

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

EVOLUÇÃO DA FORMA E ENCOLHIMENTO DE UM SISTEMA GEL
DURANTE A SECAGEM POR CONVECÇÃO FORÇADA

Leonardo da Silva Arrieche

Orientador: Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori

São Carlos - SP

Setembro de 2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

EVOLUÇÃO DA FORMA E ENCOLHIMENTO DE UM SISTEMA GEL
DURANTE A SECAGEM POR CONVECÇÃO FORÇADA

Leonardo da Silva Arrieche

Orientador: Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos

São Carlos - SP

Setembro de 2003

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

A775ef

Arrieche, Leonardo da Silva.

Evolução da forma e encolhimento de um sistema gel durante a secagem por convecção forçada / Leonardo da Silva Arrieche. -- São Carlos : UFSCar, 2003.

136 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2003.

1. Secagem. 2. Encolhimento. 3. Fatores de forma. 4. Períodos de secagem. 5. Camada limite. I. Título.

CDD: 660.28426 (20^a)

À minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori, pela orientação, amizade, apoio e incentivo.

Ao Prof. Dr. José Teixeira Freire pelos seus ensinamentos, pela amizade, apoio e incentivo.

Aos professores do PPGEQ/DEQ/UFSCar, Prof. Dr. Ronaldo Guimarães Corrêa, à Prof^a Dra. Ana Maria da Silveira e à Prof^a Dra. Maria do Carmo Ferreira pelas contribuições que deram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus familiares pelo apoio, compreensão e incentivo que deram no decorrer deste trabalho.

Aos técnicos do DEQ-UFSCar, especialmente ao Sr. Oscar da Silva, Sr. Walter Suficiel e Sr. Dorival Prenholato.

Aos amigos Lissandra Xavier Ito e Antônio Muniz.

E aos demais amigos e colegas, especialmente à Ana Paula, Carolina, Salete, Karina, Paula, Juliana, Cristiane, Euclides, Kleper, Margarete, Tatiana, Manoel, Luanda, Pérola, Marcelo Bacelos, Carla Fabiani, Roger, Patrícia, Fabíola, Alexandre, Alexei e Antonio, pela amizade e contribuições ao trabalho.

A todos os demais que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

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

RESUMO

O conhecimento da evolução de forma e encolhimento de um sistema gel esférico, durante a secagem por convecção forçada, significativamente aumenta a compreensão deste processo na visão dos fenômenos de transporte. Este trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema gel, com geometria esférica, que permita analisar o efeito do escoamento na camada limite, entre o sólido e o fluido, no transporte de umidade, encolhimento e na evolução da forma da amostra, durante a secagem por convecção forçada. O encolhimento foi observado pela tomada de imagens, e os dados foram utilizados para o cálculo de fatores de forma. O processo foi avaliado sobre um escoamento de fluido laminar (baseado em diâmetro de partícula), com uma concentração de ágar de 1,5 e 3% (b.u.), velocidade do fluido variando de 1,0 a 2,0 m/s e diâmetros de partícula iniciais de $1,61 \cdot 10^{-2}$ e $2,66 \cdot 10^{-2}$ m, sendo a temperatura mantida em aproximadamente 50 °C. Os resultados confirmaram com boa reprodutibilidade, comprovada estatisticamente, que a circularidade e massa específica das amostras diminuem de acordo com a formação de perfis de umidade bidimensionais, para teores de umidade abaixo do valor crítico. A diferença entre os diâmetros máximo e mínimo de uma amostra, ao longo do processo, evidenciou a variação das taxas de transferência de massa entre as regiões anterior e posterior. Durante o período de taxa constante de secagem foi avaliado que a análise é concentrada, em relação ao transporte de umidade, com a circularidade e massa específica das amostras permanecendo aproximadamente constantes. O sistema gel desenvolvido permitiu alcançar o objetivo proposto de maneira seletiva, representando materiais intensamente afetados pelo fenômeno do encolhimento.

ABSTRACT

Knowledge of the shape evolution and shrinkage of a spherical gel system during drying by forced convection significantly enhances the understanding of this process under the vision of the transport phenomena. This work consists in the development of a gel system, with spherical geometry, which allows analyzing the effect of the fluid flow, in the boundary layer, on the moisture transport, shrinkage and on the shape evolution of the sample, during drying in an air stream forced convection equipment. The shrinkage was observed through the capture of images, used for the calculation of shape factors. The process was evaluated under a laminar flow (based on particle diameter), with a agar concentration of 1.5 and 3% (wet basis), fluid velocities varying from 1.0 to 2.0 m/s and initial particle diameters of $1.61 \cdot 10^{-2}$ and $2.66 \cdot 10^{-2}$ m, being the temperature maintained at 50 °C. The results confirmed with good reproducibility, proved statistically, that the circularity and specific mass of the samples decrease according to the formation of accentuated two-dimensional moisture profiles, for moisture contents lower than the critical value. The difference between the maximum and minimum diameters of a sample, during the process, evidenced the variation of the mass transfer rates between the previous and subsequent areas. It was inferred that during the constant drying rate period, the analysis is pondered in relation to the moisture transport, with the circularity and specific mass of the samples staying approximately constant. The gel system used allowed to reach the proposed objective, in a selective way, representing materials intensely affected by the shrinkage.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiv
NOMENCLATURA.	xvi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 ASPECTO GERAL.....	1
1.2 MOTIVAÇÃO À PESQUISA	3
1.3 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA.....	4
1.4 OBJETIVO.....	7
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 GENERALIDADES SOBRE O GÉL ÁGAR.....	9
2.2 APLICAÇÕES DO GEL ÁGAR	11
2.3 ENCOLHIMENTO	12
2.3.1 <i>Mecanismos de encolhimento</i>	13
2.3.2 <i>Tipos de encolhimento</i>	14
2.4 SECAGEM CONVECTIVA CONSIDERANDO O ENCOLHIMENTO	16
2.4.1 <i>Síntese dos fenômenos de transferência de massa e calor durante</i> <i>a secagem convectiva e tendências para a modelagem</i> <i>matemática do processo</i>	16

2.4.2 <i>Visão geral da modelagem da secagem convectiva considerando o encolhimento</i>	19
2.5 EXEMPLOS DE MODELOS PARA A SECAGEM CONVECTIVA CONSIDERANDO ENCOLHIMENTO.....	23
2.5.1 <i>Modelo de SHAH & PORTER (1973), para filme com transferência de massa e calor unidimensionais</i>	23
2.5.2 <i>Modelo de RÄDERER et al. (2000), para filme com transferência de massa e calor unidimensionais</i>	30
2.5.3 <i>Modelo de ROQUES et al. (1994), para geometria esférica com transferência de massa e calor combinados unidimensionais</i>	32
2.5.4 <i>Modelo de HERNÁNDEZ et al. (2000), para filme e paralelepípedo com transferência de massa unidimensional e bidimensional isotérmica</i>	35
2.6 CONCLUSÃO GERAL SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	42
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 MATERIAIS	44
3.2 CONSTRUÇÃO DAS AMOSTRAS DE GÉIS	45
3.2.1 <i>Preparo das misturas</i>	45
3.2.2 <i>Moldagem e geleificação das amostras</i>	46
3.2.3 <i>Avaliação da construção de amostras em geometria esférica</i>	48
3.3 UNIDADE EXPERIMENTAL DE SECAGEM CONVECTIVA.....	49
3.3.1 <i>Secador de convecção forçada com reciclo de ar</i>	49
3.3.2 <i>Câmara de secagem</i>	51
3.3.3 <i>Suporte da amostra para pesagem direta e contínua</i>	54

3.4 DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO	56
3.4.1 <i>Determinações de umidade e medidas de velocidade e temperatura</i>	56
3.4.2 <i>Densidade de fluxo de massa</i>	57
3.5 DETERMINAÇÕES DAS PROPRIEDADES DA AMOSTRA	58
3.5.1 <i>Tomada de imagens para a medida do encolhimento</i>	58
3.5.2 <i>Obtenção do perímetro, volume e área superficial da amostra a partir da análise de imagens</i>	59
3.5.3 <i>Determinação da forma das partículas a partir da análise de imagens</i>	59
3.5.4 <i>Massa específica a partir da massa e volume da amostra ao longo do processo</i>	60
3.5.5 <i>Determinação da umidade de equilíbrio termodinâmico via método dinâmico</i>	61
3.5.6 <i>Determinação do teor de umidade média crítica</i>	61
3.6 DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE DE MASSA EFETIVA E DO NÚMERO DE BIOT DE MASSA	62
3.6.1 <i>Determinação da difusividade de massa efetiva</i>	62
3.6.2 <i>Número de Biot</i>	64
3.7 PROPRIEDADES FÍSICAS DO FLUIDO	68
3.8 TESTES DE SECAGEM CONVECTIVA DAS AMOSTRAS	69
3.8.1 <i>Procedimento experimental</i>	69
3.8.2 <i>Planejamento dos experimentos, condições operacionais e reprodutibilidade para a experimentação</i>	70

3.9. REPRESENTAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS COM MODELOS DA LITERATURA	71
3.9.1 <i>Equações para as representações do volume, massa específica e porosidade em função da umidade da amostra (modelos para o encolhimento)</i>	72
3.9.2 <i>Ângulo de separação do escoamento na camada limite</i>	74
3.9.3 <i>CrITÉrios para a verificação de ajuste e reprodutibilidade dos dados</i>	75
3.10 ANÁLISE DOS DADOS	75
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	78
4.1 CONSTRUÇÃO DAS AMOSTRAS DE GÉIS	78
4.1.1 <i>Avaliação dos componentes utilizados</i>	78
4.1.2 <i>Moldagem e geleificação das amostras</i>	80
4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL NA UNIDADE DE SECAGEM CONVECTIVA	82
4.3 DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO	84
4.3.1 <i>Medidas de velocidade, temperatura e umidade</i>	84
4.3.2 <i>Densidade de fluxo de massa</i>	86
4.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA AMOSTRA	88
4.4.1 <i>Encolhimento</i>	88
4.4.2 <i>Determinação da forma das partículas a partir da análise de imagens</i>	92
4.4.3 <i>Determinação da massa específica a partir da massa e volume da amostra ao longo do processo</i>	95

4.5 DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE DE MASSA EFETIVA E DO NÚMERO DE BIOT DE MASSA.....	98
4.5.1 <i>Determinação da difusividade efetiva</i>	98
4.5.2 <i>Número de Biot de massa</i>	101
4.6. REPRESENTAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS ATRAVÉS DOS MODELOS DA LITERATURA.....	103
4.7 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS.....	106
4.7.1 <i>Análise da dependência da circularidade com os períodos de secagem</i>	107
4.7.2 <i>Análise da dependência da massa específica simulada e experimental com os períodos de secagem</i>	112
4.7.3 <i>Análise da dependência da relação de diâmetros com os períodos de secagem</i>	116
4.7.4 <i>Análise da dependência do número de Biot com os períodos de secagem</i>	121
4.7.5 <i>Síntese dos fenômenos físicos ocorridos durante a secagem do sistema gel</i>	125
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	127
CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:Esquema do fluxo ao redor de uma esfera submersa em um fluido que escoava.	5
Figura 2.1: Esquema das estruturas do ágar (A) e precursor do ágar (B) com as posições comuns das substituições do metil ésters (FALSHAW et al., 1998).	10
Figura 2.2: Visão geral da secagem por convecção forçada, considerando o encolhimento.	20
Figura 2.3: Esquema para um processo de secagem de gel (SHAH &PORTER, 1973).	24
Figura 3.1. (i) Esquema do molde para esfera sem extrator: (A) posição de retirada da amostra, (B) posição de moldagem. (ii) Esquema do molde para esfera com extratores, (A) posição de moldagem, (B) posição de saque.	47
Figura 3.2: Esquema da unidade de secagem utilizada para a condução dos experimentos (CASSANDRE et al., 2001).	49
Figura 3.3: Resultado típico de velocidade do ar na região de secagem, com $V_A = 0,95 \pm 0,05$ m/s e $T_A = 34,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Var 1 = largura em cm, Var 2 = altura em cm (CASSANDRE et al., 2001).	53

Figura 3.4: Resultado típico de temperatura do ar na região de secagem, com $T_A = 34,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ e $V_A = 0,95 \pm 0,05$ m/s. Var 1 = largura em cm, Var 2 = altura em cm (CASSANDRE et al., 2001).....	54
Figura 3.5: Esquema para a secagem das amostras pelo método contínuo.....	55
Figura 3.6: Esboço da plataforma utilizada no método intermitente de aquisição de dados.....	56
Figura 4.1: Amostra composta de amido (7%), celulose (9%) e ágar (1,5%), em base úmida, em três tempos distintos do processo de secagem com $T_A = 50^\circ\text{C}$, $V_A = 1,3$ m/s e $D_0 = 3,33$ cm (escoamento da direita para a esquerda, visão lateral).	79
Figura 4.2: Amostra composta de ágar (1,5 % b.u.) em três tempos distintos do processo de secagem com $T_A = 50^\circ\text{C}$, $V_A = 1,4$ m/s e $D_0 = 2,66$ cm (escoamento da direita para a esquerda, visão lateral).....	80
Figura 4.3: Amostra composta de ágar (3%) em três tempos distintos do processo de secagem com $T_A = 50^\circ\text{C}$, $V_A = 1,0$ m/s e $D_0 = 2,66$ cm (escoamento da direita para a esquerda, visão de topo).....	83
Figura 4.4: X_{BS} em função do tempo de secagem, para um experimento típico e sua réplica.....	85

Figura 4.5: Densidade de fluxo de massa em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.	87
Figura 4.6: A_P e P_P , em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.	89
Figura 4.7: D_{MX} , D_{MN} e D_{MD} em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.	90
Figura 4.8: D_{EQ} e V_{EQ} , em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.	90
Figura 4.9: ϕ e D_F em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.	93
Figura 4.10: ρ_{am} em função do tempo de secagem, para o experimento e a sua réplica.	96
Figura 4.11: X em função do tempo de secagem.	99
Figura 4.12: D_{EF} em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.	99
Figura 4.13: Bi_m em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.	102
Figura 4.14: V_{EQ} em função de X_{BS} . (a) Método contínuo. (b) Método intermitente.	104

- Figura 4.15: R e ϕ em função de X_{BS} , com $V_A = 2,0$ m/s.
 (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m. (b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.108
- Figura 4.16: R e ϕ em função de X_{BS} , com $V_A = 1,0$ m/s.
 (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m. (b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.109
- Figura 4.17: R e ρ_{am} , obtida dos dados experimentais e pela Equação (3.19),
 em função de X_{BS} , com $V_A = 2,0$ m/s. (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m.
 (b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.113
- Figura 4.18: R e ρ_{am} obtida dos dados experimentais e pela Equação (3.19),
 em função de X_{BS} , com $V_A = 1,0$ m/s. (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m.
 (b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.114
- Figura 4.19: R e D_F em função de X_{BS} , com $V_A = 2,0$ m/s.
 (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m. (b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.117
- Figura 4.20: R e D_F em função de X_{BS} , com $V_A = 1,0$ m/s.
 (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m. (b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.118
- Figura 4.21: R e Bi_m em função de X_{BS} , com $V_A = 2,0$ m/s.
 (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m. (b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.122
- Figura 4.22: R e Bi_m em função de X_{BS} , com $V_A = 1,0$ m/s.
 (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m. (b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.123
- Figura 4.23: R, Bi_m , D_F , ϕ e ρ_{am} em função de X_{BS} , com $V_A = 2,0$ m/s,
 $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m, $T_A = 50^{\circ}\text{C}$ e $UR = 16,7$ %.....126

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Propriedades do ar à 1 atm (SINGH & HELDMAN, 1993).	69
Tabela 3.2: Condições experimentais utilizadas nos experimentos preliminares	70
Tabela 3.3: Variáveis e seus níveis utilizados para o planejamento experimental	71
Tabela 4.1: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas de X_{BS} , para a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes ao experimento típico mostrado na Figura (4.4).	85
Tabela 4.2: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre réplicas de R, para a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes ao experimento típico mostrado na Figura (4.5).	87
Tabela 4.3: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre as réplicas de A_p , P_p , D_{MX} , D_{MN} , D_{MD} , D_{EQ} e V_{EQ} para a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes ao experimento mostrado nas Figuras (4.6) a (4.8).	91
Tabela 4.4: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre réplicas de ϕ e D_F , para a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes ao experimento mostrado na Figura (4.9).	93

Tabela 4.5: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre réplicas de ρ_{am} , para a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes ao experimento da Figura (4.10)	96
Tabela 4.6: Parâmetros estatísticos da análise de regressão de um experimento e sua réplica, para a determinação da constante de secagem K_{sec} e para a verificação da reprodutibilidade de D_{EF} , com referência ao experimento mostrado nas Figuras (4.11) e (4.12).	100
Tabela 4.7: Parâmetros estatísticos da análise de regressão para a determinação da reprodutibilidade do número de Biot de massa, com referência ao experimento mostrado na Figura (4.13).	102
Tabela 4.8 : Parâmetros estatísticos da avaliação de ajuste de V_{EQ} com a Equação (3.18), referentes aos experimentos das Figuras (4.14.a) e (4.14.b).	105

NOMENCLATURA

a_w	Atividade de água do alimento.	[-]
A	Área	[L ²]
A	Parâmetro adimensional, Eq. (3.5)	[-]
A_{ES}	Área da esfera equivalente	[L ²]
A_p	Área projetada	[L ²]
Bi_m	Número de Biot para massa ($Bi_m = \frac{K_c \rho_{ar} x_l K_{eq}}{\rho_{SS} D_{EF}}$)	[-]
ϕ	Circularidade ($\phi = \frac{P_{ES}}{P_P} = \pi \cdot \frac{D_{EQ}}{P_P}$)	[-]
C_G	Calor específico do solvente livre de gel (independente da temperatura)	[L ² T ⁻² θ ⁻¹]
C_p	Calor específico do ar	[L ² T ⁻² θ ⁻¹]
C_{SL}	Calor específico do solvente líquido (independente da temperatura)	[L ² T ⁻² θ ⁻¹]
C_{SV}	Calor específico do vapor do solvente (independente da temperatura)	[L ² T ⁻² θ ⁻¹]
C_{0S}	Concentração de sólido inicial (base úmida)	[-]
D	Coeficiente de difusão do solvente no gel na concentração zero de solvente (SHAH & PORTER, 1973)	[L ² T ⁻¹]
D_{12}	Coeficiente de difusão mútuo	[L ² T ⁻¹]
$D_{a\infty}$	Difusividade da água no ar	[L ² T ⁻¹]
D_{EF}	Difusividade efetiva de massa	[L ² T ⁻¹]
D_{EQ}	Diâmetro equivalente	[L]

D_F	Relação de diâmetros ($D_F = \frac{D_{MX} - D_{MN}}{D_{MD}}$)	[-]
D_{MD}	Diâmetro médio	[L]
D_{MN}	Diâmetro mínimo	[L]
D_{MX}	Diâmetro máximo	[L]
D_ξ	Coefficiente de difusão modificado levando em conta o encolhimento	[L ² T ⁻¹]
G	Módulo de Young	[ML ⁻¹ T ⁻²]
h	Entalpia	[MT ⁻² L ²]
h_G	Coefficiente de transferência de calor na fase gasosa	[MT ⁻³ θ ⁻¹]
k_∞	Condutividade térmica do ar	[MLT ⁻³ θ ⁻¹]
K	Constante da lei de Henry	[-]
K_c	Coefficiente de transferência de massa por convecção	[LT ⁻¹]
K_{eq}	Constante de partição entre o conteúdo de umidade do alimento e do ar de secagem ($K = \frac{Y}{X_{BS}}$)	[-]
K_G	Coefficiente de transferência de massa no gás	[LT ⁻¹]
K_{sec}	Constante de secagem	[T ⁻¹]
L	Comprimento característico (espessura)	[L]
m_{am}	Massa da amostra medida experimentalmente	[M]
M_S	Peso molecular do solvente	[-]
M_{SS}	Massa de sólido seco	[M]
\overline{Nu}_D	Número de Nusselt médio ($\overline{Nu}_D = \frac{h_G \cdot D_{EQ}}{k_\infty}$)	[-]
p_{wv}	Pressão parcial de vapor d'água	[ML ⁻¹ T ⁻²]

P	Pressão total	$[ML^{-1}T^{-2}]$
P_{ES}	Perímetro da esfera equivalente	[L]
P_G	Pressão parcial do solvente na fase gasosa	$[ML^{-1}T^{-2}]$
P_p	Perímetro projetado	[L]
Pr	Número de Prandtl ($Pr = \frac{\nu}{\alpha}$)	[-]
P_V	Pressão de vapor do solvente na superfície do gel (SHAH & PORTER, 1973)	$[ML^{-1}T^{-2}]$
P_V	Potência de Microondas efetivamente dissipada	$[MT^{-3}L^2]$
P_0	Pressão de vapor do solvente puro na temperatura inicial na superfície do gel	$[ML^{-1}T^{-2}]$
r	Raio	[L]
R	Densidade de fluxo de massa	$[MT^{-1}L^{-2}]$
R_{est}	Densidade de fluxo de massa no período de taxa constante	$[MT^{-1}L^{-2}]$
Re_D	Número de Reynolds de partícula ($Re_D = \frac{D_{EQ} V_A \rho_{ar}}{\mu_{\infty}}$)	[-]
R_S	Raio até a superfície	[L]
Sc	Número de Schmidt ($Sc = \frac{\nu}{D_{a\infty}}$)	[-]
\overline{Sh}_D	Número de Sherwood médio ($\overline{Sh}_D = \frac{K_c D_{EQ}}{D_{a\infty}}$)	[-]
t	Tempo de secagem	[T]
T_A	Temperatura do ar de secagem	[θ]
$V_{\acute{a}gua}$	Volume de água	$[L^3]$
V_A	Velocidade do ar de secagem	$[LT^{-1}]$

V_{EQ}	Volume equivalente	$[L^3]$
V_g	Volume do gel	$[L^3]$
V_s	Volume da fase sólida	$[L^3]$
W	Taxa de transferência de massa do solvente para a superfície (SHAH & PORTER, 1973)	$[MT^{-1}]$
x_1	Dimensão característica para esfera ($x_1 = V_{EQ}/A_{ES}$)	$[L]$
X	Umidade em base seca pontual (SHAH & PORTER, 1973, HERNÁNDEZ et al., 2000)	$[-]$
X	Adimensional de umidade média em base seca $\left(X = \left(\frac{X_{BS} - X_{BSe}}{X_{BS0} - X_{BSe}} \right) \right)$	$[-]$
(X)	Umidade em base seca média (HERNÁNDEZ et al., 2000)	$[-]$
X_0	Conteúdo de umidade do alimento em base seca inicial	$[-]$
X_{BS}	Umidade média em base seca	$[-]$
X_{BS0}	Umidade média inicial em base seca	$[-]$
X_{BSc}	Umidade média crítica em base seca	$[-]$
X_{BSe}	Umidade de equilíbrio dinâmico em base seca	$[-]$
X_e	Conteúdo de umidade do alimento em base seca no equilíbrio	$[-]$
Y	Umidade do ar de secagem em base seca	$[-]$
Y_i	Umidade do ar em base seca na interface	$[-]$
z	Coordenada espacial retangular	$[L]$

Símbolos Gregos

α	Difusividade térmica do ar ($\alpha = \frac{k_{\infty}}{\rho_{\text{ar}} C_p}$)	$[L^2 T^{-1}]$
χ	Porosidade	$[-]$
Δh_v	Calor latente de vaporização	$[L^2 T^{-2}]$
ΔL_f	Fração do comprimento característico no final da secagem	$[-]$
ε	Coefficiente de retração	$[-]$
γ_1	Coefficiente que leva em conta dependência da difusividade do solvente com a temperatura	$[M^{-1} L^3 \theta^{-1}]$
γ_2	Coefficiente que leva em conta a dependência da difusividade do solvente com a concentração.	$[M^{-1} L^3]$
μ	Razão de Poisson	$[-]$
μ_{sup}	Viscosidade do ar na superfície da amostra	$[ML^{-1} T^{-1}]$
μ_{∞}	Viscosidade do ar na corrente livre	$[ML^{-1} T^{-1}]$
θ_s	Ângulo de separação	$[-]$
ρ_a	Massa específica do ar	$[ML^{-3}]$
ρ_{ar}	Massa específica do ar	$[ML^{-3}]$
$\rho_{\text{água}}$	Massa específica da água	$[ML^{-3}]$
ρ_{am}	Massa específica aparente da amostra	$[ML^{-3}]$
ρ_g	Massa específica do gel livre de solvente (SHAH & PORTER, 1973)	$[ML^{-3}]$
ρ_s	Concentração de sólido seco	$[ML^{-3}]$
ρ_s	Massa específica do solvente puro (SHAH & PORTER,	$[ML^{-3}]$

1973)

ρ_{SS}	Massa específica do sólido seco	$[ML^{-3}]$
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima	$[ML^{-1}T^{-2}]$
τ	Adimensional de tempo	$[-]$
υ	Difusividade de quantidade de movimento do ar ($\upsilon = \frac{\mu_{\infty}}{\rho_{ar}}$)	$[L^2T^{-1}]$
ξ	Adimensional de posição	$[-]$
ψ	Adimensional de umidade pontual	$[-]$
(ψ)	Adimensional de umidade média	$[-]$

Subscritos

a	Amostra
eq	Equilíbrio
ES	Esfera equivalente
EQ	Equivalente
MD	Médio
MN	Mínimo
MX	Máximo
P	Projetado
s	Sólido
w	Água
wv	Vapor d'água
0	Estado inicial ou seco
1	Solvente (água)
2	Sólido (polímero)

Sobrescritos

- ⁰ Relativo aos sólidos
- ⁽⁰⁾ Inicial (tempo a zero)

Abreviações

- Eq. Equação
- Fig. Figura
- Tab. Tabela
- Var Variável

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTO GERAL

Sob a ótica da engenharia de sistemas, o constante desenvolvimento dos processos de secagem é uma meta que não pode ser alcançada sem o perfeito entendimento e, eventualmente, algum domínio de todos os subprocessos envolvidos, como o encolhimento da estrutura e os fenômenos internos e externos de transferência de calor, matéria e quantidade de movimento, presentes durante a secagem de inúmeros materiais, os quais determinam o desempenho do processo e a integridade física do produto final.

Uma das principais razões para a deterioração da estrutura física é decorrente de mudanças causadas pelo encolhimento do produto durante o processo de desidratação. O encolhimento tanto promove perda nas características de permeabilidade ao solvente, ou torna o produto instável e quebradiço, sendo ambos efeitos indesejáveis.

Diferentes atributos de qualidade dos produtos desidratados, tais como massa específica, formação de crosta, rachaduras e propriedades mecânicas, são todas relacionadas com o processo de contração (EICHLER et al., 1997).

Os géis são estruturas que sofrem um acentuado encolhimento durante a secagem, de forma semelhante a muitos materiais com alto teor de umidade, devido à sua estrutura polimérica, razão pela qual são considerados como sistemas simuladores para estudos de secagem.

Entre as aplicações dos géis encontram-se, por exemplo, os sistemas simuladores utilizados principalmente para simplificar os sistemas biológicos complexos, com o objetivo de estudar os fatores que afetam a qualidade dos produtos seletivamente, eliminando outros não desejáveis, conforme apresentado por GOGUS & LAMB (1998).

Desde que muitos sistemas biológicos poliméricos possuem estruturas de cadeias que incham em presença de um solvente de alta afinidade, pode-se beneficiar dos progressos recentes da física de géis. Os géis, bem como muitos destes produtos, têm estruturas de cadeias que incham na presença de solventes de alta afinidade (EICHLER et al., 1997).

Sistemas géis, têm sido nos últimos anos, largamente utilizados para a simulação de diferentes materiais em pesquisas e desenvolvimento dos processos de industrialização de produtos com alto valor agregado, como nos trabalhos de GOGUS & LAMB (1998), SCHRADER & LICHFIELD (1992); GARCIA & BUENO (1998); VAGENAS & KARATHANOS (1993); ROQUES et al. (1994); EICHLER et al. (1997); SHAH & PORTER (1973) e MRANI et al. (1997).

Nestes trabalhos vários sistemas géis simuladores são utilizados como os de amido, ágar, poli-acrilamida e outros, para o estudo de reações químicas, mecanismos de encolhimento e a grande maioria em estudos de secagem, envolvendo a modelagem com base nas equações de transferência de calor e massa, considerando o encolhimento do sistema com fronteiras móveis, tendo como respostas a influência do processo sobre os perfis de umidade no

interior dos materiais, deformações decorrentes do encolhimento e otimização de processos energéticos combinados, entre outros.

O gel ágar, em particular, tem apresentado algumas características de encolhimento durante a secagem que são as mesmas características apresentadas por certos vegetais, existindo então a possibilidade de aplicação dos modelos, que descrevem suas transformações, referentes ao encolhimento durante a secagem, em outras matérias-primas, com a vantagem de ser um meio constituído por dois componentes, água e polímero.

Dentro deste aspecto geral da secagem de materiais com alto teor de umidade como o gel ágar, tem-se a seguir a motivação desta pesquisa.

1.2 MOTIVAÇÃO À PESQUISA

Muitos dos estudos científicos de secagem que tratam da modelagem matemática deste processo incluem o fenômeno do encolhimento, porém são realizados de forma simplificada, considerando a difusão de umidade e a transferência de calor unidimensionais.

Em amostras de geometria esférica, estes fenômenos são considerados em uma única dimensão espacial (o raio), que poderá ou não ser satisfatória dependendo das características físicas da amostra e das condições operacionais do processo.

Porém, para amostras de geometria esférica, em camada espessa, submetidas à secagem por convecção forçada, a difusão de umidade bidimensional é evidente e a consideração de difusão apenas ao longo do raio torna-se fisicamente inconsistente.

Observa-se ainda, na literatura, que pouca atenção é dada aos fenômenos fluidodinâmicos externos, de interação entre o fluido e a partícula, que causam alterações nos coeficientes de transferência de massa e calor por convecção e, por conseqüência, uma secagem não uniforme, com uma maior deterioração das características físicas dos produtos.

De acordo com estas considerações, identificam-se boas oportunidades para o desenvolvimento de estudos científicos nesta linha de pesquisa. Entende-se que uma modelagem matemática dos perfis de velocidade e das forças entre o fluido e a partícula, na camada limite, sob condições diferenciadas de secagem, por convecção forçada e por convecção natural, poderiam explicar e prever a deterioração física das amostras, como fissuras e rachaduras, contribuindo para a escolha da melhor maneira de se conduzir um processo de secagem, de forma a ocasionar o mínimo de deterioração na integridade física dos produtos e, conseqüentemente, conferir-lhes um maior valor agregado.

1.3 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

Com relação aos fenômenos de interação entre o fluido e a partícula, observa-se que ao redor de uma esfera imersa em um fluido, com velocidade da corrente v_0 , durante um processo de secagem por convecção forçada, existe um ponto de estagnação, onde a velocidade do fluido é igual a zero, aumentando de valor conforme o fluido contorna o corpo, formando uma camada limite, conforme o esquema mostrado na Figura (1.1).

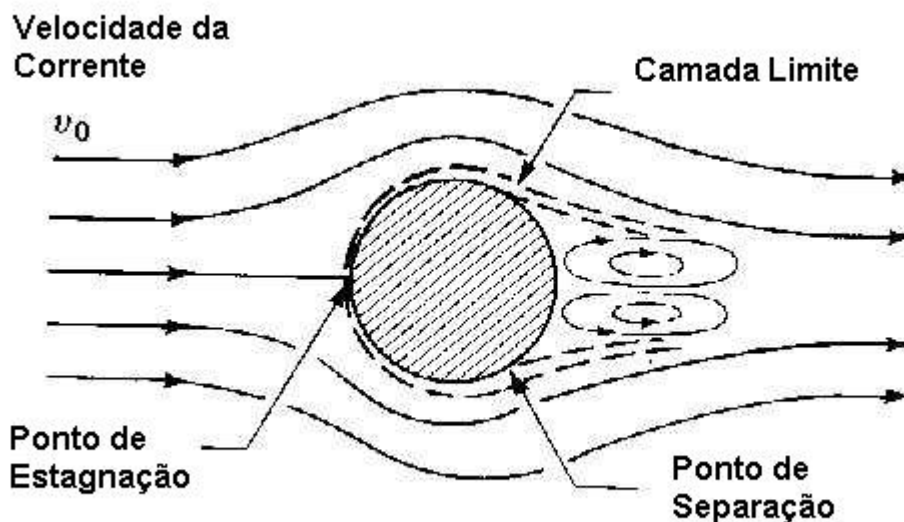


Figura 1.1:Esquema do fluxo ao redor de uma esfera submersa em um fluido que esco.

O perfil de velocidade existente nesta camada limite será responsável pelo aparecimento de uma tensão cisalhante sobre a superfície da esfera gerando uma força de interação entre o fluido e a partícula. Colabora para a formação desta força o fluido adjacente a esta camada que precisa mudar de direção para contornar a esfera.

Em um determinado ponto da camada limite, ocorrerá a sua separação da superfície da esfera, gerando ondas na parte posterior (vórtices), que também contribuirão para o aumento da força de interação entre o fluido e a partícula.

Estes fenômenos geram diferentes coeficientes de transferência de calor e massa por convecção na superfície da esfera conduzindo a uma secagem não uniforme. Os gradientes de umidade mais acentuados na parte anterior

causam o surgimento de tensões internas que promovem a ruptura do material, deteriorando a integridade física dos materiais durante a secagem.

O principal fator para a ocorrência desta não uniformidade na secagem é o ponto de separação da camada limite. Quanto mais afastada do ponto de estagnação ocorrer esta separação, menor será a formação de gradientes diferenciados e menor será a deterioração das características físicas do produto.

O ponto de separação da camada limite depende da velocidade do fluido, do diâmetro da partícula e da massa específica e viscosidade do ar de secagem, que são combinados no adimensional denominado número de Reynolds, que consiste numa relação entre as forças inerciais e as forças viscosas conferidas pelo fluido em movimento.

Quanto maiores as forças inerciais, em comparação às forças viscosas, mais cedo ocorrerá a separação da camada limite, sendo que nos valores do número de Reynolds de partícula menores que 1 (região de Stokes), esta separação praticamente não ocorre, tendo-se então uma predominância das forças viscosas conferidas pelo fluido.

Tem-se neste ponto a condição limite entre a secagem por convecção forçada e a secagem por convecção natural, onde outras forças de interação entre o fluido e a partícula passam a predominar: as forças viscosas e forças de empuxo. Estas forças são relacionadas por outro adimensional de grande importância, denominado número de Grashof.

1.4 OBJETIVO

Buscando contribuir com a necessidade de mais informações a respeito da influência dos fenômenos de interação entre o fluido e a partícula no processo de secagem por convecção forçada, e visando dar continuidade aos estudos sobre a secagem de géis realizados pelo “Centro de Secagem de Pastas, Suspensões e Sementes” do DEQ/UFSCar, o objetivo principal deste trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema gel, com geometria esférica, que possibilite analisar o efeito do escoamento do fluido na camada limite, no transporte de umidade, encolhimento e na evolução da forma da amostra, durante a secagem por convecção forçada.

Para atingir o objetivo proposto, foram cumpridas as seguintes etapas:

- i. preparação do sistema gel simulador com geometria esférica, em diferentes dimensões, com avaliação da composição a ser utilizada;
- ii. estabelecimento das condições operacionais do processo e adaptações no equipamento de secagem;
- iii. padronização da forma de medida do encolhimento por meio de tomada de imagens;
- iv. levantamento da cinética de secagem em diferentes dimensões de partícula e velocidades do ar de secagem;
- v. avaliação da reprodutibilidade dos dados obtidos;

-
- vi. avaliação da dependência do encolhimento com a umidade, ao longo do processo;
 - vii. avaliação da dependência da forma da amostra com os períodos de secagem, através de fatores de forma;
 - viii. avaliação da dependência da massa específica e da porosidade da amostra com os períodos de secagem,
 - ix. avaliação da dependência do número de Biot de massa com os períodos de secagem, e
 - x. síntese dos fenômenos físicos que ocorrem com o sistema gel durante o processo de secagem.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados generalidades sobre o gel ágar, aspectos gerais da secagem considerando o encolhimento, exemplos de representações matemáticas para este processo e uma síntese da revisão bibliográfica.

2.1 GENERALIDADES SOBRE O GÉL ÁGAR

Em toda a sua extensão, o litoral brasileiro, conta com uma imensidão de recursos inexplorados, em contraste com os demais países desenvolvidos como o Japão, onde mesmo contando com menor espaço geográfico, possui uma importante parcela de sua economia na exploração racional de seus recursos hidrobiológicos.

Dentre estes recursos, as algas pluricelulares e unicelulares são de fundamental importância na manutenção de pequenos crustáceos como o kril, constituindo então um elo na cadeia alimentar dos oceanos.

São capazes de sintetizar a glicose a partir de compostos inorgânicos como carbonatos, com o auxílio da luz solar, armazenando a energia necessária ao seu metabolismo e crescimento, produzindo proteínas, lipídios e carboidratos. Dentre estes metabólitos celulares, destacam-se os ácidos graxos como o ômega 3 (linolênico) e ômega 4 (linoléico) e polissacarídeos como a agarose e a agarpectina, constituintes do ágar.

Ágares são polissacarídeos formadores de géis, isolados de certas algas vermelhas (principalmente da alga *Gellidium amansi*). São polímeros lineares baseados em uma estrutura repetida de dissacarídeos 3-β-D-galactopiranosil e 4-3,6-anidro-α-L-galactopiranosil.

Usando a nomenclatura de KNUTSEN (FALSHAW et al., 1998), estas unidades referem-se a G e LA, respectivamente, como pode ser visto na Figura (2.1).

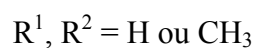
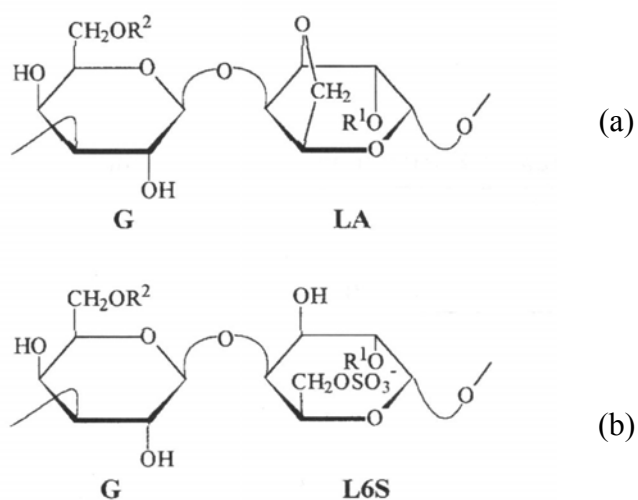


Figura 2.1: Esquema das estruturas do ágar (A) e precursor do ágar (B) com as posições comuns das substituições do metil éster (FALSHAW et al., 1998).

Cada estrutura repetida de dissacarídeo tem três grupos hidroxílicos em unidades de 3- β -D-galactopiranosil, em posições identificadas como G-2, G-4 e G-6, e um na unidade 4-3,6-anidro- α -L-galactopiranosil em LA-2. Alguns destes grupos podem ser substituídos por vários grupos oxigenados, particularmente etil éter, éster sulfato, acetato pirúvico ou unidades de glicosil como xilanopiranosil (X).

A posição comum do metil éter está na Figura (2.1). A presença de muitos precursores metilados na molécula dos ágar esconde a associação molecular responsável pela geleificação, (FALSHAW et al., 1998).

2.2 APLICAÇÕES DO GEL ÁGAR

Uma das muitas aplicações estudadas recentemente é a utilização do gel ágar como um sistema simulador de materiais biológicos. GOGUS et al. (1998) estudaram o efeito de reagentes na reação de Maillard em uma matriz de gel composta por 22,0% de celulose microcristalina, 1,00% de ágar, 0,90% de glicose e 0,37% de aminoácido glicina, durante a secagem por convecção a 80⁰C.

Estes sistemas simuladores também foram estudados por GOGUS & LAMB (1998), com o objetivo de selecionar uma composição formada por ágar, amido e celulose microcristalina, para aplicar em estudos de secagem de alimentos. Foi verificado que o gel ágar, quando desidratado, apresentava uma alta tendência ao encolhimento sendo que a adição de amido diminuía a taxa de encolhimento, mas aumentava a tendência à quebra dos moldes sólidos.

Porém, a mistura de ágar, amido e celulose microcristalina em proporções ideais mostraram melhores características de secagem sem a

ocorrência de quebra dos moldes e encolhimento similar ao dos vegetais estudados

Outro estudo mais recente com a aplicação de gel de alginato seco (extraído também de algas) foi desenvolvido por REIFEN et al. (1998). Neste caso, o suporte era uma matriz de hidro-colóide (gel de alginato a 1%) no qual óleo enriquecido com vitamina A havia sido adicionado por homogeneização.

Após a geleificação e secagem por liofilização, um sólido mastigável, projetado como uma embalagem comestível contendo vitamina A, foi obtido, com ausência de sabor, cor e odor facilitando a sua aceitação e com possibilidades de aromatização artificial durante o processo. Os suportes foram avaliados quanto às suas propriedades mecânicas com testes de compressão e estrutura interna por microscopia eletrônica.

Com relação a fragilidade de géis especificamente, OATES et al.(1993) estudaram o gel ágar e dois tipos de géis de alginato (gulurônico e manurônico) e em diferentes concentrações. O trabalho para vencer a resistência à quebra foi encontrada numa faixa de 4 a 32 J/m², sendo a maior faixa de valores para o gel ágar.

Foi descoberto que este gel se comporta de uma maneira típica aos géis de amido. A medida que estes géis retrogradavam, sua resistência à quebra tornava-se maior, enquanto o contrário acontecia com géis de alginatos.

2.3 ENCOLHIMENTO

Um fenômeno comumente observado na secagem de géis é um considerável encolhimento na estrutura, devido à evaporação do solvente. Este

encolhimento causa perda nas características de permeabilidade do gel pelo solvente ou torna o gel frágil e algumas vezes causa rachaduras no mesmo o que, de um ponto de vista prático, é um fenômeno indesejável.

Apresenta-se aqui uma revisão sobre os mecanismos que conduzem à ocorrência do fenômeno do encolhimento, segundo EICHLER et al. (1997). Também são considerados os tipos de encolhimento, seguindo SUZUKI et al. (1976), dando ênfase ao encolhimento linear.

2.3.1 Mecanismos de encolhimento

O inchamento dos géis envolve a formação de uma pressão de rede devido a uma extensão elástica da matriz polimérica. Uma possível força dirigente para o encolhimento pode ser a relaxação desta pressão de rede.

Um solvente de baixa afinidade pelo polímero, por um outro lado, pode favorecer a interação polímero-polímero e, por conseqüência, induzir um colapso espontâneo da estrutura (EICHLER et al., 1997).

No caso da secagem, a matriz polimérica hidrofílica é circundada inicialmente por água e finalmente por ar, que podem ser considerados como solventes de alta e baixa afinidade pelo polímero, respectivamente. O colapso induzido pela mudança na afinidade do solvente pela matriz polimérica, durante a secagem, deve ser outra possível força dirigente para o encolhimento (EICHLER et al., 1997).

Forças capilares também têm sido mencionadas como uma possíveis forças dirigentes do processo de encolhimento (WHITAKER, 1980; EICHLER et al., 1997).

O ponto final do processo de encolhimento pode ser a transição do estado gomoso para o estado vítreo do produto (EICHLER et al., 1997).

Outra possibilidade para a interrupção do encolhimento é um extremo aumento na rigidez da matriz devido a percolação de partículas colocadas como preenchimento no gel e, obviamente, quando as forças provenientes das pressões de rede e a magnitude do colapso causado pela mudança no solvente diminuïrem para valores negligenciáveis, (EICHLER et al., 1997).

2.3.2 Tipos de encolhimento

SUZUKI et al. (1976) investigaram a secagem de raïzes de vegetais, propondo três modelos para formular a relação entre a mudança de volume e o conteúdo de umidade do material:

- Modelo de Secagem Uniforme – o encolhimento é igual ao volume de água perdida por evaporação durante todos os estágios de secagem;
- Modelo de Secagem Central (“core drying”) – neste caso, supõe-se que a camada seca é formada na superfície externa, e o centro permanece com umidade igual à umidade inicial do material, no interior desta camada, ou seja, a densidade no centro é igual a do material inicial e a densidade da camada externa seca é a mesma de equilíbrio do material, e
- Modelo de Secagem Semi-central (“semi-core drying”) – a densidade na 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 intermediário entre as densidades inicial e do material seco.

Segundo os autores, o primeiro modelo resulta em duas equações alternativas, uma necessitando 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 massa específica.

IGLESIAS et al. (1993) sugeriram um modelo que estabelece o encolhimento em função da umidade para o gel agar, representado pela seguinte equação:

$$V_g = 0,67 + 1,002X_{BS} \quad (2.1)$$

onde V_g é o volume do gel e X_{BS} a umidade em base seca.

Este modelo pode ser escrito numa melhor forma como:

$$V_g = V_s(1 + \varepsilon X_{BS}) = V_s(1 + 1,493X_{BS}) \quad (2.2)$$

onde ε é o coeficiente de retração (adimensional) e V_s o volume do sólido.

No trabalho de BUVANASUNDARAM et al. (1996), os dados mostram que o gel encolhe aproximadamente o mesmo volume que a água que dele evapora. Isto está de acordo com o trabalho de IGLESIAS et al. (1993). Calculando o valor da razão $\rho_{\text{ágar}}/\rho_{\text{água}}$ verifica-se que esta tem quase o mesmo

valor de ε . Substituindo-se esta razão no lugar de ε na Equação (2.2) e sabendo-se que X_{BS} é a razão entre a massa de água e a massa de ágar seco obtém-se:

$$V_g = V_s + V_{\text{água}} \quad (2.3)$$

onde $\rho_{\text{ágar}}/\rho_{\text{água}}$ é a razão entre as massas específicas do ágar sólido e da água, respectivamente, e $V_{\text{água}}$ é o volume da água, o que comprova a aplicabilidade do modelo de secagem uniforme para representar o encolhimento do gel ágar.

2.4 SECAGEM CONVECTIVA CONSIDERANDO O ENCOLHIMENTO

Neste item será feita uma breve descrição dos fenômenos de transferência de massa e energia, que ocorrem na secagem convectiva, e dos esforços dirigidos para a modelagem matemática do problema, tendo como base a literatura consultada.

2.4.1 Síntese dos fenômenos de transferência de massa e calor durante a secagem convectiva e tendências para a modelagem matemática do processo

A secagem por convecção é considerada como um processo simultâneo de transferência de massa e calor, onde a água é transferida por difusão do interior do material para a interface ar-sólido, e da interface para a corrente de ar por convecção.

O calor é transferido por convecção do ar para a interface ar-sólido, e desta, por condução, para o interior do material. Estes fenômenos têm sido

modelados em duas tendências gerais: detalhadas e simplificadas, de acordo com HERNÁNDEZ et al. (2000).

Os modelos detalhados utilizam as equações simultâneas de transferência de calor e de massa, com as propriedades variáveis dos materiais e considerando o encolhimento. Estas equações são formadas por um sistema de duas equações diferenciais parciais não-lineares acopladas.

Alguns autores, como SHAH & PORTER (1973), ROQUES (1994), utilizam modelos detalhados para prever a cinética de secagem de alimentos ou para ajustar dados experimentais. O único meio de resolver tais modelos é por meios de métodos numéricos como elementos finitos e diferenças finitas.

Os modelos detalhados são de grande importância no estudo científico da secagem de materiais biológicos; entretanto a sua aplicação pode não ser prática devido à complexidade da sua resolução.

Os modelos simplificados são obtidos a partir de modelos detalhados de uma maneira tal que a equação de transferência de massa possa ser resolvida analiticamente. As simplificações mais comuns são as seguintes:

- a temperatura do material é constante, por exemplo, a transferência de calor é negligenciável;
- não há encolhimento, e
- a difusividade da água no interior do alimento é constante.

Estas considerações simplificam a equação de transferência de massa mas diminuem a habilidade de representar os dados experimentais de cinética de secagem de materiais biológicos.

Entretanto, estes modelos são utilizados para preverem ou ajustarem os dados de cinética de secagem de alimentos, pois são suscetíveis para o uso no projeto ou simulação de operações de secagem, segundo HERNÁNDEZ et al. (2000,).

Em um estudo realizado por MULET (1994), citado por HERNÁNDEZ et al. (2000), modelos foram testados em diferentes graus de complexidade. O autor conclui que o fator principal que deve ser considerado nestes modelos é o encolhimento do produto, observando que modelos onde se assumiu a difusividade como sendo constante e o encolhimento, ajustaram dados experimentais de cinética de secagem de alimentos de forma semelhante àqueles modelos em que foram considerados a difusividade variável e a ocorrência do encolhimento.

BALABAN & PIGOTT (1988), citados por HERNÁNDEZ et al. (2000) modelaram a cinética de secagem de peixes utilizando um modelo detalhado no qual a difusividade era considerada, constante com respeito ao conteúdo de umidade, considerando o encolhimento durante o processo.

HERNÁNDEZ et al. (2000), apresentam um modelo similar para a secagem de batatas, onde foi mostrado que a dependência da difusividade de água com conteúdo de umidade não está completamente comprovada.

Uma possível explicação para isto pode ser encontrada no trabalho de MAROULIS et al (1995), citados por HERNÁNDEZ et al. (2000).

Estes autores ajustaram modelos detalhados considerando dados experimentais de cinética de secagem de batatas, observando que a difusividade da água é praticamente constante (com respeito ao conteúdo de umidade), em

concentrações de água acima de 0,2 Kg/Kg., e em concentrações menores passa a ser função do conteúdo de umidade.

Por outro lado, é evidente o encolhimento de materiais com alto teor de umidade durante a secagem, e extremamente importante em secagem por meio de difusão de umidade, pois se produz uma variação na distância requerida para o movimento das moléculas de água.

Então seria de interesse prático obter uma solução analítica da equação de transferência de massa, levando em consideração o encolhimento, em um novo modelo simplificado (HERNÁNDEZ et al. 2000).

2.4.2 Visão geral da modelagem da secagem convectiva considerando o encolhimento

Com base na literatura consultada, pôde-se construir um esquema geral da forma como a modelagem da secagem por convecção forçada, considerando o encolhimento, pode ser tratada, o qual é apresentado na Figura (2.2).

Nesta figura observa-se que a modelagem pode seguir dois caminhos iniciais: um, considerando a transferência de calor (ar de secagem a uma temperatura superior a do material no início do processo) e, o outro, colocando a amostra a ser seca na mesma temperatura do ar de secagem.

Seguindo-se o fluxo em amarelo, a modelagem para a secagem não isotérmica deverá constar de equações para o transporte de umidade e calor no interior do material, pelas Leis de Fick e Fourier, respectivamente.

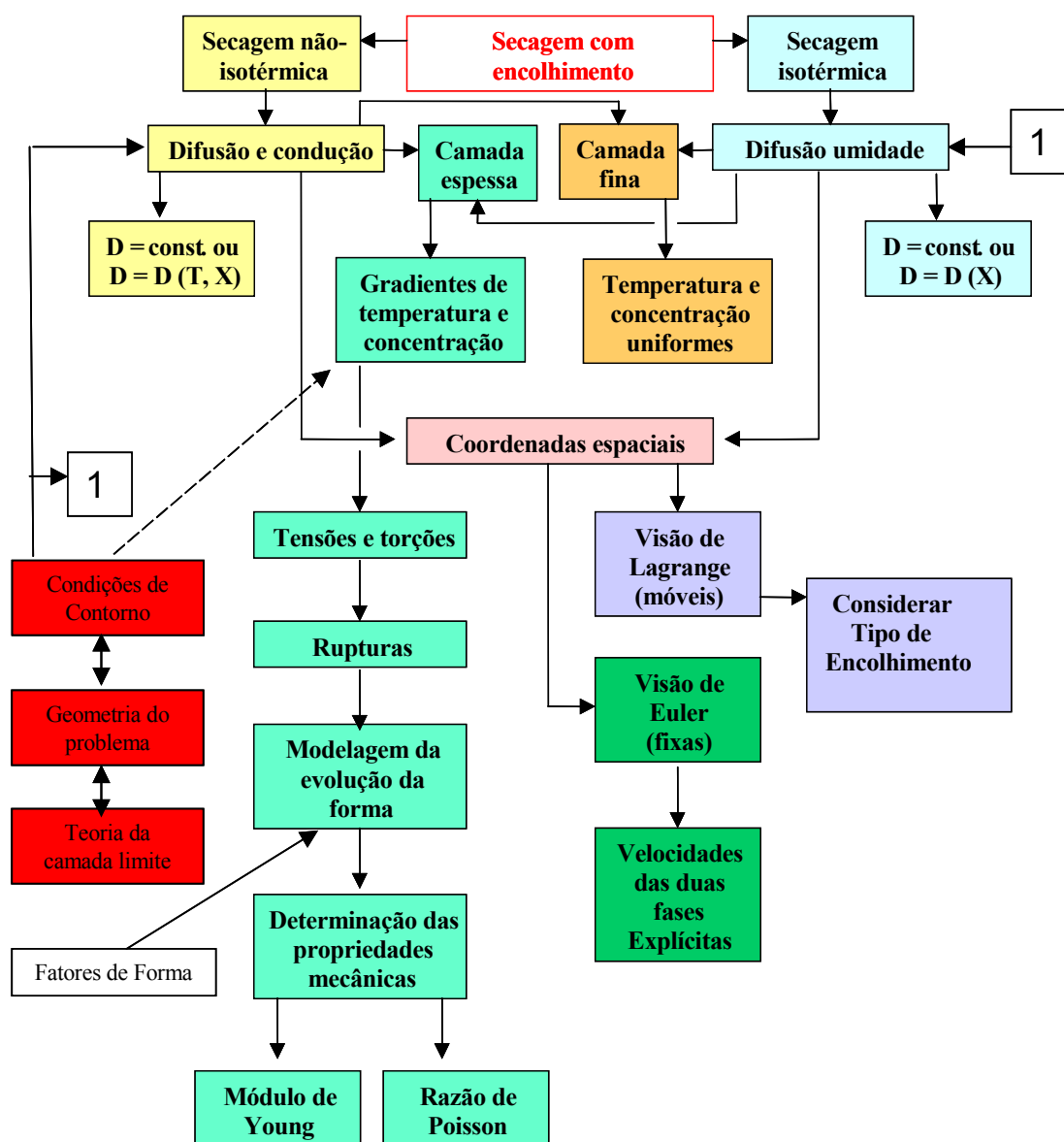


Figura 2.2: Visão geral da secagem por convecção forçada, considerando o encolhimento.

O fluxo em vermelho indica a necessidade de estabelecer condições de contorno para a resolução das equações diferenciais que descrevem as transferências de calor e massa no interior do material.

Para o processo de transferência de massa, a difusividade no interior do material pode ser considerada como constante, ou dependente da concentração de água e da temperatura, sendo, os parâmetros para a equação de dependência podendo ser obtidos experimentalmente.

Para a secagem isotérmica, seguindo-se o fluxo azul, tem-se no modelo apenas a equação para a difusão de umidade no interior do sólido e as respectivas condições de contorno, já que não há consideração da transferência de calor. Para este caso, a difusividade pode ser considerada como constante ou dependente da concentração.

Tanto o modelo para secagem isotérmica quanto o modelo para a secagem não-isotérmica podem seguir duas considerações: camada espessa e camada fina. Seguindo o fluxo verde, para a camada espessa, a modelagem considerará perfis de temperatura e umidade.

SHAH & PORTER (1973), consideram apenas perfis de concentração no interior do material, sendo que a equação da energia é escrita assumindo-se variação de temperatura apenas no tempo, sendo uniforme com a posição (dita análise concentrada).

Tendo-se perfis de concentração no interior do material, surgem tensões e torções no material, durante a secagem, o que causa deteriorações na qualidade como rupturas.

Para este caso, uma representação completa do processo deveria incluir uma modelagem para a previsão da forma, o que implica em determinações de propriedades mecânicas como o Módulo de Young e Razão de Poisson.

Seguindo-se o fluxo em laranja, a consideração de camada fina acarretará em temperatura e concentração variando uniformemente, eliminando-se o problema mecânico da modelagem.

Os modelos de secagem podem seguir dois tipos de coordenadas espaciais como descrito por KETELAARS et al. (1994), segundo as visões de Lagrange e Euler.

Seguindo-se o fluxo em roxo, a visão de Lagrange parece ser a mais natural para se descrever problemas com vizinhanças móveis, porém, é necessária uma consideração sobre o tipo de encolhimento, para derivar uma equação de transporte.

O encolhimento para muitos materiais como alimentos e géis é considerado como uma função linear da concentração de água, até a transição vítrea, onde ocorre a extinção do fenômeno do encolhimento.

De forma oposta, quando expressando as derivadas totais na visão de Euler (fluxo verde escuro), as velocidades locais das duas fases aparecem explicitamente, e não é preciso qualquer consideração em relação ao tipo de encolhimento (KETELAARS et al., 1994).

2.5 EXEMPLOS DE MODELOS PARA A SECAGEM CONVECTIVA CONSIDERANDO ENCOLHIMENTO

Neste item, será feita uma descrição dos modelos de secagem convectiva considerando o encolhimento do sólido. São introduzidos segundo os autores, geometrias estudadas e o estabelecimento dos fenômenos envolvidos nos processos.

É dada ênfase às considerações realizadas para o estabelecimento das equações que representam os fenômenos de transferência de massa e energia, tipo de encolhimento, difusividade, coordenadas utilizadas e principais conclusões sobre a validade dos mesmos.

2.5.1 Modelo de SHAH & PORTER (1973), para filme com transferência de massa e calor unidimensionais

Um dos trabalhos pioneiros nesta linha de pesquisa é o de SHAH & PORTER (1973), onde foi desenvolvido um modelo teórico detalhado para a secagem de uma estrutura gel (lipogel) na forma de um filme, conforme mostrado na Figura (2.3).

Neste trabalho os autores afirmam que, embora o modelo tenha sido derivado para uma estrutura na forma de lâmina infinita, um modelo muito similar pode ser obtido facilmente para outras geometrias, como para um cilindro infinito ou esfera.

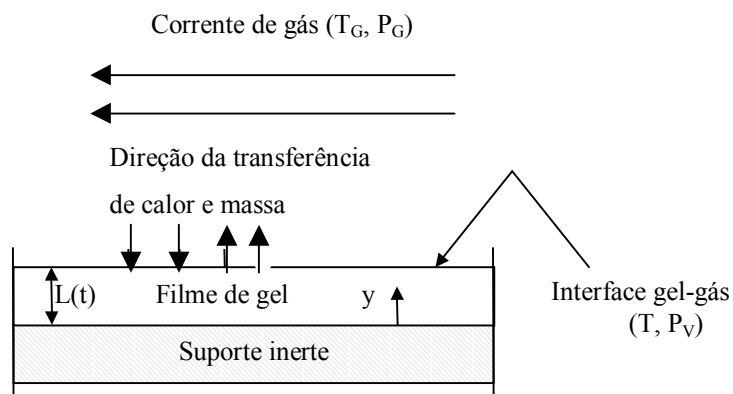


Figura 2.3: Esquema para um processo de secagem de gel (SHAH & PORTER, 1973).

O modelo é desenvolvido assumindo que à medida que o solvente é removido de qualquer porção da estrutura gel, a qual é permeável ao solvente, a estrutura encolhe localmente, para preencher os espaços deixados pelo solvente.

Todavia, qualquer gradiente de concentração de solvente no gel criará diferenças no encolhimento local, o que resulta na mudança das propriedades físicas do gel e o aparecimento de tensões dentro da estrutura.

No caso destas tensões excederem à resistência do material gel, ocorrerá o surgimento de rupturas. Estes autores também assumem que o gel forma uma solução regular.

Segundo o esquema da Figura (2.3), uma lâmina muito longa nas duas direções perpendiculares à espessura, com valores iniciais conhecidos para a concentração de solvente, temperatura e espessura, é colocada subitamente em uma corrente de gás com determinada temperatura e pressão parcial de solvente.

Após algum tempo de imersão, o gel apresenta perfis transversais de temperatura e concentração governados pelas taxas de transferências de massa e calor, na superfície e dentro da estrutura.

Em adição, a espessura do gel se reduziu devido ao encolhimento do material pela perda do solvente. Assumindo base unitária para a massa do solvente livre de gel, tem-se a seguinte equação:

$$\rho(y, t) = \frac{[1 + X(y, t)]}{\left[\frac{1}{\rho_g} + \frac{X(y, t)}{\rho_s} \right]} \quad (2.4)$$

onde ρ_g e ρ_s são a massa específica do sólido seco e a massa específica do solvente, X é a umidade em base seca e ρ a massa específica da amostra.

A Equação (2.4) descreve a massa específica local da estrutura. A taxa de transferência de massa do solvente da superfície, W , é dada, pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} W &= \left[D \exp \left[\gamma_1 + \gamma_2 (T - T_0) \right] \left\{ \frac{X}{\left(\frac{1}{\rho_g} + \frac{X}{\rho_s} \right)} \right\} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{X(y, t)}{\left[\frac{1}{\rho_g} + \frac{X(y, t)}{\rho_s} \right]} \right\} \right]_{y=L} = M_S K_G (P_V - P_G) = \\ &= M_S K_G \left(\frac{K \cdot X(y, t) \cdot P_s(y, t)}{\rho_s \left[\frac{1}{\rho_g} + \frac{X(y, t)}{\rho_s} \right]} - P_G \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Os coeficientes γ_1 e γ_2 são coeficientes que levam em conta a dependência da difusividade do solvente com relação à temperatura e à concentração.

Na Equação (2.5) é assumido que o coeficiente de difusão de massa é uma função exponencial da temperatura do sólido e da concentração de umidade.

Uma outra condição assumida neste modelo é que a pressão do solvente na superfície obedece à lei de Henry, já que o gel tem atração pelo mesmo, e a pressão real deste na superfície é a pressão do componente puro menos a pressão devido a forças atrativas, entre o solvente e o gel.

A taxa interna de transferência de massa através de difusão é governada pela seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\text{De} \left(\left[\gamma_1 + \gamma_2 (T - T_0) \right] \left\{ \frac{X}{\left[\frac{1}{\rho_g} + \frac{X}{\rho_s} \right]} \right\} \right) \right] \frac{\partial}{\partial y} \left(\left[\frac{1}{\rho_g} + \frac{X}{\rho_s} \right] \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\left[\frac{1}{\rho_g} + \frac{X}{\rho_s} \right] \right) \quad (2.6)$$

Em geral, a distribuição de temperatura dentro do gel será função da distância e do tempo (y e t). Entretanto, neste trabalho, é assumido que, a qualquer tempo, a temperatura de todo o gel é uniforme com a distância (coordenada y).

Seguindo o fluxo da Figura (2.2), este trabalho seria um estudo em camada fina, em relação à transferência de calor, já que não foram considerados gradientes de temperatura; e um estudo em camada espessa em relação à transferência de umidade, pois são considerados gradientes de concentração e o aparecimento de tensões e torções na estrutura.

O balanço interno de energia na secagem do gel é dado por:

$$h_G(T_G - T) + W(\lambda + C_{SV}(T_G - T)) = \frac{d}{dt} [LC_{p\text{médio}} \rho_{\text{médio}} T] \quad (2.7)$$

onde,

$$L(t)C_{p\text{médio}} = \int_0^{L(t)} \left\{ \left(\frac{X}{1+X} \right) C_{SL} + \left(\frac{1}{1+X} \right) C_G \right\} dy \quad (2.8)$$

e

$$L(t)\rho_{\text{médio}} = \int_0^{L(t)} \rho dy \quad (2.9)$$

O encolhimento é dado por um balanço de material no gel livre de solvente:

$$L_0 = \int_0^{L(t)} \frac{\left[\frac{1}{\rho_g} + \frac{X_0}{\rho_s} \right]}{\left[\frac{1}{\rho_g} + \frac{X(y,t)}{\rho_s} \right]} dy \quad (2.10)$$

Também é assumido que não há transferência de massa através da interface entre o gel e o suporte, então:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{X}{\left[\frac{1}{\rho_g} + \frac{X}{\rho_s} \right]} \right) = 0 \quad \text{em } y=0 \quad (2.11)$$

Através da análise desta teoria, se pôde ter uma visão do processo de equacionamento físico-matemático necessário para representar um processo de secagem, considerando o fenômeno do encolhimento, em um modelo detalhado.

SHAH & PORTER (1973) fazem uma adimensionalização das equações para as transferências de umidade e calor no interior do sólido e para as condições de contorno. O conjunto de equações final é resolvido numericamente para o perfil de umidade transiente, no interior do sólido, e para a temperatura do sistema gel.

Apresentam ainda equações para as tensões no material. Com relação ao filme de comprimento e largura finita, se as bordas do filme são fixadas, a máxima tensão na borda do filme, $\sigma_{\text{máx}}$, será, segundo SHAH & PORTER (1973), dada pela Equação (2.12):

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{G}{(1-\mu)} (\xi - 1) \quad (2.12)$$

onde G, é o módulo de Young e μ a Razão de Poisson.

Se $\sigma_{\text{máx}}$ exceder a resistência do filme, este irá romper. Desde que a tensão máxima ocorre na superfície do gel, fissuras aparecerão primeiramente nesta região, se propagando então para algum plano de equilíbrio acima da parte inferior do gel.

Na situação em que o gel for de geometria cilíndrica, as tensões locais seriam ambas tangenciais e radiais, e o gel romperia se uma destas tensões excedesse a máxima suportada pelo material. (SHAH & PORTER, 1973)

SHAH & PORTER (1973) concluem neste trabalho que as taxas de secagem e encolhimento são essencialmente independentes da vazão de ar e da constante da lei de Henry, desde que, as quantidades adimensionais M e P sejam maiores que 100 e 10, respectivamente, as quais são apresentadas nas equações a seguir:

$$M = \frac{K_G \cdot L_0 \cdot M_S \cdot P_0}{D \cdot C_0} \quad (2.13)$$

$$P = \frac{K \cdot C_0}{\rho_g} \quad (2.14)$$

nestas equações, P_0 é a pressão de vapor do solvente puro na temperatura inicial na superfície do gel.

Exceto em extremas condições de temperatura, as taxas de secagem e encolhimento são em maior parte influenciadas pelos adimensionais M, P e \underline{P} , sendo este último definido pela Equação (2.15):

$$P = \frac{P_G}{P_0} \quad (2.15)$$

Com relação ao efeito da dependência do coeficiente de difusão de massa com a concentração e temperatura, sobre o tempo requerido para nivelamento da taxas de secagem e encolhimento, pode-se manipulá-lo definindo-se uma variável adimensional de tempo, em termos de coeficiente de difusão médio.

SHAH & PORTER (1973) encontraram também concordância entre o modelo teórico e os dados experimentais da secagem isotérmica do filme de lipogel, sobre condições de convecção natural. Sobre condições de convecção forçada, os dados experimentais mostraram um aumento nas taxas de secagem e encolhimento, como no modelo, porém os filmes rompiam nos primeiros estágios da secagem, tornando estas conclusões com significância apenas qualitativa.

2.5.2 Modelo de RÄDERER et al. (2000), para filme com transferência de massa e calor unidimensionais

RÄDERER et al. (2000) desenvolveram um modelo matemático baseando-se nas transferências de massa e calor, interna e externa, com encolhimento ideal (linear com a concentração). Um sistema de coordenadas anexadas ao sólido foi usado e depois transformado para a altura inicial tendo em vista facilitar a solução numérica das equações.

O coeficiente de difusão do produto foi expresso como uma função do conteúdo de umidade e da temperatura ajustando o modelo a dados experimentais de cinética de secagem, para diferentes condições operacionais,

utilizando-se maltodextrina e PVP. A equação final, para a transferência de massa, com a umidade expressa em base seca é igual a:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[D_{\xi} \frac{\partial X}{\partial \xi} \right] \quad (2.16)$$

Esta equação tem a mesma forma da Segunda Lei de Fick para um sistema sem encolhimento, embora, este, esteja sendo levado em conta no coeficiente de difusão modificado:

$$D_{\xi} = D \left(\frac{\rho_2}{\rho_2^0} \right) = D \left(\frac{d\xi}{dy} \right) \quad (2.17)$$

A taxa de deformação é dada pela equação que representa o encolhimento linear e o coeficiente de difusão D , representado pelas equações que relacionam a dependência com a umidade e com a temperatura.

Recentemente, RÄDERER et al. (2000) relatam que os valores obtidos para o comportamento da difusão em maltodextrina e PVP mostraram boa concordância com a literatura.

No caso de maltodextrina, ágar teve que ser adicionado para evitar convecção interna. Entretanto, a adição de ágar foi desnecessária nas soluções de PVP, devido à sua alta viscosidade, quando comparada às soluções de maltodextrina.

2.5.3 Modelo de ROQUES et al. (1994), para geometria esférica com transferência de massa e calor combinados unidimensionais

ROQUES et al. (1994) apresentam um modelo integrando problemas de encolhimento com fonte interna de calor, através de radiação de microondas, para uma geometria esférica do gel de poliacrilamida (P.A.G.)

P.A.G. é considerado como uma fase única com dois componentes: água (1) e polímero (2). Levou-se em conta o encolhimento por meio de coordenadas do sólido (visão de Lagrange) para todas as equações de transferência.

A equação de transferência de massa é escrita a partir da equação da continuidade, para ambos os componentes, da forma:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_1 \cdot \vec{u}_1) = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_2 \cdot \vec{u}_2) = 0 \quad (2.19.a)$$

A única variável experimentalmente acessível é o conteúdo médio de umidade, \bar{X} ; conseqüentemente, é necessário ter o conteúdo de umidade local X , em todas as equações. Repondo ρ_2 por ρ_1/X na Equação (2.19.a), tem-se:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho_1 \cdot \vec{u}_2) = \rho_2 \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right)_{\xi_{\text{const.}}} \quad (2.19.b)$$

A derivada em relação ao tempo em ξ constante, refere-se ao sistema de coordenadas de Lagrange anexado à matriz do sólido. Incluindo a lei de Fick, a conservação de massa torna-se:

$$\rho_2 \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right)_{\xi} = \vec{\nabla} \cdot \left[\left(\frac{\rho D_{12}}{(1+X)} \right) \vec{\nabla} \cdot X \right] \quad (2.20)$$

Mudando o sistema de coordenadas, é necessário saber a taxa de deformação $\left(\frac{\rho_2}{\rho_2^0} \right)^2$. Para o caso de deformação ideal onde o encolhimento é

linear em função do conteúdo de umidade, esta taxa é expressa por:

$$\frac{\rho_2}{\rho_2^0} = 1 + \frac{\rho_2^0}{\rho_1^0} X = (1 + \varepsilon X) \quad (2.21)$$

finalmente, a conservação de massa, com a difusão fickiana em uma esfera, torna-se:

$$\left(\frac{\partial X}{\partial t} \right)_{\xi} = \frac{1}{\xi^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[D(X, T) \xi^2 \left(\frac{\partial X}{\partial \xi} \right)_t \right] \right\}_t \quad \text{com } D(X, T) = \frac{D_{12}(X, T)}{(1 + \varepsilon X)^2} \left(\frac{z}{\xi} \right)^4 \quad (2.22)$$

O balanço de energia inclui a potência de microondas efetivamente dissipada, P_S :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho h}) + \vec{\nabla} \cdot (\overline{\rho u h}) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda_{ef} \cdot \vec{\nabla} \cdot T) + P_V \quad (2.23)$$

transformando a Equação (2.23) na coordenada sólida tem-se:

$$\begin{aligned} & \rho_2^0 \left[X C_{p1} + C_{p2} \right] \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_\xi - \rho_2^0 C_{p1} \frac{D_{12(X,T)}}{(1 + \varepsilon X)} \left(\frac{z}{\xi} \right)^2 \left(\frac{\partial X}{\partial \xi} \right)_t \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right)_t \\ & \frac{1}{\xi^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{k_{ef}}{(1 + \varepsilon X)} \left(\frac{z}{\xi} \right)^4 \xi^2 \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right)_t \right] \right\} + (1 + \varepsilon X) P_V \end{aligned} \quad (2.24)$$

Nas condições iniciais e de contorno, tem-se, inicialmente, o conteúdo de umidade uniforme:

$$t = 0 \text{ e } 0 \leq \xi \leq R_S, X = X_0 \quad (2.25.a)$$

Todos os gradientes são nulos no centro geométrico (condição de simetria):

$$t > 0 \text{ e } \xi = 0, \left(\frac{\partial X}{\partial \xi} \right)_{\xi=0} = 0 \quad (2.25.b)$$

Na superfície, $\xi = R_S$, a densidade de fluxo de massa é dada pela lei de Fick e o fluxo de calor pela lei de Fourier, ou seja:

$$R = -\frac{\rho_2^0 D(X, T) \left(\frac{\partial X}{\partial \xi} \right)_{\xi=R_s}}{\left(\frac{z}{\xi} \right)^2} \quad (2.26)$$

$$h(T_{ar} - T_{superf.}) - \Delta h_v R = -\frac{k_{ef.}}{(1 + \epsilon X)^2} \left(\frac{r}{\xi} \right)^2 \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right)_{\xi=R_s} \quad (2.27)$$

ROQUES et al. (1994) concluíram que este modelo para a transferência de massa e calor, incluindo o encolhimento, é suficiente para representar todos os fenômenos físicos envolvidos em secagem combinando as transferências de calor por convecção e radiação.

Torna possível o entendimento do período de secagem específico às microondas com seu máximo fluxo de massa. O tempo ótimo de secagem, com qualidade, pôde ser encontrado com o controle do sistema baseada na temperatura do produto e atuando na modulação do fornecimento de radiação.

2.5.4 Modelo de HERNÁNDEZ et al. (2000), para filme e paralelepípedo com transferência de massa unidimensional e bidimensional isotérmica

HERNÁNDEZ et al. (2000) desenvolveram um estudo para mostrar e validar uma solução analítica de uma equação de transferência de massa na qual o encolhimento foi levado em consideração. Estes autores mostraram que o transporte de água por difusão, para um plano infinito, onde, z representa uma posição no interior do plano e L a espessura, com a origem $z = 0$, é dado por:

$$\frac{\partial X}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ef.} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \text{ para } 0 \leq z \leq L \quad (2.28)$$

com as condições de contorno iguais a,

$$-D_{ef} \rho_s \frac{\partial X_i}{\partial z} = K_c \rho_a [y_i - y] \text{ em } z = L \quad (2.29.a)$$

$$\frac{\partial X}{\partial z} = 0 \text{ em } z = 0 \quad (2.29.b)$$

O ponto $z = L$ representa a superfície de contato entre a amostra e $Z = 0$ pode ser o fundo em contato com suporte inerte, se a amostra é seca de um só lado, ou o centro da lâmina, se for seca por dois lados.

HERNÁNDEZ et al. (2000), seguem CRANCK (1975), reescrevendo as Equações (2.28) a (2.29.b) em termos dos seguintes grupos adimensionais:

$$\tau = \frac{D_{ef.}}{L^2} \quad (2.30.a)$$

$$\xi = \frac{z}{L} \quad (2.30.b)$$

$$Bi_m = \frac{K_c \rho_a L K_{eq}}{\rho_s D_{ef.}} \quad (2.30.c)$$

$$\Psi = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (2.30.d)$$

A definição do número de Biot de massa (Bi_m) foi obtida assumindo-se a dependência linear entre a umidade do material a umidade do ar, no equilíbrio:

$$Y_i = K_{eq} X_i \quad (2.31)$$

Sendo que, K_{eq} , representa uma constante de partição média. Pode ter seu valor determinado, segundo CÓRDOVA-QUIROZ et al., citado por HERNÁNDEZ et al. (2000), com a Equação (2.32):

$$K_{eq} = \frac{\int_{X_0}^{X_e} \left(\frac{Y_i}{X} \right) dX}{X_0 - X_e} \quad (2.32)$$

onde,

$$Y_i = \frac{[p_{wv} P] a_w 18}{1 - [p_{wv} P] a_w 28} \quad (2.33)$$

Reescrevendo as Equações (2.28) a (2.29.b), em termos dos grupos adimensionais, Equações (2.30.a) a (2.30.d), tem-se:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi^2}, \text{ para } 0 \leq \xi \leq 1 \quad (2.34.a)$$

$$-\frac{\partial \Psi}{\partial \xi} = \text{Bi}_m \Psi, \text{ em } \xi = 1 \quad (2.34.b)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \xi} = 0 \text{ em } \xi = 0 \quad (2.34.c)$$

Entretanto, se o produto encolhe durante a secagem, L é variável e as Equações (2.28) e (2.29) não podem ser reescritas diretamente nas Equações (2.34). Além do mais, as Equações (2.28) e (2.29) representam um problema com vizinhanças móveis, sem uma solução analítica reportada.

Uma possibilidade de reduzir as Equações (2.28) a (2.29.b) para as Equações (2.34), quando o encolhimento está presente, pode ser deduzida da diferenciação total dos grupos adimensionais das Equações (2.30):

$$dt = \frac{L^2}{\text{Def.}} d\tau + \frac{2L\tau}{\text{Def.}} dL, \quad (2.35.a)$$

$$dz = Ld\xi + \xi dL \quad (2.35.b)$$

HERNÁNDEZ et al. (2000) afirmam que a única maneira de fazer a redução é assumindo-se:

$$2L\tau dL \ll L^2 d\tau, \quad (2.36.a)$$

$$\xi dL \ll Ld\xi. \quad (2.36.b)$$

A implicação matemática destas inequações foram desenvolvidas por HERNÁNDEZ et al. (2000), os quais ainda afirmam que quando Bi_m é maior que 30, onde ocorre a predominância da resistência à difusão de massa no sólido, em relação à resistência à convecção de massa para o ar de secagem, a condição de contorno que envolve Bi_m pode ser escrita como:

$$\psi = 0 \text{ em } \xi = 1 \quad (2.36.c)$$

CRANCK (1975), desenvolveu uma solução analítica para o problema do valor de contorno definido pela Equação (2.34.b), com a condição de contorno da Equação (2.36.c). A solução para a umidade média no alimento é dada por:

$$(\psi) = \frac{(X) - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right]. \quad (2.37)$$

onde é requerida uma função que represente a mudança na espessura da amostra. HERNÁNDEZ et al. (2000) reportam que o encolhimento durante o processo segue uma função da umidade. Alguns autores, segundo HERNÁNDEZ et al. (2000), usaram funções lineares para relacionar o encolhimento com o conteúdo de umidade.

HERNÁNDEZ et al. (2000) propõem em seu trabalho a seguinte equação para o encolhimento:

$$\frac{L}{L_0} = \Delta L_f + (1 - \Delta L_f) \frac{X}{X_0} \quad (2.38)$$

A Equação (2.38) indica que, $L = L_0$, quando $X = X_0$, e, $L = (\Delta L_f).L_0$, quando $X = 0$. O termo ΔL_f representa a fração do comprimento característico (espessura) no final da secagem. Como na Equação (2.38), X é assintótico a X_e , o valor de $X = 0$ nunca é atingido, e a Equação (2.38) é consistente em todo o período de secagem.

Entretanto, o encolhimento dos alimentos, durante a secagem, é um fenômeno complexo, existindo a possibilidade de ser maior, quando a espessura do produto aumenta. Como o objetivo do trabalho de HERNÁNDEZ et al. (2000) é representar matematicamente este fenômeno, de um modo mais simples e fisicamente consistente, propuseram a seguinte equação para expressar a variação da fração final (ΔL_f):

$$(\Delta L_f) = e^{-\eta L_0} \quad (2.39)$$

onde,

η é parâmetro empírico, $[L^{-1}]$.

A solução para um paralelepípedo é obtida pela aplicação do princípio da superposição (GEANKOPLIS, 1978; HERNÁNDEZ et al., 2000).

Para as Equações (2.34) e (2.37), em um problema de duas dimensões retangulares, é dada por:

$$(\psi) = \frac{8^2}{\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2 (2m-1)^2} \exp\left\{-\left[(2n-1)^2 + (2m-1)^2\right] \frac{\pi^2 D_{ef} \cdot t}{4L^2}\right\} \quad (2.40)$$

As Equações (2.37) e (2.40), em conjunto com as Equações (2.38) e (2.39), são expressões algébricas obtidas da teoria de transferência de massa, que podem descrever as curvas de secagem de alimentos (ou outro material), levando em consideração o encolhimento.

Estas equações são implícitas em X , e aproximações sucessivas são necessárias para solucioná-las. No entanto, o levantamento do valor de uma equação algébrica por aproximações sucessivas é mais simples do que a solução numérica de uma equação parcial diferencial, por elementos finitos ou diferenças finitas.

As séries nas Equações (2.37) e (2.40) convergem no primeiro termo, quando $\Psi < 0,7$ (HERNÁNDEZ et al., 2000). Em tal situação é possível obter a derivada destas equações que são iguais a:

$$-\frac{d\psi}{dt} = \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2} \cdot \psi. \quad (2.41)$$

a Equação (2.41), em conjunção com as Equações (2.38) e (2.39), não é uma expressão algébrica implícita e descreve as taxas de secagem como uma função do

conteúdo de umidade, levando em consideração o encolhimento. Estas expressões são necessárias para o projeto ou simulação de operações de secagem (HERNÁNDEZ et al. 2000).

A principal conclusão relatada por HERNÁNDEZ et al. (2000) foi que o modelo é eficiente na simulação da secagem de alimentos, em umidades acima de 5% em relação à umidade de equilíbrio, onde o coeficiente de difusão de massa varia pouco com relação à concentração de umidade no sólido.

Para umidades inferiores a este valor, onde geralmente se encontra a fase de transição vítrea de muitos alimentos, seria necessário um modelo que considerasse a variação da difusividade de massa em função da concentração de umidade.

Segundo os autores, a única maneira de representar todo o processo de secagem, incluindo a fase vítrea, seria obter uma equação para a dependência da difusividade de massa com a concentração, que pudesse prever grandes variações em teores de umidade abaixo de 5%, e pequenas variações em concentrações acima deste valor.

2.6 CONCLUSÃO GERAL SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Mesmo com os progressos recentes nos estudos sobre a secagem convectiva (mecanismos e modelos), nota-se uma escassez de informações, principalmente, sobre a secagem considerando o efeito da natureza do escoamento na camada limite entre o sólido e o fluido e o seu efeito nos coeficientes de transferência de calor e massa.

Alguns trabalhos foram encontrados na literatura, os quais estudam soluções analíticas para as transferências de calor e de massa ao redor de esferas e cilindros rígidos, como os de KENDOUSH (1995) e HAN et al. (1996), mas nenhum ligado especificamente aos processos de secagem.

A literatura fornece muitos modelos para a representação do processo de secagem de materiais orgânicos. No entanto, cabe ainda estabelecer uma linha de pesquisa que se preocupe com a variação da taxa de secagem ao longo da superfície dos materiais submetidos ao processo de secagem e que sofrem acentuado encolhimento, já que a variação local dos coeficientes de transferência de massa na superfície terá grande influência no encolhimento e evolução da forma das amostras.

No estágio atual do desenvolvimento de representações matemáticas fundamentais, não são levados em consideração os fenômenos de interação entre o fluido e a partícula, e a suas influências na secagem de materiais sólidos, com altos teores de umidade, e nas degradações da estrutura física do material, que ocorrem devido a estes fenômenos.

Entende-se que há necessidade de novos trabalhos com esta visão dos processos de secagem, que sem dúvida irão contribuir para o avanço científico desta importante operação unitária em engenharia.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo são apresentados os materiais, as metodologias de preparação e construção das amostras de géis, a unidade experimental de secagem convectiva, bem como, as metodologias para as determinações das variáveis de processo, propriedades do material sólido, propriedades físicas do fluido, parâmetros de transporte, adimensionais e os testes de secagem. Também, são apresentados os modelos da literatura e os métodos de tratamento dos dados.

3.1 MATERIAIS

Componentes como ágar, amido, celulose (serragem), glicose, colágeno e azul de metileno foram testados para elaborar o sistema gel mais apropriado para o estudo. As composições utilizadas nos testes foram baseadas em trabalhos como os de SHAH & PORTER (1973), SCHRADER & LITCHFIELD (1992), GOGUS & LAMB (1998), MOREIRA (2000) e CASTILHO & SARTORI (2002).

O ágar, utilizado para dar consistência e permitir a retração estrutural da amostra, apresenta diferenças 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 (MOURADI-GIVERNAUD *et al.*, 1992, BIRD & HINSON, 1992 e BIRD *et al.*, 1981).

Com a finalidade de padronizar a concentração de ágar e compreender melhor a secagem do gel, 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 (OXOID) e mesmo lote.

O amido de milho foi utilizado com o intuito de intensificar a retração estrutural da amostra de gel junto com o ágar, sendo solúvel em água fria. Com a finalidade de reduzir ao máximo a variabilidade referente à espécie de milho e ao local de origem, este foi adquirido na forma de pó branco, de um único fornecedor (MAIZENA) e mesmo lote.

A celulose foi adquirida em serraria, de forma a garantir sua origem de uma única espécie de madeira, no caso eucalipto. Foi utilizada na forma de pó fino. É marrom, com leve odor característico e insolúvel em água, mantendo, portanto, sua estrutura original. Foi utilizada por ser componente de muitos materiais orgânicos que sofrem encolhimento durante a secagem

Azul de metileno (P.A. SYNTH) foi usado como corante para se obter o contraste necessário na análise subsequente de imagens.

3.2 CONSTRUÇÃO DAS AMOSTRAS DE GÉIS

A construção das amostras de géis consistiu basicamente de três etapas: preparo da mistura, moldagem e geleificação das amostras e avaliação da construção das amostras em geometria esférica.

3.2.1 Preparo das misturas

As concentrações estudadas foram avaliadas numa faixa de 1 a 3% para o agar, 1 a 7% para o amido, 1 a 9% para a celulose e água destilada suficiente para completar 100%, sendo que, as faixas de valores de concentrações testadas, foram baseadas em resultados disponíveis em GOGUS & LAMB (1998),

MOREIRA (2000) e CASTILHO & SARTORI (2002), sendo escolhido o ágar como único componente.

Dentre os diversos métodos de preparo, optou-se pelo método apresentado no FOOD CHEMICAL CODEX (1980), devido à simplicidade do aparato experimental necessário e ao menor tempo exigido para o preparo, em relação aos demais métodos.

A solução foi preparada hidratando-se os constituintes da mistura com água fria ($T \cong 25^{\circ}\text{C}$), solubilizando-os em ebulição por 10 minutos com agitação contínua, visando à homogeneização da mistura, sendo sua concentração ajustada por peso, adicionando-se água quente no final do processo. O líquido obtido solidifica entre 32 e 39 °C, formando um gel firme e resistente que não se liquefaz abaixo de 85 °C.

3.2.2 Moldagem e geleificação das amostras

A solução obtida era, então, colocada ainda quente em moldes para placebos, que são constituídos de duas peças simétricas desprovidas de partes móveis; conforme esquema da Figura (3.1.i), com dimensões $1.61 \cdot 10^{-2}$ e $2.66 \cdot 10^{-2}$ m de diâmetro e com circularidade inicial $\phi = 1$.

Também foram testados moldes com extratores, desenvolvidos em outras pesquisas no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar (CASTILHO & SARTORI, 2002), sendo os esquemas mostrados na Figura (3.1.ii).

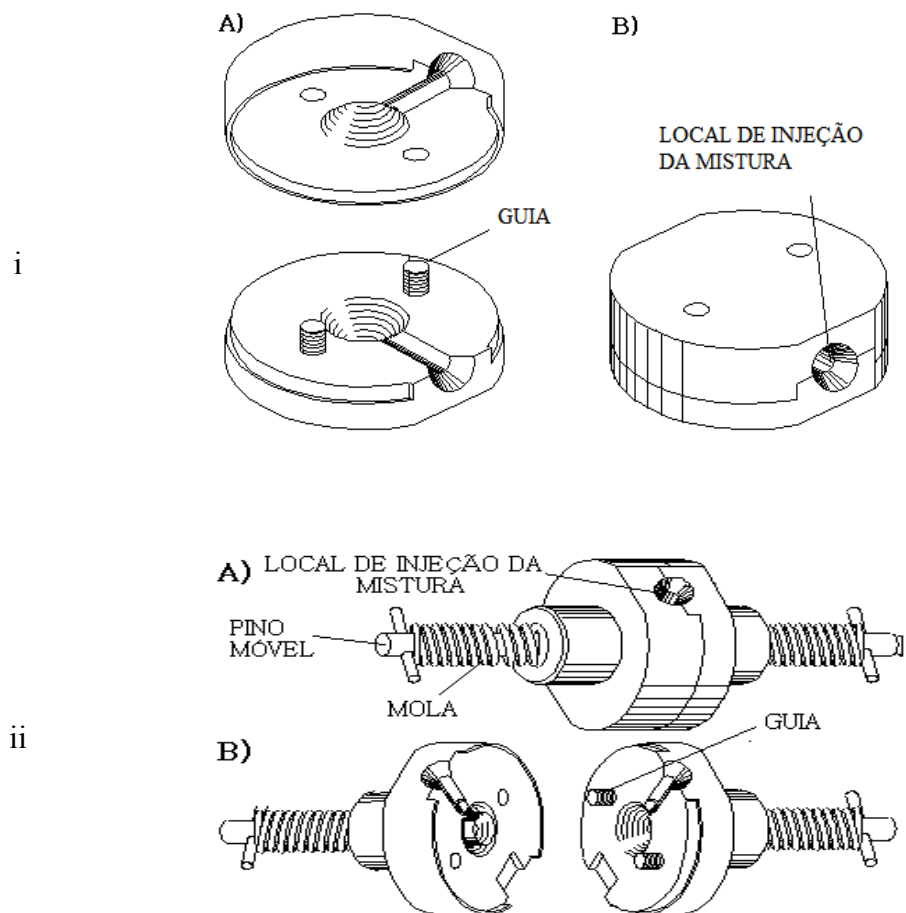


Figura 3.1. (i) Esquema do molde para esfera sem extrator: (A) posição de retirada da amostra, (B) posição de moldagem. (ii) Esquema do molde para esfera com extratores, (A) posição de moldagem, (B) posição de saque.

Além disso, foi preso um fio de algodão com 1.10^{-3} m de espessura, no centro geométrico do molde, de forma que, após a geleificação, a amostra ficasse presa ao fio para ser suspensa posteriormente no compartimento de secagem.

A mistura foi resfriada por aproximadamente 15 horas até a temperatura ambiente para obter a consistência de gel. Depois de retiradas dos

moldes, foram pré-aquecidas a 50 °C, para garantir o processo inicialmente isotérmico (temperatura do ar de secagem), pesadas para posterior determinação da umidade inicial das amostras e, em seguida, foram suspensas isoladamente no sistema de sustentação e pesagem da unidade de secagem.

3.2.3 Avaliação da construção de amostras em geometria esférica

A seleção de um sistema gel simulador, segundo VAN ARSDEL (1973), baseia-se na minimização de fenômenos diferentes daqueles sob investigação.

Neste trabalho, a principal preocupação foi selecionar a composição para um sistema gel, que desenvolvesse encolhimento e evolução da forma, conforme a bi-dimensionalidade do transporte de umidade, ocasionada pelos diferentes coeficientes de transferência de massa por convecção nas regiões anterior e posterior da esfera.

Este comportamento corresponde a materiais com alto conteúdo de umidade inicial (em torno de 95 % b. u.) e, neste sentido, foi selecionado o sistema gel que apresentasse mudança nos fatores de forma estudados durante o processo.

Também se considerou a composição que permitisse a moldagem e extração das amostras em geometria esférica, sem a formação de rupturas anteriores ao processo de secagem e a reprodutibilidade destes critérios.

3.3 UNIDADE EXPERIMENTAL DE SECAGEM CONVECTIVA

O equipamento utilizado para os testes de secagem consiste basicamente de um secador de convecção forçada e um suporte de sustentação da amostra, conforme descritos a seguir.

3.3.1 Secador de convecção forçada com reciclo de ar

Os testes de secagem foram realizados em um secador de convecção forçada com reciclo de ar, construído e instalado por CASSANDRE et al. (2001) no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, de acordo com o esboço mostrado na Figura (3.2).

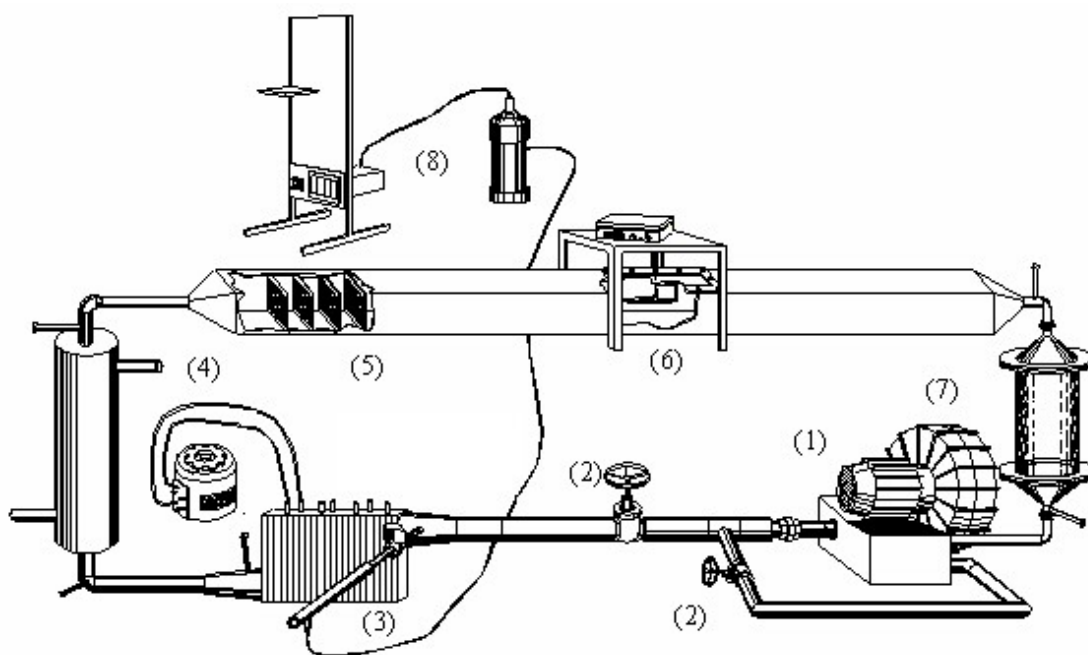


Figura 3.2: Esquema da unidade de secagem utilizada para a condução dos experimentos (CASSANDRE et al., 2001).

A unidade é constituída por um soprador do tipo compressor radial (IBRAM) (1), duas válvulas (2), aquecedor elétrico conectado a um regulador de voltagem (3), trocador de calor de duplo tubo (4), compartimento de secagem (5), sistema de suspensão e pesagem da amostra (6), secador de ar (7) e um circuito para medidas de temperaturas de bulbo úmido e seco (8).

Na unidade experimental da Figura (3.2), o ar de secagem é impulsionado por meio de um soprador do tipo compressor radial (1), que impulsiona o ar para o sistema, passando por duas válvulas do tipo gaveta, sendo uma encarregada de regular a vazão do ar de secagem que escoar para o aquecedor de ar (3), e a outra em relação ao ar que retorna através de um reciclo para o soprador.

Com a finalidade de determinar a umidade do ar de secagem através da medição de temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco, foram instalados na entrada do aquecedor elétrico (3) dois termopares de cobre-constantan (AWG-24), ligados a um sistema de medida constituído por um milivoltímetro, ponto frio e chave seletora digital (8).

O trocador de calor (3) é composto por cinco resistências elétricas, sendo a potência de 750 watts em cada uma. No aquecedor elétrico projetado e construído, está conectado um variador de voltagem, que permite manter a temperatura do ar no valor desejado na câmara de secagem.

Em seguida, caso haja necessidade de resfriamento do ar de secagem, está instalado um resfriador (4) ou trocador de calor duplo tubo, sendo o diâmetro do tubo externo e interno, respectivamente de $7,62 \cdot 10^{-2}$ e $5,08 \cdot 10^{-2}$ m. O

referido trocador pode operar em escoamentos concorrentes ou contracorrentes, utilizando água na região coaxial.

Após escoar pelo compartimento de secagem da amostra (5), o ar entra em um desumidificador de ar (7), que consiste de um leito fixo de sílica gel, cujo compartimento foi construído com um cilindro de PVC, de 0,50 m de comprimento e diâmetro interno de 15,24 cm, tendo a finalidade de manter a umidade relativa do ar de secagem aproximadamente constante. Em seguida o ar retorna ao soprador e o “ciclo” se inicia novamente.

Para as medidas de massa de água evaporada e dimensões iniciais da amostra, foram utilizados uma balança analítica digital, da marca GEHAKA, modelo BG 440 de precisão de 10^{-6} kg e um paquímetro (OMET INOX), respectivamente. Uma máquina fotográfica digital (CASIO®) e um sistema de iluminação integrado por duas lâmpadas reguláveis foram utilizados para a tomada de imagens.

Para as medidas de velocidade e temperatura no interior da câmara de secagem, foi utilizado um termoanemômetro de fio quente digital, marca ALNOR, modelo 8525, com precisão de 0,1 m/s para a velocidade e de 1°C para a temperatura.

3.3.2 Câmara de secagem

No túnel de secagem (5), na Figura (3.2), constituído de chapa de ferro galvanizada de $0,3 \cdot 10^{-2}$ m de espessura, com 2,50 m de comprimento e secção retangular de 0,15 m de largura e 0,10 m de altura, ocorre a secagem da amostra, que é colocada em um suporte móvel, segundo o método intermitente de

aquisição de dados, e fixada a um fio conectado à balança eletrônica, para o método contínuo.

Para a distribuição e homogeneização final do escoamento do ar foi utilizado um rotor e um conjunto de telas defletoras na região de entrada do ar no compartimento de secagem da amostra (5). O rotor causa uma turbulência no ar, fazendo com que o fluido seja homogeneizado ao passar pelas telas.

Pequenos orifícios de $1,0 \cdot 10^{-2}$ m foram feitos na região de secagem das amostras, para serem utilizados nas medidas de temperatura e velocidade do ar, mediante o auxílio do termoanemômetro. Estes orifícios eram vedados com fita adesiva quando não utilizados, para que não houvesse vazamento do ar de secagem para o ambiente externo.

Com base nos testes dinâmicos e térmicos, realizados por CASSANDRE et al. (2001), foi verificada a uniformidade das distribuições de temperatura e velocidade do ar na região de secagem das amostras, através das diferenças entre os valores de temperatura e as diferenças entre os valores de velocidade do fluido, em relação aos seus respectivos erros prováveis de medidas, mediante o auxílio da aplicação do “Método de Quadrantes”, conforme SOGAB (1987).

A variação das medidas de temperatura e velocidade de escoamento do ar de secagem, obtidas experimentalmente por CASSANDRE et al. (2001), foram respectivamente de $0,5^{\circ}\text{C}$ e $0,05$ m/s e os erros de medidas do termoanemômetro são de 1°C para a temperatura e $0,1$ m/s para a velocidade, para o escoamento de fluido com temperaturas entre 30 e 70°C e com velocidades entre $0,5$ e $1,8$ m/s.

Como as variações experimentais destas variáveis operacionais são menores que os erros de medidas do aparelho pode-se concluir que a região onde se processou a secagem apresenta em torno de 98,7% de distribuições uniformes de velocidade e temperatura do ar, como pode ser visualizado nas distribuições típicas das Figuras (3.3) e (3.4), respectivamente, segundo CASSANDRE et al. (2001).

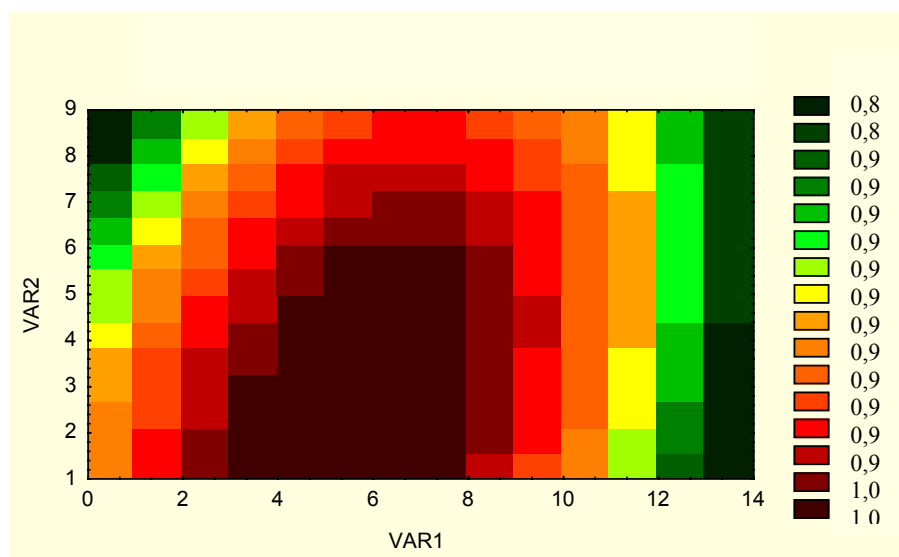


Figura 3.3: Resultado típico de velocidade do ar na região de secagem, com $V_A = 0,95 \pm 0,05$ m/s e $T_A = 34,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Var 1 = largura em cm, Var 2 = altura em cm (CASSANDRE et al., 2001).

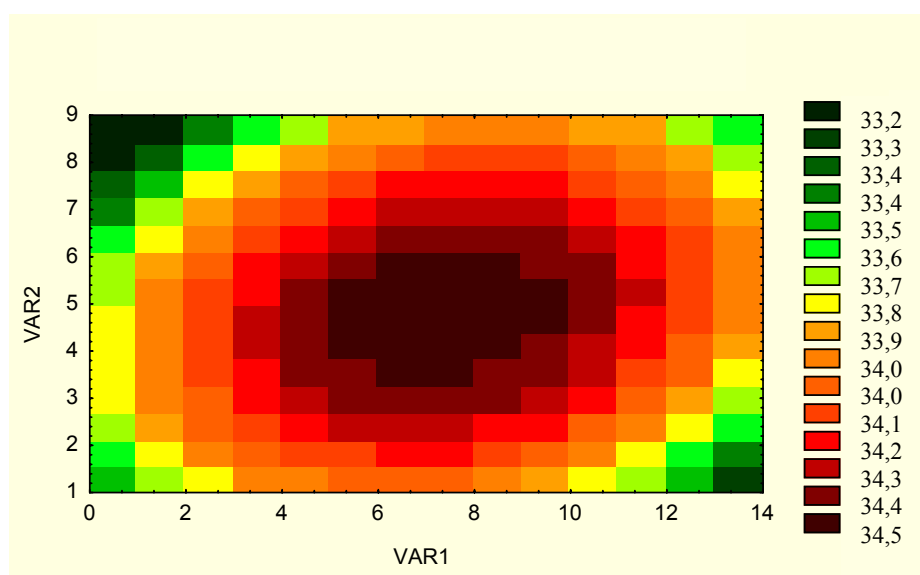


Figura 3.4: Resultado típico de temperatura do ar na região de secagem, com $T_A = 34,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ e $V_A = 0,95 \pm 0,05$ m/s. Var 1 = largura em cm, Var 2 = altura em cm (CASSANDRE et al., 2001).

3.3.3 Suporte da amostra para pesagem direta e contínua

A aquisição de dados foi realizada primeiramente com a tomada de imagens, durante o processo, por meio de uma janela lateral do compartimento de secagem, conforme o esquema da Figura (3.5), com a amostra a ser submetida ao processo suspensa no escoamento do ar de secagem por um fio de algodão, de 1×10^{-3} m de espessura, conectado à balança, para medida direta de massa. Esta forma de tomada de imagens e medida de massa foi chamada de método contínuo.

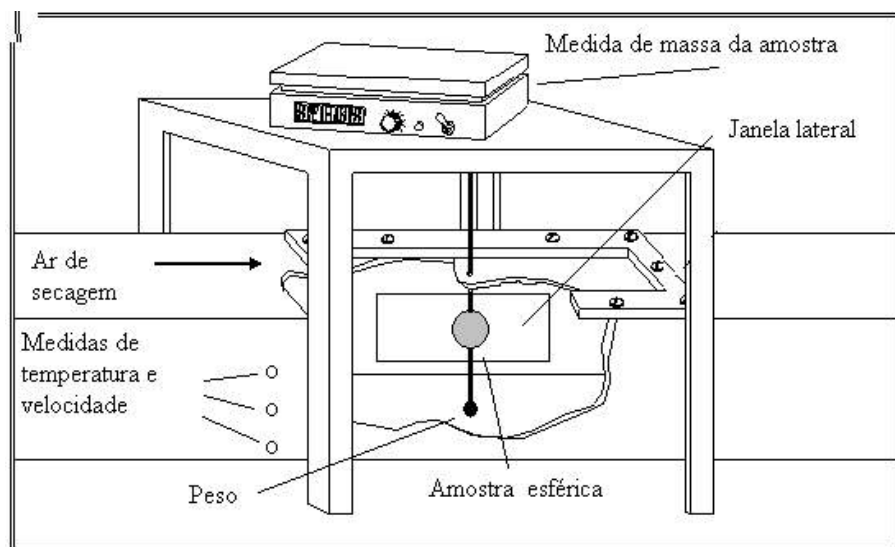


Figura 3.5: Esquema para a secagem das amostras pelo método contínuo.

Para a segunda forma de tomada de imagem e medida de massa ao longo do processo, uma plataforma acrílica quadrada foi utilizada, Figura (3.6), com uma área de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, conectada a uma haste de metal com $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ de diâmetro, sendo a amostra fixada à haste e a plataforma retirada do equipamento em intervalos de tempo pré-estabelecidos, retornando ao mesmo logo após a aquisição de dados. Este procedimento corresponde ao método intermitente.

Os dois métodos de aquisição de dados foram avaliados pela reprodutibilidade dos dados, comprovadas estatisticamente, tornando possível a decisão por um dos dois métodos para a melhor condução das experiências de secagem.

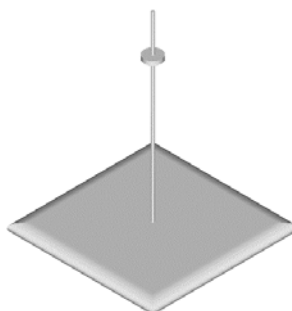


Figura 3.6: Esboço da plataforma utilizada no método intermitente de aquisição de dados

3.4 DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO

Como conjunto das variáveis gerais do processo tem-se o conteúdo de umidade, a velocidade e a temperatura da amostra, assim como, a umidade relativa, a velocidade e a temperatura do fluido de secagem e, por consequência, a densidade de fluxo de massa.

3.4.1 Determinações de umidade e medidas de velocidade e temperatura

A massa da amostra foi medida ao longo do processo, através da balança analítica, com precisão de 10^{-6} kg, para a determinação da umidade em base seca, que é obtida a partir da massa da amostra e a massa de sólido seco.

O método de LEES (1980) foi utilizado para a determinação da massa de sólido seco da amostra, após os experimentos de secagem, dado necessário para os cálculos de umidade em base seca.

A velocidade da amostra foi considerada nula com relação às paredes da câmara de secagem e a temperatura do material não foi determinada ao longo do processo de secagem, mas a amostra foi colocada no equipamento previamente aquecida à temperatura de aproximadamente 50 °C, para garantir inicialmente um processo isotérmico.

A umidade relativa do ar foi obtida via psicrometria, a partir das medidas de temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, com precisão em torno de 0,25°C para a temperatura e 4% para a umidade relativa, com posterior leitura com o auxílio do software CAT^{®1}, que contém dados do ar em uma ampla faixa de temperaturas e pressão.

Para as medidas de velocidade e temperatura do fluido, foi utilizado um termoanemômetro de fio quente digital da marca ALNOR. Estas medidas foram feitas através de orifícios feitos no compartimento de secagem, com erro de medida de 0,1 m/s e 1°C para a velocidade e temperatura, respectivamente.

3.4.2 Densidade de fluxo de massa

Os dados de cinética de secagem foram analisados através de curvas de densidade de fluxo de massa, construídas com auxílio dos programas ORIGIN^{®2} e STATISTICS^{®3}, sendo a umidade da amostra ao longo do processo expressa em base seca. A densidade de fluxo de massa é determinada conforme a equação a seguir:

^{®1} John Wiley & Sons, Inc. ^{®2} Microcal Software, Inc.. ^{®3} StatSoft, Inc.

$$R = -M_{SS} \frac{d(X_{BS})}{dt} \frac{1}{A_{ES}} \quad (3.1)$$

onde, $\frac{d(X_{BS})}{dt}$ é a taxa de secagem, X_{BS} , a umidade média em base seca, M_{SS} , a massa de sólido seco, A_{ES} , a área da esfera equivalente à área projetada e R , a densidade de fluxo de massa.

Devido às determinações de R durante o período de taxa constante de secagem oscilarem, a taxa constante de secagem média, (R_{est}), foi calculada pela média das determinações de R , correspondentes aos valores a partir da umidade inicial até a umidade crítica (X_{BSc}).

3.5 DETERMINAÇÕES DAS PROPRIEDADES DA AMOSTRA

As propriedades da amostra determinadas antes, durante e após a secagem foram o volume e a forma, a massa específica, a umidade de equilíbrio dinâmico e o teor de umidade crítica.

3.5.1 Tomada de imagens para a medida do encolhimento

O encolhimento foi registrado através de uma câmara fotográfica digital Cássio, modelo LK 10V, sendo que, para verificar as dimensões iniciais das amostras, foi utilizado um paquímetro SOMET INOX, com precisão de $5 \cdot 10^{-5}$ m.

As imagens, tomadas ao longo do processo de secagem, foram posteriormente analisadas com o auxílio do *software* IMAGE PRO PLUS^{®4}, para obtenção de dados de área projetada, perímetro projetado (comprimento da linha

que circunda o objeto), diâmetro máximo (comprimento da linha mais longa unindo dois pontos contidos no perímetro do objeto e passando pelo centróide), diâmetro mínimo (comprimento da linha mais curta unindo dois pontos contidos no perímetro do objeto e passando pelo centróide) e o diâmetro médio (comprimento médio dos diâmetros medidos a cada intervalo de 2^0 e passando pelo centróide do objeto).

3.5.2 Obtenção do perímetro, volume e área superficial da amostra a partir da análise de imagens

A área projetada da amostra (A_P), medida através da análise de imagens, com o auxílio do programa IMAGE PRO PLUS^{®4}, é igualada à área de uma circunferência para se obter o diâmetro equivalente (D_{EQ}). A partir do diâmetro equivalente, calcula-se o perímetro (P_{ES}), o volume (V_{EQ}) e a área (A_{ES}) da esfera equivalente à área projetada.

3.5.3 Determinação da forma das partículas a partir da análise de imagens

WADELL (1933) introduziu o “grau de circularidade” (ϕ), parâmetro adimensional. Ao contrário da esfericidade, que consta de uma relação entre áreas superficiais, o grau de circularidade ϕ , pode ser determinado via observação fotográfica, através da área e do perímetro projetados da amostra, conforme definido pela Equação (3.2):

$$\phi = \frac{P_{ES}}{P_P} = \pi \cdot \frac{D_{EQ}}{P_P} \quad (3.2)$$

onde, P_{ES} é o perímetro da esfera equivalente à área projetada, P_P o perímetro projetado da amostra e D_{EQ} o diâmetro da esfera equivalente à área projetada.

O perímetro e a área projetados são obtidos através da análise de imagens e a circularidade (ϕ) calculada é utilizada para avaliar a evolução da forma da amostra durante o processo.

Também foi avaliada a razão entre a diferença dos diâmetros máximo e mínimo pelo diâmetro médio, medidos através da análise de imagens. A razão D_F representa a diferença entre o encolhimento da amostra na região anterior ao escoamento e o encolhimento na região posterior, devido aos diferentes coeficientes de transferência de massa por convecção na camada limite, sendo definida pela Equação (3.3):

$$D_F = \frac{D_{MX} - D_{MN}}{D_{MD}} \quad (3.3)$$

onde, D_{MX} é o diâmetro máximo, D_{MN} , o diâmetro mínimo, e D_{MD} , o diâmetro médio.

3.5.4 Massa específica a partir da massa e volume da amostra ao longo do processo

A massa específica da amostra foi calculada a partir dos dados experimentais, conforme a equação:

$$\rho_{am} = (m_{am} / V_{EQ}) \quad (3.4)$$

onde, ρ_{am} , é a massa específica aparente da amostra e m_{am} é a massa da amostra, medida experimentalmente.

3.5.5 Determinação da umidade de equilíbrio termodinâmico via método dinâmico

A determinação do equilíbrio termodinâmico entre a amostra e o ar circundante é extremamente importante, não só pelo conhecimento do estado final do processo, como também pelo fenômeno de transferência de massa, pois indica a condição limite para a qual tende o valor do seu teor de umidade no processo de secagem.

Neste trabalho foi considerada a umidade de equilíbrio dinâmico do sistema, X_{BS_e} , devido à rapidez de sua obtenção e pela influência do escoamento de ar, em relação à determinação da umidade de equilíbrio estático.

Para tanto, foi necessário determinar a massa de sólido seco pelo método de LEES (1980). A amostra de gel foi posta numa estufa da marca FANEM, modelo 315 SE a $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$ durante um período de 4 h ($1,44 \cdot 10^4\text{s}$).

Depois de pesada retornou à estufa por mais 30 min ($1,8 \cdot 10^3\text{s}$), sendo pesada novamente. Continuou-se a operação de 30 min em 30 min ($1,8 \cdot 10^3\text{s}$) na estufa, até se obter massa constante (precisão de 10^{-3} g).

3.5.6 Determinação do teor de umidade média crítica

Foram feitas análises de regressão linear pelos gráficos de X_{BS} em função do tempo de secagem, sendo que, no método utilizado, os últimos pontos, correspondentes ao período de taxa decrescente, são desprezados a cada regressão linear, até obter-se um coeficiente de correlação (r) igual a, no mínimo, 0,99.

O teor de umidade crítica (X_{BSc}) corresponde ao último valor de umidade no qual se obteve o coeficiente de correlação igual a, no mínimo, 0,99, como descrito em PRADO (1999). Nos gráficos de densidade de fluxo de massa em função da umidade média em base seca, o teor de umidade crítica, X_{BSc} , corresponde ao valor de umidade no final do período de taxa constante.

Este dado foi utilizado para posterior avaliação da influência dos períodos de secagem na evolução da forma e na degradação física das amostras. Isto permite verificar em quais condições de transferência de massa - com resistência predominante difusiva ou convectiva - e a partir de qual teor de umidade, em relação à umidade de armazenamento, ocorrem as degradações.

3.6 DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE DE MASSA EFETIVA E DO NÚMERO DE BIOT DE MASSA

Segue a descrição dos métodos utilizados para a determinação da difusividade de massa efetiva e do número de Biot de massa, essenciais para a análise do efeito da predominância do transporte convectivo ou difusivo, e a sua relação com a degradação da amostra durante o processo de secagem.

3.6.1 Determinação da difusividade de massa efetiva

Com base dos dados advindos dos experimentos de cinética de secagem, foram determinadas as constantes de secagem, K_{sec} , através de regressão não linear, utilizando-se a lei exponencial na forma integrada a dois parâmetros, correlação que estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre do material, de acordo com PINTO & TOBINAGA, (1996):

$$X \equiv \left(\frac{X_{BS} - X_{BSe}}{X_{BS0} - X_{BSe}} \right) = A \cdot \exp(-K_{sec} \cdot t) \quad (3.5)$$

onde, X é o adimensional de umidade, X_{BSe} é a umidade de equilíbrio dinâmico em base seca, que corresponde à umidade da amostra quando a massa se torna constante no final dos experimentos, X_{BS0} é a umidade média inicial em base seca, A é um parâmetro adimensional e t a variável tempo.

Esta equação corresponde ao primeiro termo da série da solução do modelo fickiano, onde para tempos de secagem longos somente o primeiro termo é significativo.

A partir da constante de secagem, determinou-se a difusividade de massa efetiva, D_{EF} , através da relação para esferas, provinda do modelo fickiano em geometria esférica (PINTO & TOBINAGA, 1996; BACELOS, 2002; ARRIECHE & SARTORI, 2003):

$$K_{sec} = \frac{\pi^2 \cdot D_{EF}}{\left(\frac{D_{EQ}}{2} \right)^2} \quad (3.6)$$

onde, $\frac{D_{EQ}}{2} = r$ é o raio da amostra, o qual é uma função da umidade média em base seca.

3.6.2 Número de Biot

O número adimensional Biot de massa (Bi_m) representa a relação entre a resistência interna ao transporte de massa (umidade) na amostra e a resistência ao transporte de massa por convecção, associado ao meio externo que envolve a amostra. Considera-se a resistência externa à transferência de massa desprezível em relação à resistência interna para valores do número de Biot de massa acima de 30, na secagem de alimentos em geral, como relatado por CRANK (1975).

O Número de Biot é calculado conforme HERNÁNDEZ et al. (2000), que segue CRANCK (1975), reescrevendo o número de Biot da seguinte forma:

$$Bi_m = \frac{K_c \rho_{ar} x_1 K_{eq}}{\rho_{SS} D_{EF}}, \quad (3.7)$$

onde $x_1 = V_{EQ}/A_{ES}$ é a dimensão característica, D_{EF} é a difusividade de massa efetiva, K_c é o coeficiente de transferência de massa por convecção, ρ_{ar} é a massa específica do ar seco, ρ_{SS} é a massa específica do sólido seco, e K_{eq} representa uma constante de partição média.

A definição do número de Biot de massa (Bi_m) foi obtida por HERNÁNDEZ et al. (2000), assumindo-se um comportamento linear entre a umidade do material alimentício e do ar no equilíbrio:

$$Y_i = K_{eq} X_i. \quad (3.8)$$

onde K_{eq} representa uma constante de partição média, sendo Y_i substituído pela umidade do ar de secagem (Y_∞) e X_i pela umidade de equilíbrio dinâmico da amostra (X_{BSe}).

Para obter o coeficiente de partição (K_p), HERNANDEZ et al. (2000) consideraram o equilíbrio do vapor d'água entre as fases líquida e gasosa. As relações do equilíbrio de fases entre o líquido e o seu vapor são utilizadas, por exemplo, nos fenômenos de absorção e desorção.

Nesses fenômenos a umidade está contida na fase líquida e gasosa. Caso este soluto esteja distribuído e diluído nas fases sólida e fluida, a relação de equilíbrio é escrita analogamente à lei de Henry.

Este coeficiente surge em função da distribuição desigual do soluto na fronteira que separa as fases sólida e fluida. Desta forma, a condição estabelecida na equação é muito útil na operação de secagem, e que envolva fases sólida e fluida, pois possibilita especificar uma relação de equilíbrio entre a concentração de umidade presente no interior do sólido e aquela no seio da fase fluida (HERNANDEZ et al., 2000).

Esta definição é válida na situação em que a umidade do meio externo é diluída em relação ao meio interno, ou seja, ao sistema gel. Na Equação (3.7), D_{EQ} e D_{EF} variam ao longo do processo, sendo estes dados obtidos a partir dos testes de secagem.

O coeficiente de transferência de massa convectivo, K_c , é obtido pela analogia com a transferência de calor, sendo que, o número de Nusselt médio, \overline{Nu}_D , segundo WHITAKER (1972), pode ser obtido pela equação:

$$\overline{Nu}_D = 2 + \left(0,4 Re_D^{\frac{1}{2}} + 0,06 Re_D^{\frac{2}{3}} \right) Pr^{0,4} \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_{sup}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.9)$$

para $3,5 < Re_D < 8.10^4$, $0,7 < Pr < 380$ e $1,0 < \left(\frac{\mu_\infty}{\mu_{sup}} \right) < 3,2$

válida para líquidos e gases escoando sobre esferas, onde, Re_D é o Número de Reynolds de partícula, Pr é o número de Prandtl, μ_∞ é a viscosidade do ar na corrente livre e μ_{sup} é a viscosidade na parede da amostra.

As propriedades na Equação (3.9) são avaliadas à temperatura da corrente livre e a viscosidade do ar na superfície da amostra (μ_{sup}) à temperatura média entre a temperatura de bulbo úmido e a temperatura do ar de secagem.

Complementando a Equação (3.9), o número de Reynolds de partícula (Re_D), que representa a razão entre forças inerciais e viscosas é definido por:

$$Re_D = \frac{D_{EQ} V_A \rho_{ar}}{\mu_\infty} \quad (3.10)$$

sendo que V_A é a velocidade da corrente livre

O Número de Prandtl representa uma relação entre as difusividades de quantidade de movimento (ν) e térmica (α), ou ainda as espessuras relativas das camadas limites fluidodinâmica e térmica:

$$\text{Pr} = \frac{\frac{\mu_{\infty}}{\rho_{\text{ar}}}}{\frac{k_{\infty}}{\rho_{\text{ar}}c_p}} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.11)$$

Pela analogia entre as transferências de calor e massa, substitui-se na Equação (3.10) $\overline{\text{Nu}}_D$ e Pr por $\overline{\text{Sh}}_D$ e Sc, respectivamente.

O número de Sherwood, $\overline{\text{Sh}}_D$, representa a relação entre as transferências de massa por convecção e por difusão, na camada limite de concentração, como na equação:

$$\overline{\text{Sh}}_D = \frac{K_c D_{\text{EQ}}}{D_{a\infty}} \quad (3.12)$$

Sc é o número de Schmidt, razão entre as difusividades de quantidade de movimento e mássica, ou a relação entre as espessuras relativas das camadas limites fluidodinâmica e de concentração, dado por:

$$\text{Sc} = \frac{\nu}{D_{a\infty}} \quad (3.13)$$

A difusividade da água no ar ($D_{a\infty}$) pode ser estimada segundo SISSON & PITTS (1972), para uma ampla faixa de valores de temperaturas, pela equação:

$$D_{a\infty} = \frac{0,000146T^{2.5}}{P(T + 441)} \quad (3.14)$$

onde, $D_{a\infty}$ é dado em ft^2/h , T é a temperatura em R e P a pressão em atm.

3.7 PROPRIEDADES FÍSICAS DO FLUIDO

As propriedades físicas do ar de secagem necessárias para o cálculo dos dimensionais do item anterior são a difusividade do vapor d'água no ar, viscosidade, difusividade de quantidade de movimento e a massa específica.

Foram considerados os dados existentes na literatura (SINGH & HELDMAN, 1993, PERRY & GREEN, 1997), sendo que a difusividade da água no ar, $D_{a\infty}$, foi determinada pela Equação (3.14).

Os valores das propriedades utilizadas no cálculo dos coeficientes de transferência convectiva de calor e massa na superfície de contato entre o sólido e o fluido foram estimados na temperatura do fluido ($T_A = 50^\circ\text{C}$) e na temperatura média de película (T_{am}), entre a temperatura de bulbo úmido e seco e encontram-se reunidos na Tabela (3.1):

Tabela 3.1: Propriedades do ar à 1 atm (SINGH & HELDMAN, 1993).

Temperatura °C	Massa específica (ρ_{ar}) (Kg/m ³)	Viscosidade (μ_{∞}) (10 ⁻⁶ N.s/m ²)	Viscosidade cinemática (ν) (10 ⁻⁶ m ² /s)
30	1.127	18,682	16,58
40	1.092	19,123	17,6
50	1.057	19,515	18,58

3.8 TESTES DE SECAGEM CONVECTIVA DAS AMOSTRAS

Neste item é apresentada a metodologia utilizada para a realização dos testes de secagem, desde o procedimento experimental no secador de convecção forçada, passando pelo planejamento dos experimentos, até as condições operacionais e experimentos para a verificação da reprodutibilidade dos dados.

3.8.1 Procedimento experimental

Após as amostras de gel serem pesadas, foram conduzidas individualmente para a operação de secagem, onde o equipamento já estava em regime permanente, com as variáveis, temperatura e velocidade do ar, fixadas em valores pré-estabelecidos. O final da operação de secagem ocorreu quando a massa da amostra tornava-se constante ao longo do tempo.

O procedimento de medida do encolhimento do sistema foi feito sem a interrupção do processo de secagem, através da tomada de imagens pelo visor lateral do equipamento, Figura (3.5), e pelo método intermitente, retirando-se a amostra do equipamento para a medida de massa e registro da imagem.

3.8.2 Planejamento dos experimentos, condições operacionais e reprodutibilidade para a experimentação

Os experimentos foram conduzidos visando avaliar a influência do diâmetro inicial das amostras, (D_0), de $2,660 \cdot 10^{-2}$ e $1,610 \cdot 10^{-2}$ m e da velocidade do ar de secagem, (V_A), variando de 0,8 a 2,0 m/s, sendo a temperatura do ar de secagem nas amostras, (T_A), mantida em aproximadamente 50°C .

Esta faixa de valores foi escolhida para garantir um escoamento laminar na camada limite, com números de Reynolds menores que 10^5 (baseado no diâmetro da partícula), evitar longos períodos de secagem e minimizar a influência das paredes do túnel no escoamento de ar sobre as amostras, localizadas na região central da câmara de secagem.

A concentração de sólido inicial (em base úmida), C_{0S} , foi de 3 % e 1,5 % para o ágar, componente selecionado para compor o modelo gel neste estudo.

Experimentos preliminares, realizados pelos dois métodos de aquisição de dados (intermitente e contínuo), foram replicados para que fosse possível avaliar a reprodutibilidade, conforme os valores reunidos na Tabela (3.2). Para estes experimentos a concentração inicial de ágar foi de 1,5 %.

Tabela 3.2: Condições experimentais utilizadas nos experimentos preliminares

Experimento	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Velocidade (m/s)	Diâmetro inicial (cm)
A1*	50	1,4	2,66
A2*	50	1,5	3,33
A3**	50	1,8	1,61
A4**	50	0,8	1,61

*método contínuo; **método intermitente

Através destes experimentos pode-se fazer uma primeira análise da influência do diâmetro inicial e da velocidade do ar de secagem na evolução da forma das amostras em conjunto com a cinética de secagem, bem como, determinar a reprodutibilidade dos experimentos e decidir pelo método contínuo ou intermitente de aquisição de dados.

Com o objetivo de se estender a análise experimental, novos experimentos foram realizados, seguindo-se um planejamento experimental, conforme apresentado na Tabela (3.3). Para estes experimentos foi utilizado o método intermitente de aquisição de dados com a concentração de ágar de 3% em massa (b.u).

Tabela 3.3: Variáveis e seus níveis utilizados para o planejamento experimental

Experimentos	Velocidade (m/s)	Diâmetro Inicial (cm)
B1	1,0	1,61
B2	1,5	1,61
B3	2,0	1,61
B4	1,0	2,66
B5	1,5	2,66
B6	2,0	2,66

3.9. REPRESENTAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS COM MODELOS DA LITERATURA

Apresenta-se neste item os modelos utilizados com base na literatura consultada, bem como, os critérios de avaliação do ajuste dos dados e da reprodutibilidade.

3.9.1 Equações para as representações do volume, massa específica e porosidade em função da umidade da amostra (modelos para o encolhimento)

Afim de ajustar a dependência linear do volume com a umidade utilizou-se uma equação para o encolhimento, de acordo com IGLESIAS et al. (1993) e ROQUES et.al. (1994), os quais também utilizaram sistemas géis de dois componentes como neste trabalho.

O significado físico desta equação para o encolhimento linear é de que toda a contração sofrida pela amostra equivale ao volume de água evaporado da sua estrutura. Desta forma, o volume do gel, (V_g), é representado pela equação:

$$V_g = V_s + V_w \quad (3.15)$$

onde, V_s é o volume do sólido (ágar) e V_w o volume da água.

O volume de água pode ser relacionado com a umidade em base seca (X_{BS}), a massa específica do sólido (ρ_s) e a massa específica da água (ρ_w), definindo-se, então, o coeficiente de encolhimento linear (ε) pela equação:

$$\varepsilon = (\rho_s/\rho_w) \quad (3.16)$$

assim sendo, o volume do gel fica expresso pela equação:

$$V_g = V_s.(1+\varepsilon X_{BS}) \quad (3.17)$$

nesta equação, ε é igual à massa específica relativa do ágar. X_{BS} é definida como a massa total de água da amostra dividida pela massa de sólido seco.

Substituindo V_s por (m_s / ρ_s) e ε por (ρ_s/ρ_w) , tem-se a equação para o volume do gel:

$$V_g = (m_s / \rho_s) \cdot [1 + (\rho_s / \rho_w) X_{BS}] \quad (3.18)$$

onde, m_s é a massa de sólido.

A partir da equação para o volume, obtém-se a equação para a massa específica do gel, ρ_g :

$$\rho_g = (m_s + X_{DB} \cdot m_s) / \{(m_s / \rho_s) \cdot [1 + (\rho_s / \rho_w) X_{DB}]\} \quad (3.19)$$

A Equação (3.18) foi utilizada para verificar se os dados de volume equivalente, V_{EQ} , se ajustavam ao modelo de encolhimento linear, onde V_{EQ} corresponde ao volume da esfera de mesma área projetada, medida experimentalmente.

A Equação (3.19) foi utilizada para comparar a massa específica do gel, prevista pelo encolhimento linear, com a massa específica da amostra, calculada a partir dos dados experimentais, conforme a Equação (3.4).

A porosidade da amostra, χ_{am} , representa a razão do volume de vazios (diferença entre o volume experimental e teórico) pelo volume experimental, sendo calculada para os experimentos através da equação:

$$\chi_{am} = (V_{EQ} - V_g)/(V_{EQ}) \quad (3.20)$$

3.9.2 Ângulo de separação do escoamento na camada limite

A separação do escoamento na camada limite fluidodinâmica ocorre devido a desaceleração do fluido e ao conseqüente aumento da pressão local, sendo que o ângulo de separação é inversamente proporcional ao Número de Reynolds de partícula.

Existem na literatura modelos para o ângulo de separação (θ_s), baseados na equação de Navier-Stokes, porém, válidos para baixos valores de Número de Reynolds, $20 < Re < 400$, como na equação:

$$\theta_s = 180 - 42,5 \left[\ln \left(\frac{Re_D}{20} \right) \right]^{0,483} \quad (3.21)$$

Além dos limites da Lei de Stokes, o anel de separação continua a se mover para perto do ponto de estagnação, a medida em que o número de Reynolds aumenta, até um limite de 81 a 83^0 , determinando pontos de máxima e mínima transferências de calor e massa.

O ângulo de separação, medido em graus, a partir do ponto de estagnação, pode ser bem aproximado pela seguinte interpolação (CLIFT et al., 1978):

$$\theta_s = 78 + 275 Re_D^{-0,37} \quad \text{para } (400 < Re_D < 3.10^5) \quad (3.22)$$

A Equação (3.22) foi utilizada para prever o ângulo de separação a partir dos dados experimentais, com o propósito de analisar o seu efeito na evolução da forma do gel durante a secagem.

3.9.3 Critérios para a verificação de ajuste e reprodutibilidade dos dados

Os dados de V_{EQ} e V_g para cada experimento foram linearizados através da equação:

$$V_{EQ} = a V_g \quad \text{para } a = 1 \quad (3.23)$$

O ajuste é verificado pelo parâmetro a próximo de 1, assegurado estatisticamente pela variância explicada (% de pontos explicados pelo modelo), desvio padrão (entre pontos experimentais e modelo) e teste t (razão entre parâmetro a e o desvio padrão).

O mesmo procedimento foi utilizado para verificar a reprodutibilidade entre as réplicas, sendo V_{EQ} substituído pelos valores medidos de umidade em base seca, densidade de fluxo de massa, área projetada, perímetro projetado, D_{MX} , D_{MN} e D_{MD} , difusividade, Número de Biot e V_g substituído pelos valores replicados, respectivamente.

3.10 ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados obtidos foi realizada através da elaboração de gráficos de duplo eixo vertical em diferentes valores de velocidade do ar de secagem e diâmetro inicial da amostra, com o auxílio dos programas ORIGIN^{®2} e

STATISTICS^{®3}, relacionando vários aspectos dos dados obtidos com a visão dos fenômenos de transporte.

- Análise da dependência da circularidade com os períodos de secagem

Através da densidade de fluxo de massa e da circularidade em função da umidade em base seca, foi feita a análise da dependência da circularidade com os períodos de secagem, e sua relação com a degradação física da amostra, formação de rachaduras, transição vítrea, umidade de armazenamento e umidade crítica.

- Análise da dependência da massa específica simulada e experimental com os períodos de secagem

Com as curvas de densidade de fluxo de massa e das massas específicas simulada e experimental, em função da umidade em base seca, foram observadas as dependências das massas específicas com os períodos de secagem, as diferenças entre as massas específicas simulada e a experimental, destacando a razão para estes desvios e relacionando-os com a degradação física da amostra e a formação de porosidade, bem como, os valores de umidade em que ocorrem as deformações.

- Análise da dependência da relação de diâmetros com os períodos de secagem

Através dos gráficos de densidade de fluxo de massa e da relação de diâmetros, em função da umidade em base seca, foi avaliada a dependência da relação de diâmetros com os períodos de secagem, relacionando esta dependência com a degradação física da amostra, formação de rachaduras, ângulo de separação

do escoamento na camada limite, transição vítrea e os valores de umidade em que ocorrem as deformações.

- Análise da dependência do número de Biot com os períodos de secagem

Com base em gráficos de número de Biot em função da umidade em base seca, foi feita a análise da dependência deste adimensional em função dos períodos de secagem, relacionando esta dependência com a formação de perfis de umidade no interior da amostra e verificando em quais estágios da secagem predominam as resistências convectiva e difusiva à transferência de massa.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados que foram obtidos seguindo-se a metodologia proposta para o trabalho, bem como, as respectivas discussões.

4.1 CONSTRUÇÃO DAS AMOSTRAS DE GÉIS

Neste item faz-se uma avaliação dos componentes utilizados para compor os sistemas géis, assim como, uma avaliação do processo de moldagem das amostras.

4.1.1 Avaliação dos componentes utilizados

Os sistemas géis foram elaborados e submetidos ao processo de secagem, conforme as composições e concentrações mencionadas no Item (3.2.1).

Na Figura (4.1) tem-se um exemplo típico de uma amostra de gel, composta de amido (7%), celulose (9%) e ágar (1,5%), em base úmida, submetida ao processo de secagem, em três tempos distintos do processo, sendo que, a tomada de imagens foi realizada pelo método contínuo.

Observa-se que os sistemas preparados com amido, celulose e ágar, como na Figura (4.1), apresentam um encolhimento menos acentuado, devido a tornaram-se ocos nos estágios iniciais da secagem.

A adição de celulose em proporções maiores reduz a formação da cavidade central, mas a circularidade (Φ) e a relação entre os diâmetros (D_F) das

amostras não mudam durante o processo, como pode ser observado na Figura (4.1).

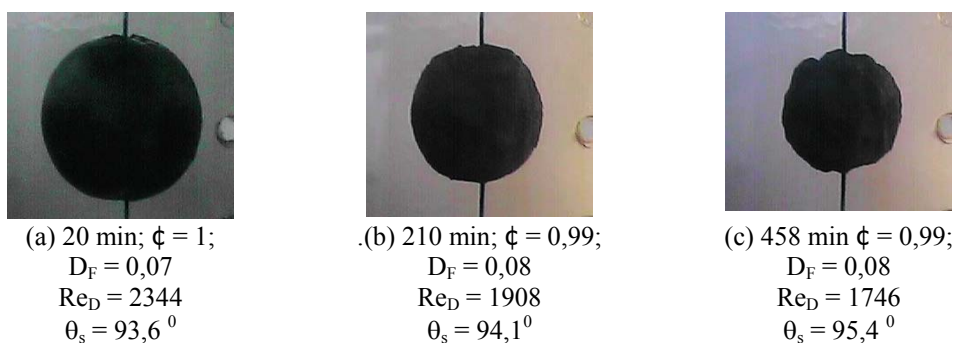


Figura 4.1: Amostra composta de amido (7%), celulose (9%) e ágar (1,5%), em base úmida, em três tempos distintos do processo de secagem com $T_A = 50^\circ\text{C}$, $V_A = 1,3\text{ m/s}$ e $D_0 = 3,33\text{ cm}$ (escoamento da direita para a esquerda, visão lateral).

As amostras compostas apenas de ágar como componente sólido, nas concentrações de 1,5 e 3 % (b. u.), também apresentam a cavidade central no período de taxa decrescente de secagem, mas é possível analisar o efeito da bi-dimensionalidade do transporte de umidade no encolhimento, conforme pode ser observado no resultado típico mostrado na Figura (4.2), pelo método contínuo.

Nesta figura, através dos valores decrescentes de ϕ e crescentes de D_F , além do ângulo de separação, pode-se inferir uma maior transferência de massa na região anterior à separação do escoamento.

A amostra composta somente de ágar foi escolhida, pois este gel encolhe mais acentuadamente na região anterior à separação do escoamento,

permitindo relacionar a mudança nos fatores de forma estudados com a transferência de massa.

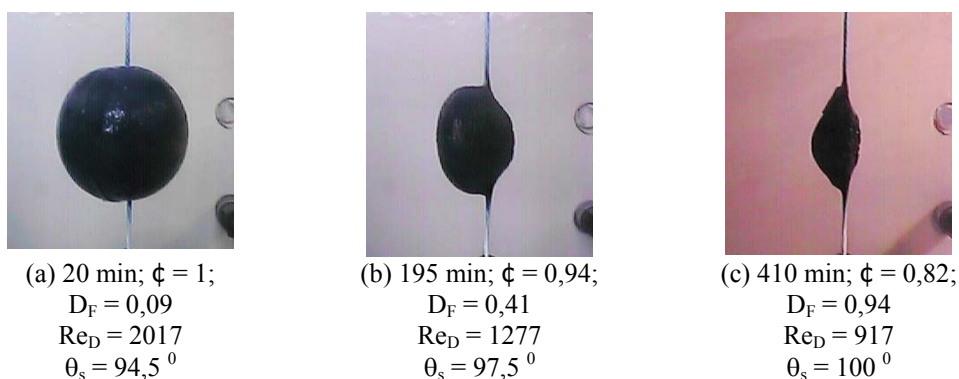


Figura 4.2: Amostra composta de ágar (1,5 % b.u.) em três tempos distintos do processo de secagem com $T_A = 50^\circ\text{C}$, $V_A = 1,4\text{ m/s}$ e $D_0 = 2,66\text{ cm}$ (escoamento da direita para a esquerda, visão lateral).

As observações a respeito das composições testadas estão de acordo com os resultados disponíveis em GOGUS & LAMB (1998), e serviram como base para a seleção do ágar como componente sólido do sistema gel.

4.1.2 Moldagem e geleificação das amostras

Nos primeiros ensaios de confecção das amostras, após o período de geleificação, quando era feita a abertura do molde de extração manual, algumas amostras apresentaram partes dos materiais aderidos à primeira peça do molde.

Em outras situações, após a abertura do molde, as amostras não apresentavam frações aderidas na primeira peça, no entanto, havia o problema de extrair manualmente a amostra da segunda peça.

A utilização destes moldes exige o contato manual com as amostras, o que provoca tensões mecânicas nos sistemas géis que, por apresentarem estrutura frágil, foram partidos e/ou apresentaram formação de rachaduras durante a retirada.

Tendo-se em vista minimizar a aderência da amostra com as superfícies do molde e as tensões durante a extração, utilizou-se vaselina (material inerte) para untar os moldes.

O problema de aderência da amostra à primeira peça foi solucionado, no entanto, persistiram os mesmos problemas durante a retirada do sistema gel da segunda parte do molde, pois, não havia uma região de contato com a amostra que facilitasse a sua extração sem a ocorrência de fissuras e/ou partições da mesma.

Estes problemas foram solucionados utilizando-se um ágar de qualidade superior (OXOID), com uma força de trabalho de 1%, sendo a força de trabalho definida como a mínima concentração de ágar para manipulação do gel.

O gel formado por este ágar, a partir da concentração de 1%, apresentou resistência, flexibilidade e lubrificação própria suficientes para que o processo de extração manual dos moldes fosse realizado, sem haver a ocorrência de rachaduras ou aderência da amostra aos moldes.

O mesmo problema com a extração manual das amostras foi encontrado por CASTILHO & SARTORI (2002), que desenvolveram no “Centro de Secagem do DEQ/UFSCar”, moldes com pinos que expulsam a amostra aderida a uma das metades do molde, sem a necessidade de contato manual.

Estes moldes foram testados no presente trabalho e são recomendados para a construção de sistemas géis constituídos de outros componentes poliméricos, como amido, celulose e ágar de baixa força de trabalho, os quais aumentam a aderência da amostra ao molde.

Após a construção dos sistemas géis, foi possível iniciar os experimentos de secagem.

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL NA UNIDADE DE SECAGEM CONVECTIVA

Com relação aos métodos de tomada de imagens, observou-se que pelo método contínuo o gel aderiu ao fio de sustentação ao longo do processo, o que contribuiu para a mudança nos fatores de forma estudados.

Já pelo método intermitente, a plataforma contendo a amostra foi colocada sobre uma superfície luminosa localizada no exterior da câmara de secagem, com a tomada de imagens sendo realizada do topo da amostra, conforme as fotos típicas mostradas na Figura (4.3).

Neste último procedimento o volume aderido à haste da plataforma não foi mensurado e a mudança nos fatores de forma foi devida somente à natureza do escoamento de fluido na camada limite e a sua relação com a transferência de massa.

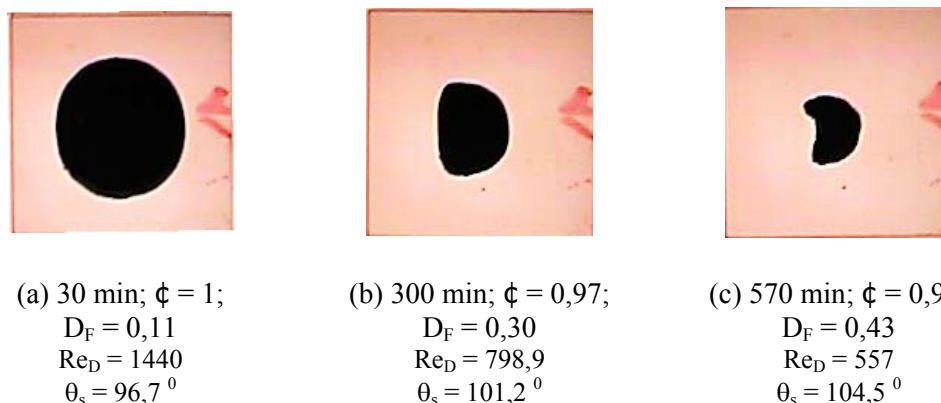


Figura 4.3: Amostra composta de ágar (3%) em três tempos distintos do processo de secagem com $T_A = 50^\circ\text{C}$, $V_A = 1,0\text{ m/s}$ e $D_0 = 2,66\text{ cm}$ (escoamento da direita para a esquerda, visão de topo).

As duas concentrações de ágar utilizadas, 1,5 e 3 % (b.u.), permitiram observar as mudanças nos fatores de forma das amostras, sendo que, com a concentração de 3 % (b.u.), reduziu-se a aderência da amostra à haste da plataforma.

Durante a realização dos experimentos pelo método contínuo, verificou-se que a medida da massa da amostra tornava-se alterada com o movimento do fluido, tanto devido à força de arraste, quanto às vibrações do equipamento, que desestabilizavam a balança.

Devido a estas razões, o método intermitente de tomada de imagens e medida de massa da amostra foi escolhido para dar continuidade aos experimentos, preparando o sistema gel com ágar a 3% (b.u.).

4.3 DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO

Neste item são apresentadas as observações com respeito à velocidade e a temperatura da amostra, bem como, a temperatura, velocidade e umidade relativa do ar.

Também se encontra a verificação da reprodutibilidade dos dados obtidos nas determinações do conteúdo de umidade da amostra e da densidade de fluxo de massa, com relação aos experimentos realizados pelo método intermitente, sendo a temperatura do ar de secagem igual a 50⁰C para todos os experimentos.

4.3.1 Medidas de velocidade, temperatura e umidade

A velocidade da amostra foi considerada nula com relação ao equipamento de secagem e a temperatura do material não foi determinada ao longo do processo de secagem, porém se considerou que durante o período de taxa constante, a temperatura da amostra foi a de bulbo úmido, e, durante o período de taxa decrescente, a temperatura da amostra foi igual à do ar de secagem (50⁰C).

A velocidade, temperatura e umidade relativa do fluido, mantiveram seus valores aproximadamente constantes durante os experimentos, não ultrapassando os erros de medidas dos instrumentos utilizados, conforme descritos na metodologia.

Na Figura (4.4) tem-se a umidade da amostra, X_{BS} , em função do tempo de secagem, para um experimento típico e sua réplica. Na Tabela (4.1), tem-se os parâmetros estatísticos obtidos com a regressão linear, através da Equação (3.23).

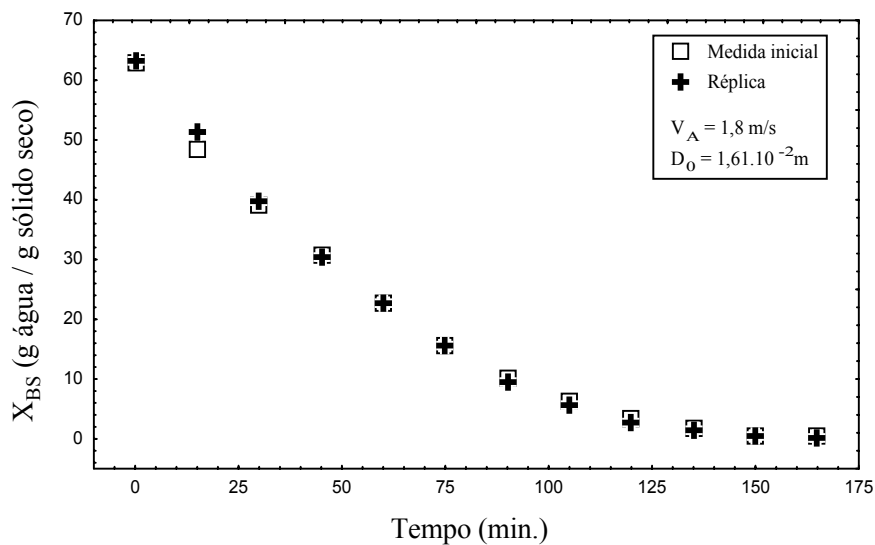


Figura 4.4: X_{BS} em função do tempo de secagem, para um experimento típico e sua réplica.

$$X_{BS} = a X_{BS}(\text{réplica}) \tag{3.23}$$

Tabela 4.1: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre determinações replicadas de X_{BS}, para a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes ao experimento típico mostrado na Figura (4.4).

Parâmetro (adimensional) Eq. (3.23)	Desvio Padrão	Teste-t	Coefficiente de correlação	Variância explicada (%)	P Valor	Nível de significância (%)
a = 0,9826	0,009	111	0,9991	99,82	<0,001	5

A reprodutibilidade das determinações replicadas da Figura (4.4) pode ser constatada tanto visualmente, através da proximidade dos dados de umidade em base seca em função do tempo, quanto pelo bom ajuste do modelo estatístico, utilizado para verificar a reprodutibilidade dos dados, Equação (3.23).

Na Tabela (4.1) o valor estimado para o parâmetro a é aproximadamente igual à unidade, o que indica que o valor da determinação inicial de X_{BS} foi, em média, igual a 98,26% do valor da determinação replicada.

A validade estatística do parâmetro a é assegurada pelo fato do desvio padrão ser 111 vezes menor que o parâmetro a , teste t , e pelo alto índice de variância explicada, que mostra a percentagem de validade dos dados obtidos pelo modelo estatístico.

O nível de significância (chance de erro) desta análise estatística é de 5%, portanto o valor P menor que 0,05 possibilita assegurar a validade do parâmetro a com no mínimo 95 % de confiança.

De acordo com estes resultados, considerou-se que a determinação de umidade em base seca (X_{BS}) ao longo do tempo, foi reprodutível, seguindo-se o método intermitente de aquisição de dados.

4.3.2 Densidade de fluxo de massa

Na Figura (4.5) tem-se o resultado típico da densidade de fluxo de massa (R) em função do tempo de secagem e sua réplica. Na Tabela (4.2), tem-se os parâmetros estatísticos obtidos por meio da regressão linear com a Equação (3.23), para as determinações replicadas de R , referentes ao experimento da Figura (4.5).

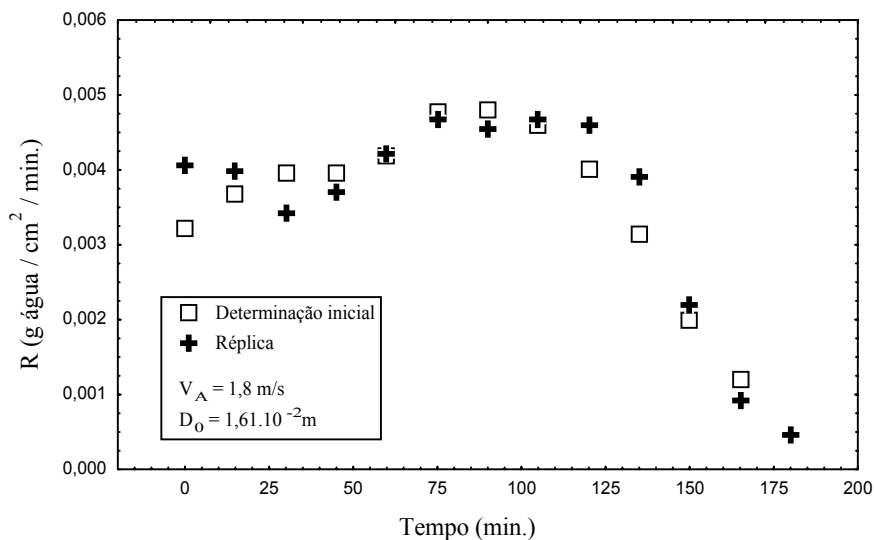


Figura 4.5: Densidade de fluxo de massa em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.

Tabela 4.2: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre réplicas de R, para a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes ao experimento típico mostrado na Figura (4.5).

Parâmetro (adimensional) Eq. (3.23)	Desvio Padrão	Teste-t	Coeficiente de correlação	Variância explicada (%)	P Valor	Nível de significância (%)
1,03	0,034	30	0,9186	84,4	<0,001	5

A reprodutibilidade do experimento replicado da Figura (4.5) pode ser avaliada visualmente, através da proximidade dos dados de densidade de fluxo de massa. A reprodutibilidade é também assegurada pelo ajuste do modelo estatístico utilizado para verificar a reprodutibilidade, Equação (3.23).

Na tabela (4.2) o valor estimado para o parâmetro a é aproximadamente igual à unidade, o que indica que a determinação inicial de R foi, em média, apenas 3 % maior que a determinação de R replicada, sendo que, a

validade estatística deste parâmetro é assegurada com um desvio padrão 30 vezes menor que este parâmetro, teste t.

Já o valor da variância explicada mostrou que alguns dados obtidos pelo modelo estatístico não explicam os dados experimentais. Isto pode ser justificado pela propagação do erro de medidas derivadas.

Como o cálculo da densidade de fluxo de massa envolve o valor de umidade em base seca e a área superficial da amostra (obtida por medidas de encolhimento), o erro destas determinações se propaga a R de forma combinada.

Contudo, mesmo com pontos discrepantes, considerou-se o parâmetro a significativo, devido ao alto valor do teste t e baixo desvio padrão, com no mínimo 95 % de confiança.

De acordo com estes resultados, considerou-se que a densidade de fluxo de massa, determinada pelo método intermitente, apresentou a mesma dependência com o tempo de secagem, quando comparada com a réplica.

4.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA AMOSTRA

De forma análoga ao item anterior, segue-se a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes às propriedades da amostra, que envolve as medidas e determinações de encolhimento e as determinações da forma e massa específica para experimento típico, realizado pelo método intermitente, com $T_A = 50^{\circ}\text{C}$.

4.4.1 Encolhimento

Nas Figuras (4.6) a (4.8) apresentam-se os resultados típicos de área projetada (A_P), perímetro projetado (P_P), diâmetro máximo (D_{MX}), diâmetro

mínimo (D_{MN}), diâmetro médio (D_{MD}) e as determinações de diâmetro equivalente à área projetada (D_{EQ}) e volume equivalente (V_{EQ}), todos em função do tempo de secagem.

Também são mostrados, na Tabela (4.3), os parâmetros estatísticos obtidos com a regressão linear dos dados replicados destas medidas e determinações, através da Equação (3.23) e, em seguida, tem-se as discussões a respeito destes resultados.

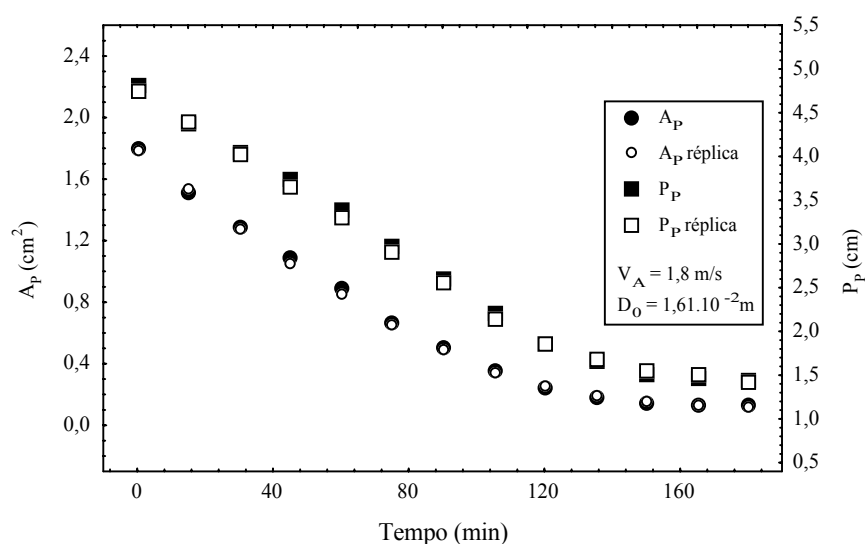


Figura 4.6: A_p e P_p , em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.

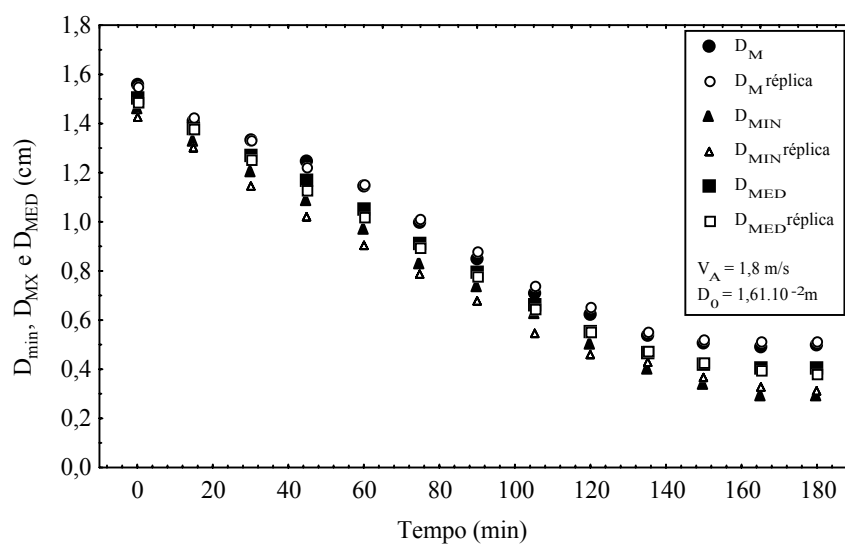


Figura 4.7: D_{MX} , D_{MN} e D_{MD} em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.

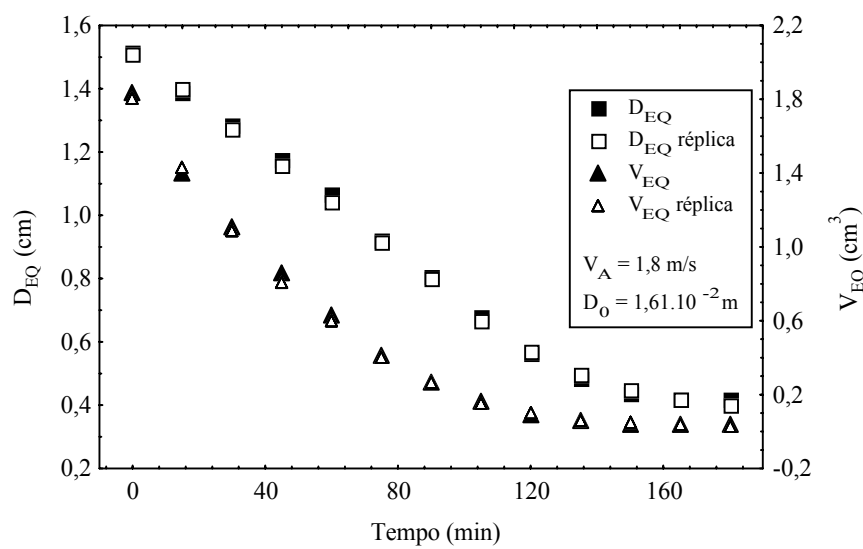


Figura 4.8: D_{EQ} e V_{EQ} , em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.

Tabela 4.3: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre as réplicas de A_p , P_p , D_{MX} , D_{MN} , D_{MD} , D_{EQ} e V_{EQ} para a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes ao experimento mostrado nas Figuras (4.6) a (4.8)

	Parâmetro a (adimensional) Eq. (3.23)	Desvio Padrão	Teste-t	Coefficiente de correlação	Variância explicada (%)	P Valor	Nível de significância (%)
A_p	1,009	0,0057	178,2	0,9995	99,9	< 0,001	5
P_p	1,010	0,0042	241,5	0,9993	99,9	< 0,001	5
D_{MX}	0,993	0,0053	186,8	0,9988	99,8	< 0,001	5
D_{MN}	1,040	0,0120	86,0	0,9961	99,2	< 0,001	5
D_{MD}	1,014	0,0040	252,6	0,9994	99,9	< 0,001	5
D_{EQ}	1,006	0,0035	287,7	0,9996	99,9	< 0,001	5
V_{EQ}	1,011	0,0077	131,7	0,9993	99,9	< 0,001	5

A reprodutibilidade dos dados experimentais pode ser avaliada visualmente, através da proximidade dos pontos nas Figuras (4.6) a (4.8). A reprodutibilidade é também assegurada pelo excelente ajuste do modelo estatístico utilizado, Equação (3.23), conforme mostrado na Tabela (4.3).

Nesta tabela o valor estimado para o parâmetro a é aproximadamente igual à unidade para todas as medidas, sendo a validade estatística deste parâmetro assegurada pelos baixos valores de desvio padrão e altos valores de teste t .

O alto índice de variância explicada, mostra que a percentagem de validade dos pontos obtidos pelo modelo estatístico foi excelente, não ficando abaixo de 99,2 %.

O nível de significância (chance de erro) desta análise estatística é 5%, portanto, o valor P menor que 0,05 possibilita assegurar a validade do parâmetro a com no mínimo 95 % de confiança, considerando-se, então, as medidas de A_p , P_p , D_{MX} , D_{MN} , D_{MD} e as determinações de D_{EQ} e V_{EQ} como reprodutíveis.

Verifica-se também, na Figura (4.8), o acentuado encolhimento que a amostra desenvolveu, sendo que o volume final representa 2,1 % e 1,9 % do volume inicial, para a determinação inicial e réplica, respectivamente.

A transição do estado gomoso para o vítreo também pode ser observada na Figura (4.8), quando o volume da amostra tende a uma constante. Como o processo de secagem continua a ocorrer, a amostra desenvolve uma porosidade e o volume final não corresponde ao volume do ágar sólido.

4.4.2 Determinação da forma das partículas a partir da análise de imagens

Na Figura (4.9), são apresentados os resultados típicos das determinações de circularidade (ϕ) e da relação de diâmetros (D_F) em função do tempo de secagem, para um experimento típico e a sua réplica, e, na Tabela (4.4), tem-se os parâmetros estatísticos obtidos com a regressão linear dos dados replicados de ϕ e D_F , através da Equação (3.23).

A reprodutibilidade da circularidade na Figura (4.9) pode ser avaliada visualmente pela proximidade das determinações exceto para alguns dados discrepantes, no estágio final da secagem.

A reprodutibilidade é também assegurada pelo ajuste do modelo estatístico utilizado para verificar a reprodutibilidade, Equação (3.23).

Na Tabela (4.4) o valor estimado para o parâmetro a , com relação à circularidade, é aproximadamente igual a unidade, indicando que a determinação inicial de ϕ foi, em média, apenas 0,7 % menor que a determinação de ϕ replicada, sendo que, a validade estatística deste parâmetro é assegurada com um desvio padrão 457,8 vezes menor que este parâmetro, (teste t).

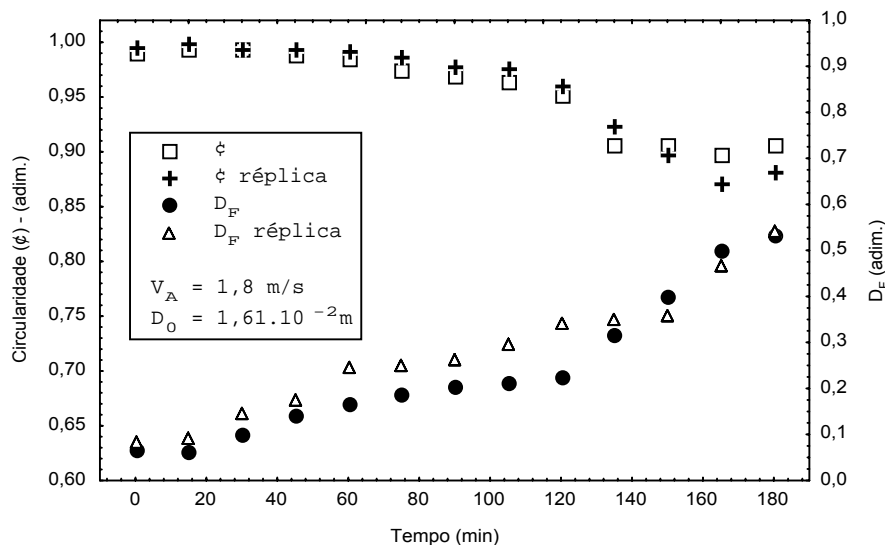


Figura 4.9: ϕ e D_F em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.

Tabela 4.4: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre réplicas de ϕ e D_F , para a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes ao experimento mostrado na Figura (4.9).

	Parâmetro a (adimensional) Eq. (3.23)	Desvio Padrão	Teste-t	Coefficiente de correlação	Variância explicada (%)	P Valor	Nível de significância (%)
ϕ	0,993	0,0022	457,8	0,9761	95,3	< 0,001	5
D_F	0,930	0,0564	16,49	0,9502	90,3	< 0,001	5

O valor da variância explicada foi apenas razoável, mostrando que alguns pontos obtidos pelo modelo estatístico não explicam os dados experimentais. Isto pode ser justificado pela propagação do erro de medidas derivadas, já que a determinação da circularidade envolve duas medidas, P_p e A_p , e o erro destas medidas se propaga a ϕ de forma combinada.

Considerou-se, também, que os resultados discrepantes de ϕ , podem ter ocorrido devido ao fato de que a circularidade está relacionada com a

formação de uma rachadura na região posterior à separação do escoamento, sendo que esta rachadura evolui principalmente no estágio final do processo, durante o período de taxa decrescente.

Dependendo da extensão desta rachadura, nas determinações replicadas de ϕ , tem-se diferentes valores de perímetro projetado, modificando então os valores da circularidade nas réplicas.

Contudo, mesmo com poucos valores discrepantes, pode-se considerar o parâmetro a significativo, devido ao alto valor do teste t e baixo desvio padrão, com no mínimo 95 % de confiança, podendo-se afirmar que ϕ apresentou a mesma dependência em relação ao tempo de secagem, quando comparada com a determinação da réplica.

No tocante à relação de diâmetros, D_F , pode-se verificar visualmente através da Figura (4.9) que os valores obtidos e suas réplicas são bem próximos, a menos de alguns resultados discrepantes. A reprodutibilidade é assegurada pelo ajuste do modelo estatístico utilizado, Equação (3.23).

Na Tabela (4.4) o valor estimado para o parâmetro a , com relação à D_F , é próximo à unidade, indicando que a determinação inicial de D_F foi, em média, 7 % menor que a determinação de D_F replicada.

A validade estatística deste parâmetro é assegurada com um desvio padrão 16,5 vezes menor que este parâmetro, (teste t), ou seja, o valor do desvio padrão representa 6,06 % do valor do parâmetro.

O valor da variância explicada mostrou que alguns valores obtidos pelo modelo estatístico não explicam os valores experimentais. Isto pode ser justificado pela propagação do erro de medidas derivadas, já que a determinação

de D_F envolve três medidas, D_{MX} , D_{MN} , D_{MD} , sendo que o erro destas medidas se propaga a D_F de forma mais acentuada, quando se compara com a circularidade.

Contudo, mesmo com pontos discrepantes, considerou-se o parâmetro a significativo, devido ao alto valor do teste t e baixo desvio padrão, com no mínimo 95 % de confiança, podendo-se afirmar que a determinação inicial de D_F apresentou a mesma dependência com o tempo de secagem, quando comparada com a determinação da réplica.

4.4.3 Determinação da massa específica a partir da massa e volume da amostra ao longo do processo

A Figura (4.10) apresenta os resultados típicos das determinações de massa específica aparente da amostra, (ρ_{am}), em função do tempo de secagem, para um experimento e a sua réplica. Na Tabela (4.5) tem-se reunidos os parâmetros estatísticos obtidos com a regressão linear dos dados replicados de ρ_{am} através da Equação (3.23), para o experimento da Figura (4.10).

A reprodutibilidade da massa específica aparente, Figura (4.10), pode ser avaliada visualmente pela proximidade das determinações no período inicial do processo, porém, a partir do tempo de aproximadamente 90 minutos em diante, ocorrem muitas diferenças entre os valores replicados.

Apesar dos pontos discrepantes entre a experiência e sua réplica, observa-se a mesma dependência com o decorrer do tempo, ou seja, a massa específica durante certo período aumenta, aproximando-se do valor da massa específica do sólido seco ($\rho_s = 1,551 \text{ g/cm}^3$), logo após, com a formação da rachadura na parte posterior da amostra e a fissura interna, com conseqüente aumento de poros, a massa específica decresce.

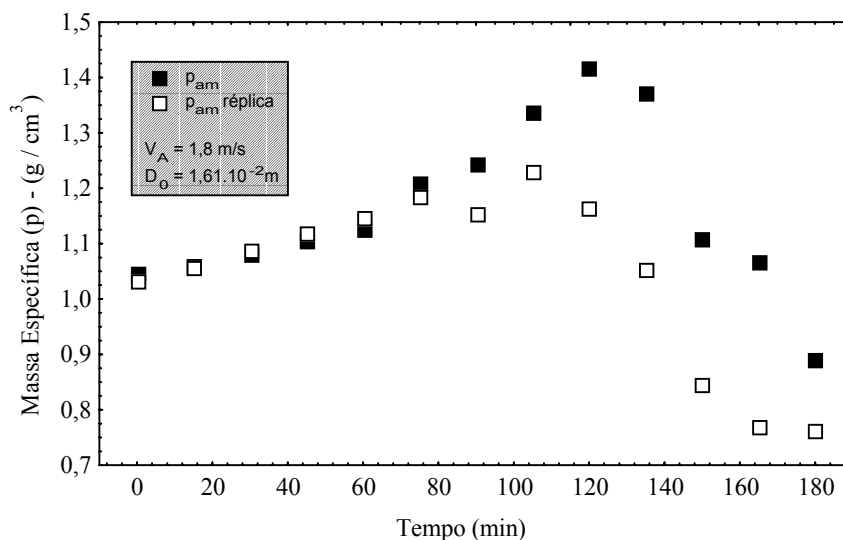


Figura 4.10: ρ_{am} em função do tempo de secagem, para o experimento e a sua réplica.

Tabela 4.5: Parâmetros estatísticos da regressão linear entre réplicas de ρ_{am} , para a verificação da reprodutibilidade dos dados, referentes ao experimento da Figura (4.10)

	Parâmetro a (adimensional) Eq. (3.23)	Desvio Padrão	Teste-t	Coefficiente de correlação	Variância explicada (%)	P Valor	Nível de significância (%)
ρ_{am}	1,098	0,036	30,7	0,41	16,58	< 0,001	5

Na Tabela (4.5) o valor estimado para o parâmetro a, com relação à massa específica aparente, é aproximadamente igual a 1,098; indicando que a determinação inicial de ρ_{am} foi, em média, 9,8 % maior que a determinação de ρ_{am} replicada, sendo que a validade estatística deste parâmetro é assegurada com um desvio padrão 30,7 vezes menor que este parâmetro (teste t).

O valor da variância explicada foi baixo, mostrando que alguns valores obtidos pelo modelo estatístico não explicam os pontos experimentais.

Isto pode ser justificado, por um lado, pela propagação do erro de medidas derivadas, já que a determinação da massa específica aparente envolve duas determinações, a massa da amostra e o volume equivalente, sendo que o erro destas determinações se propaga a ρ_{am} de forma combinada.

Considerou-se, também, que os pontos discrepantes de ρ_{am} , podem ter ocorrido devido ao fato de que, o decréscimo da massa específica aparente, durante o período de taxa decrescente de secagem, está relacionada com a formação da fissura na região posterior à separação do escoamento.

Dependendo da extensão desta fissura e o momento em que ocorre, nas determinações replicadas de ρ_{am} , tem-se diferentes valores de taxa de evaporação na parte posterior da amostra, modificando, então, os valores da massa específica aparente nas réplicas, como pode ser observado na Figura (4.10), onde ρ_{am} replicada decresce mais acentuadamente, em comparação com a determinação inicial.

Contudo, mesmo com pontos discrepantes, considerou-se que ρ_{am} reproduziu a mesma dependência com o decorrer do processo, podendo ser utilizada como parâmetro para se avaliar a deterioração do gel (formação de fissuras e poros), bem como, em que etapa do processo começa a ocorrer esta deterioração.

Tendo-se verificado que a metodologia é adequada para a determinação das propriedades da amostra, iniciaram-se as determinações da difusividade de massa efetiva e do número de Biot de massa.

4.5 DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE DE MASSA EFETIVA E DO NÚMERO DE BIOT DE MASSA

Neste item é apresentada a análise estatística da regressão não linear da umidade adimensional em função do tempo, para um experimento típico e sua réplica, com $T_A = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, bem como, a verificação da reprodutibilidade da difusividade de massa efetiva e do número de Biot de massa.

4.5.1 Determinação da difusividade efetiva

A Figura (4.11) apresenta o resultado típico das determinações de umidade adimensional em função do tempo e o ajuste realizado através da Equação (3.5). Na Figura (4.12) tem-se a difusividade efetiva em função do tempo de secagem, ambas para um experimento típico e a sua réplica.

Na Tabela (4.6) tem-se os parâmetros estatísticos obtidos com a análise de regressão das determinações de umidade adimensional em função do tempo, para a obtenção da constante de secagem K , através da Equação (3.5), e os parâmetros estatísticos da verificação de reprodutibilidade de D_{EF} , pela Equação (3.23).

$$X \equiv \left(\frac{X_{BS} - X_{BSe}}{X_{BS0} - X_{BSe}} \right) = A \cdot \exp(-K_{sec} \cdot t) \quad (3.5)$$

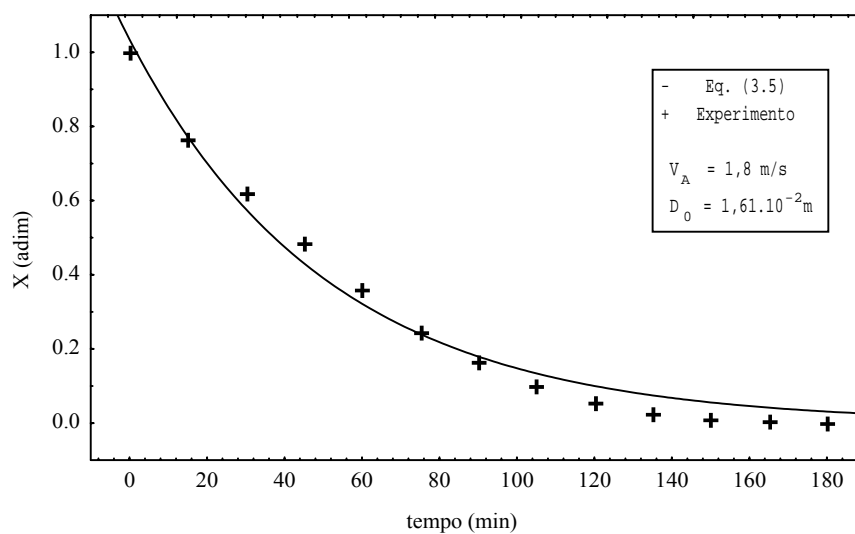


Figura 4.11: X em função do tempo de secagem.

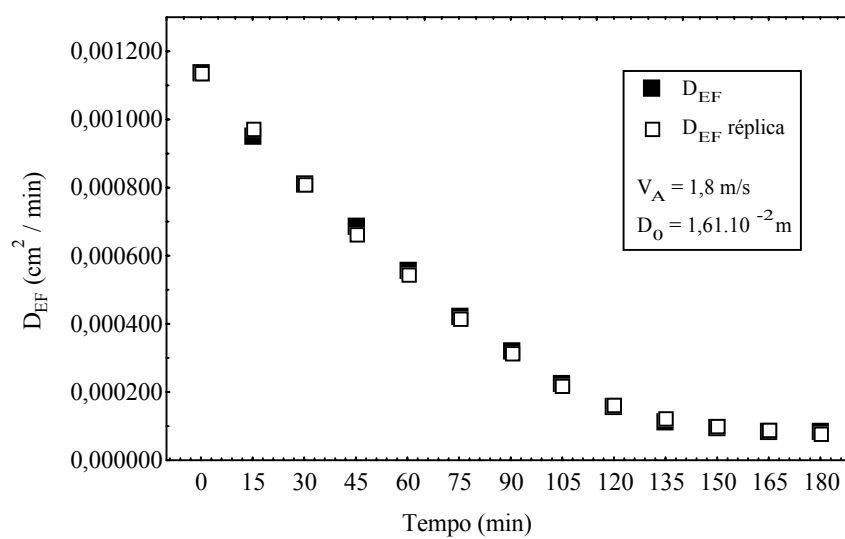


Figura 4.12: D_{EF} em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica.

Tabela 4.6: Parâmetros estatísticos da análise de regressão de um experimento e sua réplica, para a determinação da constante de secagem K_{sec} e para a verificação da reprodutibilidade de D_{EF} , com referência ao experimento mostrado nas Figuras (4.11) e (4.12).

Parâmetro		Desvio Padrão	Teste-t	Coefficiente de correlação	Variância explicada (%)	P Valor	Nível de significância (%)
Eq. (3.5)	$K_{sec} = 0,01946$ (min^{-1})	0,0010	18,88	0,9932	98,65	< 0,001	5
	A = 1,035	0,033	31,17			< 0,001	
	$K_{sec} = 0,01966$ (min^{-1})	0,0012	16,92	0,99146	98,30	< 0,001	5
	A = 1,053	0,039	27,3			< 0,001	
Eq. (3.23)	a = 0,9992	0,0056	178,21	0,9995	99,90	< 0,001	5

O bom ajuste da Equação (3.5) às determinações de X em função do tempo, Figura (4.11), pode ser avaliado visualmente pela proximidade das determinações experimentais com os valores previstos pela Equação (3.5).

Este bom ajuste é confirmado estatisticamente, tanto para a determinação inicial, quanto para a réplica, como pode ser observado a partir da Tabela (4.6), com baixos valores de desvio padrão e altos valores do teste t e variância explicada, para os parâmetros A e K, respectivamente, com 95 % de confiança.

A reprodutibilidade da difusividade efetiva pode ser avaliada visualmente, na Figura (4.12), pela proximidade dos pontos e, também, assegurada pelo bom ajuste do modelo estatístico utilizado para verificar a reprodutibilidade, Equação (3.23).

Na Tabela (4.6) o valor estimado para o parâmetro a , com relação à difusividade, é aproximadamente igual à unidade, o que indica que a determinação inicial de D_{EF} foi, em média, igual à determinação de D_{EF} da réplica, sendo que, a validade estatística deste parâmetro é assegurada com um desvio padrão 178,2 vezes menor que este parâmetro, teste t .

O valor da variância explicada foi muito bom, evidenciando ausência de valores discrepantes, considerando-se, então, que D_{EF} apresentou a mesma dependência com o tempo de secagem, quando comparada com a determinação replicada, com 95 % de confiança.

4.5.2 Número de Biot de massa

Na Figura (4.13), apresentam-se os resultados típicos obtidos para o número de Biot de massa, Bi_m , em função do tempo de secagem, para um experimento e a sua réplica.

Na Tabela (4.7), tem-se a os parâmetros estatísticos obtidos através da análise de regressão com a Equação (3.23), para a determinação da reprodutibilidade de Bi_m .

A reprodutibilidade do número de Biot de massa, Figura (4.13), pode ser avaliada visualmente pela proximidade dos valores no período inicial do processo, com pequenas diferenças entre os resultados no final do processo.

Observa-se a mesma dependência entre as réplicas, com o decorrer do tempo, com uma inflexão durante o processo, caracterizada pela passagem para o período cuja resistência predominante é a difusiva, ou seja, Bi_m maior que 30, de acordo com HERNÁNDEZ et al. (2000).

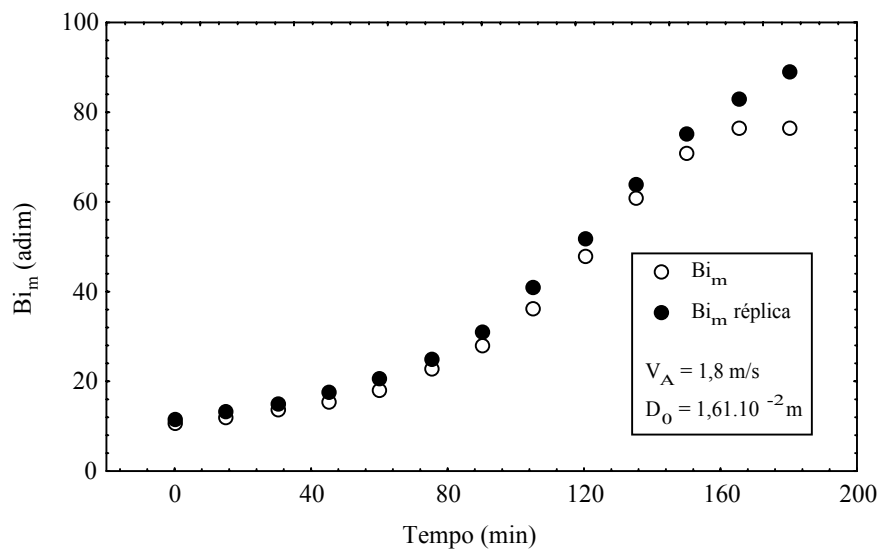


Figura 4.13: Bi_m em função do tempo de secagem, para um experimento e sua réplica

Tabela 4.7: Parâmetros estatísticos da análise de regressão para a determinação da reprodutibilidade do número de Biot de massa, com referência ao experimento mostrado na Figura (4.13).

Parâmetro	Desvio Padrão	Teste-t	Coefficiente de correlação	Variância explicada (%)	P Valor	Nível de significância (%)
Eq. (3.23) a = 0,93	0,0064	144,9	0,9991	99,83	< 0,001	5

Na Tabela (4.7) o valor estimado para o parâmetro a, com relação ao número de Biot de massa, é igual a 0,93; o que indica que a determinação inicial de Bi_m foi, em média, 7 % menor que a determinação de Bi_m replicada, sendo que, a validade estatística deste parâmetro é assegurada com um desvio padrão 144,9 vezes menor que este parâmetro (teste t).

O valor da variância explicada foi alto, mostrando que os valores obtidos pelo modelo estatístico (Equação 3.23) explicam os dados experimentais.

O fato do número de Biot de massa na determinação inicial ser 7 % menor que a réplica também pode ser justificado, pela propagação do erro de medidas derivadas, porém, esta discrepância foi considerada pequena.

Assim sendo, considerou-se que Bi_m reproduziu a mesma dependência com o decorrer do processo, podendo ser utilizado como parâmetro para se avaliar a deterioração do gel, conforme a predominância das resistências à transferência de massa via mecanismos convectivo e difusivo.

4.6. REPRESENTAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS ATRAVÉS DOS MODELOS DA LITERATURA

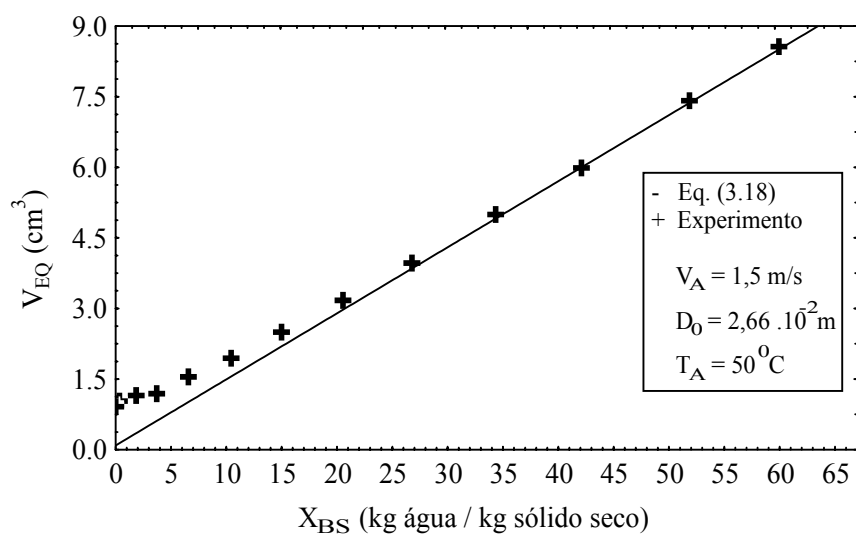
Segue-se neste item a verificação de ajuste do modelo de encolhimento linear às determinações experimentais de volume equivalente, V_{EQ} , realizadas pelo método intermitente de aquisição de dados e, também, para determinações realizadas pelo método contínuo, com o objetivo de enfatizar a decisão anterior pelo método intermitente.

- Equação para a representação do volume:

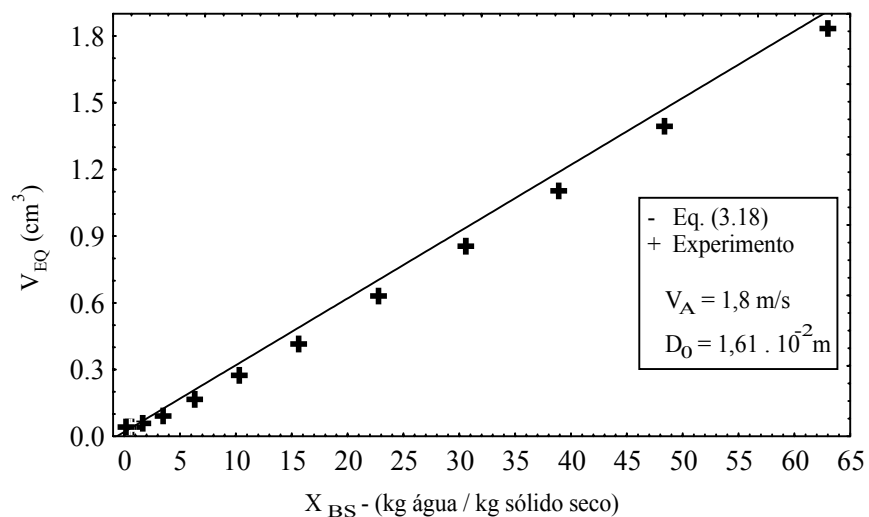
Têm-se apresentados nas Figuras (4.14.a) e (4.14.b) os resultados típicos do ajuste das determinações experimentais de V_{EQ} ao modelo de encolhimento linear, Equação (3.18).

$$V_g = (m_s / \rho_s) \cdot [1 + (\rho_s / \rho_w) X_{BS}] \quad (3.18)$$

Na Tabela (4.8) são reunidos os parâmetros estatísticos da avaliação do ajuste das determinações de V_{EQ} com a Equação (3.18).



(a)



(b)

Figura 4.14: V_{EQ} em função de X_{BS} . (a) Método contínuo. (b) Método intermitente.

Tabela 4.8 : Parâmetros estatísticos da avaliação de ajuste de V_{EQ} com a Equação (3.18), referentes aos experimentos das Figuras (4.14.a) e (4.14.b).

Método	Parâmetro a (adim.) Eq. (3.23)	Erro Padrão	Teste t	Coefficiente de correlação	Variância explicada (%)	P Valor	Nível de significância %
Contínuo	1,033	0,037	28,103	0,978	95,611	< 0,001	5
(réplica)	0,840	0,028	29,767	0,979	95,796	< 0,001	5
Intermitente	0,929	0,0087	106,73	0,999	99,80	< 0,001	5
(réplica)	0,935	0,0097	96,48	0,999	99,77	< 0,001	05

Para o experimento da Figura (4.14.a) foi utilizada uma concentração de ágar de 1,5 % e, para o experimento da Figura (14.b), a concentração de 3 %, na qual obteve-se menor aderência da amostra na haste da plataforma de sustentação da amostra.

Tem-se uma boa concordância entre os valores experimentais e a equação do modelo de encolhimento linear, para o experimento da Figura (4.14.b), realizado pelo método intermitente, assegurado pela alta variância explicada e o parâmetro $a = 0,929$, para a determinação inicial e $0,935$, para a réplica.

Porém, para o experimento da Figura (4.14.a) os pontos se afastam do modelo para valores de X_{BS} inferiores a 10, o que pode ser explicado pelo fato do gel aderir ao fio, ao qual a amostra estava suspensa no secador e, a inclusão do volume aderido, acarretou em um erro experimental na medida de área projetada.

Isto pode ser observado pelo valor da variância explicada na Tabela (4.8), validando a decisão anterior de adotar o método intermitente para a aquisição de dados.

O método de medida do encolhimento para o experimento da Figura (4.14.b) não mede este volume aderido e os dados se ajustam melhor à

equação do modelo de encolhimento linear, ao longo de todo o processo, comprovado pela variância explicada maior que 99%, conforme a Tabela (4.8).

Porém, na Figura (4.14.b), os pontos situam-se abaixo da linha prevista pela Equação (3.18), devido ao fato de que o volume aderido não foi mensurado, o que pode ser avaliado quantitativamente pelo parâmetro a , na Tabela (4.8), o qual indica que V_{EQ} foi, em média, 7,1 % menor que o volume previsto pela Equação (3.18), para a determinação inicial, e 6,5 % menor para a réplica.

Considerou-se, então, a Equação (3.18) para representar o encolhimento do sistema gel estudado, para a análise da cinética de secagem e evolução da forma da amostra, tendo como base a análise estatística e referências como IGLESIAS et al. (1993) e ROQUES et.al. (1994), os quais também utilizaram sistemas géis de dois componentes.

4.7 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS

Tendo-se avaliado as reprodutibilidades das medidas e das determinações efetuadas durante a experimentação, seguem-se as análises da evolução da forma e da deterioração da estrutura da amostra, em conjunto com a cinética de secagem do sistema gel.

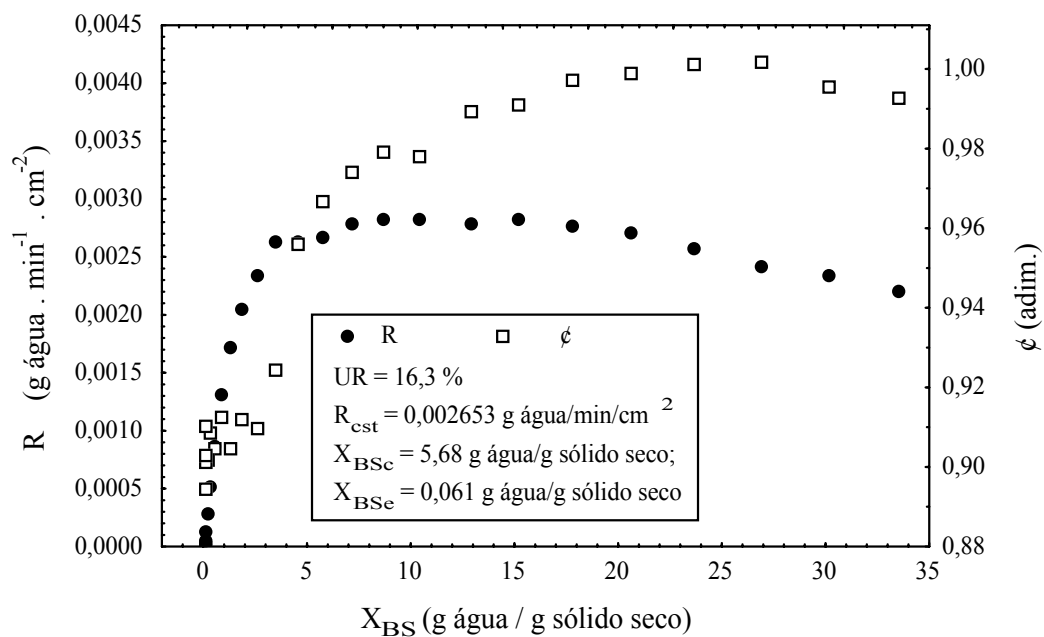
Os resultados típicos dos experimentos ilustrados nas figuras que se seguem foram agrupados de acordo com a velocidade do fluido, $V_A = 2,0$ m/s e $V_A = 1,0$ m/s, para dois diâmetros iniciais do sistema gel, $D_0 = 2,66$ cm e $D_0 = 1,61$ cm.

A temperatura do ar de secagem T_A foi mantida aproximadamente constante em $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a concentração inicial de sólidos na mistura do sistema gel foi de 3 % em massa (b.u.).

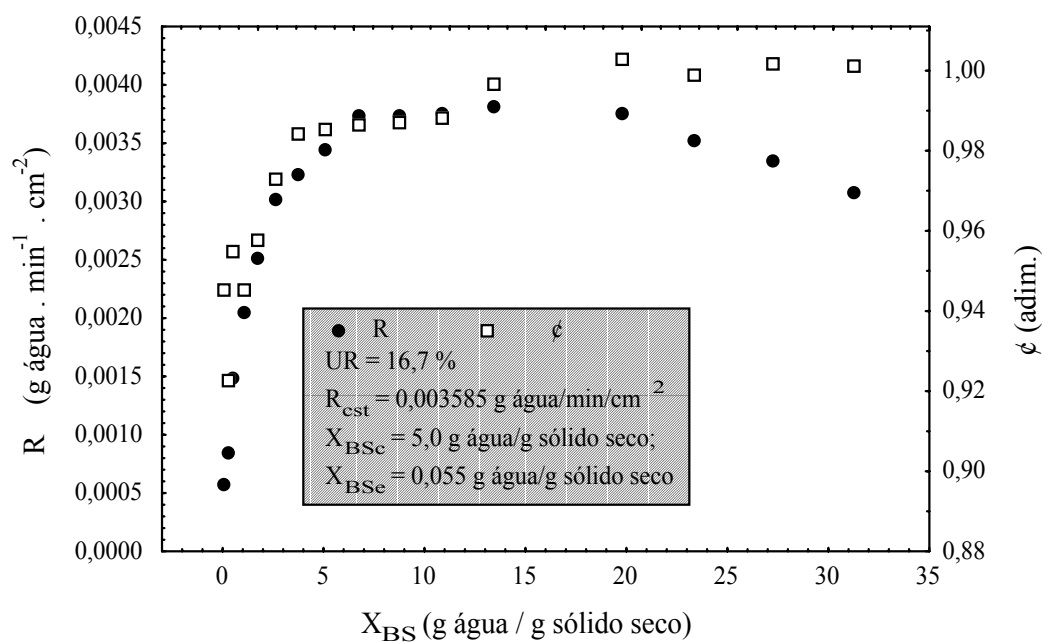
4.7.1 Análise da dependência da circularidade com os períodos de secagem

Nas Figuras (4.15) e (4.16) tem-se os resultados típicos de densidade de fluxo de massa (R) e da circularidade das amostras (ϕ) em função da umidade média em base seca, X_{BS} , onde é possível avaliar a dependência do fator de forma circularidade, em relação aos períodos de secagem.

Apresentam-se, também, nas Figuras (4.15) e (4.16), as propriedades da amostra, como a umidade crítica (X_{BSc}), o diâmetro inicial (D_0), a umidade de equilíbrio dinâmico (X_{BSe}) e as variáveis de processo, como a densidade de fluxo de massa no período de taxa constante (R_{cst}), a temperatura (T_A), umidade relativa (UR) e a velocidade (V_A) do ar de secagem.



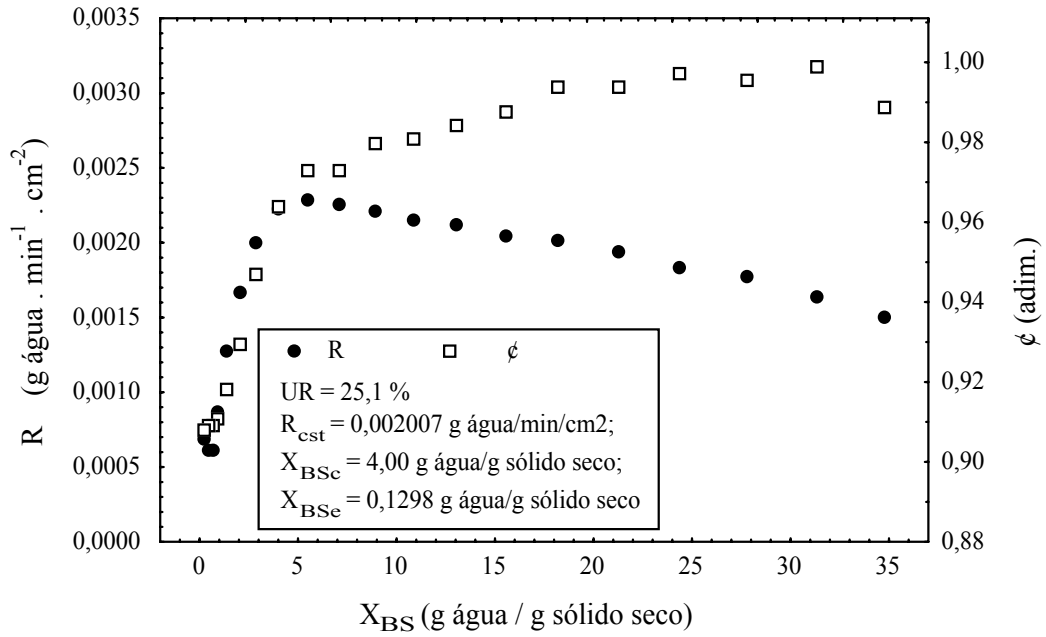
(a)



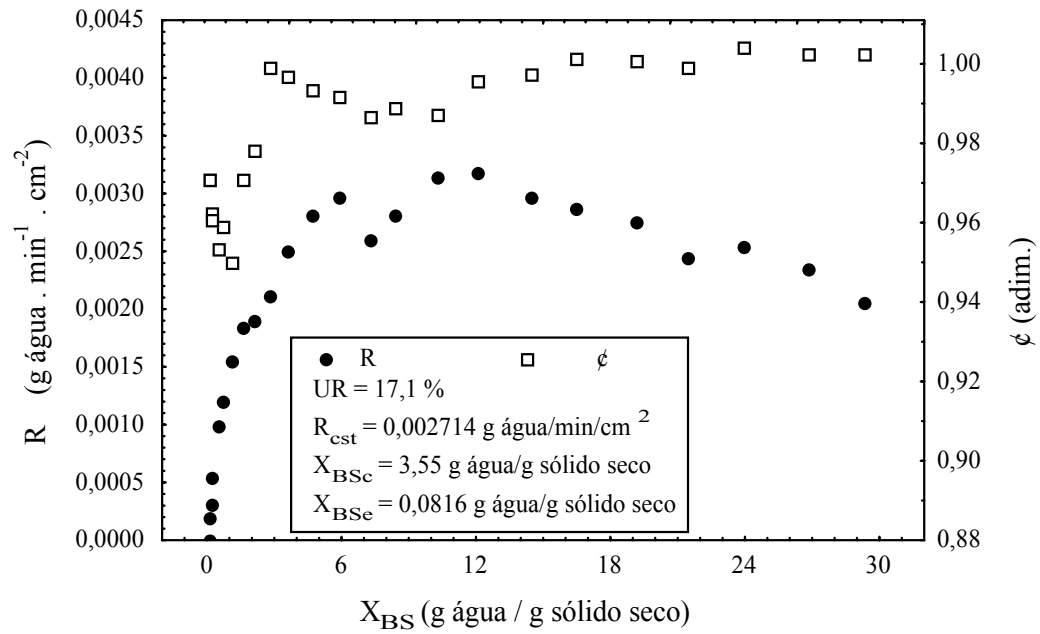
(b)

Figura 4.15: R e ϕ em função de X_{BS} , com $V_A = 2,0 \text{ m/s}$. (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. (b)

$$D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2} \text{ m}.$$



(a)



(b)

Figura 4.16: R e ϕ em função de X_{BS} , com $V_A = 1,0$ m/s. (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m. (b)

$$D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2} \text{ m.}$$

A observação geral que pôde ser feita através das Figuras (4.15) e (4.16) é que ϕ manteve-se aproximadamente constante durante o período de taxa constante de secagem, decrescendo acentuadamente para teores de umidade inferiores ao valor crítico.

Esta dependência pode ser justificada pelo fato de que durante o período de taxa constante de secagem, a análise é concentrada em relação ao transporte de umidade, sem a formação de perfis bidimensionais.

Para valores de umidade inferiores ao crítico, tem-se um decréscimo de ϕ , com a degradação da forma das amostras evoluindo conforme a formação de perfis bidimensionais de umidade, no período de taxa decrescente.

A formação de perfis pode ser explicada pela separação do escoamento de ar na camada limite entre o sólido e o fluido, o que conduz a maiores coeficientes de transferência de massa por convecção na região anterior à separação, em comparação aos da região posterior, que por sua vez causam uma densidade de fluxo de massa (R) pontual.

A formação de perfis bidimensionais promove tensões internas na estrutura do gel, para teores de umidade inferiores ao valor crítico, como descrito por MRANI et al. (1997).

Pôde ser observado também em todos os experimentos, o desenvolvimento de uma fissura na superfície da esfera, localizada na região posterior à separação do escoamento, na camada limite entre o sólido e o fluido, sendo que, o aparecimento desta fissura ocorre simultaneamente com o decréscimo da circularidade.

A localização desta fissura é uma importante observação, pois evidencia que, as camadas externas da região anterior à separação do escoamento atingem a umidade para a transição vítrea antes das camadas externas da região posterior, gerando tensões na estrutura do gel e o rompimento no ponto de estagnação posterior, onde se tem a umidade mais elevada e, conseqüentemente, menor resistência mecânica da amostra.

Entende-se que a evolução desta fissura superficial, durante o processo, está relacionada com o decréscimo de ϕ no período de taxa decrescente.

Analisando-se as Figuras (4.15) e (4.16), constata-se que os maiores teores de umidade crítica, para um mesmo diâmetro inicial, ocorreram para maiores valores de R_{cst} , o que pode ser justificado pela formação de uma camada impermeabilizadora na superfície da amostra, devido à alta taxa de transferência de massa.

Também, para uma mesma velocidade do fluido, a amostra de maior diâmetro, atinge um teor de umidade crítica superior ao da amostra de menor diâmetro inicial, o que pode ser explicado pelo caminho da difusão de massa, o qual é maior nas amostras com maior diâmetro.

Estas são observações importantes, pois, independente do diâmetro inicial e da velocidade do ar de secagem utilizados, conforme pode ser verificado nas Figuras (4.15) e (4.16), o decréscimo acentuado da circularidade, que foi de 1 até em torno de 0,9, sempre coincidiu com a região onde a amostra atingiu o teor de umidade crítica.

Desta forma, amostras esféricas submetidas ao processo de secagem com camada espessa e altas taxas de secagem, começam a sofrer

degradação em teores de umidade ainda altos, com relação ao teor de umidade de armazenamento de materiais biológicos, que fica em torno de 10 % (b.u.) ou 0,111 (b.s.) g água / g sólido seco.

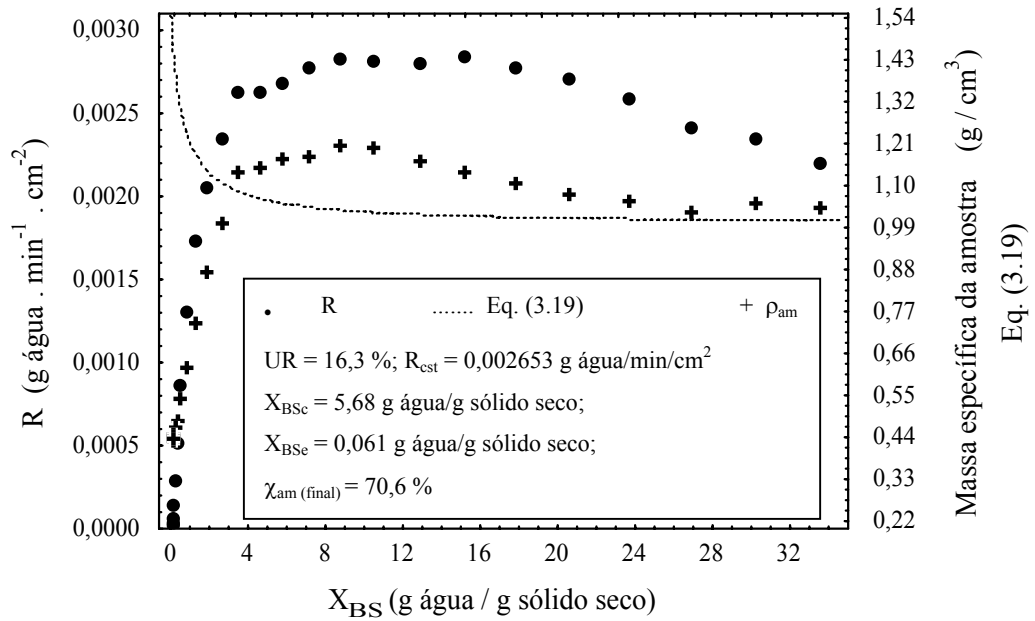
Observa-se, ainda nas Figuras (4.15) e (4.16), que a circularidade final das amostras com mesmo diâmetro inicial, foi menor para maiores valores de R_{cst} , e também menor para maiores valores de diâmetro inicial, mantendo-se a mesma velocidade.

Isto era esperado, pois maiores taxas de secagem ocorrem com uma maior velocidade do fluido, e quanto maior a velocidade do fluido e o diâmetro das amostras, maior é o efeito da separação do escoamento na camada limite nos coeficientes de transferência de massa por convecção pontuais, ocorrendo formação de perfis internos de umidade e a degradação do gel.

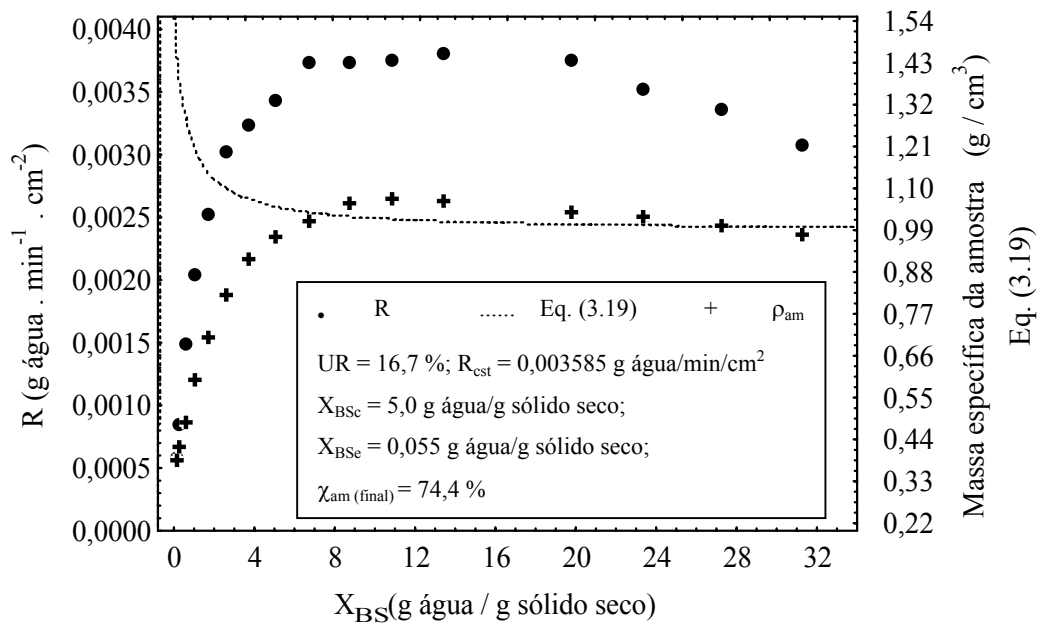
Constatou-se que a circularidade é um importante fator de forma que permite avaliar em que período do processo a amostra começa a deteriorar-se, já que este fator de forma está relacionado com a degradação física da estrutura, através da formação de fissuras

4.7.2 Análise da dependência da massa específica simulada e experimental com os períodos de secagem

Nas Figuras (4.17) e (4.18), tem-se os resultados típicos de densidade de fluxo de massa, da massa específica aparente das amostras (ρ_{am}), e o modelo para a massa específica do gel, Equação (3.19), todos em função da umidade em base seca. Constam também nestas figuras, além das propriedades da amostra e variáveis de processo citadas anteriormente, a porosidade final das amostras, $\chi_{am (final)}$, calculada pela Equação (3.20).

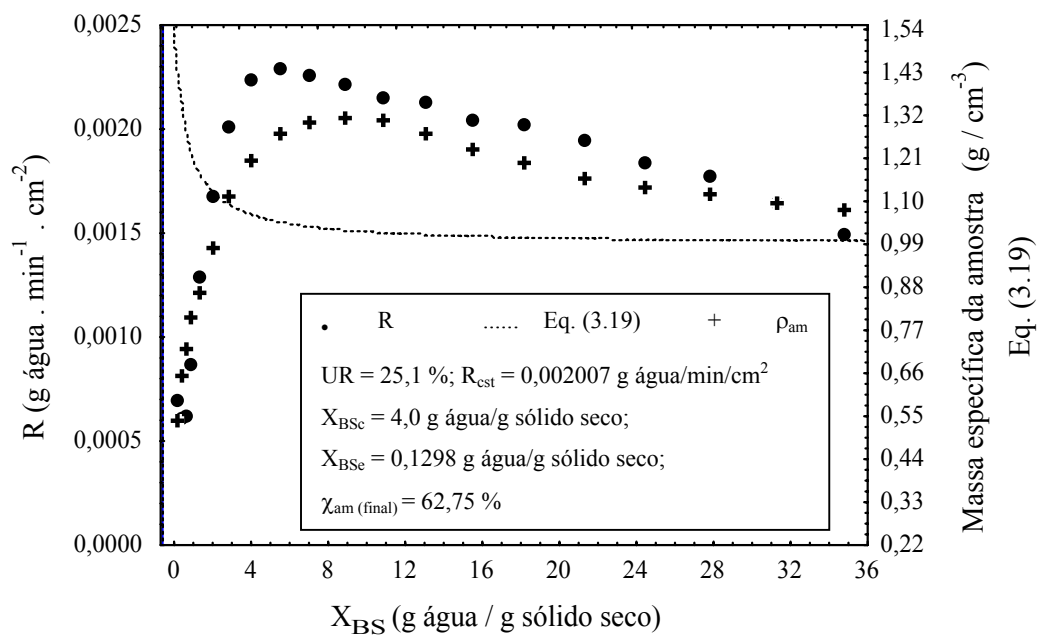


(a)

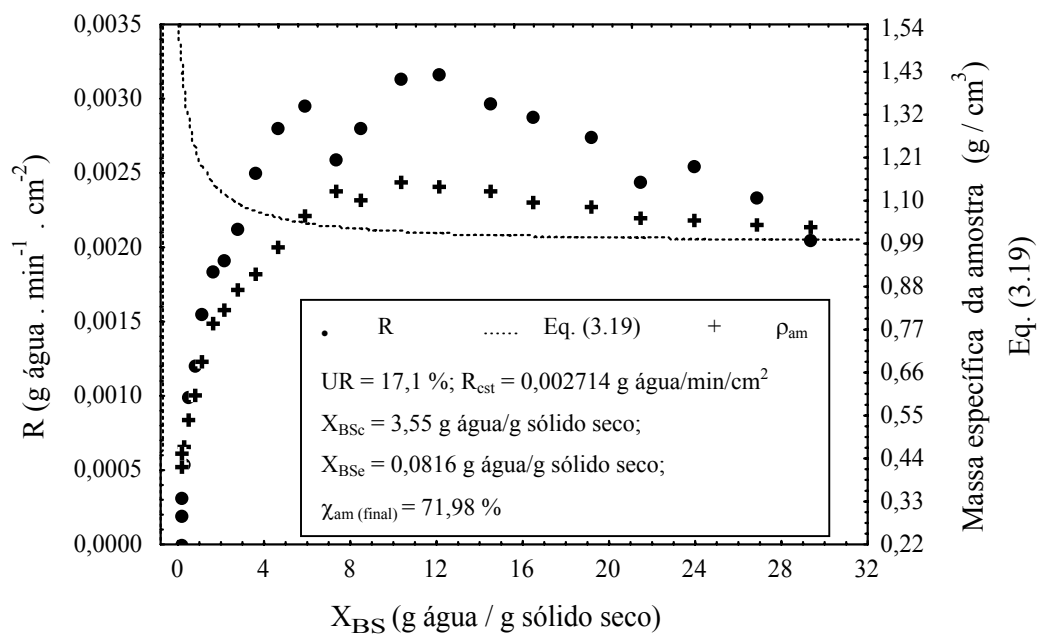


(b)

Figura 4.17: R e ρ_{am} , obtida dos dados experimentais e pela Equação (3.19), em função de X_{BS} , com $V_A = 2,0$ m/s. (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m. (b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.



(a)



(b)

Figura 4.18: R e ρ_{am} obtida dos dados experimentais e pela Equação (3.19), em função de X_{BS} , com $V_A = 1,0$ m/s. (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m. (b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.

A importante avaliação é que ρ_{am} , de forma análoga à circularidade, decresce para teores de umidade inferiores ao valor crítico, em contradição com a Equação (3.19), que prevê uma massa específica aproximadamente constante, durante o período de taxa constante, e um aumento para teores de umidade inferiores ao valor crítico, atingindo valores próximos à massa específica do ágar sólido (1,551 g / cm³).

Este decréscimo na massa específica aparente, no período de taxa decrescente, pode ser justificado, pelo desenvolvimento da fissura interna à estrutura da amostra, o que promove a formação de poros, conforme foi observado, seccionando-se as amostras no final dos experimentos e constatando-se que estavam ocas, sendo que, fato similar ocorreu com GOGUS & LAMB (1998), na secagem de sistemas géis.

Isto está de acordo com a porosidade final das amostras, $\chi_{am (final)}$, determinada pela Equação (3.20), conforme pode ser observado nas Figuras (4.17) a (4.18), sendo que a porosidade final ficou em uma faixa de 62,7 a 74,4 %, devido à cavidade interna.

O desenvolvimento desta fissura interna pode ser explicado, pela extinção do encolhimento nas camadas superficiais da região anterior e posterior à separação do escoamento. Como o interior da amostra continua a encolher, com o transporte de umidade, por não ter atingido a transição vítrea, surge um rompimento no interior da amostra.

Observa-se ainda, nas Figuras (4.17) e (4.18), que, a porosidade final das amostras foi maior para os maiores valores de R_{cst} , podendo-se inferir

que, quanto maior a taxa de secagem, maiores são as condições favoráveis à formação da cavidade central.

O aumento de porosidade, indicado pelo decréscimo da massa específica aparente da amostra, ρ_{am} , também é um parâmetro importante para avaliar-se a deterioração da amostra durante o processo, surgindo em função da formação de perfis de umidade.

4.7.3 Análise da dependência da relação de diâmetros com os períodos de secagem

Nas Figuras (4.19) e (4.20), encontram-se apresentados os resultados típicos da densidade de fluxo de massa e da relação de diâmetros (D_F), em função da umidade em base seca, onde é possível avaliar a dependência da relação de diâmetros com os períodos de secagem.

Tem-se, também, nestas figuras, além das propriedades da amostra e variáveis de processo citadas anteriormente, o ângulo de separação do escoamento na camada limite fluidodinâmica entre o sólido e o fluido, calculado pela Equação (3.20), para o início e o final do processo.

A relação de diâmetros (D_F) é uma possibilidade de se analisar a efeito da separação do escoamento na camada limite na secagem e encolhimento.

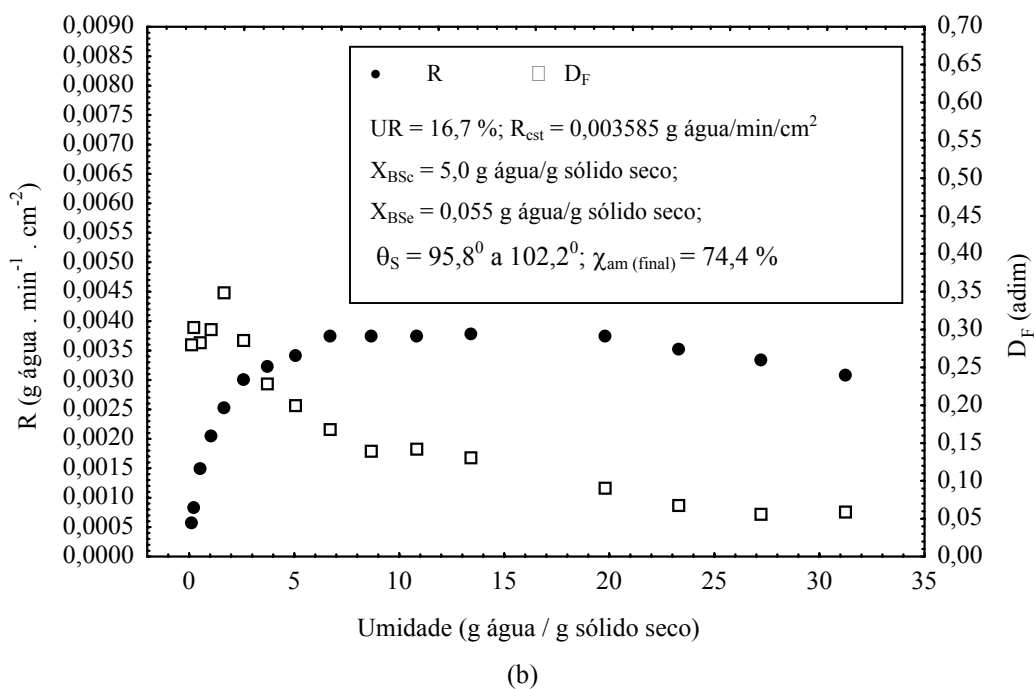
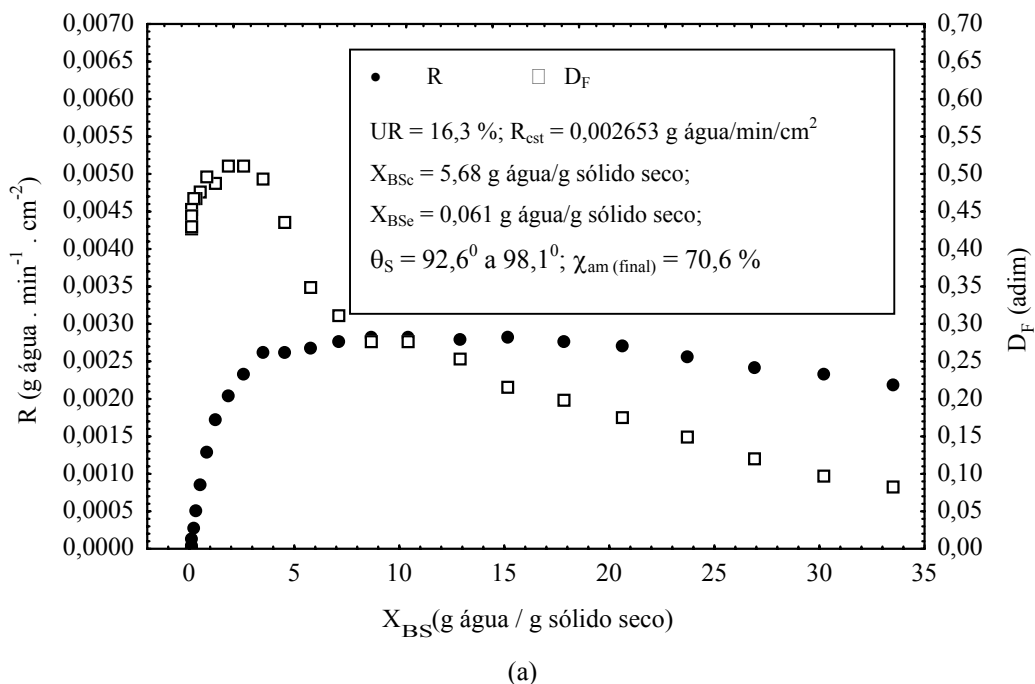
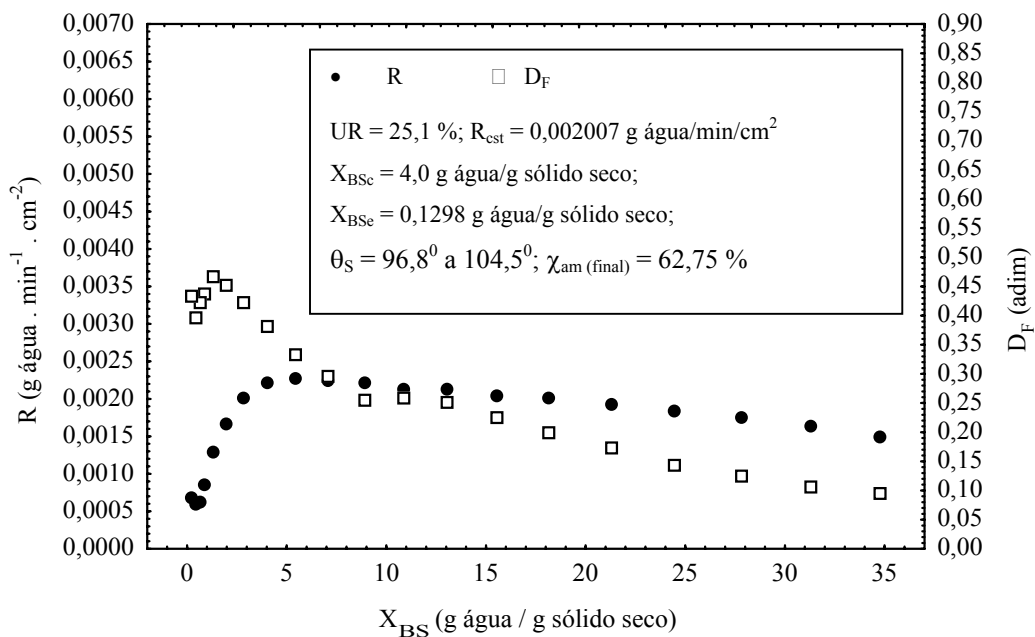
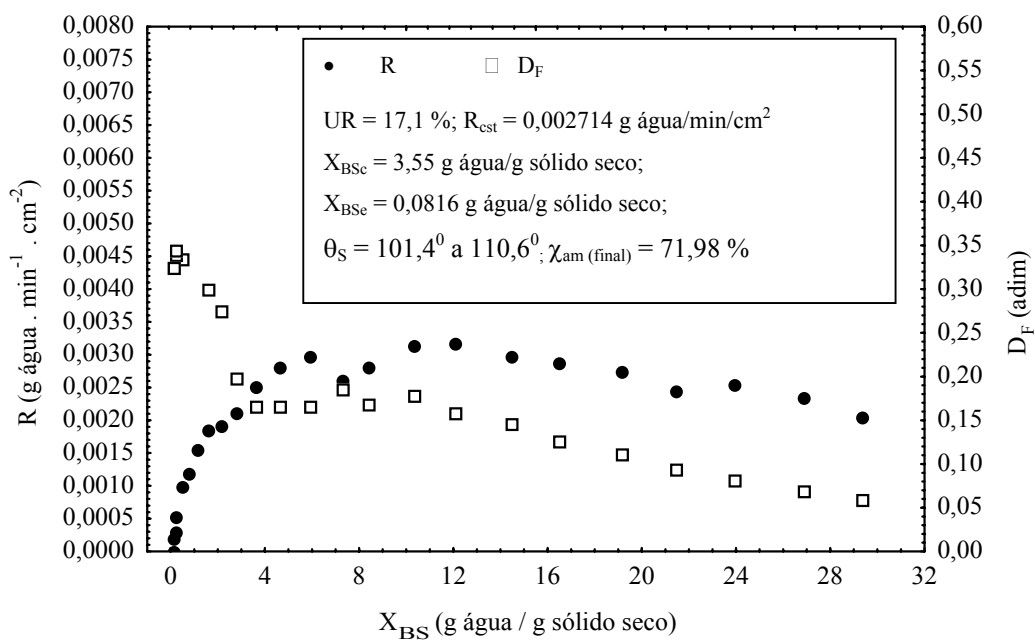


Figura 4.19: R e D_F em função de X_{BS} , com $V_A = 2,0$ m/s. (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m.

(b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.



(a)



(b)

Figura 4.20: R e D_F em função de X_{BS} , com $V_A = 1,0$ m/s. (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m.

(b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.

Uma importante informação que pode ser obtida a partir das Figuras (4.19) e (4.20) é com relação à influência dos períodos de secagem na variação de D_F .

Durante o período de taxa de secagem constante, D_F aumenta moderadamente até a amostra atingir um teor de umidade próximo ao valor de umidade crítica, em comparação com a grande quantidade de água que é removida do material neste período.

Tomando o experimento mostrado na Figura (4.19.a) como exemplo, o valor de D_F , no ponto correspondente à umidade crítica, representa um aumento de 310% em relação ao valor de D_F inicial, enquanto a umidade crítica representa um decréscimo de 83,02% do teor de umidade, em relação à X_{BS0} .

Em contradição, deste estado em diante, até a fase inicial do período de taxa decrescente de secagem, a relação D_F representa um aumento de 192 % em relação à D_F inicial, enquanto o decréscimo na umidade é de 11,5 % em relação a X_{BS0} .

Durante o restante do período de taxa decrescente, a relação D_F diminui para 0,432 até o final do processo, mantendo, mesmo assim, um valor alto quando comparado com o D_F inicial de 0,085.

Esta dependência de D_F pôde ser constatada em todos os experimentos como os mostrados nas Figuras (4.19) e (4.20), independente dos valores de V_A e D_0 , e pode ser justificada pela existência de uma taxa de secagem pontual, pela variação da resistência à difusão de umidade no interior do material e pela ação da força de arraste do fluido sobre a amostra, a qual é devida ao atrito entre o fluido e o sólido e, também, devida à forma da amostra.

A relação entre os diâmetros aumenta durante a taxa constante de secagem, devido à diferença entre os coeficientes de transferência de massa por convecção, para as regiões anterior e posterior da esfera. Aumenta moderadamente durante o período de taxa constante, devido à resistência ao transporte de umidade no interior do material ser pequena, indicando que os perfis de umidade bidimensionais ainda são tênues. Porém como a amostra ainda possui um teor de umidade alto, e por consequência uma baixa resistência mecânica, a força de arraste também contribui para a variação de D_F neste período.

No entanto, como a taxa de secagem na realidade é pontual, quando a região anterior à separação do escoamento atinge o período de taxa decrescente, esta relação aumenta rapidamente, devido ao encolhimento não uniforme da amostra. Quando a região posterior atinge o período de taxa decrescente, esta relação começa a diminuir. Esta dependência pode ser justificada, devido à região anterior da esfera atingir a transição vítrea antecipadamente à região posterior, durante o período de taxa decrescente.

No entanto, D_F se mantém, no período final da secagem, num valor alto, indicando que a secagem não uniforme ocorreu durante o processo, ocasionando a formação de uma rachadura superficial na região posterior e a cavidade interna, como explicado anteriormente. Desta forma, D_F também é um parâmetro indicativo da deterioração da qualidade.

Observou-se, também, que o valor máximo que D_F atingiu corresponde às amostras com o maior D_0 , e, para um mesmo diâmetro inicial, D_F máximo correspondeu ao menor ângulo de separação, como pode ser visualizado a partir das Figuras (4.19) e (4.20).

Esta observação é coerente, pois, quanto maior o diâmetro inicial, maior o caminho da difusão de massa no interior do sistema e maior o efeito da taxa de secagem pontual na deformação das amostras. De maneira análoga, quanto menor o ângulo de separação, maior a variação da taxa de secagem pontual ao longo da superfície da esfera, partindo do ponto de estagnação anterior.

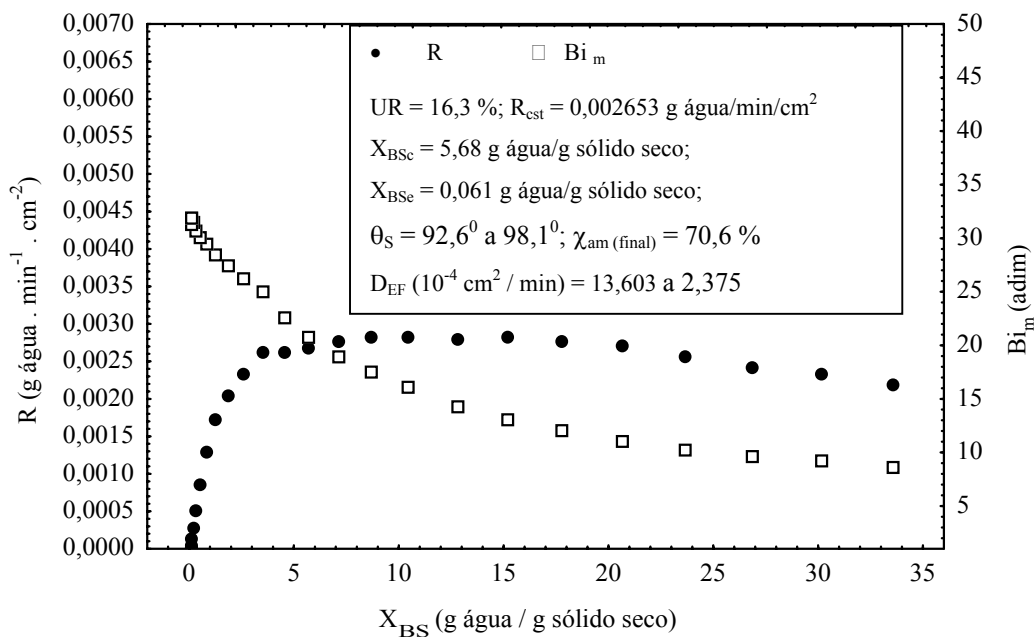
Avaliou-se, então que a relação de diâmetros D_F é um importante fator de forma, sendo que, sua relação com a taxa de secagem, está de acordo com as observações feitas a respeito da circularidade e da massa específica aparente.

4.7.4 Análise da dependência do número de Biot com os períodos de secagem

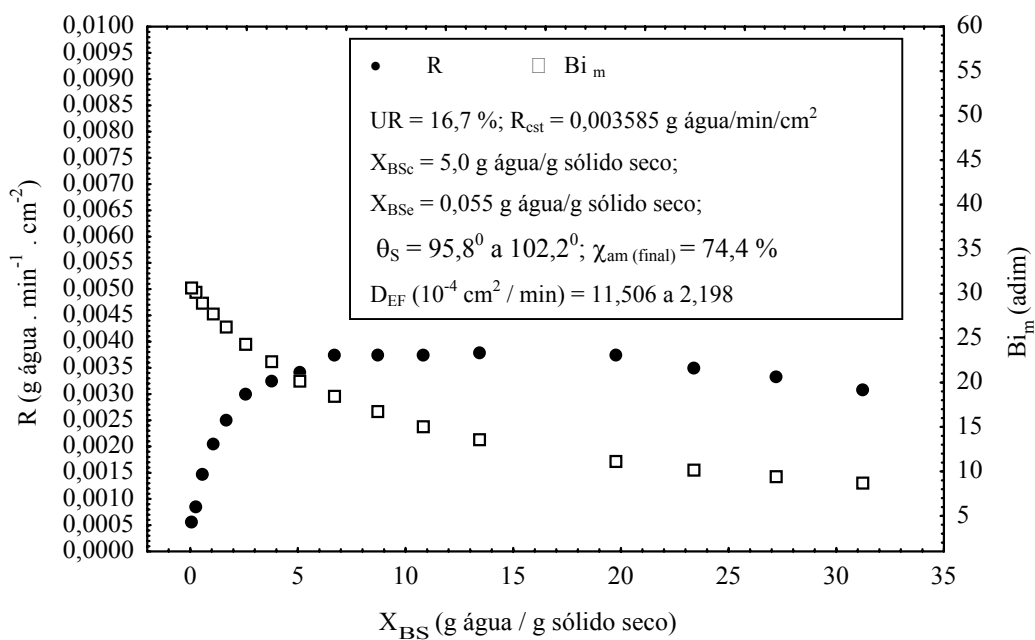
Os resultados típicos da densidade de fluxo de massa e do número de Biot de massa, em função da umidade em base seca, estão apresentados nas Figuras (4.21) e (4.22), onde é possível avaliar a dependência do número de Biot com os períodos de secagem.

As Figuras (4.21) a (4.22), contêm, além das propriedades da amostra e variáveis de processo citadas anteriormente, a faixa de valores da difusividade de massa efetiva, para o início e o final do processo de secagem.

O número de Biot de massa relaciona a resistência à transferência de massa por difusão com a resistência à transferência de massa por convecção, e é apresentado aqui tendo em vista validar fisicamente as discussões já realizadas.



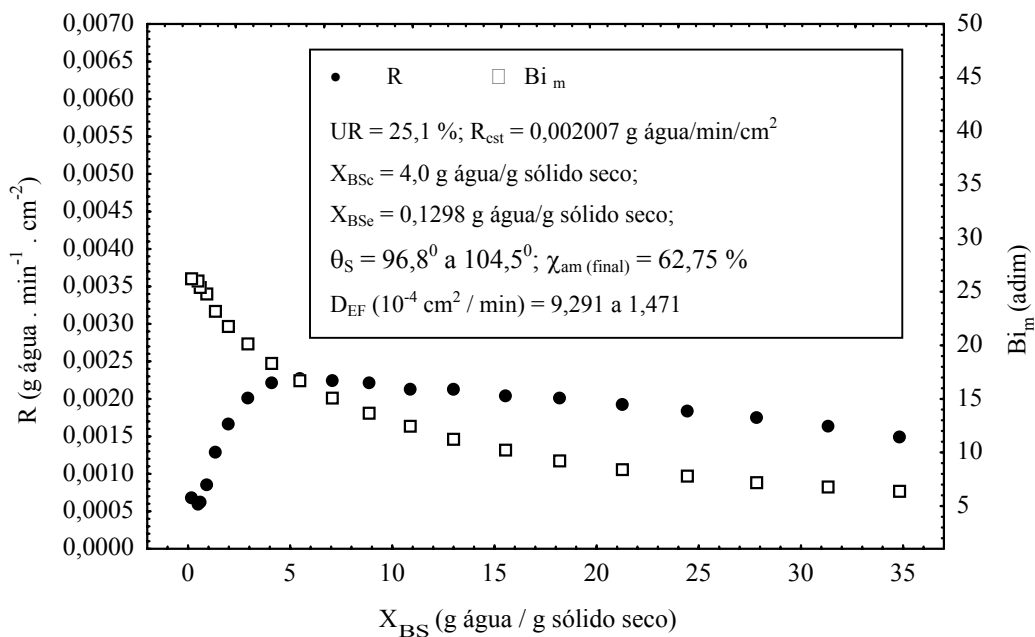
(a)



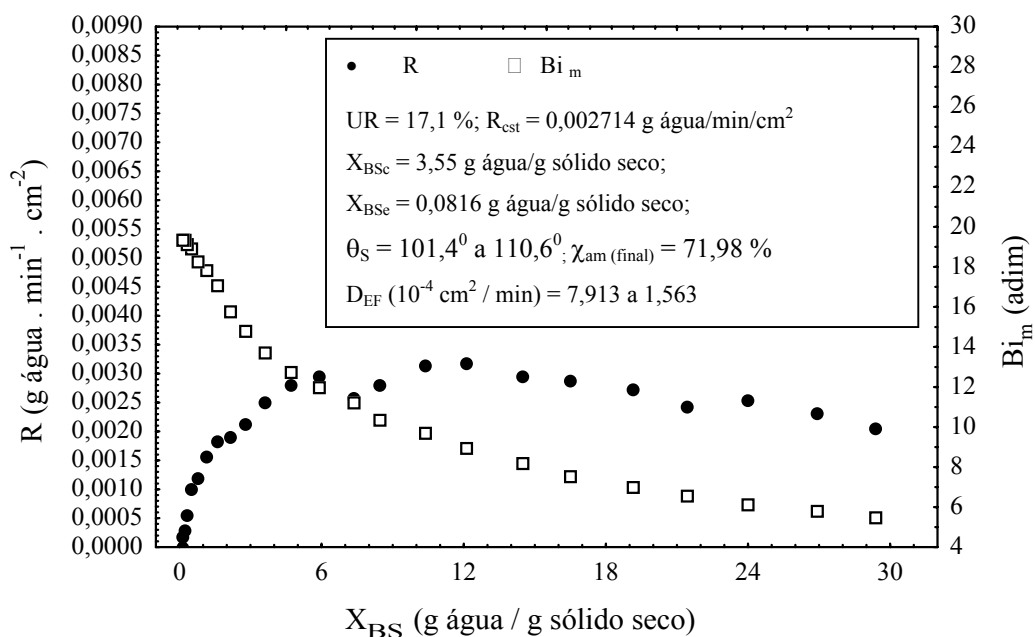
(b)

Figura 4.21: R e Bi_m em função de X_{BS} , com $V_A = 2,0$ m/s. (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m.

(b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.



(a)



(b)

Figura 4.22: R e Bi_m em função de X_{BS} , com $V_A = 1,0$ m/s. (a) $D_0 = 2,66 \cdot 10^{-2}$ m.

(b) $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m.

Observa a partir das Figuras (4.21) e (4.22) que durante o período de taxa constante de secagem, o número de Biot apresenta uma variação pequena, em relação à grande quantidade de água que é removida do material, indicando que a resistência ao transporte de umidade é predominantemente convectiva, com valores do número de Biot menores que 30, e que a resistência à difusão de água no interior do material é relativamente pequena.

Durante o período de taxa decrescente, tem-se uma acentuada variação do número de Biot, com relação à pequena quantidade de umidade que é removida do material neste período, sendo que, para os experimentos da Figura (4.21), o número de Biot supera o valor de 30 e, para os experimentos da Figura (4.22), atinge valores próximos a este limite.

Isto indica que a resistência ao fenômeno de transferência via difusão de umidade no interior do material aumenta acentuadamente no período de taxa decrescente, pois de acordo com CÓRDOVA et al. (1996) e HERNÁNDEZ et al. (2000), para um número de Biot de massa maior que 30, tem-se que a resistência ao fenômeno de transferência de massa por convecção é desprezível, em comparação com a resistência à transferência de massa por difusão de umidade no interior do material, caracterizando o processo como difusivo. As afirmações de CÓRDOVA et al. (1996) e HERNÁNDEZ et al. (2000) estão de acordo com o que se observa a partir das Figuras (4.21) e (4.22).

Através destas constatações, pode-se inferir que a análise é concentrada com relação ao transporte de umidade durante o período de taxa constante, sem a ocorrência de perfis de umidade.

Já no período de taxa decrescente, pode-se inferir que a resistência ao mecanismo difusivo aumenta, dificultando o transporte de umidade no interior do material, o que favorece à formação de perfis de umidade, sendo então a análise distribuída.

Estas observações a respeito da dependência do número de Biot, com relação aos períodos de secagem, estão de acordo com as observações anteriores feitas sobre o decréscimo da circularidade e da massa específica, e sobre o aumento da relação de diâmetros D_F , assim como, a relação destes parâmetros com os períodos de secagem e com a formação de perfis de umidade.

Entende-se que o número de Biot de massa é um importante adimensional na análise do processo e pode ser relacionado com a evolução da forma da amostra durante o processo de secagem por convecção forçada, combinando os efeitos da velocidade do ar de secagem, das dimensões da amostra e da difusividade efetiva.

4.7.5 Síntese dos fenômenos físicos ocorridos durante a secagem do sistema gel

Finalizando-se esta análise, a Figura (4.23) apresenta uma síntese dos fenômenos físicos que ocorreram com o sistema gel durante a secagem por convecção forçada, para um experimento típico.

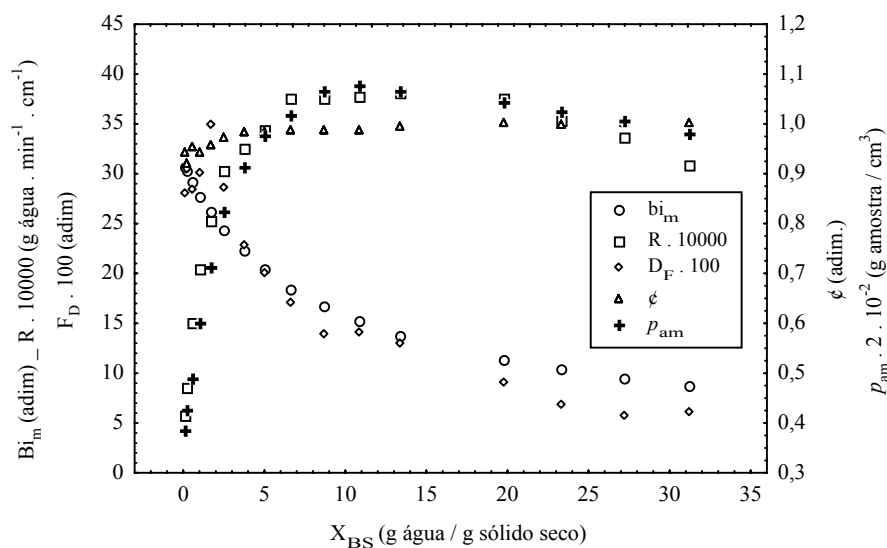


Figura 4.23: R , Bi_m , D_F , ϕ e ρ_{am} em função de X_{BS} , com $V_A = 2,0$ m/s, $D_0 = 1,61 \cdot 10^{-2}$ m, $T_A = 50^0\text{C}$ e $UR = 16,7$ %.

A partir da Figura (4.23) pode-se observar de forma conjunta a dependência das grandezas físicas e adimensionais estudados com os períodos de secagem, constatando-se que o período de taxa de secagem decrescente é a fase crucial do processo, onde a evolução da forma, a degradação das amostras e a resistência difusiva à transferência de massa possuem as suas maiores variações, em comparação com a pequena quantidade de água que é removida do material durante este período.

Pode-se, então, afirmar que o período de taxa decrescente é a etapa mais crítica do processo de secagem por convecção forçada, e a que mais requer pesquisas para o desenvolvimento dos processos de secagem, para que se possa obter produtos com o mínimo de deterioração da sua integridade física.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Com base no objetivo proposto e diante dos resultados obtidos neste trabalho sobre a secagem das amostras de géis, têm-se, para as condições operacionais utilizadas, as conclusões descritas a seguir:

A composição para o sistema gel esférico, utilizando-se como único componente sólido o ágar, nas concentrações de 1,5% e 3% (b.u.), foi a que permitiu analisar, entre as misturas estudadas, o efeito do escoamento do fluido na camada limite, no transporte de umidade, encolhimento e na evolução da forma das amostras. O amido e a celulose impediram a observação da ocorrência do encolhimento local, levando a determinações aproximadamente constantes dos fatores de forma estudados.

A moldagem e geleificação das amostras, em moldes esféricos com extração manual, foi possível com a utilização de um ágar com força de trabalho igual a 1%. Para a construção de sistemas géis multicomponentes é necessária a utilização de moldes com extratores.

As metodologias usadas para as determinações das propriedades das amostras e das variáveis de processo foram adequadas para o estudo da secagem.

O método intermitente de aquisição de dados forneceu os melhores resultados em relação ao método direto, permitindo analisar as mudanças nos fatores de forma causadas pelo escoamento de ar, na camada limite entre o sólido e o fluido.

As curvas de densidade de fluxo de massa evidenciaram uma resistência à transferência de massa por convecção predominante na maior parte do processo e, através das determinações de Bi_m , pode-se inferir que em relação aos perfis de umidade, a análise é concentrada no período de taxa constante e distribuída no período de taxa decrescente de secagem.

O período de taxa decrescente começa em teores de umidade mais elevados, conforme se aumenta o diâmetro e a velocidade do ar de secagem, devido à dependência existente entre o caminho da difusão e a taxa de secagem constante, com relação à manutenção da camada de líquido na superfície do material.

O modelo de encolhimento linear representou o volume da amostra, sendo que a avaliação estatística do ajuste evidenciou que as determinações experimentais de V_{EQ} foram, em média, 6,8% menores que o volume previsto pelo modelo de encolhimento linear, para o método intermitente.

As variações da circularidade (ϕ), massa específica aparente (ρ_{am}), relação de diâmetros (D_F) e número de Biot de massa (Bi_m), estão diretamente relacionados com a formação de perfis de umidade bidimensionais no sólido evidenciando a importância da consideração do fenômeno de separação do escoamento, na camada limite entre o sólido e o fluido, e a sua influência no encolhimento e evolução da forma de materiais de geometria esférica, com conteúdos de umidade iniciais em torno de 95% (b.u.).

A secagem por convecção forçada deve ser considerada sob o ponto de vista da camada limite, pois o principal fator para a alteração na integridade física do gel foi atribuído à secagem não uniforme, devida a gradientes

de concentração mais acentuados nas proximidades do ponto de estagnação anterior, do que nas proximidades do ponto de estagnação da região posterior à separação do escoamento do fluido na camada limite.

O presente trabalho é um esforço inicial para um objetivo maior de se modelar matematicamente o processo de secagem convectiva, de modo que se possa simular, não somente a cinética de secagem, perfis de umidade e o encolhimento do material, mas também prever a evolução da forma e a conseqüente degradação de sua integridade física, contribuindo, assim, para a evolução científica dos processos de secagem, por meio de convecção forçada.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados e conclusões obtidos neste trabalho verifica-se a possibilidade da continuidade dos estudos sobre a secagem de amostras de géis, sendo indicadas, a seguir, algumas sugestões para trabalhos futuros:

- avaliar a dependência do encolhimento e dos fatores de forma com relação aos períodos de secagem para outras geometrias, como a cilíndrica e a retangular;

- conduzir o processo de secagem dos sistemas géis, em diferentes geometrias, imersos em um escoamento compreendido na região de Stokes ($Re_D < 1$), onde não há separação do escoamento na camada limite entre o sólido e o fluido. Considerar também a secagem por convecção natural, com a finalidade de avaliar a mudança nos fatores de forma estudados na condição onde as forças viscosas e forças de empuxo são mais importantes que as forças inerciais;

- estudar sistemas géis elaborados com misturas compostas por outros materiais;

- realizar a secagem de sistemas géis com a adição de reagentes, para a ocorrência da reação de Maillard (reação entre açúcares redutores e aminoácidos);

- pesquisar sobre outros fatores de forma a serem analisados, e

- medir a temperatura do sistema gel durante o processo, visando à consideração da transferência de calor na degradação do gel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRIECHE, L. S.; SARTORI, D. J. M. Shape Evolution And Shrinkage of a Gel System during Drying by Forced Convection. In: 17th INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 17., 2003, São Paulo. **Proceedings...** (no prelo).
- BACELOS, M. S. **Análise Experimental e Modelagem da Cinética de Secagem da Batata Considerando o Encolhimento**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- BIRD, K. T.; HANISAK, M. D.; RYTHER, J. Chemical Quality and Production of Agars Extracted from *Gracilaria tikvahiae* 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.
- BUVANASUNDARAM, K.; MUKAI, N.; TSUKADA, T.; HOZAWA, M. Experimental and Theoretical Studies on Drying of Food Materials. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, v. 1, n. 29, p. 105, 1996.
- CASSANDRE, J. E. F.; MOREIRA, M. F. P.; SARTORI, D. J. M. Desenvolvimento de um Secador de Convecção Forçada com Reciclo de Ar. In: 3^o COBEQ-IC, 3., 2001, Belo Horizonte. **Anais...**
- CASTILHO, R. H. F e SARTORI, D. J. M. Desenvolvimento de Modelos Géis Simplificados: Sistemas com Geometrias Esférica e Cilíndrica. In: 4^o COBEQ-IC, 4., 2002, Maringá. **Anais...**

- CLIFT R., GRACE, J. R., WEBER, M. E. **Bubbles, Drops, and Particles**. Academic Press, 1978.
- CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2. ed. England: Oxford University Press, 1975.
- EICHLER, S.; RAMON, O.; LADYZHINSKI, I et al. Collapse Processes in Shrinkage of Hydrophilic Gels During Dehydration. **Food Research International**, Great Britain, v. 30, n. 9, p. 719 – 726, 1997.
- FALSHAW, R.; FURNEAUX, R. H.; STEVENSON D. E. Ágars from Nine Species of Red Seaweed in The Genus *Curdia* (Gracilariaceae, Rhodophyta). **Carbohydrate Research**, n. 308, p. 107 – 115, 1998.
- FOOD CHEMICALS CODEX. 3a edição. Constitution Avenue, N. W. Washington, D. C.: National Academy Press, 1980. 2101p.
- GARCIA, A. & BUENO, J. L. Improving Energy Efficiency in Combined Microwave Convective Drying. **Drying Technology**, New York, v. 1 & 2, n. 16, p. 123 – 140, 1998.
- GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. Newton, MA: Allyn & Bacon, 1978. 849 p.
- GOGUS, F. & LAMB, J. Choice of Model Gel Systems for the Food Dehydration Studies. **Drying Technology**, New York, v. 1 e 2, n. 16, p. 297 – 309, 1998.
- GOGUS, F.; WEDZICHA, B. L.; LAMB, J. Modelling of Maillard Reaction During the Drying of a Model Matrix. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, v. 4, n. 35, p. 445 – 458, 1998.

- HAN, R. J.; MOSS, O. R. & WONG, B. A. Derivation and application of an Analytical Solution of the Mass Transfer Equation to the Case of Forced Convective Flow around a Cylindrical and Spherical Particle with Fluid Surface Properties. **J. Aerosol Sci.** Great Britain, n. 2, v. 27, p. 235 – 247, 1996.
- HERNÁNDEZ, J. A ; PAVÓN, G.; GARCÍA, M. A. Analytical Solution of Mass Transfer Equation Considering Shrinkage for Modeling Food – Drying Kinetics. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, n. 45, p. 1 – 10, 2000.
- IGLESIAS, O.; GARCIA, A.; ROQUES, M.; BUENO, J. L. Drying of Water Gels: Determination of the Characteristic Curve of Agar-Agar. **Drying Technology**, New York, v. 3, n. 11, p. 571 - 587, 1993.
- KENDOUSCH, A. A. Low Prandtl Number Heat Transfer to Fluids Flowing past an Isothermal spherical Particle. **J. of Heat and Fluid Flow**, New York, p. 291 – 297, 1995.
- KETELAARS, A. A. J., KAASSCHIETR, E. J., COUMANS, W. J. and KERKHOF, P. J. A. M. The Influence of Shrinkage on Drying Behavior of Clays. **Drying Technology**, New York, n. 11, 1994.
- LEES , R. **Análisis de los Alimentos: Métodos Analíticos y de Control de Calidad**. 2. ed. Zaragoza, Espanha: Editorial Acribia, 1980.
- MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Transport Properties in the Drying of Solids. in **Handbook of Industrial Drying**, 2a ed., A. S. Mujumdar (Ed.), Marcel Dekker, New York, p. 113-159, 1995.
- MOREIRA; M.F.P. **Secagem de Gel Agar**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

- 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.
- MULET, A. Drying Modeling and Water Diffusivity in Carrots and Potatos. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, n. 45, 1994.
- MRANI, I.; BÉNET, J. C.; FRAS, G.; ZRIKEM, Z. Two Dimensional Simulation of Dehydration of a Highly Deformable Gel: Moisture Content, Stress and Strains Fields. **Drying Technology**, New York, v. 9, n. 15, p. 2165 - 2193, 1997.
- OATES, C. G.; LUCAS, P. W. & LEE, W. P. How Brittle are Gels. **Carbohydrate Polymers**, Great Britain, v. 3, n. 20, p.189 – 194, 1993.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers Handbook**. Seventh Edition. USA:McGraw-Hill, 1997.
- PINTO, L. A. A. **Cinética de Secagem de Filés de Peixes: Uso de um Modelo Difusivo com Variação de Volume**. 1996. 151 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- PRADO, M.M. **Secagem de Sementes de Mamão Papaya**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- RÄDERER, M.; BESSON, A & SOMMER, K. A. Thin Film Drying Approach for Determination of Water Diffusion Coefficients in Viscous Products. In: International Drying Symposium, 2000. **Proceedings...**(CD Rom).

- REIFEN, R.; EDRIS, M. & NUSSINOVITCH, A. A Novel, Vitamin A-Fortified, Edible Hydrocolloid Sponge for Children. **Food Hydrocolloids**, Great Britain, v. 1, n. 12, p. 111 – 114, 1998.
- ROQUES, M. A.; ZAGROUBA, F.; SOBRAL, P. A. Modelisation Principles for Drying of Gels. **Drying Technology**, New York, v. 6, n. 12, p. 1245-1262, 1994.
- SCHRADER, G. W. & LITCHFIELD, J. B. Moisture Profiles in a Model Food Gel During Drying: Measurement Using Magnetic Resonance Imaging and Evaluation of the Fickian Model. **Drying Technology**, New York, v. 2, n. 10, p. 295 – 327, 1992.
- SHAH, Y. T. & PORTER, J. H. A model for Gel Drying. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 17, p. 605 – 618, 1973.
- SINGH, R. P., HELDMAN, R. D. **Introduction to Food Engineering**. USA: Academic Press Inc., 1993.
- SISSON, L. E.; PITTS, D. R. **Fenômenos de Transporte**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1972.
- SOGAB, M. N. **Curso de Controle de Poluição Atmosférica**. São Paulo - SP: CETESB, 1987. 13 p.
- SUZUKI, K.; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T.; HOSAKA, H. Shrinkage in Dehydration of Root Vegetables. **Journal of Food Science**, v. 5, n. 41, p. 1189 - 1193, 1976.
- VAGENAS, G. K. and KARATHANOS, V. T. Prediction of the Effective Moisture Diffusivity in Gelatinized Food Systems. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, n. 18, p. 159-179, 1993.

WADELL, H., **J. Geol.**, n. 41, p. 310 – 331, 1933.

WHITAKER, S. Heat and Mass Transfer in Porous Media. In: **Advances in Drying**, Washington, ed. Hemisphere Publishing Corporation, v.1, p. 23-61, 1980.

