

Universidade Federal de São Carlos  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Química

## Secagem de Gel Ágar

Marcos Flávio Pinto Moreira

São Carlos – SP  
2000

Universidade Federal de São Carlos  
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Química

## Secagem de Gel Ágar

Marcos Flávio Pinto Moreira

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

São Carlos – SP  
2000

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

M838sg

Moreira, Marcos Flávio Pinto.

Secagem de gel ágar / Marcos Flávio Pinto Moreira. --  
São Carlos : UFSCar, 2000.  
104 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São  
Carlos, 2000.

1. Secagem. 2. Processos de secagem e evaporação. 3.  
Isotermas de equilíbrio. 4. Cinética de secagem. 5. Colóides.  
6. Ágar. I. Título.

CDD: 660.28426 (20<sup>a</sup>)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **MARCOS FLÁVIO PINTO MOREIRA**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 29 DE FEVEREIRO DE 2000.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori  
**PPG-EQ/UFSCar**



Prof. Dr. José Romário Lima Verde  
**DEQ/UFU**



Prof. Dr. Ronaldo Guimarães Corrêa  
**PPG-EQ/UFSCar**

*“Tudo posso naquele que me fortalece.” (Filipenses 4, 13)*

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado aos meus pais Derci Angelo Moreira e Gelma Pinto Moreira, que muito fizeram para que eu chegasse até aqui; aos meus irmãos queridos, Róbson Fabrício Pinto Moreira e Tiago Juliano Pinto Moreira; à minha esposa Fernanda e à minha filha Giovanna por todo o amor, carinho e compreensão.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori, pela acolhida, pela paciência, pelo profissionalismo, pela compreensão, pela dedicação, pelo “full time” e pelo carinho com que me orientou, ao Prof. Dr. José Teixeira Freire pelos seus ensinamentos e pelo carinho e aos demais professores do DEQ-UFSCar, especialmente ao Prof. Dr. Ronaldo Guimarães Corrêa, à Prof<sup>a</sup> Dra. Ana Maria da Silveira e à Prof<sup>a</sup> Dra. Maria do Carmo Ferreira pelo carinho e pelas contribuições que deram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu tio Doar Moreira pelo carinho e apoio numa hora tão difícil, ao Sr. Adão Marques pelas orações e pelo carinho, à Sra. Luzia Pedrazzani pelo apoio e pelo carinho, aos meus sogros Ubirajara e Rosália pelo apoio constante, pela amizade e por todo o carinho. Também ao Garnizé e à Daniela pela amizade.

Aos técnicos e secretárias do DEQ-UFSCar, especialmente ao Sr. Oscar da Silva e à Sra. Alzira Gonzalez pelo auxílio e pela amizade.

Aos meus amigos e colegas, especialmente à Cris, ao Manoel, ao Sidnelson, à Paula, à Ione e ao Percy pela amizade e contribuições ao trabalho.

À minha família pelo apoio, compreensão e incentivo que deram no decorrer deste trabalho e a todos os amigos.

Ao CNPq, CAPES, PRONEX/FINEP pelo apoio financeiro.

A Deus, ao Nosso Senhor Jesus Cristo e à Sua Mãe que me auxiliam nessa caminhada.

## RESUMO

O ágar é um colóide hidrofílico usado nos setores de microbiologia e alimentos, entre outros. Uma das operações mais importantes no processo de obtenção do ágar é a secagem. Com o objetivo de estudar a secagem do gel ágar faz-se necessária a realização das determinações das isotermas de equilíbrio e experimentos de secagem. O equilíbrio ágar-água-ar foi estudado via método gravimétrico estático com soluções salinas saturadas, nas temperaturas de 25 a 50°C e umidades relativas do ar de 11 a 84% e os experimentos de secagem foram realizados em um secador de convecção forçada nas temperaturas de 35 a 50°C e velocidades superficiais do ar de 1,0 a 4,0 m/s. A determinação da umidade baseou-se no método de Lees. O modelo G.A.B. (Guggenheim-Anderson-de Boer) representou bem o equilíbrio entre os modelos analisados. Constatou-se, através da equação de Lewis, que a temperatura e a velocidade do ar influenciam a cinética de secagem do gel. Constatou-se ainda que a secagem do gel no período de taxa constante de secagem é similar à da água. Este período de secagem foi representado por uma relação para evaporação da água e o período de taxa decrescente por uma curva característica generalizada. Todos os resultados obtidos sobre a transferência de massa na secagem do gel ágar servem de contribuição para a continuidade dos estudos sobre o processo de obtenção do ágar, servindo também de base para a busca de diferentes tipos de secadores convectivos e de condições ótimas de operação ligadas à relação “custo de produção x produção”.

## ABSTRACT

Agar-agar is a hydrophilic colloid extracted from seaweed, mainly from algae *Gelidium*. It's used as culture medium in microbiology and as emulsificant, stabilizer and gelling in foods. Drying is an important operation in the extractive process to obtain Agar-agar, because it defines the form, color and final moisture content of product. In order to study the drying of agar gel, equilibrium and drying experiments are needed. The equilibrium of agar-water-air was investigated using the static gravimetric method and drying experiments were performed in a forced convection dryer. To determine equilibrium moisture content values, the static method was used with saturated saline solutions where operational conditions of temperature and relative humidity ranged from 25.0°C to 50.0°C and 11.0% to 84.0%, respectively. The determination of moisture content was based on Lees' method. The drying experiments were performed with temperatures from 30.0°C to 50.0°C and superficial air velocities from 1.0 to 4.0 m/s. Based on the experimental procedure above, the equilibrium of agar-water-air could be reasonable described by the G.A.B. (Guggenheim-Anderson-de Boer) model. It was verified, using Lewis' equation, that temperature and velocity of air influence the drying operation. Finally, at a constant drying rate, the drying of agar gel and water are very similar. The constant drying rate of agar gel has been represented by a relationship for evaporation of water. The decreasing drying rate of agar gel was represented by the characteristic curve. All results obtained in this work serve as contribution to the process to obtain the agar, which utilizes the drying.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
SUMÁRIO.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	ix
NOMENCLATURA.....	xi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 O ÁGAR.....	5
2.2 SECAGEM.....	7
2.2.1 Curvas de Secagem.....	8
2.2.2 Classificação dos Sólidos para a Secagem.....	10
2.2.3 Secagem do Gel Ágar.....	11
2.2.4 Propriedades Físicas Envolvidas na Secagem do Material.....	14
2.2.4.1 Encolhimento.....	16
2.2.4.2 Equilíbrio Termodinâmico do Sistema Ágar-água-ar.....	18
2.2.4.3 Constante de Secagem.....	22
2.3 MODELOS PARA REPRESENTAÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM...23	
2.3.1 Modelos Teóricos de Secagem.....	24

2.3.2 Modelos Semi-Empíricos de Secagem.....	25
2.3.3 Modelos Empíricos de Secagem.....	27
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 O ÁGAR.....	30
3.2 SECADOR DE CONVECÇÃO FORÇADA .....	31
3.2.1 Técnicas de Medidas.....	32
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	32
3.3.1 Preparação do Gel.....	32
3.3.2 Caracterização do Ágar.....	33
3.3.3 Determinação das Isotermas de Equilíbrio.....	35
3.3.4 Operações da Unidade de Secagem.....	38
3.4 TRATAMENTO DOS DADOS.....	40
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1 PREPARAÇÃO DO GEL.....	42
4.2 ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO.....	43
4.3 CINÉTICA DE SECAGEM.....	49
4.3.1 Reprodutibilidade dos Experimentos.....	50
4.3.2 Encolhimento.....	51
4.3.3 Variação do Adimensional de Umidade em função do Tempo.....	52
4.3.4 Períodos de Secagem.....	54
4.3.5 Verificação da Influência da Temperatura e da Velocidade do Ar na	

Cinética.....	62
4.3.6 Representação dos Períodos de Secagem.....	64
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	71
CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
ANEXO A – EQUILÍBRIO ÁGAR-ÁGUA-AR.....	80
ANEXO B – CURVAS DE SECAGEM E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	85
ANEXO C – DADOS DOS EXPERIMENTOS DE SECAGEM.....	90

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Esquema da unidade de secagem utilizada.....	31
Figura 3.2. Recipiente usado nos testes de equilíbrio.....	37
Figura 3.3. Suporte das amostras.....	38
Figura 4.1. Umidades de equilíbrio em função da umidade relativa para as temperaturas de 25, 40 e 50°C.....	44
Figura 4.2. Distribuição dos resíduos para o modelo G.A.B.....	47
Figura 4.3. Distribuição dos resíduos para o modelo Halsey modificado.....	47
Figura 4.4. Distribuição dos resíduos para o modelo Henderson-Thompson.....	48
Figura 4.5. Adimensional de umidade em função do tempo para as réplicas.....	50
Figura 4.6. Diâmetro do gel em função da espessura (1,0 m/s e 35°C).....	51
Figura 4.7. Efeito da velocidade do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo (T=40°C).....	53
Figura 4.8. Efeito da temperatura do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo (v=2,0 m/s).....	54
Figura 4.9. Densidade de fluxo de massa em função do tempo (3 m/s e 45°C).....	55
Figura 4.10. Densidade de fluxo de massa em função da umidade do gel em base seca (3,0 m/s e 45°C).....	58
Figura 4.11. Diâmetro do gel em função do tempo (3,0 m/s e 45°C).....	59

Figura 4.12. D.f.m.m. do período de taxa constante de secagem do gel ágar em função da velocidade do ar de secagem, parametrizado na temperatura do ar de secagem.....	60
Figura 4.13. Duração do experimento em função da velocidade do ar de secagem.....	61
Figura 4.14. K em função da velocidade e da temperatura do ar de secagem.....	62
Figura 4.15. Densidade de fluxo de massa em função da velocidade para o gel e para a água.....	65
Figura 4.16. Densidade de fluxo de massa em função da velocidade e temperatura do ar. (Comparação entre ajuste e pontos experimentais).....	68
Figura 4.17. Curva generalizada para a secagem do gel ágar.....	70
Figura A1. Distribuição de resíduos para o modelo de Chen & Clayton.....	81
Figura A2. Distribuição de resíduos para o modelo de Chung & Pfof.....	81
Figura A3. Distribuição de resíduos para o modelo de Halsey.....	82
Figura A4. Distribuição de resíduos para o modelo de Luikov.....	82
Figura A5. Distribuição de resíduos para o modelo de Henderson.....	83
Figura A6. Comparação entre o modelo G.A.B. e os dados de equilíbrio.....	83
Figura A7. Distribuição dos resíduos do modelo G.A.B.....	84
Figura B1. Efeito da velocidade do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo (T=35°C).....	86
Figura B2. Efeito da velocidade do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo (T=45°C).....	86

Figura B3. Efeito da velocidade do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo ( $T=50^{\circ}\text{C}$ ).....	87
Figura B4. Efeito da temperatura do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo ( $v=1,0\text{ m/s}$ ).....	87
Figura B5. Efeito da temperatura do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo ( $v=3,0\text{ m/s}$ ).....	88
Figura B6. Efeito da temperatura do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo ( $v=4,0\text{ m/s}$ ).....	88

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1. Modelos de Isotermas de Equilíbrio.....	20
Tabela 2.2. Modelos empíricos de secagem.....	29
Tabela 3.1. Umidade relativa das soluções salinas em função da temperatura....	36
Tabela 4.1. Umidades de equilíbrio (%bu).....	43
Tabela 4.2. Valores de E e $r^2$ para os modelos estudados.....	46
Tabela 4.3. Porcentagem de tempo do processo a taxa constante.....	56
Tabela 4.4. Umidades críticas para cada experimento (bs).....	57
Tabela 4.5. Análise de Variância das Constantes de Secagem.....	63
Tabela 4.6. Densidades de fluxo de massa experimentais do gel ágar (kg/h.m <sup>2</sup> ).....	67
Tabela 4.7. Densidades de fluxo de massa estimadas do gel ágar (kg/h.m <sup>2</sup> ).....	67
Tabela A1. Valores dos parâmetros dos modelos de previsão do equilíbrio.....	84
Tabela B1. Diferenças entre os valores de K (determinação de significâncias)....	89
Tabela C1. Experimentos de secagem a 4,0 m/s e 50°C.....	91
Tabela C2. Experimentos de secagem a 3,0 m/s e 50°C.....	91
Tabela C3. Experimentos de secagem a 2,0 m/s e 50°C.....	92
Tabela C4. Experimentos de secagem a 1,0 m/s e 50°C.....	93
Tabela C5. Experimentos de secagem a 4,0 m/s e 45°C.....	94
Tabela C6. Experimentos de secagem a 3,0 m/s e 45°C.....	94
Tabela C7. Experimentos de secagem a 2,0 m/s e 45°C.....	95

Tabela C8. Experimentos de secagem a 1,0 m/s e 45°C.....	96
Tabela C9. Experimentos de secagem a 4,0 m/s e 40°C.....	97
Tabela C10. Experimentos de secagem a 3,0 m/s e 40°C.....	97
Tabela C11. Experimentos de secagem a 2,0 m/s e 40°C.....	98
Tabela C12. Experimentos de secagem a 1,0 m/s e 40°C.....	99
Tabela C13. Experimentos de secagem a 4,0 m/s e 35°C.....	100
Tabela C14. Experimentos de secagem a 3,0 m/s e 35°C.....	101
Tabela C15. Experimentos de secagem a 2,0 m/s e 35°C.....	102
Tabela C16. Experimentos de secagem a 1,0 m/s e 35°C.....	103
Tabela C17. Massas secas de cada amostra.....	104
Quadro 2.1. Vantagens e desvantagens dos modelos empíricos.....	23
Quadro 2.2. Vantagens e desvantagens dos modelos difusivos (semi-empíricos).....	24
Quadro 2.3. Vantagens e desvantagens dos modelos teóricos.....	24

## NOMENCLATURA

$C_p$	calor específico, $[L^2T^{-2}\theta^{-1}]$
$D$	diâmetro, $[L]$
$D$	coeficiente de difusão, $[L^2T^{-1}]$
$D_{EF}$	difusividade efetiva, $[L^2T^{-1}]$
d.m.s.	diferença mínima significativa, $[T^{-1}]$
$h$	coeficiente de transferência de calor, $[MT^{-3}\theta^{-1}]$
$h_D$	coeficiente de transferência de massa, $[LT^{-1}]$
$k$	condutividade térmica, $[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
$K$	constante de secagem, $[T^{-1}]$
$L$	espessura, $[L]$
$L_o$	espessura inicial, $[L]$
$N$	densidade de fluxo de massa, $[ML^{-2}T^{-1}]$
$N_{cr}$	densidade de fluxo de massa crítica, $[ML^{-2}T^{-1}]$
$P$	pressão, $[ML^{-1}T^{-2}]$
$P_{total}$	pressão total, $[ML^{-1}T^{-2}]$
$P_{ar}$	pressão do ar, $[ML^{-1}T^{-2}]$
$P_{H_2O\ sat}$	pressão do vapor de água na superfície do material, $[ML^{-1}T^{-2}]$
$P_{H_2O\ ar}$	pressão de vapor de água no ar, $[ML^{-1}T^{-2}]$
$QM_{resíduo}$	Quadrado médio dos resíduos, $[T^{-2}]$
$R$	constante universal dos gases, $[ML^2T^{-2}\theta^{-1}]$
$t$	tempo, $[T]$

T	temperatura, [ $\theta$ ]
v	velocidade, [ $LT^{-2}$ ]
$v_{ar}$	velocidade do ar, [ $LT^{-2}$ ]
V	volume, [ $L^3$ ]
$V_{\acute{a}gua}$	volume de água, [ $L^3$ ]
$V_s$	volume do sólido seco, [ $L^3$ ]
x	diâmetro da amostra, [L]

#### Adimensionais

bs	base seca
bu	base úmida
E	erro médio percentual
Fo(s)	$D.t/(L^2)$ , número de Fourier
Le	$Sc/Pr$ , número de Lewis
n	número de experimentos
p	número de parâmetros
Pr	$\mu \cdot Cp/(k)$ , número de Prandtl
q	parâmetro de Tukey
r	coeficiente de determinação
r	número de repetições
$r^2$	coeficiente de correlação
Sc	$\mu/(\rho \cdot D)$ , número de Schmidt
$S_r$	desvio padrão dos resíduos

$S_t$	desvio padrão da média
UR	umidade relativa
X	umidade, (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ss</sub> )
$\bar{X}$	umidade média, (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ss</sub> )
$\bar{X}_e$	média experimental, (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ss</sub> )
$X_{bs}$	umidade em base seca, (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ss</sub> )
$X_{cr}$	umidade crítica, (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ss</sub> )
$X_{esti}$	valor estimado da umidade, (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ss</sub> )
$X_{expi}$	valor experimental da umidade, (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ss</sub> )
$X_o$	umidade inicial, (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ss</sub> )
$X_e$	umidade de equilíbrio, (kg <sub>água</sub> /kg <sub>ss</sub> )
W	$(\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e})$ , adimensional de umidade

#### Letras Gregas

$\rho$	massa específica, [ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_s$	massa específica do sólido seco, [ML <sup>-3</sup> ]
$\mu$	viscosidade, [ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup> ]

## Adimensionais

$\varepsilon$             coeficiente de retração

$\nu$              $\frac{N(\bar{X})}{N(X_0)}$ , taxa de secagem adimensionalizada

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O ágar é um colóide hidrofílico extraído de certas algas marinhas. Provem principalmente das famílias de algas *Gracilaraceae* e *Gelidiaceae*. Um dos gêneros mais importantes para a sua obtenção é o gênero *Gelidium* pertencente à classe Rhodophyceae (Food Chemical Codex, 1980).

Segundo Selby & Wynne (1973), foi em torno de 1866 que começou na Europa o uso de ágar em alimentos. Em 1881 foi usado no crescimento de colônias de bactérias por W. Hesse. Poller descobriu em 1924 que o ágar tem a capacidade de ser moldado, abrindo desta forma o campo do uso de material de impressão para criminologistas, dentistas, cirurgiões plásticos, preparadores de museus e artistas em geral.

As aplicações atuais se fazem na microbiologia como um meio de cultivo, como material de impressão em odontologia, criminologia e outros. Em alimentos, embora o ágar seja praticamente indigerível, é usado pelas propriedades emulsificantes, estabilizantes, geleificantes e pela resistência que apresenta ao calor. Na medicina o gel ágar é usado em supositórios, em lubrificantes cirúrgicos e em alguns medicamentos como suporte. No laboratório o uso do ágar nas determinações turbidimétricas pode aumentar a precisão na determinação do tamanho de partícula. Na separação de toxinas bacteriológicas,

para estimar o tamanho de cadeia de ácidos nucleicos, no fracionamento de substâncias antibióticas e antimicoplasma, na separação e purificação de enzimas e em cremes e loções, encontra-se o auxílio do ágar. Tem seu uso ainda na indústria fotográfica, na indústria do aço, do papel e do cimento. Tem habilidades na troca catiônica, na inibição da corrosão do ferro e muitas outras propriedades e aplicações.

Segundo Selby & Wynne (1973), um dos processos usados nos Estados Unidos para a obtenção do ágar, emprega várias operações.

Uma das operações mais importantes do processo de obtenção do ágar é a secagem, pois determina a qualidade do produto final resultando em características físicas desejáveis, como a umidade final e a forma do ágar. Num dos processos mais usados para a obtenção do ágar são realizadas duas secagens ao sol, podendo levar dias para serem realizadas.

A fim de se obter um produto de boa qualidade, de acordo com as especificações de mercado e otimizar o processo através do uso de secadores convectivos, por exemplo, se faz necessário um estudo detalhado da cinética de secagem do ágar. Através deste estudo as indústrias têm informações a respeito do comportamento do ágar no processo de secagem, o que possibilita buscar a melhor condição de trabalho na relação “custo de produção x produção”.

Muitos modelos são propostos para géis, mas pouco é o estudo voltado ao ágar. O ágar é um produto de grande importância nos dias atuais, visto suas aplicações. Pouca é a literatura dedicada a este material em relação ao seu processo de obtenção e muito menos às operações de secagem pelas quais passa. Entre os trabalhos desenvolvidos para este material destaca-se o de Iglesias et al.

(1993). Neste trabalho apresenta-se, de modo incompleto, um estudo da secagem do ágar. Os autores apenas citam modelos para a cinética de secagem, sem verificarem suas qualidades, utilizando a constante de secagem  $K$ , sendo que não apresentam a forma como as variáveis de processo interferem nesta constante. Não se referem ao problema do encolhimento de maneira mais explícita. Além disso, problemas de ruptura devido à temperatura e à velocidade do ar de secagem e valores de umidade crítica não são bem esclarecidos.

Realmente, muito ainda deve ser feito na secagem do gel ágar, visto a escassez de informações na literatura. O equilíbrio entre o sistema ágar, a água e o ar tem sido pouco estudado, não se verificou o melhor modelo de isothermas de dessorção para representá-lo. A cinética de secagem tem sido estudada em uma faixa restrita de temperatura e não se verifica a contribuição da temperatura e da velocidade do ar na formulação que representa o processo de secagem. Por fim, a metodologia da secagem do gel é incompleta, o que dificulta muito a pesquisa e o desenvolvimento de secadores convectivos para este material.

Tendo em vista contribuir com os estudos neste sentido, o objetivo deste trabalho é o estudo da secagem do gel ágar em um secador de convecção forçada, a fim de se obter uma metodologia clara e consistente, estudar e representar o equilíbrio do sistema ágar-água-ar e verificar a influência da temperatura e da velocidade do ar na cinética de secagem. Para tanto, serão cumpridas as seguintes etapas:

- Preparação e caracterização do gel;
- Realização das determinações do teor de umidade de equilíbrio;
- Representação matemática do equilíbrio com modelos da literatura;

- Secagem do gel em um secador de convecção forçada e
- Estudo da influência da temperatura e velocidade do ar no processo de secagem, assim como, a representação do processo de secagem.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se o material de estudo, assim como, aspectos gerais sobre a secagem e as considerações referentes aos trabalhos já realizados sobre a secagem do gel ágar. É apresentada também uma análise das propriedades físicas envolvidas no processo de secagem.

Por fim, faz-se uma revisão de alguns dos modelos mais usados na literatura para representar o fenômeno de secagem.

#### 2.1 O ÁGAR

O ágar é uma substância mucilaginosa extraída de certas algas marinhas. As espécies de *Gelidium* são as principais fontes de ágar, segundo o trabalho de Selby & Wynne (1973).

De acordo com Bobbio & Bobbio (1992), o ágar é constituído por dois polissacarídeos: agarose, fração constituída, alternadamente, por resíduos de D-galactopiranosose, unidos em B-(1-3), ligados a resíduos de 3,6-anidro L-galactopiranosose por ligações glicosídicas B-(1-4), não contendo sulfato na molécula. O outro polissacarídeo, denominado agaropectina, é formado, além de

resíduos de D-galactopiranosose e 3,6 anidro L-galactopiranosose, também por unidades de ácido D-glucurônico, ácido pirúvico na forma acetálica [4,6 O-(1-carboxietilideno)] da galactopiranosose e um teor muito alto de sulfato.

Segundo Matz (1962), o ágar é insolúvel em água fria, pouco insolúvel em água quente e facilmente solúvel em água fervendo. Em concentrações baixas, em torno de 0,04% (P/V), o ágar forma um gel que começa a solidificar-se de 40°C a 50°C. O gel é termicamente reversível, geralmente funde de 80°C a 85°C e também é elástico. Dependendo da fonte do ágar, um gel aquoso de 1,5% de resistência pode fundir de 30°C a 97°C. A resistência do gel é aproximadamente proporcional à quantidade de ágar entre 0,5% e 2%.

De acordo com especificações, o ágar não deve conter mais do que 1% de matéria orgânica estranha, não mais que 1% de cinzas de ácidos insolúveis e não mais que 20%(bu) de água (Food Chemicals Codex, 1980). Geralmente, o produto final tem cerca de 12% (bu) de umidade. Pode se dispor comercialmente de várias maneiras, de acordo com a finalidade que se deseja. Entre algumas formas estão a de floco e a forma granular.

Um dos processos de obtenção do ágar empregado nos Estados Unidos, de acordo com o estudo de Selby & Wynne (1973), tem a seguinte sequência de operações:

- (a) limpeza da matéria-prima;
- (b) pré-tratamento químico;
- (c) extração;
- (d) pós-tratamento químico;
- (e) filtração;

- (f) gelatinização;
- (g) resfriamento;
- (h) pós-tratamento;
- (i) lavagem;
- (j) secagem;
- (l) esterilização;
- (m) branqueamento;
- (n) lavagem, e
- (o) secagem.

A secagem é realmente uma operação muito importante no processo de obtenção do ágar, pois além do tempo que leva para ser realizada, em torno de alguns dias, determina qualidades desejáveis ao produto como a forma e a umidade final.

## 2.2 SECAGEM

A secagem é uma operação muito importante. Segundo Keey (1980) uma boa parte da energia consumida nos processos industriais é destinada às operações de secagem. Em torno de 10% da energia total é destinada à secagem, como relatam Lebedev & Ginzburg (1971).

Isto faz com que este processo venha sendo extensivamente estudado e mesmo assim muito falta a ser realizado. Segundo Mc Cormick (1983) a secagem é normalmente considerada um processo de remoção de umidade de um sólido por evaporação. Quando o calor necessário para evaporar a água é fornecido ao

material, ocorrem transferências simultâneas de calor e massa entre as fases fluida e sólida.

O conhecimento dos mecanismo de transferência de água, do interior do material para a sua superfície, é de fundamental importância para a descrição do fenômeno da secagem. A migração de umidade através do sólido pode ocorrer por meio de vários mecanismos, segundo Fortes & Okos (1980). No caso da secagem do gel ágar a literatura não especifica os mecanismos principais na transferência de umidade, por isso ainda existe a necessidade de mais estudos sobre este fenômeno com relação ao gel ágar.

### 2.2.1 Curvas de Secagem

Tendo em vista a representação do fenômeno de secagem, procura-se representar os dados experimentais sob a forma de curvas. Usualmente, dados em secagem são representados graficamente como o conteúdo de umidade médio  $\bar{X}$  ou adimensional de umidade ( $W$ ), dado pela Equação (1), em função do tempo.

Também como a taxa de secagem  $\frac{d\bar{X}}{dt}$  em função do conteúdo de umidade relativa  $\frac{\bar{X}}{X_0}$  ou do tempo como reporta Fortes & Okos (1980).

Os esforços que têm sido feitos para classificar os diferentes tipos de características de secagem ainda são poucos. É muito comum o uso da curva característica de secagem normalizada,  $v$  em função de  $W$ , onde  $v$ , dado pela Equação (2), é uma razão entre densidades de fluxo de massa.

$$W \equiv \frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} \quad (1)$$

$$v \equiv \frac{N(\bar{X})}{N(X_o)} \quad (2)$$

Nas curvas de secagem pode-se notar, geralmente, dois comportamentos da taxa de secagem. Um deles é o período de taxa constante, o outro, é o período de taxa decrescente.

No período de taxa constante a superfície do material é mantida num nível de umidade tal que a secagem ocorre como se o sistema fosse água pura evaporando, na temperatura de bulbo úmido do ar. As resistências às transferências de calor e massa apresentam-se somente na corrente de ar, assim a taxa de evaporação da água não muda em relação ao tempo.

O término do período de taxa constante é alcançado quando a migração interna de água para a superfície se torna a resistência principal à transferência de água do gel para o ar de secagem. O valor da umidade deste estado é denominado de umidade crítica. Começa nesta condição o período de taxa decrescente de acordo com Chirife (1983).

Segundo Iglesias et al. (1993), o gel ágar apresenta os dois períodos de taxa de secagem. O período de taxa constante de secagem não é sempre constante, pois se nota uma pequena variação em torno da densidade de fluxo de massa média. Também verifica-se um repentino aumento da densidade de fluxo de massa quando o processo de secagem está próximo do período decrescente.

### 2.2.2 Classificação dos Sólidos para a Secagem

De acordo, por exemplo, com os períodos de secagem que apresentam os sólidos, devido às estruturas internas; as transferências de calor e massa ocorrem de maneiras diferentes durante a secagem. Existem condições internas e externas para a remoção da umidade dos sólidos, o que faz com que os sólidos apresentem comportamentos diferentes em relação à secagem. Entre as condições externas, encontram-se a temperatura, umidade, taxa e direção do fluxo de ar, a forma física do sólido e o modo de suportar o sólido durante a secagem. Entre as condições internas, tem-se a temperatura e a umidade do sólido, a natureza física do sólido, ou seja, o “caminho” no interior do sólido para a transferência de calor e massa. Este “caminho” por dentro do sólido implica na classificação a seguir dos sólidos, conforme Mujumdar & Menon (1995), que só é aplicável a meios homogêneos que podem ser considerados como contínuos para o transporte de calor e massa:

- Meio não higroscópico capilar-poroso (areia, partículas de polímeros, algumas cerâmicas, etc): apresentam espaço poroso que é totalmente preenchido com líquido se o meio está saturado e preenchido com ar quando o meio está completamente seco. A umidade de equilíbrio é praticamente nula. Não há encolhimento durante a secagem.

- Meio higroscópico poroso (argila, barro, madeira): apresentam espaço poroso. Há uma grande quantidade de líquido “ligado” ao material no equilíbrio. O encolhimento geralmente ocorre no estágio inicial da secagem. Podem classificar-

se em meio higroscópico capilar-poroso (microporos e macroporos, incluindo meio bidisperso, ex: madeira, argila) e em meio completamente higroscópico (somente microporos, ex: sílica gel, alumina, zeolitas).

- Meio não poroso coloidal (sabão, cola, alguns polímeros e vários produtos alimentícios): não apresentam espaço poroso (a evaporação ocorre somente na superfície). Todo o líquido está fisicamente “ligado” ao material.

Os géis são geralmente considerados como materiais homogêneos (Fish, 1957). Muitos desenvolvem uma estrutura porosa durante a secagem. O gel ágar pode ser considerado também como um material homogêneo. Apresenta uma grande quantidade de água na sua estrutura e é considerado como um colóide hidrofílico.

### 2.2.3 Secagem do Gel Ágar

Embora seja clara a importância do ágar conforme comentado no Capítulo 1, a secagem do gel, que é uma das operações para a sua obtenção, é ainda um tema pouco estudado. Dentre os trabalhos existentes, pode-se citar os desenvolvidos recentemente por Iglesias et al. (1993), Mrani et al. (1997), Gögüs & Lamb (1998) e Garcia & Bueno (1998).

O trabalho de Iglesias et al. (1993) é o mais abrangente entre os encontrados na literatura. Os autores tratam dos usos do ágar, de sua característica físico-química, do equilíbrio ágar-água-ar e da cinética de secagem, mas de uma

forma incompleta. Não deixam clara a metodologia de trabalho, não descrevem matematicamente o comportamento do equilíbrio do sistema ágar-água-ar, não informam qual a faixa de umidade relativa e nem de temperatura em que o equilíbrio foi analisado, não apresentam as influências possíveis sobre o processo de secagem. Embora sugiram modelos para representar a secagem, não realizam os cálculos de seus parâmetros, relatam a predominância do período de taxa constante, mas não determinam de maneira quantitativa de quanto é essa predominância e não trazem informações claras a respeito da umidade crítica.

Mrani et al. (1997) tratam pouco sobre a parte experimental envolvida no estudo da secagem do gel ágar. Neste trabalho, os autores enfocam um modelo para representar o fenômeno de secagem e o comparam com dados experimentais. Tudo é feito apenas para a temperatura de 30°C. Sugerem que a umidade crítica para o caso do gel ágar tenha um valor acima de 1,2 ( $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ss}}$ ). Propõem o uso do modelo G.A.B.(Guggenheim-Anderson-de Boer) para representar o equilíbrio do sistema ágar-água-ar à temperatura de 30°C. Os autores também fornecem ilustrações sobre o perfil de umidade no gel durante a secagem, retratando bem o que ocorre no material.

Existem ainda os trabalhos de Gögüs & Lamb (1998) e Garcia & Bueno (1998), mas que trazem menos informações sobre a secagem por convecção forçada do gel ágar.

Para o estudo da secagem do gel ágar, etapas como a preparação do gel e a determinação da umidade do gel ágar são muito importantes.

A preparação bem conduzida garante a boa formação do gel, sem a ocorrência de fissuras na amostra, por exemplo. Também permite a manipulação das amostras usando concentrações adequadas.

A preparação do gel, segundo Iglesias et al. (1993), é feita através da dissolução do ágar em pó em 100 ml de água destilada em um frasco imerso em um banho de óleo a 120°C por 2 h ( $7,2 \cdot 10^3$ s). A evaporação da água durante a preparação do gel é evitada com o uso de um condensador de refluxo total. A evaporação excessiva pode causar a variação do valor de concentração desejado para o gel.

Outra preparação do gel é encontrada no Food Chemicals Codex (1980). Neste caso, pesa-se 1g ( $1 \cdot 10^{-3}$ kg) de ágar e mistura-se com 65 ml ( $6,5 \cdot 10^{-5}$ m<sup>3</sup>) de água destilada. Aquece-se até o final de 10 min ( $6 \cdot 10^2$ s) de ebulição sob agitação contínua.

A determinação de umidade também é importante no estudo da secagem do gel ágar. É nesta etapa que é possível de se calcular as umidades experimentais de equilíbrio do sistema ágar-água-ar e as umidades em função do tempo nos experimentos de secagem, partindo-se então para a análise matemática.

Em relação à determinação de umidade, segundo Iglesias et al. (1993), seu valor é obtido após 24 h ( $7,32 \cdot 10^4$ s) de aquecimento em estufa a 110°C até que se verifique peso constante. Outra determinação de teor de umidade do ágar é sugerida por Lees (1980). Neste método o ágar é posto numa estufa a  $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$  durante um período de 4 h ( $1,44 \cdot 10^4$ s). Depois de pesado retorna à estufa por mais 30 min ( $1,8 \cdot 10^3$ s), sendo pesado novamente depois disto. Se a massa não estiver constante continua-se a operação de 30 min em 30 min ( $1,8 \cdot 10^3$ s) na estufa, até se

obter peso constante.

Além da aplicação do método adequado de preparação do gel e da determinação do seu teor de umidade, tem-se, também, a necessidade de informações relativas aos métodos para a determinação de suas propriedades físicas.

#### 2.2.4 Propriedades Físicas Envolvidas na Secagem do Material

A fim de descrever o fenômeno de secagem tanto do gel ágar quanto o de qualquer outro material através de modelos matemáticos, o conhecimento das propriedades físicas se faz muito importante.

Segundo Karathanos et al. (1996) as principais propriedades físicas utilizadas nos modelos que descrevem a secagem são:

- condutividade térmica efetiva;
- calor específico do material;
- densidade e porosidade;
- coeficientes de transferência de massa e calor interfaciais;
- difusividade efetiva;
- encolhimento;
- conteúdo de umidade de equilíbrio, e
- constante de secagem.

A condutividade térmica efetiva é a medida da habilidade de um material de conduzir calor. Faz-se muito importante o cálculo dessa propriedade em estudos onde se enfoca a transferência de calor. Sua importância é reduzida em estudos de camada fina, onde os gradientes de temperatura no interior do material em estudo são relativamente pequenos e a transferência de calor no material pode ser desconsiderada. Em relação ao gel ágar, informações sobre sua condutividade térmica efetiva não são encontradas apesar dos métodos disponíveis na literatura para a obtenção desta propriedade (Karathanos et al., 1996).

Também em relação ao ágar não são encontradas informações sobre o calor específico. O calor específico pode perder a importância nos casos onde a quantidade de material usada é muito pequena ou quando as variações de temperatura em função do tempo são pequenas. É uma propriedade necessária na representação da transferência de calor em regime transiente. A difusividade efetiva também é uma propriedade muito importante e por isso muito tratada na literatura. Existem vários modelos e métodos para o cálculo da difusividade efetiva (Zogzas et al., 1994). Pode-se considerar que a difusividade efetiva é a “velocidade” com que a umidade é transferida no interior do material. É realmente necessária nos modelos difusivos que dependem do seu valor (Pinto & Tobinaga, 1996). Nada se encontra sobre a difusividade efetiva para o gel ágar. Apenas se encontra o valor do coeficiente aparente de difusão utilizado à temperatura de 30°C no trabalho de Mrani et al. (1997).

Em relação à densidade, Iglesias et al. (1993) determinaram a densidade  $\rho_s$  (excluindo todos os poros) do ágar a 20°C por picnometria com hélio encontrando o valor de  $(1,47 \pm 0,02) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

Os coeficientes de transferência de massa e de calor entre o sólido e o fluido são coeficientes encontrados na camada estagnada; que é uma camada relativa ao fluxo de ar, pois sua espessura varia de tamanho de acordo com a velocidade do ar, a qual se assume aderida à superfície do material durante a secagem. Estes coeficientes determinam com que velocidade ocorre a transferência de massa e de calor do material para o ambiente. Dependem das propriedades do ar de secagem, assim como, da geometria do sistema (Marinos-Kouris & Maroulis, 1995). Não dependem do tipo de material. Na literatura consultada sobre o gel ágar nada é considerado a respeito destes coeficientes.

Todas as propriedades físicas envolvidas na secagem têm importância, mas cabe focar de modo mais aprofundado três delas; o encolhimento, o conteúdo de umidade de equilíbrio e a constante de secagem.

#### 2.2.4.1 Encolhimento

O encolhimento é o fenômeno físico pelo qual um material diminui de tamanho ao sofrer secagem. Suzuki et al. (1976) investigaram a secagem de raízes de vegetais (cenoura, batata, batata doce e rabanetes), e propuseram três modelos para formular a relação entre a mudança de volume e o conteúdo de umidade:

(1) modelo de secagem uniforme: o encolhimento no volume é igual ao volume de água perdida por evaporação durante todos os estágios da secagem;

(2) modelo de secagem central (“core drying”): neste caso, é suposto que a camada seca é formada na superfície externa, e o centro permanece com umidade igual a do material inicial no interior desta camada; ou seja, a densidade do centro é igual a do material inicial, e a densidade da camada externa seca é a mesma de equilíbrio do material, e

(3) modelo de secagem semi-central (“semi-core drying”): a densidade da camada seca não é igual a do material seco, pois a umidade gasosa está contribuindo menos para a densidade que a água líquida estaria. Neste caso a densidade da camada seca é considerada como um valor médio entre as densidades inicial e do material seco.

Segundo os autores, o primeiro modelo resulta em duas equações alternativas. Uma necessita dos dados de umidade de equilíbrio e massa específica de equilíbrio, enquanto que a outra equação requer a umidade inicial e a massa específica inicial. O segundo e o terceiro modelos necessitam dos valores iniciais e de equilíbrio para a umidade e da massa específica.

Iglesias et al. (1993) sugerem a seguinte equação que estabelece o encolhimento em função da umidade para o gel ágar:

$$V = 0,67 + 1,002 X \quad (3)$$

Esta equação pode ser escrita numa melhor forma como:

$$V = V_S (1 + \varepsilon X) = V_S (1 + 1,493 X) \quad (4)$$

onde,  $V_S$  é o volume da fase sólida,  $X$ , a umidade do gel, e  $\varepsilon$ , o coeficiente de retração.

No trabalho de Buvanasundaram et al.(1996), os dados mostram que o gel encolhe aproximadamente o mesmo volume que o de água que dele evapora . Isto está de acordo com o trabalho de Iglesias et al. (1993). Calculando o valor da razão  $\rho_{\text{ágar}}/\rho_{\text{água}}$  , que é em torno de 1,48, verifica-se que esta relação se aproxima do valor de  $\varepsilon$ , que é de 1,493 segundo a Equação (4). Substituindo-se então, a razão  $\rho_{\text{ágar}}/\rho_{\text{água}}$  no lugar de  $\varepsilon$  na Equação (4) e sabendo que  $X$  é a razão entre a massa de água e a massa de ágar seco obtém-se:

$$V = V_S + V_{\text{água}}, \quad (5)$$

o que comprova a afirmação de Buvanasundaram et al.(1996), sendo então usado o modelo de secagem uniforme para representar o encolhimento do gel ágar.

#### 2.2.4.2 Equilíbrio Termodinâmico do Sistema Ágar-água-ar

O conhecimento do estado de equilíbrio termodinâmico entre o ar circundante e o gel ágar é um pré-requisito básico para a secagem, como é para qualquer situação similar de transferência de massa.

O conteúdo de umidade do material quando atinge o equilíbrio com o ar de secagem é uma propriedade útil incluída na maioria dos modelos de secagem como o de Lewis (1921), por exemplo.

A umidade de equilíbrio é a umidade para a qual o material tende durante o processo de dessorção ou adsorção de vapor d'água.

Quanto mais diferente desse valor, maiores são as variações da umidade em função do tempo; quanto mais próxima deste valor, menores são as variações da umidade em função do tempo. A relação entre o conteúdo de umidade do material e a atividade de água correspondente para uma dada temperatura é conhecida como isoterma de equilíbrio (Karathanos et al., 1996). A atividade da água em pressões e temperaturas que usualmente prevalecem durante a secagem é igual à umidade relativa do ar.

A umidade de equilíbrio do material pode ser alcançada via processos de adsorção ou dessorção. A diferença geralmente observada entre estes fenômenos é devido ao que se denomina histerese, como explicam Marinos-Kouris & Maroulis (1995). Este fenômeno ocorre em quase todos os produtos higroscópicos. Várias teorias tentam explicar este fenômeno. Uma delas assume que os poros são estruturas rígidas e não consegue explicar este comportamento em alimentos e materiais sintéticos onde os poros não são rígidos (Mujumdar & Menon, 1995).

O conteúdo de umidade de equilíbrio do material depende de muitos fatores, entre os quais estão a temperatura, a composição química, a estrutura física e as condições do ar de secagem.

Um grande número de equações (teóricas, semi-empíricas e empíricas) têm sido propostas na literatura, nenhuma das quais, entretanto, consegue descrever o fenômeno de histerese (Mujumdar & Menon, 1995). Outra desvantagem é que nenhuma das equações se aplica satisfatoriamente sobre a faixa inteira de atividade de água que vai de 0 a 1 .

Algumas destas equações encontram-se reunidas na Tabela 2.1 (Marinos-Kouris & Maroulis, 1995):

Tabela 2.1 - Modelos de Isotermas de Equilíbrio

Referência	Modelos
Halsey (1948)	$X_e = A \left( T \ln \left( \frac{1}{UR} \right) \right)^{\frac{1}{c}} \quad (6)$
Luikov (1966)	$X_e = \frac{A}{1 + BT \ln \left( \frac{1}{UR} \right)} \quad (7)$
Henderson (1952)	$X_e = A \left( \frac{1}{T} \ln \left( \frac{1}{1 - UR} \right) \right)^{\frac{1}{c}} \quad (8)$
Chung & Pfof (1967)	$X_e = -\frac{1}{A} \ln \left( \frac{T}{-B} \ln(UR) \right) \quad (9)$
Chen & Clayton (1971)	$X_e = \frac{1}{-CT^D} \ln \left( \frac{\ln UR}{-BT^A} \right) \quad (10)$
Henderson-Thompson (Thompson et al. 1968)	$X_e = \left( \frac{\ln \left( \frac{1}{1 - UR} \right)}{A(T + B)} \right)^{\frac{1}{C}} \quad (11)$
Halsey modificada (Osborn et al. 1989)	$X_e = \left( \frac{\exp(AT + B)}{-\ln UR} \right)^{\frac{1}{C}} \quad (12)$
G.A.B. (Garcia-Alvarado et al. 1995)	$X_e = \frac{A.C.UR.b}{(1 - A.UR)(1 - A.UR + A.C.UR)} \quad (13)$
	$A = a.e^{E/T} \quad (14)$
	$C = c.e^{D/T} \quad (15)$

As isotermas de equilíbrio podem ser determinadas por dois métodos; o gravimétrico e o higrométrico .

- Métodos Gravimétricos:

Durante a medida, a temperatura do ar e a atividade de água são mantidas constantes até que o conteúdo de umidade da amostra atinja o valor de equilíbrio.

O ar pode ser circulado (método dinâmico) ou estar estagnado (método estático). O peso do material pode ser registrado continuamente (método contínuo) ou descontinuamente (método descontínuo).

As principais vantagens do método dinâmico sobre o estático são sua velocidade e o fato de permitir fácil variação da temperatura do ar. Com o método dinâmico, o tempo necessário para o equilíbrio é pequeno comparado com o tempo para se atingir o equilíbrio no método estático, que pode levar semanas (Papadakis et al., 1993).

A vantagem do método estático se deve à maior facilidade de obter condições termodinâmicas constantes. A obtenção experimental das isotermas de equilíbrio pelo método estático pode ser conseguida com a utilização de soluções ácidas de diversas concentrações ou soluções salinas saturadas, para regular a pressão de vapor nas vizinhanças do material.

O uso das soluções salinas é mais comum devido à segurança no manuseio e pela maior facilidade de manter a umidade relativa constante. Se houver evaporação de água, alguns sais precipitam, mas a umidade relativa não varia (Labuzza et al., 1983, Barrozo et al., 1998).

#### - Métodos Higrométricos:

Durante a medida, o conteúdo de umidade do material é mantido constante até que o ar circundante atinja um valor constante de equilíbrio. A atividade de água do ar é medida via higrômetro ou manômetro.

Entre os trabalhos consultados sobre o gel ágar, apenas no de Iglesias et al. (1993) encontram-se informações dos métodos para a determinação das isotermas de equilíbrio. São sugeridos os métodos estático e dinâmico.

#### 2.2.4.3 Constante de Secagem

Através das propriedades de transporte como difusividade efetiva, condutividade efetiva, coeficientes efetivos de transferência de massa e calor interfaciais, é possível descrever a cinética de secagem. Entretanto, na literatura (principalmente referente aos alimentos) em vez das propriedades de transporte, a constante de secagem (K) é usada, a qual é uma combinação das propriedades citadas. A constante de secagem K é uma propriedade fenomenológica representativa de vários fenômenos de transporte que ocorrem na secagem e pode ser definida usando a equação de secagem em camada fina (Jayas et al., 1991). Uma equação simples de camada fina tem a seguinte forma:

$$-d\bar{X}/dt = K.(\bar{X} - X_e) \quad (16)$$

A consideração sob a qual a Equação (16) é válida, é a de que o material a ser seco seja suficientemente fino, ou a velocidade do ar suficientemente alta, de modo que as condições operacionais do ar de secagem sejam constantes por todo o material (Jayas et al., 1991).

A constante de secagem K é obtida a partir de experimentos de secagem. Nenhum entre os trabalhos sobre a secagem do ágar define um modelo para K, visto que não analisam a influência de variáveis como temperatura e velocidade do ar na cinética de secagem.

Pode-se incorporar em K todas diferentes variáveis que se deseja estudar (Kiranoudis et al., 1997). O modelo desenvolvido para K se torna uma informação valiosa para descrever o fenômeno de secagem, apresentando a influência, sob a forma matemática, das resistências convectiva e difusiva à transferência de umidade entre o gel ágar e o ar em um secador convectivo.

Com base nestas considerações sobre a secagem do gel ágar, a pesquisa e o desenvolvimento de secadores convectivos podem ser realizados via diferentes tipos de formalismos matemáticos.

### 2.3 MODELOS PARA REPRESENTAÇÃO DA CINÉTICA DE SECAGEM

Definida uma metodologia experimental, imprescindível para o estudo da secagem, parte-se para o desenvolvimento de modelos que representem o processo. Os modelos usados para representar a secagem podem ser classificados em três classes: empíricos, semi-empíricos e teóricos.

Os Quadros 2.1, 2.2, e 2.3 apresentam as vantagens e as desvantagens destes modelos.

Quadro 2.1 - Vantagens e desvantagens dos modelos empíricos

Vantagens	Desvantagens
1. Bom ajuste dos dados.	1. Sem credibilidade fora da faixa medida.
2. Matemática pouco complexa.	2. Não se baseiam em princípios físicos fundamentais..
3. Completa flexibilidade na abordagem.	3. Usados em problemas bem particulares.

Quadro 2.2 - Vantagens e desvantagens dos modelos difusivos (Semi-Empíricos)

Vantagens	Desvantagens
1. Mais fundamentados na teoria do que os modelos empíricos.	1. Geralmente ruim para dados de material espesso.
2. A dependência da secagem na T, P e UR podem ser incorporadas nas condições de contorno.	2. Muitas considerações teóricas questionáveis.
3. Solução analítica em alguns casos.	

Quadro 2.3 - Vantagens e desvantagens dos modelos teóricos

Vantagens	Desvantagens
1. Mais próximos dos princípios teóricos.	1. Matemática Complexa.
2. Mais credibilidade para extrapolação.	2. Parâmetros podem ser desconhecidos.
3. Melhor reconhecimento das inter-relações entre as variáveis.	3. Maior tempo de desenvolvimento e necessidade de computadores velozes e programas sofisticados.

A seguir comenta-se sobre cada tipo de modelo existente.

### 2.3.1 Modelos Teóricos de Secagem

As teorias que procuram explicar a secagem são muitas. Pinto & Tobinaga (1992) apresentam um resumo das teorias mais importantes, que são utilizadas para explicar os mecanismos de transferência de umidade durante a secagem de sólidos. Como exemplo, pode-se citar a Teoria de Whitaker (Whitaker, 1977a,

1977b, 1980, 1983).

Todas as teorias partem de equações de balanço de massa, de energia e de quantidade de movimento para as fases sólida e fluida. O que as diferenciam são as hipóteses usadas. Com algumas considerações pode-se chegar aos modelos difusivos a partir da Teoria de Whitaker, por exemplo. No entanto, o uso de modelos teóricos é dificultado pela falta de conhecimento técnico para a medida de alguns parâmetros. Por isto são pouco usados em sua forma original, mas usados com simplificações e rearranjos.

### 2.3.2 Modelos Semi-Empíricos de Secagem

Existem vários tipos de modelos que se enquadram nesta classificação sendo que os principais são os modelos difusivos. Mesmo com muitas considerações, que os fazem perder muito o significado físico, os modelos difusivos são muito usados pelas boas respostas que fornecem. O modelo difusivo, entre várias possibilidades, pode ser desenvolvido com ou sem encolhimento ou acoplado a um modelo convectivo. Pinto (1996) e Pinto & Tobinaga (1992, 1994, 1996) fazem uma revisão dos modelos difusivos sem e com a presença do encolhimento, sendo que Carneiro & Tobinaga (1995) utilizam um modelo difusivo-convectivo para explicar a secagem de peixe.

Poucos são os casos onde existe solução analítica para a formulação difusiva. Um destes casos é quando a difusividade efetiva de massa é constante. Tornando desprezíveis os efeitos da resistência externa, impondo-se  $v_{ar}$  superior a 1,0 m/s sobre a superfície do material, a equação do balanço de massa do modelo

difusivo sem encolhimento pode ser escrita como:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{EF} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad 0 < z < L_o, \quad t > 0 \quad (17)$$

com as seguintes condições:

inicial:  $t = 0; 0 < z < L_o; X = X_o$

contorno:  $z = L_o; t > 0; X = X_e$

$$z = 0; t > 0; (\partial X / \partial z) = 0$$

A solução analítica deste modelo, para o perfil interno de umidade, é dada por Crank (1956) como:

$$\frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n}{(2n+1)} e^{\left[ \frac{-(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{EF} \cdot t}{L_o^2} \right]} \cos\left[ \frac{(2n+1) \cdot \pi \cdot z}{2 \cdot L_o} \right] \right\} \quad (18)$$

O cálculo utilizando a média no volume fornece o perfil médio de umidade.

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{(2n+1)^2} e^{\left[ \frac{-(2n+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{EF} \cdot t}{L_o^2} \right]} \right\} \quad (19)$$

Para tempos de secagem longos, a equação anterior se reduz a:

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{\frac{-\pi^2 \cdot D_{EF} \cdot t}{4 \cdot L_o^2}} \quad (20)$$

Nos trabalhos consultados sobre a secagem do gel ágar, um tipo de modelo semi-empírico é usado por Mrani et al. (1997). Este modelo necessita de informações sobre o encolhimento, sobre o equilíbrio do sistema ágar-água-ar, sobre tensões no gel devido ao encolhimento, entre outras necessidades. Mesmo Mrani et al. (1997) tendo trabalhado com um modelo difusivo através do uso de um coeficiente de difusão aparente, que tem semelhança com a difusividade efetiva, ainda há a necessidade de maiores informações sobre a difusividade efetiva, visto que esta foi estudada apenas a 30°C. A resolução dos modelos semi-empíricos muitas vezes não é analítica e sim numérica, exigindo esforço computacional.

### 2.3.3 Modelos Empíricos de Secagem

Existem na literatura muitos modelos empíricos para representar a secagem. O modelo mais conhecido foi obtido por Lewis (1921), com a seguinte forma:

$$-\frac{d\bar{X}}{dt} = K \cdot (\bar{X} - X_e) \quad (21)$$

A integração desta equação leva a:

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = e^{-K.t} \quad (22)$$

onde K é a constante de secagem.

Iglesias et al. (1993) sugerem três equações para representar a secagem do gel ágar. As duas primeiras, as Equações (23) e (24) são muito semelhantes à de Lewis (1921); a terceira, a Equação (25), que é uma curva generalizada de secagem e que serve para representar as taxas de secagem, ou seja, a velocidade com que o material perde umidade ao longo da secagem.

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = A.e^{-K.t} \quad (23)$$

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_0 - X_e} = e^{-a.t^b} \quad (24)$$

$$\frac{N}{N_{cr}} = 1 - e^{\{-A.(\frac{X - X_e}{X_{cr} - X_e})\}} \quad (25)$$

A Tabela 2.2 apresenta outros modelos empíricos encontrados na literatura, muito utilizados para representar a cinética de secagem.

Tabela 2.2 – Modelos Empíricos de Secagem.

Equação	K	Autores
$\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = C \exp(-Kt)$ (26)	$K = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$ (27)	Brooker (1974)
$\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = C \left[ \exp(-Kt) + \frac{1}{9} \exp(-9Kt) \right]$ (28)	$K = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$ (29)	Henderson- Henderson (1968)
$\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = \exp(-Kt^n)$ (30)	$K = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right)$ (31)	Page (1949)
$\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = \exp\left[-(Kt)^n\right]$ (32)	$K = \exp\left(A + \frac{B}{T}\right)$ (33)	Overhults (1973)

Muito se tem estudado sobre a secagem convectiva (mecanismos, modelos, etc.), mas muito ainda falta estudar, principalmente sobre a secagem do gel ágar. A literatura fornece muitos modelos para a previsão do equilíbrio, assim como, para a representação do processo de secagem. No entanto, ainda cabe estabelecer os melhores modelos para a representação do equilíbrio do sistema ágar-água-ar e para a cinética de secagem do ágar, através de uma metodologia experimental adequada, a qual não está clara na literatura consultada.

## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentados os materiais usados neste trabalho, assim como os métodos de preparação do gel para a secagem, de caracterização do ágar e de determinação das isotermas de dessorção.

Também apresentam-se os equipamentos e as operações de secagem realizadas no secador de convecção forçada e como foi conduzido o tratamento dos dados.

#### **3.1 O ÁGAR**

O ágar foi o material usado nas determinações de equilíbrio e nos experimentos de secagem. Este material foi utilizado na forma de gel, onde contém uma alta porcentagem de umidade. Segundo os trabalhos de Mouradi-Givernaud et al. (1992), Bird & Hinson (1992) e Bird et al. (1981), o ágar apresenta diferença em sua composição química e nas propriedades físicas, conforme a espécie de alga da qual provém, do local onde é encontrada e da sua alimentação. Este fato pode ser fonte de erro introduzida no estudo. Com a finalidade de compreender melhor a secagem do gel ágar fez-se necessário reduzir ao máximo a variabilidade destes fatores na resposta. Para isto adquiriu-se o ágar, na forma granular, de um único fornecedor (DIFCO) e mesmo lote.

### 3.2 SECADOR DE CONVECÇÃO FORÇADA

Utilizou-se um secador de convecção forçada construído por Singulani & Freire (1999), conforme esquema apresentado na Figura 3.1.

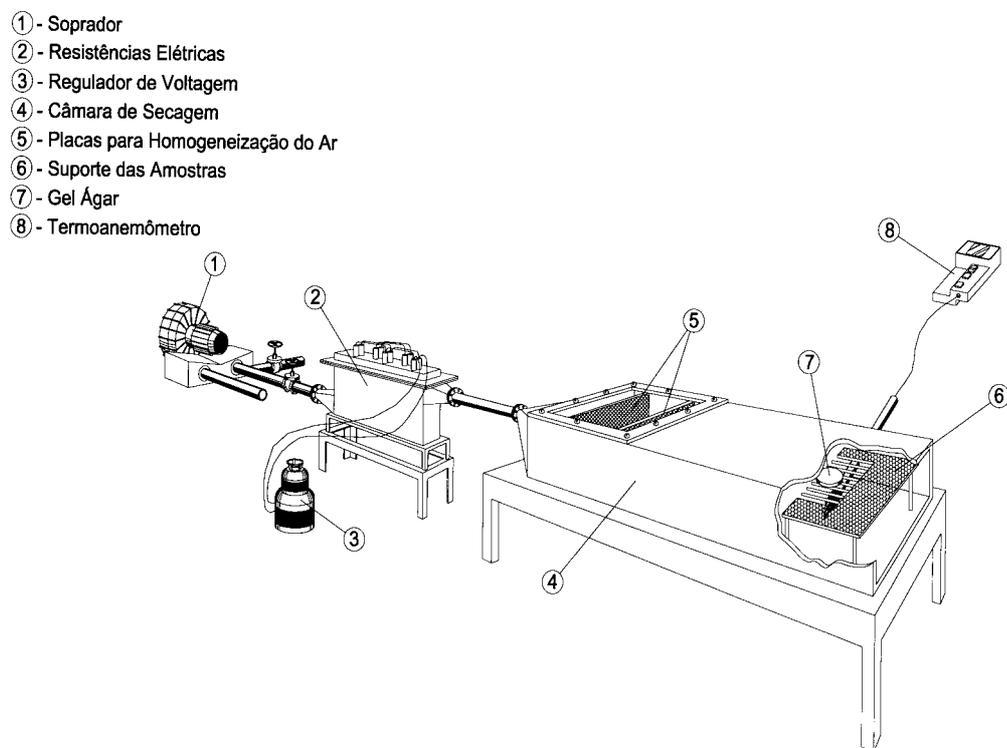


Figura 3.1 – Esquema da unidade de secagem utilizada

A unidade de secagem era formada basicamente por um soprador (1) IBRAM modelo VC 2000 (3390 rpm e potência  $\frac{1}{2}$  CV), resistências elétricas (2), um regulador de voltagem (3) VARIVOLT (0 – 240 V) e a câmara de secagem (4). A câmara de secagem possui placas perfuradas (5) a fim de distribuir melhor o ar na região de secagem e o suporte das amostras (6). As dimensões da câmara de secagem são de 1,15 m de comprimento, 0,2 m de altura e 0,2 m de largura.

### 3.2.1 Técnicas de Medidas

A temperatura e a velocidade do ar nos experimentos de secagem foram obtidas com o uso de um termoanemômetro digital ALNOR modelo 8525 com precisão de 0,1 m/s para a velocidade e de 1°C para a temperatura. A massa do material foi medida com auxílio de uma balança da marca GEHAKA, modelo BG 440 de precisão de  $10^{-6}$  kg. A umidade do ar foi obtida com o uso de um termohigrômetro COLE PARMER, modelo 3310-00 de precisão de 2% para a umidade relativa. Utilizou-se também um paquímetro SOMET INOX, precisão de  $5.10^{-5}$  m, para medir as dimensões da amostra de gel.

## 3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental pode ser definido basicamente como:

- a preparação das amostras de gel ágar para as determinações das isotermas de equilíbrio e para os experimentos de secagem;
- a caracterização do ágar para determinar a umidade do material;
- as determinações de equilíbrio, e
- a operação da unidade de secagem.

### 3.3.1 Preparação do Gel

A fim de reproduzir a etapa de secagem do processo de obtenção do ágar, fez-se necessária a rehidratação do produto (ágar seco) para que o mesmo voltasse

à sua forma de gel e, então, fosse possível analisar o comportamento da sua secagem.

Na preparação do gel, utilizou-se uma variação do método descrito no Food Chemicals Codex (1980). Pesou-se 5g ( $5 \cdot 10^{-3}$ kg) de ágar e misturou-se com 100 ml ( $10^{-4}$ m<sup>3</sup>) de água destilada. Aqueceu-se até o final de 10 min ( $6 \cdot 10^2$ s) de ebulição e sob agitação contínua. Depois derramou-se o gel ainda líquido em seu molde. O gel moldado destinado aos experimentos de secagem tinha em torno de  $2 \cdot 10^{-3}$  m de altura e  $6 \cdot 10^{-2}$  m de diâmetro. Este diâmetro foi usado com base em testes preliminares que indicaram ser nestas dimensões que a temperatura do ar de secagem não apresentava variação maior que o erro de medida do termoanemômetro utilizado. O gel moldado para as determinações de equilíbrio tinha  $5 \cdot 10^{-3}$  m de altura e  $3,4 \cdot 10^{-2}$  m de diâmetro. Constatou-se visualmente que ambos tinham um aspecto transparente, com a cor esbranquiçada.

Após o preparo das amostras de gel, estas eram conduzidas ou para as determinações de equilíbrio ou para os experimentos de secagem. Após isto então, eram levadas para serem caracterizadas.

### 3.3.2 Caracterização do Ágar

Para a caracterização e controle de qualidade do ágar, se empregam normalmente testes de Arsênico, de Cinzas (ácido insolúvel), de Cinzas (Total), de Matéria Insolúvel, de Metais Pesados (Chumbo), de Cor, de Resistência, de Umidade e de Solubilidade (Food Chemicals Codex, 1980).

No trabalho aqui desenvolvido a preocupação estava voltada para a cinética de secagem. Por isso, o teste de caracterização realizado foi o teste de umidade para a determinação do teor de água contida no gel. Esta informação é necessária nos estudos cinéticos e de equilíbrio. Empregou-se na determinação da umidade, o método apresentado por Lees (1980), utilizando-se de uma estufa da marca FANEM, modelo 315 SE.

O método basicamente consiste em:

- pesar a amostra em um vidro relógio ou placa de Petri previamente dessecados;
- colocar o vidro relógio com seu conteúdo em uma estufa a  $(105 \pm 3)^{\circ}\text{C}$  e dessecar durante 4 h ( $1,44 \cdot 10^4$ s);
- retirar o material, esfriá-lo em um dessecador e pesar;
- voltar a colocar a cápsula na estufa e dessecar novamente durante mais 30 min ( $1,8 \cdot 10^3$ s). Retirar, esfriar e pesá-la;
- repetir a operação anterior, até peso constante, e
- calcular o conteúdo de umidade a partir da perda de massa da amostra.

O cálculo da umidade, em base seca ou base úmida, possibilitou então o tratamento dos dados.

### 3.3.3 Determinação das Isotermas de Equilíbrio

Após a preparação do gel, o material era levado para as determinações das isotermas de equilíbrio.

Conforme exposto no Capítulo 2, a determinação deste equilíbrio entre o gel ágar e o ar circundante é extremamente importante, não só pelo conhecimento do estado final, como também pelo fenômeno de secagem, pois indica a condição limite para a qual o material tende o valor do seu teor de umidade.

A fim de estabelecer equações matemáticas que representem este equilíbrio são usadas as isotermas de equilíbrio. No presente trabalho foram estudadas as isotermas no processo de dessorção, que consiste na retirada de umidade do interior do material para o ambiente. A dependência estabelecida é da umidade de equilíbrio com a temperatura e com a umidade relativa do ar na vizinhança da amostra.

Vários modelos de isotermas de equilíbrio são apresentados na literatura, algumas estão expostas na Tabela 2.1 do Capítulo 2. A fim de calcular os valores dos parâmetros envolvidos nestes modelos, torna-se necessária a realização de testes experimentais de equilíbrio.

A condução destas experiências pode ser realizada de acordo com vários métodos, como se apresentou no capítulo 2. Neste trabalho adotou-se o método gravimétrico com determinação do teor de umidade de equilíbrio através do método estático, conforme descrito por Barrozo et al. (1998). Um dos principais motivos desta escolha é a facilidade em se obter uma umidade relativa aproximadamente constante na vizinhança da amostra, pois as soluções salinas usadas acabam por determinar uma umidade relativa única em suas proximidades,

quando submetidas a uma temperatura constante (ver Tabela 3.1, Labuzza et al., 1983).

Tabela 3.1 - Umidade relativa das soluções salinas em função da temperatura

Solução Salina	25°C	30°C	40°C	45°C	50°C
LiCl	0,113	0,113	0,112	0,111	0,111
CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> K	0,225	0,216	0,204	0,195	0,192
MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0,328	0,324	0,318	0,314	0,312
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,432	0,432	0,432	0,432	0,433
NaNO <sub>2</sub>	0,645	0,635	0,616	0,603	0,597
NaCl	0,753	0,750	0,748	0,747	0,746
KCl	0,843	0,834	0,818	0,808	0,802

Dentro de recipientes, conforme o esquema mostrado na Figura 3.2, com cerca de  $7.10^{-2}$  m de altura e  $6.10^{-2}$  m de diâmetro, eram colocadas soluções salinas saturadas, as quais garantiam a umidade relativa do ambiente num valor conhecido e constante, mesmo que os sais precipitassem. A cerca de  $3.10^{-2}$  m da base havia um suporte onde o gel era colocado. O recipiente era fechado hermeticamente e mantido à temperatura constante numa câmara com temperatura regulável, da marca FAUVEL, modelo EI 430 G, com temperatura regulável.

Os recipientes eram retirados da câmara de tempos em tempos, para que a solução salina fosse agitada, usando um agitador magnético STIRRER/HOTPLATE, e em seguida efetuada a pesagem do suporte com o gel.

O material ao atingir o equilíbrio, verificado pela constância nas medidas de massa, era então levado para a estufa para a determinação da umidade.

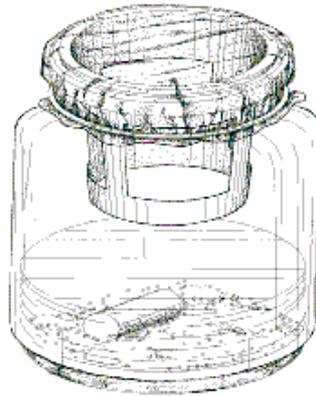


Figura 3.2 - Recipiente usado nos testes de equilíbrio

Em altas umidades relativas, correspondente aos sais cloreto de sódio e cloreto de potássio, na temperatura de 25°C, ocorreu a presença de microorganismos, sendo necessária a repetição de algumas destas experiências, visando obter um resultado confiável.

Foram utilizadas três temperaturas (25°C, 40°C e 50°C) e umidades relativas no intervalo de 11% a 84%, de modo que se pudesse conhecer as umidades de equilíbrio do gel nas condições de temperatura e umidade em que os experimentos de secagem seriam realizados.

Estas umidades de equilíbrio são informações necessárias na modelagem, sendo incorporadas como parte do modelo para caracterizar o sistema ou para servir como condições de contorno. As determinações de equilíbrio foram conduzidas com três réplicas. Após estas determinações, as amostras eram caracterizadas para se calcular as umidades de equilíbrio.

Obtidas as isotermas de dessorção, estas foram usadas na busca do melhor modelo, dentre os utilizados na literatura e apresentados no Capítulo 2, para representar o equilíbrio do sistema ágar-água-ar; informação esta necessária aos modelos que são utilizados para descrever a cinética de secagem.

### 3.3.4 Operação da Unidade de Secagem

Após nova preparação do gel, sendo moldado e tendo-se solidificado o gel era colocado, então, no suporte das amostras que se encontrava dentro da câmara de secagem quando o secador atingia o regime permanente nas condições de operação desejadas. Ocorria assim a secagem em ambas as faces da amostra, com o auxílio do suporte perfurado, mostrado na Figura 3.3. A cada 5 min ( $3 \cdot 10^2$ s) o material era pesado e seu diâmetro e altura eram medidos com auxílio de um paquímetro.

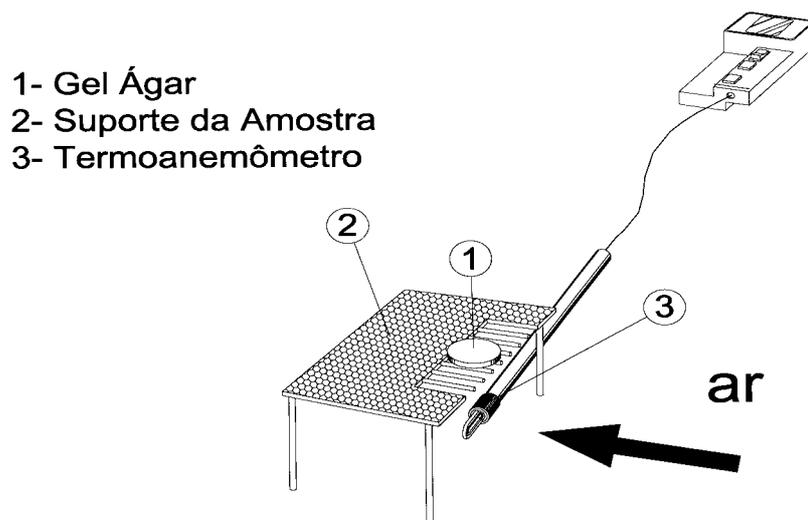


Figura 3.3 - Suporte das amostras.

Um termoanemômetro colocado abaixo do suporte da amostra, media a velocidade e a temperatura do ar. O valor de temperatura e velocidade do ar medidos abaixo do suporte eram confiáveis pois não havia diferença significativa entre as medidas de temperatura e de velocidade do ar de secagem feitas à frente, em cima ou embaixo da amostra de gel. Esta informação foi obtida através do estudo de Singulani & Freire (1999) no mesmo secador, segundo o método utilizado por Sogab (1987). Um higrômetro foi posto no ambiente onde se encontrava o soprador a fim de se obter a umidade absoluta do ar.

Os experimentos foram conduzidos até que três pesagens consecutivas fornecessem o mesmo valor de massa para o gel que estava sendo seco. Operou-se na faixa de velocidade de 1,0 a 4,0 m/s e de temperatura de 35 a 50°C. A temperatura de 50°C foi escolhida como limite superior pois em temperaturas mais altas poderia ocorrer rupturas ou deteriorações no gel, o que não era o objetivo desta investigação. Utilizou-se 35°C como limite inferior, pois uma variação de 15°C entre a temperatura máxima e a mínima do estudo, era suficiente para se aplicar um estudo estatístico. A velocidade de 4,0 m/s foi escolhida como máxima velocidade, pois acima deste valor o gel que estava sendo seco poderia ser lançado para fora do secador, conforme se constatou em testes preliminares. Já a velocidade de 1 m/s foi escolhida como limite inferior por ser usual no estudo da secagem e por fornecer uma variação relativamente alta entre a mínima e a máxima velocidade, favorecendo a análise estatística.

Todos os experimentos foram conduzidos com réplicas, para que se garantisse a reprodutibilidade dos mesmos, validando desta maneira os dados experimentais obtidos, possibilitando assim a análise matemática dos resultados.

Após os experimentos de secagem, as amostras eram levadas para a caracterização. Os dados obtidos de massa da amostra em função do tempo eram convertidos para umidade do ágar em função do tempo, permitindo-se assim a construção de gráficos e a análise matemática apresentada no próximo item.

### 3.4 TRATAMENTO DOS DADOS

A partir da obtenção das isotermas de equilíbrio e da caracterização do material foi possível determinar os valores das umidades de equilíbrio nas diversas umidades relativas e temperaturas utilizadas.

Os valores experimentais de umidades de equilíbrio foram ajustados aos modelos apresentados na Tabela 2.1 via o método de regressão não linear, com auxílio do software STATISTICA<sup>®1</sup>, determinando-se os parâmetros destes modelos (ver Tabela A1, no Anexo A) e através dos critérios escolhidos, identificando-se o melhor modelo para representar o equilíbrio do sistema ágar-água-ar.

Com base nos experimentos de secagem e na caracterização do material foi possível determinar as umidades do material e os adimensionais de umidade em função do tempo, calcular as taxas de secagem ao longo do tempo e verificar as variações no tamanho da amostra de gel em função do tempo de operação.

---

<sup>1</sup> Programa da StatSoft.

Construíram-se também gráficos com o auxílio do programa ORIGIN<sup>®2</sup> e tabelas, a partir de planilhas feitas no EXCEL<sup>®3</sup>. Foi feita a determinação da constante de secagem K, via regressão não linear no software STATISTICA<sup>®1</sup>, permitindo uma análise estatística a fim de se comprovar a influência da temperatura e da velocidade do ar na secagem e a representação matemática do processo de secagem através de modelos empíricos. Todos os resultados obtidos com o respectivo tratamento dos dados são apresentados no próximo capítulo.

---

<sup>2</sup> Programa da Microcal Software, Inc.

<sup>3</sup> Programa da Microsoft.

<sup>1</sup> Programa da StatSoft.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **4.1 PREPARAÇÃO DO GEL**

Apesar da literatura fornecer métodos para a preparação do gel, não se tinha informações sobre a concentração de ágar que deveria ser usada no preparo das amostras. A partir desta necessidade, foram conduzidos testes com concentrações de ágar em diferentes valores, ou seja, 1, 3, 5, 7 e 10% (P/V).

Optou-se, com base em testes preliminares, em preparar o gel em uma concentração de 5%. Esta decisão deveu-se ao fato de que em concentrações abaixo de 5% o gel não apresentava consistência suficiente para que pudesse ser manipulado. Por outro lado, em concentrações acima de 5% se tornava difícil o preparo, havendo queima do material e dificuldade de agitação da mistura.

A amostra era preparada com o gel ainda no estado líquido e com a temperatura elevada. Isto porque, quando a temperatura atingia um valor em torno de 40°C, o gel se solidificava tornando difícil a preparação da amostra no molde, não se conseguindo a espessura desejada para as amostras.

O gel era muito fácil de ser moldado, o que permitiu realizar os testes com amostras na forma cilíndrica, tanto nos experimentos de secagem, quanto nas determinações de equilíbrio. O gel moldado para as determinações de equilíbrio

tinha em torno de 5g ( $5 \cdot 10^{-3}$ kg), enquanto que o gel moldado para os experimentos de secagem tinha em torno de 6,4g ( $6,4 \cdot 10^{-3}$ kg). Depois de preparado o gel, a cor da amostra era esbranquiçada, fácil de manipular devido à concentração adequada de ágar. O material não apresentou rupturas, nem mesmo após o processo de secagem, sendo que este fato já era esperado, pois as temperaturas utilizadas durante os experimentos não eram elevadas. Após a preparação se tornou possível a realização das determinações das isotermas de equilíbrio e os experimentos de cinética de secagem no secador de convecção forçada.

#### 4.2 ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO

A partir da preparação e da caracterização das amostras foi possível determinar as umidades de equilíbrio. A Tabela 4.1 apresenta os resultados das umidades de equilíbrio, assim como a Figura 4.1, só que inclui as réplicas e as discrepâncias (s) entre as réplicas para cada determinação de umidade de equilíbrio. O valor de s é dado pela diferença entre o maior e o menor valor obtido no conjunto de três medidas, a uma dada temperatura e umidade relativa.

Tabela 4.1 – Umidades de equilíbrio (%bu)

Solução Salina	25°C	40°C	50°C
LiCl	8,63	4,63	3,45
	8,34	4,42	3,40
	7,61	3,93	3,01
	s=1,02	s=0,70	s=0,44
CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> K	11,44	8,44	5,14
	11,37	8,22	4,71
	11,32	7,37	4,01
	s=0,12	s=1,07	s=1,13
MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	15,06	10,81	7,59
	14,93	9,93	7,27
	14,78	9,19	7,00
	s=0,28	s=1,62	s=0,59

Tabela 4.1 – Umidades de equilíbrio (%bu)

Solução Salina	25°C	40°C	50°C
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	17,24	13,51	10,72
	16,67	13,49	10,62
	15,87	13,20	10,40
	s=1,37	s=0,31	s=0,32
NaNO <sub>2</sub>	20,45	18,21	13,63
	20,37	17,67	13,37
	19,80	16,70	12,55
	s=0,65	s=1,51	s=1,08
NaCl	22,35	19,24	15,11
	21,80	19,09	14,57
	21,60	18,53	13,63
	s=0,75	s=0,71	s=1,48
KCl	24,49	22,19	16,08
	24,42	21,24	15,77
	24,06	20,77	15,43
	s=0,43	s=1,42	s=0,65

A discrepância média dos conjuntos foi de 0,84% (bu), verificando-se assim que houve reprodutibilidade das determinações de umidade de equilíbrio devido a este baixo valor.

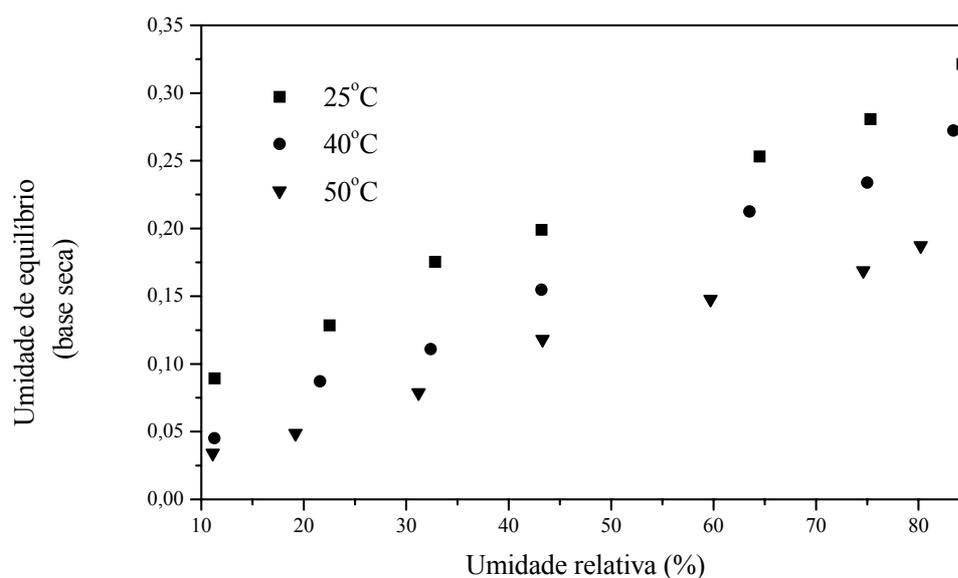


Figura 4.1 – Umidades de equilíbrio em função da umidade relativa para as temperaturas de 25, 40 e 50°C.

Objetivando representar as isotermas de dessorção para o gel foram analisados os modelos de Halsey (1948), Halsey modificado (Osborn et al., 1989), Luikov (1921), Henderson (1952), Henderson-Thompson (Thompson et al., 1968), Chung & Pfof (1967), Chen & Clayton (1971) e G.A.B. (Garcia et al., 1995), apresentados na Tabela 2.1.

Os critérios utilizados a fim de se comparar os modelos foram os usados por Kechaou & Maalej (1999) e por McMinn & Magee (1997). Utilizaram-se os valores E (erro médio percentual) e  $r^2$  (variância explicada), definidos nas Equações (34), (35), (36), (37) e (38). Também se levou em consideração a aleatoriedade dos resíduos.

$$E = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{esti} - X_{exp i}|}{X_{exp i}} \quad (34)$$

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (35)$$

$$S_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{esti} - X_{exp i})^2}{n-p}} \quad (36)$$

$$S_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X}_e - X_{exp i})^2}{n-1}} \quad (37)$$

$$\overline{X}_e = \frac{\sum_{i=1}^n X_{\text{exp}i}}{n} \quad (38)$$

A Tabela 4.2 mostra os resultados de E e  $r^2$  para os modelos avaliados.

Tabela 4.2 – Valores de E e  $r^2$  para os modelos estudados.

Modelos	E	$r^2$
G.A.B.	6%	0,980
Halsey modificado	28%	0,924
Henderson-Thompson	31%	0,922
Chung-Pfost	37%	0,805
Chen & Clayton	37%	0,800
Henderson	28%	0,807
Luikov	64%	0,807
Halsey	74%	0,769

Dentro dos critérios usados, verificou-se que o modelo G.A.B. forneceu o menor valor de E, Tabela 4.2, ficando abaixo de 10%, considerado por McMinn & Magee (1997) como sendo um bom ajuste.

Aproximadamente 98% da variância foi explicada. O modelo também apresentou uma distribuição aleatória dos resíduos em torno do zero como apresenta a Figura 4.2. Os outros modelos analisados ficaram com E acima de 10%. A variância explicada foi baixa, exceto para os modelos de Halsey modificado e Henderson-Thompson. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam as distribuições dos resíduos correspondentes a estes dois modelos que se mostram tendenciosos, bem como os demais modelos (ver Anexo A).

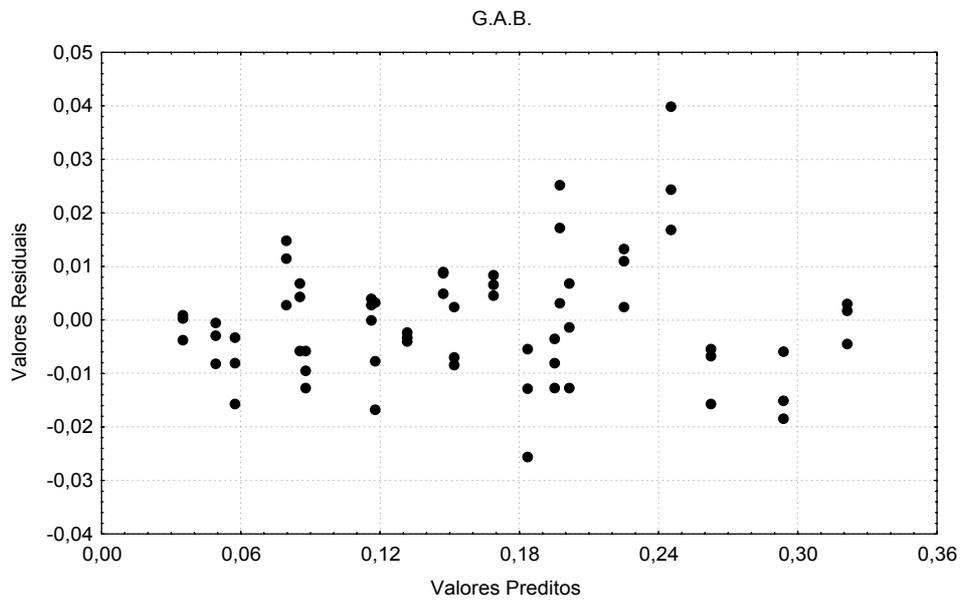


Figura 4.2 – Distribuição dos resíduos para o modelo G.A.B.

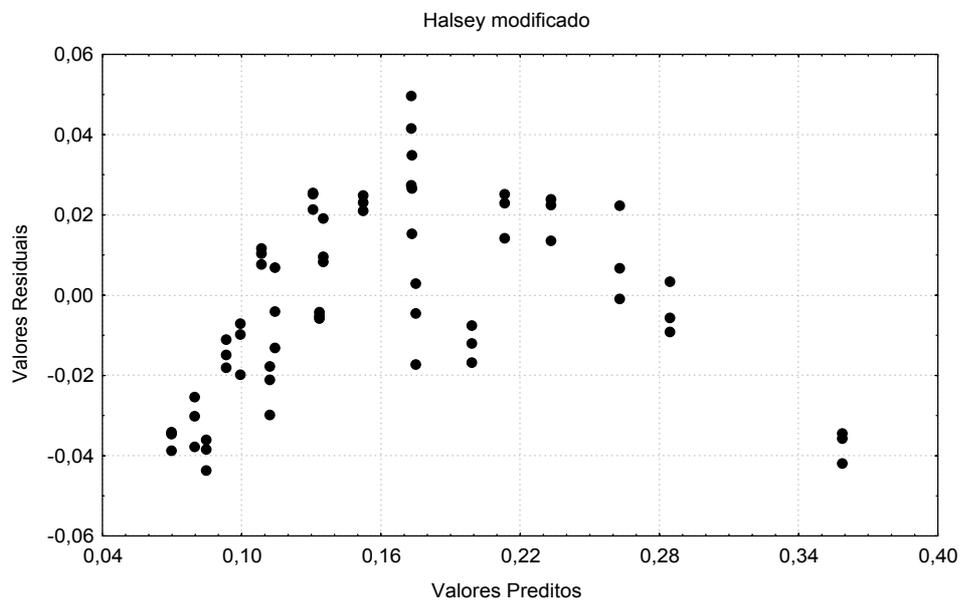


Figura 4.3 – Distribuição dos resíduos para o modelo Halsey modificado.

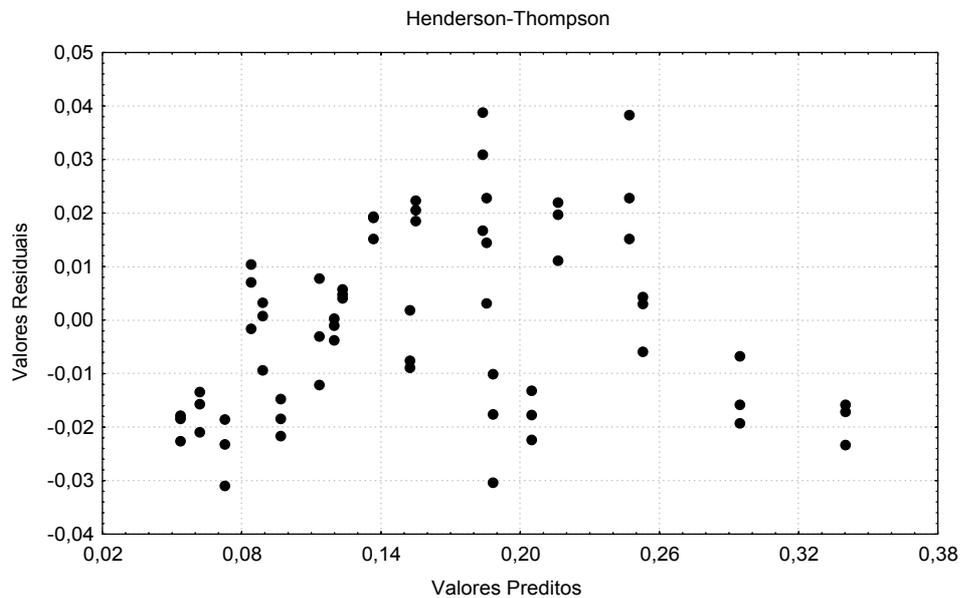


Figura 4.4 – Distribuição dos resíduos para o modelo Henderson-Thompson.

Assim sendo, o modelo proposto para representar o teor de umidade de equilíbrio em base seca do gel é o modelo G.A.B., dado pela Equação (39):

$$X_e = \frac{a.e^{E/T}.c.e^{D/T}.UR.b}{(1-a.e^{E/T}.UR)(1-a.e^{E/T}.UR+a.e^{E/T}.c.e^{D/T}.UR)} \quad (39)$$

onde,

$$a = 6,382.10^{-3};$$

$$E = 1251;$$

$$c = 1,478.10^{-3};$$

$$D = 2586 \text{ e}$$

$$b = 0,248.$$

A temperatura está em K e a umidade relativa do ar varia de 0 a 1.

A Equação (39) é uma informação imprescindível para a aplicação dos modelos que descrevem a cinética de secagem, pois pode fornecer a condição do estado final da secagem do gel em determinadas condições de temperatura e umidade relativa do ar. O ajuste é válido apenas na faixa de umidade relativa de 11 a 84% e de temperatura de 25 a 50°C. Cabe ressaltar também, que o modelo G.A.B. forneceu uma distribuição normal de seus resíduos com valor médio em torno de zero, como se verifica na Figura A7, no Anexo A. A comparação entre o modelo G.A.B. e os dados experimentais (Figura A6), assim como, os parâmetros encontrados para os outros modelos avaliados (Tabela A1), encontram-se no Anexo A.

A partir do conhecimento das umidades de equilíbrio foi possível prosseguir o estudo da secagem do ágar, pois o modelo usado para representar a cinética de secagem necessita desta informação a fim de caracterizar o material.

#### 4.3 CINÉTICA DE SECAGEM

A cinética de secagem descreve como ocorre a variação de umidade do gel em função do tempo de secagem. Com este estudo tem-se a possibilidade de se obter, por exemplo, informações sobre o encolhimento do gel, períodos de secagem, taxas de secagem e determinar o teor de umidade crítica. Todas estas informações são importantes para descrever matematicamente o comportamento do gel ágar no seu processo de secagem.

#### 4.3.1 Reprodutibilidade dos Experimentos

Os testes referentes à cinética de secagem foram conduzidos com réplicas a fim de garantir a reprodutibilidade dos experimentos de secagem realizados.

A Figura 4.5 mostra o comportamento das réplicas para o experimento a 1,0 m/s e 50°C e que é típico para os demais experimentos realizados.

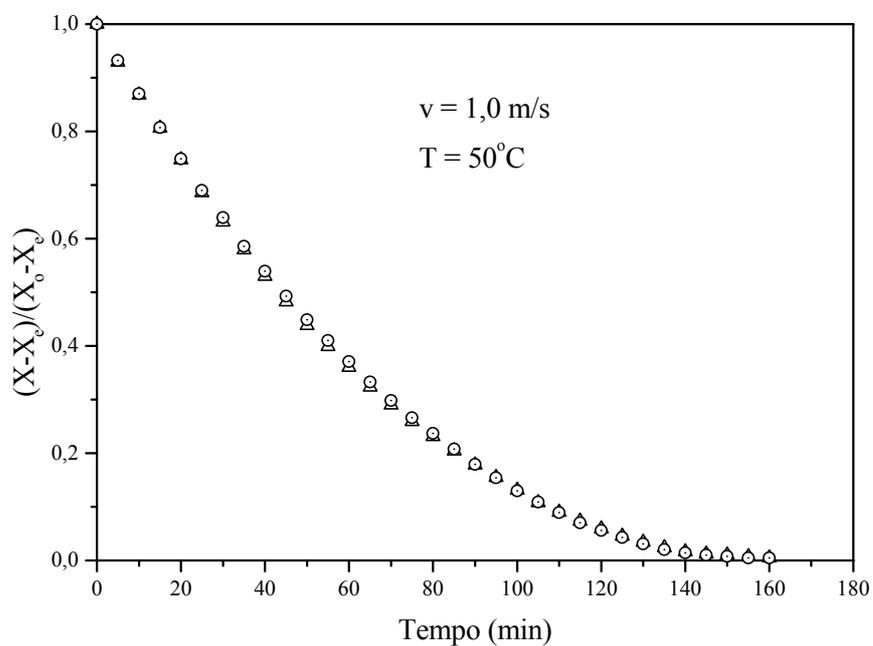


Figura 4.5 - Adimensional de umidade em função do tempo para as réplicas.

A diferença média entre os valores de adimensional de umidade das réplicas (com valor em torno de 0,002) é menor que o valor do erro de medida do adimensional de umidade (com valor em torno de 0,003), calculado com base na propagação do erro de medida da umidade, de acordo com Goldemberg (1970). Com isto pode se constatar a reprodutibilidade dos experimentos.

### 4.3.2 Encolhimento

Na condução de todos os experimentos as amostras apresentaram o fenômeno de encolhimento, sendo reduzidas em torno de 50% do diâmetro e da espessura inicial.

A relação entre o diâmetro e a espessura do gel é apresentada na Figura 4.6. Este comportamento foi típico para todos os experimentos realizados.

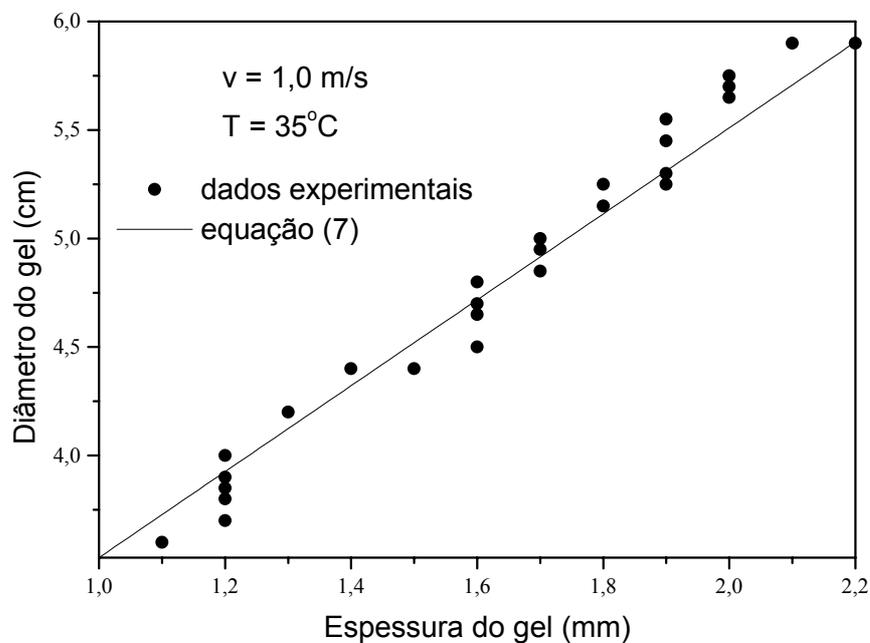


Figura 4.6 - Diâmetro do gel em função da espessura (1,0 m/s e 35°C).

A dependência do diâmetro em função da espessura durante o encolhimento é da forma linear, dada por:

$$D = 1,55 + 1,98.L \quad (40)$$

Sendo  $r^2$  igual a 0,91 e estando o diâmetro em cm e a espessura em mm.

Esta relação, juntamente com a equação do volume de um cilindro e com a relação de encolhimento para o gel relatada por Iglesias et al. (1993), Equação (3), fornece equações do tipo  $D=D(X)$  e  $L=L(X)$ . Incorporando ainda a representação matemática da cinética de secagem, pode-se obter relações do tipo  $D=D(t)$  e  $L=L(t)$ .

Em nenhum momento verificou-se visualmente qualquer tipo de ruptura no gel devido ao seu encolhimento. Houve apenas o retorcimento das amostras quando apresentavam diâmetro entre 3 e  $4 \cdot 10^{-2}$  m. A cor final de todas as amostras era um amarelo muito fraco, chegando a ser transparente, conforme era esperado. A menor espessura obtida foi de  $1 \cdot 10^{-3}$  m visto que o material não favorecia medidas inferiores a esta devido ao retorcimento. O diâmetro final ficou em torno de  $3,1 \cdot 10^{-2}$  m. Os valores altos obtidos para o encolhimento são devidos à alta transferência de umidade do gel para o ar de secagem.

#### 4.3.3 Variação do Adimensional de Umidade em função do Tempo

Esta retirada de umidade do material em função do tempo mostra ainda mudança em seu comportamento em relação às variações de temperatura e de velocidade a que foram submetidas as amostras.

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam a dependência do adimensional de umidade em função do tempo quando se varia a velocidade e a temperatura do ar de secagem, respectivamente.

Estes comportamentos mostraram-se típicos para todas as variações de velocidades e temperaturas utilizadas.

Os demais gráficos do adimensional de umidade em função do tempo para os outros experimentos realizados são apresentados no Anexo B.

Os dados dos experimentos de secagem obtidos nas operações no secador de convecção forçada, necessários para a construção dos gráficos de adimensional de umidade em função do tempo, são mostrados no Anexo C. Também encontra-se neste mesmo anexo a Tabela C17, que traz os valores de massa obtidos na determinação de umidade.

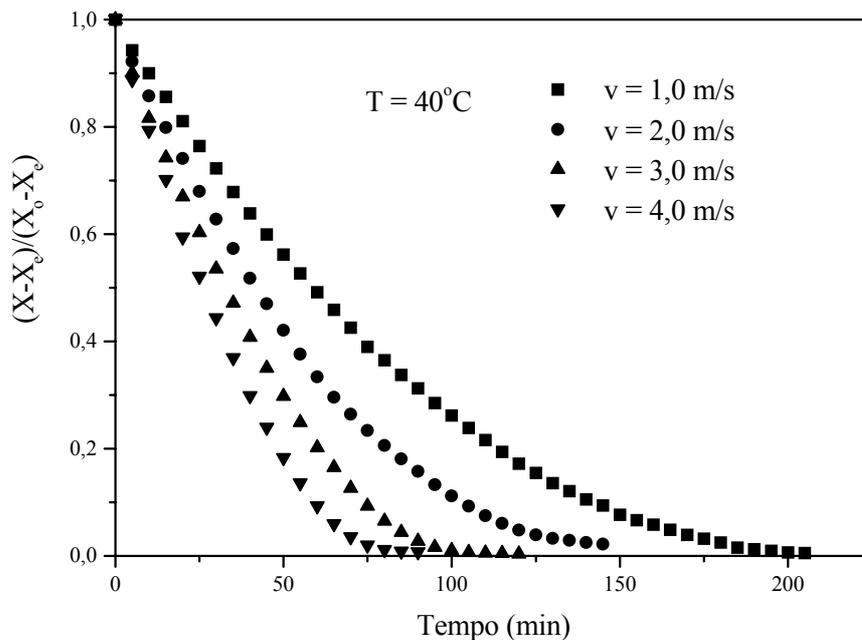


Figura 4.7 – Efeito da velocidade do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo ( $T=40^\circ\text{C}$ ).

Pode-se observar na Figura 4.7 que a maior variação do adimensional de umidade ocorre para velocidades maiores em uma dada temperatura. Este comportamento já era esperado devido à diminuição da camada limite com o aumento da velocidade, facilitando a transferência de massa entre o gel e o ar.

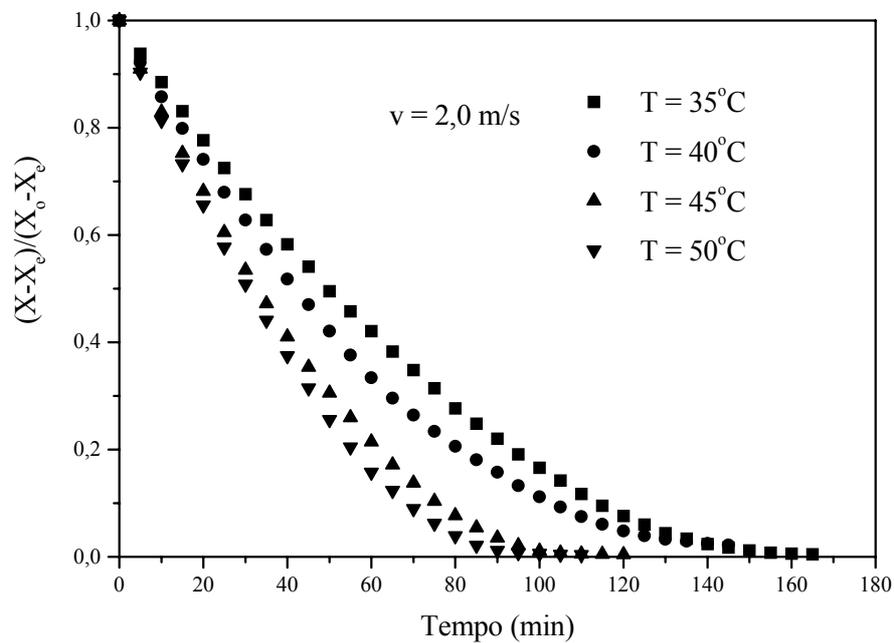


Figura 4.8 – Efeito da temperatura do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo ( $v=2,0 \text{ m/s}$ ).

A partir da Figura 4.8, verifica-se que quanto maior a temperatura maior a velocidade do processo de secagem. Isto se deve a uma maior transferência de energia entre o ar de secagem e o gel ágar, facilitando a evaporação da água contida no gel.

#### 4.3.4 Períodos de Secagem

Com os experimentos de secagem realizados, foi possível verificar o comportamento da taxa de secagem do gel. Na Figura 4.9 apresenta-se a densidade de fluxo de massa (d.f.m.) em função do tempo.

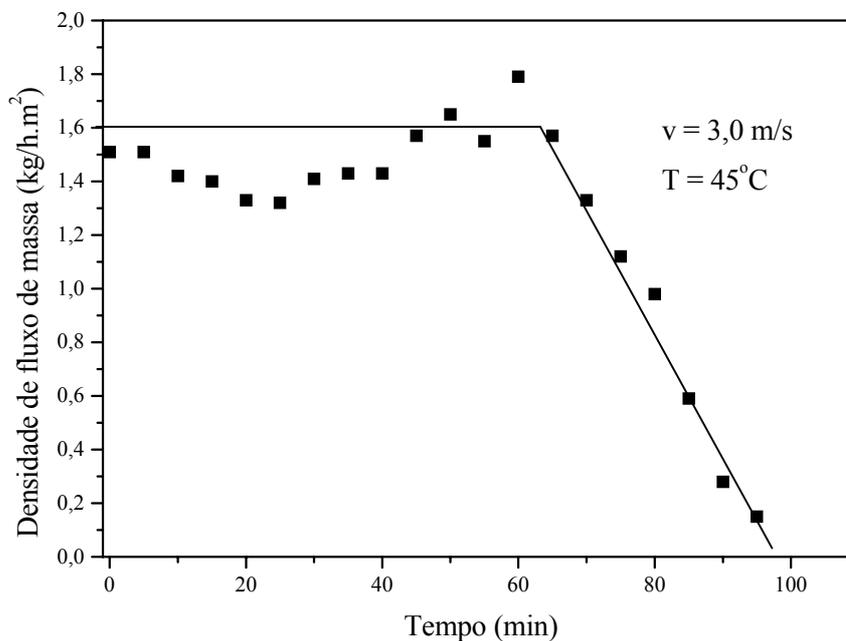


Figura 4.9 - Densidade de fluxo de massa em função do tempo (3,0 m/s e 45°C).

Através dos dados experimentais notam-se dois períodos de secagem, aproximados por duas retas a fim de facilitar a discussão destes resultados. O primeiro período, apesar de não ser realmente constante (pois apresenta uma variação da d.f.m. em torno de uma d.f.m. média), é chamado de período de taxa constante de secagem. As variações apresentadas nos valores das taxas de secagem neste período provavelmente ocorrem devido ao rearranjo das moléculas de ágar que formam a matriz sólida. Ao final deste período ocorre uma tendência de aumento da d.f.m. e, então, alcança-se o período de taxa decrescente de secagem.

Para o experimento representado na Figura 4.9, o primeiro período se estende por aproximadamente 65 minutos de um total em torno de 100 minutos de

experimento, até que se atinja a umidade crítica, sendo que as taxas de secagem foram calculadas por diferenciação numérica.

Todos os experimentos mostraram-se semelhantes ao da Figura 4.9. Este fato já era esperado, de acordo com o trabalho de Iglesias et al. (1993).

Na Tabela 4.3 tem-se a porcentagem do tempo de cada experimento de secagem (com réplica) correspondente ao período de taxa constante de secagem.

Tabela 4.3 – Porcentagem de tempo do processo a taxa constante.

Velocidade	Temperatura			
	35°C	40°C	45°C	50°C
1,0 m/s	72%	75%	65%	68%
	74%	71%	59%	63%
2,0 m/s	69%	79%	65%	57%
	55%	69%	63%	55%
3,0 m/s	62%	58%	67%	53%
	58%	54%	58%	53%
4,0 m/s	65%	59%	60%	54%
	57%	50%	47%	46%

Pode-se constatar na Tabela 4.3 que o período de taxa constante é predominante na secagem do gel. Em média, para as condições estudadas, 61% do tempo despendido na operação de cada experimento é destinado ao período de taxa constante de secagem, ou seja, para que o material partindo da umidade inicial atinja a umidade crítica.

As umidades críticas foram obtidas a partir dos gráficos de d.f.m. em função da  $X_{bs}$ . Tomou-se como umidade crítica o valor de umidade do final do período de taxa constante. A Tabela 4.4 apresenta os valores de umidade crítica para cada experimento realizado. O valor da umidade crítica ficou em torno de  $(1,4 \pm 0,3)$  (bs). Mrani et al. (1995) relatam que de 0 a 1,2 (bs) de umidade observa-se parte do período de taxa decrescente de secagem, implicando que a umidade crítica esteja acima de 1,2 (bs), o que torna o valor médio de 1,4 (bs) coerente com os resultados apresentados por estes pesquisadores.

Tabela 4.4 – Umidades críticas para cada experimento (bs)

Velocidades Experimentais	Temperaturas Experimentais			
	35°C	40°C	45°C	50°C
1,0 m/s	1,10	1,71	1,63	1,69
	1,45	1,36	1,35	1,31
2,0 m/s	1,07	1,19	1,48	1,37
	1,13	1,34	1,57	1,28
3,0 m/s	2,25	1,44	1,28	2,00
	1,52	1,39	1,48	2,35
4,0 m/s	1,59	1,71	1,03	1,27
	1,03	1,27	1,54	1,43

Com base nos valores apresentados na Tabela 4.4, constata-se a grande variação existente entre as umidades críticas. Provavelmente deve-se ao fato de que o gel se retorce após um certo tempo de secagem, o que dificulta a medida de diâmetro da amostra, necessária no cálculo da taxa de secagem, ou talvez ao

intervalo de tempo usado para as medidas, que era de 5 min. Talvez com intervalos menores fosse possível diminuir muito a variabilidade dos dados de umidade crítica.

A densidade de fluxo de massa pode ser expressa também em função da umidade em base seca do material, como se verifica na Figura 4.10.

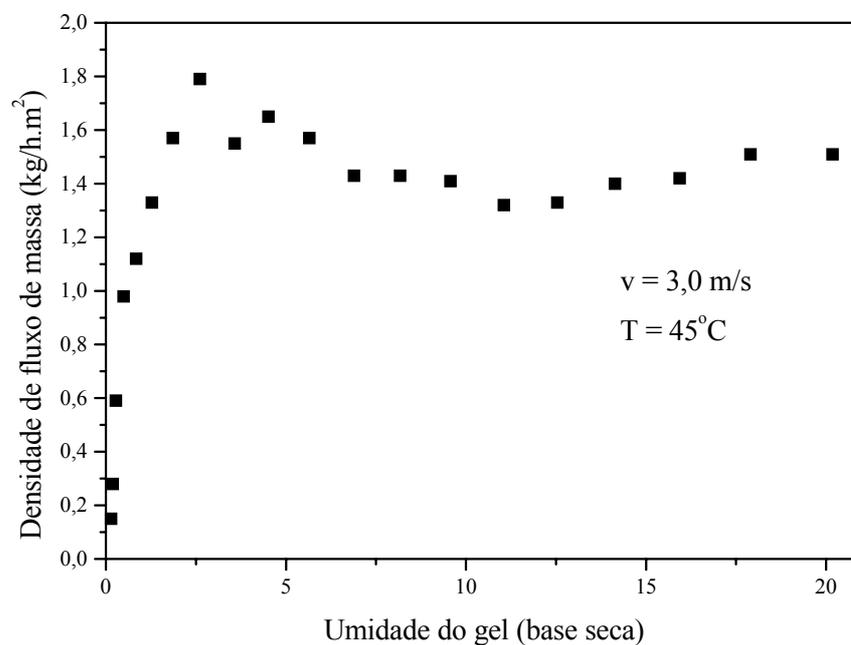


Figura 4.10 - Densidade de fluxo de massa em função da umidade do gel em base seca (3,0 m/s e 45°C)

A dependência da d.f.m. em função da umidade, observada na Figura 4.10, mostrou-se típica para todos os experimentos realizados.

A elevação dos valores de d.f.m., verificada nas Figuras 4.9 e 4.10, um pouco antes do material atingir a umidade crítica, pode ser provavelmente devido ao aumento da taxa de encolhimento, ou seja, devido à mudança no

comportamento do diâmetro das amostras em função do tempo. Esta elevação da taxa de secagem também é relatada por Iglesias et al. (1993).

A Figura 4.11 mostra o diâmetro da amostra de gel em função do tempo. Pode-se notar que decorridos, aproximadamente, 45 minutos de secagem, a diminuição do diâmetro do gel é mais rápida, justificando o aumento da d.f.m, a partir de valores em torno deste tempo, pois a d.f.m. é a razão entre a variação de massa em um determinado tempo e a área da amostra de gel.

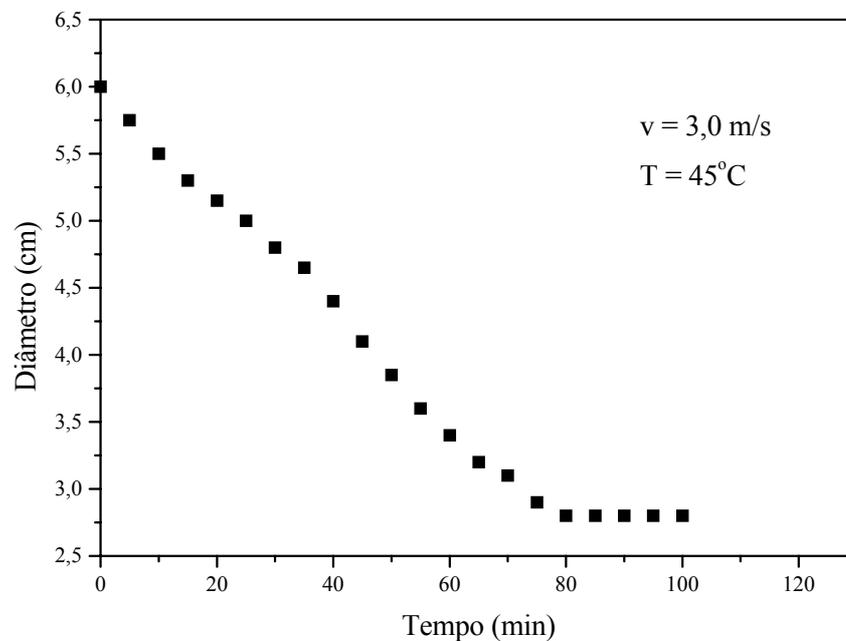


Figura 4.11 – Diâmetro do gel em função do tempo (3,0 m/s e 45°C).

Constatando-se a mudança na velocidade do processo de secagem quando havia variações de velocidade e temperatura do ar, conforme as Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente, foram determinadas as densidades de fluxo de massa médias (d.f.m.m.) dos períodos de taxa constante para todos os experimentos e foi feito o

gráfico das d.f.m.m. em função da velocidade do ar, em cada temperatura estudada, como apresentado na Figura 4.12.

Pode-se notar, com base na Figura 4.12, o aumento da d.f.m.m. com o aumento da velocidade do ar de secagem, para todos valores de temperatura utilizados. Isto se dá, devido à diminuição da camada limite, conforme ocorre o aumento da perturbação provocada pelo aumento da velocidade do ar. Também se constata o aumento da d.f.m.m. quando a temperatura aumenta, para uma mesma condição de velocidade do ar, devido ao maior fornecimento de energia para a evaporação da água, facilitando a difusão efetiva da água no interior do gel.

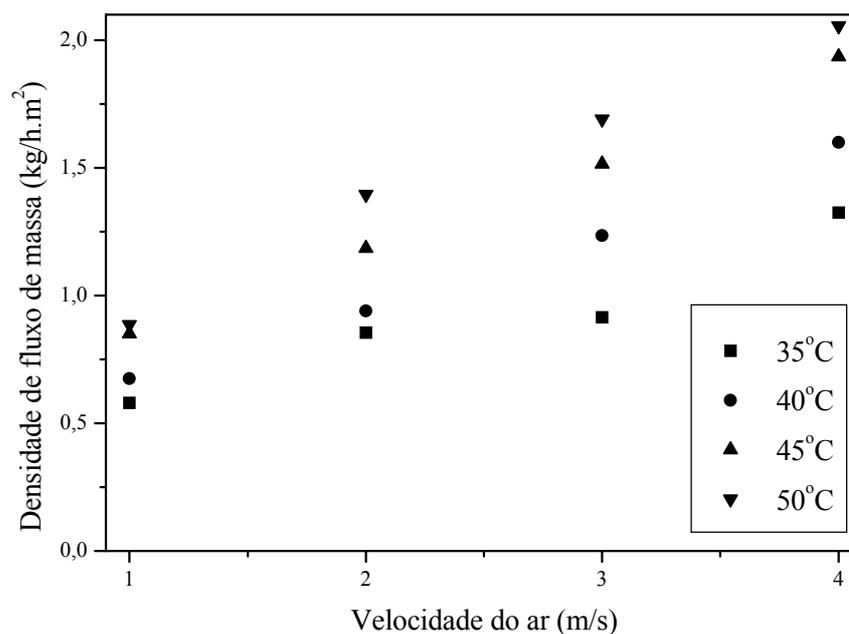


Figura 4.12 - D.f.m.m. do período de taxa constante de secagem do gel ágar em função da velocidade do ar de secagem, parametrizado na temperatura do ar de secagem.

O aumento nos valores das taxas de secagem com o aumento da temperatura e/ou da velocidade implica na diminuição do tempo médio de duração

de cada experimento, como apresenta a Figura 4.13. Foram adicionados às quatro temperaturas os valores relativos à velocidade igual a zero, que corresponde ao mecanismo de convecção natural. Todos os experimentos iniciam com amostras aproximadamente de mesma massa,  $(6,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$  kg, e umidades iniciais. As umidades absolutas do ar ficaram com valores muito próximos,  $(10,7 \pm 0,5) \text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ , durante todo o processo.

Os experimentos foram conduzidos até que se verificasse peso constante da amostra. Cabe fazer duas comparações observando a Figura 4.13. Constata-se que a secagem a  $35^\circ\text{C}$  e  $1 \text{ m/s}$  necessita aproximadamente do mesmo tempo que a secagem a  $50^\circ\text{C}$  e  $0 \text{ m/s}$ . Verifica-se, também, que há uma redução em torno de 38% no tempo de secagem quando alteram-se as condições de operação de  $50^\circ\text{C}$  e  $0 \text{ m/s}$  (convecção natural) para  $50^\circ\text{C}$  e  $1 \text{ m/s}$  (convecção forçada).

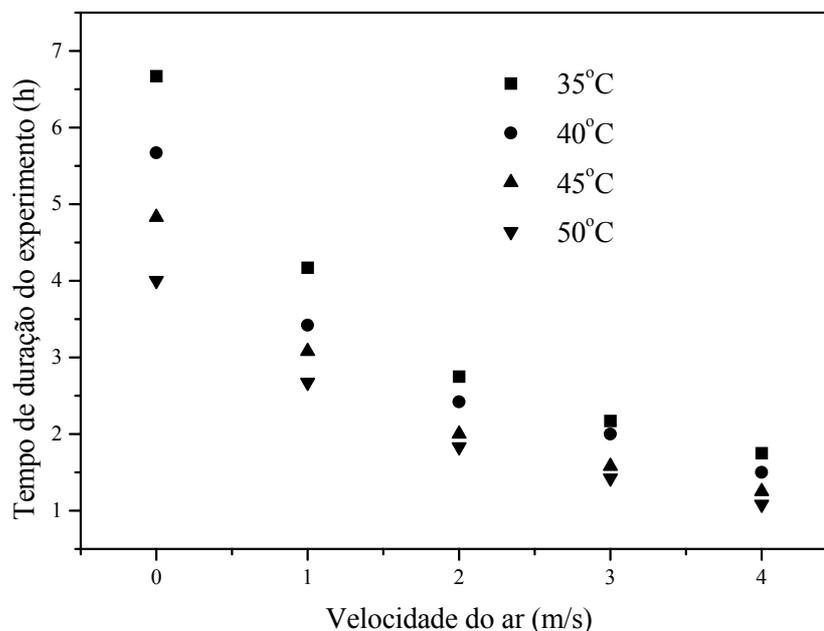


Figura 4.13 - Duração do experimento em função da velocidade do ar de secagem.

#### 4.3.5 Verificação da Influência da Temperatura e da Velocidade do Ar na Cinética

Assim como o tempo de duração está relacionado às taxas de secagem, os valores da constante de secagem do modelo de Lewis (1921), obtidos por regressão linear, também estão relacionados às taxas de secagem. Os aumentos de temperatura e de velocidade causam aumentos na velocidade do processo de secagem, causando assim um aumento no valor da constante de secagem. A Figura 4.14 permite observar os valores médios de K para todos os experimentos realizados em função da velocidade do ar de secagem. Os valores das constantes de secagem para cada experimento foram utilizados com a finalidade de representar o fenômeno de secagem e de se fazer um estudo de significância sobre as influências na cinética de secagem. O modelo de Lewis mostrou um bom ajuste aos dados experimentais, com  $r^2$  em torno de 0,99 para todos os experimentos.

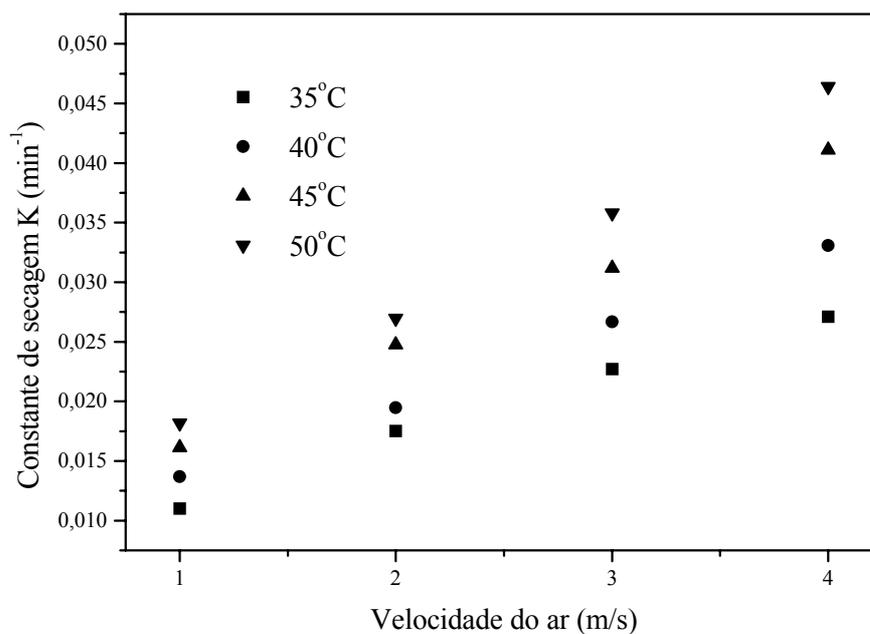


Figura 4.14 - K em função da velocidade e temperatura do ar de secagem.

Fez-se, então, uma análise de variância segundo Hoffman & Vieira (1989), a partir de todos os valores da constante de secagem obtidos.

Adotando-se um nível de significância de 5% (o que significa ter uma chance de erro de 5% ao admitir que existe a influência da temperatura e da velocidade do ar no processo de secagem, quando não existe(Hoffman & Vieira, 1989)), tem-se um valor tabelado de 2,35 para F. Constata-se que este valor é menor do que os calculados para T, v e a interação entre T e v, conforme o que é mostrado na Tabela 4.5, que trata da análise de variância. Observa-se assim que as influências da temperatura, velocidade e da interação entre T e v são significantes na cinética de secagem.

Tabela 4.5 – Análise de Variância das Constantes de Secagem

Fontes	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F
T	3	0,000701	0,000234	75
v	3	0,002159	0,00072	231
T x v	9	0,0001	1,12E-05	4
Tratamento	15	0,002961	0,000197	
Resíduo	16	4,98E-05	3,11E-06	
Total	31	0,003011	9,71E-05	$F_{0,05;15;16} = 2,35$

Coube então comparar as médias dos valores de K devido à variação de velocidade para cada temperatura e de K devido à variação da temperatura para cada velocidade. Usou-se, então, o teste de Tukey (Hoffman & Vieira, 1989).

Ao nível de 5% de significância, a diferença mínima significativa (d.m.s.) entre as médias, é dada por:

$$d.m.s. = q \sqrt{\frac{QM_{residuo}}{r}} \quad (41)$$

onde,  $q = 5,66$  e  $r = 2$ .

A d.m.s. teve um valor de 0,0071. Constatou-se que variações de 5°C para uma determinada velocidade mostraram-se insignificantes na variação de K em sua maioria. Na velocidade de 1,0 m/s, a variação de K só é significativa para diferenças de temperaturas iguais a 15°C. Nas temperaturas de 35 e 40°C, variações de 1,0 m/s na velocidade do ar em geral são insignificantes na variação de K. Todas as diferenças são apresentadas na Tabela B1, no Anexo B, onde estão em **negrito** as diferenças não significativas.

Portanto, os valores de K para todo o processo podem ser obtidos pela Equação (42):

$$K = -0,157 + 8,886 \cdot 10^{-4} \cdot T - 1,161 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 7,891 \cdot 10^{-2} \cdot v + 1,008 \cdot 10^{-4} \cdot v^2 + 2,718 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot v, \quad (42)$$

com  $r^2$  igual a 0,98; onde T está em K, v em m/s e K em  $\text{min}^{-1}$ .

#### 4.3.6 Representação dos Períodos de Secagem

A partir da alta umidade inicial do gel, cerca de 95%(bu), resolveu-se, então, comparar a evaporação da água com a transferência de umidade do gel para o ar. Para tanto secou-se simultaneamente gel e água no secador sob as mesmas condições operacionais. Os valores experimentais obtidos para as densidades de fluxo de massa das duas substâncias são apresentados na Figura 4.15.

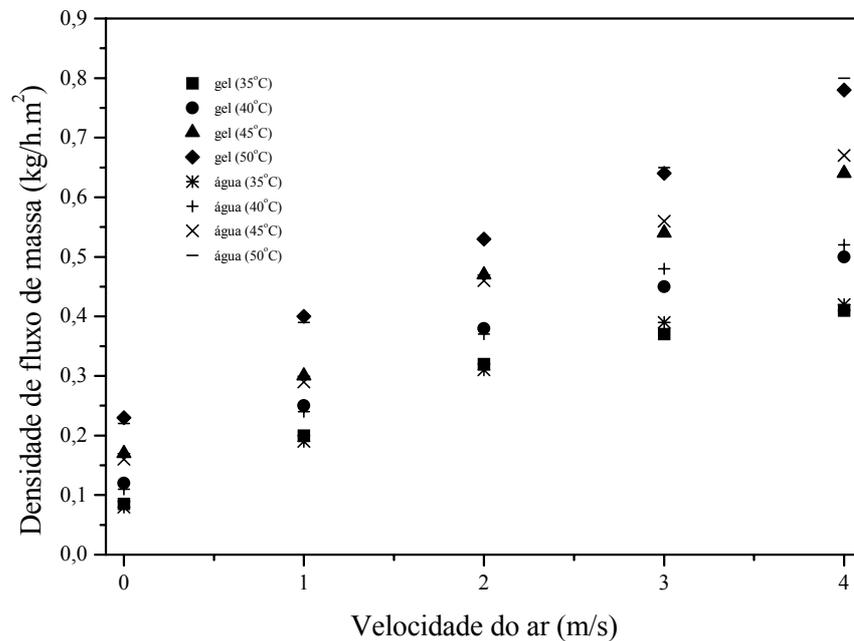


Figura 4.15 - d.f.m. em função da velocidade para o gel e para a água.

Na Figura 4.15, pode-se observar que os valores obtidos para o gel e para a água, nas mesmas condições, são aproximadamente iguais. As diferenças constatadas nas velocidades maiores podem ser justificadas pelo arraste de água, na forma líquida, do suporte e pela variação existente, no período de taxa constante, na densidade de fluxo de massa do gel.

Esta semelhança na transferência de massa sugere o uso das relações apresentadas na literatura para a evaporação da água a fim de representar a transferência de massa na secagem convectiva do gel ágar no período de taxa constante, nas condições operacionais utilizadas no secador. A densidade de fluxo de massa do gel, no período de taxa constante de secagem, pode então ser dada, segundo Eckert e Drake Jr. (1959), como sendo:

$$N = \frac{h_D}{85,74 \cdot T} \cdot (P_{H_2O_{sat}} - P_{H_2O_{ar}}) \cdot 144 \quad (43)$$

onde  $h_D$  está em ft/h, T em Rankine, P em psi e N em lb/h.ft<sup>2</sup>.

Pode-se obter  $h_D$  através da seguinte relação, segundo Treybal (1980):

$$\frac{h}{\rho_{ar} \cdot \text{seco} \cdot h_D \cdot C_p} = \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{0,567} = Le^{0,567} \quad (44)$$

$$h = \frac{0,664 \cdot K}{x} \cdot \left(\frac{\mu \cdot C_p}{K}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\rho \cdot v_{ar} \cdot x}{\mu}\right)^{1/2} \quad (45)$$

onde x está em ft, K em Btu/(h.ft.F) e h está em Btu/(h.ft<sup>2</sup>.F)

Para o caso em que  $Le=1$ , obtém-se a relação de Lewis, que é usada para os regimes laminar e turbulento, mas que representa melhor o regime turbulento, segundo Eckert e Drake Jr. (1959). Através da relação de Lewis  $h_D$  é dado por:

$$h_D = \frac{h}{\rho_{ar} \cdot \text{seco} \cdot C_p} \quad (46)$$

Utilizando-se a relação de Lewis, Equação (46), para se prever a densidade de fluxo de massa do gel ágar, através da Equação (43), obtém-se a Equação (47):

$$N = \frac{A \cdot \sqrt{v}}{(1,8 \cdot T + 0,6)} \cdot (P_{H_2O_{sat}} - P_{H_2O_{ar}}) \quad (47)$$

As variáveis v, T e P desta equação estão no sistema internacional, sendo N dado em kg/h.m<sup>2</sup> e A em (R.s<sup>5/2</sup>)/(3600.m<sup>3/2</sup>). O valor de A é de 0,203 s<sup>5/2</sup>/(3600.m<sup>3/2</sup>). A Equação (47) é válida apenas na faixa de temperatura estudada, pois as propriedades utilizadas foram tomadas como médias entre 35 e 50°C. Na Tabela 4.6 são apresentados os valores das densidades de fluxo de massa do gel

obtidos experimentalmente nas velocidades de 1, 2, 3 e 4 m/s, nas temperaturas de 35, 40, 45 e 50°C, na umidade absoluta do ar de 16 g<sub>água</sub>/kg<sub>ar seco</sub>.

Tabela 4.6 – Densidades de fluxo de massa experimentais do gel ágar (kg/h.m<sup>2</sup>).

Velocidades Experimentais	Temperaturas Experimentais			
	35°C	40°C	45°C	50°C
1,0 m/s	0,20	0,25	0,30	0,40
2,0 m/s	0,32	0,38	0,47	0,53
3,0 m/s	0,37	0,45	0,54	0,64
4,0 m/s	0,41	0,50	0,64	0,78

A Tabela 4.7 mostra os valores estimados para a densidade de fluxo de massa do gel ágar através da Equação (47).

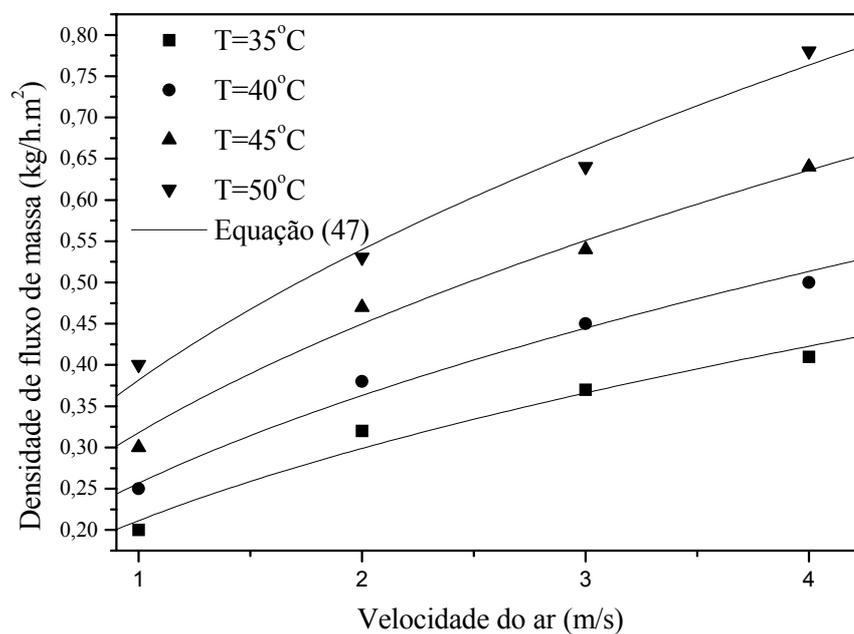
Tabela 4.7 – Densidades de fluxo de massa estimadas do gel ágar (kg/h.m<sup>2</sup>).

Velocidades Experimentais	Temperaturas Experimentais			
	35°C	40°C	45°C	50°C
1,0 m/s	0,22	0,27	0,37	0,41
2,0 m/s	0,32	0,38	0,53	0,60
3,0 m/s	0,39	0,48	0,65	0,73
4,0 m/s	0,45	0,55	0,75	0,84

Comparando os valores experimentais com os estimados, através das Tabelas 4.6 e 4.7, verifica-se que os valores estimados são ligeiramente maiores que os experimentais. As maiores diferenças são constatadas nas temperaturas de

45 e 50°C, com velocidades de 3,0 e 4,0 m/s. O erro percentual médio é de 10%, considerado por McMinn & Magee (1997) como sendo um bom ajuste. As diferenças entre os valores experimentais e os estimados podem ser explicadas pelo fato de a Equação (47) ter sido usada com o valor médio das propriedades físicas necessárias para o cálculo de A. Verifica-se que o melhor ajuste, para as condições estudadas, é fornecido quando o valor de A é igual a  $0,187 (R.s^{5/2})/(3600.m^{3/2})$ .

A Figura 4.16 apresenta os valores experimentais da densidade de fluxo de massa do gel ágar juntamente com o ajuste (linhas contínuas) fornecido pela Equação (47), onde A é igual a  $0,187 (R.s^{5/2})/(3600.m^{3/2})$ .



F

Figura 4.16 – Densidade de fluxo de massa em função da velocidade e temperatura do ar. (ajuste via Equação (47) e dados experimentais).

Por fim, mesmo já tendo a representação do período de taxa constante, buscou-se, através de uma curva generalizada, representar os dois períodos de taxa de secagem do gel ágar.

A Figura 4.17 apresenta a curva característica generalizada para a secagem do gel ágar. Foi usado o modelo proposto por Iglesias et al. (1993), de acordo com a Equação (25):

$$\frac{N}{N_{cr}} = 1 - e^{\left\{-A \cdot \left(\frac{X - X_e}{X_{cr} - X_e}\right)\right\}} \quad (25)$$

Fez-se uma análise de regressão não linear com todos os dados experimentais obtidos, utilizando-se a umidade crítica média e o valor de A foi de 2,48; com  $r = 0,90$ . Devido à grande variabilidade dos dados no período de taxa constante de secagem, este modelo é recomendado para prever apenas o período de taxa decrescente de secagem do gel ágar.

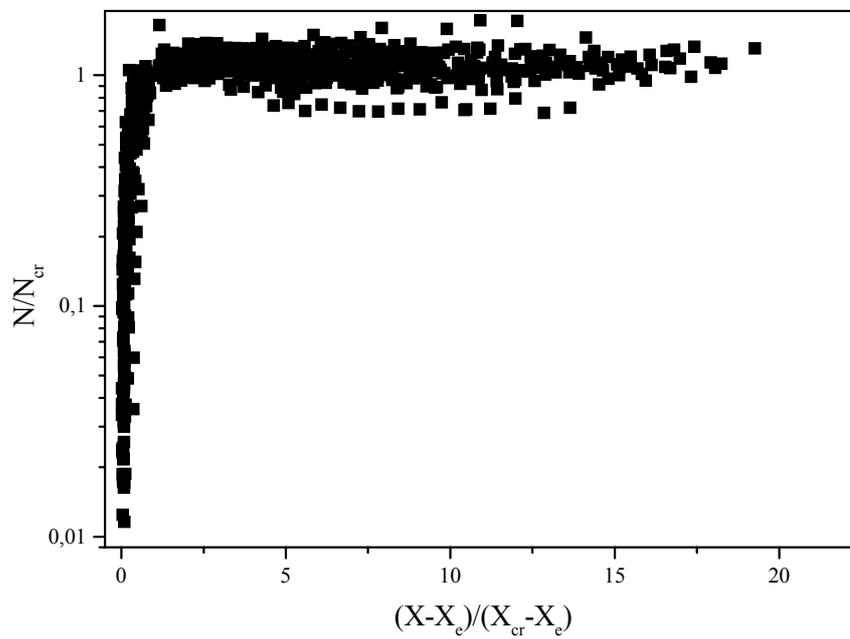


Figura 4.17 – Curva generalizada para a secagem do gel ágar.

Portanto para o período de taxa constante recomenda-se o uso das relações de evaporação para a água, Equações (43) a (47), e para o período de taxa decrescente, a curva generalizada, Equação (25).

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos, nos resultados obtidos e nas condições operacionais estudadas, podem ser feitas as seguintes conclusões.

Foi possível a preparação e a caracterização do gel a partir dos métodos adotados. O gel ágar apresentou uma boa consistência na concentração de 5% o que permitiu determinar as medidas de suas dimensões. Apresentou uma coloração esbranquiçada, um tanto transparente, e não se verificaram fissuras antes nem mesmo depois do processo de secagem.

As metodologias usadas para a determinação das isotermas de equilíbrio, via método gravimétrico estático, e para o estudo da cinética de secagem no secador de convecção forçada mostraram-se adequadas.

No estudo do equilíbrio do sistema ágar-água-ar, dentro dos critérios estatísticos utilizados, verificou-se que o modelo G.A.B. foi o que representou melhor o fenômeno de dessecamento, entre o conjunto de equações analisadas para representar os dados de equilíbrio. Constatou-se para o modelo G.A.B. um erro médio de 6% e  $r^2$  igual a 0,98.

Em relação à cinética de secagem, constatou-se a existência de dois períodos de secagem; períodos de taxas constante e decrescente. A maior parte do tempo do processo é relativa à taxa constante de secagem o que comprova a predominância deste período no processo de secagem do gel. A umidade crítica apresentou um valor de aproximadamente  $(1,4 \pm 0,3)$  (bs).

O fenômeno de encolhimento fez-se presente durante a redução do teor de umidade do gel e a dependência entre o diâmetro e a espessura das amostras de gel mostrou-se da forma linear, com  $r^2$  igual a 0,91.

Por meio da utilização da constante de secagem “K”, presente no modelo de Lewis, para a representação do processo de secagem, pode-se afirmar que a temperatura, a velocidade e a interação entre a temperatura e a velocidade são importantes na secagem do gel ágar ao nível de 5% de significância. As variações de temperatura e velocidade foram significantes. Isto indica que existem resistências convectivas e difusivas ao processo de transferência de massa entre o gel e o ar de secagem.

Verificou-se também que, nas condições de operação do secador, a secagem do gel ágar no período de taxa constante é muito próxima à da água. Logo, o comportamento do gel ágar no período de taxa constante de secagem pode ser representado por correlações para a evaporação da água. O período de taxa decrescente de secagem do gel pode ser representado pelo modelo de Iglesias. Este modelo não representou bem o período de taxa constante devido à grande variabilidade dos dados.

Portanto, obteve-se um conhecimento melhor do comportamento do gel, tanto frente às isoterms de equilíbrio, quanto em relação aos fenômenos de transferência envolvidos na secagem, devido ao estudo mais amplo das variáveis, uma vez que a literatura existente possui poucas informações a este respeito.

Com o estudo desenvolvido, tornou-se a metodologia da secagem do gel ágar mais clara, além de se representar a umidade de equilíbrio do sistema ágar-água-ar que é imprescindível nos estudos de secagem para se determinar o estado

final do processo e os períodos de secagem, necessários para se conhecer a quantidade de umidade que o material perde ao longo do processo em função das condições operacionais, através de modelos simples e bem conhecidos.

Todas estas informações sobre os fenômenos envolvidos na secagem do gel ágar servem de contribuição para a continuidade dos estudos sobre o processo de obtenção do ágar, o qual emprega a secagem, servindo também de base na busca de diferentes tipos de secadores convectivos e de condições ótimas de operação ligadas à relação entre “custo de produção x produção”.

## **CAPÍTULO 6**

### **SUGESTÕES**

Com base no estudo realizado sugere-se para o prosseguimento das pesquisas sobre secagem do gel ágar:

- utilizar outros critérios estatísticos para avaliar o melhor modelo na determinação do equilíbrio do sistema ágar-água-ar;
- estudar a secagem do gel ágar em outros tipos de secadores (leito de jorro, “spray dryer”, por exemplo) e em camada espessa;
- determinar as propriedades como condutividade térmica efetiva e difusividade efetiva para o gel ágar;
- verificar a faixa de influência da temperatura e da velocidade do ar na secagem;
- analisar a influência da concentração do gel ágar e da umidade do ar na cinética de secagem e no equilíbrio do sistema ágar-água-ar;
- fazer uma análise mais aprofundada sobre as variações da d.f.m. no período de taxa constante de secagem;
- verificar, através de outras metodologias, se a umidade crítica do material é única e constante ou se varia com as condições do processo de secagem;
- estudar o encolhimento em outros tamanhos e geometrias de amostras, e
- verificar a resposta de outros modelos, por exemplo, do modelo difusivo com encolhimento, na representação da secagem do gel ágar.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrozo, M. A. S.; Sartori, D. J. M.; Freire, J. T. Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamentos cruzados: secagem de sementes de soja. In: Freire, J. T.; Silveira, A. M. Tópicos Especiais em Sistemas Particulados. São Carlos, v. 4, ed. UFSCar, p. 119-159, 1998.
- Bird, K. T.; Hanisak, M. D.; Ryther, J. Chemical quality and production of agars extracted from gracilaria *tikvakiae* grown in different nitrogen enrichment conditions. Botanica Marina. V. 24, p. 441-444, 1981.
- Bird, K. T.; Hinson, T. K. Seasonal variations in agar yields and quality from north carolina agarophytes. Botanica Marina. V. 35, p. 291-295. 1992.
- Bobbio, F. O.; Bobbio, P. A. Introdução à Química de Alimentos. 2<sup>a</sup> ed., Livraria Varela, São Paulo, 1992.
- Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F.W.; Ehall, C.W. Drying Cereal Grains; The Avi Publishing Company, Inc., Westport, 1974.
- Buvasasundaram, K.; Mukai, N.; Tsukada, T.; Hozawa, M. Experimental and theoretical studies on drying of food materials. Journal of Chemical Engineering of Japan, 29(1) p. 105, 1996.
- Carneiro, M. J. M.; Tobinaga, S. Modelagem matemática da secagem de pescado. Dissertação de Mestrado, UNICAMP/FEA, 1995.
- Chirife, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: Mujumdar, A. Advances in Drying: Washington, ed. Hemisphere Publishing Corporation, V.3. p. 73-102, 1983.
- Chen, C. S.; Clayton, J. T. The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials. Transactions of the ASAE. 14(5) p. 927-929, 1971.
- Chung, D. S.; Pfof, H. B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. Transactions of the ASAE. 10(4) p. 552-575, 1967.
- Crank, J. The Mathematics of Diffusion, Oxford University Press Amen dHouse, Oxford, Londres, Inglaterra, 1956.
- Eckert, E. R. G.; Drake Jr, R. M. Heat and Mass Transfer. McGraw Hill Book Company, Inc., 2<sup>a</sup> ed., Nova York, 1959.

- Fish, B. P. Diffusion and equilibrium properties of water in starch, Food Investigation Paper n°5, HMSO, Londres, 1957.
- Food Chemicals Codex.. 3ª edição, National Academy Press, 2101 Constitution Avenue, N. W. Washington, D. C. 20418 p. 11, 1980.
- Fortes, M.; Okos, M. R. Drying Theories: Their bases and limitations as applied to foods and grains. In: Mujumdar, A. Advances in Drying, Washington, ed. Hemisphere Publishing Corporation, V.1. p. 119-154, 1980.
- Garcia-Alvarado, M. A.; De La Cruz-Medina, J.; Waliszewski-Kubiak, K. N. Salgado-Cervantes, M. A. "Statistical analysis of the GAB and Henderson equations for sorption isotherms of foods". Drying Technology 13(8&9) p. 2141-2152, 1995.
- Garcia, A.; Bueno, J. L. Improving energy efficiency in combined microwave convective drying. Drying Technology 16(1&2) p. 123-140, 1998.
- Gögüs, F.; Lamb, J. Choice of model gel systems for the food dehydration studies. Drying Technology 16(1&2) p. 297-309, 1998.
- Goldemberg, J. Física Geral e Experimental. 2ª ed., Ed. Nacional e Ed. da SP, v. 1, 525p., 1970.
- Halsey, G. Physical adsorption on non-uniform surfaces. J. Chem. Phys. V.16 p. 931, 1948.
- Henderson, S. M. A basic concept of equilibrium moisture. Agric. Eng. V.33 p. 29-32, 1952.
- Henderson, J. M.; Henderson, S. M. A computational procedure for deep-bed drying analysis. Journal of Agricultural Engineering Research, 13, p. 87-95, 1968.
- Hoffmann, R.; Vieira, S. Estatística Experimental. Editora Atlas, São Paulo, 1989.
- Iglesias, O.; Garcia, A.; Roques, M.; Bueno, J. L.. Drying of water gels: determination of the characteristic curve of agar-agar. Drying Technology, 11(3) p. 571-587, 1993.
- Jayas, D. S.; Cenkowski, S.; Pabis, S.; Meior, W. E. Review of thin layer drying and wetting equations. Drying Technology 9(3) p. 551-588, 1991.
- Karathanos, V. T.; Maroulis, Z. B.; Marinos-Kouris, D.; Saravacos, D. G. Hygrothermal and quality properties applicable to drying. data sources and measurement techniques . Drying Technology 14(6), p. 1403-1418, 1996.
- Kechaou, N.; Maalej, M. Desorption isotherms of imported banana application of

- the GAB theory . Drying Technology 17(6) p. 1201-1213, 1999.
- Keey, R. B. Theoretical foundations of drying technology. In: Mujumdar, A. Advances in Drying, Washington, ed. Hemisphere Publishing Corporation, V.1. p. 1-22, 1980.
- Kiranoudis, C. T.; Tsami, E.; Maroulis, Z. B.; Marinos-Kouris, D. Drying Kinetics of Some Fruits. Drying Technology, 15(5) p. 1399-1418, 1997
- Labuzza, T. P.; Kaanane, A.; Chen, J. Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. Journal of Food Science, v. 50, p. 385-390, 1983.
- Lebedev, P. D.; Ginzburg, A. S. General problems of drying theory and techniques, Prog. Heat Mass Transfer, V. 4, p. 55-76, 1971.
- Lees , R. Análisis de los alimentos: métodos analíticos y de control de calidad, 2<sup>a</sup> ed, Editorial Acribia, Zaragoza, Espanha, 1980.
- Lewis , W. K. The rate of drying of solids materials. In: The Symposium on Drying. The Journal of I.&E.Ch. 13(5) p.427-432, 1921.
- Luikov, A. V. Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies. Pergamon Press, Oxford, Inglaterra, 1966.
- Marinos-Kouris, D.; Maroulis, Z. B. Transport properties in the drying of solids in “Handbook of Industrial Drying”, 2<sup>a</sup> ed., A. S. Mujumdar (Ed.), Marcel Dekker, New York, p. 113-159, 1995.
- Matz, S. A. Food Texture. The Avi Publishing, Inc. West Port, Connecticut, 1962.
- Mc Cormick, P. Y. Solids drying fundamentals. In: Perry, R. H. and Chilton, C. H., Chemical Engineer’s Handbook. Mc Graw-Hill Co. 5ed. Sec.20-4, 1983.
- McMinn, W. A. M.; Magee, T. R. A. Moisture sorption characteristics of starch materials. Drying Technology 15(5) p. 1527-1551, 1997.
- Mouradi-Givernaud, A.; Givernaud, T.; Morvan, H.; Cosson, J. Agar from *Gelidium latifolium* (Rhodophyceae, Gelidiales): biochemical composition and seasonal variations. Botanica Marina. V. 35. P. 153-159, 1992.
- Mrani, I.; Bénet, J. C.; Fras, G. Zrikem, Z. Two dimensional simulation of dehydration of a highly deformable gel: moisture content, stress and strain fields. Drying Technology 15(9) p. 2165-2193, 1997.
- Mrani, I.; Bénet, J. C.; Fras, G. Structure interne et propriétés hygro-mécaniques du gel d’agar-agar. Journal de physique 3(5) p. 985-998, 1995.
- Mujumdar, A. S.; Menon, A. S. Drying of solids, principles, classification and

- selection of dryers in “Handbook of Industrial Drying”, 2<sup>a</sup> ed., A. S. Mujumdar (Ed.), Marcel Dekker, New York, p. 1-39, 1995.
- Osborn, G. S.; White, G. M.; Sulaiman, A. H.; Welton, L. R. Predicting equilibrium moisture proportions of soybeans. Transactions of the ASAE. 32(6) p. 2109-2113, 1989.
- Overhults, D. G.; White, G. M.; Hamilton, H. E.; Ross, I. J. Drying soybeans with heated air. Transactions of the ASAE, p. 112-113, 1973.
- Page, G. E. Influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layer. Indiana-EUA, Purdue University (Dissertação de Mestrado), 1949.
- Papadakis, S. E.; Bahu, R. E.; Mckenzie, K. A.; Kemp, I. C. Correlations for the equilibrium moisture content of solids. Drying Technology 11(3) p. 543-553, 1993.
- Pinto, L. A. A.; Tobinaga, S. Secagem de materiais fibrosos: músculos de peixes. In: Freire, J. T. e Sartori, D. J. M. Tópicos Especiais em Secagem. São Carlos, v.1, ed. UFSCar, p. 211-251, 1992.
- Pinto, L. A. A.; Tobinaga, S. Secagem de músculos de peixes: Uso de um modelo difusivo com variação de volume. In: Anais do XXII ENEMP, Florianópolis, SC, v. 2, p. 496-503, 1994.
- Pinto, L. A. A.; Tobinaga, S. Modelos de secagem em camada fina de alimentos: Uma revisão da literatura. Vetor 6: p. 33-49, 1996.
- Pinto, L. A. A. Cinética de secagem de filés de peixes: Uso de um modelo difusivo com variação de volume. Tese de Doutorado, UFSCar, São Carlos, SP, 1996.
- Selby, H. H.; Wynne, W. H. Agar. In: (R. L. Whistler, ed.) Industrial Gums. Academic Press. New York, p. 29-48, 1973.
- Singulani, R. C.; Freire, J. T. Desenvolvimento de um secador de convecção forçada. Trabalho de Graduação. Universidade Federal de São Carlos – São Carlos – SP, 1999.
- Sogab, M. N. Curso de controle de poluição atmosférica. CETESB – São Paulo – SP. 13 p., 1987.
- Suzuki, K.; Kubota, K.; Hasegawa, T.; Hosaka, H. Shrinkage in dehydration of root vegetables. Journal of Food Science, 41(5): 1189-1193, 1976.
- Thompson, T. L.; Peart, R. M.; Foster, G. H. Mathematical simulation of corn drying – a new model. Transactions of the ASAE. V.11 p. 582-586, 1968.
- Treybal, R. Mass Transfer Operations. New York: McGraw-Hill, 1980.

- Whitaker, S. Simultaneous, heat, mass and momentum transfer in porous media: A theory of drying. In: Advances in Heat transfer. New York, ed. Academic Press, v. 13, p. 119-203, 1977a.
- Whitaker, S. Toward a diffusion theory of drying. I.&E.Ch. Fundamentals. 16(4) p. 408-414, 1977b.
- Whitaker, S. Heat and mass transfer in porous media. In: Mujumdar, A. Advances in Drying. Washington, ed. Hemisphere Publishing Corporation. V.1, p. 23-61, 1980.
- Whitaker, S. Diffusion and reaction in a micropore-macropore model of a porous medium. Lat. Am. J. Chem. Eng. Appl. Chem. v. 13, p. 143-183, 1983.
- Zogzas, N. P.; Maroulis, Z. B.; Marinos-Kouris, D. Moisture diffusivity methods of experimental determination: a review. Drying Technology 12(3) p. 483-515, 1994.

ANEXO A  
EQUILÍBRIO ÁGAR-ÁGUA-AR

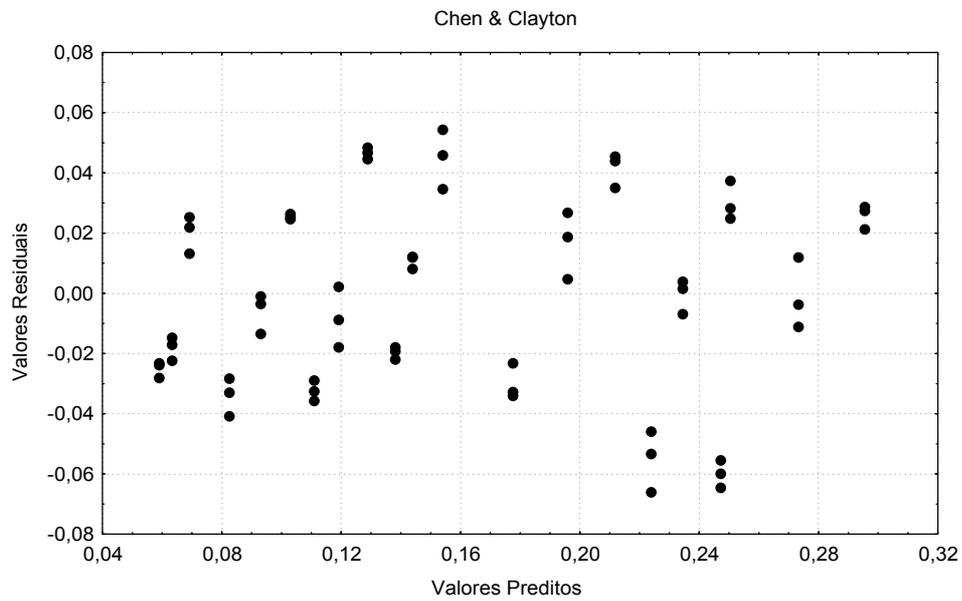


Figura A1 – Distribuição de resíduos para o modelo de Chen & Clayton.

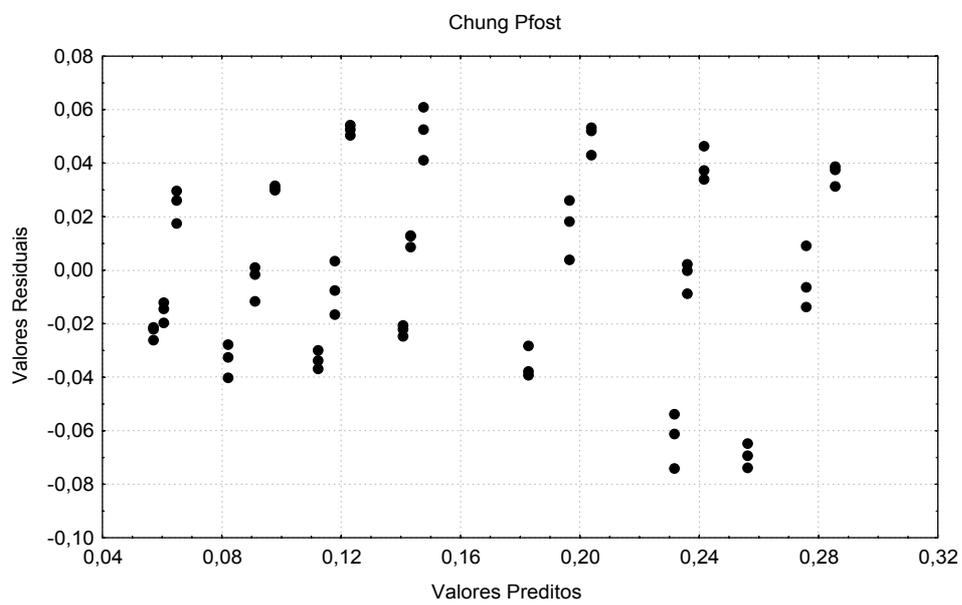


Figura A2 – Distribuição de resíduos para o modelo de Chung & Pfst.

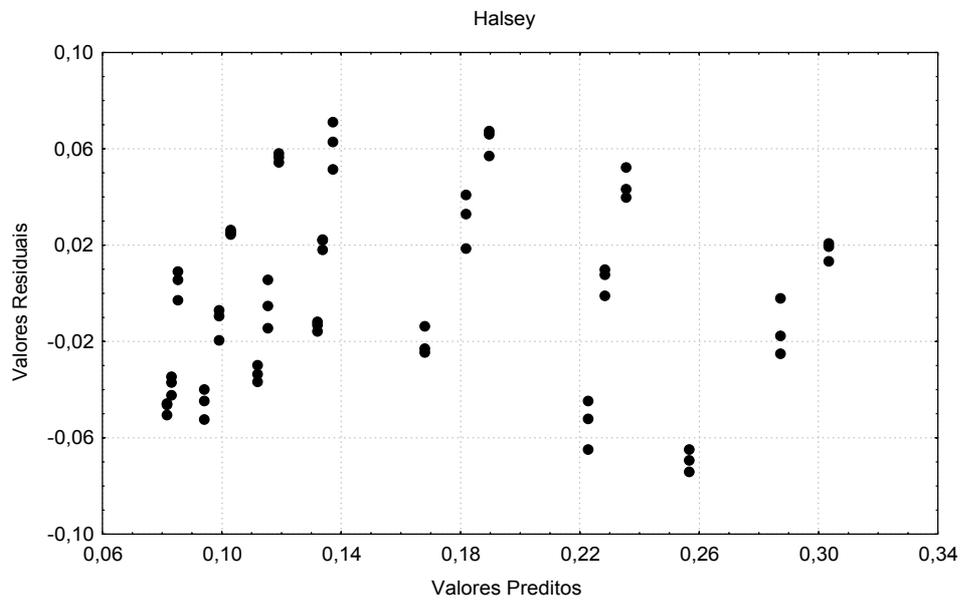


Figura A3 – Distribuição de resíduos para o modelo de Halsey.

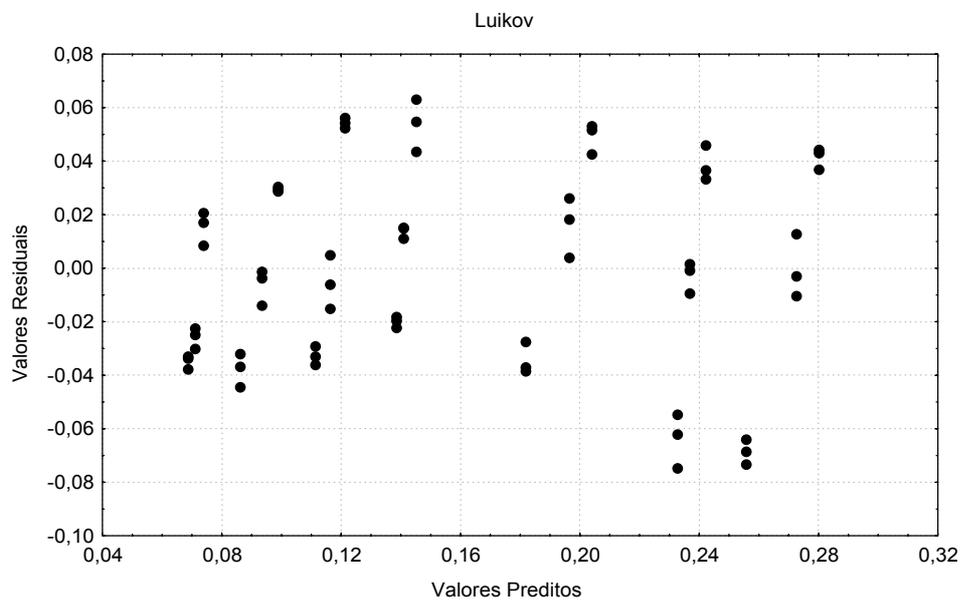


Figura A4 – Distribuição de resíduos para o modelo de Luikov.

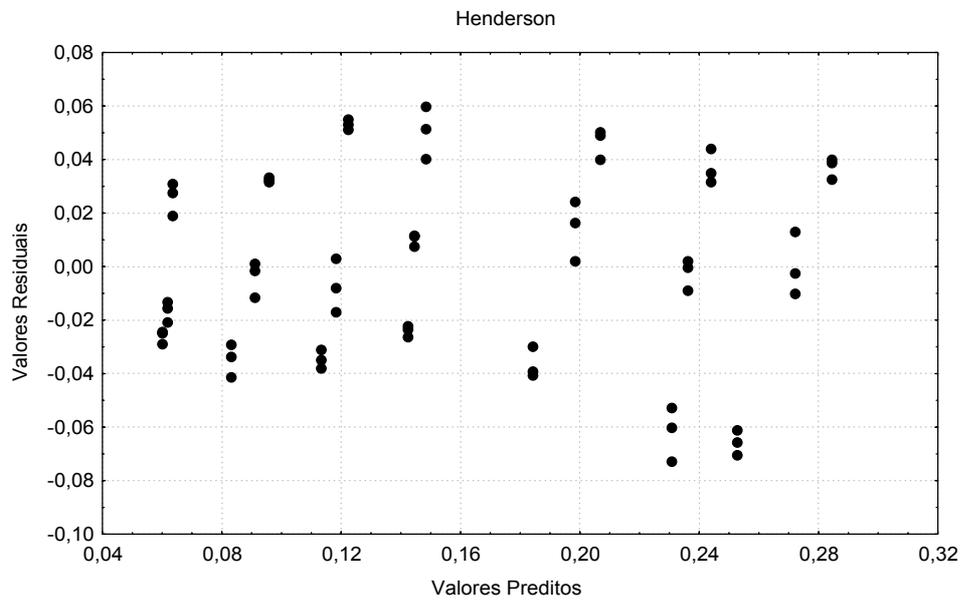


Figura A5 – Distribuição de resíduos para o modelo de Henderson.

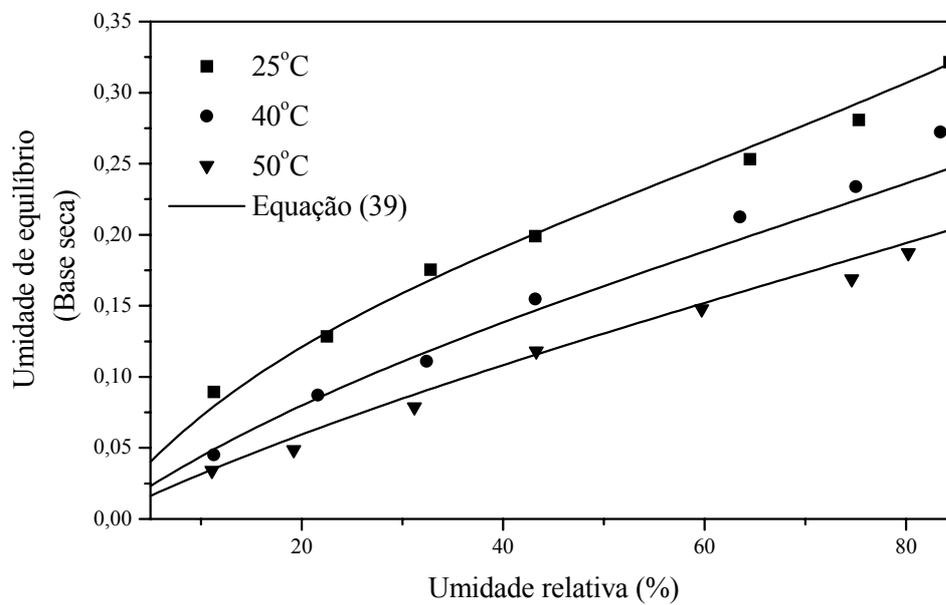


Figura A6 – Comparação entre o modelo G.A.B. e os dados de equilíbrio.

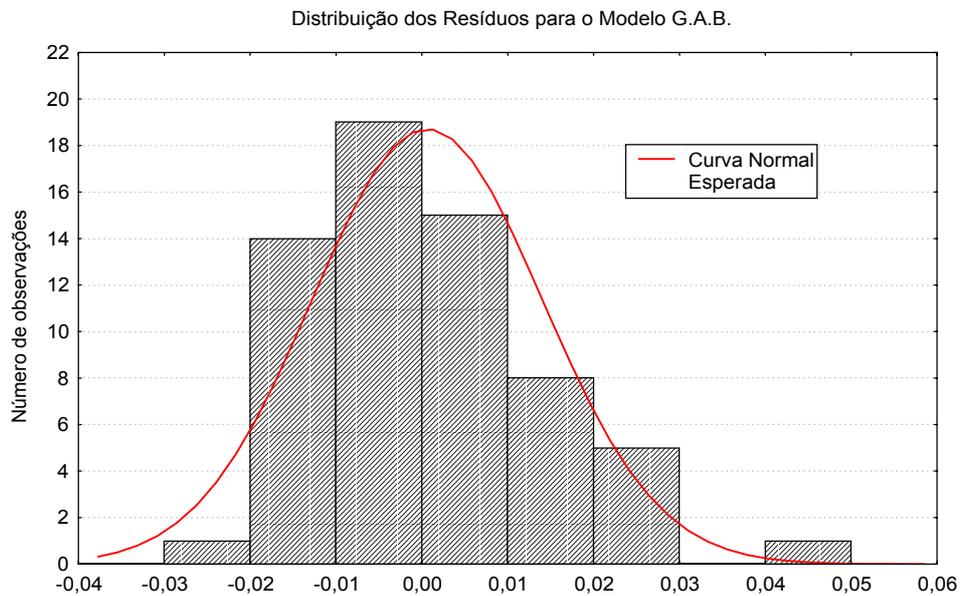


Figura A7 – Distribuição dos resíduos do modelo G.A.B.

Tabela A1 – Valores dos parâmetros dos modelos de previsão do equilíbrio.

	A	B	C	D
Hend-Thomp	1,912	-279,6	1,957	
Halsey mod.	$-4,957 \cdot 10^{-2}$	10,1	2,241	
Chung	26,6	3160		
Chen	$8,46 \cdot 10^{-2}$	6,598	$1,413 \cdot 10^{-2}$	1,32
Halsey	2,915		1,825	
Luikov	0,355	$2,679 \cdot 10^{-3}$		
Henderson	3,265		2,005	

ANEXO B  
CURVAS DE SECAGEM E  
ANÁLISE ESTATÍSTICA

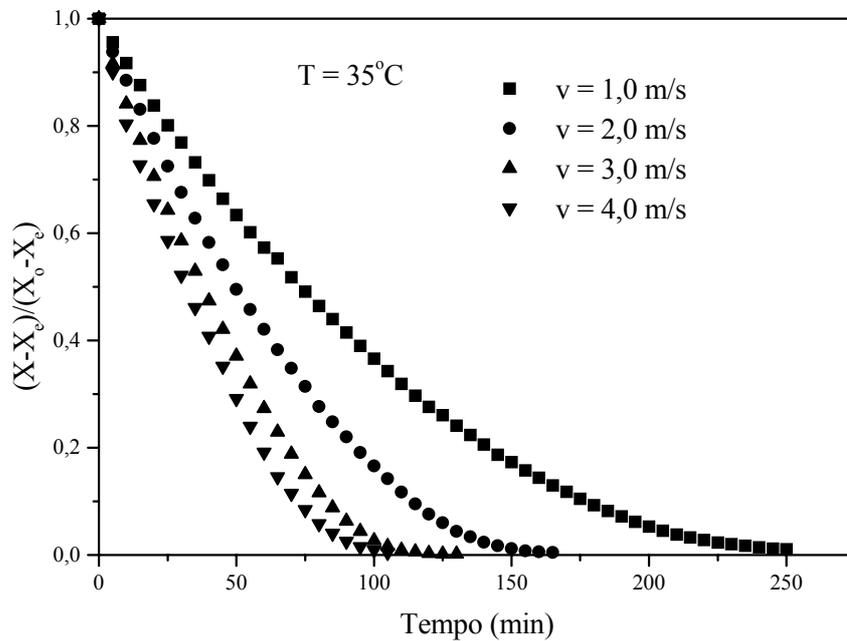


Figura B1 – Efeito da velocidade do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo ( $T=35^{\circ}\text{C}$ ).

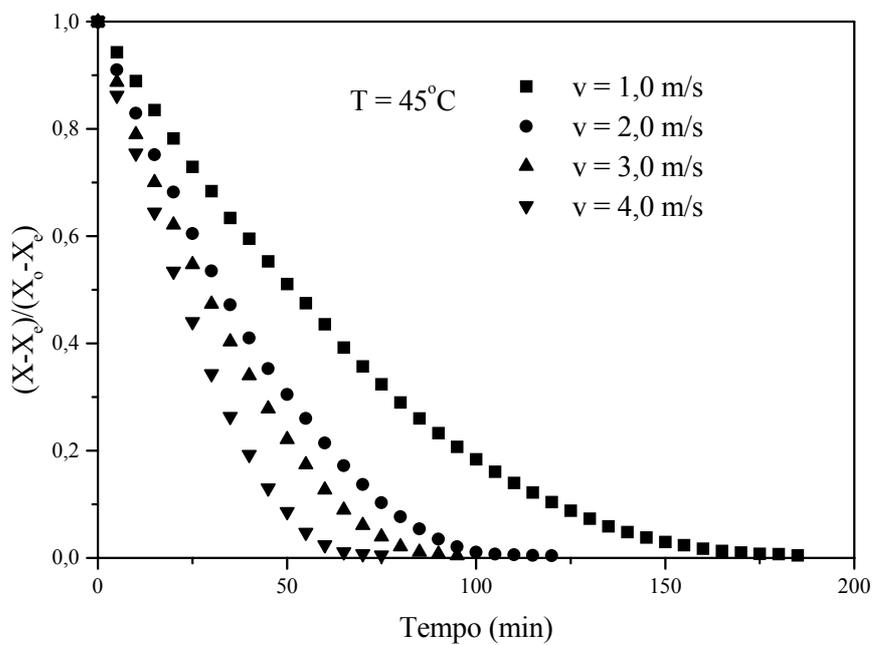


Figura B2 – Efeito da velocidade do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo ( $T=45^{\circ}\text{C}$ ).

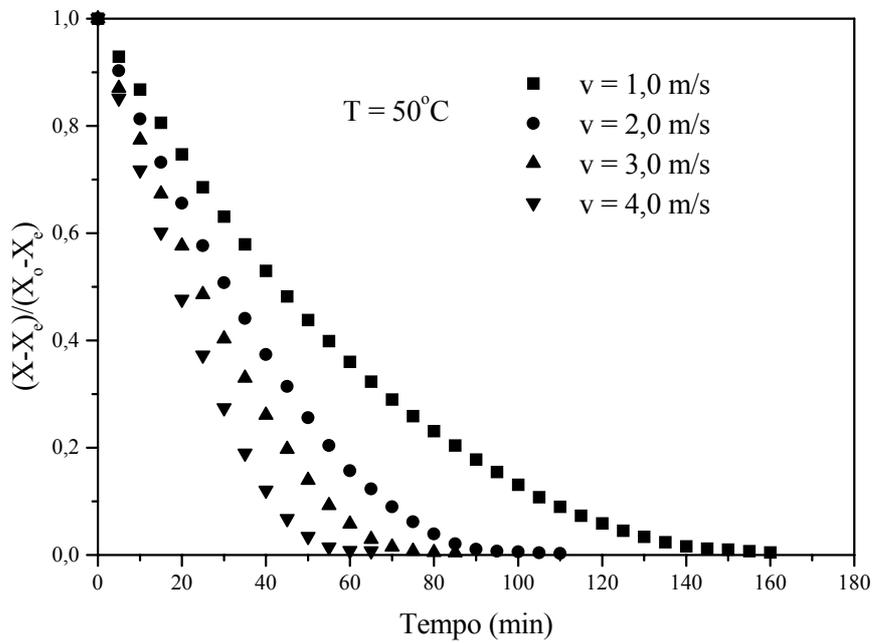


Figura B3 – Efeito da velocidade do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo ( $T=50^\circ\text{C}$ ).

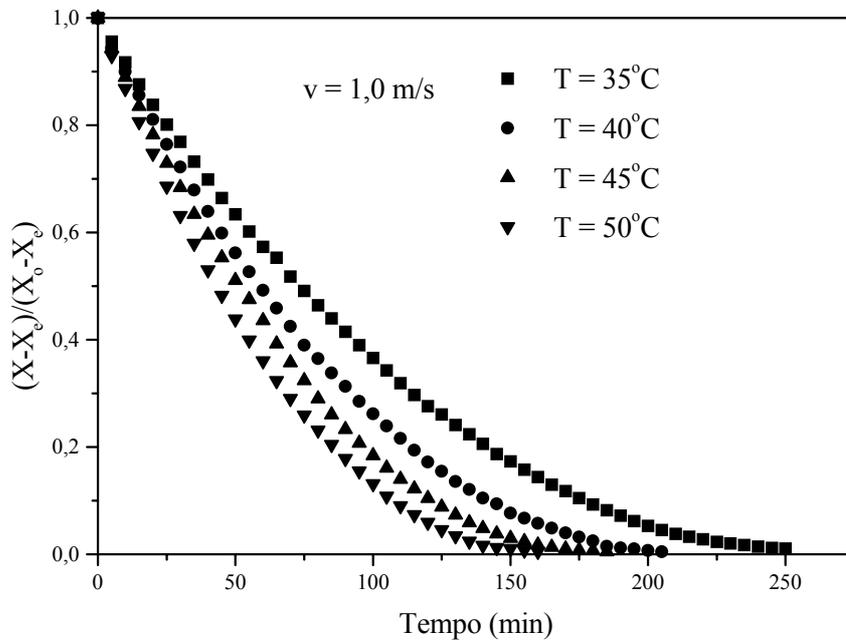


Figura B4 – Efeito da temperatura do de secagem ar sobre o adimensional de umidade em função do tempo ( $v=1,0 \text{ m/s}$ ).

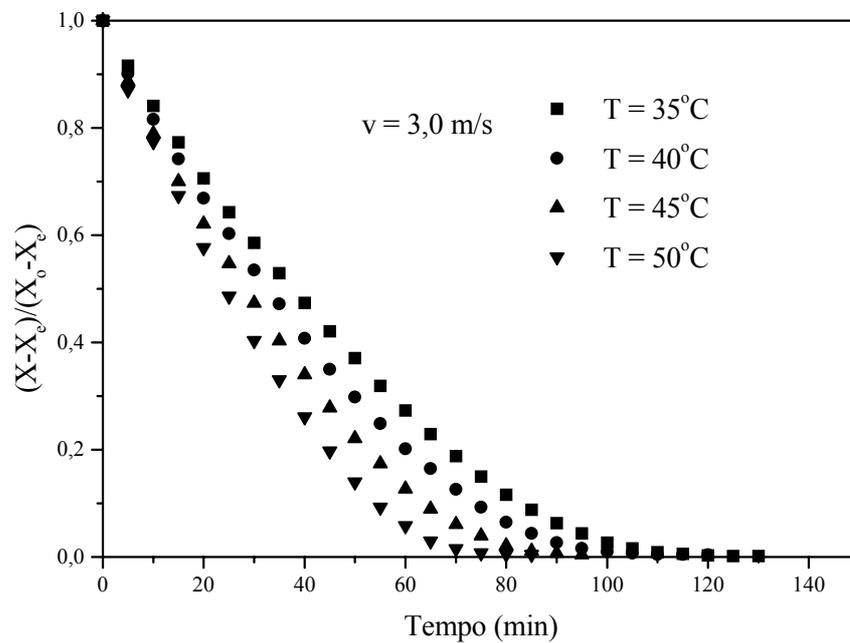


Figura B5 – Efeito da temperatura do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo ( $v=3,0 \text{ m/s}$ ).

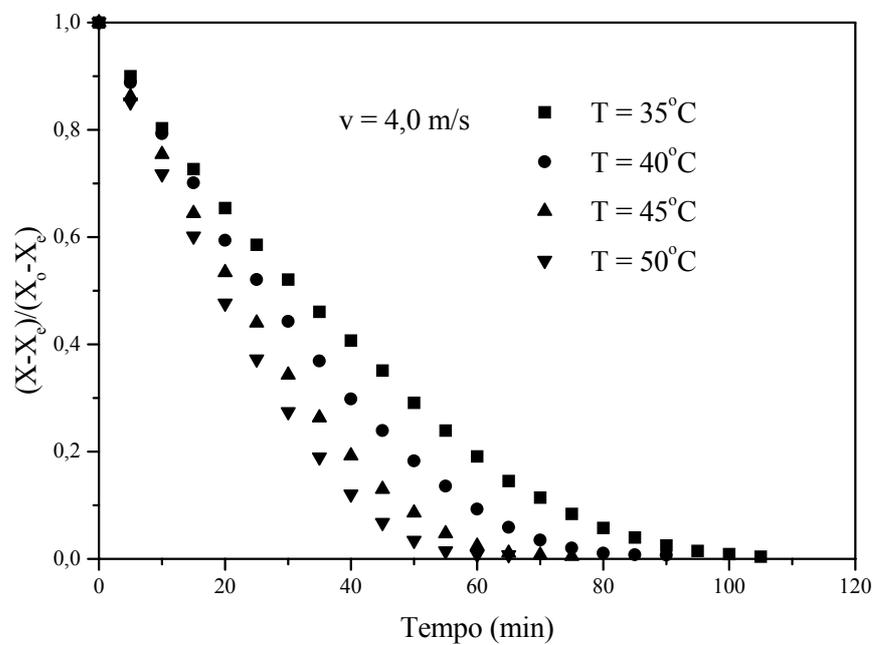


Figura B6 – Efeito da temperatura do ar de secagem sobre o adimensional de umidade em função do tempo ( $v=4,0 \text{ m/s}$ ).

Tabela B1 – Diferenças entre os valores de “K” (determinação de significâncias)

Velocidades	Variação da temperatura					
	35 - 40°C	35 - 45°C	35 - 50°C	40 - 45°C	40 - 50°C	45 - 50°C
1,0 m/s	<b>0,0027</b>	<b>0,0051</b>	0,0072	<b>0,0025</b>	<b>0,0045</b>	<b>0,0020</b>
2,0 m/s	<b>0,0020</b>	0,0072	0,0094	<b>0,0053</b>	0,0075	<b>0,0022</b>
3,0 m/s	<b>0,0040</b>	0,0085	0,0131	<b>0,0045</b>	0,0091	<b>0,0046</b>
4,0 m/s	<b>0,0060</b>	0,0140	0,0193	0,0080	0,0133	<b>0,0053</b>
Temperaturas	Variação da velocidade					
	1,0 – 2,0 m/s	1,0 – 3,0 m/s	1,0 – 4,0 m/s	2,0 – 3,0 m/s	2,0 – 4,0 m/s	3,0 – 4,0 m/s
35°C	<b>0,0065</b>	0,0117	0,0161	<b>0,0052</b>	0,0096	<b>0,0044</b>
40°C	<b>0,0058</b>	0,0130	0,0194	0,0072	0,0136	<b>0,0064</b>
45°C	0,0086	0,0151	0,0250	<b>0,0064</b>	0,0163	0,0099
50°C	0,0088	0,0176	0,0282	0,0089	0,0195	0,0106

ANEXO C  
DADOS DOS EXPERIMENTOS DE  
SECAGEM

Tabela C1 – Experimentos de secagem a 4,0 m/s e 50°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $g_{ag}/g_{gel}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $g_{ag}/g_{gel}$ )	D (cm)	L (mm)
0	18,27	5,95	2,3	15,82	5,95	2,3
5	15,56	5,65	2,2	13,08	5,65	2,1
10	13,12	5,40	2,0	10,48	5,40	1,8
15	11,00	5,25	1,8	8,69	5,25	1,6
20	8,72	5,00	1,7	6,81	5,00	1,5
25	6,82	4,70	1,5	5,25	4,60	1,4
30	5,04	4,45	1,4	3,72	4,45	1,2
35	3,49	4,20	1,2	2,49	4,20	1,1
40	2,22	3,80	1,0	1,43	3,90	1,0
45	1,27	3,65		0,74	3,60	
50	0,66	3,40		0,31	3,40	
55	0,30	3,20		0,15	3,20	
60	0,19	3,10		0,14	3,10	
65	0,17	3,00		0,13	3,00	

Tabela C2 – Experimentos de secagem a 3,0 m/s e 50°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $g_{ag}/g_{gel}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $g_{ag}/g_{gel}$ )	D (cm)	L (mm)
0	21,30	5,95	2,1	21,38	5,95	2,2
5	18,54	5,70	2,0	18,39	5,70	2,1
10	16,49	5,50	2,0	16,04	5,50	2,0
15	14,35	5,25	1,8	13,74	5,35	2,0
20	12,29	5,15	1,8	11,59	5,10	1,8
25	10,37	4,90	1,6	9,63	4,90	1,6
30	8,61	4,60	1,6	7,83	4,60	1,6
35	7,06	4,40	1,5	6,20	4,40	1,5
40	5,60	4,10	1,2	4,78	4,10	1,2
45	4,23	3,90	1,1	3,41	3,90	1,1
50	2,99	3,80		2,35	3,85	
55	2,00	3,50		1,45	3,65	
60	1,27	3,20		0,78	3,40	
65	0,66	2,90		0,38	3,10	
70	0,35	2,90		0,24	3,00	
75	0,19	2,80		0,15	2,80	
80	0,15	2,80		0,14	2,80	
85	0,13	2,80		0,13	2,80	

Tabela C3 – Experimentos de secagem a 2,0 m/s e 50°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)
0	21,65	5,95	2,3	20,73	5,90	2,3
5	19,55	5,80	2,2	18,79	5,80	2,2
10	17,61	5,60	2,1	16,88	5,60	2,0
15	15,86	5,50	2,0	15,18	5,50	2,0
20	14,21	5,40	2,0	13,55	5,30	1,9
25	12,51	5,20	1,8	12,01	5,10	1,9
30	11,01	5,05	1,8	10,57	4,90	1,8
35	9,56	4,85	1,7	9,26	4,70	1,6
40	8,12	4,60	1,5	8,02	4,50	1,6
45	6,83	4,45	1,5	6,69	4,30	1,5
50	5,56	4,15	1,3	5,67	4,10	1,4
55	4,45	3,90	1,2	4,65	3,90	1,3
60	3,44	3,70	1,1	3,69	3,60	1,2
65	2,71	3,50		3,04	3,40	
70	1,97	3,35		2,33	3,20	
75	1,37	3,10		1,73	3,00	
80	0,87	2,90		1,28	2,90	
85	0,49	2,80		0,97	2,80	
90	0,28	2,80		0,70	2,80	
95	0,19	2,80		0,56	2,80	
100	0,17	2,80		0,42	2,80	
105	0,12	2,80		0,34	2,80	
110	0,11	2,80		0,29	2,80	

Tabela C4 – Experimentos de secagem a 1,0 m/s e 50°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)
0	22,79	5,95	2,1	22,67	5,95	2,3
5	21,18	5,80	2,0	21,13	5,88	2,2
10	19,79	5,70	2,0	19,72	5,70	2,1
15	18,38	5,60	2,0	18,32	5,60	2,0
20	17,04	5,50	2,0	17,00	5,50	2,0
25	15,65	5,35	2,0	15,66	5,40	2,0
30	14,38	5,20	2,0	14,49	5,20	1,9
35	13,20	5,00	2,0	13,30	5,10	1,8
40	12,10	4,90	1,9	12,24	5,00	1,8
45	11,01	4,80	1,8	11,20	4,90	1,8
50	10,01	4,70	1,8	10,20	4,70	1,8
55	9,12	4,50	1,8	9,32	4,60	1,6
60	8,23	4,40	1,6	8,45	4,60	1,6
65	7,38	4,30	1,5	7,58	4,40	1,5
70	6,63	4,10	1,5	6,78	4,30	1,5
75	5,94	4,00	1,4	6,05	4,20	1,4
80	5,29	3,85		5,40	4,00	
85	4,68	3,70		4,75	3,90	
90	4,09	3,60		4,09	3,70	
95	3,56	3,40		3,53	3,60	
100	3,03	3,40		2,99	3,50	
105	2,50	3,30		2,51	3,40	
110	2,09	3,10		2,05	3,30	
115	1,69	3,10		1,63	3,10	
120	1,38	3,00		1,31	3,00	
125	1,07	2,80		1,01	2,80	
130	0,81	2,80		0,75	2,80	
135	0,59	2,80		0,50	2,80	
140	0,41	2,80		0,37	2,80	
145	0,31	2,80		0,26	2,80	
150	0,26	2,80		0,22	2,80	
155	0,21	2,80		0,16	2,80	
160	0,15	2,80		0,16	2,80	

Tabela C5 – Experimentos de secagem a 4,0 m/s e 45°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $g_{ag}/g_{gel}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $g_{ag}/g_{gel}$ )	D (cm)	L (mm)
0	20,65	5,90	2,3	16,70	6,00	2,3
5	17,81	5,70	2,1	14,06	5,70	2,0
10	15,57	5,50	2,0	11,88	5,50	1,9
15	13,31	5,30	1,8	10,13	5,25	1,8
20	11,04	5,00	1,7	8,17	4,90	1,7
25	9,12	4,70	1,5	6,41	4,70	1,5
30	7,12	4,40	1,4	4,79	4,40	1,4
35	5,46	4,30	1,3	3,42	4,30	1,3
40	4,02	4,00	1,2	2,23	4,00	1,2
45	2,72	3,70	1,1	1,34	3,70	1,1
50	1,83	3,40	1,0	0,73	3,40	1,0
55	1,03	3,10		0,37	3,10	
60	0,54	3,00		0,21	3,00	
65	0,28	2,90		0,17	2,90	
70	0,19	2,80		0,17	2,80	
75	0,16	2,80		0,15	2,80	

Tabela C6 – Experimentos de secagem a 3,0 m/s e 45°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $g_{ag}/g_{gel}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $g_{ag}/g_{gel}$ )	D (cm)	L (mm)
0	20,18	6,00	2,2	17,65	6,00	2,1
5	17,90	5,75	2,0	15,48	5,70	1,9
10	15,93	5,50	1,8	13,68	5,50	1,8
15	14,14	5,30	1,7	12,00	5,30	1,7
20	12,54	5,15	1,6	10,45	5,15	1,6
25	11,05	5,00	1,5	8,75	4,90	1,5
30	9,57	4,80	1,5	7,52	4,70	1,4
35	8,17	4,65	1,3	6,28	4,50	1,3
40	6,89	4,40	1,3	5,11	4,20	1,2
45	5,65	4,10	1,2	4,01	3,85	1,1
50	4,51	3,85	1,1	3,05	3,70	1,1
55	3,57	3,60	1,0	2,20	3,40	1,0
60	2,61	3,40		1,48	3,30	
65	1,86	3,20		0,98	3,20	
70	1,28	3,10		0,54	3,10	
75	0,84	2,90		0,30	2,90	
80	0,49	2,80		0,20	2,80	
85	0,28	2,80		0,15	2,80	
90	0,19	2,80		0,14	2,80	
95	0,14	2,80		0,13	2,80	

Tabela C7 – Experimentos de secagem a 2,0 m/s e 45°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)
0	18,64	6,00	2,1	17,90	5,95	2,1
5	16,96	5,75	2,0	16,44	5,75	2,1
10	15,47	5,60	1,9	15,06	5,60	2,0
15	14,03	5,50	1,8	13,54	5,40	1,9
20	12,72	5,40	1,7	12,24	5,30	1,9
25	11,29	5,25	1,6	10,98	5,20	1,8
30	9,99	5,05	1,5	9,84	5,00	1,7
35	8,82	4,85	1,4	8,70	4,85	1,6
40	7,68	4,65	1,4	7,67	4,70	1,6
45	6,62	4,55	1,3	6,66	4,60	1,5
50	5,73	4,30	1,2	5,67	4,40	1,4
55	4,88	4,15	1,1	4,76	4,10	1,3
60	4,04	4,05	1,0	4,01	3,90	1,2
65	3,24	3,90		3,33	3,80	1,1
70	2,61	3,75		2,70	3,60	1,0
75	1,98	3,40		2,02	3,30	
80	1,48	3,20		1,57	3,10	
85	1,06	3,10		1,17	3,00	
90	0,71	3,00		0,77	2,90	
95	0,44	2,90		0,54	2,80	
100	0,26	2,80		0,38	2,80	
105	0,19	2,80		0,22	2,80	
110	0,16	2,80		0,18	2,80	
115	0,14	2,80		0,15	2,80	
120	0,14	2,80		0,13	2,80	

Tabela C8 – Experimentos de secagem a 1,0 m/s e 45°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)
0	17,99	5,90	2,1	18,84	5,95	2,2
5	16,96	5,80	2,0	17,72	5,80	2,2
10	16,01	5,75	2,0	16,70	5,70	2,2
15	15,02	5,60	2,0	15,57	5,60	2,1
20	14,08	5,40	1,8	14,58	5,50	2,1
25	13,13	5,35	1,8	13,63	5,40	2,1
30	12,32	5,30	1,8	12,66	5,25	2,0
35	11,43	5,10	1,7	11,80	5,15	2,0
40	10,72	5,10	1,7	10,96	5,10	2,0
45	9,97	5,00	1,7	10,16	5,00	1,9
50	9,23	4,75	1,7	9,41	4,85	1,8
55	8,57	4,70	1,6	8,67	4,70	1,8
60	7,87	4,65	1,6	7,94	4,60	1,8
65	7,08	4,50	1,6	7,30	4,50	1,8
70	6,47	4,40	1,5	6,64	4,30	1,6
75	5,86	4,30	1,5	6,05	4,10	1,6
80	5,26	4,10	1,5	5,45	3,90	1,6
85	4,72	3,90	1,4	4,87	3,70	1,6
90	4,24	3,80	1,3	4,37	3,50	1,6
95	3,77	3,70	1,2	3,84	3,30	1,5
100	3,35	3,60	1,1	3,35	3,20	1,5
105	2,95	3,50	1,0	2,92	3,10	1,5
110	2,57	3,40		2,43	2,95	1,4
115	2,25	3,30		2,06	2,90	1,3
120	1,93	3,20		1,70	2,80	1,3
125	1,63	3,15		1,35	2,80	1,2
130	1,36	3,10		1,07	2,80	1,2
135	1,12	3,00		0,85	2,80	1,2
140	0,92	2,90		0,63	2,80	1,1
145	0,74	2,90		0,50	2,80	1,1
150	0,59	2,80		0,37	2,80	1,1
155	0,48	2,80		0,27	2,80	1,0
160	0,37	2,80		0,19	2,80	
165	0,29	2,80		0,17	2,80	
170	0,24	2,80		0,15	2,80	
175	0,20	2,80		0,13	2,80	
180	0,17	2,80		0,12	2,80	
185	0,14	2,80		0,09	2,80	

Tabela C9 – Experimentos de secagem a 4,0 m/s e 40°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)
0	17,58	5,95	2,3	19,32	5,95	2,2
5	15,61	5,75	2,1	16,88	5,70	1,9
10	13,95	5,50	1,9	14,76	5,45	1,8
15	12,35	5,35	1,8	12,72	5,30	1,7
20	10,47	5,20	1,7	10,86	5,05	1,5
25	9,20	5,05	1,6	9,29	4,80	1,4
30	7,84	4,70	1,5	7,75	4,60	1,4
35	6,55	4,60	1,4	6,42	4,40	1,3
40	5,30	4,30	1,3	5,08	4,10	1,2
45	4,27	4,00	1,2	3,89	4,00	1,1
50	3,29	3,90	1,1	2,81	3,80	1,1
55	2,46	3,80	1,0	2,00	3,50	1,0
60	1,71	3,60		1,27	3,20	
65	1,12	3,30		0,77	2,95	
70	0,70	3,00		0,46	2,85	
75	0,44	2,80		0,31	2,80	
80	0,28	2,80		0,25	2,80	
85	0,23	2,80		0,23	2,80	

Tabela C10 – Experimentos de secagem a 3,0 m/s e 40°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)
0	20,94	6,00	2,3	20,99	6,00	2,2
5	18,87	5,80	2,0	18,80	5,80	2,0
10	17,11	5,65	2,0	16,89	5,60	2,0
15	15,57	5,50	2,0	15,12	5,50	1,9
20	14,05	5,30	1,8	13,41	5,30	1,7
25	12,66	5,15	1,7	11,79	5,10	1,6
30	11,24	5,05	1,6	10,31	5,05	1,5
35	9,92	4,85	1,5	8,97	4,80	1,4
40	8,59	4,70	1,4	7,74	4,60	1,3
45	7,39	4,60	1,3	6,65	4,50	1,2
50	6,29	4,30	1,2	5,62	4,35	1,2
55	5,28	4,10	1,1	4,61	4,10	1,1
60	4,30	3,90		3,68	3,90	
65	3,52	3,70		2,77	3,70	
70	2,71	3,50		1,99	3,50	
75	2,02	3,30		1,39	3,30	
80	1,44	3,10		0,89	3,20	
85	1,00	3,10		0,55	3,10	
90	0,65	2,90		0,26	2,90	
95	0,42	2,80		0,22	2,80	
100	0,29	2,80		0,20	2,80	
105	0,22	2,80		0,19	2,80	
110	0,20	2,80		0,18	2,80	

Tabela C11 – Experimentos de secagem a 2,0 m/s e 40°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)
0	23,21	6,00	2,3	23,92	5,90	2,2
5	21,42	5,80	2,2	21,99	5,75	2,1
10	19,93	5,70	2,2	20,28	5,65	2,0
15	18,57	5,65	2,1	18,68	5,50	2,0
20	17,23	5,50	2,0	17,22	5,40	2,0
25	15,82	5,40	2,0	15,74	5,30	1,8
30	14,62	5,20	1,9	14,47	5,20	1,8
35	13,35	5,00	1,8	13,23	5,10	1,7
40	12,08	4,90	1,7	12,01	4,80	1,7
45	10,95	4,65	1,7	10,78	4,70	1,5
50	9,82	4,50	1,5	9,62	4,60	1,5
55	8,79	4,45	1,5	8,60	4,30	1,4
60	7,82	4,10	1,4	7,62	4,15	1,4
65	6,93	3,95	1,4	6,78	4,10	1,4
70	6,19	3,95	1,4	5,96	4,10	1,3
75	5,49	3,80	1,3	5,17	3,95	1,2
80	4,84	3,75	1,1	4,48	3,90	1,1
85	4,28	3,60		3,81	3,70	
90	3,74	3,40		3,19	3,50	
95	3,17	3,40		2,66	3,40	
100	2,68	3,20		2,14	3,20	
105	2,23	3,00		1,70	3,00	
110	1,82	2,80		1,34	2,80	
115	1,50	2,80		1,06	2,80	
120	1,19	2,80		0,83	2,80	
125	1,00	2,80		0,67	2,80	
130	0,84	2,80		0,62	2,80	
135	0,76	2,80		0,57	2,80	
140	0,66	2,80		0,55	2,80	
145	0,59	2,80		0,54	2,80	

Tabela C12 – Experimentos de secagem a 1,0 m/s e 40°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)
0	24,38	5,95	2,3	23,00	6,00	2,0
5	23,00	5,80	2,3	21,78	5,80	2,0
10	21,95	5,78	2,1	20,68	5,80	1,9
15	20,87	5,60	2,0	19,53	5,70	1,9
20	19,78	5,50	2,0	18,51	5,65	1,9
25	18,66	5,50	2,0	17,47	5,60	1,8
30	17,63	5,40	2,0	16,55	5,50	1,8
35	16,57	5,38	2,0	15,62	5,45	1,8
40	15,60	5,30	1,9	14,69	5,30	1,8
45	14,65	5,20	1,9	13,81	5,20	1,7
50	13,74	5,10	1,9	12,80	5,10	1,7
55	12,88	4,90	1,8	12,12	4,90	1,7
60	12,04	4,80	1,8	11,35	4,80	1,6
65	11,24	4,70	1,8	10,50	4,70	1,6
70	10,42	4,60	1,8	9,76	4,70	1,6
75	9,56	4,55	1,6	9,05	4,60	1,4
80	8,96	4,40	1,5	8,36	4,50	1,4
85	8,29	4,20	1,5	7,72	4,40	1,4
90	7,68	4,20	1,5	7,12	4,30	1,4
95	7,02	4,00	1,5	6,52	4,20	1,4
100	6,44	4,00	1,5	5,96	4,10	1,3
105	5,88	4,00	1,4	5,41	4,00	1,3
110	5,34	3,80	1,3	4,87	3,90	1,2
115	4,80	3,80	1,2	4,39	3,90	1,1
120	4,26	3,70	1,1	3,88	3,70	1,1
125	3,85	3,50		3,50	3,60	
130	3,39	3,50		3,00	3,40	
135	3,02	3,30		2,62	3,40	
140	2,65	3,30		2,28	3,30	
145	2,38	3,10		1,92	3,20	
150	1,96	3,00		1,63	3,00	
155	1,71	3,00		1,36	3,00	
160	1,50	3,00		1,14	3,00	
165	1,27	2,80		0,95	2,90	
170	1,05	2,80		0,79	2,85	
175	0,87	2,80		0,62	2,80	
180	0,69	2,80		0,50	2,80	
185	0,46	2,80		0,43	2,80	
190	0,39	2,80		0,39	2,80	
195	0,32	2,80		0,38	2,80	
200	0,25	2,80		0,35	2,80	
205	0,22	2,80		0,34	2,80	

Tabela C13 – Experimentos de secagem a 4,0 m/s e 35°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)
0	17,72	5,95	2,2	17,39	5,95	2,1
5	15,95	5,80	2,0	15,45	5,65	1,9
10	14,25	5,70	1,9	13,86	5,60	1,9
15	12,91	5,45	1,8	12,35	5,40	1,8
20	11,62	5,35	1,8	11,01	5,25	1,7
25	10,43	5,20	1,6	9,78	5,10	1,6
30	9,29	5,05	1,6	8,54	4,90	1,5
35	8,24	4,90	1,5	7,40	4,70	1,4
40	7,28	4,70	1,4	6,36	4,50	1,3
45	6,29	4,50	1,4	5,28	4,45	1,3
50	5,23	4,40	1,3	4,33	4,25	1,2
55	4,32	4,10	1,2	3,51	4,00	1,2
60	3,48	3,90	1,1	2,69	3,70	1,1
65	2,67	3,75	1,0	2,06	3,50	1,0
70	2,12	3,50		1,47	3,20	
75	1,59	3,20		1,03	3,10	
80	1,14	3,10		0,70	3,10	
85	0,82	3,00		0,46	3,00	
90	0,56	3,00		0,30	3,00	
95	0,38	3,00		0,23	3,00	
100	0,27	3,00		0,19	3,00	
105	0,18	3,00		0,19	3,00	

Tabela C14 – Experimentos de secagem a 3,0 m/s e 35°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)
0	18,60	5,90	2,2	18,68	5,90	2,2
5	17,05	5,90	2,1	17,06	5,80	2,2
10	15,67	5,75	2,0	15,48	5,75	2,2
15	14,41	5,70	2,0	14,04	5,70	2,1
20	13,17	5,65	2,0	12,94	5,60	2,1
25	12,01	5,55	1,9	11,80	5,50	2,1
30	10,95	5,45	1,9	10,70	5,30	2,0
35	9,89	5,30	1,9	9,69	5,25	2,0
40	8,88	5,25	1,9	8,66	5,25	2,0
45	7,89	5,25	1,8	7,71	5,20	1,9
50	6,97	5,15	1,8	6,73	5,15	1,8
55	6,02	5,00	1,7	5,88	5,05	1,8
60	5,17	5,00	1,7	4,98	4,95	1,8
65	4,35	4,95	1,7	4,17	4,80	1,8
70	3,59	4,85	1,7	3,37	4,70	1,6
75	2,88	4,80	1,6	2,69	4,70	1,6
80	2,25	4,70	1,6	2,09	4,55	1,6
85	1,74	4,65	1,6	1,52	4,50	1,6
90	1,28	4,50	1,6	1,11	4,50	1,6
95	0,92	4,40	1,5	0,75	4,40	1,5
100	0,61	4,40	1,4	0,47	4,30	1,5
105	0,41	4,20	1,3	0,32	4,20	1,5
110	0,28	4,20	1,3	0,24	4,10	1,4
115	0,22	4,00	1,2	0,17	3,90	1,3
120	0,18	3,90	1,2	0,17	3,85	1,3
125	0,16	3,85	1,2	0,16	3,80	1,2
130	0,15	3,80	1,2	0,14	3,60	1,2

Tabela C15 – Experimentos de secagem a 2,0 m/s e 35°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)
0	16,07	5,95	2,2	14,43	5,95	2,0
5	15,07	5,70	2,1	13,29	5,80	1,9
10	14,23	5,60	2,0	12,42	5,60	1,9
15	13,38	5,50	2,0	11,54	5,50	1,8
20	12,50	5,40	1,9	10,72	5,40	1,8
25	11,68	5,30	1,9	9,95	5,30	1,8
30	10,90	5,20	1,8	9,20	5,15	1,6
35	10,13	5,10	1,7	8,42	5,10	1,6
40	9,42	5,00	1,7	7,73	4,90	1,5
45	8,75	4,90	1,6	7,07	4,80	1,5
50	8,02	4,90	1,6	6,49	4,70	1,4
55	7,42	4,80	1,4	5,92	4,65	1,4
60	6,83	4,65	1,4	5,31	4,50	1,3
65	6,23	4,50	1,3	4,78	4,30	1,2
70	5,67	4,50	1,3	4,23	4,20	1,2
75	5,13	4,30	1,3	3,75	4,00	1,2
80	4,54	4,10	1,2	3,29	3,90	1,1
85	4,08	4,00	1,1	2,82	3,80	1,0
90	3,62	3,90	1,0	2,37	3,60	1,0
95	3,17	3,60		2,03	3,40	
100	2,76	3,50		1,69	3,30	
105	2,37	3,50		1,37	3,10	
110	1,98	3,30		1,13	3,00	
115	1,63	3,20		0,92	2,90	
120	1,32	3,10		0,72	2,90	
125	1,07	3,00		0,56	2,80	
130	0,82	2,80		0,44	2,80	
135	0,65	2,80		0,34	2,80	
140	0,50	2,80		0,29	2,80	
145	0,39	2,80		0,24	2,80	
150	0,30	2,80		0,22	2,80	
155	0,25	2,80		0,21	2,80	
160	0,21	2,80		0,19	2,80	
165	0,19	2,80		0,19	2,80	

Tabela C16 – Experimentos de secagem a 1,0 m/s e 35°C.

t (min)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)	$X_{bs}$ ( $\frac{g_{ag}}{g_{gel}}$ )	D (cm)	L (mm)
0	18,64	5,90	2,2	18,41	5,90	2,2
5	17,83	5,90	2,1	17,59	5,80	2,2
10	17,11	5,75	2,0	16,75	5,75	2,2
15	16,34	5,70	2,0	16,05	5,70	2,1
20	15,63	5,65	2,0	15,35	5,60	2,1
25	14,95	5,55	1,9	14,74	5,50	2,1
30	14,36	5,45	1,9	14,06	5,30	2,0
35	13,68	5,30	1,9	13,42	5,25	2,0
40	13,06	5,25	1,9	12,86	5,25	2,0
45	12,42	5,25	1,8	12,18	5,20	1,9
50	11,86	5,15	1,8	11,60	5,15	1,8
55	11,27	5,00	1,7	11,00	5,05	1,8
60	10,73	5,00	1,7	10,45	4,95	1,8
65	10,35	4,95	1,7	9,93	4,80	1,8
70	9,70	4,85	1,7	9,42	4,70	1,6
75	9,21	4,80	1,6	8,90	4,70	1,6
80	8,72	4,70	1,6	8,42	4,55	1,6
85	8,26	4,65	1,6	7,98	4,50	1,6
90	7,81	4,50	1,6	7,50	4,50	1,6
95	7,34	4,40	1,5	7,08	4,40	1,5
100	6,90	4,40	1,4	6,65	4,30	1,5
105	6,47	4,20	1,3	6,23	4,20	1,5
110	6,03	4,20	1,3	5,81	4,10	1,4
115	5,62	4,00	1,2	5,41	3,90	1,3
120	5,22	3,90	1,2	5,05	3,85	1,3
125	4,95	3,85	1,2	4,69	3,80	1,2
130	4,59	3,80	1,2	4,35	3,60	1,2
135	4,27	3,70	1,2	4,05	3,60	1,2
140	3,93	3,60	1,1	3,71	3,50	1,1
145	3,57	3,60	1,1	3,43	3,40	1,1
150	3,33	3,50	1,1	3,08	3,30	1,1
155	3,05	3,40	1,0	2,81	3,20	1,0
160	2,79	3,30		2,58	3,20	
165	2,53	3,20		2,31	3,10	
170	2,31	3,10		2,08	3,00	
175	2,07	3,00		1,85	2,90	
180	1,84	2,90		1,64	2,90	
185	1,64	2,80		1,45	2,80	
190	1,45	2,80		1,27	2,80	
195	1,27	2,80		1,09	2,80	
200	1,10	2,80		0,99	2,80	
205	0,95	2,80		0,89	2,80	
210	0,82	2,80		0,77	2,80	

215	0,73	2,80		0,67	2,80	
220	0,63	2,80		0,58	2,80	
225	0,54	2,80		0,47	2,80	
230	0,48	2,80		0,44	2,80	
235	0,44	2,80		0,40	2,80	
240	0,37	2,80		0,34	2,80	
245	0,33	2,80		0,31	2,80	
250	0,31	2,80		0,29	2,80	

(continuação da Tabela C16)

Tabela C17 – Massas secas de cada amostra em gramas.

	35°C	40°C	45°C	50°C
1,0 m/s	0,331	0,251	0,333	0,268
	0,321	0,266	0,322	0,276
2,0 m/s	0,390	0,262	0,325	0,306
	0,390	0,250	0,330	0,301
3,0 m/s	0,327	0,283	0,299	0,283
	0,315	0,288	0,328	0,290
4,0 m/s	0,358	0,354	0,309	0,331
	0,355	0,312	0,356	0,381