

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Análise das Características de Secagem da  
Proteína Texturizada de Soja**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aline Schilling Cassini

Porto Alegre

2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

# **Análise das Características de Secagem da Proteína Texturizada de Soja**

Aline Schilling Cassini

Dissertação de Mestrado apresentada como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Área de concentração: Fenômenos de Transporte  
e Operações Unitárias

**Orientador:**  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Lígia Damasceno Ferreira Marczak

**Co-orientador:**  
Prof. Dr. Caciano Pelayo Zapata Noreña

**Porto Alegre**

**2004**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *Análise das Características de Secagem da Proteína Texturizada de Soja*, elaborada por Aline Schilling Cassini, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Dr. Luis Antônio de Almeida Pinto

---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Keiko Wada

---

Prof. Dr. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo

---

Prof. Msc. René Lúcio Rech

*O degrau de uma escada não serve simplesmente para que alguém permaneça em cima dele, destina-se a sustentar o pé de um homem pelo tempo suficiente para que ele coloque o outro um pouco mais alto (Thomas Huxley).*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela saúde, serenidade, coragem e disposição para enfrentar cada etapa desta longa jornada e por ter posto em meu caminho algumas pessoas que, de tão especiais, foram fundamentais para a concretização deste projeto.

À minha mãe, responsável por toda minha base pessoal e educacional, que me proporcionou as melhores oportunidades e esteve sempre ao meu lado.

Aos meus orientadores, Profa. Lúcia e Prof. Caciano, por toda a atenção dispensada e pela oportunidade de absorver um pouco de seus vastos conhecimentos.

Ao Engenheiro René Rech e à Solae do Brasil Ind. e Com. de Alim. Ltda., por me proporcionarem um mestrado repleto de desafios e imensamente gratificante, no qual pude mesclar o aprendizado acadêmico com a realidade de uma grande empresa, fato determinante para minha plena realização durante o curso.

Aos Engenheiros Vítor Hugo Evers e Cristiano F. Cassini, por me receberem tão bem, sempre me propiciando ótimas condições de trabalho, bem como por todo apoio pessoal, profissional e intelectual a mim concedido.

Aos encarregados, operadores e analistas das Proteínas Texturizadas, cuja colaboração foi fundamental para a realização deste trabalho, bem como a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o bom andamento do projeto (manutenção, CDTA, laboratório central, entre outros).

Aos meus grandes amigos do Depto. de Eng. Química que viveram este período ao meu lado, dividindo conquistas, angústias, sucessos, fracassos e, sobretudo, muita amizade e companheirismo que nos fez sempre seguir adiante.

À Lúcia, minha grande amiga, por toda sua dedicação, acompanhamento, amizade, companheirismo e carinho durante estes dois anos; foste determinante para minha tranquilidade, paixão e total realização durante o curso.

Finalmente, à pessoa mais importante, que dividiu comigo cada dia – e cada noite – cada dúvida, cada certeza e cada descoberta, me acalmando e indicando, muitas vezes, o caminho a seguir. Como se não bastasse todo amor, carinho, compreensão, apoio e dedicação ainda me brindou com todo seu conhecimento. Cris, se cheguei até aqui, foi por que estiveste sempre ao meu lado, percorrendo comigo cada curva deste longo caminho. Te amo.

## RESUMO

As proteínas vegetais vêm sendo largamente utilizadas na indústria alimentícia como substitutas da proteína animal, além de agir como um ingrediente funcional nos mais variados produtos. Dentre as proteínas mais utilizadas encontra-se a proteína texturizada de soja. Seu processamento envolve uma etapa de secagem que é uma das operações unitárias mais relevantes e desafiadoras para a indústria alimentícia. Neste trabalho, determinaram-se as curvas de secagem de três diferentes tipos de proteína texturizada de soja (PTS), através de diferentes experimentos, variando-se a temperatura do ar de secagem ( $T$ ) – 90, 110 e 130°C – a velocidade do ar de secagem ( $v$ ) – 100, 125 e 150  $\text{cm.s}^{-1}$  – e a altura da camada de produto ( $h$ ) – 3 e 6 cm para a PTS Tipo I, 2,5 e 5 cm para a PTS Tipo II e 5 e 10 cm para a PTS Tipo III. A partir dos dados experimentais obtidos de teor de umidade em função do tempo, fez-se o ajuste a um modelo exponencial de duas constantes. Todas as combinações de parâmetros apresentaram ajustes de boa qualidade, cujos coeficientes de correlação foram superiores a 0,99. Uma das constantes obtidas ( $C_1$ ) apresentou valores muito próximos à unidade para todos os casos (e para os três tipos de PTS), enquanto que a outra constante ( $C_2$ ) apresentou valores variáveis. Realizou-se, então, uma análise estatística (Teste F), a fim de verificar quais dos parâmetros estudados (bem como seus efeitos de interação) eram significativos para a determinação da constante  $C_2$  do modelo exponencial. Para as PTS tipos I e II, a um nível de 95% de significância, todos os parâmetros e efeitos de interação apresentaram-se significativos para a determinação de  $C_2$  e desenvolveu-se, então, um modelo estatístico de dez constantes em função destes. Obteve-se um ótimo ajuste dos dados de  $C_2$  em função dos parâmetros aos modelos testados, atingindo-se valores de erro médio relativo ( $EMR$ ) sempre inferiores a 10% e coeficientes de correlação elevados. Para a PTS Tipo III apenas dois dos parâmetros testados, somados a dois efeitos de interação, mostraram-se significativos. Apesar disso, foram obtidos os melhores ajustes através, novamente, do modelo de 10 constantes. Assim,

para os três tipos de PTS, foi possível a obtenção de um modelo que prevê o tempo de processo de cada tipo de PTS, para que se atinja uma determinada umidade final, ou vice-versa, em função da umidade inicial da amostra, de sua umidade de equilíbrio e dos parâmetros de processo ( $T$ ,  $v$  e  $h$ ). Paralelamente, determinaram-se as isotermas de sorção de dois tipos de PTS (um contendo cerca de 20% de açúcares e outro não contendo açúcares) para quatro temperaturas (10, 20, 30 e 40°C). Para o ajuste dos dados experimentais foram utilizados os modelos de Oswin, Halsey, BET, GAB, Peleg e Darcy-Watt. Os modelos de Peleg e GAB foram os que melhor se ajustaram aos dados experimentais, embora outros modelos como Halsey e Oswin também se mostraram representativos para temperaturas mais elevadas. As isotermas de sorção da PTS que continha açúcar apresentaram uma inversão de comportamento em uma atividade de água em torno de 0,9, enquanto que as curvas obtidas para a outra PTS não se cruzaram em nenhum momento. O calor de sorção foi estimado, pela equação de Clausius-Clapeyron, para ambos os tipos de PTS e este aumentou com a diminuição de umidade. Estimaram-se valores de umidade de monocamada, através do ajuste dos dados ao modelo de GAB, entre 4,6 e 7,4% para a PTS Tipo I e entre 4,4 e 5,4% para a PTS Tipo IV; os valores de umidade de monocamada diminuíram com o aumento de temperatura.

## ABSTRACT

Texturized vegetable proteins (TVP) have been used for many years in the food industry as a substitute of animal protein. In recent times, since the discovery of its beneficial health effects, TVP also became an important functional ingredient in several food applications. The most used TVP is the soy protein (TSP) and its production involves a drying step, which is one of the most relevant and challenging unit operations of the food industry. In this study, the drying curves of three different types of TSP were determined through different experiments in which different drying air temperatures ( $T$ ) – 90, 110 e 130°C – drying air velocities ( $v$ ) – 100, 125 e 150 cm.s<sup>-1</sup> – and height of the product layer ( $h$ ) – 3 and 6 cm for TSP Type I, 2.5 and 5 cm for TSP Type II and 5 and 10 cm for TSP Type III were tested. The experimental data (dimensionless moisture versus time) were fitted to an exponential model of two constants. Every combination of parameters showed a very good fit with correlations coefficients over 0.99. One of the constants obtained ( $C_1$ ) showed values very close to the unity for all the groups of parameters and all the types of TSP. The other constant ( $C_2$ ) showed values that varied with the parameters tested. The next step was the realization of a statistical analysis (F Test) in order to verify which of the studied parameters (and also its interaction effects) were significant in the estimation of the  $C_2$  constant of the exponential model. For TSP types I and II, with 95% of signification, the three parameters and all the interaction effects correlated to them were statistical significant and a ten-constant statistical model was developed. A great result was obtained fitting the data of the tested types of TSP to this model (parameters dependent), since *RME* valued always fewer than 10% and elevated correlation coefficients were obtained. For TSP Type III, only two parameters ( $T$  and  $v$ ) and two interaction effects showed significance. Beside that, the best fitting was obtained also with the ten-constant model. As a result, for the three types of TSP, it was possible to obtain a model (function of the initial and the equilibrium moisture content of the sample and also function of the process



parameters) that predicts the drying time (until the product reaches a desired final moisture content) or the final moisture content of the product after a desired drying time. Simultaneously, the water adsorption isotherms of two types of TSP (one of them containing about 20% of sugars and the other without sugars) were determined using the static method of saturated salt solutions at 10, 20, 30 and 40°C. The experimental data were adjusted to six models available in the literature, namely the Oswin, Halsey, BET, GAB, Peleg and Darcy-Watt models, in order to determine the best fit. The curves obtained for the sugar-containing TSP showed that its equilibrium moisture content at water activities up to 0.9 decreased as the temperature increased; at higher water activities, its moisture content showed an inverse behavior, resulting in crossing of the isotherm curves; for TSP without sugars, this crossing did not occur. The GAB and Peleg equation showed the best fit for the curves, but the models of Halsey and Oswin were also representative for the isotherms of more elevated temperatures. The Clausius-Clapeyron equation was applied to determine the total heat of sorption of the two types of TSP; the values obtained increased with decreased moisture content. The monolayer moisture content of these two types of TSP decreased with increased temperature.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VIII</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>X</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>5</b>
2.1 A UMIDADE NOS ALIMENTOS .....	5
2.1.1 Umidade base úmida (b.u.) x base seca (b.s.).....	7
2.2 ATIVIDADE DE ÁGUA.....	7
2.3 ESTABILIDADE DOS ALIMENTOS.....	8
2.3.1 Contaminação microbiana.....	9
2.3.2 Reações enzimáticas.....	10
2.3.3 Reações não-enzimáticas.....	10
2.3.4 Oxidação de lipídios.....	10
2.3.5 Fenômenos físicos e estruturais.....	11
2.4 SORÇÃO E ISOTERMAS DE SORÇÃO .....	11
2.4.1 Calor de sorção ( $Q_s$ ) .....	14
2.4.2 Modelos para prever as isotermas de sorção.....	15
2.5 SECAGEM DE ALIMENTOS .....	18
2.6 TAXA DE SECAGEM .....	20
2.6.1 Período de taxa constante.....	22
2.6.2 Período de taxa decrescente .....	23
2.6.3 Difusividade efetiva de umidade ( $D_{eff}$ ) .....	24
2.6.4 Fatores que influenciam a taxa de secagem.....	26
2.7 EQUIPAMENTOS DE SECAGEM .....	29
2.7.1 Escolha do equipamento .....	29
2.7.2 Classificação dos secadores.....	30
2.7.3 Tipos de secadores.....	31
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>36</b>
3.1 ISOTERMAS DE SORÇÃO .....	36
3.2 CURVAS DE SECAGEM .....	39

<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
4.1 MATÉRIA PRIMA .....	42
4.1.1 <i>Isotermas de adsorção</i> .....	43
4.1.2 <i>Curvas de secagem</i> .....	43
4.2 MÉTODOS.....	44
4.2.1 <i>Determinação do diâmetro equivalente</i> .....	44
4.2.2 <i>Determinação da cor</i> .....	44
4.2.3 <i>Determinação de umidade</i> .....	45
4.2.4 <i>Determinação das isotermas de adsorção</i> .....	45
4.2.5 <i>Determinação das curvas de secagem</i> .....	47
4.3 AJUSTE DE DADOS.....	50
4.3.1 <i>Experimentos de sorção</i> .....	51
4.3.2 <i>Experimentos de secagem</i> .....	51
<b>RESULTADOS – ISOTERMAS .....</b>	<b>53</b>
5.1 AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS .....	54
5.2 UMIDADE DE MONOCAMADA .....	60
5.3 CALOR TOTAL DE SORÇÃO .....	61
5.4 ÁREA SUPERFICIAL DA PTS.....	62
<b>RESULTADOS – SECAGEM.....</b>	<b>63</b>
6.1 PTS TIPO I.....	63
6.1.1 <i>Ajuste dos dados experimentais ao modelo exponencial</i> .....	66
6.1.2 <i>Análise estatística (ANOVA)</i> .....	67
6.1.3 <i>Taxa de secagem da PTS Tipo I</i> .....	68
6.1.4 <i>Influência da temperatura do ar de secagem na coloração final da PTS Tipo I</i> .....	69
6.1.5 <i>Ajuste dos dados da constante <math>C_2</math> ao modelo estatístico</i> .....	71
6.2 PTS TIPO II .....	74
6.2.1 <i>Ajuste dos dados experimentais ao modelo exponencial</i> .....	76
6.2.2 <i>Taxa de secagem da PTS Tipo II</i> .....	78
6.2.3 <i>Ajuste dos dados da constante <math>C_2</math> ao modelo estatístico</i> .....	80
6.3 PTS TIPO III .....	82
6.3.1 <i>Ajuste dos dados experimentais ao modelo exponencial</i> .....	84
6.3.2 <i>Taxa de secagem da PTS Tipo III</i> .....	86
6.3.3 <i>Ajuste dos dados da constante <math>C_2</math> ao modelo estatístico</i> .....	87
6.4 AJUSTE PARCIAL DAS CURVAS DE SECAGEM OBTIDAS PARA AS PTS TIPOS I, II E III.....	91
6.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS TRÊS TIPOS DE PTS.....	93

<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>96</b>
7.1 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO .....	96
7.2 CURVAS DE SECAGEM .....	97
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>100</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>105</b>
<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>106</b>
<b>APÊNDICE C</b> .....	<b>107</b>
<b>APÊNDICE D</b> .....	<b>108</b>
<b>APÊNDICE E</b> .....	<b>109</b>
<b>APÊNDICE F</b> .....	<b>112</b>
<b>APÊNDICE G</b> .....	<b>115</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XVIII</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Representação esquemática da produção de PTS a partir da farinha desengordurada de soja. <i>Fonte:</i> BUNGE ALIMENTOS, 2001. ....	3
<b>Figura 2.1:</b> Influência da atividade de água na estabilidade dos alimentos (BAKER, 1997). ....	8
<b>Figura 2.2:</b> Isoterma típica de produtos alimentícios (MUJUMDAR, 1995). ....	12
<b>Figura 2.3:</b> Isoterma típica, apresentando o fenômeno de histerese (BAKER, 1997). ....	13
<b>Figura 2.4:</b> Representação esquemática da teoria de LABUZA (1968). ....	13
<b>Figura 2.5:</b> Curva típica da taxa de secagem em função do teor de umidade de um produto alimentício (HELDMAN e HARTEL, 2000). ....	20
<b>Figura 4.1:</b> Três tipos de PTS utilizados na determinação das curvas de secagem. ....	43
<b>Figura 4.2:</b> Representação esquemática do dispositivo para a obtenção das isotermas. ....	46
<b>Figura 4.3:</b> Secador piloto utilizado na determinação das curvas de secagem. ....	47
<b>Figura 5.1:</b> Isotermas de adsorção da PTS Tipo I nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C. ....	54
<b>Figura 5.2:</b> Isotermas de adsorção da PTS Tipo IV nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C. ....	54
<b>Figura 5.3:</b> Ajuste dos dados experimentais obtidos para as PTS tipos I e IV, na temperatura de 20°C, ao modelo de GAB. ....	58
<b>Figura 5.4:</b> Ajuste dos dados experimentais das isotermas de adsorção da PTS Tipo I (temperaturas de 20 e 40°C) ao modelo de GAB. ....	59
<b>Figura 5.5:</b> Ajuste dos dados experimentais das isotermas de adsorção da PTS Tipo IV, referente às temperaturas de 20 e 40°C, ao modelo de GAB. ....	59
<b>Figura 5.6:</b> Calor total de sorção (em kcal.gmoF <sup>1</sup> ) de ambos os tipos de PTS. ....	61
<b>Figura 6.1:</b> Influência da altura de camada de produto na curva de secagem da PTS Tipo I ( $T=90^{\circ}\text{C}$ e $v=100\text{ cm.s}^{-1}$ ). ....	64
<b>Figura 6.2:</b> Influência da temperatura do ar de secagem na curva de secagem da PTS Tipo I ( $h=6\text{ cm}$ e $v=100\text{ cm.s}^{-1}$ ). ....	65
<b>Figura 6.3:</b> Influência da velocidade do ar de secagem na curva de secagem da PTS Tipo I ( $h=3\text{ cm}$ e $T=110^{\circ}\text{C}$ ). ....	65
<b>Figura 6.4:</b> Influência da temperatura do ar de secagem na taxa de secagem da PTS Tipo I versus a umidade adimensional ( $h=3\text{ cm}$ e $v=150\text{ cm.s}^{-1}$ ). ....	68
<b>Figura 6.5:</b> Influência da temperatura do ar de secagem na taxa de secagem da PTS Tipo I versus o tempo ( $h=3\text{ cm}$ e $v=150\text{ cm.s}^{-1}$ ). ....	68
<b>Figura 6.6:</b> Valores de delta L (PTS Tipo I) versus o tempo de residência ( $T=130^{\circ}\text{C}$ , $h=6\text{ cm}$ e $v=100\text{ cm.s}^{-1}$ ). ....	70

<b>Figura 6.7:</b> Valores de delta L (PTS Tipo I) versus a umidade final da amostra ( $T=130^{\circ}\text{C}$ , $h=6$ cm e $v=100$ $\text{cm.s}^{-1}$ ).....	70
<b>Figura 6.8:</b> Ajuste dos dados experimentais ao modelo proposto para um experimento realizado com a PTS Tipo I ( $T=110^{\circ}\text{C}$ , $v=125$ $\text{cm.s}^{-1}$ e $h=6$ cm). ....	74
<b>Figura 6.9:</b> Influência da altura de camada de produto na curva de secagem da PTS Tipo II ( $T=90^{\circ}\text{C}$ e $v=100$ $\text{cm.s}^{-1}$ ).....	75
<b>Figura 6.10:</b> Influência da temperatura do ar de secagem na curva de secagem da PTS Tipo II ( $h=5$ cm e $v=100$ $\text{cm.s}^{-1}$ ). ....	75
<b>Figura 6.11:</b> Influência da velocidade do ar de secagem na curva de secagem da PTS Tipo II ( $h=2,5$ cm e $T=110^{\circ}\text{C}$ ).....	76
<b>Figura 6.12:</b> Influência da temperatura do ar de secagem na taxa de secagem da PTS Tipo II versus a umidade adimensional ( $h=2,5$ cm e $v=150$ $\text{cm.s}^{-1}$ ).....	79
<b>Figura 6.13:</b> Influência da temperatura do ar de secagem na taxa de secagem da PTS Tipo II versus o tempo ( $h=2,5$ cm e $v=150$ $\text{cm.s}^{-1}$ ).....	79
<b>Figura 6.14:</b> Ajuste dos dados experimentais ao modelo proposto para um experimento realizado com a PTS Tipo II ( $T=90^{\circ}\text{C}$ , $v=150$ $\text{cm.s}^{-1}$ e $h=2,5$ cm).....	82
<b>Figura 6.15:</b> Influência da altura de camada de produto na curva de secagem da PTS Tipo III ( $T=90^{\circ}\text{C}$ e $v=100$ $\text{cm.s}^{-1}$ ).....	83
<b>Figura 6.16:</b> Influência da temperatura do ar de secagem na curva de secagem da PTS Tipo III ( $h=5$ cm e $v=100$ $\text{cm.s}^{-1}$ ).....	83
<b>Figura 6.17:</b> Influência da velocidade do ar de secagem na curva de secagem da PTS Tipo III ( $h=5$ cm e $T=110^{\circ}\text{C}$ ).....	84
<b>Figura 6.18:</b> Influência da temperatura do ar de secagem na taxa de secagem da PTS Tipo III versus a umidade adimensional ( $v=150$ $\text{cm.s}^{-1}$ e $h=5$ cm).....	87
<b>Figura 6.19:</b> Influência da temperatura do ar de secagem na taxa de secagem da PTS Tipo III versus o tempo de secagem ( $v=150$ $\text{cm.s}^{-1}$ e $h=5$ cm).....	87
<b>Figura 6.20:</b> Ajuste dos dados obtidos em um dos experimentos realizados com a PTS Tipo III ao modelo proposto ( $T=130^{\circ}\text{C}$ , $v=100$ $\text{cm.s}^{-1}$ e $h=10$ cm).....	90

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$DH_0$	Calor latente de vaporização da água pura (10,53 kcal.gmol <sup>-1</sup> a 25°C).
$A$	Parâmetro de ajuste da equação 2.12 e 2.13.
$A$	<i>Redness</i> , parâmetro de avaliação de cor.
$A_{H_2O}$	Área de uma molécula de água ( $A_{H_2O} = 10,6 \times 10^{-20}$ m <sup>2</sup> ).
$A_S$	Área exposta ao ar de secagem, em m <sup>2</sup> .
$A_w$	Atividade de água (adimensional).
$b$	Parâmetro de ajuste da equação 2.6 e 2.15.
$B$	Parâmetro de ajuste da equação 2.12 e 2.13.
$B$	<i>Yellowness</i> , parâmetro de avaliação de cor.
b.s.	Base seca.
b.u.	Base úmida.
$C$	Parâmetro de ajuste da equação 2.7, 2.9.
$c$	Fator entrópico (parâmetro de ajuste da equação 2.10).
$C_1$	Parâmetro de ajuste do modelo exponencial (equação 4.4).
$C_2$	Parâmetro de ajuste do modelo exponencial (equação 4.4).
$D_0$	Parâmetro de ajuste da equação 2.28.
$D_{eff}$	Coefficiente de difusividade efetiva de umidade, em m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> .
$D_{eq}$	Diâmetro equivalente, em mm.
$D_{eqi}$	Diâmetro equivalente da peneira <i>i</i> , em mm.
$E_a$	Energia de ativação, em cal.gmol <sup>-1</sup> .
$EMR$	Erro médio relativo, em %.
$h$	Altura de camada de produto, em cm.
$H_C$	Coefficiente de transferência de calor convectivo, em W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> .
$H_m$	Entalpia molar de sorção da monocamada, em J.gmol <sup>-1</sup> .
$H_n$	Entalpia molar de sorção da multicamada, em J.gmol <sup>-1</sup> .
$H_p$	Entalpia molar de evaporação da água líquida J.gmol <sup>-1</sup> .
$k$	Inverso da pressão de vapor da água pura na temperatura do sistema, em Pa <sup>-1</sup> .
$K$	Parâmetro de ajuste da equação 2.8 e 2.9.
$K_1$	Parâmetro de ajuste da equação 2.16 e 2.17.
$K_1$	Parâmetro de ajuste do modelo estatístico (equação 4.5).
$k_{10}$	Parâmetro de ajuste do modelo estatístico (equação 4.5).
$K_2$	Parâmetro de ajuste da equação 2.16 e 2.17.
$K_2$	Parâmetro de ajuste do modelo estatístico (equação 4.5).
$K_3$	Parâmetro de ajuste da equação 2.16.
$K_3$	Parâmetro de ajuste do modelo estatístico (equação 4.5).

$K_4$	Parâmetro de ajuste da equação 2.16.
$K_4$	Parâmetro de ajuste do modelo estatístico (equação 4.5).
$K_5$	Parâmetro de ajuste da equação 2.16.
$K_5$	Parâmetro de ajuste do modelo estatístico (equação 4.5).
$K_6$	Parâmetro de ajuste do modelo estatístico (equação 4.5).
$K_7$	Parâmetro de ajuste do modelo estatístico (equação 4.5).
$K_8$	Parâmetro de ajuste do modelo estatístico (equação 4.5).
$K_9$	Parâmetro de ajuste do modelo estatístico (equação 4.5).
$K_G$	Fator entrópico (parâmetro de ajuste da equação 2.11).
$K_H$	Parâmetro de ajuste da equação 2.14.
$K_y$	Coefficiente de transferência de massa, em $m.s^{-1}$ .
$L$	<i>Lightness</i> , parâmetro de avaliação de cor.
$L_p$	Espessura de uma placa plana, em cm.
$M_i$	Massa de amostra retida na peneira de diâmetro $D_{eqi}$ , em g.
$M_{S.S.}$	Massa de sólido seco, em kg.
$M_{tot}$	Massa total da amostra, em kg.
$N$	Parâmetro de ajuste da equação 2.7.
$N_0$	Número de Avogadro ( $N_0 = 6 \times 10^{23}$ moléculas.gmol <sup>1</sup> ).
$N_1$	Parâmetro de ajuste da equação 2.17.
$N_2$	Parâmetro de ajuste da equação 2.17.
$N_a$	Fluxo de vapor de água, em $kg.m^{-2}.s^{-1}$ .
$p$	Parâmetro de ajuste da equação 2.15.
$P$	Pressão do ar, em $kgf.cm^{-2}$ .
$PM_{ar}$	Massa molecular do ar (28,8 g.gmol <sup>1</sup> ).
$PM_{H_2O}$	Massa molecular da água (18 g.gmol <sup>1</sup> ).
PTS	Proteína texturizada de soja.
$P_w$	Pressão parcial da atmosfera externa, em Pa.
$q$	Taxa de calor, em W.
$Q_s$	Calor de sorção, em kcal.gmol <sup>1</sup>
$Q_{st}$	Calor total de sorção, em kcal.gmol <sup>1</sup>
$R$	Taxa de secagem, em $kg\ água.kg\ ss^{-1}.s^{-1}$
$r, r^*$	Raio, em cm
$R^2$	Coefficiente de correlação.
$R_a$	Raio de um cilindro, em cm.
$R_C$	Período de taxa constante de secagem.
$R_D$	Período de taxa decrescente de secagem.
$r_e$	Raio de uma esfera, em cm.
$R_G$	Constante universal dos gases (1,987 cal.gmol <sup>1</sup> .K <sup>-1</sup> ).



$S_s$	Sólido seco.
$S_0$	Área superficial de água do produto, em $m^2.g$ de sólido <sup>-1</sup> .
$T$	Temperatura do ar, em °C ou K.
$t$	Tempo, em s.
$T_g$	Temperatura de transição vítrea, em °C.
$T_w$	Temperatura de bulbo úmido, em °C ou K.
$UR$	Umidade relativa do ar (adimensional).
$v$	Velocidade do ar, em $cm.s^{-1}$ .
$V_{CALC}$	Valores estimados pelo modelo.
$V_{EXP}$	Dados experimentais.
$X$	Teor de umidade, em $kg$ água. $kg$ ss <sup>-1</sup> .
$X_{adm}$	Teor de umidade adimensional, em função de $X$ , $X_0$ e $X_{eq}$ .
$X_C$	Teor de umidade crítico, em $kg$ água. $kg$ ss <sup>-1</sup> .
$X_{eq}$	Teor de umidade de equilíbrio, em $kg$ água. $kg$ ss <sup>-1</sup> .
$X_{in}$	Umidade de equilíbrio equivalente a uma $a_w$ de 0,5, em $kg$ água. $kg$ ss <sup>-1</sup> .
$X_L$	Teor de umidade livre, em $kg$ água. $kg$ ss <sup>-1</sup> .
$X_m$	Umidade de monocamada, em $kg$ água. $kg$ ss <sup>-1</sup> .
$X_{máx}$	Teor de umidade máximo, $kg$ água. $kg$ ss <sup>-1</sup> .
$y$	Umidade do ar, em $kg$ água. $kg$ ss <sup>-1</sup> .
$Y_s$	Umidade do ar na superfície do sólido, em $kg$ água. $kg$ ss <sup>-1</sup> .
$Y_w$	Teor de umidade em $T = T_w$ , em $kg$ água. $kg$ ss <sup>-1</sup> .
$?_n$	Raiz do tipo um e ordem zero da função de Bessel de primeira espécie.
$?_w$	Calor latente em $T = T_w$ , em $kcal.gmol^{-1}$ .

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1:</b> Valores mínimos de atividade de água para o crescimento de alguns microrganismos.....	9
<b>Tabela 2.2:</b> Modelos comumente utilizados na predição das isotermas de sorção de produtos alimentícios (umidade de equilíbrio em função da atividade de água).....	17
<b>Tabela 2.3:</b> Valores estimados para a difusividade efetiva de alguns produtos alimentícios. ....	26
<b>Tabela 2.4:</b> Efeitos geralmente causados pelo aumento da temperatura ( $T$ ), velocidade ( $v$ ), umidade relativa ( $UR$ ) e pressão ( $P$ ) em ambos os períodos de taxa de secagem.....	28
<b>Tabela 4.1:</b> Soluções salinas saturadas utilizadas na determinação das isotermas de adsorção.....	46
<b>Tabela 4.2:</b> Valores de altura de camada ( $h_1$ e $h_2$ ) utilizados nos procedimentos experimentais para a determinação das curvas de secagem de cada tipo de PTS.....	49
<b>Tabela 4.3:</b> Faixa de valores estudados para cada fator. ....	50
<b>Tabela 5.1:</b> Resultado do ajuste dos dados experimentais, obtidos para a PTS Tipo I, aos diferentes modelos estudados. ....	55
<b>Tabela 5.2:</b> Resultado do ajuste dos dados experimentais, obtidos para a PTS Tipo II, aos diferentes modelos estudados.....	56
<b>Tabela 5.3:</b> Valores de umidade de monocamada para ambos os tipos de PTS. ....	60
<b>Tabela 5.4:</b> Valores estimados para a área superficial da PTS Tipo I e Tipo IV para as diferentes temperaturas estudadas.....	62
<b>Tabela 6.1:</b> Umidade de equilíbrio e diâmetro equivalente obtidos para cada tipo de PTS.....	63
<b>Tabela 6.2:</b> Resultado do ajuste dos dados experimentais obtidos para a PTS Tipo I ao modelo exponencial.....	66
<b>Tabela 6.3:</b> Valores de $F$ (calculados e tabelados) para a PTS Tipo I.....	67
<b>Tabela 6.4:</b> Constantes obtidas através do ajuste dos dados da Tabela 6.2 ao modelo estatístico proposto.....	71
<b>Tabela 6.5:</b> Valores de $EMR$ gerados na comparação dos teores de umidade da PTS Tipo I obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo.....	72
<b>Tabela 6.6:</b> Resultado do ajuste dos dados experimentais obtidos para a PTS Tipo II ao modelo exponencial.....	77
<b>Tabela 6.7:</b> Valores de $F$ calculado e tabelado obtidos para a PTS Tipo II. ....	78
<b>Tabela 6.8:</b> Constantes obtidas através do ajuste dos dados da Tabela 6.6 ao modelo estatístico proposto.....	80

<b>Tabela 6.9:</b> Valores de <i>EMR</i> gerados na comparação dos teores de umidade da PTS Tipo II obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo.....	81
<b>Tabela 6.10:</b> Resultado do ajuste dos dados experimentais obtidos para a PTS Tipo III ao modelo exponencial. ....	85
<b>Tabela 6.11:</b> Valores de F calculados e tabelados obtidos para a PTS Tipo III.....	86
<b>Tabela 6.12:</b> Constantes obtidas através do ajuste dos dados da Tabela 6.10 ao modelo proposto.....	88
<b>Tabela 6.13:</b> Valores de <i>EMR</i> gerados na comparação dos teores de umidade da PTS Tipo III obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo. ....	89
<b>Tabela 6.14:</b> Comparação entre valores de <i>EMR</i> gerados na simulação parcial das curvas de secagem através do ajuste de toda a curva e de parte dela.....	92
<b>Tabela 6.15:</b> Constantes do modelo unificado proposto .....	92

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

As proteínas são componentes estruturais essenciais das células, encontrando-se no centro da ação nos processos biológicos; praticamente todas as transformações moleculares que definem o metabolismo celular são mediadas pela catálise protéica. As proteínas exercem também importantes funções regulatórias, controlando as condições intracelulares e extracelulares, além de fornecer informações para outros componentes da célula.

Para que um alimento seja considerado como uma boa fonte de proteínas, estas devem se encontrar disponíveis para a utilização pelo organismo. Segundo SGARBIERI (1996), o valor nutricional das proteínas varia de acordo com a composição das mesmas, sua digestibilidade, a biodisponibilidade dos aminoácidos essenciais, a ausência de toxicidade e/ou a presença de componentes antinutricionais.

Com o descobrimento da importância nutricional das proteínas começou-se a buscar alternativas de alimentos de elevado teor protéico. Descobriu-se, assim, o grão de soja como ótima fonte de proteína vegetal, uma vez que este contém cerca de 40% de proteína. Além disso, as proteínas presentes na soja contêm todos os aminoácidos essenciais que não são sintetizados pelo organismo humano, sendo limitados apenas os teores de metionina e fenilalanina (em relação ao Padrão Teórico de referência dado pela Academia Norte-americana de Ciências). Estudos demonstraram, ainda, que a biodisponibilidade dos aminoácidos essenciais presentes na farinha de soja é superior a 90% (exceto para a metionina) o que indica um nível muito bom de biodisponibilidade em relação às proteínas de origem animal (SGARBIERI, 1996).

Outro fator de grande importância na avaliação do valor nutritivo das proteínas é seu índice de digestibilidade. De modo geral, pode-se dizer que as proteínas de origem animal apresentam uma digestibilidade superior a 95%, enquanto que a digestibilidade apresentada

pelas proteínas de origem vegetal não chega a 80%. Dentre estas, entretanto, destacam-se as proteínas de soja que apresentam os mais elevados índices de digestibilidade entre as proteínas vegetais (em torno de 78%).

Assim, a constatação do grão de soja como uma ótima fonte de proteínas de alto valor nutricional fez da soja uma das matérias-primas mais importantes para a obtenção de muitos ingredientes e derivados protéicos, dando-se início, por volta de 1950, à utilização destes grãos para produção de uma farinha desengordurada destinada à alimentação humana. Esta produção vem crescendo a cada dia e, atualmente, são produzidos no mundo mais de 1,5 milhões de toneladas de farinha desengordurada por ano (BUNGE, 2001). Esta farinha serviu como precursora de outros importantes produtos, tais como o farelo de soja, a proteína texturizada de soja (PTS, mínimo de 50% de proteína), a proteína concentrada de soja (mínimo de 70% de proteína) e a proteína isolada de soja (mínimo de 90% de proteína).

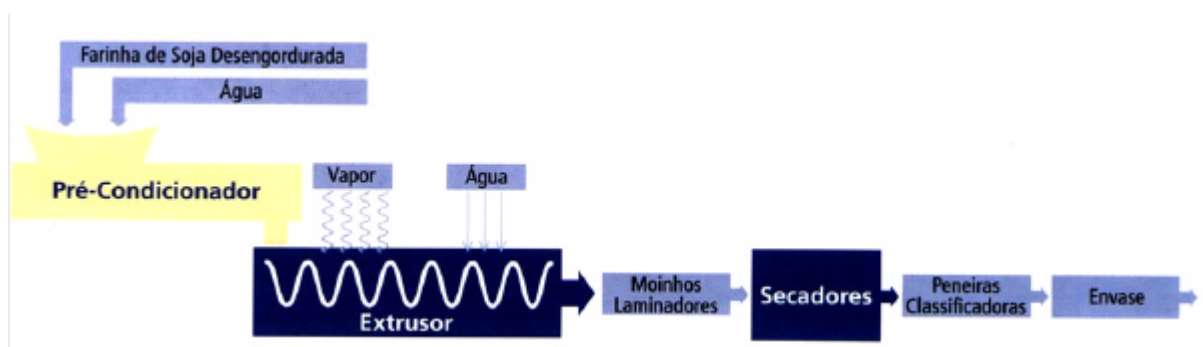
Segundo definição do Ministério da Saúde (Resolução CNNPA nº 14, de 28 de junho de 1978), “proteína texturizada de soja é o produto protéico dotado de integridade estrutural identificável, de modo a que cada unidade suporte hidratação e cozimento, obtida por fiação e extrusão termoplástica, a partir de uma ou mais das seguintes matérias-primas: proteína isolada de soja, proteína concentrada de soja e farinha desengordurada de soja”.

Inicialmente, a utilização da PTS na alimentação humana baseava-se na substituição da proteína animal em produtos cárneos (a PTS previne a perda de água, proporcionando ao produto uma textura similar à da proteína da carne). Entretanto, a comprovação dos efeitos benéficos das proteínas de soja na diminuição do colesterol e na prevenção de doenças cardíacas intensificou o interesse da indústria alimentícia no desenvolvimento dos mais diversos tipos de alimentos contendo concentrados protéicos a base de soja. Desta forma, ampliou-se significativamente a gama de aplicações das proteínas, tornando-se cada vez mais recorrente a utilização destas como um ingrediente funcional nos mais variados produtos, tais como bebidas, barras nutricionais, suplementos alimentares, cereais, biscoitos, molhos, chocolates, snacks, entre outros.

As principais funções que a PTS pode exercer nos alimentos são a de agregar água e aumentar a quantidade de proteína no produto final, além de substituir uma parte da carne em produtos embutidos, formatados ou a base de carne moída, mantendo o teor de proteína destes. Elas podem, ainda, agir como espessante em produtos desidratados. Além disso, dentre as propriedades funcionais de maior importância da PTS pode-se citar as propriedades de hidratação, retenção de água e gordura, fixação de sabores e aromas e capacidade de formação de fibras. A hidratação e a retenção de água por ingredientes protéicos têm um papel fundamental na qualidade da textura de diversos alimentos: a absorção de água produz expansão no produto, conferindo características de consistência, viscosidade e aderência. Já a capacidade de texturização das proteínas de soja através de um processo de extrusão aplicado

a um material termoplástico, faz com que se formem estruturas fibrosas mastigáveis com textura semelhante à da carne (GIESE, 1994).

Para obtenção de uma PTS de qualidade é necessário que se tenham determinados cuidados em seu processamento, desde o plantio da soja, passando pela armazenagem dos grãos, preparação e extração, até a sua preparação final. O tratamento ao qual o grão é submetido é determinante para que se tenham as propriedades nutricionais e funcionais desejadas no produto final. A Figura 1.1 apresenta uma representação esquemática do fluxograma de produção da PTS a partir da farinha desengordurada de soja.



**Figura 1.1:** Representação esquemática da produção de PTS a partir da farinha desengordurada de soja. *Fonte:* BUNGE ALIMENTOS, 2001.

Durante a produção da PTS, a etapa de extrusão é determinante para a textura e a qualidade do produto final obtido, pois é nesta etapa que ocorrem todas as transformações químicas, físicas e bioquímicas necessárias para a texturização de um produto alimentício. KINSELLA (1978) apud RHEE *et al* (1981), separou o processo de texturização das PTS em três fases distintas. Na primeira fase, as proteínas são hidratadas dentro do extrusor e gradualmente desenroladas e esticadas pela ação do vapor e da rosca giratória; na segunda fase, as proteínas ficam alinhadas e passam através de uma matriz que as comprime e lamina longitudinalmente; passa-se, então, à terceira fase, quando, na saída da matriz, a pressão cai e a umidade vaporiza, expandindo as estruturas e formando vacúolos de ar no interior destas. O processo resulta em uma estrutura porosa com arranjos paralelos de fibras laminares de proteína.

Além da etapa de extrusão, a etapa posterior de secagem também exerce papel fundamental no processo produtivo da PTS, uma vez que visa a diminuição da umidade do produto para fins de conservação e comercialização. A desidratação de alimentos é de grande importância, pois os torna menos susceptíveis à degradação causada pelo crescimento de bactérias, fungos e leveduras. Além disso, os riscos de reações químicas e enzimáticas indesejáveis, que degradam o produto e também reduzem a vida de prateleira deste, diminuem com a redução da umidade. Uma vez que a PTS deixa o extrusor com um teor de umidade em torno de 26% (base seca) e a mesma portaria citada anteriormente fixa a umidade máxima de

---

comercialização da PTS em 8% (base seca), pode-se perceber o quão importante é a etapa de secagem na produção e comercialização da PTS.

Dentro deste contexto situa-se o objetivo deste trabalho que é o de estudar e determinar as principais características de secagem de quatro diferentes tipos de proteína texturizada de soja. Para tanto, optou-se pela realização de duas séries diferentes de experimentos: uma delas visa a determinação das isotermas de adsorção de dois tipos de PTS nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C e a outra visa a obtenção das curvas de secagem de três diferentes tipos de PTS para diferentes condições de altura de camada de produto, temperatura e velocidade do ar de secagem. Analisou-se, também, a influência exercida por cada um destes parâmetros no processo de secagem e estudou-se um modelo que permitisse a predição do tempo de secagem de cada tipo de PTS em função dos parâmetros do processo e da umidade inicial e de equilíbrio da amostra.

## **CAPÍTULO 2**

### **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Neste capítulo serão apresentados os principais fundamentos teóricos relativos ao processo de secagem dos produtos alimentícios.

#### **2.1 A UMIDADE NOS ALIMENTOS**

Conforme descrito detalhadamente nas referências clássicas que tratam da secagem de produtos alimentícios - GEANKOPLIS (1993), MUJUMDAR (1995), BARBOSA e VEGA (1996), HELDMAN e HARTEL (2000) - a umidade de um produto alimentício nada mais é do que a quantidade de moléculas de água, ou teor de água, que se encontrar ligada ou não às diversas partes deste produto.

Considera-se como teor de água livre o teor de umidade passível de remoção em determinada temperatura e este pode englobar tanto a água ligada como a não ligada.

A porção de água não ligada é definida como a água presente no produto cujo comportamento assemelha-se ao da água pura. Esta corresponde à umidade de saturação, ou seja, à umidade em excesso ao teor de umidade de equilíbrio. Nos produtos muito úmidos, cujo teor de umidade é superior a 50% b.s., a água pode ser encontrada livre nos poros intersticiais e nos espaços intercelulares do alimento.

A porção de água ligada, por sua vez, é aquela que apresenta uma baixa pressão de vapor, baixa mobilidade e um ponto de congelamento bem menor do que a água pura. Além disso, suas moléculas apresentam propriedades cinéticas e termodinâmicas diferentes das moléculas de água pura. Para a água ser considerada como fisicamente ligada ao sólido, esta deve se encontrar retida no interior dos capilares, em solução na estrutura celular do sólido ou,



ainda, adsorvida química ou fisicamente na superfície deste. A água pode se encontrar ligada de duas maneiras diferentes: formando grupos iônicos (amino-ácidos e carboxil) ou formando grupos hidrogeniônicos (hidroxil e amidas). A facilidade de remoção da umidade do sólido segue a seguinte ordem: água não ligada, água ligada por grupos hidrogeniônicos e água ligada por grupos iônicos.

A forma na qual as moléculas de água encontram-se no interior dos sólidos classificam os meios nos seguintes tipos (válido apenas para meios homogêneos):

- meios porosos não higroscópicos: são facilmente identificados por possuírem poros bem definidos; se o meio está completamente seco, o espaço dos poros encontra-se totalmente preenchido por ar; por outro lado, se este se encontra saturado, seus poros estão preenchidos por líquido. Além disso, o teor de umidade fisicamente ligada a este tipo de sólido é negligenciável (material não higroscópico). Outra característica deste grupo é o não encolhimento do sólido durante o processo de secagem;
- meio poroso higroscópico: os sólidos presentes neste grupo também possuem poros bem definidos, mas, ao contrário do anterior, o teor de umidade fisicamente ligado a estes sólidos é grande e eles podem sofrer encolhimento, principalmente nos primeiros estágios da secagem;
- meios coloidais (não porosos): neste grupo encontram-se os sólidos que não possuem nenhum espaçamento de poros, ou seja, a evaporação se dá somente na superfície; além disso, toda a água presente no interior destes é fisicamente ligada.

Em uma mistura de ar seco e vapor d'água, cada um dos componentes exerce uma certa pressão sobre o outro, denominada de pressão parcial. A diferença entre as pressões parciais de vapor de água no ar e no produto é a força motriz para o processo de secagem.

Bem próximo à interface entre a água livre e o vapor d'água, a pressão de vapor no equilíbrio é a pressão de vapor de saturação. Produtos muito úmidos possuem uma pressão de vapor na interface quase igual à pressão de vapor de saturação. Na secagem, remove-se a umidade e, por consequência, aumenta-se a concentração de sólidos, o que provoca uma queda na pressão de vapor devido às forças osmóticas. Se o produto continua exposto ao ar de secagem, sua superfície torna-se seca e a água passa a existir apenas no interior de capilares muito pequenos, entre pequenas partículas, entre moléculas e/ou ligadas a elas. Essa condição causa uma expressiva diminuição na pressão de vapor e tal produto só poderá atingir novamente o equilíbrio em uma atmosfera cuja pressão de vapor encontra-se consideravelmente mais baixa.

Assim, um sólido úmido exposto a uma corrente contínua de ar fresco, à temperatura constante, perde umidade até que a pressão de vapor da umidade no interior do sólido

equipara-se à pressão parcial do vapor no gás. Nestas condições, estabelece-se o equilíbrio entre o sólido e o gás e o conteúdo de umidade do sólido neste ponto é denominado de teor de umidade de equilíbrio ( $X_{eq}$ ). A partir deste ponto, por maior que seja o tempo de exposição do sólido ao ar de secagem, não ocorrerá mais nenhuma modificação no teor de umidade deste. À correspondente pressão de vapor do meio na mesma temperatura denomina-se de pressão de vapor de equilíbrio e a razão entre a pressão de vapor de equilíbrio e a pressão de vapor de saturação é conhecida como umidade relativa de equilíbrio ou, atividade de água ( $a_w$ ).

### **2.1.1 UMIDADE BASE ÚMIDA (B.U.) X BASE SECA (B.S.)**

Os dados referentes a um processo de secagem são expressos geralmente em função do peso total do material úmido e do tempo de duração do processo, mas também se pode optar pela expressão destes dados em função da taxa de secagem.

Uma vez que o volume do sólido úmido pode variar durante o processo de secagem, não é indicado expressar o teor de umidade em função deste. Assim, o teor de umidade de um sólido é geralmente expresso em função de sua massa de matéria seca ( $X$ , em  $\text{kg água.kg sólido seco}^{-1}$  (kg ss)), pois esta permanece constante durante todo o processo de secagem. O teor de umidade é definido, desta forma, como a razão entre o teor de água presente no alimento e o teor de sólidos secos:

$$X = \frac{M_{tot} - M_{SS}}{M_{SS}} \quad (2.1)$$

onde  $M_{tot}$  é a massa total da amostra (kg),  $M_{SS}$  é a massa de sólido seco da amostra (kg) e  $X$  é o teor de umidade em base seca ( $\text{kg água.kg ss}^{-1}$ ).

Um outro parâmetro importante no desenvolvimento de um processo de secagem é o teor de umidade livre ( $X_L$ ). Este pode ser determinado a partir do valor da umidade de equilíbrio ( $X_{eq}$ ).

$$X_L = X - X_{eq} \quad (2.2)$$

## **2.2 ATIVIDADE DE ÁGUA**

Um aspecto considerado fundamental na preservação de alimentos é como - e não quanto - a água está ligada ao produto.

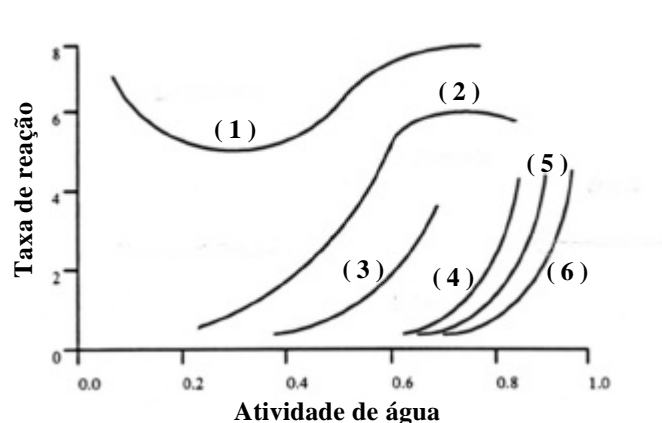
Segundo MUJUMDAR (1995) e BARBOSA e VEGA (1996), o termo atividade de água ( $a_w$ ) surgiu nos anos 50, a fim de descrever o estado da água presente no interior dos alimentos e é utilizado atualmente para expressar o papel da umidade na secagem e estabilidade durante o armazenamento de produtos alimentícios.

A atividade de água de um produto alimentício é definida como a razão entre a pressão de vapor de equilíbrio no alimento e a pressão de vapor de saturação em uma mesma temperatura e é um fator determinante para o crescimento microbiano, produção de toxinas e para a ocorrência de reações enzimáticas e não-enzimáticas. O fenômeno da oxidação, por exemplo, só é possível em meios cuja atividade de água seja superior a 0,4 e a inativação de outros organismos requer uma atividade de água de, no máximo, 0,7. Algumas reações enzimáticas podem continuar mesmo em valores muito baixos de atividade de água (0,1-0,3), mas sob taxas menores de reação.

A seguir, será discutido, mais aprofundadamente, a relação entre a atividade de água e a estabilidade dos produtos alimentícios.

## 2.3 ESTABILIDADE DOS ALIMENTOS

Como visto anteriormente, o crescimento microbiano e a deterioração química dos alimentos estão intimamente ligados à atividade de água destes. A Figura 2.1 apresenta os fatores envolvidos na estabilidade dos alimentos e sua relação com a atividade de água.



**Figura 2.1:** Influência da atividade de água na estabilidade dos alimentos (BAKER, 1997).

Nesta figura, os números de (1) a (6) representam as curvas de taxa de reação em função da atividade de água dos seguintes fatores:

- (1) oxidação de lipídios
- (2) reações não-enzimáticas
- (3) reações enzimáticas
- (4) fungos
- (5) bactérias
- (6) leveduras

Como pode ser visto na Figura 2.1, a atividade de água ideal de um produto alimentício situa-se entre 0,2 e 0,4, pois nesta faixa o alimento apresentará a maior estabilidade frente ao crescimento de microrganismos, além de sua qualidade não ser afetada pelo escurecimento não-enzimático e pela oxidação de lipídios.

A seguir serão apresentados, com maior ênfase, os principais fatores relativos à estabilidade dos alimentos e afetados pela atividade de água destes (BARBOSA e VEGA, 1996).

### 2.3.1 CONTAMINAÇÃO MICROBIANA

As células vivas são sensíveis ao estado em que a água se encontra no meio que as envolve. A habilidade dos microrganismos de crescer e produzir toxinas está diretamente relacionada com a atividade de água do meio. Na Tabela 2.1 encontram-se valores mínimos de atividade de água para o crescimento de alguns microrganismos.

**Tabela 2.1:** Valores mínimos de atividade de água para o crescimento de alguns microrganismos.

<b>Microrganismo</b>	<b>Classificação</b>	<b><math>a_w</math></b>
<i>Aspergillus flavus</i>	Fungo	0,78
<i>Aspergillus parasiticus</i>	Fungo	0,82
<i>Penicillium citrinum</i>	Fungo	0,8
<i>Aspergillus ochraceus</i>	Fungo	0,83
<i>Clostridium botulinum</i> tipo E	Bactéria	0,98
<i>Pseudomonas</i>	Bactéria	0,98
<i>Flavobacterium</i>	Bactéria	0,96
<i>Klebsiella</i>	Bactéria	0,96
<i>Lactobacillus</i>	Bactéria	0,93
<i>Micrococcus</i>	Bactéria	0,90
<i>Staphylococcus</i> (aeróbio)	Bactéria	0,86
<i>Rhodattorula</i>	Levedura	0,92
<i>Saccaromyces</i>	Levedura	0,90
<i>Cândida</i>	Levedura	0,88

Fonte: BEUCHAT, 1983 e SCORZA et al, 1981.

BECHAUT (1983) também reportou que os mínimos valores de atividade de água necessários à produção de toxinas são ainda maiores do que os valores para o crescimento microbiano. O efeito da redução da atividade de água pode ser observado na fase logarítmica, onde o tempo necessário para as células individuais se reproduzirem é mais extenso. Outros fatores, combinados com a atividade de água, também podem inibir o crescimento de microrganismos, podendo-se citar o pH, a presença de oxigênio, o uso de conservantes, a temperatura e a radiação. KAREL (1975) pesquisou a sensibilidade dos microrganismos ao

calor, luz e agentes químicos em função da atividade de água, concluindo, nos três casos, que quanto maior este fator, maior a sensibilidade dos microrganismos.

### **2.3.2 REAÇÕES ENZIMÁTICAS**

A atividade enzimática é inibida em produtos alimentícios cuja atividade de água seja inferior a 0,75. A atividade enzimática até pode ser desejada, mas, uma vez que esta pode afetar o teor de nutrientes do alimento e suas características sensoriais, ela é considerada, na maioria das vezes, como reação indesejável. A redução da atividade enzimática nem sempre ocorre devido às alterações estruturais na enzima; fatores tais como força iônica e competição por sítios ativos por compostos nucleofílicos (metanol, etanol e glicerol) explicam a estabilidade do complexo enzimático nos sistemas alimentares.

O escurecimento enzimático é o maior exemplo de reação enzimática na maioria das vezes indesejável, pois este pode ser responsável pela formação de pigmentos escuros, produção de gases e a redução no volume de frutas. Os compostos mais comuns responsáveis por esta reação são compostos insaturados como monofenóis e difenóis.

### **2.3.3 REAÇÕES NÃO-ENZIMÁTICAS**

Além da reação de oxidação das vitaminas, a reação não-enzimática mais comum encontrada em alimentos é o escurecimento não-enzimático que pode ser de dois tipos: reação de Maillard e de caramelização. Esta reação pode ser organolepticamente desejada ou não, em determinado alimento, devido às alterações causadas na cor, aroma e sabor deste. Além disso, a inibição do escurecimento não-enzimático evita, na maioria dos casos, a perda de nutrientes essenciais tais como os aminoácidos.

As reações não-enzimáticas atingem taxa máxima em baixos teores de umidade: a taxa máxima nas frutas, por exemplo, situa-se em valores de atividade de água entre 0,65 e 0,75.

### **2.3.4 OXIDAÇÃO DE LIPÍDIOS**

As reações de oxidação nos alimentos estão relacionadas com a incidência da luz sobre o produto e com a presença de metais que atuam como catalisadores para os radicais livres. Além disso, como visto na Figura 2.1, a taxa de oxidação também é função da atividade de água do alimento. Na maioria das vezes, a baixos valores de atividade de água, a reação ocorre lentamente devido à baixa mobilidade e disponibilidade dos radicais livres. Já em valores mais elevados, a taxa de reação aumenta devido à dissolução dos íons metálicos, o que promove a formação de radicais livres.

### **2.3.5 FENÔMENOS FÍSICOS E ESTRUTURAIS**

Alterações geométricas e estruturais durante a secagem afetam o transporte de massa e a qualidade dos produtos alimentícios. Os defeitos mais comuns encontrados em alimentos desidratados são sua textura ressecada e quebradiça, uma reidratação lenta ou incompleta e a perda da suculência típica do alimento fresco.

A cristalização de polissacarídeos como o amido ocorre devido à remoção da água; este fenômeno, juntamente com a perda da integridade celular, é o principal responsável pelas alterações dos produtos alimentícios.

O encolhimento é a alteração mais comum durante o processo de secagem e ocorre nos primeiros estágios deste. A desidratação de alimentos com temperaturas próximas ou abaixo da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) pode evitar ou diminuir este fenômeno. Entretanto, as frutas e os vegetais possuem um teor de umidade inicial muito alto e, por conseqüência, temperaturas de transição vítreas muito baixas, o que torna muito difícil a inibição do encolhimento. O ar comumente utilizado na secagem de frutas e vegetais encontra-se em uma temperatura muito superior às de transição vítrea, o que acarreta um encolhimento bastante extenso e o freqüente colapso do sistema. A desidratação de alimentos a baixas temperaturas (liofilização) aumenta a porosidade e diminui o encolhimento, mas ainda é considerada uma tecnologia muito cara devido ao longo tempo de secagem necessário.

A seguir, será discutida a relevância, para o processo de secagem, da relação existente entre o teor de umidade de equilíbrio do produto e a atividade de água do mesmo.

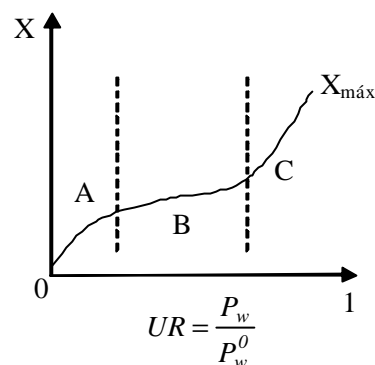
## **2.4 SORÇÃO E ISOTERMAS DE SORÇÃO**

Quando um produto alimentício é submetido à secagem, tanto seu teor de umidade como sua atividade de água se alteram ao longo do processo. O ar de secagem possui uma determinada umidade relativa e, para qualquer que seja este valor, existe um teor de umidade de equilíbrio do produto com o ar. Neste ponto de equilíbrio, a atividade de água no ar é a mesma do produto. Esta relação entre o teor de umidade de equilíbrio do produto e a umidade relativa do ar é de grande importância para o desenvolvimento de um processo de secagem, uma vez que especifica o teor de umidade do alimento que pode ser atingido sob quaisquer condições do ar de secagem (HELDMAN e HARTEL, 2000).

Um produto seco é denominado higroscópico se este é capaz de absorver água concomitantemente com um abaixamento da pressão de vapor. Produtos diferentes apresentam grande variação em suas propriedades higroscópicas devido, principalmente, a sua estrutura molecular, solubilidade e extensão da superfície reativa (MUJUMDAR, 1995).

A fim de descrever as propriedades higroscópicas de um produto, determinam-se experimentalmente suas isotermas de sorção. Estas são representadas em um gráfico que relaciona o teor de umidade e a correspondente atividade de água para uma dada temperatura (constante). Este gráfico geralmente apresenta curvas com formato de “S” invertido, pois a afinidade do sólido com a umidade e a facilidade de adsorção e dessorção da umidade dependem principalmente do modo como essa umidade está ligada ao sólido (VAN ARSDEL e COPLEY, 1973).

A Figura 2.2 apresenta uma isoterma típica de produtos alimentícios.



**Figura 2.2:** Isoterma típica de produtos alimentícios (MUJUMDAR, 1995).

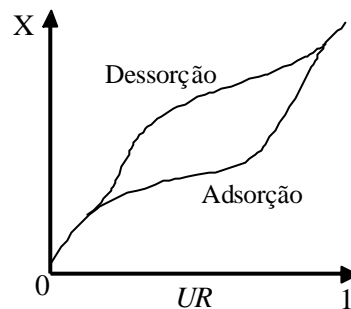
Nesta figura, se a pressão parcial da atmosfera externa ( $P_w$ ) encontrar-se próxima de zero, a umidade de equilíbrio no interior do produto também o será. A seção A da curva representa a região na qual ocorre a formação da camada monomolecular, embora camadas multimoleculares também podem ser formadas. A seção B é uma região de transição, na qual formam-se, principalmente, camadas duplas e múltiplas. Além disso, já podem ser verificadas ocorrências de condensação capilar. Finalmente, a seção C caracteriza-se por novo aumento na inclinação da curva devido, principalmente, ao aumento da condensação capilar e do característico inchaço do produto. Atinge-se a higroscopicidade máxima ( $X_{máx}$ ) quando o sólido entra em equilíbrio com o ar saturado de umidade ( $UR = 1$ ) (MUJUMDAR, 1995).

A determinação das isotermas de sorção é de grande interesse industrial, uma vez que a análise destas curvas propicia informações úteis para o planejamento dos processos de secagem, especialmente na determinação da umidade final a ser atingida, aliando viabilidade econômica e segurança microbiológica (MCLAUGHLIN e MAGEE, 1998). Além da secagem, as isotermas também fornecem dados relevantes para etapas como o embalamento, transporte e armazenamento. A análise destas curvas, por exemplo, permite a determinação da umidade de monocamada ( $X_m$ ) de determinado produto. Segundo MENKOV (2000), este é um parâmetro de grande importância para a estabilidade física e química de materiais desidratados em relação à oxidação de lipídios, atividade enzimática, escurecimento não enzimático, preservação de componentes do sabor e características estruturais.

O processo de sorção não é completamente reversível, o que causa uma diferença entre as isotermas de adsorção e as de dessorção. A primeira é utilizada principalmente para a observação de produtos higroscópicos, já a segunda auxilia na investigação dos processos de secagem (BARBOSA e VEGA, 1996).

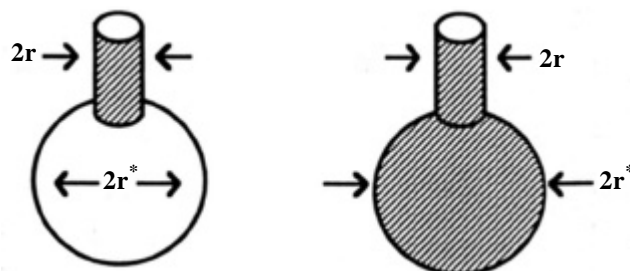
À diferença existente entre os caminhos de adsorção e dessorção para uma mesma isoterma dá-se o nome de *histerese*. Este fenômeno tem importantes implicações teóricas (irreversibilidade do processo de sorção, por exemplo) e deve ser considerado como um mecanismo de proteção contra o ressecamento da superfície e os danos causados pelo congelamento (BARBOSA e VEGA, 1996).

A Figura 2.3 apresenta uma típica curva de histerese. Como pode ser visto nesta figura, para valores intermediários de atividade de água, o mais comum é a curva de dessorção encontrar-se acima da curva de adsorção.



**Figura 2.3:** Isoterma típica, apresentando o fenômeno de histerese (BAKER, 1997).

A histerese pode ser explicada como efeito da condensação de água nos capilares. A Figura 2.4 representa, esquematicamente, uma teoria existente para a explicação deste fenômeno, denominada *Ink-bottle Theory* (LABUZA, 1968). Esta teoria assume que os capilares possuem pescoços estreitos e corpos largos. Assim, durante a adsorção, o capilar não será completamente preenchido até que um alto valor de atividade de água seja atingido – o que corresponde ao maior raio ( $r^*$ ). Já o processo de esvaziamento, que ocorre na dessorção, é controlado pelo raio menor ( $r$ ), logo, este processo apresenta menores valores de atividade de água.



**Figura 2.4:** Representação esquemática da teoria de LABUZA (1968).



Devido às alterações físicas e químicas irreversíveis que ocorrem durante os processos de adsorção e dessorção, praticamente todos os produtos alimentícios apresentam o fenômeno da histerese e podem ser dividido em três diferentes grupos (KAPSALIS, 1987):

- alimentos com alto teor de açúcar e pectina: o fenômeno pronuncia-se na região de menor teor de umidade;
- alimentos de alto teor protéico: o fenômeno inicia-se em altos valores de atividade de água, na região de condensação capilar, e estende-se por toda a isoterma até valores bem baixos de atividade de água;
- alimentos a base de amido: a maior diferença entre as curvas pode ser detectada em uma atividade de água em torno de 0,7 (na região de condensação capilar).

Para se ter uma idéia da intensidade do fenômeno, estima-se que possa ocorrer uma variação de até 2% no teor de umidade de equilíbrio de um produto alimentício, sob determinadas condições, dependendo se este foi obtido através da remoção ou da adição de umidade. Além disso, a magnitude da histerese varia também com a temperatura. Para alguns alimentos, o fenômeno pode ser eliminado através do aumento da temperatura, enquanto que para outros, o aumento da temperatura pode manter o fenômeno constante ou, até mesmo, aumentá-lo (KAPSALIS, 1987).

A temperatura, entretanto, não influencia apenas o fenômeno de histerese, mas é de grande importância em todo o processo de sorção. Uma vez que os alimentos não são compostos de misturas ideais, a variação da temperatura causa alterações na atividade de água destes produtos devido à influência deste parâmetro na mobilidade das moléculas de água e no equilíbrio entre as fases vapor e adsorvida. Assim, um aumento na temperatura – para uma atividade de água constante – causa uma diminuição na quantidade de água adsorvida; este efeito só não é observado em certos açúcares e outros constituintes alimentícios de baixo peso molecular que se dissolvem na água e tornam-se mais higroscópicos com o aumento da temperatura. Além disso, a reatividade química e microbiológica também é afetada pela relação temperatura-teor de umidade (BARBOSA e VEGA, 1996).

#### **2.4.1 CALOR DE SORÇÃO ( $Q_s$ )**

O calor de sorção ( $Q_s$ ) – determinado a partir da equação de Clausius-Clapeyron – pode ser utilizado para estimar o requerimento de energia do processo de desidratação, uma vez que representa a energia necessária para desidratar o produto até seu valor de monocamada. O nível de umidade do alimento em que o calor de sorção aproxima-se do calor latente de vaporização da água também pode ser utilizado como uma indicação do teor de “água livre” existente no alimento (KAYMAK-ERTEKIN e SULTANOGLU, 2001): em níveis de umidade superiores a este, a água encontra-se mecanicamente livre nos espaços vazios do sistema, podendo ser aproveitada pelos microrganismos (FASINA e SOKHANSANJ, 1993).

A equação de Clausius-Clapeyron é dada por:

$$\frac{d(\ln a_w)}{d(1/T)} = -\frac{Q_s}{R_G} \quad (2.3)$$

onde  $T$  é a temperatura absoluta (K) e  $R_G$  é a constante universal do gases ( $R_G = 1,987$  cal.gmol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>).

Somando-se ao calor de sorção, o calor latente de vaporização da água pura ( $DH_0$ ), que é estimado em 10,53 kcal.mol<sup>-1</sup> a 25°C, determina-se o requerimento total de calor ( $Q_{st}$ ) para a desidratação do alimento até sua umidade de monocamada:

$$Q_{st} = Q_s + DH_0 \quad (2.4)$$

Outro parâmetro que pode ser determinado a partir dos dados de monocamada é a área superficial do produto ( $S_0$ , em m<sup>2</sup>.g de sólido<sup>-1</sup>) que pode ser utilizada como auxiliar na determinação da composição deste (quanto maior a área, maior a quantidade de polímeros presentes). A equação que estima este valor é dada por (LABUZA, 1968):

$$S_0 = X_m \frac{1}{PM_{H_2O}} N_0 A_{H_2O} = 3,5 \times 10^3 X_m \quad (2.5)$$

onde  $PM_{H_2O}$  é a massa molecular da água (18 g.gmol<sup>-1</sup>),  $X_m$  é a umidade de monocamada,  $N_0$  é o Número de Avogadro ( $6 \times 10^{23}$  moléculas.gmol<sup>-1</sup>) e  $A_{H_2O}$  é a área de uma molécula de água ( $10,6 \times 10^{-20}$  m<sup>2</sup>).

Este parâmetro é estimado em função da água adsorvida pelo alimento e, portanto, a grande maioria dos alimentos apresenta áreas superficiais de água entre 100 e 250 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>. O que pode ser explicado pelo fato de as moléculas de água serem capaz de plasticizar os vários polímeros de cadeia longa que formam a matriz do alimento, expondo, assim, todos os sítios internos para a adsorção das moléculas de água (LABUZA, 1968).

A seguir, serão apresentados alguns dos modelos disponíveis na literatura para a predição das isotermas de sorção de produtos alimentícios.

#### **2.4.2 MODELOS PARA PREVER AS ISOTERMAS DE SORÇÃO**

A literatura apresenta diversos modelos matemáticos que predizem as isotermas de sorção de produtos alimentícios. Entretanto, conforme pioneiramente apontado por LABUZA (1968), a grande maioria destes modelos apresentam-se eficientes apenas para determinados tipos de alimentos e – o mais grave – para determinados intervalos de atividade de água.

Como comentado anteriormente, a curva da isoterma pode ser dividida em três regiões distintas: a primeira região, onde ocorre a adsorção do filme monomolecular de água, a

segunda região, onde ocorre a adsorção de camadas adicionais e a terceira região onde ocorre a condensação da água nos poros do produto seguido da dissolução do material solúvel presente. Como a definição exata do valor de atividade de água na qual ocorre a transição entre as regiões não é possível de prever, dificilmente um modelo se ajusta à isoterma completa. A tendência, então, é o modelo ajustar-se apenas a uma das três regiões.

A predição das isotermas de sorção é baseada na equação de Langmuir:

$$\frac{a_w}{X_{eq}} = \frac{k}{bX_m} + \frac{a_w}{X_m} \quad (2.6)$$

onde  $X_{eq}$  é a umidade de equilíbrio,  $X_m$  é o valor de monocamada,  $k$  é o inverso da pressão de vapor da água pura na temperatura do sistema e  $b$  é uma constante.

Esta equação, no entanto, não se apresenta satisfatória para produtos alimentícios, pois o calor de adsorção não é constante em toda a superfície. Nos alimentos, além de ocorrer uma alta interação entre as moléculas adsorvidas, a máxima quantidade de água adsorvida na superfície é maior que o valor de monocamada (BARBOSA e VEGA, 1996).

Um meio eficiente de estimar a contribuição da adsorção em sites específicos para a água ligada total é utilizar-se da equação de Brunauer-Emmet-Teller (BET):

$$X_{eq} = \frac{(X_m C a_w)(1 - (N + 1)a_w^N N a_w^{N+1})}{(1 - a_w)(1 - (C - 1)a_w - C a_w^{N+1})} \quad (2.7)$$

onde  $N$  e  $C$  são constantes da equação. Esta última pode ser dada por:

$$C = K \exp\left(\frac{Q_s}{R_G T}\right) \quad (2.8)$$

onde  $Q_s$  é o calor de sorção,  $T$  é a temperatura e  $K$  é uma constante. Esta equação pode ser aplicada para valores de atividade de água entre 0,1 e 0,5, pois as considerações feitas não se aplicam corretamente aos materiais úmidos (BARBOSA e VEGA, 1996).

O modelo de Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) é uma extensão da equação de BET, levando ainda em consideração as propriedades modificadas da água adsorvida na região de multicamadas. Este modelo pode ser considerado como o que melhor se ajusta às isotermas de sorção de produtos alimentícios, sendo um dos mais utilizados na predição das isotermas de sorção destes (HELDMAN e HARTEL, 2000). Além disso, ele é muito útil para a obtenção de dados em elevados valores de atividade de água (acima de 0,9) e apresenta melhor ajuste do que a equação de BET para uma faixa mais larga de teor de umidade. Este modelo é dado por:

$$X_{eq} = \frac{X_m C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (2.9)$$

onde C e K são duas constantes dadas por:

$$C = c \exp\left(\frac{H_m - H_n}{R_G T}\right) \quad (2.10)$$

$$K = k_G \exp\left(\frac{H_p - H_n}{R_G T}\right) \quad (2.11)$$

onde  $c$  e  $k_G$  são fatores entrópicos (constantes),  $H_m$  é a entalpia molar de sorção da monocamada,  $H_n$  é a entalpia molar de sorção da multicamada,  $H_p$  é a entalpia molar de evaporação da água líquida (BARBOSA e VEGA, 1996).

VAN DER BERG e BRUIN (1981) indicaram mais de 200 modelos para descrever as isotermas de sorção de materiais biológicos. As equações variam de modelos empíricos de dois ou três parâmetros até modelos termodinâmicos complexos, além de equações baseadas no modelo de BET. Os modelos apresentados na Tabela 2.2 encontram-se entre os mais relevantes na descrição das isotermas de sorção de produtos alimentícios. Nesta tabela,  $X_{eq}$  e  $X_m$  são, respectivamente, os teores de umidade no equilíbrio e de monocamada,  $X_{in}$  é a umidade de equilíbrio equivalente a uma atividade de água de 0,5 e  $A, b, B, k_H, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, n_1, n_2$  e  $p$  são constantes dos modelos apresentados.

**Tabela 2.2:** Modelos comumente utilizados na predição das isotermas de sorção de produtos alimentícios (umidade de equilíbrio em função da atividade de água).

Nome do modelo	Modelo
Oswin <sup>1</sup>	$X_{eq} = A \left( \frac{a_w}{1 - a_w} \right)^B$ (2.12)
Halsey <sup>2</sup>	$a_w = \exp\left(\frac{-A}{X_{eq}^B}\right)$ (2.13)
Henderson <sup>3</sup>	$(1 - a_w) = \exp(k_H X_{eq}^V)$ (2.14)
Iglesias-Chirife <sup>4</sup>	$\ln\left(X_{eq} + (X_{eq}^2 + X_{in})^{0,5}\right) = b a_w + p$ (2.15)
D'arcy Watt <sup>5</sup>	$X_{eq} = \frac{K_1 K_2 a_w}{1 + K_1 a_w} + K_5 a_w + \frac{K_3 K_4 a_w}{1 - K_3 a_w}$ (2.16)
Peleg <sup>6</sup>	$X_{eq} = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2}$ (2.17)

Fonte: <sup>1</sup>OSWIN, 1946; <sup>2</sup>HALSEY, 1948; <sup>3</sup>HENDERSON, 1952; <sup>4</sup>IGLESIAS e CHIRIFE, 1978; <sup>5</sup>SARAVACOS et al, 1986; <sup>6</sup>PELEG, 1993.

Até aqui foram apresentados e discutidos fatores pertinentes e de papel fundamental em qualquer processo que envolva a desidratação de alimentos. A partir de agora, passa-se a

estudar um pouco mais do processo de secagem em si, suas características, seus mecanismos e principais equipamentos.

## 2.5 SECAGEM DE ALIMENTOS

Segundo a vasta literatura existente a respeito da secagem de produtos alimentícios – GEANKOPLIS (1993), MUJUMDAR (1995), BARBOSA e VEGA (1996), HELDMAN e HARTEL (2000) – esta é uma das operações unitárias mais relevantes e desafiadoras para a indústria de alimentos, além de ser considerada um tópico de interesse contínuo nas pesquisas realizadas neste ramo. Toda essa importância deve-se ao fato de que praticamente todos os produtos alimentícios são submetidos a, pelo menos, uma etapa de secagem durante seu processamento.

Os primeiros registros da utilização de ar aquecido na preservação de alimentos (uma das primeiras formas utilizada para o processamento de alimentos) ocorreram na França, por volta de 1795. Napoleão Bonaparte ofereceu um prêmio de incentivo aos cientistas, para que estes desenvolvessem alimentos que pudessem ser consumidos pelo exército francês sem que os mesmos se deteriorassem com o passar do tempo. Essa oferta incentivou as pesquisas na área e fez surgir nomes como o de Nicholas Appert e Louis Pasteur.

Já os primeiros registros da utilização da secagem de alimentos referem-se à secagem de vegetais e datam do século 18 (VAN ARSDEL e COPLEY, 1963). A partir daí, o desenvolvimento desta indústria encontra-se intimamente ligado às guerras ocorridas ao redor do mundo. Estima-se que aproximadamente 4500 toneladas de vegetais desidratados foram transportadas de navio, a partir dos Estados Unidos, durante a Primeira Guerra Mundial.

A primeira grande evolução na desidratação de alimentos nos Estados Unidos ocorreu entre o final do século 19 e o início do século 20, com o desenvolvimento dos primeiros secadores artificiais que viriam substituir a secagem solar. Posteriormente, no período que precedeu a segunda grande guerra, pesquisaram-se e desenvolveram-se os secadores de tambor e o *spray dryer*, muito utilizados, até hoje, na produção de laticínios e ovos.

Denomina-se secagem ou desidratação de alimentos todo e qualquer processo que envolva a remoção térmica de substâncias voláteis (umidade) para a obtenção de um sólido seco. Os termos secagem e desidratação possuem o mesmo significado, mas diferem entre si quanto ao teor de umidade do produto final; alimentos desidratados são considerados aqueles com menos de 2,5% de água (base seca), enquanto que o termo alimento seco aplica-se a qualquer produto alimentício que tenha sofrido um processo de remoção de água cujo teor tenha permanecido acima dos 2,5%, base seca.

Os processos de secagem, no início de sua utilização, tinham como único objetivo a preservação do alimento por longos períodos de tempo, de tal forma que o alimento

permanecia disponível durante períodos de produção limitada ou inexistente. Atualmente, secam-se os alimentos basicamente pelo mesmo motivo: manter disponíveis diversos produtos para que estes possam ser consumidos a qualquer momento. Existem, entretanto, outras razões para a utilização da secagem de alimentos; quando se remove a água do interior do produto, este apresenta, como consequência, redução no seu peso e, até mesmo, na sua densidade, diminuindo os custos com armazenamento e transporte. Além disso, em determinados casos, o alimento seco fornece muito mais conveniência e praticidade do que o alimento fresco ou conservado por outro método.

Do ponto de vista alimentício, os principais objetivos do processo de secagem são:

- aumento da vida de prateleira: um produto alimentício seco torna-se menos susceptível aos danos causados pelo crescimento de bactérias, fungos e insetos. A atividade da maioria dos microrganismos é inibida – e reduzem-se as reações oxidativas e enzimáticas indesejáveis – em um meio cuja umidade relativa de equilíbrio encontre-se abaixo de 70%;
- facilidade de manuseio: durante a secagem ocorre diminuição na massa e, em alguns casos, no volume do sólido, o que torna os processos de embalagem, manuseio e transporte muito mais simples e baratos; além disso, o transporte do produto seco pode ser feito por meio de equipamentos simples, tais como roscas transportadoras, elevadores de canecos, tubos e esteiras. Desta forma, a força gravitacional para o transporte do produto pode ser usada em maior escala dentro da indústria, economizando energia e melhorando o *layout* desta;
- preparação para processos subsequentes: alguns produtos são secos, a fim de otimizarem e se adequarem às etapas subsequentes do processo, tais como moagem (um produto seco demanda muito menos energia para ser moído do que um produto úmido), mistura (um produto seco mistura-se muito mais uniformemente com outros produtos do que um produto úmido) e separação (um produto úmido se adere mais facilmente a outros produtos, sendo de mais difícil separação); além disso, a secagem permite a obtenção do produto no formato desejado ou requisitado para os processos subsequentes (em pó, em formato de *flake* ou em grânulos, por exemplo);
- sanitização: a secagem já pode ser considerada sinônimo de sanitização de alimentos, pois insetos e outros microrganismos são destruídos durante a aplicação do calor e a difusão da umidade.

A secagem é um processo complexo que envolve o transporte simultâneo de calor e massa (principalmente) e de quantidade de movimento (em menor escala). Estes processos podem estar acompanhados de reações químicas e bioquímicas, além de mudança de fase (transição vítrea e cristalização) e acompanhados, ou não, de encolhimento do produto.

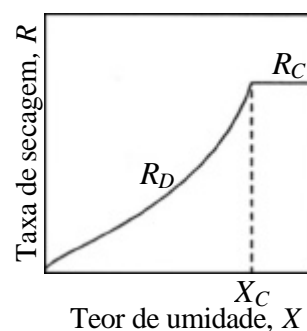
Quando um sólido úmido é submetido à secagem, dois processos ocorrem simultaneamente: transferência de energia (na maioria das vezes sob a forma de calor) do meio ambiente para evaporar a umidade presente na superfície do produto e transferência da umidade interna até a superfície do sólido e sua subsequente evaporação devido ao processo anterior.

O primeiro processo pode ocorrer por convecção, condução, radiação ou, em alguns casos, por combinação de dois ou mais destes mecanismos. Além disso, esta etapa é dependente das condições externas – como temperatura, umidade e velocidade do ar de secagem – da área da superfície exposta e da pressão do sistema. O segundo processo, por sua vez, é função da natureza física do sólido, da temperatura deste e de seu conteúdo de umidade.

## 2.6 TAXA DE SECAGEM

O processo de secagem de um material pode ser descrito como uma série de etapas nas quais a taxa de secagem possui um papel fundamental. A taxa de secagem ( $R$ , em  $\text{kg água.kg ss}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) é diretamente influenciada pelos fatores externos de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar e internos, tais como a composição do produto e a orientação de seus constituintes, podendo ser expressa como função da diminuição da umidade em função do tempo ( $t$ ).

A Figura 2.5 apresenta uma curva típica da taxa de secagem ( $\text{kg água.kg ss}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) em função do teor de umidade ( $\text{kg água.kg ss}^{-1}$ ) para condições constantes de operação, onde  $R_C$  e  $R_D$  representam, respectivamente, os períodos de taxa constante e decrescente de secagem e  $X_C$  representa o teor de umidade crítico.



**Figura 2.5:** Curva típica da taxa de secagem em função do teor de umidade de um produto alimentício (HELDMAN e HARTEL, 2000).

Para a maioria dos produtos alimentícios, esta curva apresenta duas fases distintas: uma fase constante (no início da secagem) e outra decrescente que inicia em um determinado valor de umidade denominado de umidade crítica ( $X_c$ ). A duração destas fases depende, diretamente, da umidade inicial do produto e das condições do ar que está em contato com o produto (KOYUNCU, SERDAR e TOSUN, 2004).

A primeira etapa – de taxa constante – representa a remoção da água não ligada do alimento. Durante esta etapa, a superfície do produto encontra-se saturada de umidade e a água atua como se o sólido não estivesse presente. A taxa de secagem é, desta forma, limitada pela evaporação da água na superfície e a temperatura da superfície é aproximadamente igual à temperatura de bulbo úmido. Este período se mantém apenas enquanto a taxa de migração da água do interior do sólido para a superfície é a mesma da evaporação desta para o meio.

Quando o teor de umidade médio atinge o teor de umidade crítico, o filme de umidade na superfície já se encontra bastante reduzido pela evaporação. Essa redução deve-se à diminuição da concentração de umidade no interior do sólido e, quanto menor o teor de umidade, mais difícil é a migração desta para a superfície. Isso causa o aparecimento do segundo estágio da secagem: o período taxa decrescente. Esta etapa caracteriza-se por um declínio (muitas vezes linear) da taxa de secagem, cujo fator limitante passa a ser, então, a migração interna da umidade.

Estima-se que este período de taxa decrescente possa ser dividido em duas etapas (embora, muitas vezes, seja difícil de se observar onde se encerra a primeira e começa a segunda):

- a primeira etapa decrescente ocorre quando a superfície ainda contém pontos úmidos que vão continuamente diminuindo até a secagem completa desta; esta parte da curva pode ser tão curta e nem mesmo aparecer ou, em outros casos, constituir integralmente o período de taxa decrescente de secagem;
- a segunda etapa decrescente se inicia quando a superfície já se encontra totalmente seca; nesta etapa, o calor necessário para a remoção da umidade migra através do sólido até a interface de vaporização, enquanto que o vapor desloca-se através do sólido até a corrente de ar, ou seja, a taxa de secagem é controlada pela difusão do líquido no interior do sólido e pela transferência de massa na superfície deste.

Uma vez que a profundidade da região úmida no interior do sólido aumenta progressivamente a partir da segunda etapa e a condutividade térmica das zonas externas (secas) é muito baixa, esta é determinante para a taxa de secagem. Mas se o produto seco tem uma densidade relativamente elevada e um pequeno volume cavitacional (com poros muito pequenos) a secagem é determinada mais pela resistência à difusão no interior do sólido do que pela condutividade térmica. Assim, uma vez que o teor de umidade diminui devido à secagem, a taxa do movimento interno de umidade também diminui e, nesta etapa, a taxa de secagem cai ainda mais rápido do que na anterior. O decréscimo da taxa continua até atingir-se o teor de umidade de equilíbrio, quando encerra-se o processo de secagem. Apesar desta ser uma etapa relativamente longa, a quantidade de água removida é pequena devido à baixa taxa de secagem.

Dentre alguns mecanismos de migração interna de umidade pode-se citar:



- difusão do líquido: o gradiente de umidade existente entre a superfície e o interior do sólido promove a difusão do líquido através deste; a taxa em que o líquido se difunde depende da natureza do produto, da temperatura e da diferença de concentração entre a superfície e o meio;
- difusão do vapor: assim como o líquido, o vapor formado ocasionalmente (devido a vaporização da umidade no interior do sólido) também difunde-se através do sólido até o ar de secagem. Essa difusão ocorre devido ao gradiente de pressão parcial existente e a taxa de difusão é determinada pela pressão parcial do ar de secagem;
- escoamento capilar: este mecanismo é característico, principalmente, de produtos porosos, pois as forças de tensão superficiais podem induzir à migração das moléculas de água através da estrutura interna do alimento. Dependendo da natureza e orientação da estrutura porosa do produto, o escoamento capilar pode facilitar ou, até mesmo, dificultar a migração da umidade por outros mecanismos;
- escoamento devido ao gradiente de pressão: a diferença existente entre as pressões do ar de secagem e da estrutura interna do produto pode causar a migração da umidade;
- escoamento devido ao gradiente de temperatura: a diferença entre a temperatura no interior do produto e na sua superfície pode influenciar a migração da umidade até a superfície.

Durante o processo de secagem, um ou mais destes mecanismos podem ocorrer e, além disso, a contribuição de cada um na migração da umidade pode variar. Entretanto, em um processo de secagem de alimentos, a difusão é considerada como o principal mecanismo de migração interna da umidade. Esta acontece no interior da estrutura sólida e/ou no interior dos capilares, poros e pequenos espaços saturados de vapor ou líquido e pode ocorrer de diferentes maneiras e sob diversas condições de secagem.

Os fatores que afetam ambas as fases da taxa de secagem estão relacionados com os parâmetros do processo (tipo de secador, temperatura, velocidade, pressão e umidade relativa do ar de secagem) e com a natureza do produto (área superficial, orientação dos constituintes, tipo e concentração dos solutos) e serão discutidos, com maiores detalhes, mais adiante.

### **2.6.1 PERÍODO DE TAXA CONSTANTE**

Os fenômenos de transporte predominantes num período de taxa de secagem constante são a transferência de massa do vapor de água da superfície do material através de um filme de ar até o meio, a transferência de calor através dos sólidos do produto e a transferência de calor na fase gasosa. A superfície permanece saturada enquanto está ocorrendo a secagem, pois a taxa de movimento da umidade no interior do sólido é suficiente para mantê-la assim.

Portanto, para os balanços de massa e calor desta etapa, assume-se apenas a transferência de calor por convecção entre a superfície do sólido e o ar quente que circula e a transferência de massa da superfície para este mesmo ar:

$$q = h_C A_S (T - T_w) \quad (2.18)$$

$$N_a = K_y (Y_S - y) \frac{PM_{ar}}{PM_{H_2O}} \quad (2.19)$$

onde  $h_C$  é o coeficiente de transferência de calor convectivo,  $A_S$  é a área exposta ao ar de secagem,  $T_w$  é a temperatura de bulbo úmido,  $T$  é a temperatura do ar de secagem,  $N_a$  é o fluxo de vapor de água,  $Y_S$  é a umidade do ar na superfície do sólido,  $y$  é a umidade do ar,  $K_y$  é o coeficiente de transferência de massa,  $PM_{ar}$  é a massa molar do ar e  $PM_{H_2O}$  é a massa molar da água.

O calor necessário para vaporizar a água na superfície pode ser expresso por:

$$q = N_a PM_{H_2O} ?_w A_S \quad (2.20)$$

onde  $?_w$  é o calor latente a  $T_w$ . A taxa de secagem no período de taxa constante ( $R_C$ ) pode ser expresso de duas maneiras:

$$R_C = K_y PM_{ar} (Y_w - y) \quad (2.21)$$

ou

$$R_C = \frac{h_C (T - T_w)}{I_w} = \frac{q}{I_w A} \quad (2.22)$$

onde  $Y_w$  é a umidade em  $T_w$ .

Na ausência de transferência de calor por radiação ou condução, a temperatura do sólido é igual a temperatura de bulbo úmido do ar durante todo o período de taxa de secagem constante. O ar sofre um processo de umidificação adiabática.

### 2.6.2 PERÍODO DE TAXA DECRESCENTE

Conforme comentado anteriormente, o fator limitante da taxa de secagem nesta etapa deixa de ser a evaporação de umidade a partir da superfície e passa a ser a migração desta umidade do interior do alimento até a superfície. O principal mecanismo de migração é a difusão e este pode ocorrer de diferentes maneiras e sob diversas condições de secagem. Assim, devido a essa diversidade de mecanismos e às alterações sofridas por estes no decorrer do processo, a predição dos mecanismos ou comportamentos deste período de taxa constante torna-se extremamente complexo. Optou-se, então, pela utilização de um coeficiente global que abrangesse os diferentes mecanismos de difusão interna: coeficiente de difusão efetivo ou coeficiente de difusividade efetiva de umidade.

### 2.6.3 DIFUSIVIDADE EFETIVA DE UMIDADE ( $D_{eff}$ )

Uma aproximação bastante utilizada para descrever empiricamente o período de taxa decrescente de secagem é a utilização de um coeficiente de difusão efetivo de umidade ( $D_{eff}$ , em  $m^2.s^{-1}$ ), que engloba todos os mecanismos de transferência interna de massa. Para a estimação deste, existem diversos modelos apresentados na literatura. Alguns deles, entretanto, não levam em conta o encolhimento do sólido, as alterações da superfície (formação de capa não porosa devido ao ressecamento) e as isothermas de sorção. Além disso, nestes modelos, o significado físico do coeficiente de difusão é desconsiderado ou interpretado como um efeito simultâneo, apesar de ser dependente da concentração e da temperatura.

O coeficiente de difusão efetivo de umidade ( $D_{eff}$ ) pode ser estimado através do ajuste dos dados experimentais, obtidos a partir da taxa de secagem em função do tempo, à equação diferencial governante da difusão em estado transiente. Aplicando-se a Lei de Fick no balanço de conservação de massa, tem-se:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X \quad (2.23)$$

onde  $X$  é o conteúdo de umidade livre,  $t$  é o tempo e  $D_{eff}$  é o coeficiente de difusão efetivo de umidade.

A resolução desta equação diferencial – sujeita à condição inicial de umidade ( $X_0$ ) constante e às condições de contorno de simetria e teor de umidade de equilíbrio ( $X_{eq}$ ) especificado na superfície – foi, pioneiramente, apresentado por Crank (1975) para diferentes geometrias (IGUAZ *et al.*, 2003). As soluções (para valores médios, integrados espacialmente) para uma placa plana, para um cilindro e para uma esfera são apresentadas a seguir.

Para uma placa plana, a solução da equação diferencial acima torna-se:

$$X_{adm} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{p^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{-n^2 p^2 D_{eff}}{4L_p^2} t\right) \quad (2.24)$$

onde  $L_p$  é a espessura da placa.

Para a geometria cilíndrica, tem-se a seguinte solução:

$$X_{adm} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{4}{r_a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b_n^2} \exp(-b_n^2 D_{eff} t) \quad (2.25)$$

onde  $r_a$  é o raio do cilindro e  $b_n$  é raiz do tipo um e ordem zero da função de Bessel de primeira espécie.

Para a geometria esférica, a solução é:

$$X_{adm} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{r_e^2}\right) \quad (2.26)$$

onde  $r_e$  é o raio da esfera.

Para tempos longos de secagem, apenas o primeiro termo da série torna-se significativo e, para partículas esféricas, pode-se utilizar o modelo apresentado por ROMERO (1988):

$$X_{adm} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = k \exp\left(-\frac{\pi^2}{r^2} D_{eff} t\right) \quad (2.27)$$

onde  $k$  é uma constante.

A difusividade efetiva de umidade pode ser obtida plotando-se o logaritmo natural da umidade adimensional versus o tempo. A partir da tangente do segmento linear, da constante  $\pi$  e do raio da esfera obtém-se a  $D_{eff}$ . Os dados de difusividade efetiva de diversos produtos alimentícios encontram-se tabelados na literatura e estes situam-se na faixa entre  $(0,01 \text{ e } 100) \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Na Tabela 2.3 encontram-se valores de difusividade efetiva de umidade comumente encontrados para alguns produtos alimentícios.

Os alimentos com textura de gel e baixa porosidade são os que apresentam os menores valores de difusividade a baixas umidades. Os maiores valores, por sua vez, são encontrados em alimentos muito porosos, liofilizados ou extrusados.

A maioria dos produtos alimentícios submetidos a algum nível de desidratação apresenta uma porosidade considerável e os valores de difusividade efetiva obtidos para este produto é função direta desta porosidade. Nestes produtos, a umidade do produto e a temperatura do ar de secagem exercem uma influência menos significativa na difusividade efetiva de umidade. Nos produtos não porosos, entretanto, estes dois parâmetros tem papel fundamental, devido a plasticidade dos polímeros secos com a água (SARAVACOS e KOSTAROPOULOS, 1996).

A dependência funcional da difusividade efetiva com a temperatura é comumente expressa por uma equação do tipo Arrhenius (ROMERO, 1988):

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{R_G T}\right) \quad (2.28)$$

onde  $D_0$  é uma constante,  $E_a$  é a energia de ativação ( $\text{cal} \cdot \text{gmol}^{-1}$ ),  $T$  é a temperatura do ar (K) e  $R_G$  é a constante universal dos gases ( $1,987 \text{ cal} \cdot \text{gmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

Esta relação permite a determinação da energia de ativação ( $E_a$ ) que, segundo PINEDO, 2002, é um parâmetro importante do processo por indicar a dificuldade da remoção de umidade de um produto.

**Tabela 2.3:** Valores estimados para a difusividade efetiva de alguns produtos alimentícios.

Alimento	$T$ (°C)	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
Maçã	66	$6,4 \times 10^{-9}$
Maçã liofilizada	25	$2,43 \times 10^{-10}$
Uva passa	25	$4,17 \times 10^{-11}$
Cenoura em cubos	40	$6,75 \times 10^{-11}$
	60	$12,1 \times 10^{-11}$
	80	$17,9 \times 10^{-11}$
	100	$24,1 \times 10^{-11}$
	54	$2,58 \times 10^{-11}$
Batata	60	$3,94 \times 10^{-11}$
	65,5	$4,37 \times 10^{-11}$
	68,8	$6,36 \times 10^{-11}$
	40	$1,4 \times 10^{-9}$
	35	$8,5 \times 10^{-10}$
Pêra em fatias	66	$9,63 \times 10^{-10}$

Fonte: OKOS et al, 1992.

A seguir discutem-se os principais fatores que afetam ambas as etapas da taxa de secagem.

#### 2.6.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A TAXA DE SECAGEM

Como visto anteriormente, existem diversos fatores que afetam a taxa de secagem. Estes podem estar relacionados às condições do processo de secagem (tipo de secador e condições de operação) ou à natureza do produto alimentício submetido ao processo. Estes dois fatores e os parâmetros envolvidos em cada um deles são apresentados a seguir (HELDMAN e HARTEL, 2000).

- Condições do processo

Dentre as condições externas mais importantes encontram-se a temperatura, a velocidade e a umidade relativa do ar de secagem e a pressão do sistema.

a) Temperatura: a taxa de secagem é mais elevada se o processo se dá com ar aquecido a altas temperaturas. No período de taxa constante, a temperatura age aumentando a transferência de calor do ar para a superfície do sólido. Além disso, a umidade relativa do ar de secagem diminui com o aumento da temperatura, aumentando, assim, o gradiente de

umidade entre a superfície do produto e o ar, facilitando a secagem. Já no período decrescente, a temperatura influencia diretamente a migração da umidade interna, pois quanto mais quente o ar, maior é a facilidade de migração das moléculas de água no interior do produto. Entretanto, a elevação da temperatura até valores muito elevados pode causar reações químicas ou físicas indesejáveis no alimento, além de provocar o ressecamento e endurecimento excessivo da superfície. Assim, deve-se ter consciência do limite aceito por cada produto.

b) Velocidade do ar: a velocidade na qual o ar de secagem atinge a superfície do produto a ser desidratado influencia diretamente a taxa de transferência da umidade da superfície para o ar de secagem. Isso ocorre porque um aumento na velocidade de escoamento do ar causa um aumento na taxa de transferência de massa por convecção, ou seja, quanto maior a velocidade do ar de secagem, mais curto será o período de taxa constante de secagem. No período de taxa de secagem decrescente, como o fator limitante da taxa é a migração interna de umidade, a velocidade do ar de secagem, sendo um fator externo, não exerce influência significativa.

c) Umidade relativa: o teor de umidade relativa presente no ar de secagem influencia o período de taxa constante de secagem, pois afeta diretamente a força motriz deste período do processo, ou seja, o gradiente de umidade existente entre a superfície do produto e o ar de secagem. Quanto maior a umidade relativa do ar utilizado na desidratação do produto, menor será o gradiente de umidade e, por consequência, mais lentamente se dará a secagem. Além disso, se a atividade de água do produto for inferior à umidade relativa do ar de secagem, ao invés de ocorrer a secagem do alimento, este absorverá a umidade presente no ar. Mas, assim como visto para o parâmetro velocidade (a umidade relativa do ar também é um fator externo), esta não exerce significativa influência na taxa de secagem do período decrescente. Além disso, no processo de secagem como um todo, este parâmetro é fator determinante na umidade de equilíbrio, ou seja, no teor de umidade atingido pelo produto ao final do processo (quando este é levado até o fim).

d) Pressão: este parâmetro influencia a relação de equilíbrio da água e, assim, pode influenciar o processo de secagem: quando este se dá sob vácuo, a pressão de vapor do ar é reduzida, acelerando-se, assim, o período de taxa constante de secagem. Mas, novamente, quando o fator limitante do processo é a migração interna de umidade, a operação sob vácuo quase não exerce influência na taxa de secagem.

Na Tabela 2.4 encontram-se, resumidamente, as implicações de um aumento nos fatores externos (descritos acima) nos períodos de taxa constante ( $R_C$ ) e decrescente ( $R_D$ ) de secagem.

**Tabela 2.4:** Efeitos geralmente causados pelo aumento da temperatura ( $T$ ), velocidade ( $v$ ), umidade relativa ( $UR$ ) e pressão ( $P$ ) em ambos os períodos de taxa de secagem.

	$R_C$	$R_D$
$?T$	? taxa, pois ? força motriz	? taxa, pois ? difusividade
$?v$	? taxa, pois ? convecção	Nenhuma alteração
$?UR$	? taxa, pois ? força motriz	Nenhuma alteração
$?P$	? taxa, pois ? força motriz	Nenhuma alteração

Fonte: HELDMAN e HARTEL, 2000.

- Natureza do produto alimentício

a) Área superficial: quanto maior a razão entre a área superficial do produto e seu volume, mais rapidamente se dará a secagem. Ou seja, quanto maior a área da superfície que entra em contato com o ar de secagem, mais curto será o período de taxa constante. Além disso, quanto menor a distância que a umidade deve percorrer no interior do produto alimentício, a fim de atingir a superfície, mais rapidamente se dará o período de taxa decrescente. Assim, realizar a secagem de um produto seccionado em unidades menores será sempre mais rápido do que secá-lo por inteiro.

b) Orientação dos constituintes: a orientação das microestruturas existentes no interior do alimento afeta a movimentação da umidade no interior deste: a orientação dos componentes do alimento implicará em migrações de diferentes velocidades e por diferentes caminhos.

c) Estrutura celular: na maioria dos alimentos, uma porção da umidade encontra-se no interior das células, enquanto que a porção restante está depositada na parte externa, ou seja, nas interfaces da estrutura celular. Esta porção restante é mais facilmente removida durante a secagem, uma vez que a remoção da água presente no interior das células apresenta uma resistência adicional, isto é, depende primeiro da migração da umidade através da membrana celular.

d) Tipo e concentração dos solutos: os componentes do produto alimentício determinam a mobilidade das moléculas de água durante a secagem; assim, os solutos presentes, tais como açúcares, amido, sais e/ou proteínas, interagem com as moléculas de água, podendo inibir sua movimentação. Isso se dá, principalmente, quando esses solutos já se encontram em concentrações mais elevadas no interior do produto, resultando em produtos com baixa atividade de água e diferentes viscosidades (quanto maior a viscosidade e menor a atividade de água do produto, menores serão as taxas de transporte de umidade, resultando em uma secagem mais lenta).

A seguir serão discutidos tópicos pertinentes aos equipamentos de secagem existentes atualmente.

## 2.7 EQUIPAMENTOS DE SECAGEM

### 2.7.1 ESCOLHA DO EQUIPAMENTO

A secagem é muito importante para a indústria de alimentos, uma vez que chega a ser responsável por até 10% do consumo de energia total do setor. Entretanto, a seleção do equipamento mais adequado leva em conta muito mais a qualidade do produto final do que o consumo de energia. Além disso, fatores tais como o impacto ambiental e segurança de operação também influenciam esta escolha.

Na indústria, em geral, podem ser encontrados mais de 200 diferentes tipos de secadores, mas apenas em torno de 20 deles (e suas variações) são utilizados pela indústria alimentícia. Essa diversidade de secadores deve-se, principalmente, à forma física diferenciada dos variados produtos alimentícios, às taxas de produção desejadas e às restrições de qualidade do produto seco (BAKER, 1997).

Assim, o processo de escolha do secador mais adequado para determinado produto torna-se uma complicação a mais para a indústria de alimentos, mas algumas informações preliminares podem auxiliar neste processo. São elas (MUJUMDAR, 1995):

- fluxogramas ou balanços de quantidades que incluem quantidade de matéria seca, quantidade de água a ser removida e a fonte do material úmido;
- características físicas da alimentação em batelada ou contínua, como a fonte de alimentação, a presença de etapas prévias de remoção de água (filtração, centrifugação), o método de abastecimento do material a ser seco e a distribuição do tamanho de partícula na alimentação;
- características químicas da alimentação, como a toxicidade, problemas de odor, problemas de fogo ou explosões, limitações de temperatura, temperaturas de mudanças de fase e propriedades corrosivas;
- especificações e propriedades do produto seco, como os nutrientes, o teor de umidade, a remoção de odores, a distribuição do tamanho de partículas, a densidade, a percentagem máxima de impurezas, a forma granular ou cristalina desejada e as propriedades de escoamento e temperatura que o produto deverá ser resfriado após a secagem;
- dados de secagem obtidos a partir de uma planta piloto, bem como relatos da performance da secagem de materiais semelhantes.

Os cálculos para o planejamento do secador requerem informações termodinâmicas – dados de equilíbrio sólido-líquido e propriedades termodinâmicas gás-vapor – e cinéticas – taxa de secagem em função dos parâmetros relevantes. Além disso, a escolha final deve



atender tanto às necessidades termodinâmicas (para maior eficiência na transferência de calor e massa) quanto às cinéticas (para um melhor dimensionamento do secador) (BAKER, 1997).

A análise final para a escolha do secador deve incluir, portanto, a capacidade produtiva, a umidade inicial do produto, a distribuição do tamanho de partícula, as características de secagem do produto, a temperatura máxima a que o produto pode ser submetido, características explosivas, as isotermas de umidade e dados físicos do material.

### **2.7.2 CLASSIFICAÇÃO DOS SECADORES**

Os secadores podem ser classificados de diversas maneiras:

- Segundo o método de aquecimento

Por esta classificação, os secadores podem ser divididos em secadores por convecção, por condução, por radiação, secadores dielétricos ou, ainda, uma combinação destes modos (BAKER, 1997).

A convecção – também conhecida como secagem direta – é possivelmente o método mais comum de secagem de alimentos particulados, laminados ou sólidos pastosos (estima-se que os secadores convectivos respondam por quase 90% dos processos alimentícios). Nestes equipamentos, o calor é fornecido por ar ou gás aquecido, escoando sobre a superfície do sólido e a umidade evaporada é arrastada pelo meio. Os gases mais comumente utilizados em processos convectivos são o ar (mais comum), gases inertes (nitrogênio, por exemplo), gases de combustão direta e vapor superaquecido (MUJUMDAR, 1995).

Os secadores que utilizam a condução como método de aquecimento podem ser considerados mais simples tanto em relação aos equipamentos necessários quanto aos conceitos envolvidos. Estes secadores, também conhecidos como secadores indiretos, são mais indicados para a secagem de produtos muito finos ou excessivamente úmidos. O calor para a evaporação é fornecido através do contato do produto com superfícies aquecidas (estáticas ou não) e do contato direto de partículas quentes com partículas frias e a umidade evaporada é arrastada através de uma operação sob vácuo ou através de uma corrente de ar destinada apenas para este fim (COOK e DUMONT, 1991).

Os secadores por convecção promovem um aquecimento mais eficiente e mais homogêneo do que os secadores por condução; entretanto, uma vez que a perda de entalpia no primeiro tipo é muito grande, sua eficiência térmica tende a ser menor do que no segundo (BARBOSA e VEGA, 1996).

- Pressão de operação

Quanto à pressão de operação, os equipamentos de secagem podem ser classificados em a vácuo ou sob pressão atmosférica, sendo que a grande maioria dos secadores são

operados bem próximos da pressão atmosférica. Isso ocorre pois a utilização de vácuo é cara e recomendada somente quando o produto deve ser seco sob baixas temperaturas, na ausência de oxigênio ou, ainda, se possui aromas ou nutrientes que possam ser degradados durante a secagem normal (BAKER, 1997).

A liofilização é um caso especial de secagem sob vácuo e temperatura abaixo da do ponto triplo da água. Neste processo, a água (previamente congelada) sublima direto para vapor d'água e, apesar do calor necessário para a sublimação ser bem inferior ao necessário para a evaporação, a necessidade de vácuo eleva o custo do processo. A liofilização do café, por exemplo, custa de duas a três vezes mais do que o processo que utiliza o *spray dryer*; no entanto, a qualidade do produto obtido através da liofilização é muito superior (MUJUMDAR, 1995).

- Modo de operação:

Os secadores também podem ser classificados em contínuos e em batelada, segundo seu modo de operação. Estes últimos são preferidos para produções em pequena escala (abaixo de  $50 \text{ kg.h}^{-1}$ ), longos tempos de residência e quando se necessita garantir a qualidade no interior do secador. Assim como existem secadores que podem ser operados em ambos os modos, alguns tipos, tais como o *spray dryer* e o *flash dryer* só podem ser operados continuamente (BAKER, 1997).

Os secadores podem, ainda, ser classificados de acordo com a temperatura do produto durante a secagem (alta ou baixa, acima ou abaixo do ponto de ebulição da água) e o método de manuseio do produto no interior do secador (estático, agitado, disperso, fluidizado, convergido, caindo por gravidade). Além disso, diversas outras sub-classificações para cada categoria são possíveis.

A seguir serão apresentados os tipos de equipamentos mais comuns utilizados na secagem de produtos alimentícios.

### **2.7.3 TIPOS DE SECADORES**

Existem, na literatura, inúmeros compêndios descrevendo os diferentes tipos de secadores utilizados na secagem de alimentos. A descrição dos tipos a seguir foi obtida a partir dos seguintes autores: GEANKOPLIS, 1993; MUJUMDAR, 1995; BARBOSA e VEGA, 1996 e HELDMAN e HARTEL, 2000.

- Secadores de contato direto

São os equipamentos mais comumente encontrados nas operações de desidratação de alimentos. Neste tipo de equipamento, o ar aquecido escoava através do produto, a fim de evaporar a umidade presente. Eles podem ser de dois tipos: secadores de leitos fixo e móvel.

Nos primeiros, a secagem se dá, basicamente, em batelada (o produto é acondicionado no interior do equipamento, entra em contato com o ar aquecido e é retirado, quando atinge a umidade desejada). Já nos secadores de leito móvel, o processo geralmente é contínuo (de um lado do equipamento entra, continuamente, a matéria-prima úmida e, pelo outro, sai o produto seco).

Alguns exemplos típicos de secadores de leito fixo são os secadores solares, de câmara de armazenamento, de forno e de bandeja, enquanto que entre os equipamentos de leito móvel podem-se citar os secador de esteira, de leito fluidizado e os rotativos. Alguns destes encontram-se descritos a seguir.

- Secador solar

É provavelmente o mais antigo e simples equipamento utilizado na secagem de alimentos. Consiste em deixar o produto exposto ao sol até que se atinja a umidade final desejada. Apesar de apresentar taxas muito baixas de secagem e ser dependente das condições do tempo (que se alteram constantemente), é um dos métodos mais baratos dentre os existentes.

- Secador com câmara de armazenamento

Este processo consiste, simplesmente, em escoar o ar previamente aquecido através do interior de uma câmara de armazenamento onde se encontra acondicionado o produto semi-úmido. É utilizado, na maioria das vezes, como processo secundário de secagem, a fim de remover a umidade que permaneceu no produto após etapa anterior de secagem.

- Secador de forno

Neste tipo de secador, o ar externo é aspirado, aquecido através da combustão direta do gás combustível e posto em contato com o produto a ser desidratado. Este método garante excelente eficiência no aquecimento do ar, uma vez que nenhum meio externo trocador de calor é utilizado. A desvantagem, entretanto, é que os produtos da combustão têm contato direto com o alimento e podem alterar o sabor e aroma de alguns deles.

- Secador de bandeja:

Um dos equipamentos mais comuns de secagem é o secador de bandeja. Seu modo de operação consiste no aquecimento do ar, durante sua entrada no equipamento, através de trocadores de calor ou por contato direto com gases de combustão e passagem do ar aquecido sobre e através do alimento que se encontra acondicionado em uma ou mais bandejas perfuradas. A água é removida da superfície do alimento e arrastada para fora do secador em uma única operação.

Uma das vantagens deste tipo de secador é o baixo índice de choques que o produto sofre, já que não existe movimentação do mesmo no interior do secador. Entre suas desvantagens, pode-se citar a grande necessidade de manipulação, resultando em riscos de contaminação e em elevado custo de mão-de-obra, além da dificuldade de obtenção de uma secagem uniforme por todo o leito. Apesar disto, ele é largamente utilizado na produção de biscoitos, frutas secas, fatias de vegetais e rações. Além disso, este é o equipamento mais recorrente em operações de pequena escala e plantas-pilotos.

- Secador de esteiras

Pode-se dizer que este tipo de secador é uma versão contínua do secador de bandejas, uma vez que seu princípio de funcionamento é basicamente o mesmo. A diferença é que no lugar da bandeja existe uma esteira perfurada móvel que torna o processo contínuo.

Faz-se a alimentação do secador, por uma de suas extremidades, através da deposição do produto sobre a esteira móvel. Através do movimento desta, o produto é levado ao interior do equipamento, onde circula o ar aquecido. A circulação de ar, neste tipo de equipamento, pode se dar sobre a esteira – e, por consequência, sobre o produto – sendo concorrente ou contra-corrente, ou através desta, dependendo das características do alimento processado. A circulação cruzada de ar (que atravessa o produto) torna o processo de secagem mais rápido, uma vez que propicia um maior contato do ar aquecido com o alimento. Além disso, uma parte do ar é renovada constantemente, a fim de evitar a saturação e a consequente redução na taxa de secagem, enquanto outra parte permanece circulando no interior do secador.

Dependendo do tempo de residência necessário para o processo, este equipamento pode apresentar uma ou mais esteiras que podem estar dispostas uma após a outra ou uma sobre a outra. Deste modo, encurta-se o equipamento ao mesmo tempo em que se aumenta sua altura.

Entre suas vantagens, assim como no secador de bandejas, está o baixo índice de choques e a alta produtividade em relação ao espaço ocupado pelo equipamento (utilizando-se duas ou três esteiras sobrepostas). Entretanto, a secagem não é uniforme.

- Secador de leito fluidizado

Este método consiste na secagem de produtos particulados (ou de baixa densidade) através da passagem do ar através do leito de produto. Uma vez que o contato entre o ar e as partículas é bastante íntimo, este método apresenta altas taxas de secagem. O emprego deste equipamento, entretanto, restringe-se a alimentos cujas partículas tenham entre 10  $\mu\text{m}$  e 10 mm (nos casos de leito fluidizado circulante), sejam praticamente esféricas, de estreita distribuição de tamanhos e que não formem grumos. Além disso, as partículas devem suportar a agitação e movimentações causadas pela fluidização sem degradar-se.

- Secador rotativo

Consiste de um cilindro oco que gira horizontalmente sobre seu eixo, geralmente com uma pequena inclinação em direção à saída, isolado termicamente. O produto úmido é alimentado por uma das extremidades, enquanto o ar aquecido circula concorrente ou contracorrente (dependendo da sensibilidade térmica do alimento). Funciona de modo contínuo.

Na parede interna do cilindro existem várias aletas que têm a função de promover a agitação do produto. Conforme o tambor gira, as aletas carregam o produto até uma certa altura, e então o mesmo é despejado na parte inferior do tambor, onde será novamente carregado pelas aletas. Durante a queda, o ar que está circulando seca o produto por convecção. O aquecimento do ar pode ser feito por serpentina de vapor, resistências elétricas (muito pouco usado) ou por combustão de algum gás, como gás natural.

Alguns modelos secam o produto por condução. Neste caso, as paredes do tambor ou tubos no interior do secador têm circulação de vapor de água. Com o produto em contato com estas superfícies aquecidas, a água evapora, e é exaurida por ventiladores de exaustão.

Uma das vantagens deste tipo de secador está na constante agitação que o produto sofre, resultando em uma secagem bastante homogênea. Entretanto, isto é desfavorável quando o produto não pode sofrer choques mecânicos muito elevados.

- Secador de tambor

Consiste de um tambor de metal aquecido, em cujo interior circula vapor de água e em cujo exterior se deposita uma camada delgada de um líquido ou uma suspensão a ser seco. Um raspador separa o sólido seco da superfície do tambor.

Os secadores de tambor são adequados para o processamento de suspensões ou pastas de sólidos finos, portanto o tambor funciona em parte como evaporador e em parte como secador.

Uma de suas vantagens é a continuidade do processo. Entretanto, o contato direto entre o produto e a superfície aquecida do metal pode causar sobre-aquecimento, causando reações desfavoráveis, como caramelização do produto. Assim, gradativamente, vem sendo substituído por secadores por atomização, pois este tipo é mais eficiente e ambos trabalham com o mesmo tipo de produto.

- *Spray dryer*:

Um dos tipos de secadores mais utilizados pela indústria alimentícia. A secagem neste equipamento envolve a atomização da alimentação no interior do equipamento e a recuperação das partículas secas após a remoção da água. Entre as vantagens deste

---

equipamento pode-se citar condições de secagem – e conseqüente teor final de umidade do produto – constantes, operação fácil e constante e uma diversidade de modelos disponíveis tanto para produtos sensíveis como resistentes ao calor (MASTERS, 1991). Estes equipamentos são mais indicados para produtos líquidos com conteúdo de sólidos relativamente altos e dentre alguns exemplos de produtos desidratados por este método pode-se citar o leite, ovos, café, chá, enzimas e proteínas do soro.

- Silo secador e secador vertical

Estes tipos de secadores são utilizados basicamente para a secagem de grãos, após sua colheita ou processamento. A alimentação do produto é feita pela parte superior do equipamento, e desce, através de aletas, até o fundo. Ar aquecido em contracorrente cruza a massa de grãos, secando-os. Em alguns modelos, existem duas zonas: aquecimento e resfriamento, esta última na parte inferior do equipamento.

## **CAPÍTULO 3**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A secagem de alimentos – por toda sua complexidade e por ser um processo extremamente dependente de fatores ligados ao tipo de equipamento utilizado, aos parâmetros de processo e, principalmente, à natureza do produto que está sendo submetido à secagem – é, constantemente, o assunto principal dos mais variados estudos realizados ao redor do mundo.

Nesta seção, serão abordados alguns trabalhos relevantes realizados na área de secagem nos últimos anos. Considerando os dois principais enfoques abordados neste trabalho – obtenção das isotermas de sorção e obtenção das curvas de secagem da PTS – os trabalhos serão apresentados, separadamente, de acordo com seu foco principal.

Vale ressaltar que nesta revisão bibliográfica optou-se por apresentar apenas alguns dos trabalhos mais recentes e importantes; de maneira alguma pretende-se realizar uma revisão completa sobre o assunto que fosse referência a outros trabalhos, principalmente por não ser este o enfoque deste trabalho e pelo tamanho que tal tarefa exigiria.

#### **3.1 ISOTERMAS DE SORÇÃO**

Inúmeros trabalhos determinando as isotermas de sorção dos mais variados produtos alimentícios encontram-se disponíveis na literatura. Alguns deles encontram-se descritos a seguir.

TSAMI, MARINOS-KOURIS e MAROULIS (1990) estudaram as isotermas de sorção para diferentes frutas secas (uva-passa, groselha, figo, ameixa e damasco) com diferentes teores de açúcares (82,3%, 79,5%, 75,2%, 54,5% e 51,5%, respectivamente) nas temperaturas de 15°, 30°, 45° e 60°C. As isotermas obtidas para o figo apresentaram inversão de comportamento

(cruzamento) em um valor de atividade de água próximo de 0,65; para a ameixa, isso ocorreu em uma atividade de água por volta de 0,7 e para o damasco, em uma atividade de água de 0,75. Os autores concluíram que o ponto de intersecção das curvas depende da composição do alimento e da solubilidade dos açúcares presentes; quanto maior foi o teor de açúcares presente na amostra, antes se deu a inversão de comportamento das isotermas.

MCLAUGHLIN e MAGEE (1998) determinaram as isotermas de adsorção e dessorção de amostras de batatas nas temperaturas de 30, 45 e 60°C. Os autores observaram a ocorrência considerável do fenômeno de histerese entre as curvas obtidas. Além disso, o fenômeno mostrou-se mais marcante quanto maior era a temperatura. Os modelos testados para o ajuste dos dados experimentais foram os de GAB, Oswin, Halsey e BET. Destes, apenas o último foi considerado como inadequado para a representação dos dados de sorção destas amostras. Em relação à umidade de monocamada, o autor observou uma diminuição deste parâmetro com o aumento da temperatura. O calor de sorção, por sua vez, aumentou com a elevação da temperatura.

MENKOV (2000a) determinou as isotermas de adsorção e dessorção de grãos de lentilha nas temperaturas de 5, 20, 40 e 60°C. O autor constatou, além da ocorrência do fenômeno de histerese entre as curvas de adsorção e dessorção, que a capacidade de sorção dos grãos diminuiu com o aumento da temperatura para uma atividade de água constante. Além disso, foram utilizados cinco modelos para o ajuste dos dados experimentais (Chung-Pfost modificado, Halsey modificado, Oswin modificado, Henderson modificado e GAB); os que apresentaram os melhores ajustes foram os modelos de GAB e Oswin modificado.

MENKOV (2000b) também determinou as isotermas de adsorção e dessorção de amostras de grão-de-bico nas mesmas temperaturas do estudo anterior. O grão-de-bico é um alimento considerado de alto valor nutricional, devido ao seu alto teor de proteína vegetal. Os resultados obtidos em relação à capacidade de sorção do grão foram muito semelhantes aos obtidos para as amostras de lentilha. Neste caso, entretanto, o fenômeno de histerese entre as curvas de adsorção e dessorção não se mostrou significativo. Para o ajuste dos dados experimentais, o autor optou por testar, além dos modelos utilizados no estudo anterior, um novo modelo, denominado de *Fraction-linear* (FL). Este último foi o que apresentou a melhor predição dos dados experimentais obtidos. Em relação à umidade de monocamada, o autor observou a diminuição deste parâmetro com o aumento da temperatura.

KAYMAK-ERTEKIN e SULTANOGLU (2001) determinaram as isotermas de adsorção e dessorção de dois tipos de pimenta (a pimenta verde e a vermelha) em três temperaturas (30, 45 e 60°C). Os autores constataram o aumento da umidade de equilíbrio com a diminuição da temperatura (para uma atividade de água constante). Além disso, constatou-se o fenômeno de histerese mais pronunciado em valores de atividade de água superiores a 0,5 e nas temperaturas mais baixas. Para o ajuste dos dados experimentais, os autores optaram pela utilização dos modelos de GAB, Halsey, Oswin e BET. O modelo de BET foi o que melhor se



ajustou aos dados experimentais; esta conclusão, no entanto, só mostrou-se válida para valores de atividade de água entre 0,1 e 0,5. O modelo de Halsey, por sua vez, apresentou os melhores resultados no ajuste da totalidade da curva. O calor de sorção aumentou com a diminuição de umidade e os valores obtidos para o calor de dessorção foram superiores aos obtidos para o calor de adsorção a baixos teores de umidade.

SANDOVAL e BARREIRO (2002) determinaram as isotermas de sorção de grãos de cacau não-fermentados nas temperaturas de 25, 30 e 40°C, não encontrando nenhuma diferença estatística entre elas. Ou seja, neste intervalo de temperatura, esta não afeta significativamente a adsorção de água pela amostra. Dentre os modelos estudados para o ajuste dos dados experimentais (Freundlich, BET, Harkins-Jura, Smith, Halsey, Henderson, Chung-Pfost, Kuhn e GAB), o de BET foi o que melhor se ajustou à parte inferior da curva (atividade de água inferior a 0,5) e o de Harkins-Jura foi o que melhor se ajustou à parte superior desta (atividade de água superior a 0,5). Os autores estimaram uma umidade de monocamada de 0,0294 kg água.kg ss<sup>-1</sup> pelo modelo de BET e de 0,0218 kg água.kg ss<sup>-1</sup> pelo modelo de GAB.

PARK, VOHNIKOVA e BROD (2002) determinaram as isotermas de dessorção de folhas de menta nas temperaturas de 30, 40 e 50°C. As isotermas referentes às temperaturas de 40 e 50°C mostraram-se muito semelhantes e, em todas elas, a umidade de equilíbrio diminuiu com o aumento da temperatura (para uma atividade de água constante). O ajuste dos dados experimentais foi testado com os modelos de Oswin, Halsey, BET linear, Langmuir, GAB, BET e Peleg. Os melhores resultados foram obtidos pelos modelos de GAB, Halsey e Peleg, para 30°C, e para BET, GAB e Peleg, para 40°C.

SHIVHARE, ARORA, AHMED e RAGHAVAN (2004) determinaram as isotermas de adsorção de dois tipos de cogumelos nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70°C e testaram o ajuste destes dados aos modelos de Freundlich, BET, Harkins-Jura, Oswin, Smith, Halsey, Henderson, Chung-Pfost, Kuhn, Iglesias-Chirife e GAB. Os autores observaram que o teor de umidade de equilíbrio de ambos os tipos de cogumelos aumentou com o aumento da atividade de água (para temperatura constante). Mantendo-se constante a atividade de água, o teor de umidade de equilíbrio das amostras de cogumelo diminuiu com o aumento da temperatura. Além disso, o modelo que melhor descreveu as isotermas de adsorção destas amostras foi o de Chung-Pfost, obtendo o menor coeficiente de correlação e o menor desvio padrão entre todos os modelos testados. Os autores também observaram que o calor total de sorção das amostras aumentou com a diminuição da umidade de equilíbrio de ambas as amostras.

Estudos a respeito das isotermas de sorção da proteína texturizada de soja ou, até mesmo, de alguma outra proteína texturizada vegetal, são, entretanto, deveras escassos.

ROMERO (1988) determinou as isotermas de sorção de dois tipos de proteína texturizada de soja nas temperaturas de 20, 30, 40, 50, 60 e 70°C (um dos tipos continha cerca de 50% de proteína e o outro cerca de 70%). Ele observou períodos de 7 a 15 dias para que as amostras atingissem o equilíbrio (quanto maior a temperatura, menor o período necessário para o equilíbrio ser atingido). O autor observou curvas bastante semelhantes em função da temperatura, mas bem diferentes de uma amostra para a outra. O primeiro tipo de PTS atingiu teores de umidade de equilíbrio bem mais elevados que o segundo.

### 3.2 CURVAS DE SECAGEM

Os estudos referentes à obtenção das curvas de secagem de diferentes produtos alimentícios são largamente encontrados na literatura. A grande maioria deles, entretanto, tem como objetivo principal a determinação da difusividade efetiva da amostra estudada.

KARATHANOS, VILLALOBOS e SARAVACOS (1990) compararam dois métodos diferentes de estimação da difusividade efetiva de amostras de amido: o método da tangente à curva de secagem e uma técnica de simulação computacional. As curvas de secagem foram obtidas para amostras de formato esférico e placa-plana, em um secador com ar aquecido, operando a uma temperatura entre 60 e 100°C e velocidade de 2 m.s<sup>-1</sup>. A difusividade efetiva das amostras mostraram relação com a porosidade das mesmas (quanto menos porosas eram as amostras, menores eram as difusividades estimadas). Os dois métodos mostraram-se muito semelhantes para géis com alto teor de amilopectina (baixa porosidade) e bastante diferentes para amostras granulares hidratadas e géis com alto teor de amilose (porosos). Os autores concluíram que o primeiro método pode ser usado para uma estimação preliminar deste coeficiente, enquanto que o segundo deve ser a opção quando predições mais acuradas são desejadas.

SIMAL, FEMENÍA, LLULL e ROSSELLÓ (2000) estudaram o efeito da temperatura do ar de secagem (de 30 a 80°C) nas curvas de secagem e nas propriedades funcionais de cubos de *aloe vera* em um secador estático, com ar aquecido. Os autores não detectaram nenhum período de taxa constante durante a secagem destas amostras. A temperatura do ar de secagem mostrou-se determinante para a taxa de secagem (exceto para o experimento cuja temperatura foi de 80°C). Adicionalmente, este parâmetro mostrou-se decisivo, também, na alteração das propriedades funcionais da amostra.

DOYMAZ E PALA (2001) apresentaram um estudo sobre a cinética de secagem de amostras de pimenta vermelha submetidas a diferentes pré-tratamentos e condições do ar de secagem e concluíram que a taxa de secagem aumenta com o aumento da área exposta ao ar de secagem. O pré-tratamento que melhor afetou a secagem (e a coloração final do produto) foi com 2% de oleato etílico e 5% de carbonato de potássio. Os autores também testaram o

ajuste dos dados experimentais ao modelo de Page e ao modelo exponencial, sendo que o primeiro apresentou os melhores resultados.

PARK, VOHNIKOVA e BROD (2002) determinaram as curvas de secagem de folhas de menta em um secador de bandeja com ar aquecido para três diferentes temperaturas do ar de secagem (30°, 40° e 50°C) e duas velocidades (0,5 e 1,0 m.s<sup>-1</sup>). Os autores estimaram (através do modelo de Page) a difusividade efetiva das amostras e esta variou entre 4,765×10<sup>-13</sup> e 2,945×10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>; este parâmetro aumentou com o aumento da temperatura e da velocidade do ar de secagem.

KROKIDA, KARATHANOS, MAROULIS e MARINOS-KOURIS (2003) estudaram o efeito do tamanho característico das amostras, da temperatura, da velocidade e da umidade relativa do ar de secagem na cinética de secagem de vários produtos alimentícios (batata, cenoura, pimenta, alho, champignon, cebola, ervilha, milho, aipo, abóbora, espinafre e tomate). Os autores concluíram que o efeito mais significativo na secagem de todos estes produtos foi a temperatura do ar de secagem (o processo acelerou-se com o aumento de temperatura). A velocidade do ar de secagem, por sua vez, mostrou efeitos muito baixos – por vezes, inexistentes – na secagem das amostras estudadas. O efeito da umidade do ar de secagem mostrou-se muito semelhante ao da velocidade, sendo um pouco mais significativo para a secagem de alguns produtos, tais como o tomate, o alho, o espinafre e a cebola.

SOGI, SHIVHARE, GARG e BAWA (2003) determinaram o comportamento de secagem de sementes de tomate em um secador de leito fluidizado. Para tanto os autores variaram a temperatura do ar de secagem desde o valor ambiente até 200°C e a vazão do ar de secagem de 0,4 a 2,4 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>. Uma das conclusões obtidas foi a inexistência do período de taxa constante de secagem nestas condições de processo. Além disso, os autores observaram que o tempo de secagem diminuiu substancialmente com o aumento da temperatura do ar de secagem. Os autores testaram o ajuste dos dados experimentais ao modelo logarítmico e ao modelo de Page. Este último foi indicado como mais adequado na predição das curvas de secagem de sementes de tomate nestas condições de processamento.

KOYUNCU, SERDAR e TOSUN (2004) determinaram as características e o requerimento de energia do processo de secagem de amostras de castanha (*Castanea sativa*). Foram variados os parâmetros de temperatura do ar de secagem (40, 50, 60 e 70°C) e velocidade do ar de secagem (0,5 e 1,0 m.s<sup>-1</sup>). Os autores observaram que a temperatura exerceu uma influência muito mais significativa nas curvas de secagem do produto do que a velocidade. Estes dois fatores, entretanto, mostraram-se bastante significativos na determinação da energia requisitada pelo processo.

ERTEKIN e YALDIZ (2004) estudaram o efeito da espessura da amostra (0,635, 1,27 e 2,54 cm), do tipo de pré-tratamento, da temperatura (30, 40, 50, 60 e 70°C) e da velocidade do ar de secagem (0,5, 1,0 e 2,0 m.s<sup>-1</sup>) nas características de secagem e na qualidade final de

cor e re-hidratação de fatias de berinjela. O ajuste dos dados experimentais obtidos foram testados com diversos modelos (Newton, Page, Page modificado, Henderson e Pabis, Wang e Singh, Thompson, Midilli *et al*, entre outros). Os autores concluíram que o pré-tratamento diminuiu o tempo de secagem e melhorou a cor das amostras secas, mas causou, também, uma diminuição no potencial de re-hidratação; o aumento na espessura das fatias de berinjela aumentou o tempo de secagem e o potencial de re-hidratação, não afetando a coloração final da amostra e, tanto o aumento da temperatura como da velocidade do ar de secagem diminuíram o tempo de processo. O modelo que se mostrou o mais adequado para a predição das curvas de secagem das fatias de berinjela (nos intervalos de temperatura do ar de secagem entre 30 e 70°C e velocidade do ar de secagem entre 0,5 e 2,0 m.s<sup>-1</sup>) foi o modelo apresentado por Midilli *et al*.

Semelhantemente aos estudos que determinam as isotermas de sorção, muito poucos dados a respeito das características de secagem da proteína texturizada de soja encontram-se disponíveis na literatura.

ROMERO (1988) determinou as características de secagem de dois tipos comerciais de PTS (um deles contendo cerca de 50% de proteína e ou outro contendo cerca de 70% de proteína) em um secador de leito estático e em outro de leito deslizante, variando os parâmetros de temperatura (entre 50 e 91°C) e fluxo mássico do ar de secagem (entre 0,13 e 0,18 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>). O autor concluiu que as amostras de PTS estudadas não apresentavam o período de taxa constante de secagem. Dentre os parâmetros que mais afetaram o processo, a temperatura do ar de secagem foi mais significativo deles (quanto maior a temperatura, maior a taxa). O fluxo, por sua vez, demonstrou afetar ligeiramente a taxa de secagem destes dois tipos de PTS.

## **CAPÍTULO 4**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

O presente estudo foi desenvolvido em dois locais distintos: a parte experimental que visava a determinação das curvas de secagem de três tipos de proteína texturizada de soja (PTS) foi desenvolvido na planta piloto de secagem e no Laboratório de Controle de Qualidade da unidade de produção de Proteína Texturizada de Soja da empresa Solae do Brasil Ind. e Com. de Alimentos LTDA. (Esteio, RS, Brasil), enquanto que os experimentos cujo objetivo era a determinação das isotermas de sorção da PTS foram realizados no Laboratório de Tecnologia Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre, RS).

A seguir, serão apresentadas as matérias-primas que foram utilizadas durante a realização deste estudo.

#### **4.1 MATÉRIA PRIMA**

Foram utilizados, como matéria prima, quatro diferentes tipos comerciais de proteínas texturizadas de soja, doravante denominados de Tipo I, Tipo II, Tipo III e Tipo IV. Todas as amostras utilizadas foram fornecidas pela empresa Solae do Brasil Ind. e Com. de Alimentos LTDA. (Esteio, RS, Brasil).

Os três primeiros tipos de PTS (I, II e III) eram de composição semelhante, diferindo entre si apenas em seu tamanho, formato e umidade inicial (fatores resultantes da diferença de parâmetros utilizados no processo preliminar de extrusão de cada tipo de PTS). A PTS Tipo IV, por sua vez, possuía mesmo tamanho e formato da PTS Tipo I, mas teor protéico mais elevado. As PTS dos tipos I, II e III possuíam em torno de 55% de proteína, 20% de açúcares, 20% de fibra, 5% de cinzas e 0% de gordura, enquanto que a PTS Tipo IV possuía em torno

de 75% de proteína, 0% de açúcares, 20% de fibra, 5% de cinzas e 0% de gordura (Laboratório Central – Solae do Brasil Ind. e Com. de Alim. S.A.).

A seguir, serão apresentadas, separadamente, as matérias-primas utilizadas nos experimentos de determinação das isotermas de adsorção e de obtenção das curvas de secagem.

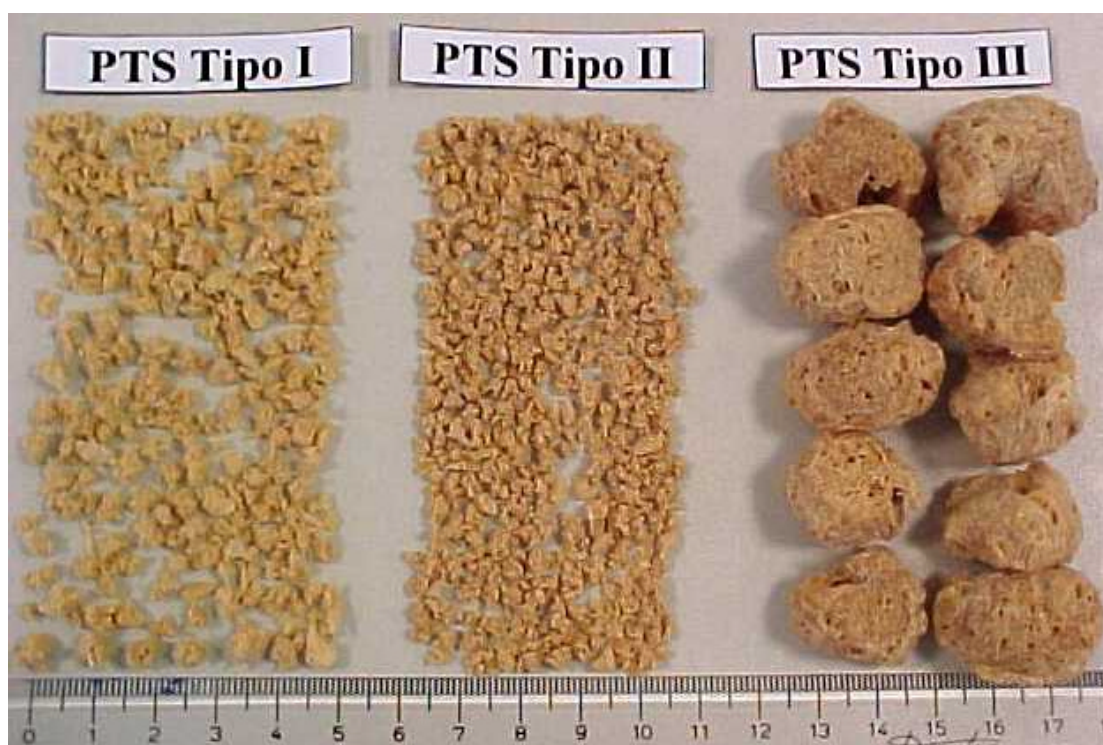
#### **4.1.1 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO**

Para os experimentos destinados à determinação das isotermas de adsorção foram utilizadas amostras secas de PTS dos tipos I e IV.

As amostras empregadas consistiam no produto final, já embalado e pronto para comercialização. Assim, as amostras utilizadas nestes experimentos possuíam umidade inicial em torno de 6,5% b.u. e eram aproveitadas dentro do prazo de validade indicado na embalagem.

#### **4.1.2 CURVAS DE SECAGEM**

Para os experimentos de secagem foram utilizadas amostras úmidas de PTS dos tipos I, II e III coletadas diretamente na linha de processo da empresa, na alimentação dos secadores (após etapa de extrusão), e submetidas aos experimentos imediatamente após sua coleta. A Figura 4.1 apresenta uma fotografia dos três tipos de PTS utilizadas nos experimentos que visavam a obtenção das curvas de secagem.



**Figura 4.1:** Três tipos de PTS utilizados na determinação das curvas de secagem.

Devido às variações desejáveis e/ou necessárias dos parâmetros dos processos que antecediam a etapa de secagem, as amostras úmidas utilizadas apresentaram sensíveis variações em suas características de umidade inicial, densidade e porosidade. Assim, nos experimentos realizados com a PTS Tipo I, foram utilizadas amostras cuja umidade inicial variou entre 21 e 27% (b.u.). Já para a PTS Tipo II a variação de umidade inicial apresentada pelas amostras situou-se na faixa entre 17 e 26% (b.u.). As amostras de PTS Tipo III foram as que apresentaram a menor variação de umidade inicial (entre 18 e 22% b.u.).

A seguir, serão apresentados os métodos que viabilizaram os resultados obtidos.

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO EQUIVALENTE

Para a determinação do diâmetro equivalente médio das partículas de PTS tipos I, II e III, foi utilizado o método de vibração de peneiras em um reostato marca Produtest, com vibração 7 (em uma escala de 1 a 10), por 10 minutos.

Para a PTS Tipo I, foram utilizadas seis peneiras cujas aberturas variaram entre 7,93 mm e 1,4 mm (Tyler: 5/16, 4, 6, 10, 12 e 14); para a PTS Tipo II, a abertura das peneiras variou entre 4,75 mm e 1,19 mm (Tyler: 4, 6, 10, 12, 14 e 16) e, para a PTS Tipo III, utilizaram-se quatro peneiras cujas aberturas variaram entre 25,4 mm e 7,93 mm (Tyler: 1, 5/8, 1/2 e 5/16).

Determinou-se o diâmetro equivalente médio da amostra através da seguinte equação:

$$D_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{M_i}{M_{tot} D_{eqi}}} \quad (4.1)$$

onde  $M_i$  é a massa de amostra retida na peneira de diâmetro de abertura  $D_{eqi}$  e  $M_{tot}$  é a massa total de amostra submetida ao peneiramento.

Os dados referentes à análise granulométrica dos três tipos de PTS são apresentados no Apêndice A.

### 4.2.2 DETERMINAÇÃO DA COR

Um dos parâmetros de qualidade mais importantes de um produto alimentício é sua coloração. A determinação dos parâmetros de cor – *lightness* (L), *redness* (a) e *yellowness* (b) – das amostras de PTS Tipo I foi realizada através da leitura espectrofotométrica, em um colorímetro da marca HunterLab, Modelo LabScan XE. A faixa de leitura do parâmetro L

variava entre 100 (para o branco perfeito) e 0 (para o preto) e a repetibilidade de leitura do aparelho era de 0,04 para este parâmetro.

A fim de diminuir os erros gerados nas diferentes medidas de cor, padronizaram-se as amostras através do peneiramento das mesmas com duas peneiras cujas aberturas eram de 3,36 mm e 2 mm (Tyler: 6 e 10). As análises de cor eram realizadas nas amostras retidas na segunda peneira. Foram realizadas cinco leituras para cada uma das amostras.

#### **4.2.3 DETERMINAÇÃO DE UMIDADE**

Amostras recolhidas no início e no final de cada experimento de secagem eram submetidas à determinação de umidade. Para tanto, pesava-se em torno de 10 g de amostra em um recipiente de alumínio (previamente seco e de massa conhecida) e este era colocado em uma estufa de circulação forçada de ar (segundo método da AOAC, 1990). As amostras, no mínimo em duplicata, permaneciam por 3 h sob uma temperatura de 105°C ou até que as mesmas apresentassem uma variação de massa inferior a 0,01g. A balança utilizada para as medidas de massa era da marca Sartorius, modelo BP3100P, com precisão de 0,01 g.

Para que a variação de umidade inicial observada entre amostras de mesmo tipo de PTS não influenciasse a análise dos resultados obtidos, optou-se pela expressão dos dados de umidade em função de um adimensional de água livre:

$$X_{adm} = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (4.2)$$

onde  $X$ ,  $X_0$  e  $X_{eq}$  são, respectivamente, o teor de umidade no tempo  $t$ , o teor de umidade inicial e o teor de umidade de equilíbrio. No presente texto, por simplicidade, essa variável ( $X_{adm}$ ) será denominada apenas de umidade adimensional.

#### **4.2.4 DETERMINAÇÃO DAS ISOTERMAS DE ADSORÇÃO**

Determinaram-se as isotermas de sorção da proteína texturizada de soja dos tipos I e IV nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C.

O método utilizado para a obtenção destas isotermas foi o método padrão de determinação das isotermas de sorção recomendado pelo projeto COST 90 (SPIESS e WOLF, 1983). Para tanto, utilizaram-se dez soluções salinas saturadas, preparadas no interior de frascos hermeticamente fechados, que, sob determinada temperatura, conferiam ao interior de cada frasco uma umidade relativa de equilíbrio entre 7 e 97%. As soluções salinas utilizadas e suas respectivas umidades relativas correspondentes a cada temperatura encontram-se listadas na Tabela 4.1.

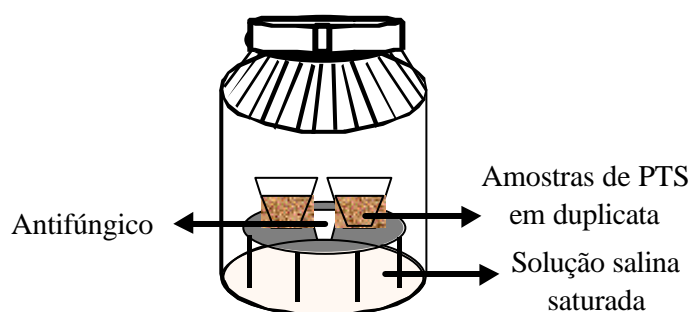


**Tabela 4.1:** Soluções salinas saturadas utilizadas na determinação das isotermas de adsorção.

Sais	UR de equilíbrio em cada temperatura			
	10°C	20°C	30°C	40°C
Hidróxido de sódio	0,096	0,070	0,070	0,065
Cloreto de lítio	0,113	0,112	0,112	0,110
Acetato de potássio	0,235	0,230	0,220	0,210
Cloreto de magnésio	0,335	0,332	0,325	0,317
Carbonato de potássio	0,440	0,430	0,430	0,430
Nitrito de potássio	0,675	0,655	0,635	0,615
Cloreto de sódio	0,760	0,755	0,755	0,755
Cloreto de potássio	0,870	0,853	0,835	0,820
Cloreto de bário	0,914	0,907	0,900	0,893
Sulfato de cobre	0,978	0,973	0,968	0,962

Cada experimento iniciava-se com a preparação das dez soluções salinas saturadas, cada uma em um frasco de vidro com sistema de fechamento hermético. Estas eram deixadas em repouso por 24 horas, a fim de que o interior do frasco atingisse a condição de equilíbrio.

Após este período, pequenos recipientes de alumínio contendo em torno de 5 g de PTS eram inseridos, em duplicata, em cada um dos frascos hermeticamente fechados. Para evitar o crescimento de fungos nos frascos cujo teor de umidade era superior a 60%, foram utilizadas 0,5 g de timol cristalino (WOLF, SPIESS e JUNG, 1985) que era inserido, separadamente, em um cadinho de porcelana no interior do frasco hermeticamente fechado. Os frascos eram, então, acondicionados em uma câmara termostática com circulação interna de ar (marca Tecnal, modelo TE-381, com faixa de operação entre  $-10^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ ) para manter a temperatura constante. Uma representação esquemática do sistema acima pode ser observada na Figura 4.2.

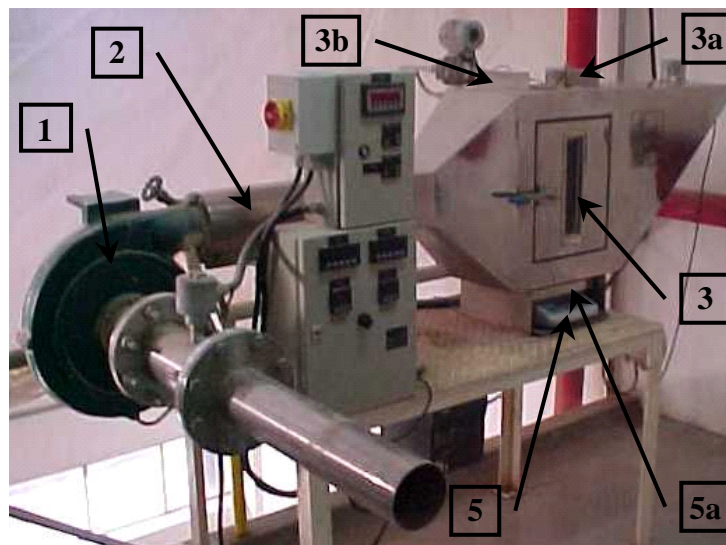
**Figura 4.2:** Representação esquemática do dispositivo para a obtenção das isotermas.

Depois de atingido o equilíbrio – em torno de 20 dias – determinava-se a umidade das amostras através do método apresentado na seção 4.2.3 (em balança analítica marca Ohaus, modelo AS200, com capacidade de  $202 \text{ g} \pm 0,0001 \text{ g}$ ).

Os dados de adsorção (umidade de equilíbrio em função da atividade de água) obtidos em cada temperatura são apresentados no Apêndice B. Estes foram utilizados para a elaboração das isotermas através do ajuste dos mesmos a diferentes modelos. Este ajuste será discutido posteriormente.

#### 4.2.5 DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM

Para a realização dos experimentos cujo objetivo era a obtenção das curvas de secagem das PTS tipos I, II e III, utilizou-se um equipamento piloto, mostrado na Figura 4.3.



**Figura 4.3:** Secador piloto utilizado na determinação das curvas de secagem.

Este é um modelo de leito estático, construído em aço inox AISI 304, apresentando os seguintes componentes (indicados na Figura 4.3):

- 1) ventilador centrífugo de insuflamento (vazão máxima de  $15 \text{ m}^3$  de  $\text{ar} \cdot \text{min}^{-1}$ , em condições ambientes) cuja vazão é controlada por um inversor de frequência;
- 2) três resistências elétricas em paralelo (com temperatura máxima de  $180^\circ\text{C}$  a  $330 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ), controladas pelo controlador descrito a seguir (juntamente com os medidores de temperatura);
- 3) cabine de secagem, com paredes laterais móveis e providas de aberturas (3a e 3b), a fim de tornar possível a inversão da direção do escoamento do ar entre ascendente e descendente;
- 4) cesto para a disposição do produto ( $\text{área} = 0,04 \text{ m}^2$ ), com telas com abertura de  $0,7 \text{ mm}$  (quando eram utilizadas amostras de PTS Tipo I e II) e  $7 \text{ mm}$  (quando eram utilizadas amostras de PTS Tipo III) de diâmetro (posicionado no interior da cabine de secagem(3));

- 5) balança semi-analítica, marca Bel, modelo Mark 8000 (capacidade entre 2 e 8000 g e precisão de 0,1 g) acoplada ao cesto de produto, com isolamento térmico de lã de rocha (massa específica =  $48 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) entre eles (5a).

Além disso, o equipamento possuía os seguintes sensores e controladores:

- dois medidores (termopares) de temperatura na entrada do secador (um para escoamento ascendente e outro para escoamento descendente) do tipo Pt100, conectados a dois controladores-indicadores PID da marca West, modelo 6100;
- um medidor de temperatura do produto, semelhante ao descrito no item anterior, no interior da cabine de secagem;
- um medidor de temperatura e de umidade de saída do ar de secagem, marca Testo – Hygrotest 650, cuja faixa de operação é de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $180^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$ , para a temperatura e 0 a  $100\% \pm 2\%$  para a umidade relativa, na saída do secador;
- um medidor de vazão de ar, marca Nykon Dwyler, cuja faixa de medição varia entre  $73,5$  e  $735 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1} \pm 0,25\%$ .

Eram controladas a vazão e a temperatura do ar de entrada do secador e registradas a temperatura e a umidade do ar de saída deste.

O equipamento utilizado na determinação experimental das curvas de secagem situava-se na área de processo, junto aos secadores industriais. Assim, a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem foram parâmetros pouco variáveis ao longo da realização dos experimentos, uma vez que as condições ambientes apresentavam-se praticamente constantes. O procedimento padrão empregado para a realização dos experimentos de secagem encontra-se descrito a seguir:

- 1°. Ligava-se o equipamento e fixava-se a temperatura e a vazão de ar a serem empregadas no procedimento experimental.
- 2°. Após o secador atingir as condições desejadas e estabilizar-se, coletava-se a amostra a ser submetida à secagem.
- 3°. Acondicionava-se a amostra no cesto de secagem até a altura de camada desejada.
- 4°. Desligavam-se, rapidamente, as resistências e o ventilador, inseria-se o cesto com a amostra no interior da cabine de secagem e anotava-se o peso inicial deste.
- 5°. Ligava-se, novamente, o ventilador e as resistências e dava-se início ao experimento.

A massa de produto era anotada a cada 90 segundos, através do rápido desligamento da resistência e do ventilador (para estabilização da balança). A planilha modelo utilizada

para o registro dos dados coletados durante a realização dos experimentos de secagem encontra-se no Apêndice C.

O escoamento do ar de secagem era, inicialmente, ascendente, a fim de proporcionar um maior desprendimento inicial dos finos presentes na amostra. Além disso, a direção de escoamento era invertida a cada 180 segundos, visando a secagem mais uniforme do produto. Este procedimento foi adotado por ser bastante comum na secagem de produtos alimentícios.

O experimento terminava quando eram atingidos valores muito baixos de umidade (inferiores a 1% b.s.) ou quando se detectava que já não ocorriam mudanças na massa da amostra, indicando que esta atingira sua umidade de equilíbrio.

Para a determinação das curvas de secagem foram variados os seguintes parâmetros de processo: altura de camada de produto, temperatura e velocidade do ar de secagem. Para os três tipos de PTS utilizaram-se três diferentes temperaturas, três diferentes velocidades e duas diferentes alturas de camada. Os dois primeiros parâmetros foram os mesmos para os três tipos de PTS, enquanto que a altura de camada variou de PTS para PTS, dependendo de seu diâmetro equivalente. Assim, nos procedimentos experimentais, foi utilizado o ar de secagem nas temperaturas de 90, 110 e 130°C cuja velocidade variava entre 100, 125 e 150 cm.s<sup>-1</sup>. Optou-se por estes valores de temperatura e velocidade, pois estes se encontram dentro da faixa comumente utilizada industrialmente nos processos de secagem de proteína texturizada de soja (WENGER, 2001).

A variação utilizada para a altura de camada de cada tipo de PTS encontra-se na Tabela 4.2. Estes valores também foram selecionados baseados na maioria dos processos industriais existentes para amostras de diâmetro equivalente semelhantes às utilizadas neste estudo.

**Tabela 4.2:** Valores de altura de camada ( $h_1$  e  $h_2$ ) utilizados nos procedimentos experimentais para a determinação das curvas de secagem de cada tipo de PTS.

	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)
<b>PTS Tipo I</b>	3	6
<b>PTS Tipo II</b>	2,5	5
<b>PTS Tipo III</b>	5	10

A fim de avaliar a influência dos parâmetros estudados – temperatura ( $T$ ) e velocidade ( $v$ ) do ar de secagem e altura ( $h$ ) da camada de produto – no processo de secagem da PTS utilizou-se um planejamento fatorial completo de três fatores ( $T$ ,  $v$  e  $h$ ), sendo dois deles com três níveis ( $T$  e  $v$ ) e o outro com apenas dois níveis ( $h$ ). Este planejamento fatorial resultou, assim, em um mínimo de 18 experimentos (3 x 3 x 2). Na Tabela 4.3 mostra-se o planejamento realizado com a faixa de valores estudados para cada fator.

**Tabela 4.3:** Faixa de valores estudados para cada fator.

Fatores	(-1)	0	(+1)
Temperatura (°C)	90	110	130
Velocidade (cm.s <sup>-1</sup> )	100	125	150
Altura de camada (cm)	$h_1$	-	$h_2$

Para a PTS Tipo I, cada experimento foi realizado, no mínimo, em triplicata; para as PTS dos tipos II e III, por sua vez, os experimentos foram realizados, no mínimo, em duplicata, pois a produção destes tipos se dava em menor escala. O número de experimentos considerados para cada tipo de PTS está descrito a seguir.

- PTS Tipo I:  $(3 \times 3 \times 2) \times 3 = 54$
- PTS Tipo II:  $(3 \times 3 \times 2) \times 2 = 36$
- PTS Tipo III:  $(3 \times 3 \times 2) \times 2 = 36$

Os dados de umidade adimensional ( $X_{adm}$ ) versus o tempo, coletados durante cada um dos experimentos de secagem citados acima, são apresentados nos Apêndices E (PTS Tipo I), F (PTS Tipo II) e G (PTS Tipo III).

A seguir, encontra-se a descrição dos modelos utilizados para o ajuste dos dados obtidos experimentalmente – tanto na determinação das isotermas de adsorção como na obtenção das curvas de secagem – bem como os métodos utilizados para os ajustes e para a análise de qualidade dos mesmos.

### 4.3 AJUSTE DE DADOS

Para o ajuste dos dados e conseqüente determinação das constantes dos modelos utilizados, fez-se uso de um software de estimação não-linear de parâmetros, contido no programa Statística '98 Edition. A fim de verificar a veracidade das soluções, repetiram-se as regressões com diferentes valores iniciais (PELEG, 1993).

Para a análise da qualidade dos ajustes fez-se uso do coeficiente de regressão ( $R^2$ ) e do erro médio relativo, em percentagem, dado pela seguinte equação:

$$EMR = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|V_{EXP} - V_{CALC}|}{V_{EXP}} \quad (4.3)$$

onde  $N$  é o número de experimentos,  $V_{EXP}$  são os dados experimentais e  $V_{CALC}$  são os dados estimados pelo modelo.

Para que um ajuste seja considerado adequado, este deve gerar valores de  $EMR$  abaixo de 10% (AGUERRE, SUAREZ e VIOLLAZ, 1989). Além disso, o modelo que apresenta um coeficiente de regressão igual à unidade é considerado perfeito; logo, quanto mais próximo de 1,0 for o valor de  $R^2$  gerado pelo ajuste, melhor ele representa os dados experimentais.

Os modelos selecionados para os ajustes dos dados experimentais obtidos em cada tipo de experimento são apresentados, separadamente, a seguir.

#### **4.3.1 EXPERIMENTOS DE SORÇÃO**

Os dados de umidade de equilíbrio versus a umidade relativa obtidos nos experimentos de sorção foram ajustados aos seguintes modelos (apresentados na seção 2.4.2): BET (equação 2.7), GAB (equação 2.9), Oswin (equação 2.12), Halsey (equação 2.13), D'arcy Watt (equação 2.16) e Peleg (equação 2.17).

Além disso, o modelo de GAB foi utilizado na determinação dos parâmetros de umidade de monocamada, área superficial e calor de sorção.

#### **4.3.2 EXPERIMENTOS DE SECAGEM**

Para o ajuste dos dados experimentais obtidos durante os testes de secagem, optou-se pela utilização de dois modelos clássicos, facilmente encontrados na literatura (um modelo exponencial e outro estatístico).

Inicialmente, estudou-se o ajuste dos dados de teor de umidade adimensional versus o tempo (obtidos experimentalmente) ao seguinte modelo exponencial de duas constantes:

$$X_{adm} = C_1 \exp(-C_2 t) \quad (4.4)$$

onde  $C_1$  e  $C_2$  são as constantes do modelo escolhido.

A fim de avaliar estatisticamente a influência dos parâmetros de processo estudados (altura da camada de produto, velocidade e temperatura do ar de secagem), bem como os efeitos provenientes da interação destes parâmetros no processo de secagem da PTS – ou seja, na determinação das constantes  $C_1$  e  $C_2$  da equação 4.4 – realizou-se uma análise estatística (ANOVA) com o auxílio de um programa desenvolvido no software Matlab 5.3. A realização do Teste F, ao final da análise, indicava a significância ou não do parâmetro avaliado. Segundo NETO, SCARMINIO e BRUNS (1995), se o valor de F calculado é maior que o valor de F tabelado, o parâmetro é significativo.

Após a análise estatística e conseqüente avaliação dos parâmetros de processo significativos para a determinação destas constantes, estudou-se o ajuste dos dados da constante  $C_2$  em função dos parâmetros do processo (altura de camada de produto ( $h$ ), temperatura ( $T$ ) e velocidade ( $v$ ) do ar de secagem) através do seguinte modelo matemático:

$$C_2^* = k_1 + k_2 T + k_3 v + k_4 h + k_5 T^2 + k_6 v^2 + k_7 T v + k_8 T h + k_9 v h + k_{10} T v h \quad (4.5)$$

onde  $k_1$  a  $k_{10}$  são as constantes do modelo e  $T$ ,  $v$  e  $h$  são os parâmetros do processo de secagem.

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS – ISOTERMAS**

Neste estudo foram determinadas as isotermas de adsorção da proteína texturizada de soja do Tipo I e Tipo IV, cujas características estão descritas na seção 4.1, nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C.

Estes dois tipos de PTS são caracterizados pelo mesmo tamanho e formato, diferindo entre si, apenas, em seus teores de proteína e açúcares: a PTS Tipo I contém cerca de 50% de proteína e 20% de açúcares enquanto que a PTS Tipo IV contém cerca de 70% de proteína e 0% de açúcares.

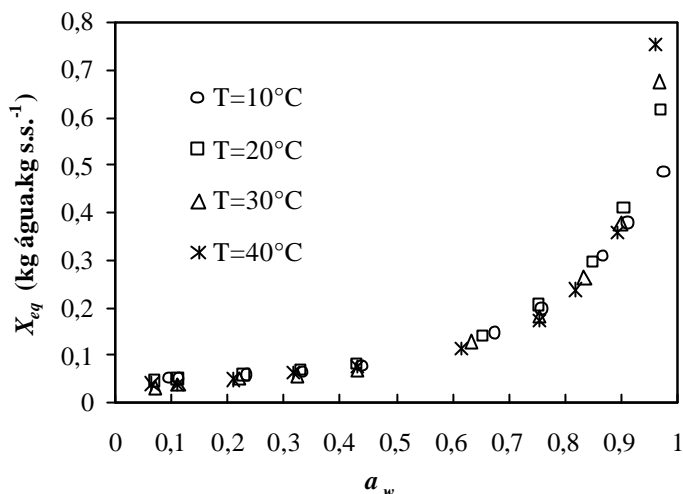
A Figura 5.1 e a Figura 5.2 apresentam as isotermas de adsorção obtidas para a PTS Tipo I e Tipo IV, respectivamente, nas quatro temperaturas estudadas. Os dados experimentais obtidos na determinação das isotermas de adsorção da PTS Tipo I e Tipo IV são apresentados no Apêndice B e C, respectivamente.

Pela análise de ambas as figuras, pode-se perceber uma pequena diferença entre as isotermas obtidas para a PTS Tipo I e as obtidas para a PTS Tipo IV: embora ambas tenham gerado curvas de mesmo formato, as isotermas da PTS Tipo I atingiram valores mais elevados de umidade de equilíbrio do que as do Tipo IV. Conforme comentado na seção 3.1, ROMERO (1988) encontrou resultados semelhantes para as isotermas de dois tipos de PTS contendo cerca de 50% e 70% de proteína.

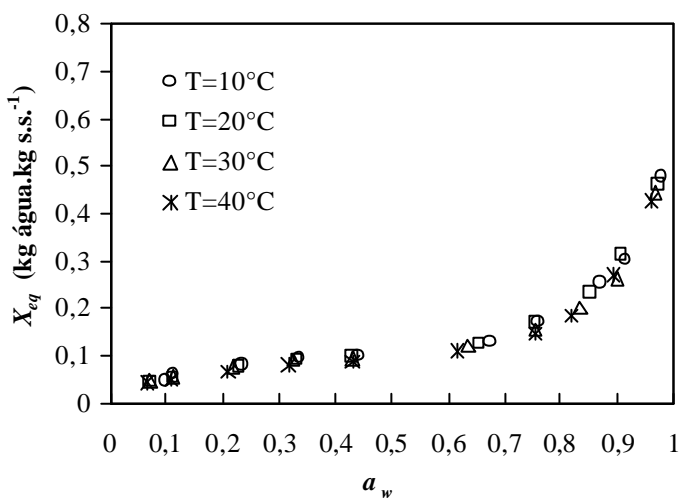
Analisando-se as figuras separadamente pode-se observar que tanto a PTS Tipo I (Figura 5.1) como a PTS Tipo IV (Figura 5.2) apresentaram isotermas bastante semelhantes na faixa de temperatura estudada (entre 10°C e 40°C), indicando que este parâmetro pouco influenciou as isotermas destes dois tipos de PTS, principalmente em valores de atividade de água inferiores a 0,9. Conforme apresentado, anteriormente, na seção 3.1, SANDOVAL e



BARREIRO (2002) encontraram resultados semelhantes para isotermas de grãos de cacau não-fermentados nas temperaturas de 25, 30 e 35°C. A diferença apresentada pelas curvas da PTS Tipo I em função do aumento da temperatura em valores de atividade de água superiores a 0,9 será discutida mais adiante.



**Figura 5.1:** Isotermas de adsorção da PTS Tipo I nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C.



**Figura 5.2:** Isotermas de adsorção da PTS Tipo IV nas temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C.

Uma vez obtidas as curvas experimentais, testou-se o ajuste destas a aos diferentes modelos apresentados na seção 4.3. Os resultados obtidos encontram-se descritos a seguir.

## 5.1 AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

A Tabela 5.1 apresenta os valores estimados para as constantes, a correlação e o erro médio relativo obtido para cada modelo utilizado no ajuste dos dados experimentais obtidos para a PTS Tipo I; a Tabela 5.2 apresenta estes mesmos resultados para os dados experimentais obtidos para PTS Tipo IV.

**Tabela 5.1:** Resultado do ajuste dos dados experimentais, obtidos para a PTS Tipo I, aos diferentes modelos estudados.

Modelo	Ctes	Temperatura			
		10°C	20°C	30°C	40°C
Oswin	<i>A</i>	0,125	0,122	0,102	0,087
	<i>B</i>	0,378	0,461	0,558	0,666
	$R^2$	0,971	0,990	0,998	0,999
	<i>EMR</i> (%)	23,63	15,14	11,09	16,18
Halsey	<i>A</i>	0,020	0,024	0,031	0,024
	<i>B</i>	1,490	1,437	1,271	1,386
	$R^2$	0,991	0,997	0,998	0,998
	<i>EMR</i> (%)	15,46	11,62	6,24	10,19
BET	$X_m$	0,075	0,072	0,062	0,062
	<i>C</i>	1,020	1,055	1,094	1,123
	<i>N</i>	11,382	12,008	11,967	9,899
	$R^2$	0,987	0,990	0,995	0,994
	<i>EMR</i> (%)	29,73	31,93	30,60	32,44
GAB	$X_m$	0,074	0,064	0,055	0,047
	<i>C</i>	5,839	10,588	8,955	30,828
	<i>K</i>	0,874	0,922	0,950	0,976
	$R^2$	0,995	0,998	> 0,999	> 0,999
	<i>EMR</i> (%)	14,70	10,61	7,99	4,02
Peleg	$K_1$	0,454	0,590	0,710	0,980
	$K_2$	0,075	0,128	0,175	0,180
	$n_1$	4,660	7,264	10,698	13,689
	$n_2$	0,191	0,490	0,861	0,830
	$R^2$	> 0,999	0,999	0,999	0,998
	<i>EMR</i> (%)	2,18	7,58	13,45	13,27
D'arcy Watt	$k_1$	-0,127	-1,004	-0,046	-0,045
	$k_2$	385,601	-0,121	127,452	135,931
	$k_3$	0,263	1,008	0,917	0,960
	$k_4$	76,463	-0,088	0,101	0,068
	$k_5$	29,133	0,141	6,079	6,256
	$R^2$	0,999	0,997	0,999	0,999
	<i>EMR</i> (%)	8,33	17,93	12,46	11,56

Através da análise destas tabelas, pode-se observar que alguns modelos se ajustaram muito bem aos dados experimentais, enquanto que outros não podem ser utilizados para representação destes.

Considerando-se os valores obtidos para o coeficiente de correlação, pode-se observar que a maioria dos modelos apresentou valores de  $R^2$  muito próximos da unidade, indicando ajustes de boa qualidade para ambos os tipos de PTS. Além disso, na maioria dos casos, quanto mais alta a temperatura, maiores foram os valores obtidos para o coeficiente de correlação.

**Tabela 5.2:** Resultado do ajuste dos dados experimentais, obtidos para a PTS Tipo II, aos diferentes modelos estudados.

Modelo	Ctes	Temperatura			
		10°C	20°C	30°C	40°C
Oswin	<i>A</i>	0,118	0,116	0,103	0,095
	<i>B</i>	0,374	0,391	0,446	0,486
	$R^2$	0,996	0,994	0,994	0,994
	<i>EMR</i> (%)	7,03	6,49	13,32	14,88
Halsey	<i>A</i>	0,006	0,009	0,006	0,007
	<i>B</i>	2,136	1,963	2,115	1,964
	$R^2$	0,994	0,994	0,994	0,997
	<i>EMR</i> (%)	14,80	14,94	15,88	12,00
BET	$X_m$	0,198	0,180	0,355	0,232
	<i>C</i>	1,019	1,025	1,021	1,031
	<i>N</i>	2,419	2,648	1,059	1,590
	$R^2$	0,973	0,972	0,985	0,982
	<i>EMR</i> (%)	25,88	25,55	17,86	21,39
GAB	$X_m$	0,054	0,055	0,047	0,044
	<i>C</i>	597,378	89,881	2591727	1429930
	<i>K</i>	0,906	0,904	0,931	0,940
	$R^2$	0,997	0,998	0,993	0,997
	<i>EMR</i> (%)	8,26	7,01	10,02	8,02
Peleg	$K_1$	0,150	0,144	0,503	0,509
	$K_2$	0,405	0,404	0,156	0,135
	$n_1$	0,435	0,435	13,208	10,999
	$n_2$	9,625	8,625	0,481	0,450
	$R^2$	0,999	> 0,999	0,998	> 0,999
	<i>EMR</i> (%)	3,93	1,84	4,47	2,32
D'arcy Watt	$k_1$	7,129	-0,530	-0,909	-0,084
	$k_2$	0,153	-11,309	-0,091	90,228
	$k_3$	0,902	0,430	8,355	7,844
	$k_4$	0,063	-20,744	0,065	0,861
	$k_5$	-0,130	3,410	-124,181	0,177
	$R^2$	0,999	0,999	0,997	0,998
	<i>EMR</i> (%)	2,49	7,08	10,61	8,64

Entretanto, se considerados os valores obtidos para o erro médio relativo, pode-se observar que a maioria dos modelos não se ajustou satisfatoriamente aos dados experimentais, uma vez que foram obtidos valores de *EMR* acima de 10%; isso demonstra que esta forma de avaliar os resultados é mais rigorosa que a anterior.

Para a PTS Tipo I, os modelos que melhor se ajustaram aos dados experimentais foram os de GAB e Peleg. O modelo de GAB apresentou os menores valores de *EMR* para as temperaturas de 30 e 40°C enquanto que o de Peleg ajustou-se melhor às temperaturas inferiores (10 e 20°C). Entretanto, o modelo de GAB é o único capaz de prever o cruzamento

que ocorre entre as isotermas deste tipo de PTS. Este cruzamento, conforme será comentado um pouco mais adiante, é característico de alimentos que contenham açúcares. Sendo assim, o modelo de GAB é o indicado para a representação dos dados experimentais da PTS Tipo I nesta faixa de temperatura.

Os modelos de GAB e Peleg também se mostraram como os mais representativos para as isotermas da PTS Tipo IV. Os ajustes com estes modelos foram os únicos a gerar valores de *EMR* abaixo de 10% para todas as temperaturas. Entretanto, como não ocorreu o cruzamento das isotermas deste tipo de PTS, o modelo de Peleg – que obteve valores de *EMR* inferiores e coeficientes de correlação superiores aos obtidos pelo modelo de GAB – pode ser indicado como o melhor modelo para a representação dos dados experimentais da PTS Tipo IV nesta faixa de temperatura. Apesar disso, para fins de comparação, e uma vez que o modelo de Peleg não estima a umidade de monocamada, a determinação dos parâmetros de calor de sorção e umidade de monocamada foi efetuada através do ajuste dos dados de ambas as PTS ao modelo de GAB.

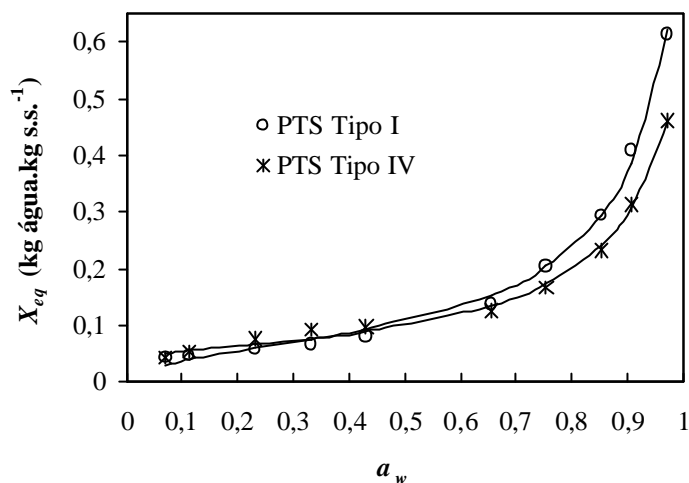
Além dos modelos citados acima, outros modelos, tais como Halsey, Oswin e D'arcy Watt também obtiveram valores aceitáveis de *EMR* em determinadas temperaturas. O modelo de Halsey, por exemplo, mostrou-se representativo das isotermas de adsorção da PTS Tipo I sob altas temperaturas (30 e 40°C). IGLESIAS e CHIRIFE (1976) indicaram ajustes de boa qualidade do modelo de Halsey às isotermas de produtos alimentícios com alto teor de proteína. Neste estudo, entretanto, este modelo ajustou-se melhor às isotermas da PTS cujo teor protéico era inferior.

O ajuste dos dados experimentais ao modelo de D'arcy Watt gerou valores de *EMR* abaixo de 10%, para a PTS Tipo IV, em três temperaturas (10, 20 e 40°C) e apenas em uma delas (10°C) para a PTS Tipo I. Uma vez que os teores de açúcares da PTS Tipo IV e I são, respectivamente, 0% e 20%, este resultado vai de encontro ao obtido por SARAVACOS, TSIOURVAS e TSAMI (1986) que indicaram um melhor ajuste deste modelo às isotermas de alimentos com alto teor de açúcar.

O ajuste dos dados experimentais ao modelo de BET obteve os valores mais elevados de *EMR* – superando os 30% – e os menores coeficientes de correlação, sendo considerado inadequado para a representação das isotermas de adsorção de ambos os tipos de PTS na faixa de temperatura estudada. Esse resultado decorre, possivelmente, do fato de o modelo de BET se ajustar apenas a valores de atividade de água até 0,5.

A Figura 5.3 apresenta as isotermas de adsorção obtidas experimentalmente para as PTS tipos I e IV na temperatura de 20°C bem como o ajuste destas isotermas ao modelo de GAB. Nesta figura, os pontos representam os dados experimentais obtidos para cada tipo de PTS e a linha contínua representa o ajuste destes dados ao modelo de GAB.

Como pode ser melhor observado através desta figura, a diferença existente entre as isotermas de adsorção dos dois tipos de PTS é mais significativa em valores de atividade de água superiores a 0,5, quando a umidade de equilíbrio da PTS Tipo I passa a aumentar mais rapidamente com o aumento da atividade de água. Isso se deve ao teor mais elevado de açúcares presente na PTS Tipo I que tornam este produto mais higroscópico, elevando seu teor de umidade de equilíbrio.



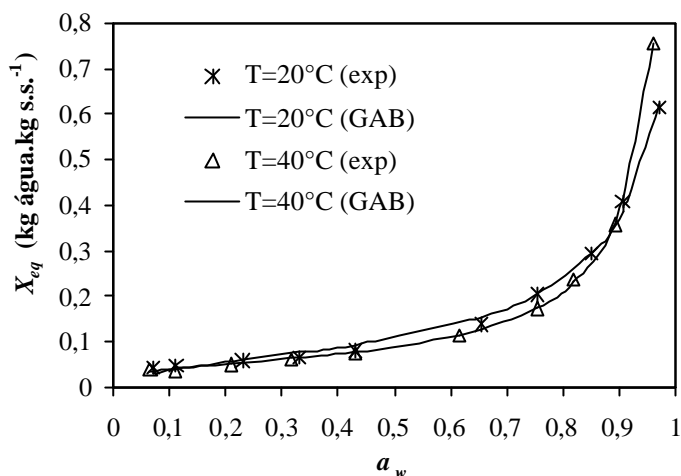
**Figura 5.3:** Ajuste dos dados experimentais obtidos para as PTS tipos I e IV, na temperatura de 20°C, ao modelo de GAB.

Como comentado anteriormente, as isotermas de um mesmo tipo de PTS (em diferentes temperaturas) apresentaram-se bastante semelhantes. Entretanto, uma pequena diferença entre as curvas pode ser observada. A fim de melhor visualizar esta diferença existente entre as isotermas de mesmo tipo de PTS, foram construídas a Figura 5.4 e a Figura 5.5, onde têm-se as isotermas de adsorção da PTS Tipo I e Tipo IV, respectivamente, para as temperaturas de 20 e 40°C.

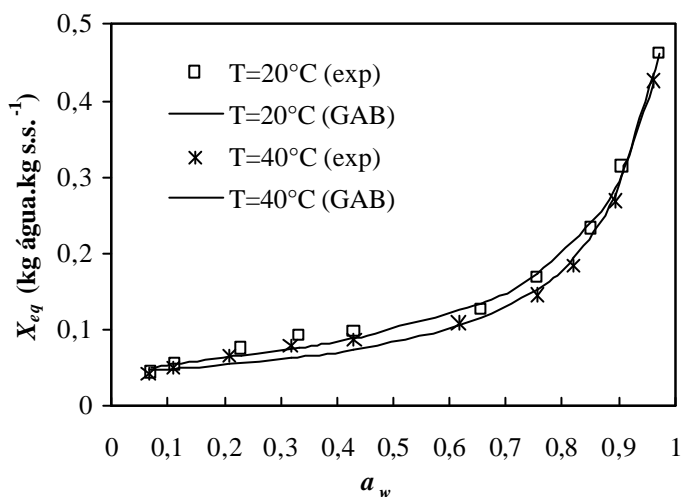
Na Figura 5.4 pode-se perceber a pequena diferença existente entre as curvas das duas isotermas. Como era de se esperar, quanto maior a umidade de equilíbrio, maior a atividade de água do produto (para temperatura constante). Isso se dá, pois a pressão do vapor de água presente no produto acompanha o aumento da pressão de vapor do meio que envolve a amostra. Além disso, tratando-se de atividade de água constante, é possível observar uma mudança de comportamento destas isotermas em uma atividade de água por volta de 0,9: a parte da curva anterior a este valor caracteriza-se por uma diminuição da umidade de equilíbrio com o aumento da temperatura; a partir de uma atividade de água por volta de 0,9 ocorre o contrário, ou seja, a umidade de equilíbrio passa a aumentar em função do aumento da temperatura.

Esta inversão de comportamento apresentado pelas isotermas da PTS Tipo I vem ao encontro dos resultados obtidos por diversos autores, uma vez que os açúcares já foram,

inúmeras vezes, reconhecidos como fatores determinantes para as isotermas de sorção, principalmente em altos valores de atividade de água, de diferentes produtos alimentícios.



**Figura 5.4:** Ajuste dos dados experimentais das isotermas de adsorção da PTS Tipo I (temperaturas de 20 e 40°C) ao modelo de GAB.



**Figura 5.5:** Ajuste dos dados experimentais das isotermas de adsorção da PTS Tipo IV, referente às temperaturas de 20 e 40°C, ao modelo de GAB.

Como apresentado na seção 3.1, TSAMI *et al* (1990) estudou as isotermas de sorção para diferentes frutas secas, com diferentes teores de açúcares, e observou que, quanto maior era o teor de açúcares da amostra, menor era o valor de atividade de água no qual as isotermas de diferentes temperaturas se cruzavam. Assim, como o teor de açúcares das amostras de PTS Tipo I utilizadas neste estudo encontrava-se em torno de 20%, a atividade de água onde ocorreu o cruzamento das isotermas foi bastante alta, como era esperado.

As isotermas de produtos alimentícios são caracterizadas por baixos teores de umidade de equilíbrio em baixos teores de atividade de água. O aumento desta última causa, por consequência, o aumento da primeira. Além disso, quanto maior a temperatura menor é o teor

de umidade adsorvido pela amostra para um mesmo valor de atividade de água. Para alimentos que contenham açúcares, entretanto, a partir de determinado valor de atividade de água (que é menor quanto maior for o teor de açúcares contido na amostra), ocorre exatamente o contrário, ou seja, quanto maior a temperatura, maior será o teor de umidade de equilíbrio da amostra para um mesmo valor de atividade de água. Isso ocorre, segundo SARAVACOS *et al* (1986), pois o aumento da temperatura causa o aumento gradual no processo de dissolução de açúcares, aumentando, assim, o teor de umidade de equilíbrio desta. Entretanto, segundo LABUZA (1984), não é somente a dissolução dos açúcares presentes na amostra que pode causar o cruzamento das isotermas, mas este também pode ser causado pela contaminação microbiana. Uma vez que não foi percebido o crescimento de microrganismos nas amostras de ambos os tipos de PTS e devido à diferença na composição de cada uma (teor de açúcares), acredita-se que a inversão de comportamento observada nas isotermas de adsorção da PTS Tipo I foi causada pela dissolução dos açúcares presentes nestas amostras.

A partir da Figura 5.5 pode-se observar que a diferença existente entre as isotermas da PTS Tipo IV também é pequena, mas evidente. Entretanto, ao contrário do ocorrido para a PTS Tipo I, as curvas referentes a PTS Tipo IV se aproximam bastante em altos valores de atividade de água, mas em nenhum momento ocorre o cruzamento das mesmas. Isso concorda com BENADO e RIZVI (1985) apud TSAMI *et al* (1990) que indicaram a ausência de cruzamento entre as isotermas de produtos alimentícios com alto teor de proteína.

## 5.2 UMIDADE DE MONOCAMADA

Para a determinação da umidade de monocamada ( $X_m$ , em kg água.kg ss<sup>-1</sup>) dos dois tipos de PTS em cada temperatura foi utilizado o ajuste dos dados experimentais ao modelo de GAB. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3:** Valores de umidade de monocamada para ambos os tipos de PTS.

$X_m$ (kg água.kg ss <sup>-1</sup> )	PTS Tipo I	PTS Tipo IV
$X_m$ (10°C)	0,074	0,054
$X_m$ (20°C)	0,064	0,055
$X_m$ (30°C)	0,055	0,047
$X_m$ (40°C)	0,046	0,044

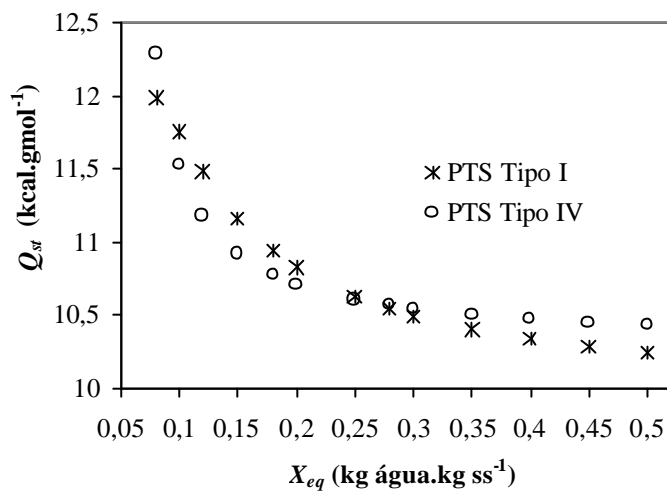
Como pode ser observado, foram obtidos valores superiores de umidade de monocamada para a PTS Tipo I e estes diminuíram com o aumento da temperatura. Este comportamento apresentado pelos valores de umidade de monocamada em função da temperatura vai ao encontro dos resultados obtidos por diversos autores (IGLESIAS e CHIRIFE (1976), LABUZA *et al* (1985), WANG e BRENNAN (1991), MCCLAUGHLIN e MAGEE (1998) e KAYMAK-ERTEKIN e SULTANOGLU (2001)). Além disso, os valores de umidade de

monocamada obtidos para ambos os tipos de PTS foram sempre inferiores a 10% (0,1 kg água.kg ss<sup>-1</sup>) que é o valor máximo de umidade de monocamada já obtido para produtos alimentícios (LABUZA *et al*, 1985).

### 5.3 CALOR TOTAL DE SORÇÃO

Este parâmetro foi determinado com o auxílio da relação de Clausius- Clapeyron e da equação 2.4. Para tanto, utilizando-se o modelo de GAB, estimaram-se diferentes valores de atividade de água em função de diferentes teores de umidade de equilíbrio para cada temperatura.

A Figura 5.6 mostra a variação do calor total de sorção de ambos os tipos de PTS em função da umidade de equilíbrio.



**Figura 5.6:** Calor total de sorção (em kcal.gmol<sup>-1</sup>) de ambos os tipos de PTS.

Como pode ser observado, para ambos os tipos de PTS, quanto maior o teor de umidade, menor é o calor total de sorção. Isso concorda com diversos autores (FASINA e SOKHANSANJ 1993), pois quanto menor é a quantidade de água presente no alimento, mais difícil é a sua remoção.

Comparando-se os dois tipos de PTS, pode-se perceber que a diferença de energia necessária para secar a PTS de uma umidade em torno de 25% até uma umidade de 10% é, somente, um pouco mais acentuada para a PTS Tipo I do que para a PTS Tipo IV, indicando que ambas os tipos de PTS demandam, praticamente, a mesma energia para ser seca até 10% de umidade. O calor total de sorção da primeira, por sua vez, se aproxima do calor latente de vaporização da água pura (10,53 kcal.gmol<sup>-1</sup>, a 25°C) em um teor menor de umidade (aproximadamente 28% (b.s.) contra 33% da PTS Tipo IV). Acima destes teores de umidade,



a água presente no produto se encontra na forma não ligada, ou seja, disponível para a utilização dos microrganismos (IGLESIAS e CHIRIFE, 1976).

## 5.4 ÁREA SUPERFICIAL DA PTS

A estimativa da área superficial de ambos os tipos de PTS foi feita através da equação 2.5 e foram utilizados os valores de umidade de monocamada estimados a partir do ajuste dos dados experimentais ao modelo de GAB. Os valores estimados para a área superficial da PTS Tipo I e Tipo IV (em  $\text{m}^2.\text{g sólido}^{-1}$ ) que podem ser utilizados como auxiliar na determinação da composição do produto (quanto maior a área, maior a quantidade de polímeros presentes), encontram-se na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4:** Valores estimados para a área superficial da PTS Tipo I e Tipo IV para as diferentes temperaturas estudadas.

$S_0$ ( $\text{m}^2.\text{g sólido}^{-1}$ )	PTS Tipo I	PTS Tipo IV
$S_0$ (10°C)	260	188
$S_0$ (20°C)	225	194
$S_0$ (30°C)	192	163
$S_0$ (40°C)	163	155

Como pode ser observado, os valores obtidos mostraram-se bastante elevados – fato característico de produtos contendo açúcares e proteínas (compostos de cadeia mais longa) – encontrando-se, praticamente, dentro da faixa comum para produtos alimentícios (100 a 250  $\text{m}^2.\text{g sólido}^{-1}$ ) (LABUZA, 1968).

## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS – SECAGEM

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados referentes aos experimentos de secagem realizados, conforme comentado na seção 4.1, para três diferentes tipos de PTS (PTS Tipo I, Tipo II e Tipo III) de mesma composição, mas formato e tamanho diferenciados.

A Tabela 6.1 apresenta os dados médios obtidos para a umidade de equilíbrio ( $X_{eq}$ ) e o diâmetro equivalente ( $D_{eq}$ ) de cada um dos tipos de PTS utilizados na presente análise. A primeira variável foi determinada durante a realização dos experimentos de secagem, quando a massa da amostra tornava-se independente do tempo, e a segunda variável, a partir do método apresentado na seção 4.2.1. Os dados utilizados para a determinação do diâmetro equivalente médio de cada PTS são apresentados no Apêndice A.

**Tabela 6.1:** Umidade de equilíbrio e diâmetro equivalente obtidos para cada tipo de PTS.

	PTS		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III
$X_{eq}$ (kg água.kg ss <sup>-1</sup> )	0,0040	0,0036	0,0084
$D_{eq}$ (mm)	3,15	1,98	15,26

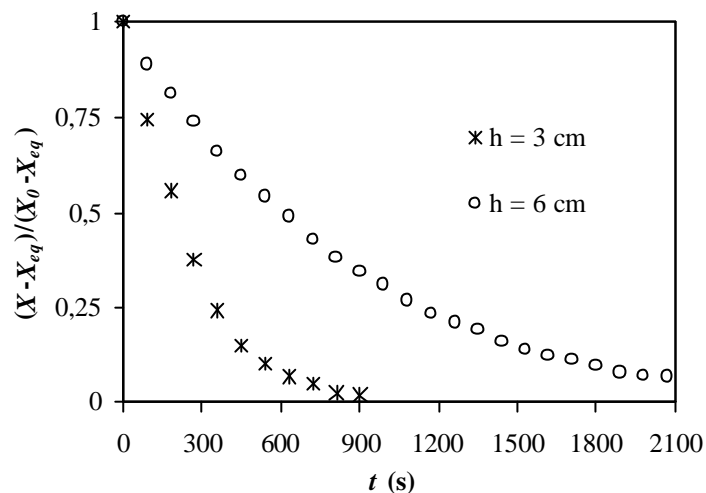
A seguir, será apresentada, separadamente, a discussão dos resultados obtidos para cada tipo de PTS estudado e, na sequência, será apresentada uma comparação entre os resultados individuais discutidos anteriormente.

#### 6.1 PTS TIPO I

As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 apresentam algumas das curvas de secagem obtidas para a PTS Tipo I, nas quais a influência da variação de cada parâmetro testado – altura da camada

de produto ( $h$ ), temperatura ( $T$ ) e velocidade ( $v$ ) do ar de secagem – no decaimento da umidade adimensional é avaliada, separadamente, em cada figura. Os dados experimentais obtidos na determinação das curvas de secagem deste tipo de PTS são apresentados no Apêndice E.

A Figura 6.1 apresenta a curva de umidade adimensional com a influência da altura de camada de produto, para a PTS Tipo I, em função do tempo, para as condições constantes de temperatura e velocidade do ar de secagem de  $90^{\circ}\text{C}$  e  $100\text{ cm.s}^{-1}$ , respectivamente. A análise desta figura revela que, quanto maior a altura de camada de produto, mais lentamente se dá o processo de secagem da PTS Tipo I. Quando este se dá com uma altura de camada de produto de 3 cm (para estas condições de temperatura e velocidade do ar de secagem) leva-se em torno de 350 segundos para que se atinja uma umidade adimensional em torno de 0,25, contra, aproximadamente, 1175 segundos para uma altura de camada de 6 cm.

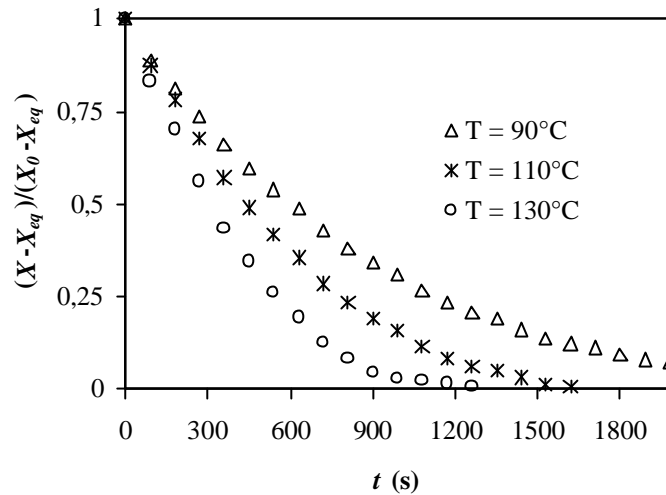


**Figura 6.1:** Influência da altura de camada de produto na curva de secagem da PTS Tipo I ( $T=90^{\circ}\text{C}$  e  $v=100\text{ cm.s}^{-1}$ ).

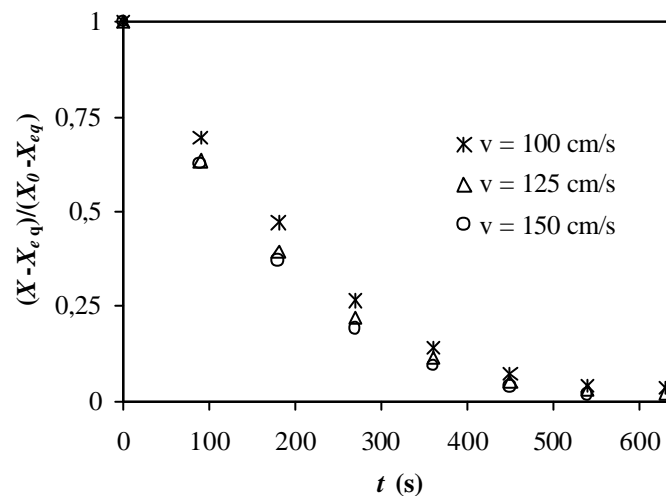
A Figura 6.2 apresenta a influência da temperatura do ar de secagem na diminuição da umidade adimensional para a PTS Tipo I para as condições constantes de altura de camada e velocidade do ar de secagem de 6 cm e  $100\text{ cm.s}^{-1}$ , respectivamente. Observa-se que a influência da temperatura do ar de secagem no processo de secagem também é considerável: quanto mais elevada a temperatura, mais rapidamente se dará o processo de secagem. Neste caso, para que se atinja uma umidade adimensional em torno de 0,25 (para as condições de altura de camada e velocidade do ar de secagem expostos nesta figura), percebe-se que o tempo de secagem aumenta de aproximadamente 550 s para 775 s e 1140 s quando se diminui a temperatura de operação de  $130^{\circ}\text{C}$  para  $110^{\circ}\text{C}$  e  $90^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

A Figura 6.3 apresenta a influência da velocidade do ar de secagem na diminuição da umidade adimensional para a PTS Tipo I para as condições constantes de altura de camada e temperatura do ar de secagem de 3 cm e  $110^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. A partir desta figura, pode-

se observar que a influência deste parâmetro nas curvas de secagem é bem menos pronunciado, ou seja, o tempo de processo para que se atinja uma umidade adimensional de aproximadamente 0,25 pouco se altera com o aumento da velocidade do ar de secagem (280 s para uma velocidade de  $100 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 250 s para  $125 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  e 235 s para  $150 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



**Figura 6.2:** Influência da temperatura do ar de secagem na curva de secagem da PTS Tipo I ( $h=6 \text{ cm}$  e  $v=100 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



**Figura 6.3:** Influência da velocidade do ar de secagem na curva de secagem da PTS Tipo I ( $h=3 \text{ cm}$  e  $T=110^\circ\text{C}$ ).

De uma maneira geral, através da análise destas três figuras, observa-se claramente a forte influência da altura de camada de produto e da temperatura do ar de secagem na diminuição da umidade adimensional da PTS Tipo I com o tempo. Por outro lado, a influência da velocidade é visivelmente menor. Esta característica é uma das conclusões deste trabalho e será discutida, com maiores detalhes, mais adiante.

### 6.1.1 AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS AO MODELO EXPONENCIAL

A partir da obtenção experimental das curvas de secagem deste tipo de PTS, testou-se o ajuste dos dados de umidade adimensional versus o tempo ao modelo exponencial exposto na equação 4.4. Para este ajuste, foram consideradas as três melhores curvas obtidas para cada combinação de parâmetros (altura de camada, temperatura e velocidade do ar de secagem).

A Tabela 6.2 apresenta os resultados dos ajustes destas curvas de secagem ao modelo exponencial. Nesta tabela, podem ser observados os valores obtidos para as constantes  $C_1$  e  $C_2$  e o coeficiente de correlação para cada conjunto de parâmetros, onde  $T$  (°C) e  $v$  (cm.s<sup>-1</sup>) são, respectivamente, a temperatura e a velocidade do ar de secagem e  $h$  (cm) é a altura de camada de produto.

**Tabela 6.2:** Resultado do ajuste dos dados experimentais obtidos para a PTS Tipo I ao modelo exponencial.

$T$ (°C)	Parâmetros		Constantes		$R^2$
	$v$ (cm.s <sup>-1</sup> )	$h$ (cm)	$C_1$	$C_2$	
90	100	3	1,029	0,00391	0,997
90	125	3	1,014	0,00342	0,999
90	150	3	1,000	0,00431	> 0,999
110	100	3	1,030	0,00495	0,995
110	125	3	1,016	0,00562	0,998
110	150	3	1,018	0,00599	0,997
130	100	3	1,037	0,00553	0,988
130	125	3	1,023	0,00690	0,994
130	150	3	1,013	0,00772	0,998
90	100	6	1,047	0,00133	0,997
90	125	6	1,032	0,00125	0,998
90	150	6	1,036	0,00193	0,997
110	100	6	1,049	0,00183	0,994
110	125	6	1,019	0,00214	0,996
110	150	6	1,040	0,00229	0,994
130	100	6	1,052	0,00265	0,994
130	125	6	1,037	0,00272	0,996
130	150	6	1,031	0,00254	0,997

Como pode ser visto nesta tabela, os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) obtidos para todos os conjuntos de parâmetros foram muito próximos da unidade, indicando um bom ajuste dos dados experimentais ao modelo proposto.

Os valores obtidos para a constante  $C_1$  mostraram-se pouco variáveis e muito próximos de 1,0. Comparando-se estes valores com uma coluna unitária foi gerado um erro médio relativo de apenas 2,92%, ou seja, a constante  $C_1$  pode ser considerada independente dos parâmetros testados e será tomada igual à unidade.

Já os valores obtidos para a constante  $C_2$  variaram significativamente em função dos parâmetros de processo utilizados em cada experimento. Assim, decidiu-se pela realização de uma análise estatística, a fim de verificar a influência da altura de camada de produto, da temperatura e da velocidade do ar de secagem na obtenção da constante  $C_2$ .

### 6.1.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA (ANOVA)

O resultado da análise estatística que avaliou a significância dos parâmetros de altura da camada de produto, temperatura e velocidade do ar de secagem na obtenção da constante  $C_2$ , através do ajuste dos dados experimentais ao modelo exponencial, pode ser observado na Tabela 6.3. Esta apresenta os valores de F calculados (F calc) e tabelados (F tab) obtidos a um nível de 95% de confiança.

**Tabela 6.3:** Valores de F (calculados e tabelados) para a PTS Tipo I.

<b>Fator</b>	<b>F calc</b>	<b>F tab</b>	<b>Significativo</b>
<i>T</i>	141,5	3,3	Sim
<i>v</i>	19,3	3,3	Sim
<i>h</i>	1074,9	4,1	Sim
<i>T + v</i>	5,6	3,3	Sim
<i>T + h</i>	24,5	3,3	Sim
<i>v + h</i>	6,3	3,3	Sim
<i>T + v + h</i>	7,6	3,3	Sim

A partir desta tabela, pode-se observar que o parâmetro mais influente na determinação da constante  $C_2$  do modelo exponencial é a altura de camada, pois esta apresentou uma diferença muito maior entre os valores de F calculado e tabelado do que os outros parâmetros. Além disso, os efeitos de interação que envolviam a altura de camada foram os que se mostraram mais significativos.

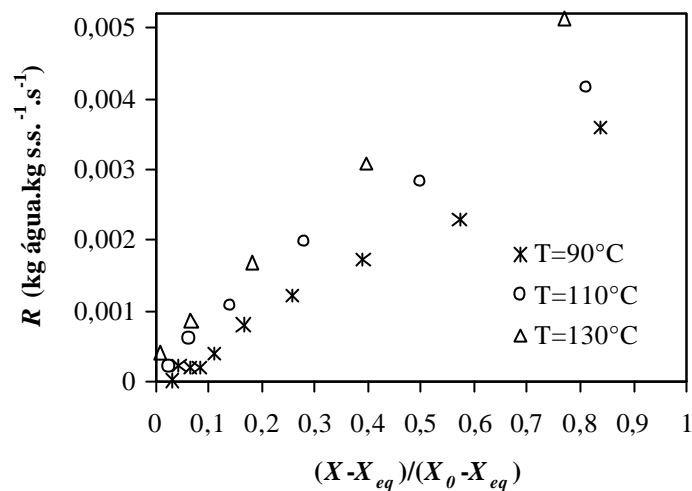
A temperatura do ar de secagem também apresentou uma diferença considerável entre os valores de F calculado e tabelado. Já a velocidade do ar de secagem e os demais parâmetros de interação, apesar de apresentarem pequenos deltas de F, também se mostraram estatisticamente significativos, ou seja, não podem ser desprezados na obtenção de um modelo matemático para a determinação da constante  $C_2$  em função dos parâmetros.

Este resultado vem ao encontro das curvas de secagem obtidas para este produto e comentadas anteriormente, indicando que, nesta faixa de operação, a secagem da PTS Tipo I não sofre tanta influência de fatores externos como a velocidade do ar de secagem, por exemplo. Isso pode indicar que o processo de secagem deste tipo de PTS se dá, basicamente, na etapa de taxa decrescente e que seu fator limitante talvez seja a difusão interna de umidade e não a evaporação desta na superfície.

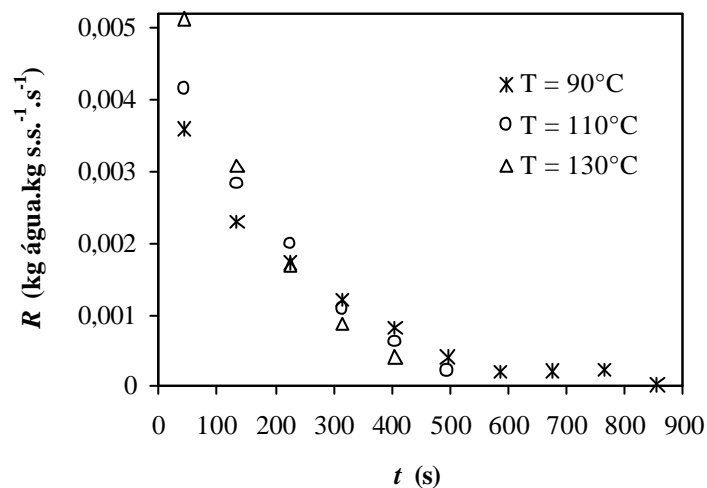
A fim de comprovar a hipótese discutida no parágrafo anterior, determinou-se a taxa de secagem ( $R$ , em  $\text{kg água.kg ss}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) para cada uma das condições testadas. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

### 6.1.3 TAXA DE SECAGEM DA PTS TIPO I

As Figuras 6.4 e 6.5 apresentam a influência do ar de secagem na taxa de secagem versus o teor de umidade adimensional e o tempo, respectivamente, para a altura de camada de 3 cm e velocidade do ar de secagem de  $150 \text{ cm.s}^{-1}$ .



**Figura 6.4:** Influência da temperatura do ar de secagem na taxa de secagem da PTS Tipo I versus a umidade adimensional ( $h=3 \text{ cm}$  e  $v=150 \text{ cm.s}^{-1}$ ).



**Figura 6.5:** Influência da temperatura do ar de secagem na taxa de secagem da PTS Tipo I versus o tempo ( $h=3 \text{ cm}$  e  $v=150 \text{ cm.s}^{-1}$ ).

Conforme o esperado, as curvas obtidas para a taxa de secagem mostraram-se tão dependentes dos parâmetros estudados quanto às curvas de secagem. Além disso, em todos os casos, estas se apresentaram muito semelhantes e confirmaram a hipótese da inexistência da

etapa de taxa constante. Ou seja, nas condições testadas, a secagem da PTS Tipo I se deu exclusivamente na etapa de taxa decrescente, sendo limitada pela difusão interna de umidade e sofrendo mais influência de fatores internos e da temperatura.

Como comentado anteriormente, na seção 3.2, ROMERO (1988) obteve resultados semelhantes em relação à inexistência do período de taxa de secagem constante para dois tipos diferentes de PTS.

A constatação da inexistência do período de taxa constante de secagem explica, também, o valor unitário obtido para a constante  $C_1$  do modelo exponencial. Uma vez que desde o início do processo de secagem (em  $t=0$ ) o modelo exponencial já pode ser utilizado – pois o processo se inicia já na etapa de taxa decrescente de secagem (ou seja,  $X_0$  é menor que  $X_C$ ) – e, neste início,  $X$  é igual a  $X_0$ , o valor obtido para a constante  $C_1$ , através do ajuste dos dados experimentais ao modelo exponencial, só pode ser um, o que concorda com os resultados obtidos anteriormente.

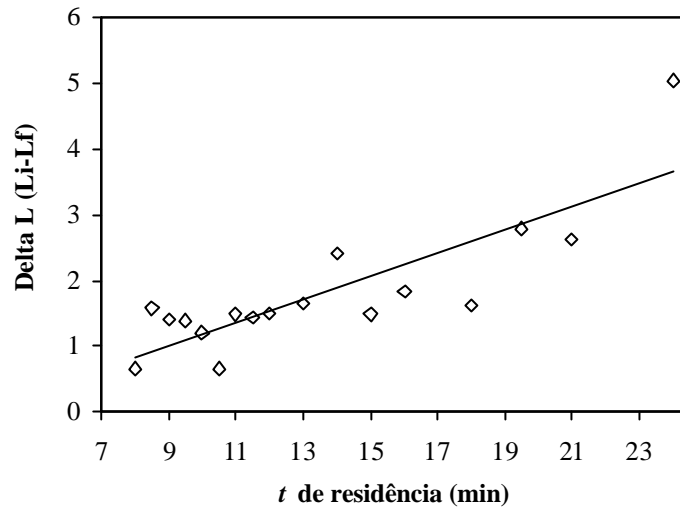
Pelos resultados apresentados até o momento, percebe-se que a temperatura a ser utilizada, para a otimização do processo, deveria ser a mais alta possível. Entretanto, deve-se ter muita cautela na alteração deste parâmetro, pois se este for elevado indiscriminadamente, alguma alteração poderá ser causada no produto final. A temperatura elevada pode causar a queima do produto e, conseqüentemente, alterações na sua textura e na sua coloração. A fim de avaliar a viabilidade da utilização da temperatura mais elevada utilizada neste estudo (130°C) na secagem da PTS Tipo I, testou-se a influência desta na coloração final da PTS Tipo I. Os resultados obtidos são comentados a seguir.

#### ***6.1.4 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM NA COLORAÇÃO FINAL DA PTS TIPO I***

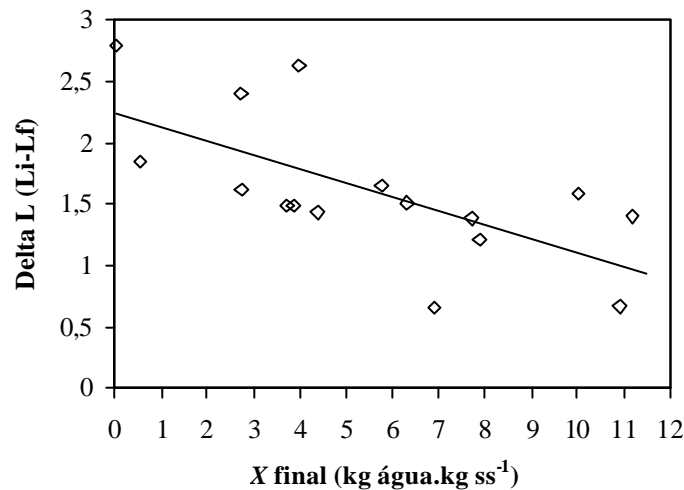
Para a avaliação da influência da temperatura do ar de secagem de 130°C na coloração final da PTS Tipo I foram realizados diversos experimentos com o ar de secagem nesta temperatura (altura de camada de 6 cm e velocidade do ar de secagem de 100 cm.s<sup>-1</sup>) para diferentes tempos de residência no secador. Ao final de cada experimento, determinava-se a umidade final do produto e os parâmetros de cor (L, a e b) eram determinados antes e após a secagem, segundo procedimento descrito na seção 4.2.2. Quanto maior era o valor de L, mais clara encontrava-se a amostra.

Nas Figuras 6.6 e 6.7 encontram-se os valores de Delta L (L antes da secagem menos L após a secagem) em função do tempo de residência no secador (em minutos) e em função da umidade final da amostra ( $X$  final), respectivamente. Nestas figuras, a linha contínua existe apenas para indicar a tendência da curva formada pelos pontos obtidos.





**Figura 6.6:** Valores de delta L (PTS Tipo I) versus o tempo de residência ( $T=130^{\circ}\text{C}$ ,  $h=6\text{ cm}$  e  $v=100\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



**Figura 6.7:** Valores de delta L (PTS Tipo I) versus a umidade final da amostra ( $T=130^{\circ}\text{C}$ ,  $h=6\text{ cm}$  e  $v=100\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

A análise destas figuras revela que os valores de delta L apresentaram uma tendência crescente com o decorrer do tempo de secagem, bem como com a diminuição da umidade final. Entretanto, o valor de delta L só foi realmente significativo para tempos de residência muito longos ou para umidades finais muito pequenas. Ou seja, a temperatura de  $130^{\circ}\text{C}$  só alterou significativamente a coloração final do produto quando a secagem estendeu-se até que a umidade de equilíbrio do produto fosse atingida.

Desta forma, pelos resultados obtidos, e uma vez que o processo de secagem se dá até valores de umidade acima de 6,5% (b.u.), pode-se recomendar a utilização da temperatura do ar de secagem de  $130^{\circ}\text{C}$  a fim de otimizar o processo de secagem, sem conseqüências indesejáveis à coloração final do produto.

Estudou-se a influência da temperatura do ar de secagem apenas na coloração final do produto e não em outros fatores tais como a solubilidade das proteínas presentes, pois durante a etapa de extrusão, que precede a etapa de secagem, já ocorre a insolubilização de grande parte das proteínas presentes no produto (o processo de extrusão diminui de 75% para 10% a porção de proteína solúvel).

### 6.1.5 AJUSTE DOS DADOS DA CONSTANTE $C_2$ AO MODELO ESTATÍSTICO

Uma vez determinado, pela análise estatística, a importância de todos os parâmetros estudados (bem como seus efeitos de interação) na determinação da constante  $C_2$  do modelo exponencial, estudou-se um modelo estatístico que ajustasse estes dados em função dos efeitos que se mostraram significativos. No presente trabalho, optou-se por um modelo estatístico de dez constantes (apresentado pela equação 4.5) para determinar uma nova constante  $C_2$ , denominada de  $C_2^*$ , em função dos parâmetros do processo.

O ajuste a este modelo foi feito a partir dos dados de  $T$ ,  $v$ ,  $h$  e  $C_2$  apresentados na Tabela 6.2 e o coeficiente de correlação obtido foi de 0,996. Os valores das constantes obtidas através deste ajuste podem ser observados na Tabela 6.4.

**Tabela 6.4:** Constantes obtidas através do ajuste dos dados da Tabela 6.2 ao modelo estatístico proposto.

$k_1$	0,0186119
$k_2$	-0,0000878
$k_3$	-0,0002233
$k_4$	-0,0045315
$k_5$	-0,0000003
$k_6$	0,0000001
$k_7$	0,0000021
$k_8$	0,0000379
$k_9$	0,0000400
$k_{10}$	-0,0000004

Além do bom coeficiente de correlação obtido, confirma-se a boa qualidade do ajuste através do erro médio relativo estimado entre os valores de  $C_2$  (determinados pelo ajuste ao modelo exponencial e função da unidade adimensional e do tempo de secagem) e  $C_2^*$  (determinados pelo modelo estatístico e função dos parâmetros do processo) que foi de 5,03, muito abaixo do limite de 10%.

Assim, através da união dos dois modelos testados obtém-se a seguinte equação:

$$\left( \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right) = \exp \left( - \left( \begin{array}{l} k_1 + k_2 T + k_3 v + k_4 h + k_5 T^2 + k_6 v^2 \\ + k_7 T v + k_8 T h + k_9 v h + k_{10} T v h \end{array} \right) t \right) \quad (6.1)$$

onde o teor de umidade da PTS ( $X$ , em kg água.kg ss<sup>-1</sup>) aparece como função de sua umidade inicial ( $X_0$ , em kg água.kg ss<sup>-1</sup>) e de equilíbrio ( $X_{eq}$ , em kg água.kg ss<sup>-1</sup>), dos parâmetros de processo (temperatura do ar de secagem,  $T$ , em °C, velocidade do ar de secagem,  $v$ , em cm.s<sup>-1</sup>, e altura da camada de produto,  $h$ , em cm) e do tempo de secagem ( $t$ , em s).

A boa qualidade apresentada por cada um dos modelos propostos indica que estes se ajustaram muito bem aos dados experimentais. Entretanto, com os resultados apresentados até o momento não é possível afirmar que o modelo unificado (equação 6.1) seja capaz de prever, coerentemente, as curvas obtidas experimentalmente. Assim, estas curvas foram simuladas por este modelo utilizando-se os mesmos conjuntos de parâmetros de processo testados experimentalmente e os valores preditos de teor de umidade em função do tempo foram comparados à média dos valores obtidos experimentalmente. O erro médio relativo gerado nesta comparação, para cada conjunto de parâmetros, encontra-se na Tabela 6.5.

**Tabela 6.5:** Valores de *EMR* gerados na comparação dos teores de umidade da PTS Tipo I obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo.

Parâmetros			<i>EMR</i> (%)	
$T$ (°C)	$v$ (cm.s <sup>-1</sup> )	$h$ (cm)	$X_0 < X < X_{eq}$	$X_0 < X < 0,06$
90	100	3	19,39	3,79
90	125	3	16,20	5,83
90	150	3	6,62	3,03
110	100	3	19,86	4,56
110	125	3	24,39	4,69
110	150	3	24,18	2,57
130	100	3	135,52	4,88
130	125	3	115,02	7,31
130	150	3	371,20	3,53
90	100	6	13,91	2,49
90	125	6	17,28	9,13
90	150	6	30,58	2,07
110	100	6	28,28	7,98
110	125	6	126,61	2,41
110	150	6	37,27	4,86
130	100	6	278,25	3,89
130	125	6	14,08	2,60
130	150	6	10,37	5,31
			<b>Média</b>	4,50
			<b>Máximo</b>	9,13
			<b>Mínimo</b>	2,07

Nesta tabela, a primeira coluna de *EMR* apresenta o erro obtido na comparação entre os valores experimentais e os valores preditos para a totalidade da curva, ou seja, de  $X_0$  até  $X_{eq}$ . A segunda coluna, por sua vez, apresenta os valores de *EMR* obtidos através da comparação destes valores para uma parte da curva, ou seja, de  $X_0$  até  $X=0,06$  kg água.kg ss<sup>-1</sup>.

Optou-se por este teor de umidade, porque no processo industrial não há necessidade de secar a PTS até valores inferiores a este (geralmente trabalha-se com metas em torno de 0,07 kg água.kg ss<sup>-1</sup>), uma vez que o Ministério da Saúde (através da Resolução CNNPA nº 14, de 28 de junho de 1978) exige um teor de umidade inferior a 8% (base seca) para a comercialização deste produto.

Pela análise da quarta coluna desta tabela, percebe-se a obtenção de valores bastante elevados de *EMR*, ou seja, o modelo proposto não foi capaz de prever coerentemente toda a curva de secagem do produto. Entretanto, pela análise da quinta coluna, percebe-se que, para teores de umidade acima de 6% b.s., todos os conjuntos de parâmetros apresentaram valores de *EMR* inferiores ao limite de 10%. Isso indica que ocorrem erros de predição do modelo em valores muito baixos de umidade (próximos ao teor de umidade de equilíbrio deste tipo de PTS), mas na faixa de umidade de interesse industrial, o modelo proposto apresentou ótimos resultados.

Conclui-se, então, que o modelo proposto pode ser considerado representativo das curvas de secagem deste tipo de PTS, na faixa de umidade superior a 6% b.s., quando forem utilizados parâmetros de processo dentro dos intervalos compreendidos neste estudo; podendo ser utilizado industrialmente para prever a umidade final da PTS Tipo I sob determinadas condições de processo, ou, ainda, estimar o tempo necessário para se atingir determinada umidade. Para tanto, pode-se utilizar a seguinte equação:

$$X = X_{eq} + (X_0 - X_{eq}) \exp(-Ct) \quad (6.2)$$

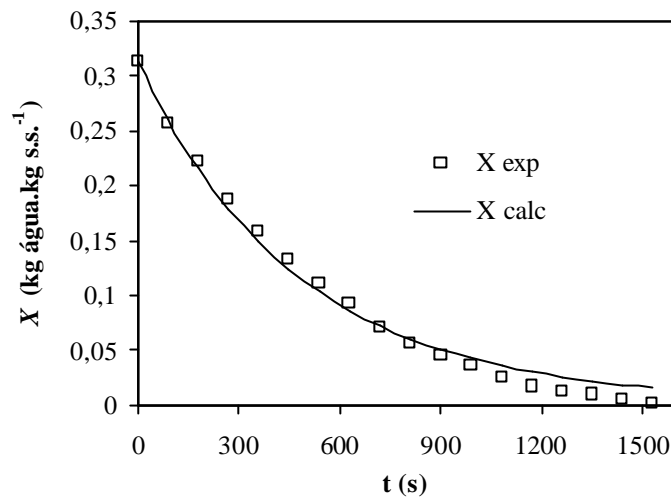
onde *C* é determinado pela equação 4.5, em função dos parâmetros do processo (temperatura do ar de secagem, *T*, em °C, velocidade do ar de secagem, *v*, em cm.s<sup>-1</sup>, e altura da camada de produto, *h*, em cm) e das constantes apresentadas na Tabela 6.4.

A Figura 6.8 apresenta o exemplo do ajuste de uma das curvas obtidas experimentalmente (experimento 179, realizado dia 21 de agosto de 2003) ao modelo proposto. Nesta figura, os pontos (*X* exp) são os dados de umidade versus o tempo de secagem experimentais e a linha cheia (*X* calc) representa a predição do modelo. Os parâmetros de secagem utilizados neste experimento foram: temperatura e velocidade do ar de secagem de 110°C e 125 cm.s<sup>-1</sup>, respectivamente, e altura de camada de produto de 6 cm.

A proximidade entre as curvas desta figura mostra o bom ajuste do modelo para a faixa de umidade de interesse, bem como o maior erro existente entre os dados experimentais e a predição do modelo para valores muito baixos de umidade.

SHIVHARE *et al* (1991) apud SOGI *et al* observaram que o modelo exponencial não prediz, adequadamente, o comportamento de secagem de alguns produtos alimentícios, subestimando a curva de secagem em seu início e superestimando a mesma nos estágios finais. Os resultados obtidos até aqui indicam que, apesar de ocorrer este erro de estimação

relatado pelo autor (como pode ser observado na Figura 6.8) este é pouco significativo, não comprometendo a qualidade do ajuste na faixa de umidade de interesse.



**Figura 6.8:** Ajuste dos dados experimentais ao modelo proposto para um experimento realizado com a PTS Tipo I ( $T=110^{\circ}\text{C}$ ,  $v=125\text{ cm.s}^{-1}$  e  $h=6\text{ cm}$ ).

A diferença entre os dados experimentais e preditos pelo modelo em valores muito baixos de umidade, visualizada na Figura 6.8, indica que pode estar ocorrendo uma mudança no mecanismo de secagem a partir de determinado valor de umidade e a determinação de um novo modelo para este período poderia ser realizada. Entretanto, como este período encontra-se fora da faixa de interesse abrangida neste estudo, a determinação de um modelo exclusivo para esta faixa de umidade não será realizada.

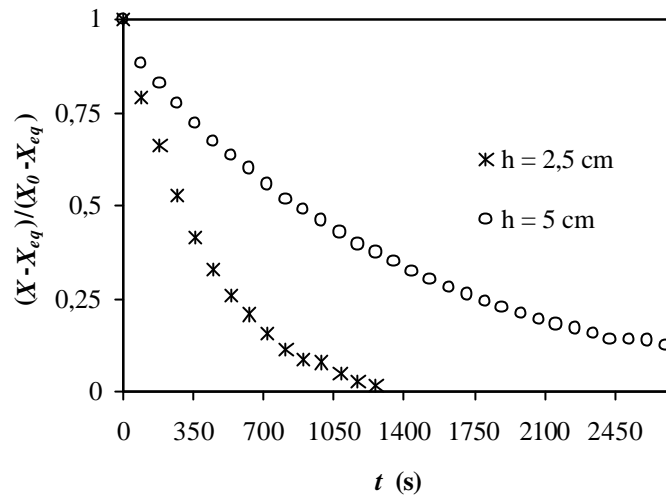
Uma vez constatada a validade do modelo proposto para a predição das curvas de secagem da PTS Tipo I na faixa de umidade entre  $X_0$  e  $X=0,06\text{ kg água.kg ss}^{-1}$ , optou-se pela realização de um novo ajuste, desta vez apenas com os dados de umidade adimensional em função do tempo compreendidos dentro da faixa de umidade citada acima. Este procedimento visa a obtenção de novas constantes e de um modelo de qualidade ainda mais refinada. O resultado deste novo ajuste encontra-se descrito a seguir, na seção 6.4.

## 6.2 PTS TIPO II

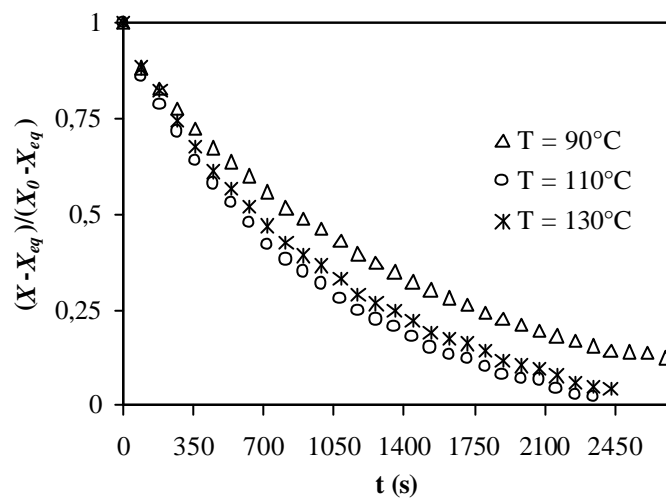
As Figuras 6.9 a 6.11 apresentam as curvas de secagem com a umidade adimensional plotada versus o tempo para a PTS Tipo II. Na Figura 6.9, tem-se a influência da altura de camada de produto para as condições constantes de temperatura e velocidade do ar de secagem de  $90^{\circ}\text{C}$  e  $100\text{ cm.s}^{-1}$ , respectivamente. Na Figura 6.10, tem-se a influência da temperatura do ar de secagem para as condições constantes de altura de camada e velocidade do ar de secagem de  $5\text{ cm}$  e  $100\text{ cm.s}^{-1}$ , respectivamente. Na Figura 6.11, tem-se a influência

da velocidade do ar de secagem para as condições constantes de altura de camada e temperatura do ar de secagem de 2,5 cm e 110°C, respectivamente.

Os dados experimentais (umidade adimensional em função do tempo) obtidos na determinação das curvas de secagem deste tipo de PTS são apresentados no Apêndice F.



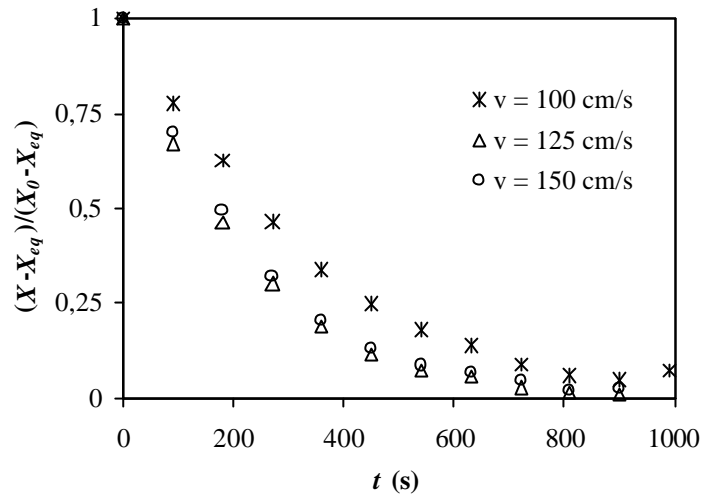
**Figura 6.9:** Influência da altura de camada de produto na curva de secagem da PTS Tipo II ( $T=90^{\circ}\text{C}$  e  $v=100\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



**Figura 6.10:** Influência da temperatura do ar de secagem na curva de secagem da PTS Tipo II ( $h=5\text{ cm}$  e  $v=100\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Conforme pode ser observado pela análise destas figuras, para a PTS Tipo II foram obtidas curvas de secagem de formato semelhante ao das curvas obtidas para a PTS Tipo I. A maior diferença encontrada entre estes dois tipos de PTS relaciona-se à influência dos parâmetros estudados na diminuição da umidade adimensional em função do tempo: enquanto que a variação da altura de camada mostrou-se, novamente, bastante significativa, a temperatura do ar de secagem não alterou tão visivelmente o decaimento da umidade adimensional deste tipo de PTS em função do tempo.

A temperatura do ar de secagem mostrou, portanto, uma influência menor e muito semelhante à influência demonstrada pela velocidade do ar de secagem, ou seja, estes dois parâmetros afetaram a diminuição de umidade da PTS Tipo II, em função do tempo, praticamente da mesma forma.



**Figura 6.11:** Influência da velocidade do ar de secagem na curva de secagem da PTS Tipo II ( $h=2,5$  cm e  $T=110^{\circ}\text{C}$ ).

Além disso, também é possível observar, através da comparação do eixo da abcissa destas figuras com o eixo da abcissa das figuras 6.1, 6.2 e 6.3, que o processo de secagem da PTS Tipo II se dá um pouco mais lentamente do que o processo da PTS Tipo I. Esse tópico será discutido, com maiores detalhes, mais adiante.

### 6.2.1 AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS AO MODELO EXPONENCIAL

A partir da obtenção dos dados experimentais, fez-se – semelhantemente ao procedimento adotado anteriormente – o ajuste destes ao modelo exponencial (equação 4.4).

Neste caso, entretanto, foram consideradas apenas as duas melhores curvas obtidas para cada combinação de parâmetros. Este procedimento foi necessário pois a PTS Tipo I é a PTS mais comum, de maior produção, sendo possível uma maior quantidade de experimentos. Já as produções das PTS dos tipos II e III se davam em menor escala, inviabilizando a realização de um grande número de testes.

A Tabela 6.6 apresenta os resultados dos ajustes das curvas de secagem experimentais obtidas para a PTS Tipo II ao modelo exponencial. Nesta tabela, podem ser observados os valores obtidos para as constantes  $C_1$  e  $C_2$  e o coeficiente de correlação para cada conjunto de parâmetros.

**Tabela 6.6:** Resultado do ajuste dos dados experimentais obtidos para a PTS Tipo II ao modelo exponencial.

$T$ (°C)	Parâmetros		Constantes		$R^2$
	$\nu$ (cm.s <sup>-1</sup> )	$h$ (cm)	$C_1$	$C_2$	
90	100	2,5	1,012	0,00254	0,999
90	125	2,5	0,994	0,00352	0,999
90	150	2,5	0,978	0,00364	0,998
110	100	2,5	1,023	0,00309	0,998
110	125	2,5	1,008	0,00459	0,999
110	150	2,5	1,014	0,00430	0,999
130	100	2,5	1,024	0,00451	0,997
130	125	2,5	1,030	0,00492	0,997
130	150	2,5	1,017	0,00545	0,998
90	100	5	0,992	0,00081	0,998
90	125	5	0,999	0,00131	0,998
90	150	5	1,021	0,00127	0,998
110	100	5	0,989	0,00120	0,998
110	125	5	1,012	0,00140	0,998
110	150	5	1,001	0,00130	0,998
130	100	5	0,998	0,00107	0,999
130	125	5	1,044	0,00162	0,995
130	150	5	1,023	0,00216	0,996

Assim como para a PTS Tipo I, os coeficientes de correlação obtidos para todos os conjuntos de parâmetros foram muito próximos da unidade, indicando um bom ajuste dos dados experimentais obtidos para a PTS Tipo II ao modelo proposto.

Além disso, os valores obtidos para a constante  $C_1$  novamente se mostraram pouco variáveis e muito próximos da unidade. O *EMR* gerado quando da comparação destes valores com uma coluna unitária foi ainda menor que o obtido anteriormente: 1,56%. Assim,  $C_1$  foi considerada, também para a PTS Tipo II, como independente dos parâmetros testados e constante e igual à unidade.

Os valores obtidos para a constante  $C_2$  também demonstraram comportamento semelhante, ou seja, variaram significativamente em função dos parâmetros de processo utilizados em cada experimento. Assim, optou-se, novamente, pela realização de uma análise estatística para verificar a influência dos parâmetros estudados na obtenção da constante  $C_2$  do modelo exponencial.

A Tabela 6.7 apresenta o resultado do Teste F – valores de F tabelado (F tab) e calculado (F calc) – realizado ao final da análise estatística (a um nível de 95% de confiança) que avaliou a influência da altura de camada de produto, da temperatura e da velocidade do ar de secagem (bem como os efeitos de interação destes parâmetros) na obtenção da constante  $C_2$  do modelo exponencial.



**Tabela 6.7:** Valores de F calculado e tabelado obtidos para a PTS Tipo II.

<b>Fator</b>	<b>F calc</b>	<b>F tab</b>	<b>Significativo</b>
<i>T</i>	51,3	3,6	Sim
<i>V</i>	31,3	3,6	Sim
<i>H</i>	929,1	4,4	Sim
<i>T + v</i>	4,4	3,6	Sim
<i>T + h</i>	15,4	3,6	Sim
<i>v + h</i>	4,5	3,6	Sim
<i>T + v + h</i>	4,5	3,6	Sim

Esta tabela confirma o que já havia sido observado a partir das curvas de secagem obtidas para este tipo de PTS: a altura de camada de produto foi, mais uma vez, o parâmetro mais significativo para a obtenção da constante  $C_2$  do modelo exponencial (este apresentou o maior delta entre os valores de F calculado e tabelado).

A temperatura do ar de secagem apresentou novamente uma influência elevada, embora um pouco menor do que a apresentada anteriormente, ou seja, seu valor de F calculado foi menor do que o valor obtido para a PTS Tipo I, mas, ainda assim, superior ao valor obtido para o parâmetro velocidade. Este, por sua vez, mostrou-se um pouco mais influente na obtenção da constante  $C_2$  da PTS Tipo II do que da PTS Tipo I, uma vez que seu valor de F calculado foi maior, aproximando-se, até mesmo, do valor de F calculado para o parâmetro temperatura. Entretanto, apesar das diferenças de influência encontradas entre os parâmetros e seus efeitos de interação, todos eles mostraram-se, novamente, estatisticamente significativos para a obtenção da constante  $C_2$  do modelo exponencial e não poderiam ser descartados na determinação de um modelo matemático para a determinação desta em função dos parâmetros.

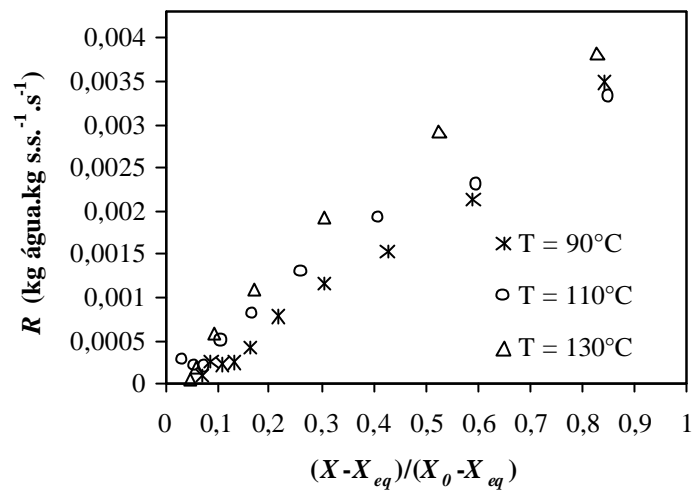
Desta forma, os resultados obtidos para a PTS Tipo II indicam que o processo de secagem desta se dá de modo semelhante ao processo da PTS Tipo I nesta faixa de operação. A secagem da PTS Tipo II também deve ocorrer apenas na fase de taxa decrescente de secagem, uma vez que o processo sofre pouca influência dos parâmetros externos, tais como a velocidade do ar de secagem.

A seguir, serão discutidos os assuntos pertinentes à obtenção da taxa de secagem para a PTS Tipo II.

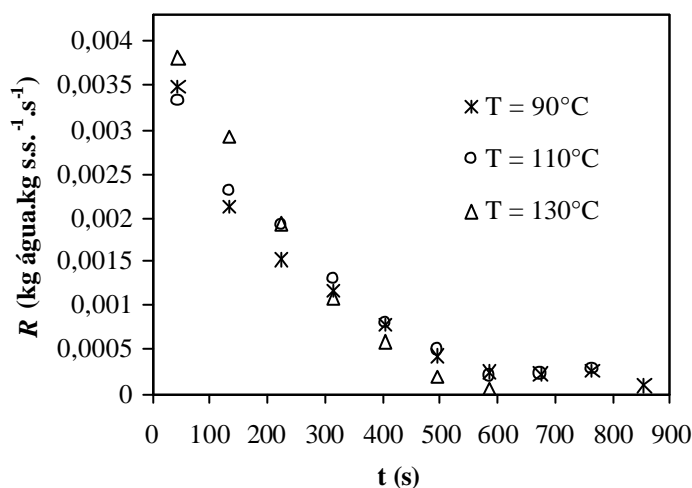
### **6.2.2 TAXA DE SECAGEM DA PTS TIPO II**

Para a comprovação da inexistência da fase de taxa constante de secagem também para este tipo de PTS, determinou-se, novamente, a taxa de secagem ( $R$ , em  $\text{kg água.kg ss}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) para cada uma das condições testadas.

As Figuras 6.12 e 6.13 são dois exemplos das curvas de taxa de secagem obtidas para a PTS Tipo II. Na primeira delas, pode-se visualizar a taxa de secagem versus o teor de umidade adimensional da amostra, enquanto que na segunda, a taxa de secagem é plotada versus o tempo (em s). Ambas as figuras comparam as três temperaturas testadas quando da utilização de uma velocidade do ar de secagem de  $150 \text{ cm.s}^{-1}$  e de uma altura de camada de produto de 2,5 cm.



**Figura 6.12:** Influência da temperatura do ar de secagem na taxa de secagem da PTS Tipo II versus a umidade adimensional ( $h=2,5 \text{ cm}$  e  $v=150 \text{ cm.s}^{-1}$ ).



**Figura 6.13:** Influência da temperatura do ar de secagem na taxa de secagem da PTS Tipo II versus o tempo ( $h=2,5 \text{ cm}$  e  $v=150 \text{ cm.s}^{-1}$ ).

Por estas figuras, mais uma vez, torna-se clara a menor influência da temperatura do ar de secagem no processamento da PTS Tipo II. As curvas da Figura 6.12 praticamente se sobrepõem, indicando uma taxa de secagem muito semelhante, principalmente nas temperaturas de 90 e 110°C; apenas a temperatura de 130°C provoca uma taxa de secagem um pouco mais elevada.

Adicionalmente, as curvas obtidas para a taxa de secagem da PTS Tipo II comprovaram a inexistência do período de taxa constante de secagem nas condições de processo testadas. Isso indica que o processo de secagem da PTS Tipo II também é limitado, principalmente, pela difusão interna de umidade, sofrendo maior influência dos fatores inerentes ao produto.

### 6.2.3 AJUSTE DOS DADOS DA CONSTANTE $C_2$ AO MODELO ESTATÍSTICO

Dando-se prosseguimento ao procedimento padrão adotado para a análise dos dados experimentais obtidos – e uma vez confirmada pela análise estatística a significância dos três parâmetros testados bem como seus efeitos de interação – fez-se o ajuste dos valores obtidos para a constante  $C_2$  do modelo exponencial através de um modelo estatístico (equação 4.5) em função destes parâmetros.

O ajuste a esta equação foi feito a partir dos dados de  $C_2$ ,  $T$ ,  $v$  e  $h$  apresentados na Tabela 6.6 e este gerou um coeficiente de correlação de 0,993. Os valores das constantes obtidas através deste ajuste encontram-se na Tabela 6.8.

**Tabela 6.8:** Constantes obtidas através do ajuste dos dados da Tabela 6.6 ao modelo estatístico proposto.

$K_1$	-0,0161945
$K_2$	0,0000850
$K_3$	0,0001970
$K_4$	0,0029925
$K_5$	0,0000002
$K_6$	-0,0000005
$K_7$	-0,0000005
$K_8$	-0,0000322
$K_9$	-0,0000217
$k_{10}$	0,0000002

Obteve-se, novamente, um ajuste de muito boa qualidade, pois, além do bom coeficiente de correlação gerado, o erro médio relativo estimado entre os valores de  $C_2$  (determinados pelo ajuste ao modelo exponencial e função da umidade adimensional e do tempo de secagem) e  $C_2^*$  (determinados pelo modelo estatístico e função dos parâmetros do processo) foi de 6,96%, abaixo do valor limite de 10%.

Desta forma, a partir dos bons índices obtidos para o ajuste dos dados experimentais da PTS Tipo II aos dois modelos propostos, pode-se, a princípio, utilizar-se a equação 6.1 para prever as curvas de secagem deste produto, na faixa de operação testada.

A Tabela 6.9 apresenta os valores de  $EMR$  gerados quando da comparação dos teores de umidade obtidos das curvas de secagem experimentais com os teores de umidade obtidos

através da simulação destas mesmas curvas com o modelo da equação 6.1 e as constantes presentes na Tabela 6.8. Mais uma vez, estes valores de *EMR* são apresentados para a totalidade da curva ( $X_0 < X < X_{eq}$ ) e para parte dela ( $X_0 < X < 0,06$  kg água.kg ss<sup>-1</sup>).

**Tabela 6.9:** Valores de *EMR* gerados na comparação dos teores de umidade da PTS Tipo II obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo.

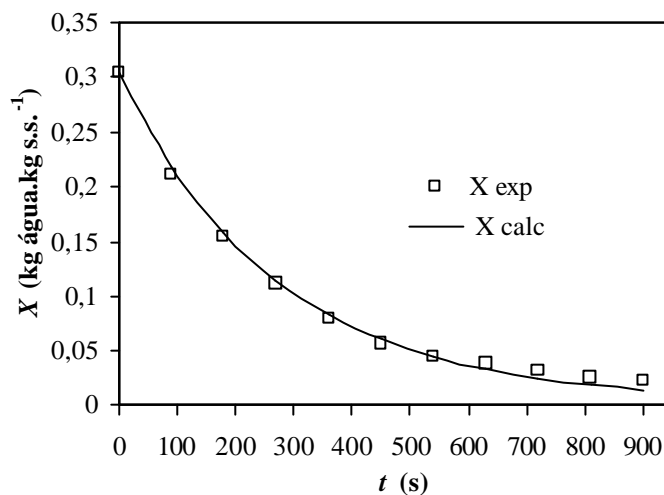
Parâmetros			EMR (%)	
<i>T</i> (°C)	<i>v</i> (cm.s <sup>-1</sup> )	<i>h</i> (cm)	$X_0 < X < X_{eq}$	$X_0 < X < 0,06$
90	100	2,5	11,78	1,78
90	125	2,5	8,38	3,68
90	150	2,5	12,43	1,19
110	100	2,5	8,91	3,81
110	125	2,5	24,84	1,89
110	150	2,5	6,68	2,37
130	100	2,5	17,07	2,96
130	125	2,5	23,28	3,26
130	150	2,5	17,96	3,31
90	100	5	15,65	9,12
90	125	5	4,34	2,66
90	150	5	13,54	1,7
110	100	5	55,33	13,11
110	125	5	9,05	5,15
110	150	5	10,46	7,51
130	100	5	6,27	2,24
130	125	5	20,27	9,61
130	150	5	37,28	2,87
			<b>Média</b>	4,35
			<b>Máximo</b>	13,11
			<b>Mínimo</b>	1,19

Considerando a curva inteira ( $X_0 < X < X_{eq}$ ), é possível observar que o número de curvas que foram preditas adequadamente foi sensivelmente maior. Para a PTS Tipo I, apenas a predição de uma das curvas gerou um *EMR* inferior a 10%; para a PTS Tipo II esse número foi de seis curvas e, além disso, mais quatro conjuntos de parâmetros geraram *EMR* muito próximos a 10%.

Outro ponto importante a ser destacado é que os valores máximos de *EMR* gerados foram bem inferiores aos gerados anteriormente (PTS Tipo I). Entretanto, valores de *EMR* de até 55% foram gerados em alguns casos, desaconselhando a predição da totalidade da curva pelo modelo proposto. Já para a parte da curva entre  $X_0$  e  $X=0,06$  kg água.kg ss<sup>-1</sup> obteve-se valores de *EMR* bastante baixos, cuja média situou-se em 4,35% (apenas um deles ficou acima do limite máximo de 10%) o que deixa claro que o modelo proposto conseguiu prever muito bem as curvas obtidas experimentalmente.

Assim, mais uma vez, conclui-se que o modelo proposto (equações 6.1 e 6.2) pode ser utilizado para a predição das curvas de secagem da PTS Tipo II – nas faixas de altura de camada de produto ( $2,5 \text{ cm} < h < 5 \text{ cm}$ ), temperatura ( $90^\circ\text{C} < T < 130^\circ\text{C}$ ) e velocidade ( $100 \text{ cm.s}^{-1} < v < 150 \text{ cm.s}^{-1}$ ) do ar de secagem utilizadas neste estudo – até uma umidade de aproximadamente 6% b.s., utilizando-se as constantes apresentadas na Tabela 6.8 e a umidade de equilíbrio da PTS Tipo II.

A Figura 6.14 apresenta o ajuste de uma das curvas obtidas experimentalmente ao modelo proposto. Nesta, os pontos ( $X \text{ exp}$ ) são os dados de umidade versus o tempo de secagem obtidos em um dos experimentos realizados (experimento 53, realizado dia 20 de março de 2003) e a linha cheia ( $X \text{ calc}$ ) representa a predição do modelo para a umidade calculada em função do tempo experimental ( $T = 90^\circ\text{C}$ ,  $v = 150 \text{ cm.s}^{-1}$  e  $h = 2,5 \text{ cm}$ ).



**Figura 6.14:** Ajuste dos dados experimentais ao modelo proposto para um experimento realizado com a PTS Tipo II ( $T=90^\circ\text{C}$ ,  $v=150 \text{ cm.s}^{-1}$  e  $h=2,5 \text{ cm}$ ).

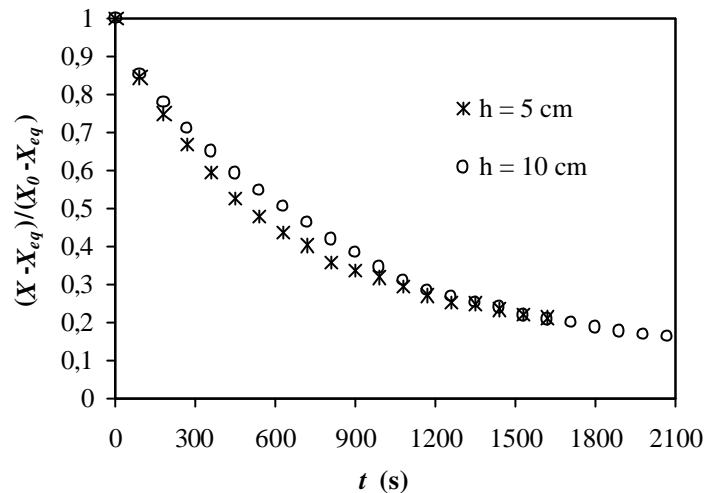
A partir desta figura, percebe-se, novamente, o bom ajuste do modelo obtido para a faixa de umidade de interesse industrial e como esse ajuste piora, um pouco, em valores muito baixos de umidade. Isso indica, mais uma vez, a provável mudança no mecanismo de secagem a baixos teores de umidade. Assim, optou-se novamente pela realização de um novo ajuste aos modelos propostos, desta vez apenas com os dados de umidade adimensional em função do tempo compreendidos dentro da faixa de umidade entre  $X_0$  e  $X=0,06 \text{ kg água.kg ss}^{-1}$ . O resultado deste novo ajuste encontra-se descrito a seguir, na seção 6.4.

### 6.3 PTS TIPO III

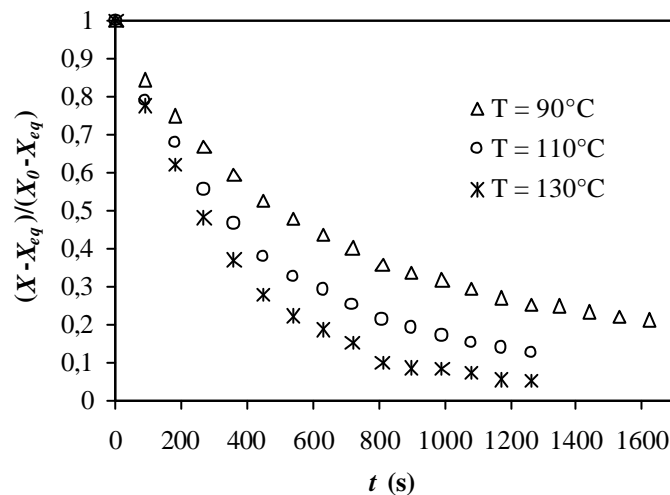
As Figuras 6.15 a 6.17 apresentam as curvas de secagem com a umidade adimensional plotada versus o tempo para a PTS Tipo III. Na Figura 6.15, tem-se a influência da altura de camada de produto para as condições constantes de temperatura e velocidade do ar de

secagem de  $90^{\circ}\text{C}$  e  $100\text{ cm.s}^{-1}$ , respectivamente. Na Figura 6.16, tem-se a influência da temperatura do ar de secagem para as condições constantes de altura de camada e velocidade do ar de secagem de  $5\text{ cm}$  e  $100\text{ cm.s}^{-1}$ , respectivamente. Na Figura 6.17, tem-se a influência da velocidade do ar de secagem para as condições constantes de altura de camada e temperatura do ar de secagem de  $5\text{ cm}$  e  $110^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

Os dados experimentais (umidade adimensional em função do tempo) obtidos na determinação das curvas de secagem deste tipo de PTS são apresentados no Apêndice G.

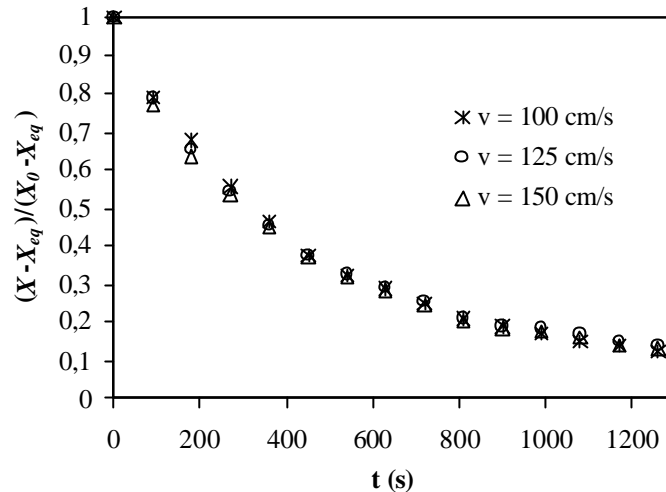


**Figura 6.15:** Influência da altura de camada de produto na curva de secagem da PTS Tipo III ( $T=90^{\circ}\text{C}$  e  $v=100\text{ cm.s}^{-1}$ ).



**Figura 6.16:** Influência da temperatura do ar de secagem na curva de secagem da PTS Tipo III ( $h=5\text{ cm}$  e  $v=100\text{ cm.s}^{-1}$ ).

Conforme pode ser observado pela análise destas figuras, as curvas de secagem obtidas para a PTS Tipo III, apesar do formato semelhante às obtidas para os outros dois tipos, foram as que mais se diferenciaram em relação à influência dos parâmetros estudados na diminuição da umidade adimensional em função do tempo.



**Figura 6.17:** Influência da velocidade do ar de secagem na curva de secagem da PTS Tipo III ( $h=5$  cm e  $T=110^{\circ}\text{C}$ ).

O parâmetro que se mostrou como o mais significativo para as curvas de secagem deste tipo de PTS foi a temperatura do ar de secagem, ao contrário do resultado obtido para os outros dois tipos de PTS que indicavam a altura de camada de produto como parâmetro mais influente na diminuição da umidade em função do tempo. Isso pode ocorrer devido ao grande tamanho apresentado pelas partículas da PTS Tipo III, fazendo com que a diferença de temperatura entre a superfície e o interior da partícula seja mais elevado – e mais relevante – do que no caso dos outros dois tipos de PTS (de menor tamanho de partícula).

Neste caso, a altura de camada de produto praticamente não influenciou a curva de secagem. Isso pode ser causado pelo tamanho das partículas da PTS Tipo III que faz com que os espaços intersticiais do leito sejam consideravelmente maiores do que nos outros dois casos, facilitando a passagem do ar de secagem através do leito de produto, independente da altura deste.

A velocidade do ar de secagem, por sua vez, mostrou exercer pouca influência nas curvas de secagem da PTS Tipo III. Isso indica que, apesar do maior tamanho de partícula desta amostra, a secagem possa ser, mais uma vez, limitada pela difusão interna de umidade e não pela evaporação desta a partir da superfície.

Uma vez obtidas as curvas de secagem, partiu-se, novamente, para a tentativa de ajuste destes dados experimentais ao modelo exponencial proposto. A seguir, será discutido o resultado obtido para este ajuste.

### 6.3.1 AJUSTE DOS DADOS EXPERIMENTAIS AO MODELO EXPONENCIAL

Para o ajuste dos dados experimentais obtidos para a PTS Tipo III ao modelo exponencial (equação 4.4), foram consideradas, novamente, as duas melhores curvas obtidas para cada combinação de parâmetros.

Os resultados destes ajustes – constantes  $C_1$  e  $C_2$  e o coeficiente de correlação gerado – podem ser observados na Tabela 6.10.

**Tabela 6.10:** Resultado do ajuste dos dados experimentais obtidos para a PTS Tipo III ao modelo exponencial.

$T$ (°C)	Parâmetros		Constantes		$R^2$
	$\nu$ (cm.s <sup>-1</sup> )	$h$ (cm)	$C_1$	$C_2$	
90	100	5	0,928	0,00110	0,990
90	125	5	0,950	0,00140	0,991
90	150	5	0,922	0,00137	0,987
110	100	5	0,952	0,00186	0,995
110	125	5	0,944	0,00186	0,993
110	150	5	0,955	0,00198	0,992
130	100	5	0,985	0,00262	0,999
130	125	5	0,976	0,00262	0,999
130	150	5	0,992	0,00288	0,997
90	100	10	0,960	0,00102	0,996
90	125	10	0,937	0,00127	0,992
90	150	10	0,939	0,00119	0,992
110	100	10	0,991	0,00122	0,995
110	125	10	0,988	0,00204	1,000
110	150	10	0,970	0,00207	0,999
130	100	10	1,012	0,00204	0,999
130	125	10	1,055	0,00301	0,995
130	150	10	1,010	0,00322	0,998

Assim como para os outros dois tipos de PTS, os coeficientes de correlação obtidos para todos os conjuntos de parâmetros foram muito próximos da unidade, indicando um bom ajuste dos dados experimentais da PTS Tipo III ao modelo proposto.

Além disso, os valores obtidos para a constante  $C_1$  novamente se mostraram pouco variáveis e muito próximos da unidade (média de  $0,970 \pm 0,034$ ). O *EMR* gerado quando da comparação destes valores com uma coluna unitária foi de 3,82%, valor um pouco mais elevado do que os obtidos anteriormente, mas, ainda assim, bem abaixo do limite de 10%. Assim,  $C_1$  foi considerada, também para a PTS Tipo III, como independente dos parâmetros testados, constante e igual à unidade.

Assim como as curvas de secagem já haviam indicado, o resultado da análise estatística para a PTS Tipo III foi bem diferente dos resultados obtidos para os outros dois tipos de PTS.

Em ambos os casos anteriores, todos os parâmetros e seus efeitos de interação mostraram-se significativos, sendo a altura de camada o que demonstrou, sem dúvida, a maior influência na obtenção da constante  $C_2$ . Para a PTS Tipo III, no entanto, o parâmetro que



apresentou a maior influência foi a temperatura do ar de secagem, sendo que a altura de camada mostrou-se estatisticamente não significativa para a obtenção da constante  $C_2$  do modelo exponencial. Isso pode ser observado na Tabela 6.11 que apresenta o resultado do Teste F – valores de F tabelados (F tab) e calculados (F calc) – realizado ao final da análise estatística (a um nível de 95% de confiança).

**Tabela 6.11:** Valores de F calculados e tabelados obtidos para a PTS Tipo III.

Fator	F calc	F tab	Significativo?
$T$	81,5	3,6	Sim
$v$	6,0	3,6	Sim
$h$	1,7	4,4	Não
$T + v$	1,2	3,6	Não
$T + h$	< 0,1	3,6	Não
$v + h$	6,5	3,6	Sim
$T + v + h$	5,0	3,6	Sim

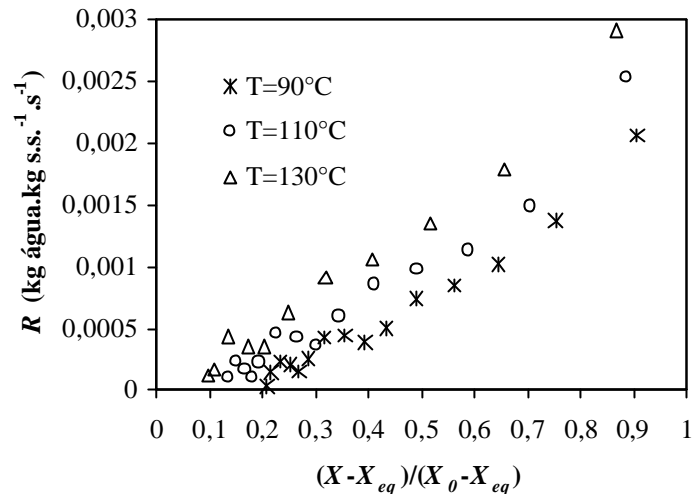
Como pode ser observado através da comparação desta tabela com as tabelas 6.3 e 6.7, nenhum parâmetro mostrou uma influência tão elevada quanto a altura de camada demonstrou para as PTS tipos I e II. Dentre os parâmetros estudados, a temperatura do ar de secagem apresentou-se como o mais significativo para a PTS Tipo III, sendo o único a apresentar uma diferença elevada entre os valores de F calculado e tabelado. Os outros parâmetros que se mostraram estatisticamente significativos para a obtenção da constante  $C_2$  para este tipo de PTS apresentaram valores de F calculados apenas levemente superiores aos tabelados.

Isso indica que este tipo de PTS é o menos sensível em relação à variação dos parâmetros do processo de secagem. Ou seja, é muito provável que uma pequena variação em um – ou mais – dos parâmetros testados (dentro da faixa compreendida neste estudo) pouco influencie o decaimento de umidade da PTS Tipo III no decorrer do tempo.

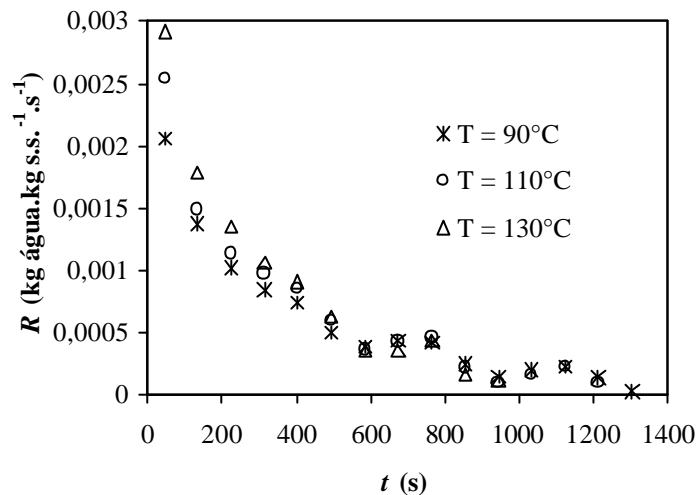
Uma vez que tanto as curvas de secagem deste tipo de PTS como a análise estatística realizada indicaram, mais uma vez, a baixa influência dos parâmetros externos no processo de secagem, determinou-se as curvas de taxa de secagem ( $R$ , em  $\text{kg água.kg ss}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) versus o teor de umidade e versus o tempo para observar o comportamento desta. O resultado obtido encontra-se descrito a seguir.

### 6.3.2 TAXA DE SECAGEM DA PTS TIPO III

As Figuras 6.18 e 6.19 são duas das curvas de taxa de secagem obtidas para a PTS Tipo III. Na primeira delas, pode-se visualizar a taxa de secagem plotada versus o teor de umidade adimensional da amostra, enquanto que na segunda, a taxa de secagem está plotada versus o tempo (em s). Ambas as figuras comparam as três temperaturas testadas e os demais parâmetros de processo utilizados foram: velocidade do ar de secagem de  $150 \text{ cm.s}^{-1}$  e altura de camada de produto de 5 cm.



**Figura 6.18:** Influência da temperatura do ar de secagem na taxa de secagem da PTS Tipo III versus a umidade adimensional ( $v=150 \text{ cm.s}^{-1}$  e  $h=5 \text{ cm}$ ).



**Figura 6.19:** Influência da temperatura do ar de secagem na taxa de secagem da PTS Tipo III versus o tempo de secagem ( $v=150 \text{ cm.s}^{-1}$  e  $h=5 \text{ cm}$ ).

As curvas obtidas para a taxa de secagem confirmam a inexistência do período de taxa constante de secagem também para este tipo de PTS. Ou seja, com a umidade inicial deste produto variando entre 18 e 22% e nos intervalos de altura de camada, temperatura e velocidade do ar de secagem abrangidos neste estudo, a superfície do produto já não se encontra saturada desde o início do processo de secagem, sendo este, assim, limitado pela difusão interna de umidade e não pela evaporação desta a partir da superfície.

### 6.3.3 AJUSTE DOS DADOS DA CONSTANTE $C_2$ AO MODELO ESTATÍSTICO

Assim como para os dois tipos anteriores de PTS, estudou-se o ajuste dos dados de  $C_2$  obtidos pelo modelo exponencial a um modelo estatístico que fosse dependente dos parâmetros de processo.

Entretanto, como para este tipo de PTS apenas dois parâmetros ( $T$  e  $v$ ) somados a dois efeitos de interação ( $v + h$  e  $T + v + h$ ) mostraram-se estatisticamente significativos, optou-se por um modelo de apenas 7 constantes para a tentativa de ajuste:

$$C_2^* = k_1 + k_2 T + k_3 v + k_4 T^2 + k_5 v^2 + k_6 v h + k_7 T v h \quad (6.3)$$

O ajuste a esta equação foi feito a partir dos dados de  $C_2$ ,  $T$ ,  $v$  e  $h$  apresentados na Tabela 6.10 e este gerou um coeficiente de correlação de 0,966. Pode-se perceber que este valor é sensivelmente inferior aos valores obtidos para os outros dois tipos de PTS. Além disso, o erro médio relativo estimado entre os valores de  $C_2$  (determinados pelo ajuste ao modelo exponencial e função da umidade adimensional e do tempo de secagem) e  $C_2^*$  (determinados pelo modelo estatístico e função dos parâmetros do processo) foi de 7,56. Este valor ainda se encontra abaixo do limite de 10%, mas já se aproxima bastante deste. Assim, a fim de comprovar qual o modelo que melhor se ajustava aos dados utilizados, testou-se, também para a PTS Tipo III, o ajuste dos dados de  $C_2$ ,  $T$ ,  $v$  e  $h$  apresentados na Tabela 6.10 ao modelo proposto de 10 constantes (equação 4.5).

Este ajuste gerou um coeficiente de correlação de 0,989 (superior ao coeficiente obtido anteriormente) e o erro médio relativo gerado na comparação dos valores de  $C_2$  e  $C_2^*$  foi de 4,14, bem inferior ao obtido com o ajuste dos dados ao modelo de 7 constantes.

Em função da melhor qualidade apresentada pelo ajuste ao modelo de 10 constantes, optou-se pela utilização deste para a predição das curvas de secagem da PTS Tipo III. Os valores das constantes obtidas através deste ajuste encontram-se na Tabela 6.12.

**Tabela 6.12:** Constantes obtidas através do ajuste dos dados da Tabela 6.10 ao modelo proposto.

$k_1$	-0,0074546
$k_2$	0,0000200
$k_3$	0,0001128
$k_4$	0,0010546
$k_5$	0,0000003
$k_6$	-0,0000002
$k_7$	-0,0000005
$k_8$	-0,0000120
$k_9$	-0,0000093
$k_{10}$	0,0000001

Também para este produto, portanto, especulou-se possível a predição das curvas de secagem através da utilização da equação 6.1 e das constantes apresentadas na Tabela 6.12. Para a confirmação desta hipótese, foram feitas as simulações das curvas de secagem obtidas experimentalmente com o auxílio deste modelo. Os valores de  $EMR$  gerados na comparação entre os teores de umidade obtidos na determinação das curvas de secagem experimentais e os teores de umidade obtidos através da simulação destas mesmas curvas com o modelo da

equação 6.1 e as constantes presentes na Tabela 6.12 são apresentados na Tabela 6.13. Mais uma vez, os valores de *EMR* são apresentados para a totalidade da curva ( $X_0 < X < X_{eq}$ ) e para parte dela ( $X_0 < X < 0,06 \text{ kg água.kg ss}^{-1}$ ).

**Tabela 6.13:** Valores de *EMR* gerados na comparação dos teores de umidade da PTS Tipo III obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo.

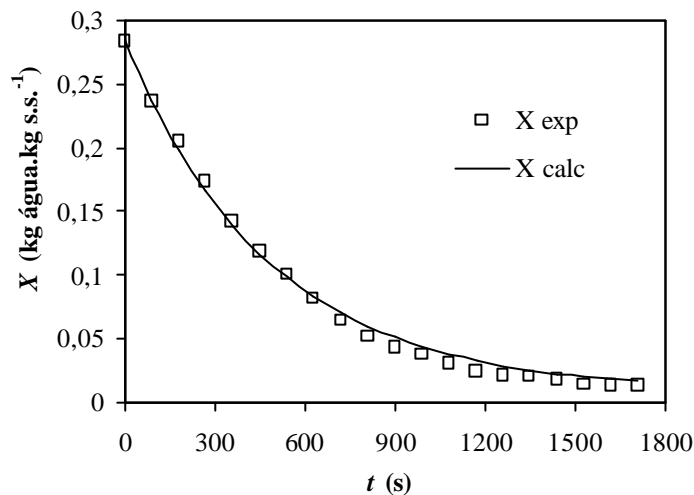
Parâmetros			<i>EMR</i> (%)	
<i>T</i> (°C)	<i>v</i> (cm.s <sup>-1</sup> )	<i>h</i> (cm)	$X_0 < X < X_{eq}$	$X_0 < X < 0,06$
90	100	5	8,81	5,33
90	125	5	8,49	4,70
90	150	5	7,88	4,43
110	100	5	10,12	8,36
110	125	5	10,82	3,32
110	150	5	9,95	4,27
130	100	5	7,01	2,80
130	125	5	8,70	1,05
130	150	5	6,94	1,72
90	100	10	8,53	3,78
90	125	10	9,86	4,74
90	150	10	10,89	4,16
110	100	10	14,90	6,89
110	125	10	5,98	2,08
110	150	10	4,20	0,88
130	100	10	5,98	1,00
130	125	10	10,59	1,96
130	150	10	18,11	1,67
			<b>Média</b>	3,51
			<b>Máximo</b>	8,36
			<b>Mínimo</b>	0,88

Como pode-se perceber pelos valores apresentados nesta tabela, a utilização do modelo proposto na equação 6.1 e das constantes da Tabela 6.12 para a predição das curvas de secagem da PTS Tipo III (nos intervalos de altura de camada, temperatura e velocidade do ar de secagem abrangidos neste estudo) gerou erros bastante pequenos, principalmente para a porção da curva de maior interesse industrial, confirmando a ótima qualidade do modelo proposto na estimação das curvas de secagem deste tipo de PTS.

Em relação à totalidade da curva, apenas dois conjuntos de parâmetros geraram erros superiores a 10% e, além disso, esses dois valores foram baixos se comparados aos obtidos para a totalidade da curva de alguns conjuntos de parâmetros das PTS tipos I e II. Os conjuntos de parâmetros restantes mostraram-se menores ou, no máximo, iguais ao limite de 10%, indicando a boa qualidade de ajuste do modelo proposto até mesmo a valores muito baixos de umidade.

Assim, torna-se possível, também para a PTS Tipo III, a utilização da equação 6.2 a fim de prever-se, industrialmente, a umidade final deste tipo de PTS, sob determinadas condições de processo, ou, ainda, estimar o tempo necessário para se atingir determinada umidade.

A Figura 6.20 apresenta o ajuste de uma das curvas obtidas experimentalmente ao modelo proposto. Nesta, os pontos ( $X$  exp) são os dados de umidade versus o tempo de secagem obtidos em um dos experimentos realizados (experimento 82, realizado dia 24 de abril de 2003) e a linha cheia ( $X$  calc) representa a predição do modelo para a umidade calculada em função do tempo experimental. Os parâmetros de secagem utilizados neste experimento foram: temperatura e velocidade do ar de secagem de  $130^{\circ}\text{C}$  e  $100\text{ cm.s}^{-1}$ , respectivamente, e altura de camada de produto de 10 cm.



**Figura 6.20:** Ajuste dos dados obtidos em um dos experimentos realizados com a PTS Tipo III ao modelo proposto ( $T=130^{\circ}\text{C}$ ,  $v=100\text{ cm.s}^{-1}$  e  $h=10\text{ cm}$ ).

A partir desta figura, pode-se confirmar que o modelo proposto prevê, com bastante coerência, as curvas de secagem obtidas experimentalmente para este tipo de PTS. Além disso, percebe-se que a qualidade do ajuste mantém-se mesmo em valores mais baixos de umidade, indicando que, neste caso, é provável que não esteja ocorrendo mudanças no mecanismo de secagem, como havia sido detectado nos casos anteriores. Mesmo assim, optou-se, novamente, pela realização de um novo ajuste aos modelos propostos, desta vez apenas com os dados de umidade adimensional em função do tempo compreendidos dentro da faixa de umidade entre  $X_0$  e  $X=0,06\text{ kg água.kg ss}^{-1}$ . O resultado deste novo ajuste encontra-se descrito a seguir, na seção 6.4.

## 6.4 AJUSTE PARCIAL DAS CURVAS DE SECAGEM OBTIDAS PARA AS PTS TIPOS I, II E III

Uma vez constatado que o modelo unificado proposto é representativo das curvas de secagem das PTS tipos I, II e III apenas quando teores de umidade entre  $X_0$  e  $X=0,06$  kg água.kg ss<sup>-1</sup> forem considerados, optou-se pela realização de um novo ajuste; desta vez são utilizados, apenas, os dados experimentais referentes à faixa de umidade citada acima.

No ajuste dos dados experimentais ao modelo exponencial (equação 4.4) foram obtidos, novamente, coeficientes de correlação bastante elevados para os três tipos de PTS. A constante  $C_1$  mostrou-se, como nos ajustes anteriores, muito próxima de 1 e a constante  $C_2$  apresentou valores variáveis em função dos parâmetros de processo.

No ajuste dos dados ao modelo estatístico (equação 4.5) foram obtidos coeficientes de correlação muito semelhantes aos obtidos anteriormente, no ajuste da totalidade das curvas: 0,996 para a PTS Tipo I, 0,992 para a PTS Tipo II e 0,991 para a PTS Tipo III. Da mesma forma, os valores de EMR gerados na comparação entre os valores de  $C_2$  (determinados pelo ajuste ao modelo exponencial e função da umidade adimensional e do tempo de secagem) e  $C_2^*$  (determinados pelo modelo estatístico e função dos parâmetros do processo) também se aproximaram bastante dos obtidos anteriormente (4,45% para a PTS Tipo I, 7,74% para a PTS Tipo II e 3,84% para a PTS Tipo III).

A Tabela 6.14 apresenta uma comparação entre os valores de EMR gerados na simulação das curvas de secagem dos três tipos de PTS. As colunas denominadas de Ajuste 1 apresentam os valores de EMR gerados na simulação de parte da curva de secagem utilizando-se as constantes obtidas anteriormente (estes dados são provenientes da última coluna das Tabelas 6.5, 6.9 e 6.13). As colunas denominadas de Ajuste 2, por sua vez, apresentam os valores de EMR gerados na simulação desta mesma parte da curva, utilizando-se, entretanto, as constantes obtidas neste último ajuste realizado.

Por esta tabela, é possível perceber uma sensível melhora na qualidade do ajuste (ou, uma diminuição nos valores de *EMR* gerados) com a utilização das constantes obtidas a partir do último ajuste realizado, ou seja, a partir do ajuste dos dados experimentais compreendidos entre  $X_0$  e 0,06 kg água.kg ss<sup>-1</sup> ao modelo unificado proposto: a soma de todos os valores de *EMR* gerados para cada tipo de PTS diminuiu sensivelmente e houve, ainda, uma diminuição nos valores médios de EMR gerados em todos os três tipos.

Assim, pode-se indicar a utilização da equação 6.2 para a predição das curvas de secagem destes três tipos de PTS na faixa de umidade abrangida nesta seção. Para tanto, o mais indicado é que se utilizem os novos valores obtidos para as constantes  $k_1$  a  $k_{10}$ . Estes valores são apresentados na Tabela 6.15.

**Tabela 6.14:** Comparação entre valores de EMR gerados na simulação parcial das curvas de secagem através do ajuste de toda a curva e de parte dela

Parâmetros			PTS Tipo I		PTS Tipo II		PTS Tipo III	
			Ajuste 1	Ajuste 2	Ajuste 1	Ajuste 2	Ajuste 1	Ajuste 2
T	v	h	EMR (%)		EMR (%)		EMR (%)	
90	100	$h_1$	3,79	4,28	1,78	1,24	5,33	4,99
90	125	$h_1$	4,73	4,42	3,68	3,37	4,7	4,33
90	150	$h_1$	3,03	2,61	1,19	1,51	4,43	3,66
110	100	$h_1$	4,56	5,66	3,81	2,68	8,36	3,96
110	125	$h_1$	1,78	1,83	1,89	2,83	3,32	3,27
110	150	$h_1$	2,57	2,61	2,37	2,5	4,27	3,25
130	100	$h_1$	4,88	4,22	2,96	3,34	2,8	0,85
130	125	$h_1$	7,31	7,70	3,26	3,05	1,05	1,76
130	150	$h_1$	3,53	3,68	3,31	3,73	1,72	1,45
90	100	$h_2$	1,88	3,68	9,12	9,56	3,78	3,4
90	125	$h_2$	9,13	4,80	2,66	1,63	4,74	2,7
90	150	$h_2$	2,07	2,46	1,7	1,58	4,16	2,77
110	100	$h_2$	7,23	4,47	13,11	13,22	6,89	8,72
110	125	$h_2$	2,41	2,07	5,15	1,81	2,08	2,05
110	150	$h_2$	4,86	3,11	7,51	4,21	0,88	0,85
130	100	$h_2$	3,89	2,37	2,24	3,52	1	1,29
130	125	$h_2$	2,60	4,06	9,61	6,7	1,96	0,44
130	150	$h_2$	5,31	2,36	2,87	6,69	1,67	0,75
<b>Soma</b>			75,56	66,39	78,22	73,17	63,14	50,49
<b>Média</b>			4,20	3,69	4,35	4,07	3,51	2,81
<b>Máximo</b>			9,13	7,7	13,11	13,22	8,36	8,72
<b>Mínimo</b>			1,78	1,83	1,19	1,24	0,88	0,44

**Tabela 6.15:** Constantes do modelo unificado proposto

PTS			
	Tipo I	Tipo II	Tipo III
$k_1$	0,0151171	-0,0149346	-0,0114734
$k_2$	-0,0000680	0,0000711	0,0000827
$k_3$	-0,0001832	0,0001870	0,0001185
$k_4$	-0,0037504	0,0029873	0,0014441
$k_5$	-0,0000003	0,0000003	0,0000002
$k_6$	0,0000001	-0,0000004	-0,0000002
$k_7$	0,0000019	-0,0000005	-0,0000007
$k_8$	0,0000315	-0,0000298	-0,0000159
$k_9$	0,0000329	-0,0000230	-0,0000111
$k_{10}$	-0,0000004	0,0000002	0,0000001

Na seqüência, será abordada uma comparação entre os resultados obtidos para cada um dos três tipos de PTS estudados.

## **6.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS TRÊS TIPOS DE PTS**

Conforme apresentado nas três seções anteriores, os tipos de PTS avaliados neste estudo apresentaram algumas diferenças em suas características de secagem. O que causa estas diferenças são as etapas que precedem a secagem de cada tipo de PTS, sendo a etapa de extrusão – com todas suas variações de parâmetros – a principal responsável, pois alimenta os secadores com produtos de diferentes tamanhos, formas, densidades e porosidades.

Em relação à importância dos parâmetros de processo estudados – altura de camada de produto, temperatura e velocidade do ar de secagem – na obtenção da curva de secagem de cada tipo de PTS foram possíveis as observações listadas a seguir.

1) A altura de camada mostrou-se extremamente significativa para as PTS Tipo I e II (de tamanho reduzido, com, respectivamente, 3,15 e 1,98 mm de diâmetro equivalente) e não significativa para a secagem da PTS Tipo III (diâmetro equivalente de 15,26 mm).

2) A temperatura do ar de secagem mostrou-se muito significativa para as curvas de secagem dos três tipos de PTS. Entretanto, pôde-se perceber uma diferença de significância em função do tipo de PTS: quanto maior o tamanho de partícula, mais importante tornava-se a variação da temperatura do ar de secagem. Para a PTS Tipo III, por exemplo, este parâmetro foi o único a apresentar uma significância mais elevada frente aos outros parâmetros. Para as PTS dos tipos I e II, a temperatura mostrou exercer uma influência importante (no primeiro, mais significativa que no segundo), mas inferior à influência demonstrada pela altura de camada.

3) A velocidade do ar de secagem, ao contrário da temperatura, praticamente não apresentou influência nas curvas de secagem dos três tipos de PTS. Ainda assim, foi possível perceber que, quanto menor o tamanho de partícula, mais influente era este parâmetro. Os valores de F calculados para as PTS Tipo III, I e II (ordem decrescente de tamanho) foram, respectivamente, 6,0, 19,3 e 31,3 para valores semelhantes de F tabelado.

Uma vez que os resultados obtidos anteriormente indicaram que o processo que controla a secagem dos três tipos de PTS estudados (na faixa de operação abrangida) é a difusão interna de umidade (fato confirmado pelas curvas obtidas para a taxa de secagem), a influência da temperatura do ar de secagem já era bastante esperada, pois, como comentado ao longo da seção 2, a temperatura facilita a movimentação das moléculas de umidade no interior das partículas, facilitando a difusão. Além disso, o aumento da influência deste



parâmetro em função do aumento do tamanho de partícula explica-se, pois, quanto maior o tamanho de partícula, maior é a diferença de temperatura entre a superfície e o interior do produto, estimulando a secagem.

Da mesma forma, esperava-se pouca influência da velocidade do ar de secagem, pois este é um parâmetro externo que facilita, principalmente, a transferência de calor por convecção. Entretanto, quanto maior a partícula, maior é a dificuldade da umidade em migrar até a superfície desta e, conseqüentemente, mais determinante é o processo difusivo frente ao convectivo. Assim, explica-se o fato comentado, anteriormente, na terceira observação.

Entretanto, uma questão surge: se o que controla o processo de transferência de umidade do produto para o ar de secagem é a etapa difusiva, por que a altura de camada apresentou-se tão significativa para as curvas de secagem das PTS tipos I e II e nada significativa para a PTS Tipo III? Acredita-se que o grande responsável pelas diferenças encontradas seja o grau de compactação do leito de produto, determinado, diretamente, pelos diferentes tamanhos das PTS estudadas e, conseqüentemente, pela altura do leito. Quanto maior a compactação do leito, mais difícil é a passagem do ar de secagem através deste, ou seja, menor é o coeficiente convectivo de transferência de massa. Além disso, é possível que, quanto maior a compactação do leito, maior é a tendência do ar de secagem de formar caminhos preferenciais de escoamento através deste. Quando estes caminhos se formam, o ar não escoar uniformemente através de todo o leito e, apesar de ser a difusão de umidade no interior de cada partícula que controla o processo, este não é capaz de arrastar uniformemente a umidade que atinge a superfície de cada uma destas partículas. Assim, algumas regiões do leito permanecem úmidas por mais tempo. Com o decorrer do processo, devido à diminuição de umidade do leito, este vai diminuindo sua massa e, por conseqüência, seu estado de compactação, facilitando a passagem do ar de secagem e diminuindo a formação dos caminhos preferenciais. Ocorre, então, gradativamente, a secagem completa do leito.

O leito formado pela PTS Tipo III é o menos compactado dentre os três analisados. Uma vez que o diâmetro equivalente médio das partículas desta amostra são bastante elevados, estas acabam ficando bem separadas umas das outras, formando um leito com elevados espaços intersticiais, independentemente da altura deste. Assim, a formação destes caminhos preferenciais é, provavelmente, muito baixa ou, até mesmo, inexistente, podendo explicar o fato de uma variação na altura não afetar a curva de secagem desta PTS.

Para os outros dois tipos de PTS, o leito formado é muito mais compacto, diminuindo extensivamente o espaçamento intersticial do mesmo, principalmente em alturas de camada mais elevadas. Assim, para a PTS Tipo I e Tipo II, altura de camada é determinante na compactação do leito e, por conseqüência, na extensão da formação dos caminhos preferenciais e, portanto, nas curvas de secagem destes dois tipos de PTS.

A diferença de compactação do leito também explica o fato de o processo de secagem da PTS Tipo I ser mais rápido do que o processo de secagem da PTS Tipo II (para as mesmas condições de temperatura e velocidade do ar de secagem). Uma vez que o leito da primeira é um pouco menos compacto que o da segunda, o ar de secagem encontra um pouco menos de dificuldade em atravessá-lo e seca este produto em menos tempo. A PTS Tipo III, por sua vez, apresenta um tempo de secagem intermediário, mesmo sendo responsável pela formação do leito menos compacto dentre os três tipos. Isso se dá devido ao diâmetro equivalente médio das partículas deste tipo de PTS (que são muito mais elevados do que o diâmetro dos outros dois tipos) que acabam retardando a secagem (pois a umidade deve percorrer um caminho de difusão mais extenso) e compensando a facilidade de passagem do ar através do leito.

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSÃO**

Neste trabalho foram realizadas duas seqüências distintas de experimentos. Através de uma delas determinaram-se as isotermas de adsorção de dois tipos de proteínas texturizadas de soja em quatro temperaturas, e, através da outra, foi possível a obtenção das curvas de secagem de três diferentes tipos de PTS bem como o desenvolvimento de um modelo capaz de prever o tempo de secagem de cada tipo de PTS em função de seus teores de umidade inicial e de equilíbrio e dos parâmetros do processo.

A seguir, são apresentadas, separadamente, as principais conclusões obtidas em cada seqüência de experimentos.

#### **7.1 ISOTERMAS DE ADSORÇÃO**

Neste trabalho, foram apresentadas as isotermas de adsorção para dois tipos de PTS (PTS Tipo I e PTS Tipo IV) para as temperaturas de 10°, 20°, 30° e 40°C. Os dados experimentais foram ajustados através de diferentes modelos, sendo, também, determinados o calor de sorção e a área superficial de água de cada produto.

As isotermas obtidas para a PTS Tipo I apresentaram o mesmo formato das curvas obtidas para a PTS Tipo IV, atingindo, entretanto, teores de umidade de equilíbrio mais elevados. As quatro isotermas obtidas para a PTS Tipo I (em quatro temperaturas diferentes) e as quatro isotermas obtidas para a PTS Tipo IV, mostraram-se muito semelhantes, revelando pouca influência da temperatura nas curvas de umidade de equilíbrio em função da atividade de água destes tipos de PTS.

Outra diferença bastante significativa encontrada entre as curvas dos dois tipos de PTS refere-se ao comportamento destas em elevados valores de atividade de água. As isotermas obtidas para a PTS Tipo IV apresentaram o mesmo comportamento para qualquer valor de atividade de água; ou seja, na totalidade da curva, quanto maior a temperatura – para uma atividade de água constante – menor era a umidade de equilíbrio apresentada pela amostra. As isotermas obtidas para a PTS Tipo I, entretanto, apresentaram uma inversão de comportamento em um valor de atividade de água de aproximadamente 0,9. Estima-se que isto tenha ocorrido devido aos cerca de 20% de açúcares presentes neste tipo de PTS (e ausentes no outro tipo), pois estes são constituintes de baixo peso molecular que, com o aumento da temperatura, podem se dissolver na água, tornando-se mais higroscópicos.

Em relação aos ajustes dos dados experimentais aos diversos modelos, para ambas as PTS, os modelos de GAB e Peleg foram os que apresentaram os melhores resultados nas quatro temperaturas estudadas. Como o modelo de GAB é o único capaz de prever o cruzamento ocorrido entre as curvas da PTS Tipo I, este foi o escolhido como o modelo ideal para a predição dos dados experimentais de adsorção obtidos para esta PTS. Para a PTS Tipo IV, entretanto, como não ocorreu esta inversão de comportamento e, uma vez que o ajuste ao modelo de Peleg foi o que gerou os menores valores de *EMR* e os coeficientes de correlação mais elevados, este foi o escolhido como o mais indicado para a predição das isotermas de adsorção desta PTS.

Os teores de umidade de monocamada obtidos (através do modelo de GAB) para ambos os tipos de PTS diminuíram com o aumento da temperatura. Além disso, os valores obtidos para a PTS Tipo I foram, em todas as temperaturas, superiores aos obtidos para a PTS Tipo IV. A área superficial de água de ambos os produtos apresentou o mesmo comportamento.

O calor de sorção, como era esperado, aumentou com a diminuição da umidade para ambas as PTS, indicando que quanto menos água contém o produto, mais difícil é sua remoção. A PTS Tipo I, entretanto, apresentou uma diferença de calor de sorção um pouco mais acentuada do que a PTS Tipo IV, se uma secagem de 25% a 10% de umidade for considerada.

## 7.2 CURVAS DE SECAGEM

Neste trabalho, foram apresentadas as curvas de secagem de três tipos de PTS, para diferentes condições de operação do sistema. Foram variados os parâmetros de temperatura do ar de secagem (90, 110 e 130°C), velocidade do ar de secagem (100, 125 e 150 cm.s<sup>-1</sup>) e altura de camada de produto ( $h_1$  e  $h_2$ , em cm). A partir do ajuste destas curvas a um modelo exponencial de duas constantes e, posteriormente, a um modelo estatístico de 10 constantes,

foi possível o desenvolvimento de um modelo capaz de prever as curvas de secagem das PTS estudadas.

As curvas de secagem obtidas indicaram que o processo de secagem de cada tipo de PTS possui características próprias, principalmente em relação à influência dos parâmetros de processo estudados. Estas particularidades são determinadas, principalmente, na etapa que antecede à secagem, ou seja, durante a extrusão termoplástica das mesmas. Esta etapa determina os parâmetros de tamanho, densidade e porosidade característicos de cada tipo de PTS.

O parâmetro de temperatura do ar de secagem foi o único que se mostrou significativo para os três tipos de PTS. Este era um resultado bastante esperado, uma vez que as curvas obtidas para a taxa de secagem de todas as amostras de PTS estudadas indicaram a ausência da etapa de taxa constante de secagem, ou seja, indicaram que o processo, nestas condições, é controlado pela difusão interna de umidade e não pela evaporação desta a partir da superfície. Quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior é a facilidade das moléculas de água de migrarem até a superfície e mais rapidamente se dá a secagem.

Realizando-se a análise da influência da temperatura do ar de secagem na coloração final da PTS Tipo I, concluiu-se que a máxima temperatura testada (130°C) não alterou significativamente a coloração final das amostras (amostras com umidade final em torno de 6,5%, base seca). Concluiu-se, portanto, que, para os intervalos de parâmetros abrangidos neste estudo, a temperatura do ar de secagem mais indicada para a secagem da PTS é a temperatura de 130°C, pois otimiza o processo sem causar alterações no produto final.

Em relação à velocidade do ar de secagem, pôde-se perceber que esta apresentou uma influência mínima nas curvas de secagem obtidas para os três tipos de PTS. Ficou claro, entretanto, que, quanto menor o tamanho das partículas, um pouco mais significativo era este parâmetro. Isso ocorreu, pois, quanto maior a partícula, maior é a dificuldade da umidade de migrar até a superfície desta e, conseqüentemente, mais determinante ainda é o processo difusivo frente ao convectivo. Mesmo assim, por implicações econômicas, indica-se a utilização da menor velocidade do ar de secagem – dentro dos intervalos de parâmetros abrangidos neste estudo – para o processamento destes três tipos de PTS.

Para as PTS dos tipos I e II, a altura de camada de produto apresentou uma influência muito maior nas curvas de secagem obtidas experimentalmente do que os outros parâmetros estudados. Nas curvas obtidas para a PTS Tipo III, entretanto, a variação deste parâmetro não causou nenhuma alteração estatisticamente significativa. A diferença de importância encontrada para este parâmetro entre os três tipos de PTS estudados relaciona-se, diretamente, com a diferença de tamanho das partículas existente entre eles. Como as partículas das PTS dos tipos I e II apresentam um diâmetro equivalente consideravelmente menor do que as partículas da PTS Tipo III, estas formam um leito muito mais compacto. Além disso, quanto

maior a altura de camada de produto, mais compacto torna-se o leito e mais lentamente se dá a secagem. Especula-se que o leito muito compacto, característico das PTS tipos I e II, causem a formação de caminhos preferenciais de escoamento do ar de secagem, dificultando a retirada de umidade do mesmo. Assim, dentro dos intervalos de parâmetros abrangidos neste estudo, pode-se indicar, para a otimização do processo de secagem das PTS tipos I e II a menor altura de camada. Já para a PTS Tipo III, indica-se a maior altura de camada, pois o leito formado por esta PTS possibilita a secagem de mais produto em um mesmo período de tempo.

Em relação ao ajuste dos dados obtidos experimentalmente aos dois modelos propostos (modelo exponencial de duas constantes e modelo estatístico de dez constantes), pôde-se perceber que ambos apresentaram coeficientes de correlação muito próximos da unidade – além de valores de *EMR* sempre inferiores ao limite de 10% – indicando ajustes de muito boa qualidade para os dados obtidos para os três tipos de PTS.

Além disso, o resultado da simulação das curvas de secagem através do modelo final proposto (união dos dois modelos testados anteriormente), nas mesmas condições utilizadas experimentalmente, indicou que este é bastante representativo destas curvas e pode ser utilizado, industrialmente, na predição das curvas de secagem destes três tipos de PTS. Este modelo é capaz de estimar o tempo de secagem de cada tipo de PTS, a partir dos dados de umidade inicial e de equilíbrio da amostra, dos parâmetros do processo e das respectivas constantes apresentadas nas tabelas 6.4, 6.8 e 6.12. Sua aplicação, entretanto, limita-se à faixa de umidade superior a 6% b.s (principalmente para as PTS dos tipos I e II) e aos intervalos de altura de camada de produto (de 3 a 6 cm para a PTS Tipo I, 2,5 e 5 cm para a PTS Tipo II e 5 e 10 cm para a PTS Tipo III), de temperatura (90 a 130°C) e velocidade (100 a 150 cm.s<sup>-1</sup>) do ar de secagem abrangidas neste estudo.

## CAPÍTULO 8

### BIBLIOGRAFIA

AGUERRE, R. J., SUAREZ, C. e VIOLLAZ, P. Z., *New BET Type Multi-layer Sorption Isotherms. Part II: Modelling Water Sorption in Foods*. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, 22(1), 192-195, 1989. In PARK, K. J., VOHNIKOVA, Z. e BROD, F. P. R. *Evaluation of Drying Parameters and Desorption Isotherms of Garden Mint Leaves*. Journal of Food Engineering, 51,193-199, 2002.

Association of Official Analytical Chemists – AOAC. *Official Methods of Analysis: 930.04, Moisture Content in Plants*, 1, 949, 1990.

BAKER, C.G.J. *Industrial Drying of Foods*, Chapman&Hall, Blackie Academic and Professional, 309 p., 1997.

BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. e VEGA-MERCADO, H., *Dehydration of Foods*, Chapman&Hall, 330p., 1996.

BECHAUT, L.R., *Influence of Water Activity on Growth, Metabolic Activities and Survival of Yeast and Molds*, Journal of Food Protection. 46(2):135-141, 1983.

BENADO, A.L. e Rizvi, S.S.H., *Thermodynamics Properties of Water on Rice as Calculated from Reversible and Irreversible Isotherms*, Journal of Food Science, 50: 101, 1985. In TSAMI, E., MARINOS-KOURIS, D. e MAROULIS, Z. B., *Water Sorption Isotherms of Raisins, Currants, Figs, Prunes and Apricots*. Journal of Food Science, 55, 1594-1597, 1990.

BUNGE ALIMENTOS, *Proteína Texturizada de Soja*, Folheto Técnico – Ingredientes Funcionais, 2001.

COOK, E. M. e DUMONT, H. D. *Process Drying Practice*, McGraw-Hill, 1991.

DOYMAZ, I. e PALA, M., *Hot-air Drying Characteristics of Red Pepper*. Journal of Food Engineering, 55, 331-335, 2002.

- ERTEKIN, C. e YALDIZ, O., *Drying of Eggplant and Selection of a Suitable Thin Layer Drying Model*, Journal of Food Engineering, 63, 349–359, 2004.
- FASINA, O. O. e SOKHANSANJ, S., *Equilibrium Moisture Relations and Heat of Sorption of Alfafa Pellets*, Journal of Agriculture Engineering Research, 56, 51-63, 1993.
- FENNEMA, O.R., *Química de los Alimentos*, 2ed., Acribia, 1258 p., 2000.
- GEANKOPLIS, C.J. *Transport Process and Unit Operations*, 3<sup>rd</sup> edition, Prentice-Hall, 921 p., 1993.
- GIESE, J. *Proteins as Ingredients: Types, Functions, Applications*. Food Technology, v. 48, n.10, p.50-60, 1994.
- HALSEY, G., *Physical Adsorption on Non-uniform Surfaces*. Journal of Chem. Phys., 16(10), 931-937, 1948. In PARK, K. J., VOHNIKOVA, Z. e BROD, F. P. R., *Evaluation of Drying Parameters and Desorption Isotherms of Garden Mint Leaves*. Journal of Food Engineering, 51,193-199, 2002.
- HELDMAN, D.R. e HARTEL, R.W., *Principles of Food Processing*. Chapman & Hall, p. 1-218, 2000.
- HENDERSON, S.M., *A Basic Concept of Equilibrium Moisture*. Agriculture Engineering, 33:29-32, 1952. In SANDOVAL, A. J. e BARREIRO, J. A., *Water Sorption Isotherms of Non-fermented Cocoa Beans*. Journal of Food Engineering, 51, 119-123, 2002.
- IGLESIAS, H.A. e CHIRIFE, J., *Empirical Equation for Fitting Water Sorption Isotherms of Fruit and Related Products*. Can. Inst. Food Sci.Technol. j. 11(1):12-15, 1978. In ALHAMDAN, A.M. e HASSAN, B.H., *Water Sorption Isotherms of Date Pastes as Influenced by Date Cultivar and Storage Temperature*, Journal of Food Engineering, 39, 301-306, 1999.
- IGUÁZ, A., MARTÍN, M.B., MATÉ, J.I., FERNÁNDEZ, T. e VÍRSEDA, P., *Modelling Effective Moisture Diffusivity of Rough Rice (Lido cultivar) at Low Drying Temperatures*, Journal of Food Engineering, 59, 253-258, 2003.
- KAPSALIS, G. J., *Influences of Histeresis and Temperature on Moisture Sorption Isotherms*. In Water Activity: Theory and applications to food, L. B. Rockland and L. R. Beuchat (ed.), Marcel Dekker, 1987.
- KARATHANOS, V.T., VILLALOBOS, G. e SARAVACOS, G.D., *Comparison of Two Methods of Estimation of the Effective Moisture Diffusivity from Drying Data*. Journal of Food Science, Vol. 55. N° 1, 1990.
- KAREL, M., *Freeze Dehydration of Foods*. In Principles of Food Science. Part II:Physical Principles of Food Preservation, M. Karel. O. W. Fennema, and D. B. Lund. (ed.), Marcel Dekker, 1975.
- KAYMAK-ERTEKIN, F. e SULTANOGLU, M., *Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Peppers*. Journal of Food Engineering, 47, 225-231, 2001.



- KOYUNCU, T., SERDAR, U. e TOSUN, I., *Drying Characteristics and Energy Requirement for Dehydration of Chestnuts (Castanea sativa Mill.)*, Journal of Food Engineering, 62, 165-168, 2004.
- KROKIDA, M.K., KARATHANOS, V.T., MAROULIS, Z.B. e MARINOS-KOURIS, D., *Drying Kinetics of Some Vegetables*. Journal of Food Engineering, 59, 391-403, 2003.
- LABUZA, T. P., *Sorption Phenomena in Foods*. Food Technology II, 22, 263-272, 1968.
- LABUZA, T.P., *Moisture Sorption: Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use*, American Association of Cereal Chemists, 1984.
- LABUZA, T.P., KAAANANE, A. e CHEN, J.Y., *Effects of Temperature on the Moisture Sorption Isotherms and Water Activity Shift of Two Dehydrated Foods*, Journal of Food Science, 50, 385, 1985.
- MASTERS, K., *Spray Drying Handbook*. 5<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons, 1991.
- MCLAUGHLIN, C. P. e MAGEE, T. R. A., *The Determination of Sorption Isotherm and the Isothermic Heats of Sorption for Potatoes*. Journal of Food Engineering, 35,267-280, 1998.
- MENKOV, N. D., *Moisture Sorption Isotherms of Lentil Seeds at Several Temperatures*. Journal of Food Engineering, 44, 205-211, 2000a.
- MENKOV, N. D., *Moisture Sorption Isotherms of Chickpea Seeds at Several Temperatures*. Journal of Food Engineering, 45, 189-194, 2000b.
- MUJUMDAR, A.S. *Handbook of Industrial Drying – 2<sup>a</sup> Ed.*, V. 1. Marcel Dekker, Inc. 742 p., 1995.
- NETO, B.B., SCARMINIO, I.S. e BRUNS, R.E., *Planejamento e Otimização de Experimentos*, (2<sup>a</sup> Ed.), Ed. Unicamp, 299 p., 1995.
- OKOS, M.R., NARSIMHAN, G., SINGH, R.K. e WEITNAUER, A.C., *Food Dehydration*. In Handbook of Food Engineering Heldman, D.R. e Lund, D.B. (Eds.). Marcel Decker, 1992.
- OSWIN, C. R., *The kinetics of Package Life III: The Isotherm*. Journal of Chem. Indust., 65, 419-421, 1946. In KAYMAK-ERTEKIN, F. e SULTANOGLU, M., *Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Peppers*. Journal of Food Engineering, 47, 225-231, 2001.
- PARK, K. J., VOHNIKOVA, Z. e BROD, F. P. R., *Evaluation of Drying Parameters and Desorption Isotherms of Garden Mint Leaves*. Journal of Food Engineering, 51,193-199, 2002.
- PELEG, M., *Assessment of a Semi Empirical Four Parameter General Model for Sigmoid Moisture Sorption Isotherms*. Journal of Food Process. Eng., 16(1), 21-37, 1993.
- PINEDO, A.A., *Secagem a Vácuo de Cenoura (Daucus carota) e Abóbora (Cucurbita máxima): Estudo das Características do Processo*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 182 p., 2002.

- Resolução CNNPA nº 14/78. *Padrão de Identidade e Qualidade para Farinha Desengordurada de Soja, Proteína Texturizada de Soja, Proteína Concentrada de Soja, Proteína Isolada de Soja e Extrato de Soja*. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 28 ago. 1978. Seção 1. pt . 1.
- RHEE, K. C., KUO, C. K. e LUSAS, E. W., *Texturization*. In: CHERRY, J. P. Ed. *Protein functionality in foods*. American Chemical Society, p. 51-88, 1981.
- ROMERO, J.T., *Secagem de Proteína Texturizadas de Soja em Leito Estático e Deslizante*. Tese de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. 144 p, 1988.
- SANDOVAL, A. J. e BARREIRO, J. A., *Water Sorption Isotherms of Non-fermented Cocoa Beans*. Journal of Food Engineering, 51, 119-123, 2002.
- SARAVACOS, G. D., TSIOURVAS, D. A. e TSAMI, E., *Effect of Temperature on the Water Adsorption Isotherms of Sultana Raisins*. Journal of Food Science, 51, 381-383, 1986.
- SARAVACOS, G.D. e KOSTAROPOULOS, A.E., *Engineering Properties in Food Processing Simulation*. Computers chem. Engineering. Vol. 20, p. S461-S466, 1996.
- SCORZA, Q.C., CHIRIFE, J. CATTANEO, P., VIGO, M.S. BERTONI, M. H. e SARRAIH, P., *Factores que Condicionam el Crecimiento Microbiano en Alimentos de Humedad Intermédia*. La alimentación latinoamericana 127:62-67, 1981.
- SGARBIERE, V. C. *Proteínas em Alimentos Protéicos*, Livraria Varela, 517p., 1996.
- SHIVAHARE, U.S., ARORA, S., AHMED, J. e RAGHAVAN, G.S.V., *Moisture Sorption Isotherms of Mushroom*, Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie, 37, 133-137, 2004.
- SHIVHARE, U.S., RAGHAVAN, G.S.V., BOSISIO, R.G., MAJUMDAR, A.S. e VANDE-VOORT, F.R., *Particulate Drying in Microwave Environment with Varying Initial Moisture Content*. Power Handling and Processing, 3, 153-157, 1991. In SOGI, D.S., SHIVHARE, U.S., GARG, S.K. e BAWA, A.S., *Water Sorption Isotherm and Drying Characteristics of Tomato Seeds*, Byosystems Engineering, 84(3), 297-301, 2003.
- SIMAL, S., FEMENÍA, A., LLULL, P. e ROSSELLÓ, C., *Dehydration of Aloe vera: Simulation of Drying Curves and Evaluation of Functional Properties*. Journal of Food Engineering, 43, 109-114, 2000.
- SOGI, D.S., SHIVHARE, U.S., GARG, S.K. e BAWA, A.S., *Water Sorption Isotherm and Drying Characteristics of Tomato Seeds*. Byosystems Engineering, 84(3), 297-301, 2003.
- SPIESS, W. E. L e WOLF, W. F., *The Results of the COST 90 Project on Water Activity*. In R. Jowitt (Ed.), *Physical Properties of Foods*, Applied Science Publishers, pp.65-91, 1983.
- STATISTICA for Windows 5.0, *Computer program manual*. Tulsa: Statsoft Inc., 2000.
- TSAMI, E., MARINOS-KOURIS, D. e MAROULIS, Z. B., *Water Sorption Isotherms of Raisins, Currants, Figs, Prunes and Apricots*. Journal of Food Science, 55, 1594-1597, 1990.
- VAN ARSDEL, W.B. e COPLEY, M.J., *Food Dehidration Vol. 1. Principles.*, AVI Publishing, 1963.

- 
- VAN ARSDEL, W.B. e COPLEY, M.J., *Food Dehydration*, Vol. 2, AVI Public. Co., Inc., 1973.
- VAN DEN BERG, C. e BRUIN, S. *Water Activity and its Estimation in Food Systems: Theoretical Aspects*. In *Water Activity: Influences of Food Quality*, L.B. Rockland e G.F. Stewart (Ed.). Academic Press, 1981.
- WANG, N. e BRENNAN, J. G., *Moisture Sorption Isotherm Characteristics of Potatoes at Four Temperatures*. *Journal of Food Engineering*, 14, 269-287, 1991.
- WENGER, *Drying of Extruded Products*, Folheto técnico, Wenger Manufacturing, Inc., p. 1-6, 2001.
- WOLF, W., SPIESS, W. E. L., e JUNG, G., *Standardization of Isotherms Measurements (cost-project 90 and 90 bis)*. In D. Stamatou, & J. L. Multon, *Properties of Water in Foods in Relation to Quality and Stability*, Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, p. 661-679, 1985.

## APÊNDICE A

### DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NA DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO EQUIVALENTE MÉDIO DAS PARTÍCULAS DAS PTS TIPOS I, II E III

PTS Tipo I				
Peneira (Tyler)	D abertura (mm)	Massa de produto retida (g)		
5/16	7,93	0,00	0,10	0,00
4	4,75	40,58	32,27	27,80
6	3,36	171,21	183,15	196,80
10	2	23,92	25,66	22,00
12	1,7	8,38	6,12	4,20
14	1,4	3,44	4,10	2,20
Massa total de amostra (g)		247,53	251,40	253,00
$D_{eq}$ (mm)		3,14	3,12	3,18
$D_{eq}$ médio (mm)		3,15		

PTS Tipo II				
Peneira (Tyler)	D abertura (mm)	Massa de produto retida (g)		
4	4,75	2,7	1,39	0,54
6	3,36	59,76	49,9	33,12
10	2	134,64	137,68	152,64
12	1,7	30,78	32,65	37,44
14	1,41	21,06	21,41	25,02
16	1,19	10,62	10,63	14,94
Massa total de amostra (g)		259,56	253,66	263,7
$D_{eq}$ (mm)		2,03	1,99	1,90
$D_{eq}$ médio (mm)		1,98		

PTS Tipo III				
Peneira (Tyler)	D abertura (mm)	Massa de produto retida (g)		
1	25,4	7,46	0,00	0,00
5/8	16	185,30	233,00	216,76
1/2	12,5	42,97	8,89	42,45
5/16	7,93	7,22	2,42	3,22
Massa total de amostra (g)		242,95	244,31	262,43
$D_{eq}$ (mm)		14,98	15,68	15,13
$D_{eq}$ médio (mm)		15,26		

## APÊNDICE B

### DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NA DETERMINAÇÃO DAS ISOTERMAS DE ADSORÇÃO DA PTS TIPO I NAS TEMPERATURAS DE 10, 20, 30 E 40°C

Frasco	10°C					20°C					
	UR (%)	$X_{eq}$			M	UR (%)	$X_{eq}$				M
1	9,6	0,060	0,053	0,041	0,051	7,0	0,055	0,050	0,035	0,044	0,046
2	11,3	-	-	0,047	0,047	11,2	-	-	0,041	0,053	0,047
3	23,5	0,057	0,057	0,055	0,056	23,0	-	-	0,048	0,066	0,057
4	33,5	0,063	0,061	0,061	0,062	33,2	0,069	0,065	0,055	0,073	0,066
5	44,0	0,071	0,088	0,066	0,075	43,0	0,088	0,081	0,071	0,080	0,080
6	67,5	0,144	0,142	0,152	0,146	65,5	0,139	0,140	0,135	0,132	0,137
7	76,0	0,190	-	0,202	0,196	75,5	0,185	0,220	0,194	0,206	0,201
8	87,0	0,281	0,289	0,349	0,306	85,3	0,275	0,279	0,311	0,312	0,294
9	91,4	0,364	0,365	0,399	0,376	90,7	-	-	0,398	0,418	0,408
10	97,8	0,413	0,409	0,629	0,484	97,3	-	-	0,594	0,635	0,614

Frasco	30°C						40°C					
	UR (%)	$X_{eq}$				M	UR (%)	$X_{eq}$				M
1	7,0	0,020	0,022	0,032	0,051	0,031	6,5	0,045	0,034	0,035	0,042	0,039
2	11,2	0,026	0,027	0,041	0,051	0,036	11,0	0,032	0,032	0,042	0,041	0,037
3	22,0	0,043	0,041	0,060	0,059	0,051	21,0	0,047	0,045	0,050	0,053	0,049
4	32,5	0,049	0,051	0,060	0,065	0,056	31,7	0,058	0,072	0,057	-	0,062
5	43,0	0,071	0,073	0,054	0,074	0,068	43,0	0,068	0,083	0,073	0,073	0,074
6	63,5	0,131	0,125	0,136	0,121	0,128	61,5	0,112	0,112	0,114	0,116	0,114
7	75,5	0,185	0,190	0,179	0,172	0,182	75,5	0,166	0,173	0,174	0,179	0,173
8	83,5	0,266	0,258	0,280	0,245	0,262	82,0	0,240	0,229	0,239	0,241	0,237
9	90,0	0,382	0,382	0,392	0,353	0,377	89,3	0,340	0,349	0,364	0,374	0,357
10	96,8	0,652	0,651	0,761	0,639	0,676	96,2	0,678	0,753	0,650	0,937	0,755

onde M é o valor médio dentre as repetições realizadas; M e  $X_{eq}$  são dados em kg água.kg ss<sup>-1</sup>.

## APÊNDICE C

### DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NA DETERMINAÇÃO DAS ISOTERMAS DE ADSORÇÃO DA PTS TIPO IV NAS TEMPERATURAS DE 10, 20, 30 E 40°C

Frasco	10°C		20°C			
	UR (%)	$X_{eq}$	UR (%)	$X_{eq}$		M
1	9,6	0,046	7,0	0,043	0,046	0,044
2	11,3	0,062	11,2	0,052	0,057	0,055
3	23,5	0,081	23,0	0,072	0,081	0,076
4	33,5	0,094	33,2	0,088	0,097	0,092
5	44	0,098	43,0	0,093	0,102	0,098
6	67,5	0,130	65,5	0,122	0,130	0,126
7	76	0,172	75,5	0,164	0,174	0,169
8	87	0,255	85,3	0,228	0,237	0,232
9	91,4	0,302	90,7	0,299	0,328	0,314
10	97,8	0,479	97,3	0,446	0,476	0,461

Frasco	30°C				40°C			
	UR (%)	$X_{eq}$		M	UR (%)	$X_{eq}$		M
1	7,0	0,037	0,059	0,048	6,5	0,040	0,046	0,043
2	11,2	0,045	0,066	0,055	11,0	0,053	0,047	0,050
3	22,0	-	0,077	0,077	21,0	0,068	0,066	0,067
4	32,5	-	0,092	0,092	31,7	0,083	0,077	0,080
5	43,0	0,093	0,092	0,093	43,0	0,088	0,087	0,088
6	63,5	0,126	0,117	0,122	61,5	0,109	0,111	0,110
7	75,5	0,163	0,148	0,156	75,5	0,146	0,147	0,147
8	83,5	0,211	0,192	0,202	82,0	0,184	0,186	0,185
9	90,0	0,262	0,262	0,262	89,3	0,264	0,275	0,270
10	96,8	0,461	0,426	0,443	96,2	0,402	0,451	0,427

onde M é o valor médio dentre as repetições realizadas; M e  $X_{eq}$  são dados em kg água.kg ss<sup>-1</sup>.

# APÊNDICE D

## PLANILHA UTILIZADA PARA REGISTRO DOS DADOS COLETADOS DURANTE A REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE SECAGEM

<i>Experimento n° - data - hora - linha</i>			<i>UR do ar</i>	<i>T ar</i>			
<b>Variáveis</b>			<div style="text-align: center;"> <p>Curva de secagem - Exp. n°</p> </div>				
T entrada do ar (°C)							
h de produto (cm)							
Velocidade do ar (cm.s <sup>-1</sup> )							
t de residência (min)							
alternância fluxo (min)							
Umidade inicial (prod.)(%)							
Umidade final (prod.)(%)							
m seca inicial (g):							
Tara - m do cesto (g):							
<b>Dados da secagem</b>							
t (min)	m (g)	m líq (g)	X (%)	X bs (%)	T ar saída	X ar saída	T prod.
<b>X̄ (b.u.)</b>	<b>m tara</b>	<b>pré-sec</b>	<b>pós-sec</b>	<b>X̄ (%)</b>			
pré-sec I							
pós-sec							
t p/ 6,5%							

## APÊNDICE E

### DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NA DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM DA PTS TIPO I

onde M é o valor médio dentre as repetições realizadas; os parâmetros do processo – altura de camada de produto ( $h$ ), temperatura ( $T$ ) e velocidade ( $v$ ) do ar de secagem – são dados em cm, °C e  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivamente.

t (s)	$T=90; h=3; v=100$				$T=90; h=3; v=125$				$T=90; h=3; v=150$				
	$X_{adm}$				$X_{adm}$				$X_{adm}$				
	Exp 34	Exp 52	Exp 204	M	Exp 28	Exp 126	Exp 176	M	Exp 10	Exp 48	Exp 118	Exp 205	M
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,743	0,773	0,710	0,742	0,751	0,747	0,746	0,748	0,727	0,622	0,730	0,625	0,676
180	0,553	0,589	0,526	0,556	0,580	0,584	0,570	0,578	0,552	0,386	0,523	0,418	0,470
270	0,357	0,409	0,357	0,374	0,419	0,425	0,402	0,415	0,392	0,250	0,352	0,260	0,314
360	0,216	0,264	0,247	0,242	0,293	0,304	0,284	0,293	0,260	0,159	0,227	0,170	0,204
450	0,130	0,167	0,151	0,149	0,202	0,219	0,194	0,205	0,170	0,098	0,139	0,117	0,131
540	0,088	0,109	0,113	0,103	0,151	0,153	0,137	0,147	0,121	0,076	0,088	0,089	0,094
630	0,068	0,043	0,094	0,069	0,118	0,116	0,101	0,112	0,092	0,071	0,064	0,073	0,075
720	0,045	0,034	0,067	0,049	0,095	0,081	0,068	0,081	0,064	0,058	0,042	0,060	0,056
810	0,023	0,008	0,046	0,026	0,069	0,049	0,039	0,052	0,028	0,043	0,017	0,050	0,034
900	0,017	0,001	0,042	0,020	0,058	0,037	0,031	0,042	0,027	0,040	0,014	0,047	0,032

t (s)	$T=110; h=3; v=100$				$T=110; h=3; v=125$				$T=110; h=3; v=150$			
	$X_{adm}$				$X_{adm}$				$X_{adm}$			
	Exp 35	Exp 68	Exp 141	M	Exp 178	Exp 181	Exp 142	M	Exp 12	Exp 127	Exp 140	M
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,685	0,712	0,691	0,696	0,631	0,651	0,625	0,635	0,633	0,619	0,625	0,625
180	0,438	0,486	0,492	0,472	0,360	0,418	0,409	0,396	0,367	0,372	0,372	0,371
270	0,230	0,265	0,300	0,265	0,179	0,244	0,229	0,218	0,188	0,197	0,188	0,191
360	0,109	0,121	0,191	0,141	0,094	0,140	0,109	0,114	0,078	0,102	0,098	0,093
450	0,043	0,047	0,124	0,071	0,039	0,066	0,047	0,051	0,023	0,044	0,043	0,037
540	0,020	0,018	0,085	0,041	0,022	0,033	0,038	0,031	0,007	0,018	0,024	0,016
630	0,019	0,011	0,073	0,034	0,026	0,030	0,009	0,022				

t (s)	$T=130; h=3; v=100$				$T=130; h=3; v=125$				$T=130; h=3; v=150$			
	$X_{adm}$				$X_{adm}$				$X_{adm}$			
	Exp 33	Exp 64	Exp 39	M	Exp 32	Exp 153	Exp 206	M	Exp 27	Exp 67	Exp 155	M
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,693	0,702	0,670	0,689	0,584	0,637	0,580	0,600	0,574	0,477	0,563	0,538
180	0,444	0,456	0,412	0,437	0,295	0,356	0,305	0,319	0,285	0,231	0,264	0,260
270	0,226	0,226	0,203	0,219	0,113	0,165	0,094	0,124	0,139	0,072	0,111	0,107
360	0,091	0,074	0,078	0,081	0,024	0,069	0,018	0,037	0,033	0,006	0,048	0,029
450	0,017	0,005	0,006	0,006	0,016	0,021	0,014	0,003	0,005	0,001	0,009	0,009





t (s)	$T=130; h=6; v=100$				$T=130; h=6; v=125$				$T=130; h=6; v=150$				
	$X_{adm}$				$X_{adm}$				$X_{adm}$				
	Exp 38	Exp 51	Exp 249	M	Exp 31	Exp 69	Exp 152	M	Exp 180	Exp 66	Exp 182	Exp 154	M
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,828	0,830	0,835	0,831	0,763	0,864	0,814	0,814	0,810	0,866	0,774	0,834	0,821
180	0,705	0,688	0,713	0,702	0,604	0,738	0,673	0,671	0,648	0,756	0,620	0,713	0,684
270	0,572	0,547	0,564	0,561	0,472	0,604	0,531	0,536	0,485	0,643	0,466	0,593	0,547
360	0,447	0,408	0,444	0,433	0,332	0,486	0,407	0,408	0,353	0,531	0,345	0,484	0,428
450	0,362	0,316	0,361	0,346	0,242	0,406	0,316	0,322	0,260	0,455	0,258	0,401	0,344
540	0,281	0,224	0,282	0,262	0,160	0,330	0,239	0,243	0,179	0,389	0,185	0,317	0,267
630	0,220	0,156	0,206	0,194	0,105	0,267	0,183	0,185	0,123	0,323	0,127	0,251	0,206
720	0,152	0,083	0,141	0,125	0,044	0,198	0,121	0,121	0,065	0,255	0,071	0,181	0,143
810	0,107	0,039	0,101	0,082	0,019	0,154	0,079	0,084	0,028	0,209	0,034	0,131	0,101
900	0,072	0,005	0,061	0,046	0,001	0,116	0,044	0,054	0,002	0,170	0,013	0,088	0,068
990	0,056	-0,006	0,039	0,030	0,001	0,093	0,032	0,042	-0,001	0,138	0,011	0,066	0,053
1080	0,034		0,015	0,025	0,000	0,059	0,009	0,023					
1170	0,015			0,015	0,000	0,035	-0,012	0,008					

onde M é o valor médio dentre as repetições realizadas; os parâmetros do processo – altura de camada de produto ( $h$ ), temperatura ( $T$ ) e velocidade ( $v$ ) do ar de secagem – são dados em cm, °C e  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivamente.

# APÊNDICE F

## DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NA DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM DA PTS TIPO II

t (s)	T=90; h=2,5; v=100			T=90; h=2,5; v=125					T=90; h=2,5; v=150			
	$X_{adm}$			$X_{adm}$					$X_{adm}$			
	Exp56	Exp128	M	Exp20	Exp107	Exp183	Exp135	M	Exp16	Exp53	Exp115	M
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,817	0,765	0,791	0,696	0,680	0,752	0,746	0,718	0,637	0,690	0,732	0,686
180	0,693	0,633	0,663	0,512	0,473	0,589	0,572	0,536	0,428	0,502	0,554	0,494
270	0,558	0,500	0,529	0,373	0,313	0,430	0,403	0,380	0,306	0,357	0,408	0,357
360	0,435	0,396	0,415	0,262	0,203	0,313	0,280	0,265	0,214	0,250	0,292	0,252
450	0,343	0,318	0,330	0,197	0,129	0,221	0,193	0,185	0,148	0,176	0,220	0,182
540	0,271	0,252	0,262	0,168	0,097	0,168	0,132	0,141	0,120	0,138	0,172	0,143
630	0,211	0,208	0,210	0,155	0,085	0,141	0,122	0,125	0,106	0,116	0,140	0,121
720	0,155	0,157	0,156	0,130	0,067	0,113	0,095	0,101	0,088	0,095	0,118	0,100
810	0,111	0,117	0,114	0,107	0,042	0,082	0,070	0,075	0,067	0,072	0,090	0,076
900	0,084	0,094	0,089	0,095	0,036	0,067	0,053	0,063	0,058	0,065	0,080	0,068

t (s)	T=90; h=5; v=100			T=90; h=5; v=125			T=90; h=5; v=150		
	$X_{adm}$			$X_{adm}$			$X_{adm}$		
	Exp 73	Exp 134	M	Exp 105	Exp 136	M	Exp 55	Exp 117	M
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,880	0,886	0,883	0,835	0,850	0,842	0,857	0,878	0,868
180	0,822	0,832	0,827	0,761	0,774	0,768	0,783	0,809	0,796
270	0,766	0,786	0,776	0,687	0,711	0,699	0,708	0,737	0,722
360	0,710	0,737	0,724	0,616	0,642	0,629	0,632	0,668	0,650
450	0,661	0,690	0,676	0,554	0,581	0,568	0,568	0,609	0,589
540	0,621	0,653	0,637	0,500	0,528	0,514	0,514	0,557	0,536
630	0,584	0,617	0,601	0,457	0,480	0,469	0,465	0,509	0,487
720	0,536	0,579	0,558	0,404	0,423	0,413	0,409	0,456	0,433
810	0,497	0,541	0,519	0,359	0,376	0,368	0,364	0,411	0,387
900	0,468	0,512	0,490	0,324	0,337	0,330	0,328	0,374	0,351
990	0,441	0,485	0,463	0,295	0,305	0,300	0,297	0,343	0,320
1080	0,406	0,453	0,429	0,256	0,264	0,260	0,256	0,302	0,279
1170	0,374	0,419	0,396	0,217	0,227	0,222	0,223	0,268	0,246
1260	0,353	0,396	0,375	0,185	0,197	0,191	0,196	0,240	0,218
1350	0,335	0,365	0,350	0,164	0,179	0,172	0,177	0,221	0,199
1440	0,308	0,341	0,324	0,151	0,150	0,151	0,146	0,191	0,169
1530	0,281	0,325	0,303	0,127	0,124	0,125	0,121	0,167	0,144
1620	0,266	0,299	0,282	0,105	0,109	0,107	0,104	0,148	0,126
1710	0,252	0,273	0,263	0,092	0,101	0,097	0,094	0,139	0,117
1800	0,229	0,260	0,244	0,087	0,086	0,087	0,078	0,121	0,099
1890	0,207	0,248	0,227	0,073	0,067	0,070	0,062	0,105	0,083
1980	0,195	0,229	0,212	0,058	0,061	0,059	0,054	0,095	0,075
2070	0,185	0,207	0,196	0,052	0,058	0,055	0,052	0,093	0,072
2160	0,169	0,195	0,182						
2250	0,151	0,189	0,170						
2340	0,142	0,172	0,157						



t (s)	$T=130; h=2,5; v=100$				$T=130; h=2,5; v=125$			$T=130; h=2,5; v=150$		
	$X_{adm}$				$X_{adm}$			$X_{adm}$		
	Exp 42	Exp 110	Exp 150	M	Exp 111	Exp 149	M	Exp 58	Exp 131	M
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,674	0,716	0,720	0,703	0,715	0,701	0,708	0,653	0,660	0,656
180	0,482	0,505	0,511	0,499	0,412	0,488	0,450	0,381	0,405	0,393
270	0,316	0,317	0,311	0,315	0,240	0,298	0,269	0,193	0,246	0,220
360	0,191	0,153	0,180	0,175	0,124	0,170	0,147	0,084	0,158	0,121
450	0,120	0,075	0,108	0,101	0,065	0,100	0,082	0,033	0,104	0,068
540	0,078	0,042	0,066	0,062	0,032	0,055	0,044	0,023	0,079	0,051
630	0,065	0,036	0,056	0,052		0,049	0,049	0,014	0,079	0,046
720	0,048	0,023	0,042	0,038		0,030	0,030	0,007		0,007
810	0,020		0,017	0,018		0,007	0,007			

t (s)	$T=130; h=5; v=100$			$T=130; h=5; v=125$			$T=130; h=5; v=150$		
	$X_{adm}$			$X_{adm}$			$X_{adm}$		
	Exp 57	Exp 129	M	Exp 60	Exp 132	M	Exp 109	Exp 151	M
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,892	0,878	0,885	0,851	0,863	0,857	0,813	0,826	0,820
180	0,826	0,818	0,822	0,758	0,785	0,771	0,702	0,717	0,710
270	0,759	0,732	0,745	0,666	0,702	0,684	0,603	0,597	0,600
360	0,689	0,665	0,677	0,572	0,624	0,598	0,500	0,490	0,495
450	0,628	0,597	0,612	0,503	0,554	0,528	0,423	0,410	0,416
540	0,582	0,551	0,566	0,443	0,501	0,472	0,345	0,336	0,340
630	0,536	0,508	0,522	0,392	0,449	0,421	0,290	0,278	0,284
720	0,483	0,458	0,470	0,330	0,391	0,360	0,223	0,205	0,214
810	0,437	0,412	0,425	0,282	0,339	0,310	0,172	0,157	0,165
900	0,404	0,381	0,392	0,243	0,298	0,271	0,129	0,119	0,124
990	0,377	0,355	0,366	0,214	0,269	0,241	0,102	0,103	0,103
1080	0,337	0,324	0,330	0,170	0,226	0,198	0,064	0,073	0,068
1170	0,297	0,284	0,291	0,135	0,188	0,162	0,037	0,048	0,043
1260	0,274	0,260	0,267	0,113	0,162	0,137	0,020	0,036	0,028
1350	0,255	0,242	0,249	0,099	0,144	0,122			
1440	0,226	0,217	0,221	0,069	0,115	0,092			
1530	0,196	0,186	0,191	0,045	0,088	0,066			
1620	0,178	0,169	0,173	0,030	0,069	0,050			
1710	0,166	0,157	0,161	0,028	0,064	0,046			
1800	0,144	0,142	0,143	0,016	0,046	0,031			
1890	0,120	0,115	0,118	0,001	0,028	0,014			
1980	0,106	0,103	0,105						
2070	0,097	0,097	0,097						
2160	0,079	0,078	0,079						
2250	0,059	0,059	0,059						
2340	0,047	0,049	0,048						
2430	0,045	0,046	0,046						

onde M é o valor médio dentre as repetições realizadas; os parâmetros do processo – altura de camada de produto ( $h$ ), temperatura ( $T$ ) e velocidade ( $v$ ) do ar de secagem – são dados em cm, °C e  $\text{cm.s}^{-1}$ , respectivamente.

## APÊNDICE G

### DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NA DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM DA PTS TIPO III

t (s)	$T=90; h=5; v=100$			$T=90; h=5; v=125$			$T=90; h=5; v=150$		
	$X_{adm}$			$X_{adm}$			$X_{adm}$		
	Exp 160	Exp 253	M	Exp 158	Exp 254	M	Exp 84	Exp 197	M
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,867	0,827	0,847	0,826	0,822	0,824	0,856	0,773	0,814
180	0,782	0,720	0,751	0,724	0,704	0,714	0,728	0,654	0,691
270	0,702	0,635	0,669	0,648	0,611	0,629	0,637	0,560	0,599
360	0,631	0,559	0,595	0,574	0,522	0,548	0,565	0,480	0,522
450	0,558	0,492	0,525	0,503	0,439	0,471	0,498	0,414	0,456
540	0,515	0,443	0,479	0,455	0,393	0,424	0,450	0,371	0,410
630	0,477	0,399	0,438	0,418	0,358	0,388	0,412	0,340	0,376
720	0,438	0,365	0,401	0,376	0,315	0,346	0,371	0,301	0,336
810	0,398	0,318	0,358	0,336	0,271	0,303	0,331	0,264	0,298
900	0,373	0,300	0,337	0,318	0,248	0,283	0,304	0,246	0,275
990	0,356	0,278	0,317	0,304	0,231	0,267	0,290	0,233	0,261
1080	0,332	0,256	0,294	0,281	0,214	0,248	0,268	0,218	0,243
1170	0,309	0,233	0,271	0,260	0,189	0,224	0,245	0,200	0,222
1260	0,288	0,211	0,249	0,246	0,170	0,208	0,231	0,188	0,209
1350	0,280	0,216	0,248	0,244	0,162	0,203	0,227	0,186	0,207
1440	0,263	0,202	0,232						
1530	0,245	0,189	0,217						
1620	0,237	0,184	0,210						

t (s)	$T=110; h=5; v=100$			$T=110; h=5; v=125$				$T=110; h=5; v=150$		
	$X_{adm}$			$X_{adm}$				$X_{adm}$		
	Exp 159	Exp 255	M	Exp 75	Exp 195	Exp 200	M	Exp 89	Exp 201	M
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,821	0,758	0,790	0,814	0,793	0,759	0,789	0,771	0,773	0,772
180	0,707	0,651	0,679	0,678	0,664	0,621	0,654	0,632	0,643	0,638
270	0,603	0,510	0,557	0,565	0,559	0,508	0,544	0,524	0,548	0,536
360	0,512	0,415	0,464	0,465	0,475	0,419	0,453	0,427	0,469	0,448
450	0,424	0,328	0,376	0,380	0,396	0,350	0,375	0,346	0,396	0,371
540	0,373	0,275	0,324	0,324	0,347	0,306	0,325	0,289	0,346	0,317
630	0,332	0,248	0,290	0,283	0,315	0,274	0,291	0,247	0,322	0,285
720	0,286	0,214	0,250	0,236	0,279	0,243	0,253	0,205	0,287	0,246
810	0,244	0,178	0,211	0,195	0,245	0,188	0,210	0,163	0,244	0,204
900	0,222	0,159	0,190	0,173	0,225	0,170	0,189	0,141	0,228	0,184
990	0,210	0,128	0,169	0,161	0,219	0,167	0,183	0,129	0,221	0,175
1080	0,188	0,115	0,152	0,141	0,201	0,162	0,168	0,112	0,208	0,160
1170	0,170	0,105	0,138	0,120	0,195	0,137	0,150	0,092	0,187	0,139
1260	0,157	0,091	0,124	0,109	0,179	0,128	0,139	0,082	0,178	0,130
1350	0,153	0,107	0,130	0,108	0,179	0,140	0,142	0,081	0,185	0,133

t (s)	<i>T=130; h=5; v=100</i>			<i>T=130; h=5; v=125</i>			<i>T=130; h=5; v=150</i>		
	<i>X<sub>adm</sub></i>			<i>X<sub>adm</sub></i>			<i>X<sub>adm</sub></i>		
	Exp 76	Exp 196	M	Exp 79	Exp 203	M	Exp 77	Exp 199	M
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,768	0,788	0,778	0,768	0,746	0,757	0,756	0,718	0,737
180	0,613	0,628	0,620	0,607	0,588	0,598	0,588	0,564	0,576
270	0,477	0,487	0,482	0,477	0,468	0,472	0,462	0,446	0,454
360	0,361	0,380	0,371	0,365	0,377	0,371	0,358	0,359	0,359
450	0,267	0,290	0,278	0,273	0,295	0,284	0,271	0,283	0,277
540	0,206	0,238	0,222	0,215	0,244	0,229	0,211	0,229	0,220
630	0,165	0,206	0,185	0,173	0,217	0,195	0,172	0,204	0,188
720	0,127	0,172	0,150	0,131	0,187	0,159	0,135	0,177	0,156
810	0,091	0,106	0,098	0,097	0,147	0,122	0,094	0,139	0,117
900	0,077	0,093	0,085	0,080	0,130	0,105	0,075	0,128	0,102
990	0,071	0,091	0,081	0,075	0,132	0,104	0,071	0,111	0,091
1080	0,060	0,082	0,071						
1170	0,045	0,062	0,054						
1260	0,038	0,061	0,049						

t (s)	<i>T=90; h=10; v=100</i>			<i>T=90; h=10; v=125</i>			<i>T=90; h=10; v=150</i>		
	<i>X<sub>adm</sub></i>			<i>X<sub>adm</sub></i>			<i>X<sub>adm</sub></i>		
	Exp 163	Exp 256	M	Exp 90	Exp 257	M	Exp 14	Exp 194	M
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,886	0,819	0,852	0,842	0,825	0,833	0,844	0,830	0,837
180	0,823	0,738	0,781	0,759	0,711	0,735	0,750	0,739	0,745
270	0,761	0,661	0,711	0,675	0,608	0,642	0,669	0,657	0,663
360	0,706	0,594	0,650	0,598	0,535	0,567	0,592	0,582	0,587
450	0,653	0,528	0,591	0,527	0,461	0,494	0,522	0,513	0,518
540	0,611	0,484	0,548	0,480	0,406	0,443	0,475	0,460	0,468
630	0,573	0,437	0,505	0,434	0,364	0,399	0,433	0,421	0,427
720	0,534	0,388	0,461	0,385	0,331	0,358	0,389	0,379	0,384
810	0,487	0,347	0,417	0,340	0,289	0,314	0,345	0,329	0,337
900	0,444	0,319	0,382	0,310	0,256	0,283	0,317	0,301	0,309
990	0,399	0,286	0,343	0,285	0,249	0,267	0,295	0,289	0,292
1080	0,368	0,252	0,310	0,260	0,232	0,246	0,269	0,263	0,266
1170	0,345	0,223	0,284	0,229	0,214	0,221	0,242	0,245	0,243
1260	0,330	0,204	0,267	0,210	0,199	0,205	0,225	0,221	0,223
1350	0,317	0,188	0,252	0,197	0,195	0,196	0,215	0,214	0,214
1440	0,300	0,177	0,239	0,179	0,188	0,184	0,200	0,199	0,199
1530	0,282	0,152	0,217	0,161	0,175	0,168	0,181	0,186	0,183
1620	0,271	0,141	0,206	0,150	0,170	0,160	0,171	0,171	0,171
1710	0,263	0,133	0,198	0,143	0,165	0,154	0,168	0,169	0,168
1800	0,251	0,122	0,186	0,132	0,163	0,148	0,159	0,164	0,161
1890	0,238	0,109	0,173				0,145	0,149	0,147
1980	0,229	0,103	0,166						
2070	0,224	0,098	0,161						

t (s)	<b>T=110; h=10; v=100</b>			<b>T=110; h=10; v=125</b>			<b>T=110; h=10; v=150</b>		
	<i>X<sub>adm</sub></i>			<i>X<sub>adm</sub></i>			<i>X<sub>adm</sub></i>		
	<b>Exp 161</b>	<b>Exp 162</b>	<b>M</b>	<b>Exp 85</b>	<b>Exp 258</b>	<b>M</b>	<b>Exp 78</b>	<b>Exp 198</b>	<b>M</b>
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,869	0,856	0,862	0,818	0,789	0,803	0,766	0,794	0,780
180	0,779	0,777	0,778	0,702	0,673	0,687	0,643	0,671	0,657
270	0,695	0,706	0,700	0,584	0,553	0,568	0,540	0,569	0,554
360	0,619	0,635	0,627	0,490	0,458	0,474	0,447	0,460	0,454
450	0,549	0,570	0,560	0,410	0,373	0,391	0,366	0,396	0,381
540	0,496	0,519	0,507	0,353	0,307	0,330	0,301	0,340	0,320
630	0,449	0,472	0,461	0,304	0,249	0,276	0,240	0,295	0,267
720	0,402	0,423	0,413	0,253	0,201	0,227	0,190	0,251	0,221
810	0,357	0,377	0,367	0,209	0,156	0,182	0,145	0,214	0,179
900	0,329	0,343	0,336	0,185	0,125	0,155	0,115	0,190	0,152
990	0,307	0,315	0,311	0,167	0,107	0,137	0,091	0,170	0,131
1080	0,281	0,283	0,282	0,145	0,083	0,114	0,067	0,153	0,110
1170	0,254	0,252	0,253	0,123	0,054	0,089	0,041	0,132	0,086
1260	0,239	0,231	0,235	0,111	0,049	0,080	0,027	0,121	0,074
1350	0,231	0,216	0,223	0,105	0,042	0,074	0,021	0,119	0,070
1440	0,216	0,196	0,206	0,096	0,030	0,063	0,009	0,106	0,058
1530	0,201	0,174	0,187	0,083	0,020	0,052	-0,004	0,094	0,045
1620	0,193	0,162	0,177	0,078	0,012	0,045	-0,011	0,089	0,039
1710	0,191	0,154	0,173	0,078	0,016	0,047	-0,012	0,093	0,041

t (s)	<b>T=130; h=10; v=100</b>			<b>T=130; h=10; v=125</b>			<b>T=130; h=10; v=150</b>		
	<i>X<sub>adm</sub></i>			<i>X<sub>adm</sub></i>			<i>X<sub>adm</sub></i>		
	<b>Exp 82</b>	<b>Exp 202</b>	<b>M</b>	<b>Exp 80</b>	<b>Exp 259</b>	<b>M</b>	<b>Exp 81</b>	<b>Exp 260</b>	<b>M</b>
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
90	0,828	0,843	0,836	0,806	0,768	0,787	0,779	0,743	0,761
180	0,715	0,714	0,715	0,666	0,615	0,640	0,618	0,559	0,589
270	0,599	0,593	0,596	0,518	0,476	0,497	0,486	0,397	0,442
360	0,488	0,483	0,485	0,414	0,368	0,391	0,362	0,279	0,320
450	0,400	0,407	0,404	0,331	0,275	0,303	0,284	0,179	0,231
540	0,333	0,347	0,340	0,266	0,211	0,238	0,221	0,115	0,168
630	0,265	0,298	0,281	0,217	0,164	0,191	0,173	0,062	0,117
720	0,204	0,251	0,228	0,167	0,122	0,145	0,129	0,022	0,076
810	0,158	0,210	0,184	0,128	0,090	0,109	0,095	-0,011	0,042
900	0,127	0,186	0,157	0,107	0,074	0,091	0,076	-0,031	0,022
990	0,105	0,170	0,138	0,096	0,068	0,082	0,071	-0,035	0,018
1080	0,079	0,152	0,116	0,081	0,060	0,071	0,062	-0,041	0,011
1170	0,058	0,131	0,094	0,066	0,041	0,053	0,045	-0,055	-0,005
1260	0,047	0,121	0,084	0,059	0,037	0,048	0,039	-0,059	-0,010
1350	0,042	0,119	0,081	0,058	0,042	0,050	0,040	-0,057	-0,008
1440	0,033	0,111	0,072						
1530	0,021	0,098	0,060						
1620	0,017	0,095	0,056						
1710	0,017	0,097	0,057						