peaks at the wavelengths where water has the highest rate of emission and absorption of this radiation, the portion transmitted has not exceeded 50%. The RW drying process was also applied to industrialized tomato pulp. It was observed that the rehydrated powders have lower consistency than the original pulp and similar color with a smaller value of ΔE^* , that indicates the process of enzyme inactivation applied to industrialized tomato pulps may have contributed to obtain tomato powder with good rehydration properties.

Keywords: Drying. Tomato powder. *Refractance Window*. Thermography. Transmissivity.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 2.1 - Maiores produtores mundiais de tomate em 2010.....	30
Figura 2.2 - Pós alimentícios no coração dos processos de alimentos ..	33
Figura 2.3 - Processo de secagem em alimentos	35
Figura 2.4 - Relação da taxa de deterioração de alimentos em função da atividade de água.....	37
Figura 2.5 - Isotermas típicas de sorção.....	38
Figura 2.6 - Curvas típicas de secagem.....	39
Figura 2.7 - Transferência de calor por condução devido à atividade molecular.....	41
Figura 2.8 - Desenvolvimento da camada limite térmica na transferência de calor por convecção.....	43
Figura 2.9 - Radiação incidente sobre uma superfície	45
Figura 2.10 - Espectro eletromagnético	46
Figura 2.11 - Poder emissivo do corpo negro	48
Figura 2.12 - Curva de absorção espectral IV para a água.....	50
Figura 2.13 - Esquema do <i>Refractance Window</i>	51
Figura 2.14 - Diagrama esquemático da transferência de calor na secagem por <i>Refractance Window</i>	52

CAPÍTULO III

Figura 3.1 - Esquema do dispositivo experimental utilizado na secagem por <i>RW</i>	58
Figura 3.2 - Esquema dos experimentos realizados.	59
Figura 3.3 - Esquema do dispositivo de agitação utilizado no teste de solubilidade	62
Figura 3.4 - Fotografia do aparato utilizado para determinar o tempo de instantaneização	63

Figura 3.5 - Esquema do funcionamento do aparato utilizado para determinar o tempo de instantaneização	63
Figura 3.6 - Esquema do aparato experimental do espectrômetro modular MIR8025TM.....	66
CAPÍTULO IV	
Figura 4.1 - Curvas de secagem da polpa de tomate <i>in natura</i>	70
Figura 4.2 - Taxas de secagem da polpa de tomate <i>in natura</i> com espessura de espalhamento de 2 mm.....	72
Figura 4.3 - Perfil da temperatura da polpa e da água de aquecimento durante a secagem por <i>RW</i>	75
Figura 4.4 - Amostra após a secagem por <i>RW</i> (<i>flakes</i>) e após a trituração em moinho de facas (pó).....	78
Figura 4.5 - Teor de umidade dos pós de tomate	79
Figura 4.6 - Atividade de água dos pós e das polpas de tomate.....	81
Figura 4.7 - Valores experimentais das isotermas de sorção dos pós de tomate.....	83
Figura 4.8 - Modelo de GAB ajustado aos dados experimentais da secagem com água de aquecimento de 95 °C e espessura de espalhamento de 2 mm.....	84
Figura 4.9 - Solubilidade dos pós de tomate para as diferentes variáveis do processo de secagem por <i>RW</i>	87
Figura 4.10 - Tempo de instantaneização dos pós de tomate.....	90
Figura 4.11 - Imagens dos pós de tomate obtidos na secagem por <i>RW</i> para as diferentes variáveis do processo	93
Figura 4.12 - Imagens das polpas de tomate <i>in natura</i> e dos pós de tomate reidratados	95
Figura 4.13 - Diferença de cor (ΔE^*) dos pós de tomate e dos pós reidratados com relação à polpa original	96

Figura 4.14 - Imagens termográfica para secagem a 95 °C, 3 mm de espessura de espalhamento da polpa e filme <i>Mylar</i> pintado	99
Figura 4.15 - Imagens termográfica para secagem a 95 °C, 3 mm de espessura de espalhamento da polpa e filme <i>Mylar</i> transparente	100
Figura 4.16 - Imagens da polpa industrializada, do pó e do pó reidratado	103
Figura 4.17 - Transmissividade dos filmes <i>Mylar</i>	105

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 2.1 - Composição média do tomate maduro 31

Tabela 2.2 - Classificação dos tipos de secadores de alimentos de acordo com o método de desidratação e a evolução histórica..... 40

Tabela 2.3 - Comparação da capacidade, temperatura do produto e eficiência térmica do *RW* com outros secadores 53

CAPÍTULO III

Tabela 3.1 - Atividade de água de soluções salinas saturadas a 25 °C.. 61

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1 - Intervalos de confiança (IC) de 95 % para os coeficientes dos modelos de regressão..... 77

Tabela 4.2 - Parâmetros de ajuste do modelo de GAB e coeficiente de correlação das amostras..... 85

Tabela 4.3 - Resultados da comparações múltiplas do método de Tukey 91

Tabela 4.4 - Parâmetros de cor da polpa, do pó e do pó reidratado 98

Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros de cor para a polpa industrializada, o pó e o pó reidratado 104

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1 Introdução	25
1.1 Objetivos.....	26
1.1.1 Geral	26
1.1.2 Específicos	26
1.2 Estrutura da dissertação.....	26

CAPÍTULO II

2 Revisão Bibliográfica.....	29
2.1 Tomate	29
2.1.1 Dados econômicos	29
2.1.2 Composição	31
2.1.3 Tomate em pó	32
2.2 Secagem	35
2.2.1 Atividade de água e isothermas de sorção.....	36
2.2.2 Curvas de secagem.....	39
2.2.3 Métodos de secagem	40
2.2.3.1 Condução.....	41
2.2.3.2 Convecção	42
2.2.3.3 Radiação	44
2.2.3.3.1 Radiação infravermelha	47
2.2.4 Secagem por radiação infravermelha	49
2.2.4.1 <i>Refractance Window</i>	51

CAPÍTULO III

3 Materiais e Métodos	57
3.1 Matéria-prima.....	57
3.1.1 Polpa de tomate <i>in natura</i>	57
3.1.2 Polpa industrializada.....	57
3.2 Processo de secagem.....	58
3.2.1 Cinética de secagem	60
3.3 Atividade de água	60
3.4 Isotermas de sorção de umidade	60
3.5 Solubilidade	61
3.6 Tempo de instantaneização.....	62
3.7 Cor.....	64
3.8 Termografia infravermelha.....	64
3.9 Consistência de Bostwick.....	65
3.10 Transmissividade dos filmes <i>Mylar</i>	65

CAPÍTULO IV

4 Resultados e Discussão.....	69
4.1 Polpa de tomate <i>in natura</i>	69
4.1.1 Cinética de secagem	69
4.1.2 Teor de umidade.....	78
4.1.3 Atividade de água	80
4.1.4 Isotermas de sorção de umidade	82
4.1.5 Solubilidade	86
4.1.6 Tempo de instantaneização.....	89
4.1.7 Cor.....	92

4.1.8 Termografia infrafermelha	99
4.2 Polpa de tomate industrializada.....	102
4.2.1 Consistência de Bostwick	102
4.2.2 Cor	103
4.3 Transmissividade dos filmes <i>Mylar</i>	104
CAPÍTULO V	
5 Conclusões.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109



CAPÍTULO I

1 Introdução

Entre as culturas olerícolas, o tomate (*Lycopersicon esculentum*) é a que apresenta produção e consumo mais difundido no mundo, tanto na forma *in natura* como industrializada (FAGUNDES et al., 2005). A produção do tomate é uma das cadeias mais importantes no âmbito do agronegócio brasileiro, sendo que no ano de 2010 o Brasil ocupou a nona colocação mundial com uma produção de 3.6 milhões de toneladas (FAO, 2012).

O tomate é uma importante fonte de minerais, vitaminas, aminoácidos essenciais e pigmentos antioxidantes, tais como o licopeno. Estudos clínicos e epidemiológicos têm demonstrado que dietas ricas em licopeno estão associadas com a redução do risco de desenvolvimento de vários tipos de câncer, bem como uma menor incidência de doenças cardiovasculares (GIOVANELLI et al., 2002; GOULA e ADAMOPOULOS, 2004; CHANG et al., 2006).

Considerando que o tomate é um fruto altamente perecível, a elaboração de produtos desidratados apresenta-se como uma alternativa para o aproveitamento do excedente da produção e comercialização *in natura*, além de disponibilizar ao consumidor um produto sensorialmente diferenciado e que, por ser menos perecível, pode ser comercializado em qualquer período do ano (NACHTIGALL et al., 2000).

Pós de tomate podem ser produzidos por diversas técnicas, sendo os secadores de tambor e o *spray dryer* os equipamentos mais utilizados (GOULA et al., 2008). Porém, um método alternativo que tem sido estudado para a produção de *flakes* e pós é o processo de secagem por *Refractance Window* (NINDO e TANG, 2007).

O *Refractance Window* é um processo de secagem que utiliza energia térmica a partir da água quente, a temperaturas muito próximas da ebulição, para secar uma fina camada de material através da condução, convecção e radiação infravermelha (NINDO et al., 2003a). A secagem por *Refractance Window* é caracterizada por manter a integridade de alimentos e ingredientes no que diz respeito à cor, sabor e nutrientes (EVANUS, 2011).

O tomate em pó possui várias vantagens, incluindo a facilidade de embalagem, transporte e mistura (GOULA et al., 2008), podendo ser

reconstituído em polpa ou suco e ser usado como base para a preparação de produtos como molhos, *ketchup*, sopas, alimentos para bebês, temperos, etc. Assim, o tomate desidratado tem se tornado um produto promissor com grande potencial nos mercados nacional e internacional (KADAM e BALASUBRAMANIAN, 2011).

A qualidade do pó de tomate depende das características da matéria-prima e do processo de secagem. Por isso, o estudo da eficiência do método de secagem e dos fatores que influenciam a qualidade dos pós de tomate é indispensável para se estabelecer a melhor condição de processo, visando à obtenção de um produto de qualidade superior.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Este trabalho teve como objetivo principal a obtenção de tomate em pó através do processo de secagem por *Refractance Window*.

1.1.2 Específicos

- a) Estudar a cinética de secagem por *Refractance Window* ;
- b) Analisar a transmissividade do filme de *Mylar* à radiação infravermelha;
- c) Avaliar a influência da radiação infravermelha, da temperatura da água de aquecimento do processo e espessura de espalhamento do tomate sobre as características do produto obtido;
- d) Caracterizar o pó quanto ao conteúdo de umidade, atividade de água, sorção de umidade, cor, solubilidade e tempo de instantaneização;
- e) Estabelecer a melhor condição de processo, visando à obtenção de um produto de qualidade superior.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução e objetivos do trabalho. No segundo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre a matéria-prima utilizada, princípios de secagem e processo de secagem por *Refractance Window*, além de parâmetros de qualidade dos alimentos, como a atividade de água, o teor de umidade e isotermas de sorção de umidade. O terceiro capítulo refere-se aos materiais e métodos. Nele se descreve a montagem do equipamento utilizado nos experimentos, bem como a

metodologia utilizada para realização dos ensaios. No quarto capítulo apresentam-se os resultados experimentais e a discussão dos resultados obtidos. O capítulo seguinte envolve as conclusões e por fim são apresentadas as referências bibliográficas.

CAPÍTULO II

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Tomate

Originário da costa andina, abrangendo Peru, Equador e Chile, o tomate foi domesticado no México, onde era cultivado pelas primeiras civilizações (SILVA, 2006). Foi levado para a Europa logo depois do Descobrimento da América (1492), sendo utilizado no início como planta ornamental. Seu uso culinário difundiu-se durante o século XIX (SILVA, 2006). Trazido para o Brasil na época da colonização, o cultivo do tomateiro expandiu suas fronteiras para todos os estados brasileiros na década de 70.

O tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.) é uma planta herbácea anual da família das solanáceas, normalmente implantada em áreas novas ou em locais onde se procede à rotação de cultivo com outras espécies (FONTES et al., 2004). O tomate é um fruto com segmentos internos carnudos repletos de sementes envoltas por uma matriz aquosa. O peso unitário médio do fruto varia de menos de 25 g (cultivares tipo cereja) até mais de 300 g em cultivares de frutos grandes, tipo salada (PEREIRA et al., 2006).

O tomate pode ser encontrado nas cores rosada, amarela e laranja, embora o mais comum seja encontrá-lo na coloração vermelha, devido ao alto teor de licopeno. Este carotenoide, devido a sua estrutura química figura como um dos melhores supressores biológicos de radicais livres, especialmente aqueles derivados do oxigênio (MONTEIRO et al., 2008).

O tomate é a segunda hortaliça mais cultivada no mundo, perdendo apenas para a batata. Seu cultivo destina-se a duas cadeias agroalimentares: a indústria de processamento, de cultivo rasteiro, e o tomate de mesa consumido na forma *in natura*, de cultivo tutorado ou envarado (OLIVEIRA e BERGAMASCO, 2003).

2.1.1 Dados econômicos

A produção mundial de tomate em 2010 foi de aproximadamente 146 milhões de toneladas, sendo a China o maior produtor, seguida por Estados Unidos e Turquia (FAO, 2012). Em 2010 o Brasil figurou entre os dez maiores produtores mundiais (Figura 2.1), obtendo uma das

maiores produtividades. Nesse ano foram produzidos cerca de 3.6 milhões de toneladas numa área de 60.77 mil hectares, indicando que a produtividade média brasileira foi de cerca de 60 toneladas por hectare (FAO, 2012).

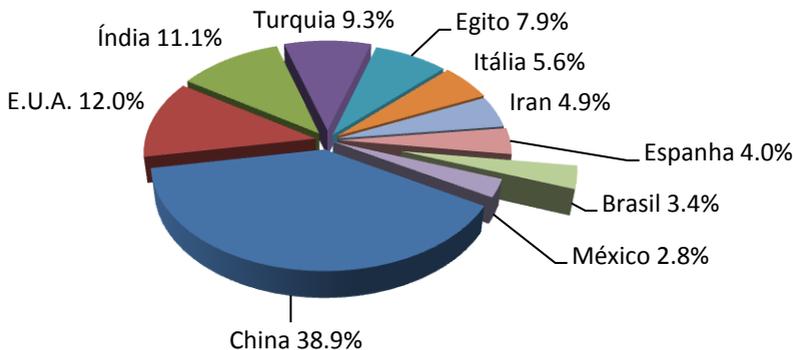


Figura 2.1 - Maiores produtores mundiais de tomate em 2010 (FAO, 2012).

A região Sudeste é responsável por 40% desta produção. Goiás, o maior estado produtor de tomate e com a maior área plantada do país, produziu 1.3 milhões de toneladas do produto em 2010, o que representa 37% da produção nacional (IBGE, 2012). Do total produzido no Brasil, aproximadamente 77% são destinados ao consumo *in natura*, o que corresponde a mais de 2.8 milhões de toneladas (MACHADO, 2010).

Um dos principais fatores para a expansão da cultura tomateira é o crescimento do consumo. Entre os anos de 1999 e 2009, a produção mundial *per capita* de tomate cresceu aproximadamente 30%, passando de 15.5 kg por pessoa por ano para 20.2 kg (FAO, 2012).

Ao longo dos últimos anos, o tomate fresco e seus produtos derivados têm despertado interesse científico devido à sua atividade antioxidante. Por ser rico em licopeno e conter altos teores de vitamina A e C, o tomate pode ser considerado um alimento funcional (MACHADO, 2010).

2.1.2 Composição

O tomate possui uma pequena quantidade de calorias sendo constituído basicamente por 94% de água (USDA, 2012). Os constituintes do tomate também incluem minerais, açúcares e fibras dietéticas, como apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição média do tomate maduro.

Componente	Quantidade por 100g
Água	94.52 g
Energia	18 kcal/ 74 kJ
Proteínas	0.88 g
Lipídios totais	0.20 g
Carboidratos	3.89 g
Fibras dietéticas	1.20 g
Açúcares totais	2.63 g
Frutose	1.37 g
Glicose	1.25 g
Vitamina C	13.7 mg
K, Ca, Mg e P	282 mg
Licopeno	2573 µg
α-caroteno	101 µg
β-caroteno	449 µg

Fonte: USDA, 2012.

A concentração de nutrientes do tomate varia consideravelmente de acordo com a variedade, condições de solo e a adição de fertilizantes (MONTEIRO et al., 2008). Os valores de açúcares totais e ácidos encontrados nos frutos contribuem em grande parte para o sabor e consequente aceitabilidade do tomate (SOBREIRA et al., 2010). Devido ao seu elevado conteúdo de água, o tomate está sujeito às variações de temperatura e umidade relativa do ambiente onde se encontra (OLIVEIRA et al., 2011).

Os frutos do tomateiro são altamente perecíveis e possuem uma casca fina na forma de película, tornando-se um produto frágil para a movimentação logística (GAMEIRO et al., 2007). O fruto maduro

possui uma vida média de prateleira de uma semana, com perdas variando entre 25% a 50%, enquanto que o fruto parcialmente maduro apresenta uma vida útil de até duas semanas, com 20% a 40% de perdas pós-colheita (CHIUMARELLI e FERREIRA, 2006).

As elevadas taxas de transpiração e atividade respiratória ocasionam prejuízos na aparência, como perda de brilho, murchamento e enrugamento da casca, e nas características sensoriais, principalmente na textura e sabor. Estes fatos influenciam negativamente na sua comercialização e incrementam o índice de perdas pós-colheita (OLIVEIRA et al., 2011).

Uma das alternativas para agregar valor e reduzir as perdas da cadeia produtiva do tomate é a desidratação. Esse processo disponibiliza ao consumidor um produto sensorialmente diferenciado e que, por ser menos perecível, pode ser comercializado em qualquer período do ano (PEREIRA et al., 2006).

2.1.3 Tomate em pó

A preservação e transformação do tomate são de grande importância comercial. Os produtos de tomates desidratados (tomate seco, *flakes* e pós) estão em alto consumo em comparação com outros produtos de tomate, devido às suas excelentes propriedades (LIU et al., 2010).

Tomates na forma de pó são obtidos da desidratação quase completa do suco de tomate (MACHADO, 2010). A desidratação permite que o produto tenha uma maior vida de prateleira devido à redução da atividade de água, além da facilidade de embalagem e de mistura e a redução no custo de transporte e armazenamento, devido à leveza e compactação (SOUZA et al., 2011).

Pós alimentícios são geralmente obtidos a partir de matérias-primas agrícolas, por processos de fragmentação e separação associados com processos de secagem. Como apresentado na Figura 2.2, os pós podem ser utilizados como produtos alimentícios intermediários no processo de elaboração de alimentos ou serem comercializados diretamente para os consumidores (CUQ et al., 2011).

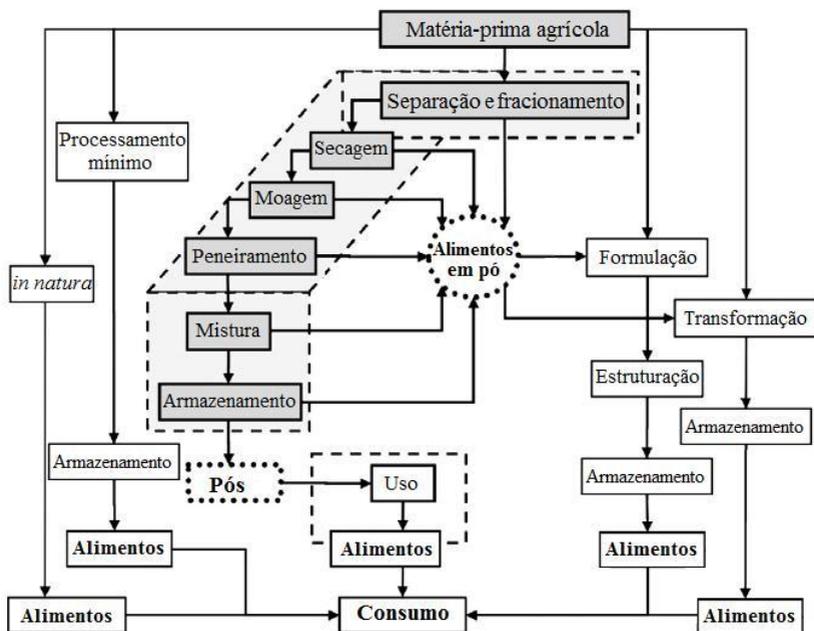


Figura 2.2 - Pós alimentícios no coração dos processos de alimentos (adaptada de CUQ et al., 2011).

Segundo Cuq et al. (2011), é possível classificar os pós alimentícios de acordo com vários critérios como, por exemplo, sua origem:

- pós naturais obtidos diretamente de matérias-primas agrícolas: farinhas, sais, etc.;
- pós transformados e/ou formulados: café instantâneo, leite em pó, chocolate em pó, frutas e legumes em pó, etc.;
- pós funcionais: aditivos, especiarias, corantes, etc.

Os pós de tomate podem ser reconstituídos em polpa ou suco e serem usados como base para a preparação de produtos como molhos, ketchup, molho picante, sopas, alimentos para bebês, temperos prontos, etc. Assim, o tomate desidratado tem se tornado um produto promissor com grande potencial nos mercados nacional e internacional (KADAM e BALASUBRAMANIAN, 2011).

Para a obtenção de um produto de boa qualidade, os cultivares de tomate industrial precisam apresentar frutos de coloração vermelha intensa e uniforme, e devem estar fisiologicamente desenvolvidos,

maduros, limpos, livre de pragas e doenças (SOUSA et al., 2010). De acordo com Davoodi et al. (2007) a qualidade do tomate desidratado depende de muitos parâmetros como a variedade do fruto, conteúdo de sólidos solúveis no fruto fresco (°Brix), tamanho das peças de tomate, umidade, temperatura e velocidade do ar de secagem e eficiência do sistema de secagem. A taxa de secagem também afeta a qualidade final do produto desidratado.

Durante o processamento e armazenamento diversas alterações podem ocorrer em pós, como por exemplo, *stickiness*, *caking*, etc. Por isso, muitos autores têm estudado os fatores que influenciam a qualidade de pós, inclusive dos pós de tomate (FITZPATRICK e AHRNÉ, 2005; PEREIRA et al., 2006; DAVOODI et al., 2007; LIU et al., 2010).

Dentre as transformações ocorridas, o escurecimento é a principal causa da degradação da qualidade do tomate durante a secagem. Cernîsev (2010) demonstrou que a taxa de escurecimento dos tomates durante a secagem depende da umidade do produto e, essencialmente, da sua temperatura. A taxa de formação de cor aumentou à medida que a intensidade do processo de secagem aumentou.

Evangelista (1992) relatou que produtos submetidos à secagem, embora se beneficiem do retardo no crescimento de microrganismos e do aumento no tempo de conservação, necessitam de embalagens adequadas, que mantenham as características do produto obtidas na secagem, nas fases de transporte e armazenamento. A aglomeração e o empedramento dos pós, por exemplo, podem ser evitados utilizando embalagens com barreiras ao oxigênio e a umidade (PEREIRA et al., 2006).

Goula e Adamopoulos (2005) relataram que algumas características do pó de tomate (teor de umidade, densidade e a solubilidade) obtido por *spray dryer* são dependentes das condições de secagem, ou seja, da temperatura do ar de entrada, do fluxo do ar de secagem e do fluxo do ar comprimido. Segundo diversos autores, as diferentes condições de secagem também podem causar a degradação do licopeno durante a fabricação de tomate em pó (GIOVANELLI et al., 2002; GOULA et al., 2006; DAVOODI et al., 2007; MACHADO, 2010).

O tomate desidratado pode ser produzido por diversas técnicas, sendo os secadores de tambor e o *spray dryer* os métodos mais utilizados para a produção do pó (GOULA et al., 2008). Quando se trata de médios e grandes volumes de produção, torna-se importante o desenvolvimento de um processo que, além de resultar num produto de

alta qualidade, seja viável e de fácil transposição de escala (TONON et al., 2006).

2.2 Secagem

Na preservação dos alimentos, a secagem é um dos métodos mais antigo de que se tem conhecimento. De acordo com Ordóñez et al. (2005) seus principais objetivos na indústria alimentícia são a conservação dos alimentos devido à redução da atividade de água (a_w); a redução do peso e do volume dos alimentos, reduzindo assim os custos de transporte e armazenamento; a facilidade do uso e a diversidade da oferta de produtos.

A secagem é a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido (PARK et al., 2007). Normalmente se imagina um sólido como algo com forma definida, mas em alguns casos o que se tem na alimentação do secador é uma pasta ou uma solução. Porém, em qualquer situação, o produto final é um sólido com pouca ou quase nenhuma umidade (AHMED, 2011).

A secagem é um processo complexo que envolve a transferência simultânea de calor e massa requerendo controle de processos precisos (JANGAM E MUJUMDAR, 2010). Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remoção do vapor d'água formado a partir da superfície do material a ser seco (Figura 2.3).

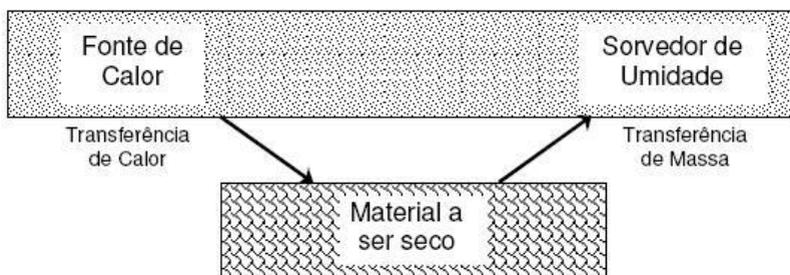


Figura 2.3 - Processo de secagem em alimentos (adaptada de AHMED, 2011).

Ao ser colocado no secador, devido à diferença de temperatura (ambiente mais quente que o material), ocorre uma transferência de calor da fonte quente para o material úmido e assim a evaporação da água. Se a água não estiver ligada (ligação física e/ou química) nas

estruturas do sólido é caracterizada como água livre, e a energia envolvida no processo será correspondente ao calor latente de vaporização. Se a água estiver ligada, a energia necessária para sua evaporação será maior, uma vez que será necessário o seu transporte do interior do sólido para a superfície (PARK et al., 2001).

2.2.1 Atividade de água e isotermas de sorção

A água livre dos alimentos é a que está disponível para o crescimento de microrganismos, germinação de esporos e para a participação em vários tipos de reações químicas. O grau de disponibilidade da água num alimento pode ser expresso como atividade de água (a_w) e define-se como a razão entre a pressão do vapor da água no alimento e a pressão de vapor da água pura à mesma temperatura, conforme a Equação (2.1) (RAHMAN, 1995):

$$a_w = \left[\frac{P}{P_0} \right]_{P,T} \quad (2.1)$$

onde a_w é a atividade de água, P é a pressão de vapor da água no alimento e P_0 é a pressão de vapor da água pura.

A atividade de água é um dos fatores mais críticos para determinação da qualidade e segurança dos alimentos, podendo afetar sua vida de prateleira, textura, sabor e aroma (JANGAM E MUJUMDAR, 2010). A Figura 2.4 apresenta a relação da taxa de deterioração de alimentos em função da atividade de água.

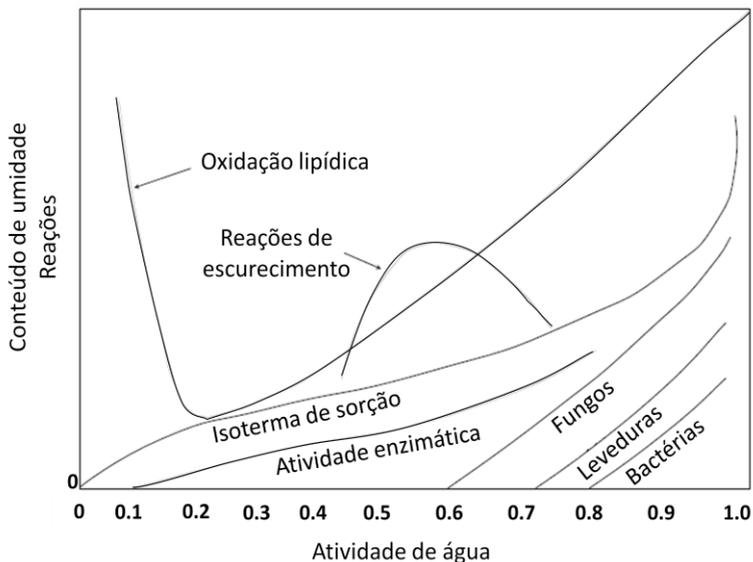


Figura 2.4 - Relação da taxa de deterioração de alimentos em função da atividade de água (adaptada de BAKER, 1997).

A perda da qualidade começa a aumentar em $a_w > 0.3$ para a maioria das reações químicas e para a maioria dos alimentos secos. Um aumento da atividade de água de 0.1 diminui a vida de prateleira dos alimentos de duas a três vezes. O crescimento microbiano é afetado em atividades de água abaixo de 0.9, enquanto que bolores e leveduras tem seu crescimento afetado abaixo de 0.8. De modo geral, o limite inferior para todos os micro-organismos é $a_w < 0.6$ (RAHMAN, 1995).

O teor de umidade de um alimento em equilíbrio com uma determinada umidade do ar e temperatura constante é denominado de umidade de equilíbrio. A umidade de equilíbrio determina o teor de umidade mínimo que um alimento pode ser seco sob um dado conjunto de condições de secagem. A relação entre a atividade de água e a umidade de equilíbrio fornece a isoterma de sorção de umidade de um produto (AHMED, 2011).

As isotermas de sorção podem ser determinadas por diversos métodos sendo que o mais utilizado é o acondicionamento do alimento em recipientes com soluções salinas saturadas e atividades de água conhecidas (JANGAM E MUJUMDAR, 2010). As isotermas de sorção podem ser obtidas pela reidratação de uma amostra seca (isotermas de

adsorção), pela secagem de uma amostra úmida (dessorção) ou pela combinação dos dois métodos (isotermas de trabalho), como apresentado na Figura 2.5.

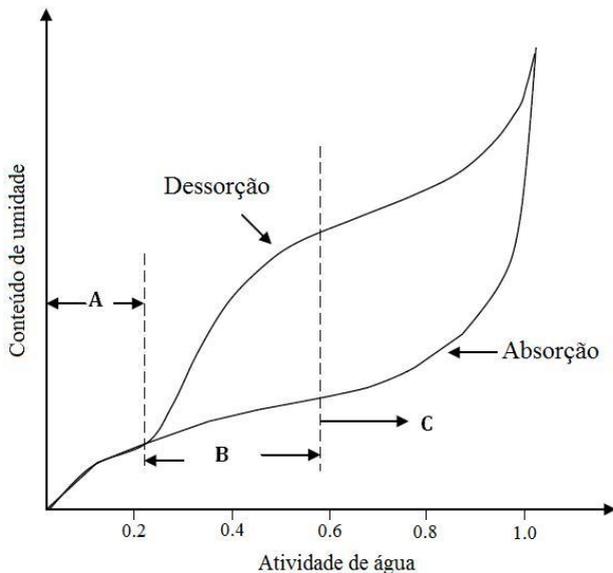


Figura 2.5 - Isotermas típicas de sorção (adaptada de JANGAM E MUJUMDAR, 2010).

Na região (A) a água está fortemente ligada e não está disponível para a reação. Nesta região, há essencialmente uma monocamada de adsorção de vapor de água e não existe distinção entre as isotermas de adsorção e dessorção. Na região (B) a água está mais fracamente ligada devido ao seu confinamento em capilares menores. Água na região de (C) está ainda mais livre e disponível para as reações e como um solvente (JANGAM E MUJUMDAR, 2010).

Um grande número de modelos matemáticos tem sido proposto na literatura para as isotermas de sorção de alimentos. O modelo de GAB (Guggenheim – Anderson - de Boer), apresentado na Equação (2.2), tem sido sugerido como o modelo de sorção mais versátil disponível na literatura e é aplicado com sucesso para vários vegetais desidratados (RAHMAN, 1995).

$$X_{eq} = \frac{kCX_0a_w}{(1 - ka_w)(1 - ka_w + Cka_w)} \quad (2.2)$$

onde X_{eq} é a umidade de equilíbrio, K é a constante de GAB relacionada à energia de interação das moléculas adsorvidas na multicamada, C é a constante relacionada à energia de interação das moléculas na monocamada e X_0 é a umidade na monocamada.

2.2.2 Curvas de secagem

Um processo de secagem pode ser bem representado por um diagrama do teor de umidade do material, da taxa de secagem e da temperatura do material em função do tempo. A taxa de secagem é definida como a quantidade de umidade removida em unidade de tempo a partir de um material seco por unidade da superfície de secagem. Ou seja, é a derivada do teor de umidade total (X) pelo tempo (t) de secagem, dX/dt (AHMED, 2011).

O processo de secagem pode ser dividido em três períodos. Na Figura 2.6 estão apresentadas as curvas em função do tempo para: (a) teor de umidade do material, (b) taxa de secagem e (c) variação da temperatura do produto durante a secagem.

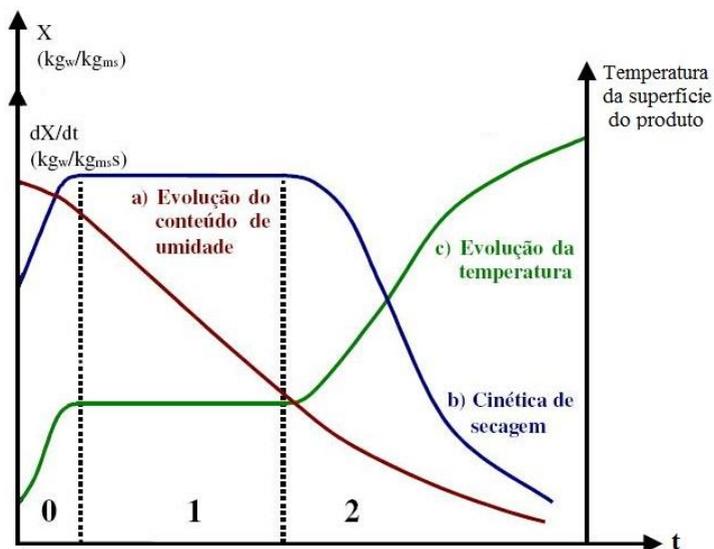


Figura 2.6 - Curvas típicas de secagem (PARK et al., 2001).

No período de acomodação, que representa o início da secagem, a taxa de secagem é quase zero. Nesse período o calor fornecido pela

secagem é destinado para elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água (PARK et al., 2001).

O primeiro período caracteriza-se pela taxa constante de secagem onde a água evaporada é a água livre. Enquanto houver quantidade de água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem e a temperatura do material serão constantes (PARK et al., 2001).

No segundo período a taxa de secagem é decrescente com um aumento da temperatura do produto. A migração de umidade do interior para a superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado (PARK et al., 2001).

2.2.3 Métodos de secagem

Segundo Yamaguishi (2008), a escolha do método de secagem depende das características físicas (viscosidade, tamanho do sólido) e químicas (sensibilidade térmica, predisposição a oxidação). Vega-Mercado et al. (2001) dividiram as operações de secagem de alimento em 4 gerações, de acordo com o método de desidratação e a evolução histórica dos processos, como apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Classificação dos tipos de secadores de alimentos de acordo com o método de desidratação e a evolução histórica (adaptada de VEGA-MERCADO et al., 2001)

Geração	Método de Secagem
I	Secadores tipo leito e cabine
II	<i>Spray dryer</i> , secadores de tambor, fluidização
III	Liofilização, alto-vácuo, desidratação osmótica
IV	Secadores <i>flash</i> , micro-ondas, RF, métodos combinados, <i>Refractance Window</i> , secagem de contato de sorção.

A condução, convecção e radiação são os mecanismos básicos de transferência de calor. A transferência de calor é definida como a energia transferida em virtude da diferença ou gradiente de temperatura. No sentido vetorial, flui a partir de regiões de temperatura mais elevada para as de temperatura mais baixa. A escolha do método empregado dependerá de sua aplicação e das condições operacionais.

2.2.3.1 Condução

A condução é o processo de transferência de calor em que a energia térmica é transferida entre átomos e/ou moléculas de uma substância. Não há deslocamento global da matéria na escala macroscópica. As partículas mais energéticas transmitem a energia para as partículas vizinhas, menos energizadas, devido às interações entre elas, como apresentado na Figura 2.7. Na presença de um gradiente de temperatura entre duas regiões em um mesmo meio ou entre dois meios em contato, a transferência de energia por condução deve ocorrer na direção da diminuição da temperatura (BERGMAN et al., 2011).

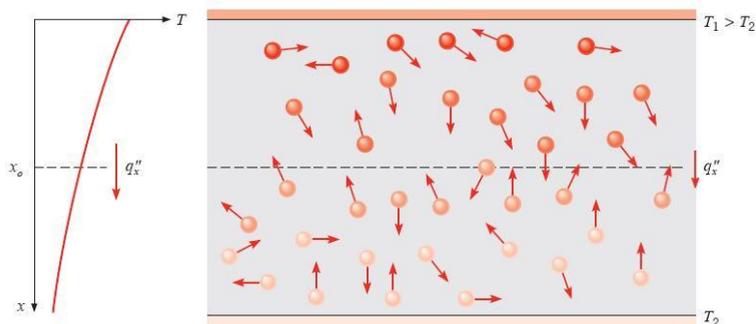


Figura 2.7 - Transferência de calor por condução devido à atividade molecular (BERGMAN et al., 2011).

Processos de transferência de calor podem ser quantificados em termos de equações de taxa apropriadas. Estas equações podem ser utilizadas para calcular a quantidade de energia a ser transferida por unidade de tempo. Para a condução de calor, a equação da taxa é conhecida como lei de Fourier (BERGMAN et al., 2011). Para um plano unidimensional, tendo uma temperatura de distribuição $T(x)$, a equação do fluxo é expressa como:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

O fluxo de calor q_x'' (W/m^2) é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área, perpendicular à direção de transferência e proporcional ao gradiente de temperatura, dT/dx , nesta direção. O parâmetro k é uma propriedade de transporte conhecida como

condutividade térmica ($W/(m.K)$) e é uma característica do material. O sinal negativo é uma consequência do fato de que o calor é transferido na direção da diminuição da temperatura.

A lei de Fourier é o alicerce da transferência de calor por condução, e suas principais características, segundo Bergman et al. (2011) são resumidas como se segue:

- é uma generalização baseada em evidências experimentais;
- é uma expressão vetorial que indica que o fluxo de calor é normal à isoterma e na direção decrescente de temperatura;
- define uma propriedade do material importante, a condutividade térmica;
- se aplica para toda a matéria, independente de seu estado (sólido, líquido ou gasoso).

No uso da lei de Fourier, a condutividade térmica do material deve ser conhecida. Esta propriedade, que é referida como uma propriedade de transporte, fornece uma indicação da taxa com que a energia é transferida pelo processo de condução. A condutividade térmica de alimentos depende tanto da sua composição como de qualquer fator que afete o fluxo de calor através do material como: a porosidade, o tamanho, a forma, o arranjo dos poros, a orientação das fibras, etc. (BERGMAN et al., 2011).

2.2.3.2 Convecção

A convecção é um modo de transferência de calor constituído por dois mecanismos. A energia pode ser transferida devido ao movimento molecular aleatório (difusão) e pela movimentação macroscópica de grandes quantidades do fluido (advecção). A advecção está associada com o fato de que, em qualquer instante, um grande número de moléculas está se movendo como agregados. Este movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de calor, uma vez que as moléculas no agregado conservam seu movimento aleatório (BERGMAN et al., 2011).

A convecção ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície delimitadora quando os dois estão a diferentes temperaturas. Uma consequência da interação de uma superfície e o fluxo de um fluido é o desenvolvimento de uma região no fluido através da qual a temperatura varia de T_s para $y = 0$ até T_∞ para o fluxo exterior. Esta região é chamada de camada-limite térmica (Figura 2.8). Em qualquer caso, se $T_s > T_\infty$, a transferência de calor por convecção irá ocorrer a partir da superfície para o fluxo exterior (BERGMAN et al., 2011).

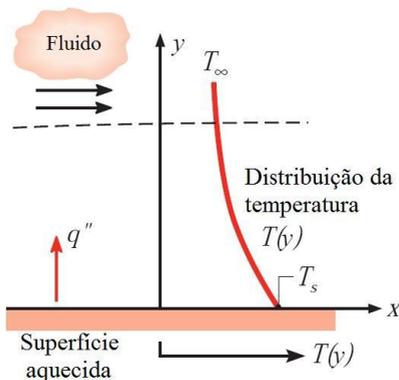


Figura 2.8 - Desenvolvimento da camada limite térmica na transferência de calor por convecção (adaptada de BERGMAN et al., 2011).

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido. A convecção é forçada quando este escoamento é causado por meios externos, tais como por um ventilador, uma bomba ou ventos atmosféricos. E a convecção é livre (ou natural) quando o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo, devido às diferenças de massa específica causadas por variações de temperatura no fluido. A combinação das duas condições é chamada de convecção mista ou combinada (BERGMAN et al., 2011).

Independentemente da natureza do processo de transferência de calor por convecção, a equação da taxa é expressa como:

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \quad (2.4)$$

onde o fluxo de calor por convecção q'' (W/m^2) é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, T_s e T_∞ , respectivamente. Esta expressão é conhecida como Lei de Newton do arrefecimento, e o parâmetro h ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) é denominado como coeficiente de transferência de calor por convecção.

O coeficiente de transferência de calor por convecção depende das condições na camada-limite que são influenciados pela geometria da superfície, pela natureza do movimento do fluido e por uma variedade de propriedades do fluido como temperatura, massa específica, viscosidade, etc.

2.2.3.3 Radiação

A radiação térmica é a energia emitida por toda a matéria que se encontra a uma temperatura acima do zero absoluto. Independentemente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a alterações nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas constituintes. A energia radiativa é transportada por ondas electromagnéticas ou, alternativamente, por fótons. Enquanto a transferência de energia por condução ou convecção requer a presença de um suporte material, a radiação não o faz. Na verdade, a transferência de radiação ocorre mais eficientemente no vácuo (BERGMAN et al., 2011).

A radiação que é emitida pela superfície se origina a partir da energia térmica da matéria e a taxa à qual a energia é libertada por unidade de área (W/m^2) é denominada de poder emissivo, E . Existe um limite superior para o poder emissivo, que é previsto pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.5)$$

onde T_s é a temperatura absoluta (K) da superfície e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$). A superfície descrita pela lei de Stefan-Boltzmann é chamada de radiador ideal ou corpo negro.

O fluxo de calor emitido por uma superfície real é menor do que a de um corpo negro à mesma temperatura e é dada por:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.6)$$

onde ε é uma propriedade radiante da superfície denominada emissividade. Com valores de $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propriedade fornece uma medida de quão eficazmente uma superfície emite energia em relação a um corpo negro. Ela depende fortemente do material da superfície e de seu acabamento.

A radiação também pode ser incidente sobre uma superfície a partir dos seus arredores. Independentemente da fonte de radiação, a taxa à qual toda radiação é incidente sobre uma unidade de área de superfície é definida como a irradiação G_λ (Figura 2.9).

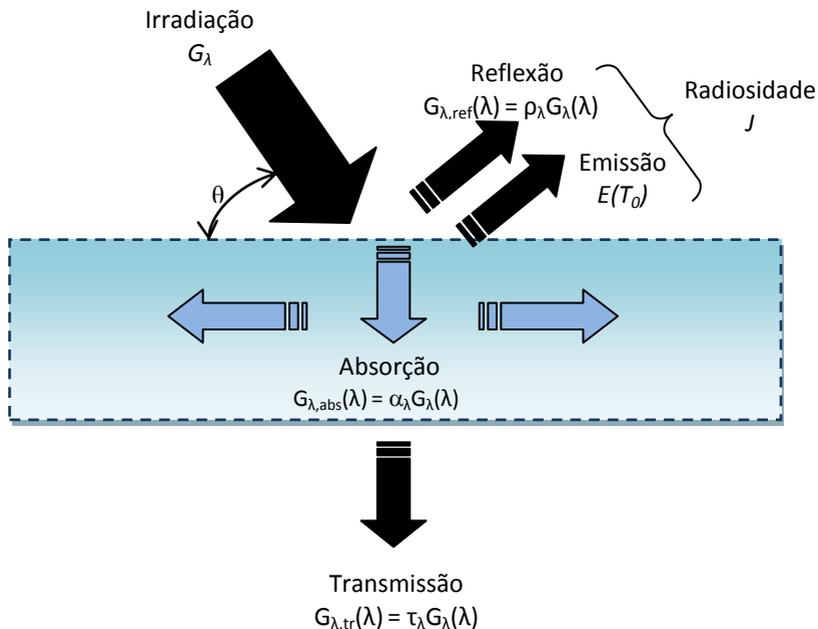


Figura 2.9 - Radiação incidente sobre uma superfície (RODRÍGUEZ, 2010).

Tal como é apresentado na Figura 2.9, ao incidir calor por radiação sobre um meio semitransparente, uma fração desta energia G_λ é refletida ($G_{\lambda,ref}$), outra fração é absorvida ($G_{\lambda,abs}$) e outra fração é transmitida ($G_{\lambda,tr}$) através do meio. A soma da emissão e da reflexão da radiação de um material é chamada de radiosidade (J). Os símbolos ρ , α e τ , correspondem à refletividade, absortividade e transmissividade, respectivamente. Pelo princípio de conservação de energia, tem-se que (BERGMAN et al., 2011):

$$G_\lambda = \rho_\lambda G_\lambda + \alpha_\lambda G_\lambda + \tau_\lambda G_\lambda \quad (2.7)$$

Da Equação (2.7) obtém-se:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \quad (2.8)$$

A Equação (2.8) considera a dependência espectral das propriedades radiativas. A relação entre a radiação incidente e a parcela transmitida define a transmissividade, dada pela Equação (2.9):

$$\tau_\lambda = \frac{G_{\tau,tr}}{G_\lambda} \quad (2.9)$$

A radiação eletromagnética compreende a corrente elétrica, as ondas de rádio, as micro-ondas, a radiação infravermelha, a luz visível, os raios ultravioleta, os raios X e os raios gama. O espectro electromagnético completo é delineado na Figura 2.10. A região intermediária do espectro, que inclui uma porção ultravioleta (UV) e toda a radiação visível e infravermelha (IV), é denominada térmica, pois afeta o estado térmico ou a temperatura da matéria.

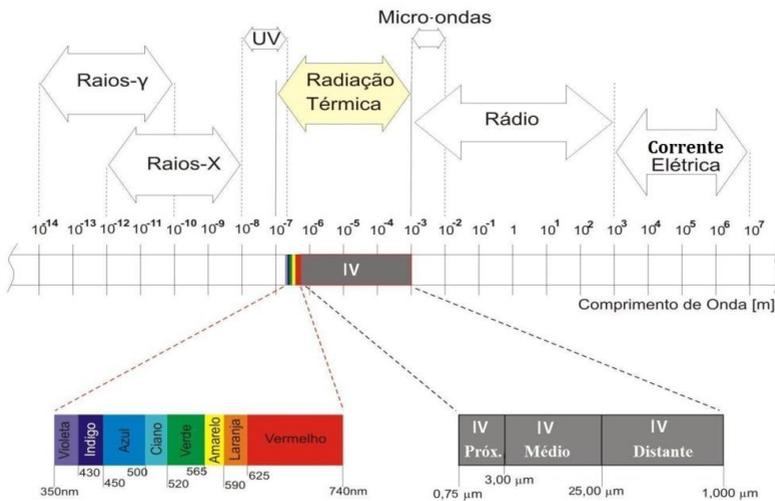


Figura 2.10 - Espectro eletromagnético (RODRÍGUEZ, 2010).

A radiação térmica emitida por uma superfície engloba uma gama de comprimentos de onda, como apresentado na Figura 2.10. Segundo Sakai e Hanzawa (1994) a radiação infravermelha pode ser dividida nas seguintes bandas: IR - próximo (0,75 - 3 μm), IR - médio (3 - 25 μm) e IR - distante (25 - 1000 μm).

2.2.3.3.1 Radiação infravermelha

Como a radiação infravermelha (IV) é uma onda eletromagnética, possui tanto uma dependência espectral como direcional. A dependência espectral precisa ser considerada já que a energia de um emissor é composta de diferentes comprimentos de onda, e a fração de radiação em cada banda é dependente de certos fatores tais como a temperatura do emissor, a emissividade, fenômenos de radiação, etc. O comprimento de onda no qual a radiação máxima ocorre é determinado pela temperatura do aquecedor. Esta relação é descrita pelas leis básicas para radiação de um corpo negro como a lei de Stefan-Boltzmann, apresentada anteriormente, a lei de Planck e a lei do deslocamento de Wien (SAKAI e HANZAWA, 1994).

A lei de Planck apresenta a distribuição espectral da radiação proveniente de uma fonte de corpo negro que emite 100% da radiação IV a uma dada temperatura (MODEST, 1993). Esse poder emissivo de um corpo negro, delimitado por um meio transparente com índice de refração n , pode ser expresso como:

$$E_{b\lambda}(T, \lambda) = \frac{2\pi hc_0^2}{n^2 \lambda^5 (e^{hc_0/n\lambda kT} - 1)} \quad (2.10)$$

onde k é conhecido como constante de Boltzmann (1.3806×10^{-23} J/K), n é o índice de refração do meio, λ é o comprimento de onda (μm), T é a temperatura da fonte (K), c_0 é a velocidade da luz (km/s) e h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J.s).

Por definição, o índice de refração no vácuo é $n = 1$. Para a maioria dos gases, o índice de refração é muito próximo da unidade. A Figura 2.11 mostra a curva de Planck, baseada na Equação (2.9), para um corpo negro em algumas temperaturas.

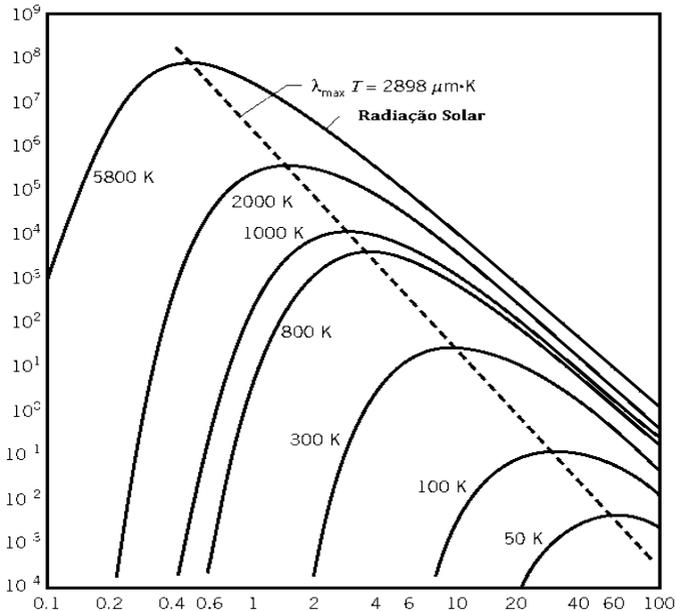


Figura 2.11 - Poder emissivo do corpo negro (adaptada de BERGMAN et al., 2011).

Em geral, o poder emissivo aumenta com um aumento de temperatura, enquanto que o comprimento de onda correspondente ao poder emissivo máximo se desloca em direção aos comprimentos de onda mais curtos.

A lei de deslocamento de Wien fornece o comprimento de onda no qual a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro atinge um máximo poder emissivo. O valor máximo das curvas pode ser determinado através da diferenciação:

$$\frac{d}{d(n\lambda T)} \left(\frac{E_{b\lambda}}{n^3 \lambda^5} \right) = 0 \quad (2.11)$$

As temperaturas da fonte de radiação IV necessárias para uma distribuição espectral desejada podem ser estimadas por (MODEST, 1993):

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (2.12)$$

onde T (K) é a temperatura da fonte e λ_{max} (μm) é o comprimento de onda de pico. Se a fonte de temperatura é conhecida, o comprimento de onda de pico pode ser obtido a partir da Equação (2.12). A linha tracejada na Figura 2.11 demonstra a relação entre a temperatura da fonte e o comprimento de onda de pico.

2.2.4 Secagem por radiação infravermelha

A radiação infravermelha é uma das mais antigas formas de tratamento térmico dos alimentos. Sabe-se que a radiação IV tem algumas vantagens sobre a condução e a convecção devido ao elevado coeficiente de transferência de calor, ao curto tempo de processo e ao baixo custo de energia (JUN et al., 2011).

Como o ar é transparente à radiação IV, os processos de secagem de alimentos podem ser feitos à temperatura ambiente e os equipamentos podem ser compactos e automatizados, com um alto grau de controle sobre os parâmetros do processo (NOWAK e LEWICKI, 2004). Além disso, as propriedades de radiação de materiais alimentares variam com a diminuição do teor de água e, conseqüentemente, aumentam sua refletividade e sua absorvidade diminui.

Nos alimentos, a radiação IV - próxima e IV - média são transferidas para as moléculas por vibração, enquanto que a IV - distante é principalmente por rotação. Embora não haja acordo completo sobre onde cada um dos subconjuntos começa e termina, os comprimentos de onda infravermelhos de 2.5 a 200 μm são os mais utilizados para os fins de secagem (JUN et al., 2011).

Segundo Sandu (1986) a água tem uma grande absorção da radiação IV nos comprimentos de onda em torno de 2.7 - 3.3, 6.0 e superior a 12.5 μm . As ligações O-H da água ao absorverem a energia IV passam a vibrar com a mesma frequência da radiação incidente provocando a evaporação da água. Isso explica por que esses comprimentos de onda são comumente utilizados em muitas situações para a secagem.

Quando a radiação IV atinge uma superfície, parte dela pode ser refletida (ρ), absorvida (α) ou transmitida (τ). Se a transmissividade é infinitesimal, o material irá refletir ou absorver IV, dependendo da natureza da radiação e das características da superfície do material.

A secagem por radiação artificial envolve a utilização de geradores de radiação IV, tais como lâmpadas elétricas especiais e painéis cerâmicos ou metálicos aquecidos por energia elétrica ou gás.

Na secagem por radiação natural (secagem solar), a radiação do sol é aproveitada, direta ou indiretamente para os fins de secagem.

A principal característica da secagem por IV é que ela não requer um meio de transmissão de energia a partir da fonte para o alvo. Os materiais a serem secos podem ser considerados como absorvedores de radiação IV. Portanto, para aumentar a eficiência da secagem, a radiação IV incidente e a energia absorvida pela água dos alimentos são considerações importantes. A Figura 2.12 apresenta a curva de absorção espectral IV para a água.

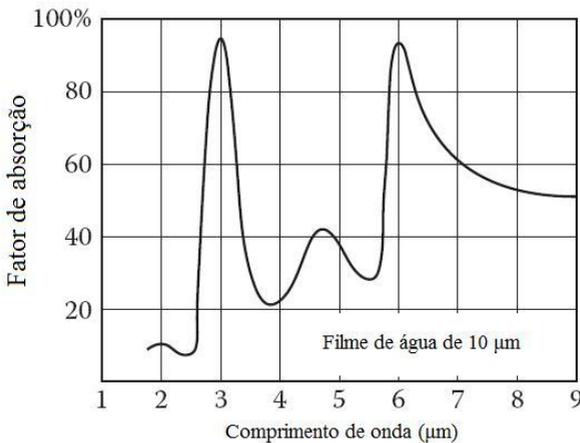


Figura 2.12 - Curva de absorção espectral IV para a água (adaptada de NINDO E MWITHIGA, 2011).

É por esta razão que os elementos industriais destinados à secagem de produtos por IV são concebidos para emitir energia em comprimentos de onda em torno de 3.5 μm ou acima de 5.5 μm. Isto não quer dizer que um emissor no intervalo de comprimento de onda de 3.5 - 5.5 μm não irá secar uma substância, apenas implica que a eficiência será muito menor, devido à diminuição da absorvidade da água.

Existem inúmeros secadores que são projetados para aproveitar essa absorção seletiva da radiação IV pelos materiais úmidos. O *Refractance Window* (NINDO et al., 2003a) é um exemplo de processo de secagem que utiliza energia térmica a partir de água quente, a temperaturas muito próximas da ebulição, para secar uma fina camada de material através da condução, convecção e radiação IV - médio.

2.2.4.1 Refractance Window

O processo de secagem por *Refractance Window* foi patenteado por Magoon (1986) e desenvolvido pela MCD Technologies Incorporated, por ele fundada em 1989 em Tacoma, Washington, EUA (ABONYI et al., 2001). Este método de secagem mantém a integridade de alimentos e ingredientes no que diz respeito à cor, sabor e nutrientes e tem sido estudado como um método potencial alternativo à liofilização, *spray dryer* e tambor de secagem para a produção de *flakes* e pós (EVRANUS, 2011).

O *Refractance Window (RW)* é um secador contínuo em que o produto a ser desidratado é espalhado sobre uma esteira plástica que flutua na superfície da água quente circulante em canaletas, como apresentado na Figura 2.13. Além de sua capacidade de lidar com uma gama diversificada de produtos líquidos, a sua aplicação prática é transformar frutas, legumes, ervas e outros produtos relacionados em pó e concentrados com alto valor agregado (NINDO e TANG, 2007).

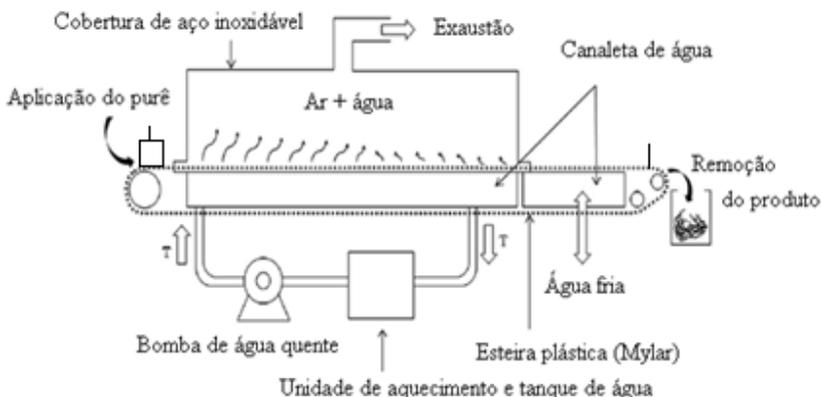


Figura 2.13 - Esquema do *Refractance Window* (adaptada de CAPARINO et al., 2012).

Uma planta comercial de secagem *RW* é composta por módulos com 6.0 m de comprimento e 2.4 m de largura cada, podendo estes ser adicionados para aumentar a produção. No início do módulo há uma seção de aplicação do produto líquido e no final uma seção de remoção de produtos secos. O processo *RW* utiliza água quente continuamente recirculada entre 95 e 98 °C a pressão atmosférica como fonte de calor para a desidratação (CLARKE, 2004).

O produto a ser seco é espalhado em uma esteira transportadora sem fim, que se estende por todo o equipamento, independentemente do número de módulos. A esteira é feita de um poliéster transparente (*Mylar*, do fabricante DuPont), o qual literalmente flutua na superfície da água e se move a velocidades de até 3 m/min, dependendo do regime de secagem necessário. A seção de arrefecimento na extremidade final do secador *RW* se destina a reduzir a temperatura do produto, parando a secagem e facilitando a remoção do produto (CLARKE, 2004).

A energia térmica para a secagem é oriunda da água quente e é transferida para o material úmido por condução e radiação, através da interface do filme, o qual é relativamente transparente à radiação infravermelha (NINDO et al., 2007). O equipamento industrial conta com um sistema de exaustão, para a remoção do vapor d'água. No *RW* os três modos de transferência de calor, ou seja, condução (q_{cond}), convecção (q_{conv}) e radiação (q_{rad}), contribuem com a secagem (NINDO e TANG, 2007). A Figura 2.14 apresenta um esquema da maneira pela qual o calor é transferido da circulação de água quente para o produto.

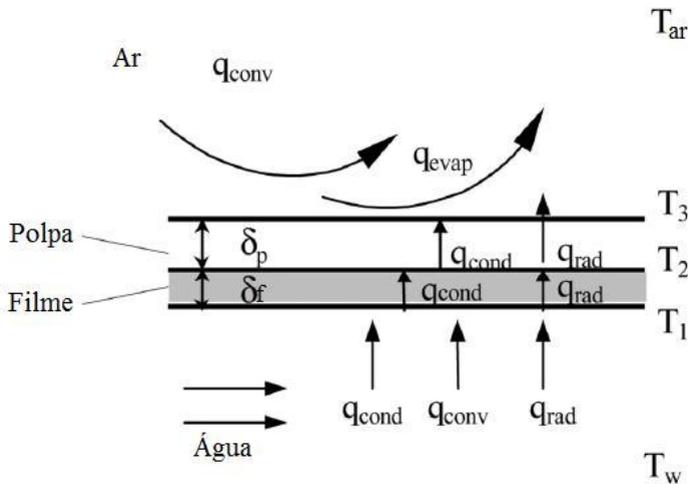


Figura 2.14 - Diagrama esquemático da transferência de calor na secagem por *Refractance Window* (adaptada de NINDO e TANG, 2007).

Segundo Magoon (1986), a interface do filme em contato íntimo com a água de um lado e com um material úmido do outro permite que ocorra a maior transmissão do infravermelho. Assim, ao se espalhar

um produto com alto teor de umidade na superfície do filme, a refração entre a interface filme-produto é minimizada, e a energia infravermelha, emitida pela água quente, é transmitida pela abertura da “janela de refractância”. À medida que o teor de umidade do produto diminui, a “janela” se fecha, e a transferência de calor por condução torna-se predominante (VEGA-MERCADO et al., 2001; KUDRA e MUJUMDAR, 2009). A convecção ocorre no interior da água de aquecimento e na superfície do alimento em contato com o ar ambiente, onde o calor é consumido devido ao arrefecimento evaporativo (NINDO e TANG, 2007).

A tecnologia *RW* tem um amplo potencial, uma vez que o equipamento é simples e relativamente barato em comparação com outros secadores. Para a secagem de uma quantidade semelhante de produto, o custo de um equipamento de *RW* é cerca de um terço do custo de um liofilizador, e seu consumo de energia é inferior a metade (OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012). Quando comparado aos secadores convencionais, Nindo et al. (2003a) demonstraram que o secador *RW* apresenta uma boa eficiência térmica (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Comparação da capacidade, temperatura do produto e eficiência térmica do *RW* com outros secadores (adaptada de NINDO e TANG, 2007).

Secadores	Capacidade típica (kg/h)	Temperatura típica do produto	Eficiência térmica
<i>Spray dryer</i>	1-30 m ⁻³	80-120 °C	51-20 %
Tambor	6-20 m ⁻²	120-130 °C	78-35 %
<i>RW</i>	1-10 m ⁻²	60-70 °C	77-52 %

Conforme a Tabela 2.3, esta técnica é caracterizada pela manutenção de uma temperatura relativamente baixa no interior do alimento (aproximadamente 70 °C) e tempos mais curtos de secagem, dependendo da espessura do produto (OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012). Esses atributos demonstram que a secagem por *RW* é particularmente eficiente para a preparação de frutas e vegetais, onde a ênfase é a retenção de componentes naturais e aspectos de qualidade (CLARKE, 2004).

Abonyi et al. (2001) ao compararem a influência dos métodos de secagem na retenção das características de qualidade de morango e

cenoura, obtiveram uma perda de carotenoides totais na cenoura de 8.7% no *RW*, comparável com os 4.0% na liofilização e muito inferior aos 56.1% no secador de tambor. A perda de vitamina C no morango não apresentou diferença significativa entre o *RW* e a liofilização. Entretanto, em estudo semelhante, Nindo et al. (2003b) obtiveram para aspargos a menor perda de vitamina C na secagem por *RW* do que nos outros métodos de secagem.

Diversas frutas e vegetais foram desidratados por *RW* com sucesso na retenção da cor. Estas incluem cenoura, abóbora, aspargo, mirtilo, morango, manga, abacate, entre outros (NINDO e TANG, 2007). No estudo de Abonyi et al. (2001), a cor da cenoura desidratada por *RW* foi comparável com a cenoura *in natura*, e o morango obteve a cor no *RW* comparável com a obtida no liofilizador.

Ochoa-Martinez et al. (2012), ao comparar a mudança de cor de fatias de manga na secagem por *RW* e secador de bandejas, obtiveram resultados semelhantes para ambas as técnicas de secagem e, em alguns casos, uma menor mudança de cor para o *RW*. Sob temperatura da água e do ar de secagem de 90 °C, as amostras de fatias de manga com 1 mm de espessura apresentaram um menor dano térmico e um menor tempo de secagem para o *RW*. No tempo de 60 min houve a redução do teor de água das amostras (kg de água / kg de sólido seco) para 0.02 com o *RW* e 0.4 com o secador de bandejas e a temperatura das fatias não passou de 72 °C para o *RW*, enquanto que para o secador de bandejas ficou próxima a do ar de secagem.

Amostras de açaí em pó foram obtidas por Pavan (2010) utilizando três métodos de secagem: *RW*, liofilização e secador de ar quente (secagem convectiva). Segundo a autora, todos os métodos produziram amostras secas com conteúdos de umidade baixos, tendo assim uma baixa atividade de água e uma estabilidade do produto relativamente boa durante o armazenamento. As isotermas de sorção de umidade foram bem ajustadas pelos modelos de GAB e BET para todos os tratamentos sendo que, para a secagem por *RW* e liofilização, as isotermas apresentaram menor adsorção de água para todas as atividades de água do que para o secador de ar quente.

Segundo Nindo e Tang (2007), na secagem por *RW* a contaminação cruzada não ocorre devido ao não contato do produto com o meio de transferência de calor, ao contrário dos secadores diretos. No estudo da redução de micro-organismos na secagem por *RW*, Nindo et al. (2003a) inocularam em purê de abóbora um coquetel de cultura microbiana composto por coliformes, *Escherichia coli* e *Listeria innocua* e realizaram a secagem por *RW*. O purê, contendo inicialmente

cerca de 10^6 UFC/ml, após a secagem obteve uma redução microbiana para o limite mínimo de detecção (< 5 UFC/ml) para todas as culturas. Este resultado sugere que o *RW* contribua eficientemente para a redução microbiana durante a secagem.

CAPÍTULO III

3 Materiais e Métodos

3.1 Matéria-prima

3.1.1 Polpa de tomate *in natura*

Os tomates utilizados neste estudo foram da variedade Santa Cruz Kada (*Lycopersicon lycopersicum*), conhecido como tomate paulista ou tomate salada e foram adquiridos no mercado local da cidade de Florianópolis/SC.

A seleção dos tomates foi realizada pelo grau de maturação, através de análise visual e teor de sólidos solúveis (°Brix). Na seleção, observou-se a firmeza dos frutos e sua cor, sendo utilizados tomates parcial ou totalmente vermelhos. O conteúdo de sólidos solúveis (°Brix) foi determinado utilizando-se um refratômetro óptico manual (Greers Ferry Glass, REF 107, Quitman, Arkansas, USA) com resolução de 0.2 °Brix, o qual permite a leitura na faixa de 0 a 90 °Brix.

As partes não comestíveis foram removidas e em seguida os tomates foram lavados em água corrente para remoção de sujidades. Os tomates foram cortados em pedaços com o auxílio de uma faca e processados com casca e sementes, sem adição de água, em liquidificador doméstico por 5 minutos. A polpa do tomate obtida foi peneirada em peneira comum de aço e utilizada imediatamente na secagem por *RW*.

3.1.2 Polpa industrializada

A polpa de tomate industrializada utilizada foi a Pomodoro da CICA (Cargil Agrícola S.A.), composta por tomate, açúcar, sal e acidulante ácido cítrico. A polpa em embalagem Tetra Pak laminada, fabricada em 16/04/2012 e com vencimento em 10/02/2013, foi adquirida em mercado local da cidade de Florianópolis/SC.

Após aberta a embalagem, a polpa foi homogeneizada e utilizada imediatamente no processo de secagem por *RW*.

3.2 Processo de secagem

Um aparato foi montado no Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI-EQA-UFSC) para a realização dos experimentos de *Refractance Window*, utilizando os princípios do equipamento comercial, com a diferença de operar em regime descontínuo. Na Figura 3.1 está apresentado um esquema do aparato experimental.

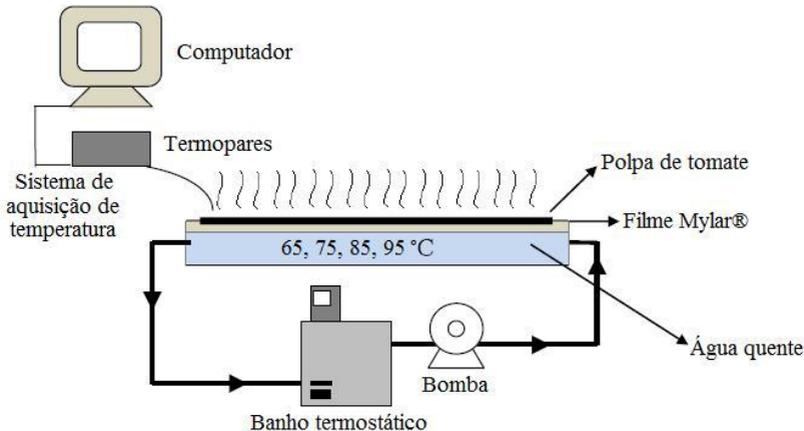


Figura 3.1 - Esquema do dispositivo experimental utilizado na secagem por RW.

O dispositivo consiste em um reservatório com água quente circulante, sobre o qual foi preso o filme de *Mylar*, com 0.25 mm de espessura. A água quente circulante foi proveniente de um banho termostático (DIST, modelo DI-921, Brasil). A polpa de tomate foi espalhada sobre o filme transparente com o auxílio de um espalhador (*doctor blade*), o qual permitia o ajuste da espessura de espalhamento da polpa. A fim de bloquear a transmissão do infravermelho o mesmo filme de *Mylar* foi pintado com tinta aerosol preta (Colorgin, alta temperatura).

O monitoramento da temperatura da polpa e da água de circulação do reservatório foi realizado através de termopares do tipo T (IOPE, modelo A-TX-TF-R-30AWG, Brasil) conectados a um sistema de aquisição de dados (Agilent, modelo 34970A, Malásia). Os termopares foram calibrados na faixa de temperatura de 0 a 100 °C com auxílio de um banho termostático (DIST, modelo DI-921, Brasil),

utilizando um termômetro de mercúrio aferido como padrão (Incotherm Porto Alegre, RS, Brasil).

Foram realizados 17 experimentos, como apresentado na Figura 3.2. Os experimentos utilizando polpa de tomate *in natura* foram conduzidos variando a temperatura da água do banho (65, 75, 85 e 95 °C), a espessura do espalhamento da polpa (2 e 3 mm) e o tipo de filme *Mylar* utilizado (transparente e pintado). Os experimento utilizando polpa de tomate industrializada foram realizados com água de aquecimento a 95 °C, espessura de espalhamento da polpa de 3 mm e filme *Mylar* transparente.

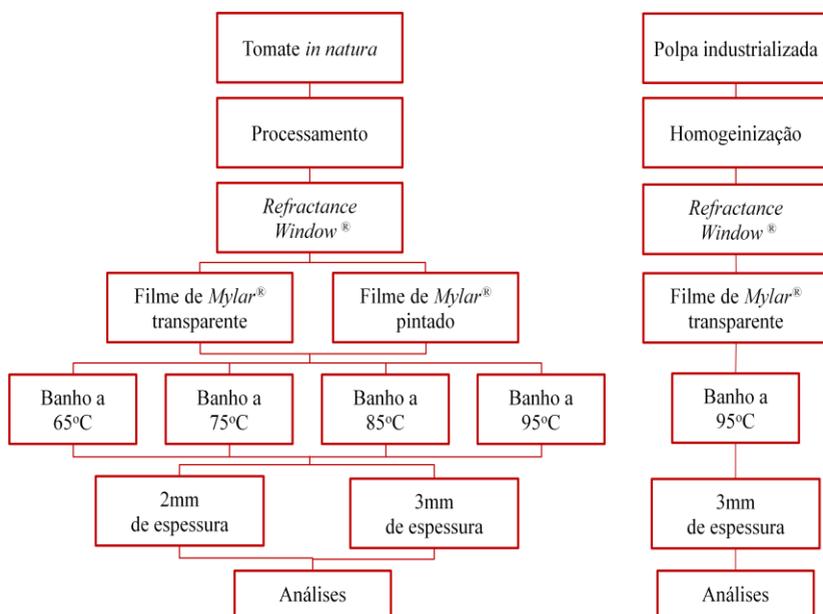


Figura 3.2 - Esquema dos experimentos realizados.

Os *flakes* obtidos na secagem foram triturados em moinho de facas para obtenção dos pós. Foram realizadas triplicatas dos experimentos para a realização de cada análise. As análises foram efetuadas imediatamente após o término da secagem e quando isto não era possível, as amostras foram acondicionadas em embalagens de polietileno com barreira a luz e seladas a vácuo.

3.2.1 Cinética de secagem

A cinética de secagem da polpa de tomate foi realizada em triplicata para cada temperatura de secagem e para cada espessura de espalhamento, nos filmes transparente e pintado. No decorrer da secagem, em intervalos de tempo estabelecidos, foram retiradas amostras de três lugares distintos do filme: da porção inicial, central e final da área espalhada. As amostras foram analisadas quanto ao teor de umidade pelo método gravimétrico em estufa à vácuo (TECNAL, TE-395) a 70 °C por 8 h, de acordo com a metodologia da A.O.A.C. 920.151 (2005). O percentual de umidade das amostras, em base seca, foi calculado segundo a Equação (3.1):

$$UBS = \frac{m_0 - m_f}{m_f} \times 100 \quad (3.1)$$

onde m_0 e m_f são as massas das amostras antes e depois da secagem em estufa, respectivamente.

3.3 Atividade de água

A atividade de água (a_w) foi determinada em higrômetro digital Aqualab (Decagon Devices, USA) calibrado com solução saturada de cloreto de potássio e água (a_w de 0.432 e 1.00, respectivamente).

Para cada experimento foram realizadas análises em triplicata da atividade de água da polpa de tomate e do pó obtido após a secagem.

3.4 Isotermas de sorção de umidade

As isotermas de sorção de água dos pós de tomate foram realizadas para os experimentos com tomate *in natura*, a 65 e 95 °C, com espalhamento de 2 e 3 mm nos filmes transparente e pintado. As isotermas foram determinadas pelo método estático em dessecadores, onde inicialmente os pós de tomates obtidos nos experimentos foram desidratados em estufa a vácuo a 70 °C por 8 horas. Após este período, duplicatas de aproximadamente 0.5 g foram pesadas em balança analítica (Shimadzu AY 220, ± 0.0001 g) e colocadas em recipientes contendo diferentes soluções saturadas de sais. Os sais utilizados e suas respectivas atividades de água estão apresentados na Tabela 3.1. Estes recipientes foram acomodados em estufa com temperatura controlada de

25 °C. Quando a umidade de equilíbrio das amostras foi atingida, o teor de umidade das mesmas foi então determinado conforme metodologia descrita no item 3.2.1.

Tabela 3.1 - Atividade de água de soluções salinas saturadas a 25 °C.

Solução salina saturada	Atividade de água
Cloreto de lítio	0.116
Cloreto de magnésio	0.327
Carbonato de Potássio	0.438
Nitrato de magnésio	0.529
Nitrato de sódio	0.645
Cloreto de sódio	0.753
Sulfato de amônio	0.810
Cloreto de potássio	0.843
Cloreto de bário	0.903

Os dados experimentais foram representados matematicamente pelo modelo de GAB (Guggenheim - Anderson - de Boer) apresentado na Equação (3.2) a seguir:

$$X_{eq} = \frac{kCx_m a_w}{(1 - ka_w)(1 - ka_w + Cka_w)} \quad (3.2)$$

onde X_{eq} é a umidade de equilíbrio, k é a constante de GAB relacionada à energia de interação das moléculas adsorvidas na multicamada, C é a constante relacionada à energia de interação das moléculas na monocamada e x_m é a umidade na monocamada.

A determinação dos parâmetros do modelo da Equação (3.2) foi realizada por regressão não linear através do programa MATLAB R2007a (Estados Unidos).

3.5 Solubilidade

A solubilidade (SOL) foi determinada 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 utilizando um dispositivo conforme apresentado na Figura 3.3.

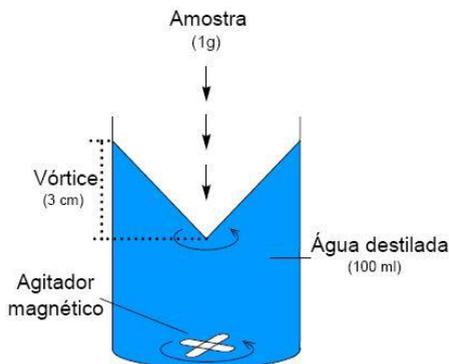


Figura 3.3 - Esquema do dispositivo de agitação utilizado no teste de solubilidade (DACANAL e MENEGALLI, 2009).

Adicionou-se ao béquer cerca de 100 mL de água destilada a 27 °C. Utilizando-se um agitador magnético, a agitação do líquido foi iniciada mantendo a altura do vórtice em torno de 3 cm. Com a agitação do líquido estabilizada, adicionou-se cerca de 1 g de amostra a uma altura de 2 cm do vórtice.

Imediatamente após a inserção de amostra, iniciou-se a contagem do tempo utilizando um cronômetro. Exatamente após 1 minuto de agitação, a solução foi filtrada com filtro de papel previamente pesado. O filtro de papel com o material retido foi seco em estufa a 105 °C, por 24 horas. A massa seca de amostra retida no filtro foi determinada e o percentual de solubilidade do pó foi calculado de acordo com a Equação (3.3):

$$SOL = 100 - \left[\frac{m_2}{m_1(1 - UBU)} \times 100 \right] \quad (3.3)$$

onde m_1 é a massa inicial da amostra, m_2 é a massa de amostra remanescente no filtro e UBU é o teor de umidade inicial da amostra analisada, em base úmida.

3.6 Tempo de instantaneização

O tempo de instantaneização é o tempo necessário para a submersão de todas as partículas de pó após serem colocadas sobre a

superfície de um líquido. O dispositivo utilizado para os testes do tempo de instantaneização é semelhante ao apresentado na Figura 3.4.

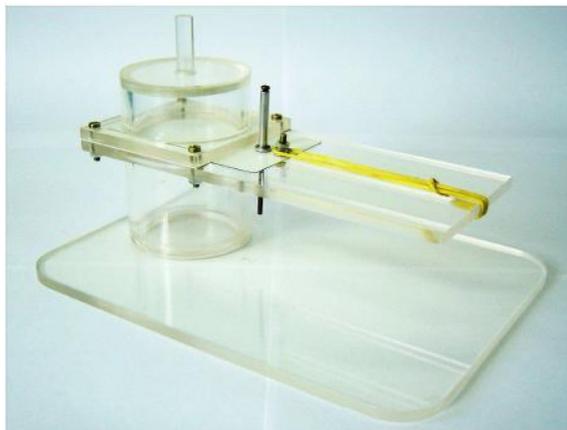


Figura 3.4 - Fotografia do aparato utilizado para determinar o tempo de instantaneização (DACANAL, 2005).

O aparato consiste de um recipiente de 80 cm³ para o líquido e um compartimento para a amostra de pó, localizado acima do recipiente que contém o líquido. Uma lâmina, que possui um sistema de acionamento por meio de um elástico, forma a base da seção para a amostra em pó. O aparato desenvolvido foi uma adaptação de Dacanal (2005) baseada no esquema apresentado por HogeKamp e Schubert (2003), exibido na Figura 3.5.

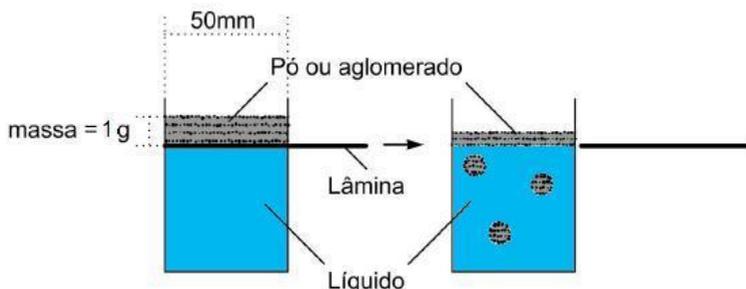


Figura 3.5 - Esquema do funcionamento do aparato utilizado para determinar o tempo de instantaneização (adaptada de HOGKAMP e SCHUBERT, 2003).

A determinação do tempo de instantaneização foi realizada em triplicata através do seguinte procedimento: preencheu-se o recipiente reservado para o líquido com 80 ml de água destilada, a uma temperatura entre 27 e 29 °C, e tampou-se o reservatório com a lâmina presa ao sistema elástico. Então, pesou-se 1 g de amostra e o distribuiu sobre a superfície da lâmina. O teste foi iniciado com o acionamento do sistema elástico. Com o deslocamento da lâmina a amostra de pó entrou em contato com o líquido e o tempo de instantaneização foi determinado com o auxílio de um cronômetro. O teste finalizou quando ocorreu a imersão completa da camada de partículas.

3.7 Cor

As medidas de cor foram expressas em termos de luminosidade L^* ($L^* = 0$ preto e $L^* = 100$ branco) e da cromaticidade definida por a^* ($+a^* =$ vermelho e $-a^* =$ verde) e b^* ($+b^* =$ amarelo e $-b^* =$ azul). Os valores de L^* , a^* e b^* foram determinados com o colorímetro MiniScan (EZ, HunterLab, USA) e a escala utilizada foi a CIELAB.

As amostras analisadas foram colocadas em placa de petri e esta sobre uma superfície branca (cerâmica de calibração). Cinco leituras foram realizadas nas polpas *in natura* e industrializada, nos pós e nos pós reidratados. A diferença de cor (ΔE^*) foi obtida através da Equação (3.4).

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

onde ΔE^* é a variação da cor das amostras com relação à polpa original, e o subscrito “0” representa a cor original da polpa.

3.8 Termografia infravermelha

As imagens termográficas foram realizadas na câmera FLIR, modelo T360 (Suécia), com precisão de ± 0.1 °C e intervalo de espectro infravermelho de 7.5 a 13 m. As imagens foram analisadas no próprio software da câmera (Testo IRSoft Software).

Em todas as coletas, a câmera termográfica foi posicionada a uma distância padronizada e a emissividade (ε) utilizada para este experimento foi de 0.98 para todas as regiões analisadas devido ao grande teor de umidade das amostras.

3.9 Consistência de Bostwick

A consistência de Bostwick é uma medida rápida da viscosidade do produto, determinada pelo escoamento de uma quantidade estabelecida de material através de uma calha de aço inoxidável com fundo graduado.

Esta análise foi realizada para a polpa de tomate industrializada e para seu pó reconstituído. 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 foi efetuada diretamente da escala graduada em cm.

3.10 Transmissividade dos filmes *Mylar*

A transmissividade do filme de *Mylar*, transparente e pintado com tinta preta, foi avaliada utilizando um espectrômetro FI-IR (Oriol MIR 8025TM Modular IR Fourier Espectrômetro) o qual está baseado no interferômetro de Michelson. Este aparato experimental é composto por uma fonte de radiação infravermelha Oriol/800007 Si (faixa espectral de emissão: 1.7 μm - 28 μm), o sistema modular MIR 8025TM, o sistema de detecção Oriol/DTGS 80008 e o sistema de aquisição e tratamentos de dados (software MIRMAT 8000TM e plataforma MATLAB).

O esquema do funcionamento do espectrômetro está apresentado na Figura 3.6. A análise consiste na incidência de um feixe de radiação, proveniente da fonte, sobre uma amostra dos filmes. A quantidade de energia transmitida pelos filmes é captada pelo sistema de detecção e o resultado é comparado com a radiação captada pelo mesmo sistema sem a presença da amostra. Esta é uma metodologia de análise indireta e a relação entre a radiação incidente e a transmitida foi calculada utilizando a Equação (2.9).

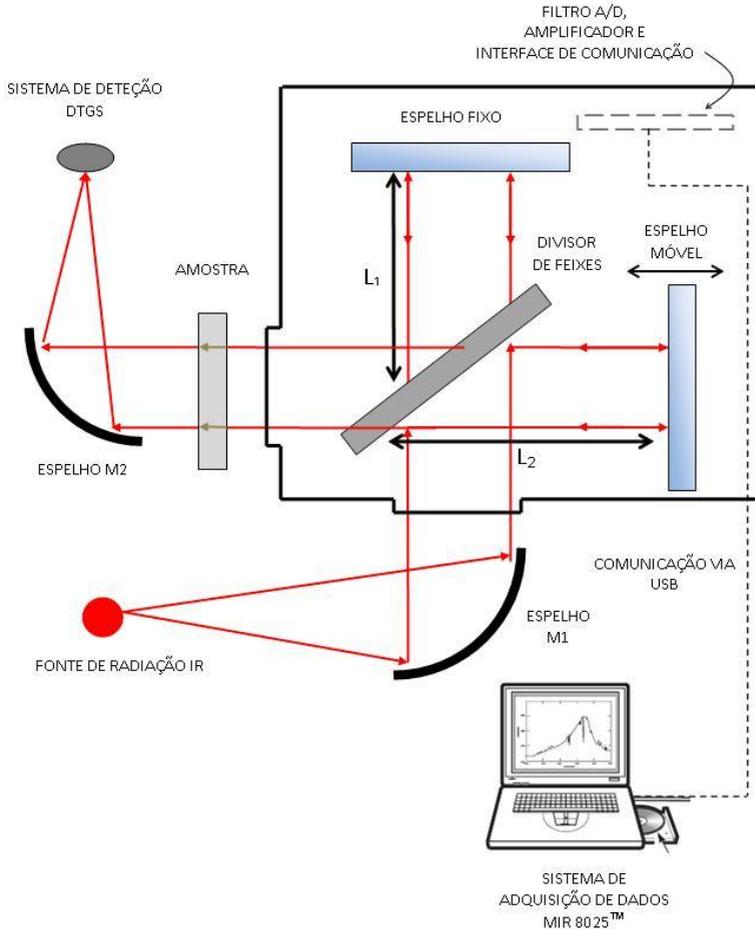


Figura 3.6 - Esquema do aparato experimental do espectrômetro modular MIR8025™ (RODRÍGUEZ, 2010).

O feixe de radiação infravermelha que é admitido pelo espectrômetro é um feixe colimado utilizando um espelho parabólico e convexo. Este feixe ao incidir sobre o divisor de feixes é dividido da seguinte forma: metade da energia é transmitida ao espelho fixo e metade é refletida ao espelho móvel. Esta radiação ao incidir em cada um dos espelhos é refletida combinando-se de volta no divisor de feixes. A combinação pode resultar em uma interferência destrutiva ou construtiva, dependendo da distância percorrida por cada um dos feixes,

sendo $2.L_1$ e $2.L_2$, a distância ida e volta desde o divisor de feixes até o espelho fixo e móvel, respectivamente. A diferença do caminho óptico percorrido para um comprimento de onda particular define o grau de interferência. Uma vez construído o interferograma é utilizado um algoritmo FFT, o qual permite converter o sinal relativo à diferença de caminho óptico percorrido num espectro de frequências (RODRÍGUEZ, 2010).

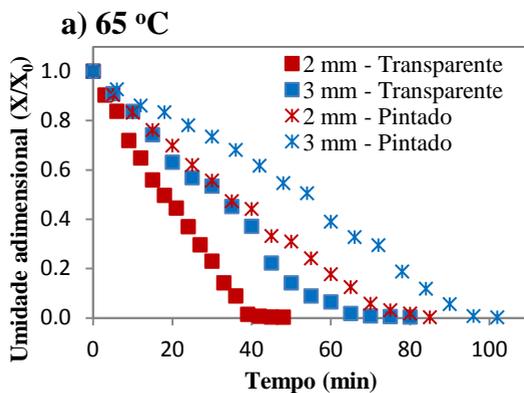
CAPÍTULO IV

4 Resultados e Discussão

4.1 Polpa de tomate *in natura*

4.1.1 Cinética de secagem

Na Figura 4.1 estão apresentadas as curvas de secagem da polpa de tomate *in natura* para os filmes *Mylar* transparente e pintado, com espessura de espalhamento de 2 e 3 mm e temperatura de água de aquecimento de: a) 65 °C, b) 75 °C, c) 85 °C e d) 95 °C. Pode ser observado que, para todas as temperaturas de água de aquecimento, o tempo de secagem para obtenção dos pós de tomate foi menor para o filme *Mylar* transparente, independentemente da espessura de espalhamento da polpa.



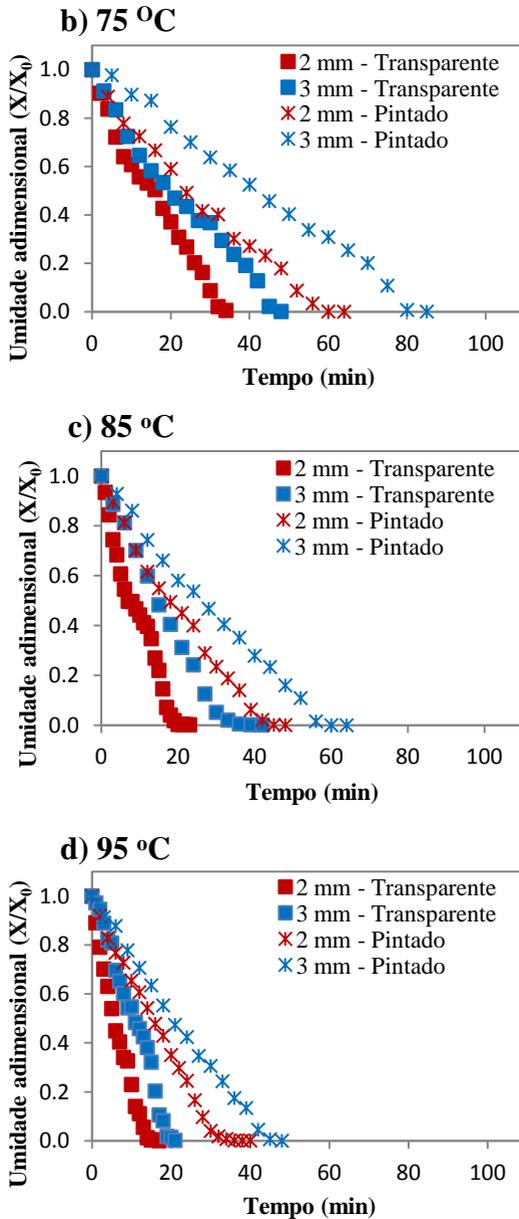


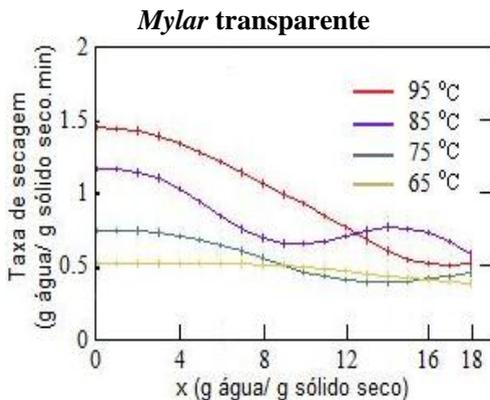
Figura 4.1 - Curvas de secagem da polpa de tomate *in natura*.

Ao avaliar a influência do filme *Mylar* transparente e pintado é possível observar que, para todas as temperaturas da água de aquecimento, o tempo de secagem foi praticamente duas vezes menor para o filme transparente quando comparado com o filme pintado. Este dado demonstra a contribuição da radiação infravermelha no processo de secagem por *Refractance Window*, uma vez que o filme *Mylar* foi pintado de preto a fim de bloquear essa radiação.

O menor tempo de secagem, para diminuir a umidade da polpa de 19 para 0.2 g água/ g sólido seco, foi de 15 minutos utilizando o filme *Mylar* transparente, com água de aquecimento de 95 °C e espessura de espalhamento de 2 mm (Figura 4.1 d). Para um mesmo filme *Mylar* utilizado é possível observar que o tempo de secagem se altera para as diferentes temperaturas da água de aquecimento e pela espessura de espalhamento da polpa.

Além das variáveis do processo de secagem por *RW*, a umidade inicial da amostra a ser desidratada também influencia o tempo de secagem. Abonyi et al. (2001), para reduzir a umidade de cenouras de 89.4 para 9.9 % (base úmida), obtiveram um tempo de secagem de 3.5 minutos por *RW* com água de aquecimento de 95 °C e espessura de espalhamento de 1 mm. Para uma mesma temperatura da água de aquecimento do *RW*, Nindo et al. (2003a) obtiveram um tempo de secagem de 7.5 minutos na secagem de polpa de abóbora com 0.65 mm de espessura de espalhamento, com uma redução na umidade de 85.2 para 3.8 % (base úmida).

A taxa de secagem das polpas de tomate para todas as variáveis do processo estão apresentadas na Figura 4.2.



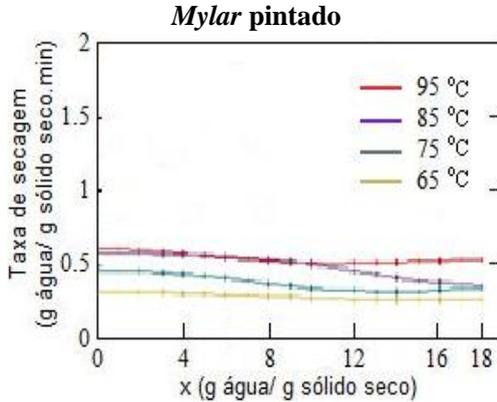
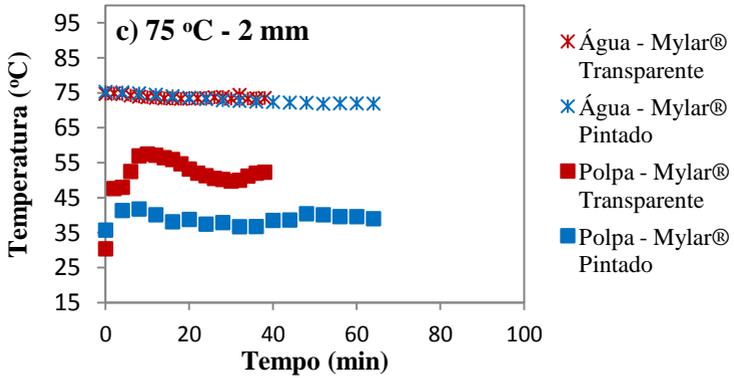
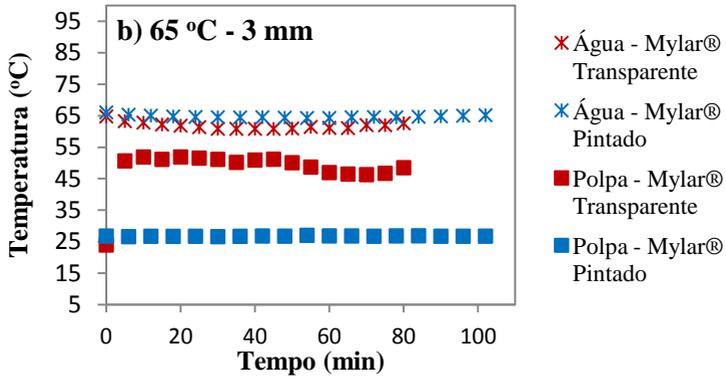
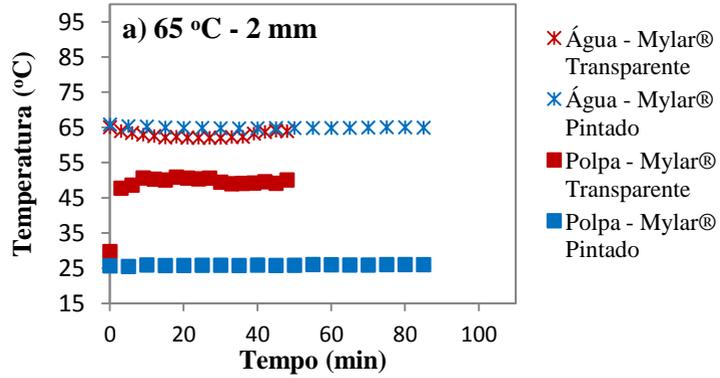


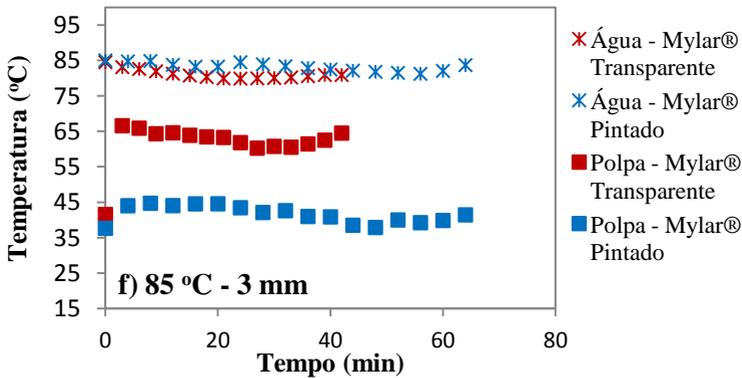
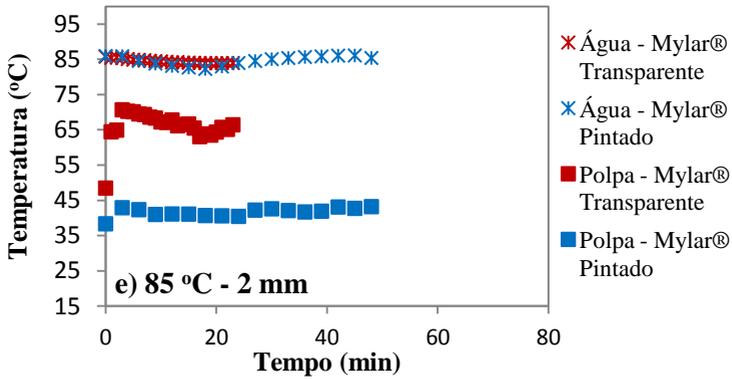
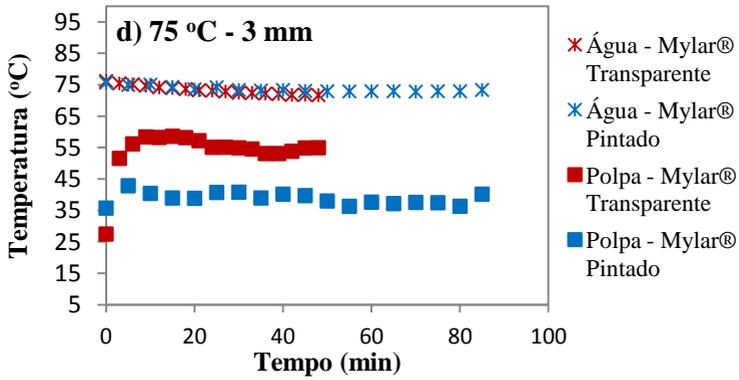
Figura 4.2 - Taxas de secagem da polpa de tomate *in natura* com espessura de espalhamento de 2 mm.

A taxa de secagem da polpa de tomate com o Mylar pintado apresentou-se constante durante quase toda secagem, enquanto que para o Mylar transparente o comportamento foi decrescente. A diminuição da temperatura da água de aquecimento reduziu a taxa de secagem. O mesmo comportamento foi apresentado por Nindo et al. (2003a) na secagem de polpa de abóbora por *RW*. O autor ainda sugere que a taxa de secagem pode ser melhorada através da elevação da temperatura da água de aquecimento acima de 95 °C com a utilização de produtos químicos para elevar o ponto de ebulição.

A espessura de espalhamento da polpa de tomate também interferiu na taxa de secagem, sendo que o aumento da espessura de espalhamento da polpa diminuiu a taxa de secagem. O mesmo comportamento foi encontrado por Ochoa-Martínez et al. (2012) ao demonstrarem que a taxa de secagem de fatias de manga por *RW* é influenciada pela espessura das fatias, sendo que as fatias de manga com 2 mm de espessura levaram o dobro do tempo para atingir a mesma umidade final das fatias de 1 mm.

Segundo Abonyi et al. (2002), a circulação contínua de água quente por baixo da pequena espessura do filme *Mylar* aliada a fina camada de polpa a ser desidratada facilitam o processo de secagem. Durante a secagem da polpa ocorre o resfriamento evaporativo, impedindo que a temperatura da mesma alcance a temperatura da água de aquecimento. A Figura 4.3 apresenta a variação da temperatura da polpa e da água de aquecimento para todos os processos de secagem por *RW*.





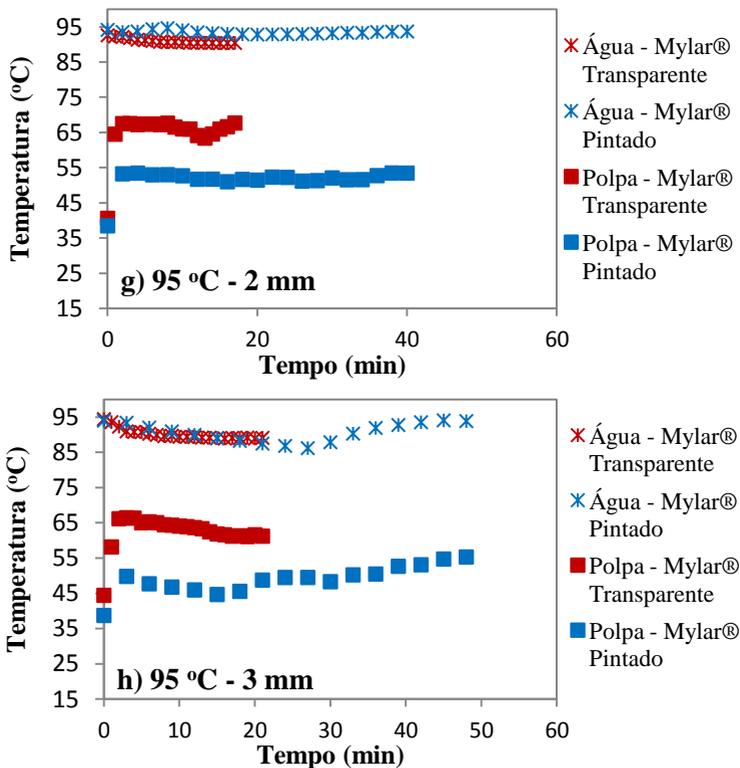


Figura 4.3 - Perfil da temperatura da polpa e da água de aquecimento durante a secagem por RW.

Na secagem com o filme *Mylar* pintado a temperatura da polpa alcançou uma menor temperatura do que quando o *Mylar* transparente foi utilizado. A falta de transmissão da radiação IV no processo com o filme pintado pode ter ocasionado uma menor transferência de calor para a polpa, resultando numa menor temperatura da mesma e um maior tempo de secagem.

Para a secagem com o filme *Mylar* transparente a temperatura da polpa ficou abaixo da temperatura da água de aquecimento, sendo que o aumento da temperatura da água de aquecimento gerou um aumento no gradiente de temperatura entre a água de aquecimento e a polpa.

Para todos os experimentos observa-se um rápido aquecimento da polpa no início da secagem, seguido por um período em que a

temperatura da polpa permaneceu praticamente constante e leve aumento da temperatura da mesma no final da secagem. Através da Figura 4.3 é possível observar as mudanças na temperatura da polpa de tomate *in natura* de acordo com os períodos de secagem apresentados no item (2.2.2).

No início da secagem a rápida elevação da temperatura da polpa pode ser explicada pela fina camada da mesma utilizada nos experimentos e pelo elevado gradiente de temperatura entre a polpa e o filme. Em seguida, após atingir uma determinada temperatura, estabeleceu-se o equilíbrio entre a transferência de calor da água de aquecimento para a polpa e a transferência de massa devido à evaporação da umidade da superfície da polpa, fazendo com que a temperatura permaneça constante. No final da secagem a migração de umidade do interior para a superfície da polpa é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. Como a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa, ocorre o aumento da temperatura do produto.

Nindo et al. (2003a) observaram o mesmo comportamento de temperatura ao secarem polpa de abóbora em uma planta industrial de RW com água de aquecimento de 95 °C e 0.65 mm de espalhamento. Os autores relataram que durante a secagem a temperatura da polpa não ultrapassou os 71 °C, mesmo valor observado por Pavan (2010) na secagem de polpa de açaí com as mesmas condições de processo. Abonyi et al. (2001) e Caparino et al. (2012) encontraram valores semelhantes, obtendo uma temperatura máxima de 72 °C para polpa de cenoura e 74 °C para a polpa de manga, respectivamente.

Para avaliar a influência de cada variável do processo na umidade adimensional foi realizada uma regressão linear múltipla com a umidade dimensional como resposta e a espessura de espalhamento da polpa, o tipo de filme *Mylar* e o tempo como variáveis explicativas, para cada uma das temperaturas fixadas. O modelo utilizado para as regressões está apresentado na Equação (4.1):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (4.1)$$

onde y é a umidade adimensional, x_1 é a espessura de espalhamento ($x_1 = 1$ para 3 mm e $x_1 = 0$ para 2 mm), x_2 é o tipo de filme *Mylar* utilizado ($x_2 = 1$ para transparente e $x_2 = 0$ para pintado) e x_3 é o tempo em minutos.

Mantendo-se as outras variáveis constantes, o valor de $\hat{\beta}_1$ é o aumento esperado na umidade adimensional quando a espessura de espalhamento muda de 2 para 3 mm, $\hat{\beta}_2$ é o aumento esperado na umidade adimensional quando o filme muda de pintado para transparente e $\hat{\beta}_3$ é o aumento esperado na umidade adimensional quando o tempo aumenta em 1 minuto. A Tabela 4.1 apresenta os valores obtidos para esses parâmetros.

Tabela 4.1 - Intervalos de confiança (IC) de 95 % para os coeficientes dos modelos de regressão.

Modelos		$IC \beta_0$	$IC \beta_1$	$IC \beta_2$	$IC \beta_3$	R^2
°C	IC	Intercessão	Espessura	Filme	Tempo	
65	Estimado	0,9522	0,1847	-0,2495	-0,0126	0.91
	Inferior	0,8986	0,1381	-0,2967	-0,0135	
	Superior	1,0058	0,2313	-0,2022	-0,0117	
75	Estimado	0,9453	0,1860	-0,2695	-0,0155	0.89
	Inferior	0,8862	0,1380	-0,3205	-0,0168	
	Superior	1,0044	0,2340	-0,2184	-0,0143	
85	Estimado	0,9201	0,1984	-0,2900	-0,0215	0.86
	Inferior	0,8506	0,1387	-0,3516	-0,0235	
	Superior	0,9895	0,2582	-0,2283	-0,0194	
95	Estimado	0,9681	0,1817	-0,3485	-0,0291	0.84
	Inferior	0,8905	0,1216	-0,4182	-0,0320	
	Superior	1,0457	0,2419	-0,2788	-0,0262	

O coeficiente de determinação (R^2) para os modelos ajustados variou de 84 a 91 %, indicando que os modelos explicaram grande parte da variação dos dados observados. Para cada temperatura da água de aquecimento, a espessura de espalhamento da polpa e o tipo de filme *Mylar* utilizado causaram alterações estatisticamente significativas na umidade das amostras ($p < 0.001$ para todas as temperaturas).

Para a espessura de espalhamento os coeficientes obtidos para diferentes temperaturas não são estatisticamente diferentes, pois todos os intervalos obtidos para β_1 tem pontos em comum. Logo, a mudança

de temperatura não afeta o efeito esperado da espessura de espalhamento na umidade adimensional.

Para o filme, embora a estimativa do coeficiente do modelo para 95°C seja bastante inferior às demais, os quatro intervalos possuem pontos em comum. Portanto, a mudança de temperatura não afeta o efeito esperado da mudança de filme pintado para transparente na umidade adimensional.

Para o tempo, foram observados quatro intervalos distintos e sem interseção. Quanto maior a temperatura, menor o coeficiente β_3 e, portanto, maior a queda da umidade adimensional para cada acréscimo na unidade de tempo, mantendo os outros fatores constantes.

O processo de secagem da polpa de tomate por *RW* resultou na formação de *flakes* que, para a realização das análises, foram triturados em moinho de facas formando os pós de tomate, como apresentado na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Amostra após a secagem por *RW* (*flakes*) e após a trituração em moinho de facas (pó).

4.1.2 Teor de umidade

Os teores de umidade dos pós de tomate obtidos na secagem por *Refractance Window* estão apresentado na Figura 4.5. A umidade dos pós variou de 0.003 a 0.058 g água/ g sólido seco.

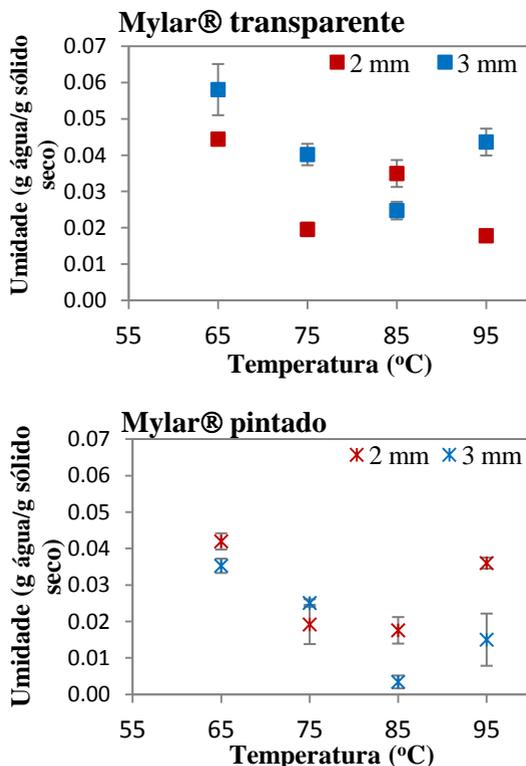


Figura 4.5 - Teor de umidade dos pós de tomate.

O maior valor de umidade do pó de tomate (5.8 % base seca) foi obtido na secagem com água de aquecimento a 65 °C, espessura de espalhamento de 3 mm e filme *Mylar* transparente. Valor semelhante foi obtido por Caparino et al. (2012) na secagem de manga por *RW* com temperatura da água de aquecimento entre 95 e 98 °C e espessura de espalhamento da polpa de 0.5 a 0.7 mm. Os pós de manga da secagem por *RW* apresentaram umidade de 0.05 kg água/ kg sólido seco, mesmo valor encontrado para os outros tipos de secadores (liofilização, *spray dryer* e secador de tambor) utilizados pelos autores.

Pavan (2010) obteve para amostras de açaí um maior teor de umidade na secagem por *RW* (2,2 % bs) quando comparado com liofilizador (1,5 % bs) e secador de ar quente (1,3 % bs). Durante a secagem por *RW* o ar ambiente está em contacto com o produto e, por conseguinte, a umidade relativa do ar não é controlada. Segundo a

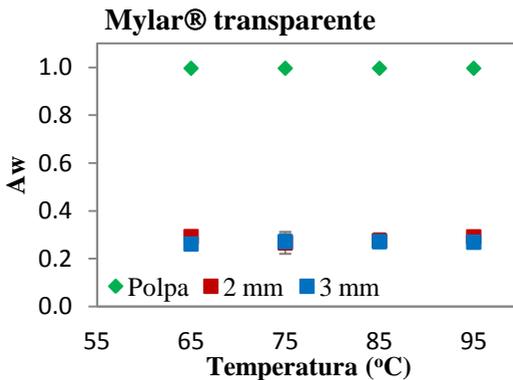
autora o maior teor de umidade dos pós de açaí obtidos por *RW*, com temperatura da água de aquecimento de 95 °C, pode ter sido causado pelo tempo de secagem insuficiente ou pela alta umidade relativa do ar.

Segundo Goula e Adamopoulos (2005), o teor de umidade dos pós diminuiu com o aumento da temperatura de entrada do ar e com a diminuição na taxa de fluxo do ar de secagem. Os autores obtiveram na secagem de tomate por *spray dryer* em ar desumidificado um teor de umidade dos pós variando entre 0.032 e 0.104 g água/ g sólido seco.

Machado (2010) relatou que a umidade dos pós de tomate secos por *spray dryer* variou de 4.2 a 8.5 %, sendo que quanto maior o gradiente de temperatura entre o ar de secagem e o produto, maior foi a taxa de transferência de calor entre as partículas, resultando numa maior evaporação de água do produto.

4.1.3 Atividade de água

Na análise da atividade de água dos pós de tomate foram obtidos valores em torno de 0.2, com pouca variação entre todos os experimentos avaliados. A Figura 4.6 apresenta os valores obtidos para a atividade de água dos pós e das polpas de tomate nos diferentes processos realizados.



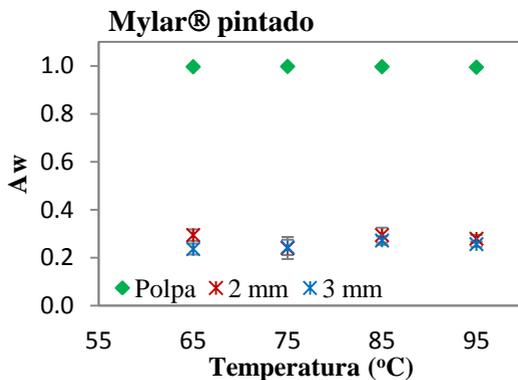


Figura 4.6 - Atividade de água dos pós e das polpas de tomate.

A atividade de água das polpas de tomate ficou próxima da unidade devido ao fato de o tomate ser constituído basicamente por 94% de água (USDA, 2012). Para os pós de tomate a a_w ficou em torno de 0.2. Pavan (2010) e Caparino et al. (2012) obtiveram o mesmo valor de a_w em seus estudos de secagem por *RW* de pós de açaí e manga, respectivamente.

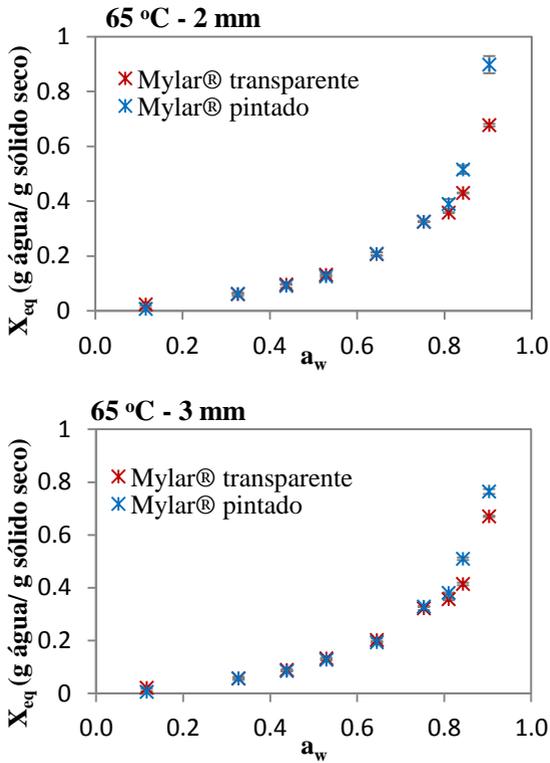
Os resultados obtidos para a a_w dos pós de tomate foram maiores aos encontrados por Machado (2010) no estudo de pós de tomate produzidos por *spray dryer*. A autora obteve pós com atividades de água entre 0.107 e 0.132, o que pode ser atribuído às maiores temperaturas de secagem utilizadas no processo (160 a 180 °C), sendo que quanto maior a temperatura do ar de secagem, menor a atividade de água dos pós.

Como apresentado no item 2.2.1, a perda da qualidade dos alimentos secos começa a aumentar em $a_w > 0.3$, sendo que alimentos com $a_w > 0.6$ estão mais propensos ao crescimento de microorganismos, bolores e leveduras (RAHMAN, 1995). Portanto, os valores da atividade de água encontrados para a secagem de polpa de tomate por *RW* são favoráveis para a garantia da estabilidade dos pós.

Os resultados da análise estatística ANOVA com 3 fatores fixos e sem interação aplicada aos dados experimentais da a_w dos pós de tomate não apresentaram efeito sobre a espessura de espalhamento da polpa, filme *Mylar* ou temperatura da água de aquecimento utilizados ($p = 0.89, 0.90$ e 0.90 , respectivamente).

4.1.4 Isotermas de sorção de umidade

Os dados experimentais da sorção de umidade dos tomates em pó obtidos na secagem por *RW* com água de aquecimento de 65 e 95 °C, espessura de espalhamento de 2 e 3 mm e filme *Mylar* transparente e pintado estão apresentadas na Figura 4.7.



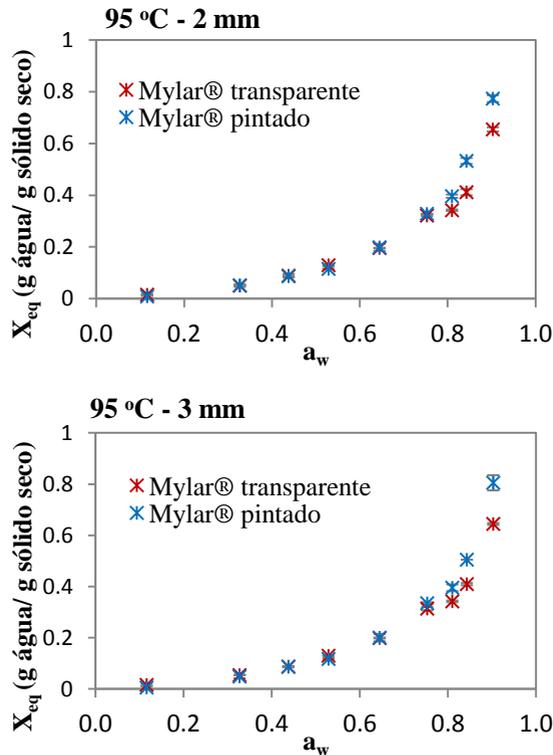


Figura 4.7 - Valores experimentais das isotermas de sorção dos pós de tomate.

As isotermas de sorção demonstram um aumento do conteúdo de umidade de equilíbrio com o aumento da atividade de água, a uma temperatura constante. Assim como relatado por Goula et al. (2008), em seu estudo com pós de tomate obtidos por *spray dryer*, para atividades de água baixas e intermediárias, a chamada região de sorção da multicamada, o teor de umidade aumentou linearmente com a_w , enquanto que para atividades de água mais elevadas, a chamada região de condensação capilar, o conteúdo de água aumentou rapidamente com a_w .

Segundo Rahman (1995) o aumento da temperatura resulta numa diminuição da umidade de equilíbrio, sendo que, para alguns materiais, valores da atividade de água acima de 0.7 resultam numa inversão do efeito da temperatura, ou seja, a umidade de equilíbrio aumenta com a

temperatura. Como relatado pelo autor, nas isotermas de sorção dos pós de tomate utilizando o filme *Mylar* transparente, pode ser observado que a umidade de equilíbrio, para as duas espessuras de espalhamento, teve uma pequena diminuição quando se elevou a temperatura de 65 para 95 °C.

As isotermas de sorção de umidade dos pós de tomate foram bem ajustadas pelo modelo de GAB com coeficientes de correlação (R^2) superior a 0.99, assim como encontrado por Giovanelli et al. (2002) e Goula et al. (2008), em seus estudos com pó de tomate. Como as isotermas obtidas neste trabalho apresentaram comportamentos semelhantes para as variáveis do processo, na Figura 4.8 estão apresentadas, como exemplo, as curvas ajustadas para a temperatura da água de secagem de 95 °C, espessura de espalhamento de 2 mm e filmes *Mylar* pintado e transparente.

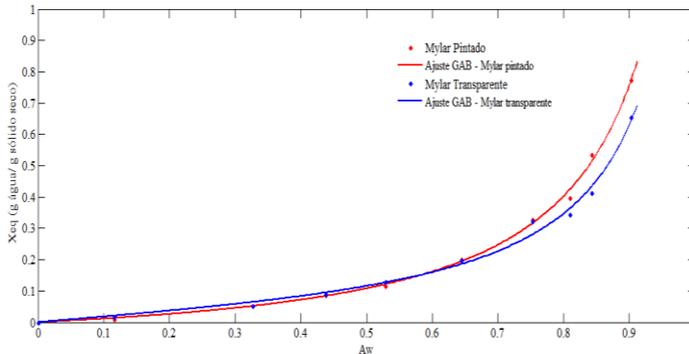


Figura 4.8 - Modelo de GAB ajustado aos dados experimentais da secagem com água de aquecimento de 95 °C e espessura de espalhamento de 2 mm.

As curvas ajustadas pelo modelo de GAB foram do tipo III pela classificação de Brunauer e segundo Rahman (1995) são características de alimentos que possuem componentes solúveis em água cristalina, como açúcar ou sal. Tonon et al. (2009) também relataram isotermas do tipo III para pós de açaí obtidos por *spray dryer* devido, segundo os autores, à presença de agentes de transporte.

A Tabela 4.2 apresenta os valores dos parâmetros de GAB ajustados para todos os experimentos realizados na obtenção das isotermas.

Tabela 4.2 - Parâmetros de ajuste do modelo de GAB e coeficiente de correlação das amostras.

Mylar	TS (°C)	Espessura espalhamento	Parâmetros de GAB			
			<i>C</i>	<i>K</i>	x_m	R^2
Transparente	65	2 mm	2.335	0.963	0.093	0.995
		3 mm	2.199	0.964	0.092	0.993
	95	2 mm	2.004	0.960	0.093	0.992
		3 mm	2.013	0.957	0.093	0.994
Pintado	65	2 mm	1.181	0.951	0.137	0.998
		3 mm	1.134	0.963	0.113	0.997
	95	2 mm	1.173	0.944	0.140	0.998
		3 mm	1.153	0.974	0.108	0.998

(TS) Temperatura de secagem; (x_m) g água/ g sólido seco.

De acordo com os dados apresentados, para um mesmo tipo de filme *Mylar* utilizado, as variáveis do processo de secagem não interferem nos valores obtidos para os parâmetros do modelo de GAB. Os parâmetros *C* e x_m apresentaram valores um pouco menor para o filme *Mylar* pintado quando comparado com o filme transparente.

O teor de umidade de todas as amostras de pó de tomate ficou abaixo do seu teor de umidade da monocamada (x_m), indicando uma boa estabilidade do produto. Para o filme *Mylar* transparente, o teor de umidade da monocamada foi menor do que o obtido para o *Mylar* pintado, sugerindo que os pós obtidos com o uso do filme transparente possuem menor capacidade de absorção de água, sendo mais estáveis.

Os parâmetros *C* e *K* do modelo de GAB estão relacionados com a energia de interação das moléculas adsorvidas na mono e multicamadas, respectivamente. Para todos os experimentos o parâmetro *K* apresentou os mesmos valores. Já o parâmetro *C* apresentou um maior valor para os pós obtidos com o filme transparente, sugerindo uma maior energia de interação das moléculas na monocamada dos pós de tomate.

Goula et al. (2008), no ajuste das isotermas de sorção de pó de tomate por *spray dryer*, obtiveram um valor semelhante para o

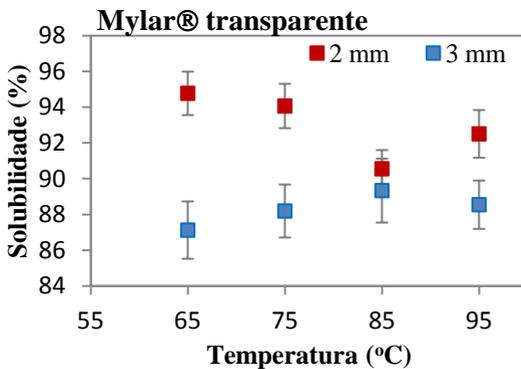
parâmetro K (0.81) enquanto que para o parâmetro C o valor foi muito superior (18.83), porém, segundo os autores, dentro dos limites obtidos para a maioria dos alimentos. Os mesmos autores encontraram para a umidade da monocamada um valor de 0.2 (g água/ g sólido seco), valor um pouco superior ao encontrado neste trabalho e por Giovanelli et al. (2002) (0.11 g água/ g sólido seco).

De acordo com os dados apresentados na Figura 4.7 a espessura de espalhamento da polpa de tomate não apresentou efeitos sobre a umidade de equilíbrio dos pós obtidos. Para verificar se este parâmetro ou as outras variáveis do processo interferem estatisticamente na umidade de equilíbrio dos pós de tomate foi realizada uma ANOVA com 3 fatores fixos e sem interação.

Os resultados da análise estatística aplicadas aos dados experimentais das isotermas de sorção dos pós de tomate não apresentaram diferenças significativas sobre a espessura de espalhamento da polpa, filme *Mylar* ou temperatura da água de aquecimento utilizados ($p = 0.90, 0.58$ e 0.90 , respectivamente).

4.1.5 Solubilidade

Na Figura 4.9 estão apresentadas as solubilidades dos pós de tomate obtidos na secagem por *RW* com variação da temperatura da água de aquecimento, espessura de espalhamento da polpa e tipo de filme *Mylar*.



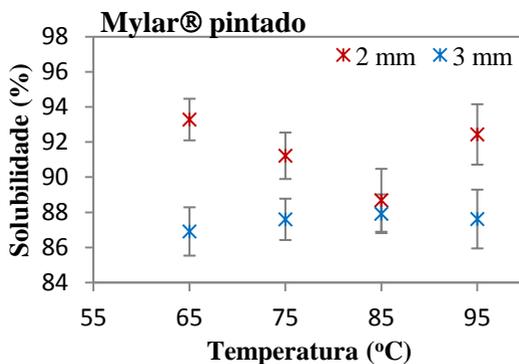


Figura 4.9 - Solubilidade dos pós de tomate para as diferentes variáveis do processo de secagem por *RW*.

Pode ser observado na Figura 4.9 que todos os pós foram bastante solúveis, com resultados variando de 86 a 94 %. Estes valores estão de acordo com vários trabalhos encontrados na literatura sobre solubilidade de pós obtidos por diferentes métodos de secagem. Caparino et al. (2012), comparando a solubilidade de pós de manga com tamanho de partícula de 180 a 250 μm , obtiveram uma solubilidade de 90, 89, 95 e 94 % para os pós obtidos por *RW*, liofilização, *spray dryer* e secador de tambor, respectivamente.

Assim como no presente estudo, Machado (2010) relatou que a solubilidade dos pós de tomate obtidos por *spray dryer* com diferentes temperaturas do ar de secagem, vazões de alimentação da polpa e concentrações de maltodextrina, variou de 89 a 96%. Valor semelhante foi encontrado por Dacanal e Menegalli (2009) ao utilizar suco de acerola em pó produzido por *spray dryer* e com maltodextrina como agente carreador, apresentando solubilidade de 94%.

Entretanto, alguns trabalhos relataram uma baixa solubilidade do pó de tomate obtido por *spray dryer*. Sousa et al. (2008) e Liu et al. (2010) obtiveram uma solubilidade do pó de tomate de 26 e 60 %, respectivamente. Sousa et al. (2008) atribuíram essa menor solubilidade devido ao baixo teor de açúcar dos tomates, em comparação com a maioria das frutas, e a presença de substâncias lipossolúveis tais como os carotenóides.

A solubilidade obtida para os filmes *Mylar* transparente e pintado, independentemente das demais variáveis, apresentaram pouca diferença. Para os dois tipos de filme, a elevação da temperatura da água

de aquecimento ocasionou uma leve mudança na solubilidade dos pós, porém com comportamentos diferentes para as duas espessuras de espalhamento da polpa. Enquanto que para os pós com 3 mm de espalhamento a solubilidade aumentou com o aumento da temperatura de 65 °C para 85 °C, para os pós com 2 mm a solubilidade diminuiu nesse mesmo intervalo de temperatura. Para a temperatura de 95 °C a solubilidade teve um leve aumento para a espessura de 2 mm e uma leve diminuição para a espessura de 3 mm. Esse comportamento pode ser explicado pela falta de controle do tamanho das partículas dos pós obtidos pela trituração dos *flakes* resultantes na secagem por *RW*.

Goula et al. (2004) também verificaram uma diminuição na solubilidade do tomate em pó obtido por *spray dryer*, quando foram utilizadas temperaturas de secagem mais altas. De acordo com os autores, temperaturas elevadas podem resultar em maior desnaturação das proteínas, afetando a solubilidade do produto.

Para todos os processos, a solubilidade dos pós com 2 mm de espalhamento da polpa foi superior a dos pós com 3 mm. Por serem mais finos, os *flakes* obtidos pela espessura de espalhamento de 2 mm podem ter gerado um pó com partículas menores e com formatos diferentes. Segundo Cuq et al. (2011), as partículas formadoras dos pós possuem características intrínsecas (tamanho, forma, composição, densidade, porosidade e cristalinidade) que interferem diretamente nas características da superfície como composição, rugosidade e solubilidade.

Para avaliar estatisticamente a influência da temperatura da água de aquecimento, a espessura de espalhamento da polpa e o tipo de filme *Mylar* nos valores da solubilidade, foi realizado uma Análise de Variância (ANOVA) com 3 fatores fixos e sem interação.

Através dos resultados obtidos verifica-se o efeito da espessura de espalhamento na solubilidade ($p = 0.001$), mas ausência de significância estatística para os fatores temperatura da água de aquecimento e tipo de filme *Mylar* ($p = 0.65$ e 0.19 , nesta ordem). Utilizando o método de Tukey foram obtidos os intervalos para as médias das diferenças dos dois níveis de espessura de espalhamento, com 95% de confiança global.

A estimativa da diferença entre as médias da solubilidade para espessura de espalhamento da polpa entre 3 mm - 2mm apresentou valor de - 4.09, com limite inferior do intervalo de confiança de - 5.85, limite superior deste mesmo intervalo de -2.32 e significância do intervalo (p) de 0.0002.

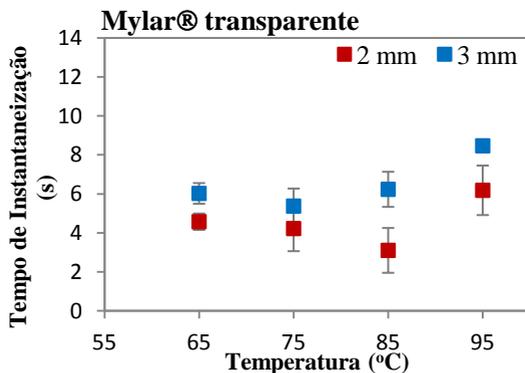
Os valores obtidos no teste de Tukey revelam que a média da solubilidade para a espessura de 3 mm é menor do que a média para a espessura de 2 mm, pois o intervalo contém apenas valores negativos. O valor de p demonstra que há diferenças estatisticamente significativas ao nível de 5 % para as duas espessuras de espalhamento.

Portanto, para os diferentes processos de secagem por *RW* realizados, somente a espessura de espalhamento da polpa tem efeito sobre a solubilidade dos pós de tomate, de modo que os pós obtidos com espessura de espalhamento da polpa de 2 mm são mais solúveis do que os obtidos com 3 mm de espessura.

4.1.6 Tempo de instantaneização

O processo de dispersão de um pó seco num líquido pode ser dividido em quatro passos: umedecimento, imersão, dispersão e dissolução. As propriedades físicas de um pó associada a estas quatro etapas são usualmente chamadas de propriedades de instantaneização. Um pó possui boas propriedades de instantaneização quando todas as etapas do processo de dispersão são concluídas dentro de alguns segundos (HOGEKAMP e SCHUBERT, 2003).

A Figura 4.10 apresenta os valores obtidos para o tempo de instantaneização dos pós de tomate na secagem por *Refractance Window*



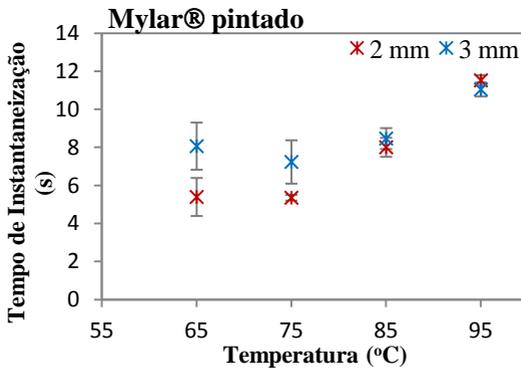


Figura 4.10 - Tempo de instantaneização dos pós de tomate.

O tempo de instantaneização dos pós de tomate variou de 3 a 11 segundos. Os valores obtidos foram muito inferiores aos encontrados por Machado (2010) na secagem de polpa de tomate por *spray dryer* com diferentes concentrações de maltodextrina. Segundo a autora todas as amostras apresentaram a formação de grumos quando em contato com a água, o que resultou em tempos de instantaneização relativamente longos, variando entre 6 e 12.6 minutos.

Os baixos tempos de instantaneização apresentados para os pós de tomate estão de acordo com os valores obtidos por Dacanal (2005) no estudo da granulação de suco de acerola desidratado em leito fluidizado. Segundo o autor o tempo de instantaneização dos pós de acerola variou de 5.6 a 8 segundos, tendo apenas influência da temperatura e velocidade do ar de fluidização.

Os dados apresentados na Figura 4.10 demonstram que o tempo de instantaneização dos pós de tomate foi menor para o filme de *Mylar* transparente. Na análise de cada filme utilizado verifica-se que a espessura de espalhamento da polpa de 3 mm resultou em maiores tempos de instantaneização, o mesmo observado nos experimentos realizados com a temperatura da água de aquecimento de 95 °C.

Assim como Machado (2010), algumas amostras apresentaram a formação de grumos no contato com a água, resultando no aumento do tempo de instantaneização das mesmas. Segundo Hoge Kamp e Schubert (2003) partículas secas do pó, antes de serem dispersas, podem ser cobertas por uma camada de líquido viscosa formada na superfície do líquido que impede o fluxo por capilaridade entre os poros.

A Análise de Variância (ANOVA) com 3 fatores fixos e sem interação realizada para o tempo de instantaneização apresentou efeito principal de todos os fatores considerados: espessura de espalhamento ($p = 0.015$), temperatura da água de aquecimento ($p = 0.002$) e tipo de filme de *Mylar* ($p = 0,001$).

Devido ao efeito das variáveis no tempo de instantaneização, foi necessário efetuar comparações múltiplas para os níveis de cada um dos fatores do modelo. Para tal, o método de Tukey com 95% de confiança global (8 comparações) foi utilizado e os resultados estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resultados da comparações múltiplas do método de Tukey.

Intervalo	<i>Dif</i>	<i>Li</i>	<i>Ls</i>	<i>p</i>	
3 - 2 mm	1.5675	0.4366	2.6984	0.0115	*
75 - 65 °C	-0.4675	-2.6635	1.7285	0.9127	
85 - 65 °C	0.4375	-1.7585	2.6335	0.9267	
95 - 65 °C	0.3290	1.0940	5.4860	0.0046	*
85 - 75 °C	0.9050	-1.2910	3.1010	0.6056	
95 - 75 °C	3.7575	1.5615	5.9535	0.0018	*
95 - 85 °C	2.8525	0.6565	5.0485	0.0118	*
Transparente - Pintado	-2.6125	-3.7434	-1.4816	0.0004	*

* Diferenças estatisticamente significativas ao nível de 5%

(*Dif*) estimativa da diferença entre as medias, (*Li*) limite inferior do intervalo de confiança para a diferença, (*Ls*) limite superior deste mesmo intervalo e (*p*) significância deste intervalo.

O teste de Tukey apresentou diferenças estatisticamente significativas ao nível de 5% para a espessura de espalhamento da polpa, para a temperatura da água de aquecimento de 95 °C e para o filme de *Mylar* utilizado.

Pela Tabela 4.3 pode ser observado que os pós obtidos com espessura de espalhamento da polpa de 3 mm possuem tempo médio de instantaneização maior do que para a espessura de espalhamento de 2 mm (intervalo 3-2 mm sempre positivo). Os pós secos com água de aquecimento de 95 °C apresentam tempo médio de instantaneização maior que as demais temperaturas (intervalos 95-65, 95-75 e 95-85 °C

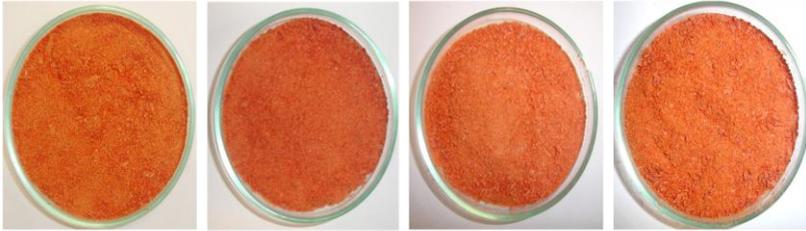
sempre positivos). Ao mesmo tempo, a utilização do filme *Mylar* transparente resultou em um menor tempo médio de instantaneização quando comparado com o filme pintado (intervalo transparente-pintado sempre negativo).

4.1.7 Cor

Na Figura 4.11 estão apresentadas as imagens dos pós obtidos na secagem por *RW* com diferentes temperaturas da água de aquecimento, espessura de espalhamento da polpa e para os filmes *Mylar* (a) transparente e (b) pintado.

a) Mylar® transparente

2 mm



3 mm



65 °C

75 °C

85 °C

95 °C

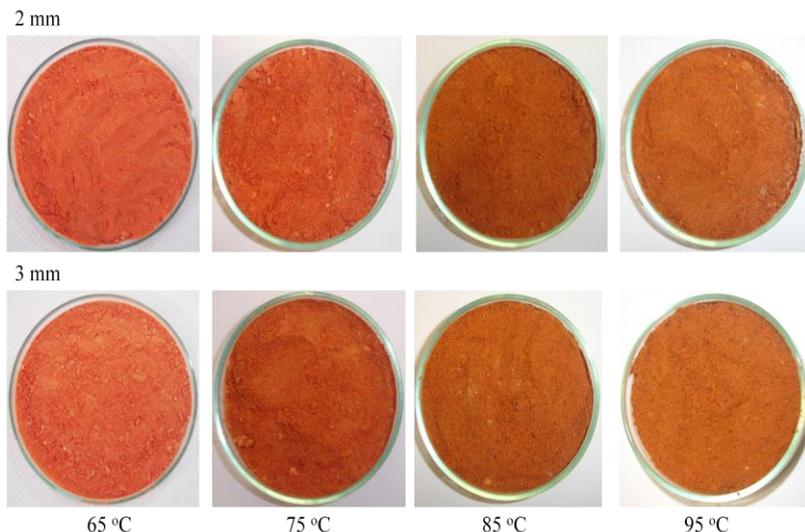
b) Mylar® pintado

Figura 4.11 - Imagens dos pós de tomate obtidos na secagem por *RW* para as diferentes variáveis do processo.

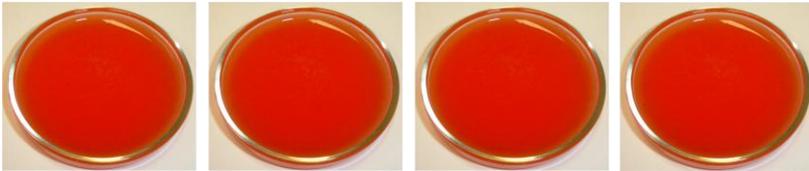
Pode ser observado na Figura 4.11 que para o *Mylar* transparente todas as amostras apresentaram coloração vermelha intensa, mesmo para as temperaturas mais elevadas, o que pode ser atribuído à boa retenção do conteúdo de licopeno no processo de secagem por *RW*. Abonyi et al. (2002) também relataram que na obtenção de pós de cenoura o processo de secagem por *RW* resultou numa menor perda de carotenoides totais (8.7 %) quando comparado aos outros métodos de secagem. Entretanto, Machado (2010) obteve uma baixa retenção de licopeno no processo de secagem de polpa de tomate por *spray dryer* resultando em pós com coloração pouco intensa.

De acordo com as imagens apresentadas, a espessura de espalhamento da polpa de tomate parece não interferir na coloração dos pós obtidos. Por outro lado, quando utilizado o filme *Mylar* pintado, os pós de tomate apresentaram coloração acastanhada para as temperaturas mais altas. Este fato pode ser explicado pela maior duração da secagem utilizando este tipo de filme, levando a uma exposição prolongada da polpa de tomate a temperaturas elevadas.

Cernîsev (2010) demonstrou que a taxa de escurecimento de tomates, utilizando um secador de túnel com diferentes temperaturas do ar de secagem, depende essencialmente da temperatura do produto durante o processo, sendo que taxa de escurecimento aumentou à medida que a intensidade do processo de secagem também aumentou. Topuz et al. (2009) relataram que a taxa de escurecimento de pós de páprica apresentou os menores valores na secagem por *RW* e o maiores valores para o secador de bandejas.

A reconstituição ou reidratação dos pós de tomate foi realizada com a adição de água destilada para obtenção do mesmo teor de umidade da polpa de tomate *in natura*. A Figura 4.12 apresenta as imagens das polpas de tomate *in natura* e das amostras obtidas pela reidratação dos pós da Figura 4.11.

a) Polpa de tomate *in natura*



b) Mylar® transparente

2 mm - Reconstituído



3 mm - Reconstituído



65 °C

75 °C

85 °C

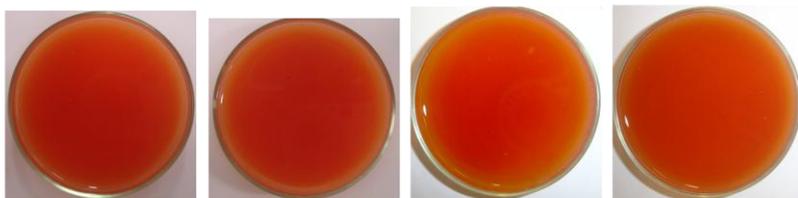
95 °C

c) Mylar® pintado

2 mm - Reconstituído



3 mm - Reconstituído



65 °C

75 °C

85 °C

95 °C

Figura 4.12 - Imagens das polpas de tomate *in natura* e dos pós de tomate reidratados.

Os pós de tomate reidratados apresentaram modificações em relação à polpa *in natura* de acordo com as variações ocorridas nos pós durante a secagem. Pode ser observado que os pós que apresentaram coloração acastanhada na secagem com o filme *Mylar* pintado ao serem reidratados resultaram em uma coloração mais alaranjada, enquanto que para o *Mylar* transparente os pós reidratados apresentaram coloração semelhante à polpa original.

Nindo et al. (2003b), ao reidratarem pós de aspargo obtidos por *RW*, relataram uma coloração mais clara com uma redução do verde quando comparado com aspargos frescos, mas mesmo assim com uma boa aparência. Abonyi et al. (2002) demonstraram que as alterações na cor de amostras secas depende tanto do método de secagem quanto do produto utilizado. Os autores obtiveram na secagem por *RW* pós de morango com coloração próxima dos obtidos na liofilização e pós de cenoura, que ao serem reidratados, foram comparáveis ao purê original.

Os parâmetros L^* , a^* e b^* foram utilizados para calcular a diferença de cor (ΔE^*) dos pós e dos pós reidratados com relação à

polpa de tomate *in natura*. Os valores obtidos para ΔE^* estão apresentados na Figura 4.13.

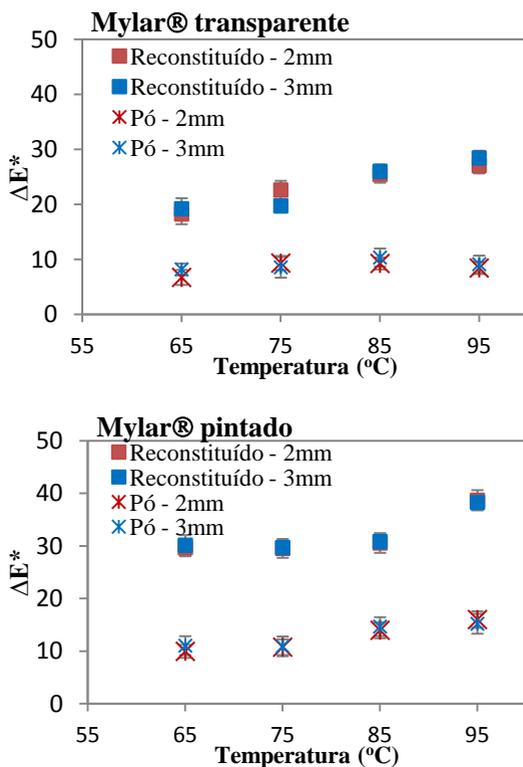


Figura 4.13 - Diferença de cor (ΔE^*) dos pós de tomate e dos pós reidratados com relação à polpa original.

A Figura 4.13 demonstra que a variação da espessura de espalhamento não interfere na diferença de cor dos pós e dos pós reidratados. Como esperado, os maiores valores de ΔE^* foram encontrados para os pós e os pós reidratados quando o filme *Mylar* pintado foi utilizado e para temperaturas mais elevadas. Apesar dos pós de tomate apresentarem uma solubilidade elevada (item 4.1.5), a não solubilização completa do pó pode ter contribuído para os maiores valores de ΔE^* obtidos na reidratação dos mesmos.

Valor semelhante de ΔE^* foi encontrado por Nindo et al. (2003b) na secagem de aspargos. Os pós de aspargo, com relação ao material fresco, apresentaram um maior valor de ΔE^* para o secador de bandejas (26.0) seguido pela secagem por *RW* (22.4) e pela liofilização (9.6). Ochoa-Martínez et al. (2012) também obtiveram para pós de manga um menor valor de ΔE^* para a técnica de *RW* do que para secador de bandejas, relacionando essa diferença no valor de ΔE^* com o tempo de secagem dos processos (30 minutos para o *RW* e 240 minutos para o secador de bandejas).

Os valores da luminosidade (L^*), das coordenadas cilíndricas croma (C^*) e do ângulo de tonalidade (h°), estão apresentados na Tabela 4.4.

O ângulo de tonalidade (h°) apresentou valores variando entre 41.31 e 49.91 para os pós e entre 46.26 e 57.74 para os pós reidratados. Um valor de h° igual a zero indica tonalidade vermelha enquanto que h° igual a 90 indica tonalidade amarela. Os valores de h° obtidos para os pós de tomate e para os pós reidratados estão de acordo com as colorações das imagens apresentadas nas Figuras 4.11 e 4.12, onde os pós apresentaram coloração entre vermelho e vermelho acastanhado e os pós reidratados uma coloração vermelha e alaranjada.

O parâmetro C^* , que indica a saturação ou pureza da cor, apresentou valores entre 41.69 e 45.69 para os pós e entre 54.58 e 65.68 para os pós reidratados. Uma cor é tanto mais saturada quanto menos quantidade de branco ou preto tiver. Assim é possível dizer que tanto os pós quanto os pós reidratados apresentaram uma saturação média. O parâmetro L^* está associado ao brilho da amostra, sendo que valor de L^* igual a 0 indica preto e L^* igual a 100 indica branco. Os valores obtidos para L^* variaram entre 48.48 e 53.01 para os pós e entre 28.91 e 39.30 para os pós reidratados.

Os pós de tomate obtidos neste estudo apresentaram uma coloração com qualidade superior aos obtidos por Machado (2010) na secagem de polpa de tomate por *spray dryer*. Os pós apresentaram tonalidades variando entre rosado e bege (h° entre 38 e 56) e elevada luminosidade, com L^* variando entre 54.5 e 69.5. Para C^* a autora obteve valores entre 16,4 e 22,8 indicando que os pós apresentaram cor pouco saturada e, neste caso, com maior quantidade de branco, sendo atribuído à presença da maltodextrina no pó.

Tabela 4.4 - Parâmetros de cor da polpa, do pó e do pó reidratado.

T	Parâmetros	Polpa	Mylar® Transparente			Mylar® Pintado				
			2 mm	3 mm	3 mm	2 mm	3 mm	3 mm		
			Pó	Pó R.	Pó	Pó R.	Pó	Pó R.		
65 °C	L^*	45.4	51	34.9	52.8	32.7	53	35.3	51.9	35.2
	C^*	42	45	55.3	44.2	54.6	43.9	61.3	43.9	61.7
	h^0	38.9	41	46.8	42.3	46.3	43.5	53.8	43.8	54.2
75 °C	L^*	45.4	53	32.8	52	32.4	50.1	39.3	52.7	35
	C^*	42	43	58.4	43.6	54.6	45.7	62.9	44.4	65.7
	h^0	38.9	43	49.2	43.5	47.4	45.1	57.7	46.7	56.8
85 °C	L^*	45.4	52	32.2	51.7	31.1	48.8	33.2	50.9	29.2
	C^*	42	45	60.4	44.1	59.4	45.6	62.9	43.1	61
	h^0	38.9	46	52.2	48.6	53.5	46	56.7	48.8	53.9
95 °C	L^*	46.6	49	31.7	49.7	30.7	49.3	30.7	49.5	28.9
	C^*	41.2	45	58.6	41.7	58.8	43.2	62.5	42.3	61.2
	h^0	38.3	48	51.7	49.9	53.2	47.4	55.1	48.3	53.7

(Pó R.) = pó reidratado, (T) = temperatura.

4.1.8 Termografia infrafermelha

A aquisição da temperatura é um aspecto importante de qualquer processo industrial e é geralmente realizada utilizando termômetros, termopares e detectores infravermelhos. Estes instrumentos determinam a temperatura de locais específicos e a maioria deles tem a necessidade de estabelecer um contato com o material. A imagem térmica infravermelha é uma técnica de não contato e não destrutiva que proporciona um mapeamento da temperatura do material através da conversão do padrão de radiação invisível em imagens visíveis (VADIVAMBAL e JAYAS, 2011).

Foram realizadas termografias de todos os experimentos e, como exemplo, são apresentadas algumas das imagens obtidas para a secagem da polpa de tomate *in natura* com água de aquecimento de 95 °C, 3 mm de espessura de espalhamento da polpa e filme *Mylar* transparente (Figura 4.14) e pintado (Figura 4.15). As faixas de temperaturas apresentadas nas imagens termográficas estão de acordo com as temperaturas obtidas pelos termopares durante as cinéticas de secagem, Figura 4.3.

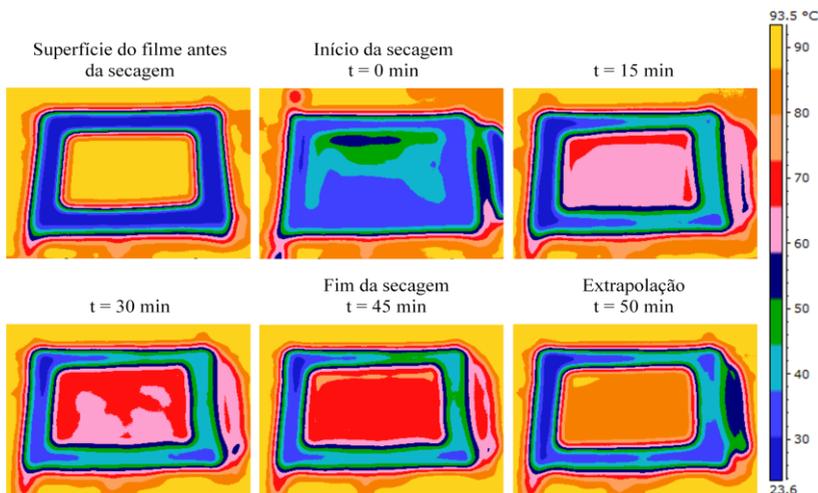


Figura 4.14 - Imagens termográfica para secagem a 95 °C, 3 mm de espessura de espalhamento da polpa e filme *Mylar* pintado.

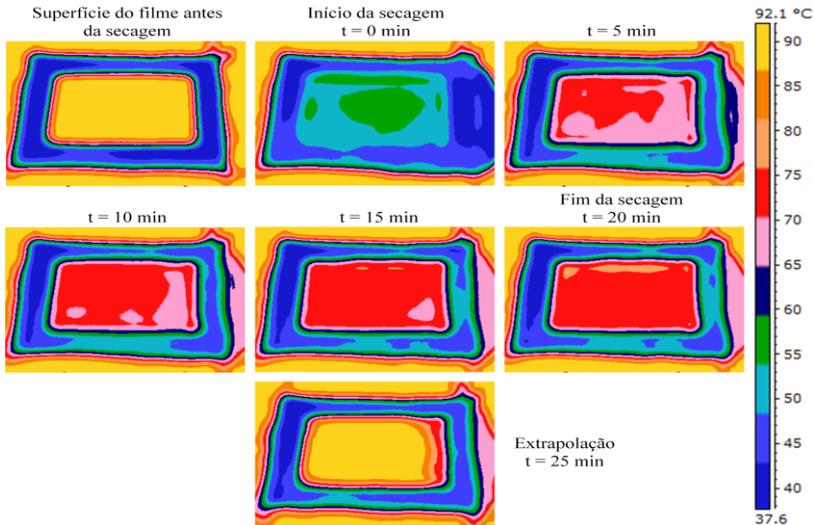


Figura 4.15 - Imagens termográfica para secagem a 95 °C, 3 mm de espessura de espalhamento da polpa e filme *Mylar* transparente.

As imagens demonstram as fases da secagem onde se pode observar a evolução da temperatura da polpa de tomate *in natura* durante o processo. Através das imagens verifica-se uma falta de uniformidade na secagem, podendo ser explicada através da imagem do início da secagem ($t = 0$ min) onde se observa regiões de maior temperatura. Nessas regiões a espessura da polpa foi menor devido à imprecisão da técnica de espalhamento utilizada para as análises termográficas.

Para todos os experimentos realizados, as análises termográficas foram conduzidas além do fim da secagem para verificar os efeitos sobre a temperatura da superfície da polpa. Pode-se observar nas Figuras 4.14 e 4.15 que as imagens da extrapolação da secagem levaram a um aquecimento do material a temperaturas muito próximas da superfície do filme *Mylar*. Segundo Vadivambal e Jayas (2011) o uso das imagens termográficas permite determinar o tempo de secagem de um material evitando a sua exposição a temperaturas excessivas.

Fito et al. (2004) realizaram um estudo sobre o controle de secagem da superfície de frutas cítricas por análise de imagens de termografia infravermelha. Os autores instalaram em secador de ar quente uma câmera AGEMA ThermoVision 470 para gravar a emissão

de infravermelhos a partir da superfície de laranjas, var. *Valencia Late*. Os experimentos foram conduzidos com temperatura do ar de secagem de 20, 25 e 30 °C. Como resultado foi relatada a ocorrência de duas etapas de secagem: a temperatura mais baixa no início do processo de secagem foi considerada como a temperatura de bulbo úmido verdadeira e o final da secagem ocorreu quando, pela primeira vez, toda a superfície da laranja estava a uma temperatura mais elevada do que a temperatura de bulbo úmido.

Os experimentos realizados com a polpa de tomate *in natura* apresentaram, além dos dois períodos de secagem relatados por Fito et al. (2004), a etapa inicial ou de acomodação da secagem. Segundo Park et al. (2001) na etapa de acomodação da secagem é onde ocorre a elevação da temperatura do material. Devido a baixa temperatura do ar de secagem (20 a 30 °C) esta etapa não foi encontrado por Fito et al. (2004).

Nas Figuras 4.14 e 4.15 a etapa de acomodação da secagem pode ser observada na imagem de $t = 0$, onde as tonalidades azul e verde indicam o aquecimento da polpa de tomate. A coloração rosada das imagens seguintes representa a faixa de temperatura em que ocorre o primeiro período de secagem, caracterizado pelas constantes taxas de secagem e temperatura do material (PARK et al., 2001). Porém, devido à falta de precisão de espalhamento e ao curto período de processo, o primeiro período de secagem foi pouco visível quando se utilizou o filme *Mylar* transparente, Figura 4.15.

A transição da coloração rosada para coloração vermelha caracteriza o segundo período da secagem, com uma diminuição da taxa de secagem e um aumento da temperatura da polpa. O fim da secagem ocorreu quando as imagens termográficas apresentaram a coloração vermelha para toda superfície de secagem.

Como apresentado, a análise de imagens termográficas da superfície de um produto durante a secagem pode ser utilizada como uma medida não destrutiva para determinar o tempo final da secagem. Esta técnica é relevante para melhorar tanto o consumo de calor quanto a qualidade de frutas, podendo ser utilizada como uma operação de controle (FITO et al., 2004).

4.2 Polpa de tomate industrializada

Nos produtos industrializados de tomate (suco, *catchup*, molho, sopas e pastas) a viscosidade e a cor são os fatores mais importantes na qualidade e aceitação do produto. Os tomates são ricos em enzimas pécnicas como a poligalacturonase e a pectinesterase, que atuam de forma controlada através de mecanismos metabólicos. Quando a célula vegetal é danificada, através de corte, esmagamento e trituração, as enzimas passam a atuar de forma não controlada degradando a pectina e causando alterações de cor e textura.

A pectina é um polissacarídeo constituinte da parede celular de plantas dicotiledôneas, responsável pela adesão entre as células e pela resistência mecânica da parede celular, sendo que sua degradação causa a diminuição da viscosidade de um material. Por este motivo, no processo de fabricação de polpas de tomate, a inativação das enzimas pécnicas é indispensável para a obtenção de produtos com boa consistência.

Como a polpa de tomate *in natura* foi utilizada nos processos de secagem por *RW* sem nenhum tratamento prévio para a inativação enzimática, foram realizados experimentos com a polpa de tomate industrializada a fim de verificar o efeito da inativação enzimática na qualidade dos pós reidratados.

4.2.1 Consistência de Bostwick

A viscosidade é a medida da resistência encontrada pelas moléculas ao se moverem no interior de um líquido. Nos produtos derivados de tomate mede-se, na realidade, a "viscosidade aparente" ou consistência, sendo o consistômetro de Bostwick o método padrão para a determinação da consistência da maioria dos produtos de tomate (GOULD, 1992).

A média dos valores obtidos para a consistência das polpas industrializadas foi de 3.07 cm (± 0.32) e dos pós reidratados foi de 4.12 cm (± 0.24). De acordo com os dados apresentados observa-se que no consistômetro de Bostwick os pós reidratados alcançaram uma distância um pouco superior à da polpa original. Isto significa que a polpa obtida com a reidratação do pó ficou mais líquida que a polpa original. Como no caso da polpa de tomate *in natura*, a não solubilização completa do pó pode ter gerado uma polpa mais líquida, ou seja, menos viscosa.

Segundo Gould (1992), a consistência dos produtos de tomate processados depende da quantidade e extensão da degradação da pectina. Como a quantidade inicial de pectina era a mesma para todos os experimentos (mesma amostra inicial), a menor consistência obtida para os pós reidratados pode também ser devido à degradação da pectina durante o processo de secagem por RW.

A viscosidade é um dos fatores mais importantes na qualidade de produtos industrializados de tomate. Sendo assim, devido à pequena diferença encontrada para a consistência da polpa de tomate industrializada e do pó reidratado, pode-se concluir que o processo de secagem por RW foi capaz de produzir pó de tomate, que ao ser reidratado, apresentou boas características de consistência.

4.2.2 Cor

A polpa de tomate industrializada foi utilizada no processo de secagem por RW com água de aquecimento de 95 °C, espessura de espalhamento de 3 mm e filme *Mylar* transparente. As imagens da polpa industrializada, do pó obtido e do pó reidratado estão apresentadas na Figura 4.16.

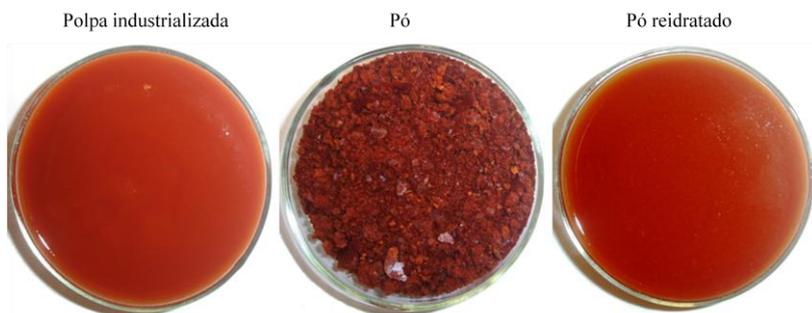


Figura 4.16 - Imagens da polpa industrializada, do pó e do pó reidratado.

O pó obtido a partir da polpa industrializada apresentou coloração mais escura e tendeu a ficar mais pegajoso, o que pode ser atribuído à presença de açúcar na composição da polpa industrializada utilizada. As imagens demonstram que o pó reconstituído apresentou aspecto muito semelhante ao da polpa industrializada.

A Tabela 4.5 apresenta os valores dos parâmetros L^* , C^* e h^o e o desvio da cor (ΔE^*) do pó e do pó reidratado com relação à polpa industrializada.

Tabela 4.5 - Valores dos parâmetros de cor para a polpa industrializada, o pó e o pó reidratado.

Amostra	L^*	C^*	h^o	ΔE^*
Polpa	25.73 ± 0.79	52.63 ± 0.52	53.90 ± 0.29	-
Pó	26.77 ± 0.45	28.17 ± 0.51	40.62 ± 0.43	26.29 ± 0.76
Pó reidratado	22.17 ± 0.28	46.52 ± 0.21	53.01 ± 0.33	7.17 ± 0.92

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.5 o pó reidratado apresentou menor valor de ΔE^* com relação à polpa industrializada. Este valor está de acordo com a observação visual apresentada na Figura 4.16 indicando que o pó obtido da secagem da polpa industrializada possui boas propriedades de reidratação.

4.3 Transmissividade dos filmes Mylar

A Figura 4.17 apresenta a transmissividade dos filmes *Mylar* com 0.25 mm de espessura, transparente e pintado de preto. A transmissividade para o filme *Mylar* pintado foi aproximadamente zero para todos os comprimentos de onda. Esse resultado demonstra que a tinta preta utilizada para pintar o filme foi capaz de bloquear a transmissão da radiação infravermelha sendo assim possível avaliar a influência desta radiação no processo de secagem por *RW*.

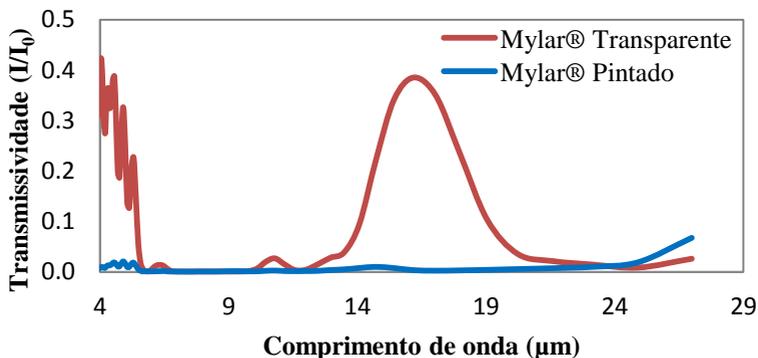


Figura 4.17 - Transmissividade dos filmes *Mylar*.

A transmissividade do filme *Mylar* transparente apresentou picos nos comprimentos de onda de 4 e 15 μm , correspondendo a 42 e 38 % de transmissão da radiação IV incidente, respectivamente. Tsilingiris (2003), em seu estudo da transmissão de infravermelho de filmes poliméricos, encontrou picos de transmissividade para o filme *Mylar* com 0.13 mm de espessura nos mesmos comprimentos de onda de 4 e 15 μm , correspondendo a 70 e 60 %, respectivamente. Segundo o autor quanto maior a espessura do filme *Mylar* menor a transmissão da radiação IV incidente.

No processo de secagem por RW a água de aquecimento do equipamento fornece calor por condução e radiação infravermelha para evaporar a água presente no alimento. Por isso, para que o processo seja eficiente, o filme *Mylar* deve ser um bom condutor e possuir uma maior transmissão de IV nos comprimentos de onda que a água emite e absorve essa radiação.

Assumindo que água se comporte como um corpo negro, o poder emissivo para os comprimentos de onda de 4 e 15 μm , a uma temperatura de 95 °C, apresenta valores próximos da máxima emissão de radiação, como apresentado na Figura 2.11. Segundo Sandu (1986) a água tem uma absorção muito forte da radiação IV nos comprimentos de onda em torno de 2.7 - 3.3, 6.0 e superior a 12.5 μm .

Apesar de o filme *Mylar* utilizado apresentar picos de transmissão de IV nos comprimentos de onda em que a água possui os maiores índices de emissão e absorção dessa radiação, a parcela de IV transmitida não ultrapassou os 50 %.

Tsilingiris (2003) classificou o *Mylar* como um filme com baixa transmissividade e encontrou para o filme de polietileno com 0.1 mm de espessura uma transmissão de IV com valores em torno de 80 %, sendo quase constante para os comprimentos de onda entre 2.5 e 15 μm . Mesmo para o polietileno com espessura semelhante a do *Mylar* utilizado neste estudo (0.2 mm), o autor observou uma transmissão de IV superior a 60%.

Os resultados da transmissividade apresentados neste trabalho em conjunto com os dados obtidos por Tsilingiris (2003) sugerem que o processo de secagem por *RW* pode ter sua eficiência aumentada com o uso de um filme com melhores e mais constantes índices de transmissão IV.

CAPÍTULO V

5 Conclusões

A partir do equipamento montado neste estudo, baseado nos princípios de secagem do *Refractance Window*, foi possível obter pós de tomate com parâmetros de qualidade e tempo de secagem semelhantes aos obtidos com a planta comercial de RW.

Os baixos teores de umidade e atividade de água dos pós de tomate obtidos demonstraram ser favoráveis para a garantia da estabilidade dos pós. Os resultados da análise estatística aplicadas aos dados experimentais apresentaram efeito significativo da espessura de espalhamento da polpa e do tipo de filme *Mylar* no teor de umidade dos pós, para uma mesma temperatura. Enquanto que a_w as variáveis do processo não apresentaram efeito significativo.

Na cinética de secagem, o incremento da temperatura da água de aquecimento, a diminuição da espessura de espalhamento da polpa e a utilização do filme *Mylar* transparente ao invés do pintado resultaram em uma diminuição significativa no tempo de secagem das amostras. Durante todo o processo de secagem a temperatura da polpa de tomate ficou abaixo da temperatura da água de aquecimento devido ao resfriamento evaporativo da mesma. Para a secagem com o filme *Mylar* transparente o aumento da temperatura da água de aquecimento gerou um aumento no gradiente de temperatura entre a água de aquecimento e a polpa.

As isotermas de sorção de umidade dos pós de tomate foram bem ajustadas pelo modelo de GAB com coeficientes de correlação (R^2) superior a 0.99, não apresentando diferenças significativas para as variáveis do processo de secagem. O teor de umidade de todas as amostras de pó de tomate ficou abaixo do seu teor de umidade da monocamada (x_m), indicando uma boa estabilidade do produto.

Os pós de tomate foram bastante solúveis, com resultados variando de 86 a 94 %. Para os diferentes processos de secagem por RW realizados, somente a espessura de espalhamento da polpa teve efeito sobre a solubilidade dos pós de tomate, de modo que os pós obtidos com espessura de espalhamento da polpa de 2 mm foram mais solúveis do que os obtidos com 3 mm de espessura.

O tempo de instantaneização dos pós de tomate variou de 3 a 11 segundos, sendo que os pós obtidos com espessura de espalhamento da polpa de 3 mm ou temperatura da água de aquecimento de 95 °C

apresentaram um maior tempo médio de instantaneização. Ao mesmo tempo, a utilização do filme *Mylar* transparente resultou em um menor tempo médio de instantaneização quando comparado com o filme pintado.

Os pós obtidos na secagem com o filme *Mylar* transparente apresentaram coloração vermelha intensa, mesmo para as temperaturas de processo mais elevadas. Apesar dos pós de tomate apresentarem uma solubilidade elevada, a não solubilização completa do pó pode ter contribuído para os maiores valores de ΔE^* obtidos na reidratação dos mesmos. Como esperado, os maiores valores de ΔE^* foram encontrados para os pós e pós reidratados quando foi utilizado o filme *Mylar* pintado.

As imagens termográficas foram capazes de demonstrar as fases da secagem onde se pode observar a evolução da temperatura da polpa de tomate *in natura* durante o processo. Com isso, a análise de imagens termográficas da superfície de um produto durante a secagem pode ser utilizada como uma medida não destrutiva para determinar o tempo final da secagem, melhorando tanto o consumo de calor quanto a qualidade do produto obtido.

Para a secagem com a polpa de tomate industrializada foi observado que no consistômetro de Bostwick os pós reidratados alcançaram uma distância um pouco superior à da polpa original, significando que a polpa obtida com a reidratação do pó ficou mais líquida que a polpa original. Os pós reidratados apresentaram coloração semelhante à da polpa original com um menor valor de ΔE^* , indicando que o processo de inativação enzimática aplicado às polpas de tomate industrializadas podem ter contribuído na obtenção de pós de tomate com boas propriedades de reidratação.

A transmissividade para o filme de *Mylar* pintado foi aproximadamente zero para todos os comprimentos de onda, demonstrando que a tinta preta utilizada para pintar o filme foi capaz de bloquear a transmissão da radiação infravermelha sendo assim possível avaliar a influência dessa radiação no processo de secagem por *RW*.

Apesar do filme *Mylar* utilizado na técnica de secagem por *Refractance Window* apresentar picos de transmissão infravermelha nos comprimentos de onda em que a água possui os maiores índices de emissão e absorção dessa radiação, a parcela de IV transmitida não ultrapassou os 50 %. Estes resultados sugerem que processo de secagem por *RW* pode ter sua eficiência aumenta com o uso de um filme com melhores índices de transmissão IV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abonyi, B. I.; Feng, H.; Tang, J.; Edwards, C. G.; Chew, B. P.; Mattinson, D. S.; Fellman, J. K. Quality retention in strawberry and carrot purees dried with *Refractance Window*TM system. **Journal of Food Science**, Vol. 67, Nr. 2, 2001.

Ahmed, J. Drying of vegetables: principles and dryer design. Em **Handbook of Vegetables and Vegetable Processing**. Sinha, N. K. Ed. Blackwell Publishing Ltd, 279-298, 2011.

Aman, R.; Carle, R.; Conrad, J.; Beifuss, U.; Schieber, A. Isolation of carotenoids from plant materials and dietary supplements by high-speed counter-current chromatography. **Journal of Chromatography, A** 1074: 99–105, 2005.

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

Baker, C. G. J. **Industrial Drying of Foods**. Blackie Academic & Professional, 1997.

Bergman, T. L.; Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.; Lavine, A. S. **Introduction to Heat Transfer**. 6 th edition, John Wiley & Sons, pp. 750-751, 2011.

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**, 11, 135-148, 2012.

Cernîsev, S. Effects of conventional and multistage drying processing on nonenzymatic browning in tomato, **Journal of Food Engineering**, 96, 114–118, 2010.

Chang, C. H.; Lin, H. Y.; Chang, C. Y.; Liu, Y. C. Comparisons on the antioxidant properties of fresh, freeze-dried and hot-air-dried tomatoes. **Journal of Food Engineering**, v. 77, n. 3, p.478-485, 2006.

Chiumarelli, M.; Ferreira, M. D. Qualidade pós-colheita de tomates “Débora” com utilização de diferentes coberturas comestíveis e

temperaturas de armazenamento. **Horticultura Brasileira**, 24: 381-385, 2006.

Clarke, P.T. *Refractance Window*TM - “down under”. **Proceedings of the 14th International Drying Symposium**, IDS 2004. São Paulo, Brasil, 22-25, vol. B, 813-820, 2004.

Cuq, B.; Rondet, E.; Abecassis, J. Food powders engineering, between knowhow and science: Constraints, stakes and opportunities. **Powder Technology**, 208, 244–251, 2011.

Dacanal, G. C. **Estudo da granulação de suco de acerola desidratado em leite fluidizado**. 2005. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 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.

Davoodi, M. G.; Vijayanand, P.; Kulkarni, S. G.; Ramana, K. V. R. Effect of different pre-treatments and dehydration methods on quality characteristics and storage stability of tomato powder. **Swiss Society of Food Science and Technology**, 40, 1832–1840, 2007.

Evangelista, J. **Tecnologia de alimentos**. São Paulo. 2. ed. São Paulo: Atheneu, 652 p, 1992.

Evranuz, E. O. Drying vegetables: new technology, equipment and examples. Em **Handbook of Vegetables and Vegetable Processing**. Ed. Sinha, N. K. Blackwell Publishing Ltd, 299-315, 2011.

Fagundes, A. F.; Onuki1, N. S.; Raupp, D. S.; Gardingo, J. R.; Borsato, A. V. Influência do grau de umidade na textura de tomate seco refrigerado ou envasado em óleo. **Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra - Ciências Agrárias e Engenharias**, Ponta Grossa, 11 (1), 35-42, 2005.

FAO. Food and Agriculture Organization. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/home/index.html#VISUALIZE> >. Acesso em: 10/08/2012.

Fito, P. J.; Ortolá, M. D.; Reyes, R. De lós; Fito, P.; Reyes, E. De lós. Control of citrus surface drying by image analysis of infrared thermography. **Journal of Food Engineering**, 61, 287–290, 2004.

Fitzpatrick, J. J.; Ahrné, L. Food powder handling and processing: Industry problems, knowledge barriers and research opportunities. **Chemical Engineering and Processing**, 44, 209–214, 2005.

Fontes, P. C. R.; Loures, J. L.; Galvão, J. C. C.; Cardoso, A. A.; Mantovani, E. C. Produção e qualidade do tomate produzido em substrato, no campo e em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.22, n.3, p. 614-619, 2004.

Gameiro, A. H.; Filho, J. V. C.; Rocco, C. D.; Rangel, R. Estimativa de perdas no suprimento de tomate para processamento industrial no estado de Goiás. **Informações Econômicas**, 37(7): 7-16, 2007.

Giovanelli, G.; Zanoni, B.; Lavelli, V.; Nani, R. Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products. **Journal of Food Engineering**, 52, 135–141, 2002.

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, 2005.

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

Goula, A. M.; Adamopoulos, K. G.; Chatzitakis, P. C.; Nikas, V. A. Prediction of lycopene degradation during a drying process of tomato pulp, **Journal of Food Engineering**, 74, 37–46, 2006.

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**, 85, 73–83, 2008.

Gould, W. A. **Tomato production, processing and technology**. Third edition. Woodhead Publishing Limited, 1992.

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

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Producao_Agricola_Municipal_%5Banual%5D/2010/>. Acesso em: 10/08/2012.

Jangam, S. V.; Mujumdar, A. S. **Drying of Foods, Vegetables and Fruits - Volume 1**. Ed. Jangam, S. V.; Law, C. L.; Mujumdar, A. S. Singapura, 2010.

Jun, S.; Krishnamurthy, K.; Irudayaraj, J.; Demirci, A. Fundamentals and Theory of Infrared Radiation. Em **Infrared Heating For Food And Agricultural Processing**. Ed. Pan, Z.; Atungulu, G. G. CRC Press, pp. 1-18, 2011.

Kadam, D. M.; Balasubramanian, S. Foam mat drying of tomato juice. **Journal of Food Processing and Preservation**, ISSN 0145-8892, 2011.

Kudra, T.; Mujumdar, A. S. **Advanced Drying Technologies**. CRC Press, 2009.

Liu, F.; Cao, X.; Wang, H.; Liao, X. Changes of tomato powder qualities during storage. **Powder Technology**, 204, 159–166, 2010.

Machado, V. G. **Obtenção de tomate em pó por atomização: influência das variáveis de processo na qualidade do produto**. 2010. 126 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia de Alimentos. Campinas/SP, 2010.

Magoon, R.E. **Method and apparatus for drying fruit pulp and the like**. US Patent: 4,631,837, 1986.

Modest, M. F. **Radiative Heat Transfer**. New York: McGraw-Hill International Editions, 1993.

Monteiro, C. S.; Balbi, M. E.; Miguel, O. G.; Penteadó, P. T. P. S.; Haracemiv, S. M. C. Qualidade nutricional e antioxidante do tomate

“tipo italiano”. **Alim. Nutr.**, Araraquara ISSN 0103-4235, v.19, n.1, p. 25-31, 2008.

Nachtigall, A. M.; Fonseca, A. S.; Machado, M. R. G.; Vendruscolo, C. T.; Gularte, M. A. Desenvolvimento de tomate desidratado em conserva. Em: **Congresso Brasileiro De Ciência E Tecnologia De Alimentos**, Fortaleza: SBCTA, v. 3, p. 11.88, 2000.

Nindo, C. I.; Feng, H.; Shen, G. Q.; Tang, J.; Kang, D. H. Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. **Journal of Food Processing Preservation**, 27, 117-136, 2003a.

Nindo, C. I.; Powers, J. R.; Tang, J. Influence of *Refractance Window* evaporation on quality of juices from small fruits. **Swiss Society of Food Science and Technology**, LWT 40, 1000–1007, 2007.

Nindo, C. I.; Sun, T.; Wang, S. W.; Tang, J.; Powers, J. R. Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). **Swiss Society of Food Science and Technology**, 36, 507–516, 2003b.

Nindo, C. I.; Tang, J. *Refractance Window* dehydration technology: a novel contact drying method. **Drying Technology**, 25, 37-48, 2007.

Nindo, C.; Mwithiga, G. Infrared Drying. Em **Infrared Heating For Food And Agricultural Processing**. Ed. Pan, Z.; Atungulu, G. G. CRC Press, pp. 89-100, 2011.

Nowak, D.; Lewicki, P. P. Infrared drying of apple slices. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 5, 353– 360, 2004.

Ochoa-Martínez, C. I.; Quintero, P. T.; Ayala, A.A.; Ortiz, M. J. Drying characteristics of mango slices using the *Refractance Window*TM technique. **Journal of Food Engineering**, 109, 69–75, 2012.

Oliveira, J. A.; Bergamasco, S. M. P. P. **Aspectos sócio-econômicos da cultura do tomate de mesa**. Workshop - Tomate na Unicamp: perspectivas e pesquisas. Faculdade de Engenharia (Feagri-Unicamp), Campinas/SP, 2003.

Oliveira, T. A.; Leite, R. H. L.; Aroucha, E. M. M.; Ferreira, R. M. A. Efeito do revestimento de tomate com biofilme na aparência e perda de massa durante o armazenamento. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.6, n.1, p. 230 - 234, 2011.

Ordóñez, J. A. et al. Conservação de alimentos com base na modificação do pH, da atmosfera e da atividade de água. Evaporação e desidratação. Em **Tecnologia de Alimentos: Componentes de Alimentos e Processos**. v. 1. Porto Alegre: Artmed, pp. 219-242, 2005.

Park, K. J.; Antonio, G. C.; Oliveira, R. A.; Park, K. J. B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas, 2007.

Park, K. J.; Yado, M. K. M.; Brod, F. P. R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*pyrusssp.*) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.21, n.3, 2001.

Pavan, M. A. **Effects of freeze drying, Refractance Window drying and hot-air drying on the quality parameters of açaí**. 2010. 88 f. Thesis (Master of Science in Food Science and Human Nutrition) - University of Illinois, Urbana-Champaign, 2010.

Pereira, I. E.; Queiroz, A. J. M.; Figueirêdo, R. M. F. Características físico-químicas do tomate em pó durante o armazenamento. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.6, n. 1, p.83-90, 2006.

Queiroz, G. M. **Determinação de propriedades termofísicas do pão tipo francês durante o processo de assamento**. 2001. 152p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

Rahman, S. **Food Properties Handbook**. CRC Press, 1995.

Rodríguez, F. J. L. **Fundamentos de óptica aplicada**. 2010. 26 p. Relatório técnico - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

Sakai, N., Hanzawa, T. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. **Trends in Food Science and Technology**, 5, 357-362, 1994.

Sandu, C. Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. **Biotechnol. Progr.** 2: 109–119, 1986.

Silva, R. A. **Comportamento do tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) aos indutores de resistência à seca.** 2006. 64 f. Dissertação (Mestre em Agronomia) - Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba/SP, 2006.

Sobreira, F. M.; Sobreira, F. M.; Almeida, G. D.; Coelho, R. I.; Rodrigues, R.; Matta, F. P. Qualidade de sabor de tomates dos tipos salada e cereja e sua relação com caracteres morfoagronômicos dos frutos. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 34, n. 4, p. 1015-1023, 2010.

Sousa, C. M. G.; Aroucha, E. M. M.; Ferreira, R. M. A.; Gois, V. A.; Nunes, G. H. S. Avaliação sensorial de tomate seco preparados em diferentes concentrações osmóticas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.5, n.2, p. 223 - 229, 2010.

Souza, D. S.; Pimentel, J. D. R.; Marques, L. G.; Narain, N. Estudo da cinética de reidratação do pó da polpa do abacate liofilizado. **Scientia Plena**, v. 7, n. 6, 2011.

Tonon, R. V.; Baroni, A. F.; Hubinger, M. D. Estudo da desidratação osmótica de tomate em soluções ternárias pela metodologia de superfície de resposta. **Ciência Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 3, p. 715-723, 2006.

USDA. National Nutrient Database for Standard Reference, Release 24. Disponível em: <http://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/3289?fg=&man=&lfacet=&count=&max=&sort=&qlookup=&offset=&format=Stats&new=>. Acesso em 15/08/2012.

Vadivambal, R.; Jayas, D. S. Applications of thermal imaging in agriculture and food industry - a review. **Food Bioprocess Technol**, 4, 186–199, 2011.

Vega-Mercado, H.; Góngora-Nieto, M. M.; Barbosa-Cánovas, G. V. Advances in dehydration of foods. **Journal of Food Engineering**, 49, 271-289, 2001.

Yamaguishi, C. T. **Processo biotecnológico para a produção de feijão desidratado com baixo teor de oligossacarídeos da família rafinose.** 147 p. Dissertação (Mestre em Processos Biotecnológicos). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.