

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

**SECAGEM EM LEITO FIXO
DE SEMENTES COM MUCILAGEM**

Manoel Marcelo do Prado

São Carlos – SP
2004

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

**SECAGEM EM LEITO FIXO
DE SEMENTES COM MUCILAGEM**

Manoel Marcelo do Prado

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **Doutor em Engenharia Química**, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori

São Carlos – SP
2004

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

P896sl

Prado, Manoel Marcelo do.

Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem /
Manoel Marcelo do Prado. -- São Carlos : UFSCar, 2004.
162 p.

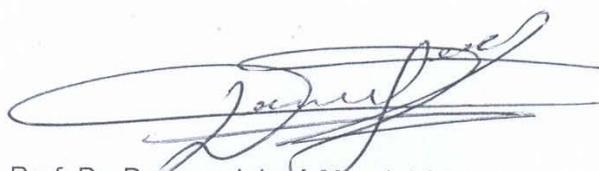
Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,
2004.

1. Secagem. 2. Transferência de calor e massa. 3.
Encolhimento. 4. Leito fixo. 5. Sementes com mucilagem. I.
Título.

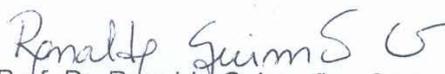
CDD: 660.28426 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **MANOEL MARCELO DO PRADO** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 06 DE ABRIL DE 2004.

BANCA EXAMINADORA:



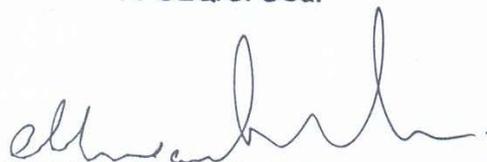
Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori
Orientador, PPGEQ/UFSCar



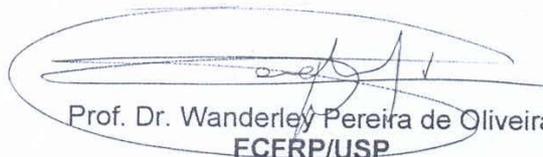
Prof. Dr. Ronaldo Guimarães Correa
PPGEQ/UFSCar



Prof. Dr. José Teixeira Freire
PPGEQ/UFSCar



Prof. Dr. Maurício Cordeiro Mancini
ITDEQ/UFRRJ



Prof. Dr. Wanderley Pereira de Oliveira
FCERP/USP

*Aos meus pais Beatriz e Luiz,
à minha irmã Josilene e à
Luanda, razões de minha vida.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter-me concedido saúde e toda a luz e perseverança necessárias para que eu superasse adversidades e seguisse em frente rumo à conquista de mais uma importante etapa de minha vida.

Muitas pessoas contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho. Seja oferecendo sugestões e conhecimentos, seja através de um gesto, um afago amigo. A todos gostaria de expressar meus agradecimentos. Em especial:

- Aos meus pais, Luiz e Beatriz Prado, pelos exemplos de vida e por todo amor, carinho, apoio e dedicação em todos os momentos de minha vida;
- A todos os meus irmãos, por tudo o que cada um sabe o que fez, nos momentos mais difíceis, para me incentivar e apoiar;
- À Luanda, pela cumplicidade e motivação oferecidos através do seu amor sempre presente;
- Ao Prof. Dr. Dermeval José Mazzini Sartori pela orientação, pela dedicação, pelo constante incentivo, pela paciência e pela amizade, com os quais foi possível a concretização deste trabalho;
- Ao Prof. Dr. José Teixeira Freire, pelo auxílio nas discussões deste trabalho, pela amizade e, sobretudo, pelo seu exemplo de educador;
- Aos professores do PPG-EQ/UFSCar, em particular aos membros do Centro de Secagem, pelas diversas formas de contribuição feitas no decorrer do trabalho;

- Ao Prof. Dr. Maurício C. Mancini do DEQ-IT/ UFRRJ, pela orientação e estímulo em momentos importantes da minha vida acadêmica;
- Aos Técnicos Srs Oscar da Silva e Walter Suficiel pelo valioso auxílio na montagem e manutenção de equipamentos e pela amizade que se formou durante esta caminhada;
- Aos amigos do DEQ/UFSCar pelo companheirismo e pela amizade, que me fazem sentir orgulhoso pelo convívio desfrutado ao longo destes anos. Em especial à Maria Angélica, Miriam, Álvaro, Cris, Ione, Edinalda, Marcos, Nivaldo e Percy;
- À CAPES, ao CNPq e ao PRONEX/FINEP pelo apoio financeiro.

RESUMO

Visando contribuir com os estudos sobre o processo de secagem de sementes revestidas por mucilagem, o objetivo deste trabalho é estudar a transferência simultânea de calor e massa durante a secagem em leito fixo e camada espessa de sementes de mamão com e sem mucilagem. A análise físico-matemática do processo utilizada para simular os perfis de temperatura e umidade ao longo do secador foi fundamentada no modelo a duas fases, de acordo com os princípios de conservação de massa e energia para as fases fluida e sólida. A fim de incorporar o fenômeno de encolhimento das sementes durante a secagem, um sistema de coordenadas móveis, que segue o movimento de contração do leito de partículas, foi usado. Investigações experimentais numa unidade de secagem em escala laboratorial foram realizadas para a caracterização do fenômeno de encolhimento e das propriedades físicas do material em função do teor de umidade, bem como para a determinação das distribuições de umidade e de temperatura do sólido, utilizadas para a avaliação do modelo. As equações de equilíbrio termodinâmico, transferência de calor e massa entre as fases sólida e fluida, necessárias no modelo, foram obtidas a partir de estudos específicos advindos da literatura. As equações do modelo foram resolvidas pelo método de diferenças finitas. Apesar dos leitos formados por sementes com mucilagem apresentarem as maiores taxas de transferência de calor, suas taxas de secagem foram menores que aquelas das sementes desprovidas do envoltório mucilaginoso. O encolhimento do leito particulado ficou em torno de 30% e 12% para as sementes com e sem mucilagem, respectivamente, o que mostrou estar diretamente relacionado às características superficiais das partículas e aos gradientes de umidade desenvolvidos durante a secagem. A análise da secagem em leito fixo de sementes de mamão com base no modelo a duas fases corroborou a importância do encolhimento do leito para uma interpretação mais precisa dos fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos na secagem de partículas com alto teor de umidade. O modelo desenvolvido mostrou-se promissor para a predição das variáveis do processo de secagem, devendo ser testado em estudos correlatos.

ABSTRACT

Attempting to contribute with the studies on mucilaginous seeds drying, the objective of this work is to study the simultaneous heat and mass transfer during drying in fixed bed of papaya seeds with and without mucilage. The physical-mathematical analysis used to predict the moisture and temperature profiles during drying was based on two-phases model, according to mass and heat balances in fluid and particulate phases. A moving coordinate system, that follows the bed contraction movement, was used to take into account the shrinkage phenomenon. Experimental investigations in a drying unit at bench scale were conducted to characterize the phenomenon of shrinkage and the physical properties of material as function of moisture content, as well as to determine the temperature and moisture content distributions, which were used to evaluate the model. The equations of thermodynamics equilibrium and heat and moisture transfer rate between the solid and fluid phases were obtained from specific studies. The model equations were solved using the finite difference method. Although the beds of mucilaginous seeds had the higher heat transfer rates, their drying rates were lower than those of non-mucilaginous seeds. Bed shrinkage was nearly 30% and 12% for seeds with and without mucilage, respectively, what is directly related to superficial characteristics of each particle and moisture gradients developed during drying. The analysis of the fixed bed drying of papaya seeds, which was based on the two-phases model, corroborated the importance of the bed shrinkage for a more accurate interpretation of heat and mass phenomena involved in drying of particles with high moisture contents. It is verified that the developed model is promising to predict the drying variable and that it must be tested in correlated studies.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS.....	xv
NOMENCLATURA	xix
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
II.1. TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE CALOR E MASSA ENTRE O SÓLIDO E O FLUIDO	6
II.1.1. MODELAGEM EM CAMADA ESPESSA.....	7
II.1.2. MODELO A DUAS FASES PARA O SECADOR DE LEITO FIXO	10
II.1.3. UMIDADE DE EQUILÍBRIO	13
II.1.4. TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO FIXO.....	14
II.1.5. CINÉTICA DE SECAGEM EM CAMADA FINA.....	16
II.1.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS DE RESOLUÇÃO NUMÉRICA DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO MODELO	18
II.2 - PROCESSO DE SECAGEM	23
II.2.1 - ASPECTOS TECNOLÓGICOS	23
II.2.2 - SECAGEM DE SEMENTES COM MUCILAGEM.....	25
II.3. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL SÓLIDO.....	28
II.3.1. DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS.....	29

II.3.2. ESFERICIDADE.....	31
II.3.3. MASSA ESPECÍFICA.....	32
II.3.4. POROSIDADE.....	38
II.3.5. CALOR ESPECÍFICO.....	41
II.3.6. FENÔMENO DE ENCOLHIMENTO.....	45
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
III.1. MATERIAIS.....	51
III.1.1. EXTRAÇÃO DAS SEMENTES.....	52
III.1.2. PREPARAÇÃO DAS PARTÍCULAS.....	52
III.2. MODELO A DUAS FASES.....	54
III.2.1. HIPÓTESES DO MODELO.....	55
III.2.2. EQUAÇÕES DO MODELO.....	56
III.2.3. EQUAÇÕES AUXILIARES DO MODELO.....	57
III.3. UNIDADE EXPERIMENTAL DE SECAGEM.....	59
III.3.1. EQUIPAMENTO.....	59
III.3.2. GARANTIAS EXPERIMENTAIS DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO.....	61
III.3.3. CÉLULAS DE MEDIDAS.....	62
III.3.4. CONDIÇÕES OPERACIONAIS.....	65
III.4. TÉCNICAS DE MEDIDAS DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	66
III.4.1- DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DO SÓLIDO.....	66
III.4.2- DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SÓLIDO.....	67
III.4.3- ERROS PROVÁVEIS DE MEDIDAS.....	67

III.5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA OS TESTES DE SECAGEM CONVECTIVA	68
III.5.1. EMPACOTAMENTO DO LEITO	68
III.5.2. OPERAÇÃO DA UNIDADE DE SECAGEM EM LEITO FIXO.....	69
III.5.3. CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DE ENCOLHIMENTO	70
III.5.4. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS SEMENTES E DO LEITO.....	71
III.6. ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS	74
III.6.1. SOLUÇÃO NUMÉRICA DO MODELO.....	74
III.6.2. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA	75
III.6.3. AVALIAÇÃO DO MODELO	78
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	80
IV.1. OBTENÇÃO DAS SEMENTES COM E SEM A CAMADA EXTERNA DE MUCILAGEM.....	79
IV.2. ENCOLHIMENTO DAS PARTÍCULAS DURANTE A SECAGEM	81
IV.2.1. DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS E ESFERICIDADE DAS PARTÍCULAS	81
IV.2.1 ANÁLISE DO ENCOLHIMENTO VOLUMÉTRICO DAS PARTÍCULAS	85
IV.3. AVALIAÇÃO DO ENCOLHIMENTO DO LEITO DURANTE A SECAGEM	88
IV.4. INFLUÊNCIA DA SECAGEM NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS SEMENTES E DO LEITO	95
IV.4.1. MASSA ESPECÍFICA REAL.....	95
IV.4.2. MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA PARTÍCULA	96

IV.4.3. DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO	99
IV.4.4. POROSIDADE DA PARTÍCULA E POROSIDADE DO LEITO	101
IV.4.5. ÁREA ESPECÍFICA	107
IV.5. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA SECAGEM EM CAMADA ESPESSE	110
IV.5.1. DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA DO SÓLIDO AO LONGO DO SECADOR.....	110
IV.5.2. DISTRIBUIÇÃO DE UMIDADE DO SÓLIDO AO LONGO DO SECADOR.....	113
IV.6. APLICAÇÃO DO MODELO A DUAS FASES À SECAGEM DE SEMENTES DE PAPAIA.....	120
IV.6.1 AVALIAÇÃO DO MODELO POR MEIO DOS RESULTADOS ADVINDOS DOS TESTES DE SECAGEM.....	122
IV.6.2 AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES PARA O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	127
IV.6.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS SIMULADOS COM E SEM A CONSIDERAÇÃO DO FENÔMENO DE ENCOLHIMENTO.....	128
IV.6.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA AS DIFERENTES ESTRUTURAS DE SUPERFÍCIE DAS PARTÍCULAS	130
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES	133
CAPÍTULO VII - SUGESTÕES	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137
ANEXO A - DADOS EXPERIMENTAIS RELATIVOS À SECAGEM EM LEITO FIXO E CAMADA ESPESSE.....	150
ANEXO B PARÂMETROS E EQUAÇÕES AUXILIARES UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO EM LEITO FIXO	161

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1 – Representação esquemática de um leito de partículas, com detalhe do elemento de volume isolado, CALÇADA (1994)	11
Figura II.2 – Esquema de uma semente de mamão.....	26
Figura III.1 – Foto das sementes de papaya (a) sem mucilagem (b) com mucilagem.	53
Figura III.2 – Esquema de um leito fixo	54
Figura III.3 – Esquema da unidade de secagem em leito fixo utilizada	60
Figura III.4 – Detalhe da célula de secagem em camada fina utilizada.....	62
Figura III.5 – Esquema da célula de secagem para a medida de encolhimento do leito de sementes.....	63
Figura III.6 – Esquema da célula de secagem para obtenção da distribuição de umidade via método de estratificação do leito	64
Figura III.7 – Esquema da célula de secagem para obtenção da distribuição da temperatura ao longo do leito.	65
Figura IV.1 – D_e/D_{e0} em função do adimensional de umidade, para sementes sem mucilagem	84
Figura IV.2 – Razão de encolhimento volumétrico em função de XR na secagem em monocamada de sementes com mucilagem	86
Figura IV.3 – Razão de encolhimento volumétrico em função de XR na secagem em monocamada de sementes sem mucilagem.....	86
Figura IV.4 – V_l/V_{l0} e XR em função do tempo de secagem para sementes sem mucilagem	89

Figura IV.5 – V_l/V_{l0} em função de XR, para leitos constituídos por sementes sem mucilagem, em diferentes condições operacionais, para uma altura inicial de empacotamento (Z_0) de 3 cm	90
Figura IV.6 – V_l/V_{l0} em função de XR, para leitos constituídos por sementes sem mucilagem, com alturas iniciais de empacotamento de 3 e 5 cm.....	92
Figura IV.7 – V_l/V_{l0} em função de XR, para leitos constituídos por sementes de papaia com (SCM) e sem mucilagem (SSM), altura inicial de empacotamento de 5 cm.....	92
Figura IV.8 – Massa específica real das sementes, com e sem mucilagem, em função do teor de umidade.....	95
Figura IV.9 – Massa específica aparente das sementes com e sem mucilagem em função do teor de umidade, para diferentes condições de secagem.....	97
Figura IV.10 – Densidade de empacotamento em função do adimensional de umidade, parametrizada em Tg_0 , Z_0 e na estrutura da partícula, $v_{g0}=0,5$ m/s	99
Figura IV.11 – Porosidade das sementes, com e sem mucilagem, em função do teor de umidade, para $Tg_0=50^\circ\text{C}$ e $v_{g0} = 0,5$ m/s.....	102
Figura IV.12 – Porosidade total do leito em função do adimensional de umidade, parametrizada em Z_0 , Tg_0 e na estrutura da partícula, $v_{g0}=0,5$ m/s	103

Figura IV.13 – Porosidade “bulk” do leito em função do teor de umidade, para sementes com e sem mucilagem	105
Figura IV.14 – Variação de volume do leito em função da variação de massa de água durante a secagem de sementes de papaya com e sem mucilagem, $Z_0=5$ cm, $T_{g0}=50^\circ\text{C}$, $v_{g0}=0,5$ m/s	106
Figura IV.15 – Área específica do leito em função do adimensional de umidade.....	107
Figura IV.16 – Área específica do leito (excluindo os poros intrapartícula) em função do adimensional de umidade, para sementes com e sem mucilagem, $T_{g0}=50^\circ\text{C}$ e $v_{g0}=0,5$ m/s	109
Figura IV.17 – Temperatura do sólido em função do tempo para uma altura do leito de 3,0 cm, durante testes de secagem de sementes sem mucilagem, $T_g=50^\circ\text{C}$ e $v_{g0}=0,5\text{m/s}$	110
Figura IV.18 – Temperatura em função do tempo para o leito constituído de sementes com mucilagem e percolado com ar a 32°C e $0,5\text{m/s}$, parametrizadas na altura do leito	111
Figura IV.19 – Temperatura em função do tempo para o leito constituído de sementes sem mucilagem e percolado com ar a 32°C e $0,5\text{m/s}$, parametrizadas na altura do leito	112
Figura IV.20 – Teor de umidade em função do tempo para uma altura do leito de 2cm, $T_{g0}= 41^\circ\text{C}$ e $v_{g0}=1,5\text{m/s}$, sementes sem mucilagem.....	114

Figura IV.21 – Teor de umidade do sólido em função do tempo para o leito constituído de sementes com mucilagem e percolado com ar a 50°C e 0,5m/s, parametrizado na altura do leito	115
Figura IV.22 – Teor de umidade do sólido em função do tempo para o leito constituído de sementes sem mucilagem e percolado com ar a 50°C e 0,5m/s, parametrizado na altura do leito	115
Figura IV.23 – Teor de umidade do sólido em função da altura do leito constituído de sementes com mucilagem e percolado com ar a 50°C e 0,5m/s, parametrizadas no tempo.....	116
Figura IV.24 – Teor de umidade do sólido em função da altura do leito constituído de sementes sem mucilagem e percolado com ar a 50°C e 0,5m/s parametrizadas no tempo.....	117
Figura IV.25 – Encolhimento do leito (%) em função do tempo de secagem, para as sementes com e sem mucilagem.....	119
Figura IV.26 – Valores experimentais e simulados de umidade do sólido em função do tempo de secagem, parametrizados em diferentes alturas do leito, durante a secagem de sementes com mucilagem, $T_{g0}=50^{\circ}\text{C}$ $v_g=0,5$ m/s.....	122
Figura IV.27 – Valores experimentais e simulados de umidade do sólido em função do tempo de secagem, parametrizados em diferentes alturas do leito, durante a secagem de sementes sem mucilagem, $T_{g0}=50^{\circ}\text{C}$ $v_g=0,5$ m/s.....	123

- Figura IV.28 – Valores experimentais e simulados de temperatura em função do tempo, parametrizados em três alturas do leito, durante a secagem de sementes com mucilagem. com $v_g=0,5$ m/s e $T_{g0}=50^\circ\text{C}$ 124
- Figura IV.29 – Valores experimentais e simulados de temperatura em função do tempo, parametrizados em três alturas do leito, durante a secagem de sementes sem mucilagem. com $v_g=0,5$ m/s e $T_{g0}=32^\circ\text{C}$ 124
- Figura IV.30 – Perfis de temperatura das fases sólida e fluida obtidos através da utilização de diferentes correlações para h. Sementes com mucilagem, $v_g=1,0$ m/s, $T_{g0}=50^\circ\text{C}$, $Y_{g0}=0,01\text{kg/kg}$, $T_{s0} = 18^\circ\text{C}$ e $X_0 = 3,9$ b.s 127
- Figura IV.31 – Perfis de temperatura das fases sólida e fluida obtidos através da utilização de diferentes correlações para h. Sementes sem mucilagem, $v_g=0,5$ m/s, $T_{g0}=35^\circ\text{C}$, $Y_{g0}=0,014\text{kg/kg}$, $T_{s0} = 24^\circ\text{C}$ e $X_0 = 3,2$ b.s..... 128
- Figura IV.32 – Resultados de umidade do sólido simulados com e sem a consideração do encolhimento. Leito de sementes sem mucilagem. $z=0,03$ m, $T_{g0}=50^\circ\text{C}$; $v_{g0}=0,5$ m/s, $Y_{g0} = 0,099$ kg/kg, $T_{s0} = 24^\circ\text{C}$ e $X_0 = 2,72$ b.s..... 129
- Figura V.33 – Resultados de temperatura do sólido simulados com e sem a consideração do encolhimento. Leito de sementes sem mucilagem, $z=0,04$ m; $T_{g0}=50^\circ\text{C}$; $v_{g0}=0,5$ m/s, $Y_{g0} = 0,099$ kg/kg, $T_{s0} = 24^\circ\text{C}$ e $X_0 = 2,72$ b.s..... 130

- Figura V.34 – Perfis simulados de umidade ao longo do leito durante a secagem de sementes com mucilagem, $T_{g0}=50^{\circ}\text{C}$ e $v_g=0,5\text{ m/s}$ 131
- Figura V.35 – Perfis simulados de umidade ao longo do leito durante a secagem de sementes sem mucilagem, $T_{g0}=50^{\circ}\text{C}$ e $v_g=0,5\text{ m/s}$ 131

LISTA DE TABELAS

Tabela II.1 –Equações do modelo a duas fases, MANCINI (1996)	10
Tabela II.2 – Equações para umidade de equilíbrio.....	14
Tabela II.3 – Principais correlações utilizadas para a estimativa do coeficiente de transferência de calor entre o gás e o sólido em leito fixo.....	15
Tabela II.4 – Equações de secagem em camada fina.....	17
Tabela II.5 – Equações dos modelos de encolhimento propostos por SUZUKI et alii (1976)	46
Tabela III.1 – Erros prováveis nas medidas.....	68
Tabela IV.1 – Distribuição do tamanho das sementes de papaya.....	80
Tabela IV.2 – Caracterização do meio poroso composto por sementes úmidas, com e sem mucilagem.....	81
Tabela IV.3 – Resultados típicos da análise de imagens para as sementes com mucilagem em diferentes teores de umidade.....	82
Tabela IV.4 – Resultados típicos da análise de imagens para as sementes sem mucilagem em diferentes teores de umidade.....	82
Tabela IV.5 – Desvios relativos médios percentuais (DVM) para as equações de encolhimento propostas por SUZUKI et alii (1976)	87
Tabela IV.6 – Resultados da regressão não linear para o encolhimento do leito de partículas com e sem mucilagem.....	90

Tabela IV.7 – Resultados típicos de S_p e S_{leito} para as sementes sem mucilagem.....	94
Tabela V.8 – Resultados da estimação de parâmetros das equações (IV.8) e (IV.9).....	98
Tabela V.9 – Resultados da regressão não linear para a área específica em função de XR	108
Tabela IV.10 – Equações representativas das propriedades físicas dos leitos formados por sementes com e sem mucilagem em função do teor de umidade.....	121
Tabela IV.11 – Resultados experimentais e simulados de umidade das sementes com mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,01\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 1,0\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 20^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 4,1\text{ b.s.}$	125
Tabela IV.12 – Resultados experimentais e simulados de umidade das sementes sem mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,012\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 0,5\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 19^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 2,75\text{ b.s.}$	126
Tabela IV.13 – Resultados experimentais e simulados de temperatura das sementes com mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,0051\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 0,8\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 20,8^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 3,5\text{ b.s.}$	126
Tabela IV.14 – Resultados experimentais e simulados de temperatura das sementes com mucilagem ao longo do leito, durante a secagem	

realizada com $T_{g0} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,019 \text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 0,5 \text{ m/s}$.	
Condições iniciais do sólido, $T_s = 23^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 3,75 \text{ b.s.}$	126
Tabela A1 – Dados experimentais de distribuição de temperatura ao longo do leito em função do tempo de secagem de sementes com mucilagem. Experimento 01.....	151
Tabela A2 – Dados experimentais de distribuição de temperatura ao longo do leito em função do tempo de secagem de sementes sem mucilagem. Experimento 02.....	152
Tabela A3 – Dados experimentais de distribuição de temperatura ao longo do leito em função do tempo de secagem de sementes sem mucilagem. Experimento 03.....	153
Tabela A4 – Dados experimentais de distribuição de temperatura ao longo do leito em função do tempo de secagem de sementes sem mucilagem. Experimento 04.....	154
Tabela A5 – Dados experimentais de distribuição de umidade do sólido ao longo do leito parametrizados no tempo em que foi realizada a estratificação do leito. Experimento 05.....	156
Tabela A6 – Dados experimentais de distribuição de umidade do sólido ao longo do leito parametrizados no tempo em que foi realizada a estratificação do leito. Experimento 06.....	156
Tabela A7 – Dados experimentais de distribuição de umidade do sólido ao longo do leito parametrizados no tempo em que foi realizada a estratificação do leito. Experimento 07.....	156

Tabela A8 – Dados experimentais de teor de umidade médio do sólido no leito em função do tempo de secagem, para sementes com mucilagem. Experimento 08.....	157
Tabela A9 – Dados experimentais de teor de umidade médio do sólido no leito em função do tempo de secagem, para sementes sem mucilagem. Experimento 09.....	158
Tabela A10 – Resultados experimentais e simulados de umidade das sementes sem mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,013\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 1,0\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 22^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 2,9\text{ b.s.}$	159
Tabela A11 – Resultados experimentais e simulados de umidade das sementes sem mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 41\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,0111\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 1,0\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 20^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 3,0\text{ b.s.}$	159
Tabela A12 – Resultados experimentais e simulados de umidade das sementes com mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 41\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,0115\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 0,5\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 20^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 4,33\text{ b.s.}$	159
Tabela A13 – Resultados experimentais e simulados de umidade das sementes com mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,012\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 1,5\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 19^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 4,11\text{ b.s.}$	160

NOMENCLATURA

a_v	Área de transferência por unidade de volume do leito	[L ⁻¹].
A	Área da seção transversal do secador cilíndrico	[L ²]
C_p	Calor específico	[L ⁻² T ⁻² θ ⁻¹]
D_e	Diâmetro da esfera de igual volume que a partícula	[L]
D_{eff}	Difusividade efetiva da água no interior da semente	[L ² T ⁻¹]
DI	Diâmetro linear médio da partícula projetada	[L]
D_p	Diâmetro do círculo de igual área que a partícula projetada	[L]
DVM	$= \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{(y_{exp} - y_{sim})}{y_{exp}} \cdot 100, \quad \text{Desvio relativo}$	Desvio relativo
	médio	[-]
f	Taxa de secagem por unidade de volume do leito	[ML ⁻³ T ⁻¹]
F	Fluxo molar	[MOL ⁻² T ⁻¹]
G_g	Fluxo mássico do gás seco	[ML ⁻² T ⁻¹]
G_s	Fluxo mássico do sólido seco	[ML ⁻² T ⁻¹]
h	Coeficiente de transferência de calor	[MT ⁻³ θ ⁻¹]
ha	Coeficiente volumétrico de transferência de calor	[ML ⁻¹ T ⁻³ θ ⁻¹]
H	Entalpia por massa de componente seco	[L ² T ⁻²]
⟨H⟩	Entalpia média por massa de componente seco	[L ² T ⁻²]
k_c	Constante de secagem para o período a taxa constante	[ML ⁻³ T ⁻¹]
K	Constante de secagem para o período a taxa decrescente	[ML ⁻³ T ⁻¹]

K_{sa}	Coeficiente volumétrico de transferência de massa	$[ML^{-3}T^{-1}]$
K_s	Condutividade térmica da semente	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
K_g	Condutividade térmica do gás	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
L_p	Entalpia de vaporização da água do produto	$[L^2T^{-2}]$
m	Massa	$[M]$
Nu	$= \frac{h \cdot D_e}{K_g}$, Número de Nusselt	$[-]$
p_1	Pressão inicial no aparato desenvolvido por DAY (1965) para medir porosidade	$[ML^{-1}T^{-2}]$
p_2	Pressão final no aparato desenvolvido por DAY (1965) para medir porosidade	$[ML^{-1}T^{-2}]$
P	Pressão absoluta	$[ML^{-1}T^{-2}]$
P_p	Perímetro da partícula projetada	$[-]$
Pr	$= \frac{\mu \cdot Cp_g}{K_g}$, Número de Prandtl	$[-]$
R	Raio da partícula	$[-]$
Re	$= \frac{G_g \cdot D_e}{\mu}$, Número de Reynolds	$[-]$
R_g	Constante universal dos gases	$[ML^2MOL^{-1}T^{-2}\theta^{-1}]$
S_v	Razão de encolhimento volumétrico das partículas	$[-]$
S_{leito}	Razão de encolhimento linear do leito	$[-]$
S_p	Razão de encolhimento linear das partículas	$[-]$
S_{hr}	Encolhimento percentual do leito	$[-]$
t	Tempo	$[T]$
T	Temperatura	$[\theta]$

U	Energia interna por unidade de massa do componente seco	$[L^2T^{-2}]$
UR	Umidade relativa do ar	[-]
v	Velocidade do fluido	$[LT^{-1}]$
V	Volume	$[L^3]$
V_l	Volume do leito	$[L^3]$
X	Umidade do sólido, massa de água por massa de sólido seco	
XR	$= \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$, Umidade adimensional	[-]
Y_g	Umidade absoluta do ar, massa de vapor d'água por massa de ar seco	
y_{exp}	valor experimental	
y_{sim}	valor simulado	
z	Variável espacial na direção de escoamento do ar	[L]
Z	Altura do leito	[L]

SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha_{v,a}$	Coefficiente volumétrico de forma	[-]
ϕ	$= \pi \frac{D_p}{P_p}$, Circularidade da partícula projetada	[-]
ε	Porosidade	[-]
ϕ	Esfericidade $= \frac{D_e}{D_{e0}}$	[-]
λ_s	Entalpia de vaporização da água livre	$[L^2T^{-2}]$

λ ou λ_w	Entalpia de vaporização da água livre	$[L^2T^{-2}]$
μ	Viscosidade	$[ML^{-1}T^{-1}]$
η	Massa específica relativa do sólido seco	$[-]$
ξ	Coordenada móvel, na direção do escoamento do fluido	$[-]$
ρ	Massa específica	$[ML^{-3}]$
υ	Volume específico do ar	$[L^3M^{-1}]$

PARÂMETROS DE EQUAÇÕES

$B_0,$ B_1, B_2	Parâmetros relativos à Equação (V.5)
ρ_{ss}, ρ_w ρ_{ps}, β	Parâmetros relativos às Equações (IV.8) e (IV.9)
$p_0, p_1,$ p_2	Parâmetros relativos à Equação (V.16)
ζ, γ	Parâmetros relativos aos modelos de SUZUKI et Alii (1976)

SUBSCRITOS

0	Condição inicial ou índice que indica a entrada do secador
b	“Bulk” ou do leito poroso
eq	Equilíbrio
exp	experimental
f	fluido
g	Fase gasosa

gs	Gás seco
l, w	Água no estado líquido
p	Partícula
ref	Valor de referência
s	Fase sólida
sat	Saturação
sim	Simulado
sp	Sistema particulado
ss	Sólido seco
t	Total
v	Água no estado vapor

ABREVIACÕES

b.s.	Base seca
b.u.	Base úmida
SCM	Sementes com mucilagem
SSM	Sementes sem mucilagem

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A secagem é um dos mais difundidos processos de transferência de calor e massa, com aplicações em diversas áreas da engenharia. Os estudos sobre os fenômenos de transporte que ocorrem durante a secagem em diferentes materiais particulados são de interesse não somente tecnológico, devido às suas inúmeras aplicações industriais, mas também de interesse técnico-científico, por causa da complexidade que o material apresenta.

Partículas com núcleo sólido e cobertura natural ou artificial de mucilagem representam um material complexo que oferece importante desafio no que diz respeito à análise da transferência de calor e massa, o que tem despertado o interesse pelo estudo da secagem de partículas desta natureza.

As deformações no revestimento mucilaginoso durante a secagem podem alterar o tamanho e a forma das partículas e, conseqüentemente, as propriedades estruturais do leito poroso, influenciando o transporte de calor e de massa entre o fluido e a partícula.

Algumas espécies de sementes de frutos carnosos, como mamão e maracujá, representam uma classe de partículas naturais com as características acima citadas. Além do alto teor de umidade inicial, são revestidas por uma mucilagem com características de gel altamente deformável, o que as tornam susceptíveis ao encolhimento.

Enquanto os estudos envolvendo os fenômenos fundamentais em meios porosos constituídos por partículas rígidas, devido ao alto grau de compreensão atingido, têm partido para sutilezas de modelação, as pesquisas correspondentes aos materiais particulados deformáveis encontram-se em seus estágios iniciais, na busca de informações sobre a interação entre as fases fluida e particulada na operação de secagem

Diante da escassez de informações sobre o comportamento destes materiais frente a diferentes condições de secagem, os estudos em leito fixo crescem de importância pelo fato deste tipo de leito constituir a base para a compreensão dos fenômenos fundamentais que permeiam os estudos em outros leitos particulados.

Os modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para prever o desempenho de secadores de leito fixo são fundamentados nas equações de conservação de massa e energia, com base na mecânica do contínuo, em conjunção com as equações de transferência de calor, massa e de equilíbrio termodinâmico entre as fases sólida e fluida. Tais modelos constituem hoje uma das mais bem desenvolvidas e formalizadas teorias de secagem e são encontrados em diversos trabalhos da literatura (**CENKOWSKI et alii, 1993; MASSARANI e SILVA TELLES, 1992**).

No entanto, devido às hipóteses de encolhimento desprezível e de propriedades físicas do material constantes durante o processo, adotadas na sua formulação, só são diretamente aplicáveis à secagem de sementes com um teor de umidade inicial baixo, em torno de 25% b.u.. Conseqüentemente, poucos são os estudos existentes sobre a modelagem e simulação da secagem de sementes de

frutos carnosos, ao contrário da secagem de sementes de oleaginosas, de gramíneas e de grãos de cereais (BARROZO, 1995; ARNOSTI Jr., 1997).

Logo, para a secagem de sementes com uma estrutura susceptível à deformação, há a necessidade de uma abordagem mais rigorosa do problema, pois se a hipótese de encolhimento é negligenciada, pode ocorrer uma interpretação incorreta dos fenômenos de transferência levando a resultados de simulação que não condizem com o processo real.

A estrutura das sementes de mamão, além da camada externa de mucilagem, possui uma camada interna provida de protuberâncias laminares. A utilização destas sementes, com ou sem o envoltório mucilaginoso, conduz a partículas com diferentes características superficiais, o que possibilita a formação de leitos espessos interessantes sob o ponto de vista dos estudos dos fenômenos simultâneos de transferência de calor e de massa envolvidos no processo de secagem. Em adição, são muito escassas na literatura informações sobre estudos comparativos voltados para uma melhor compreensão da secagem desta peculiar natureza de sementes.

Visando contribuir com estudos neste sentido, o Centro de Secagem do DEQ/UFSCar vem desenvolvendo nos últimos anos trabalhos na linha de secagem de sementes de frutos carnosos, e em particular, sobre sementes com mucilagem.

A avaliação da viabilidade da secagem em leito fixo, em relação às qualidades física e fisiológica do produto, mostrou que este tipo de secador é promissor para esta natureza de sementes. Além disto, avanços importantes já foram dados nesta linha de pesquisa através de estudos envolvendo a determinação das isotermas de equilíbrio e da cinética de secagem de sementes de

papaya com e sem mucilagem, e do coeficiente de transporte de massa através deste meio em particular (PRADO, 1999; MARINELLI et alii, 2002).

No entanto, há ainda lacunas no que diz respeito à realização de estudos em camada espessa, imprescindíveis para a compreensão dos fenômenos simultâneos de transferência de calor, de massa e do encolhimento na secagem destas sementes com diferentes características superficiais. Constata-se, também, a necessidade de uma análise crítica dos modelos de secagem, a fim de adequá-los à realidade física do processo de secagem de sementes com alto teor de umidade providas de mucilagem, incorporando na sua formulação o fenômeno de encolhimento e a dependência das propriedades físicas em função do teor de umidade.

Objetivos do Trabalho

Visando contribuir com avanços na análise e no desenvolvimento do processo de secagem deste tipo de material particulado, o objetivo deste trabalho é o estudo da transferência simultânea de calor e massa entre o ar e sementes de mamão, com e sem a cobertura de mucilagem, submetidas à secagem em leito fixo e camada espessa.

A análise físico-matemática do processo foi fundamentada na modelagem a partir das equações de conservação de massa e energia para as fases sólida e fluida, considerando o encolhimento do leito e a dependência das propriedades físicas das partículas em função do teor de umidade, com as equações para o teor de umidade de equilíbrio, taxa de secagem e coeficiente de transferência de calor oriundas de estudos específicos.

Tendo em vista atingir estes objetivos, foi necessário o cumprimento das seguintes etapas:

- i) extração e preparação das partículas, seguida da caracterização física das sementes de mamão, individualmente e na forma de leitos empacotados, em função do teor de umidade, visando identificar e quantificar experimentalmente o fenômeno de encolhimento e as mudanças das propriedades físicas durante o processo de secagem do sólido com e sem a camada de mucilagem;
- ii) adequação de uma unidade experimental de secagem em leito fixo existente no DEQ/UFSCar aos objetivos deste trabalho, bem como, a construção de células de secagem;
- iii) realização de testes de secagem em leitos fixos com diversas espessuras, visando as determinações experimentais das distribuições de temperatura e umidade das sementes em função do tempo e ao longo do leito, nas situações com e sem a presença de mucilagem, e
- iv) simulação do secador em leito fixo e camada espessa, considerando sementes com diferentes estruturas de superfícies, através da resolução numérica do sistema de equações do modelo. Análise de diferentes correlações para o coeficiente de transferência de calor e comparação dos resultados simulados, com e sem a consideração de encolhimento do sistema, com os experimentais.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica enfoca inicialmente a transferência de calor e massa na secagem de materiais particulados, voltando-se para o modelo mais utilizado na descrição físico-matemática do processo, com o intuito de adequá-lo à realidade do processo de secagem de sementes de frutos carnosos providas de mucilagem. A revisão da literatura é então direcionada para agregar informações necessárias para o estudo desta natureza de partículas, como por exemplo, aquelas relativas à caracterização física do material sólido.

II.1. TRANSFERÊNCIA SIMULTÂNEA DE CALOR E MASSA ENTRE O SÓLIDO E O FLUIDO

A secagem convectiva é um dos mais difundidos processos de transferência de calor e massa, com aplicações em diversas áreas da engenharia.

A interação de troca de energia e massa entre o fluido e o sólido pode ser influenciada pela configuração do material no secador, pelas condições operacionais do secador como temperatura, velocidade e umidade do fluido, bem como pelas propriedades do sólido, tais como umidade, temperatura, tamanho, forma, massa específica e porosidade (**McMINN e MAGEE, 1999**).

O estudo do comportamento de secagem utilizando uma abordagem estritamente experimental constitui um enorme desafio devido ao grande número

de variáveis que devem ser consideradas. Neste sentido, o desenvolvimento de modelos matemáticos tem se tornado uma ferramenta útil para a compreensão mais fundamental e quantitativa dos fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa que ocorrem durante o processo de secagem.

A conveniente modelagem e simulação computacional dos perfis de temperatura e umidade no secador permite, por exemplo, examinar e interpretar a influência das condições operacionais sobre o processo sem a necessidade de recorrer a um extensivo conjunto de testes experimentais. Além disto, uma maior compreensão da transferência de calor e massa entre o sólido e o fluido contribui para o projeto e controle de novos secadores, bem como para a otimização de secadores já existentes, assegurando a obtenção de um produto final em condições adequadas de beneficiamento e armazenamento (**LÓPEZ et alii, 1998**).

Contudo, deve ser ressaltado que a experimentação é de fundamental importância dentro de qualquer pesquisa sobre secagem, uma vez que pode contribuir para a compreensão da física do processo e, assim, para o desenvolvimento de modelos mais realísticos. Além disto, a experimentação é essencial para o conhecimento das características físicas do meio poroso e para a validação da precisão e da credibilidade das simulações.

II.1.1. MODELAGEM EM CAMADA ESPESSA

Vários modelos matemáticos têm sido propostos para descrever o processo de secagem em leitos espessos de partículas (**PARRY, 1985; CENKOWSKI et alii, 1993**). O estudo em camada espessa é parte integrante da análise dos

fenômenos de transferência de calor e massa, uma vez que possibilita a obtenção de dados mais próximos das operações em grande escala.

A complexidade da transferência simultânea de calor e de massa torna o tratamento teórico complexo e a sua descrição físico-matemática difícil. O modelo de secagem em camada espessa que vem recebendo as maiores atenções na literatura é o chamado modelo a duas fases (**BROOKER et alii, 1974, SILVA TELLES e MASSARANI, 1991**). Este modelo é oriundo de uma análise mais fundamental do problema físico envolvido na secagem. Conseqüentemente, tem um caráter mais genérico, o que tem levado aos maiores avanços no tratamento teórico da transferência simultânea de calor e massa.

Dentro do ponto de vista do modelo a duas fases, o qual tem como base a Teoria de Misturas de **TRUESDEL (1957)**, a secagem de material sólido particulado pode ser descrita como um processo de transferência de calor e massa que se desenvolve entre uma fase fluida e uma fase sólida em que apenas um componente se transfere entre elas. Assim, a cada ponto do sistema está associado um valor de velocidade, umidade e temperatura para as fases sólida (sólido seco + água líquida) e fluida (gás seco + água vapor).

As equações de conservação de massa e energia estabelecidas para cada fase, mais um conjunto de informações adicionais quanto à transferência de calor e massa entre as fases e dados de equilíbrio termodinâmico constituem o corpo desta teoria (**MASSARANI e SILVA TELLES, 1992**).

Os primeiros trabalhos com este enfoque foram desenvolvidos por **BAKKER-ARKEMA et alii (1967)** e **BROOKER et alii (1974)** que, no desenvolvimento das equações do modelo, adotaram algumas hipóteses

simplificadoras que são aceitas pela grande maioria dos pesquisadores, quais sejam:

- os gradientes de temperatura dentro das partículas individuais são negligenciáveis;
- são desprezíveis a condução de calor e a difusão de massa entre as partículas;
- as fases sólida (sólido seco + água líquida) e fluida (gás seco + água vapor) são consideradas misturas ideais;
- a radiação térmica e a perda de calor pelas paredes do sistema são consideradas desprezíveis;
- escoamento unidirecional com distribuições uniformes de temperatura, velocidade e umidade do fluido de secagem;
- as propriedades físicas do fluido e do sólido são constantes, e
- o encolhimento do leito durante o processo de secagem é negligenciável.

Entre as hipóteses adotadas no modelo a duas fases a menos aceita é a hipótese de que não há redução da espessura do meio poroso. Para o caso de materiais com altos teores de umidade inicial, esta última hipótese não é válida e o fenômeno de encolhimento do leito deve ser considerado na modelagem.

Na Tabela II.1 encontra-se um resumo das equações do modelo a duas fases, apresentado por **MANCINI (1996)**, para a representação das diversas configurações de secadores convectivos.

Tabela II.1: Equações do modelo a duas fases, **MANCINI (1996)**.

Fase Sólida	$\mathbf{G}_S \cdot \text{grad}(X) + \frac{\partial(X(m_{ss}/V_{sp}))}{\partial t} = -f(T, v, UR)$	(II.1)
	$\text{div}(\mathbf{G}_S \cdot H_S) + \frac{\partial(U_S(m_{ss}/V_{sp}))}{\partial t} = ha(T_g - T_S) - f\langle H \rangle$	(II.2)
Fase Fluida	$\mathbf{G}_g \cdot \text{grad}(Y_g) + \frac{\partial(Y_g(m_{gs}/V_{sp}))}{\partial t} = f(T, v, UR)$	(II.3)
	$\text{div}(\mathbf{G}_g \cdot H_g) + \frac{\partial(U_g(m_{gs}/V_{sp}))}{\partial t} = -ha(T_g - T_S) + f\langle H \rangle$	(II.4)
Equações Auxiliares	$f = f(X, X_{eq}, T, v, \dots, t) \quad X_{eq} = X_{eq}(T, UR)$ $U_S = H_S = (Cp_S + X \cdot Cp_1)(T_S - T_{ref}) \quad \langle H \rangle = \lambda + Cp_v(T - T_{ref})$ $H_g = (Cp_g + Y_g Cp_v)(T_g - T_{ref}) + Y_g \lambda \quad U_g = H_g - R_g T_g$	(II.5)

II.1.2. MODELO A DUAS FASES PARA O SECADOR DE LEITO FIXO

A secagem em leito fixo e camada espessa é um processo no qual o leito de partículas permanece fixo no secador e o gás de secagem percola o leito transferindo calor para a fase sólida e retirando água, num admitido escoamento com distribuições uniformes de temperatura, umidade e velocidade.

Segundo o modelo a duas fases, o meio poroso é tido como um fictício meio contínuo e os fenômenos de transferência podem ser descritos por equações macroscópicas resultantes dos balanços de massa e energia num elemento de volume representativo do leito. Uma representação esquemática de leito fixo com detalhe do elemento de volume, onde as fases particulada e fluida interagem trocando massa e energia, é mostrada na Figura II.1.

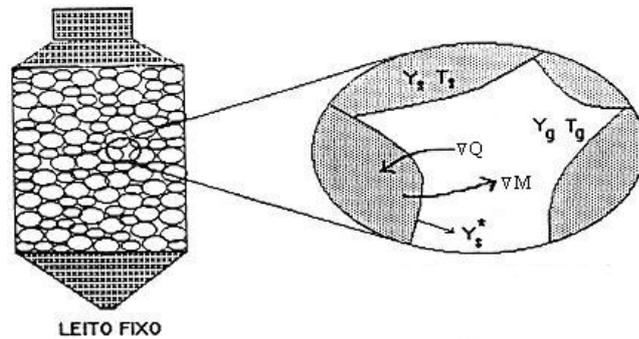


Figura II.1: Representação esquemática de um leito de partículas, com detalhe do elemento de volume isolado, CALÇADA (1994).

De acordo com PARRY (1985), COSTA e FIGUEIREDO (1990) e CENKOWSKI et alii, (1993) o comportamento de um secador de leito fixo e camada espessa é descrito pelo seguinte sistema de equações diferenciais parciais:

- Conservação de massa:

$$\rho_g v_g \frac{\partial Y_g}{\partial z} + \rho_g \varepsilon \frac{\partial Y_g}{\partial t} = -\rho_s (1 - \varepsilon) \frac{\partial X}{\partial t} \quad (\text{II.6})$$

- Conservação de energia para a fase sólida:

$$\rho_s (1 - \varepsilon) (C_{pS} + X \cdot C_{pI}) \frac{\partial T_S}{\partial t} = ha (T_g - T_S) + \rho_s (1 - \varepsilon) [L_p + (C_{p_v} - C_{p_w}) \cdot T_s] \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \quad (\text{II.7})$$

- Conservação de energia para a fluida:

$$\rho_g v_g (C_{p_g} + Y_g C_{p_v}) \frac{\partial T_g}{\partial z} + \rho_g \varepsilon (C_{p_g} + Y_g C_{p_v}) \frac{\partial T_g}{\partial t} = \left[ha - \rho_s (1 - \varepsilon) C_{p_v} \frac{\partial X}{\partial t} \right] \cdot (T_s - T_g) \quad (\text{II.8})$$

- Equação de taxa de secagem em camada fina:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = f(X, v_g, Y_g, T_g) \quad (\text{II.9})$$

- Equações auxiliares:

$$X = X_{eq}(T, UR), \quad Nu = Nu(Re, Pr) \quad (\text{II.10})$$

As condições iniciais e de contorno associadas ao problema são dadas por:

$$X(0,z) = X_0 \quad (\text{II.11})$$

$$T_S(0,z) = T_{S0} \quad (\text{II.12})$$

$$Y_g(0,z) = Y_g(t,0) = Y_{g0} \quad (\text{II.13})$$

$$T_g(0,z) = T_g(t,0) = T_{g0} \quad (\text{II.14})$$

A resolução do sistema de equações diferenciais resultante dos balanços de conservação de massa e energia, as equações constitutivas para o sistema em consideração e as condições iniciais e de contorno, levam ao estabelecimento dos perfis de temperatura e umidade do sólido e do fluido ao longo do secador.

Um grande número das operações de secagem envolve a passagem de uma corrente fluida através de um leito fixo de partículas sólidas. Esta técnica de contato sólido-fluido, utilizando ar ambiente, aquecido ou resfriado, encontra grande aplicação na agricultura para o propósito da secagem de grãos e sementes antes ou durante o armazenamento (**BROOKER et alii, 1992**). Outras aplicações variam desde a regeneração de dessecadores como silicatos até a secagem de materiais granulares das indústrias química e de alimentos (**KEEY, 1992**).

A abrangência do modelo a duas fases é dependente do tratamento dado à determinação das equações constitutivas de equilíbrio termodinâmico e de transporte de calor e massa entre as fases. Deste modo, a obtenção das mesmas tem sido feita a partir de estudos experimentais específicos, evitando-se a determinação autógena dos parâmetros de secagem, o que leva a resultados de extrapolação duvidosa (**MASSARANI e SILVA TELLES, 1992**).

II.1.3. UMIDADE DE EQUILÍBRIO

A umidade de equilíbrio de um material, numa determinada temperatura e pressão, é definida como o teor de umidade correspondente ao equilíbrio entre as pressões de vapor da água no sólido e na vizinhança.

O sólido não pode perder uma quantidade de água maior que aquela que tem em equilíbrio com o ar de secagem, ou seja, não pode ter um teor de umidade menor que o referente à umidade de equilíbrio. Constata-se, portanto, que a umidade de equilíbrio é que vai determinar o teor de umidade mínimo que o material pode atingir em um determinado conjunto de condições operacionais.

A maioria dos modelos de secagem utiliza a diferença entre o teor de umidade do material e o teor de umidade de equilíbrio como sendo uma medida da força motriz para a secagem. Devido à grande importância dos dados de umidade de equilíbrio para a modelagem de secadores, são encontrados na literatura diversos estudos experimentais envolvendo isoterma de equilíbrio, determinadas especificamente para cada tipo de grão ou semente utilizado.

As equações mais utilizadas para a estimativa da umidade de equilíbrio de grãos e sementes estão relacionadas na Tabela II.2. Estas equações são válidas numa faixa de condições operacionais entre aproximadamente 0,111 e 0,843 para a umidade relativa e de 25 a 50°C, para a temperatura.

Segundo **PRADO (1999)**, a mucilagem que envolve as sementes de mamão contribui para a retenção de umidade, tal que em altas umidades relativas a umidade de equilíbrio das sementes revestidas é maior que aquela para sementes desprovidas de mucilagem. O efeito da cobertura natural sobre a capacidade de

sorção é reduzido em baixas concentrações de vapor d'água no ambiente (ar) que circunda as sementes.

Tabela II.2: Equações para umidade de equilíbrio

Designação	Equação	Referência
Henderson	$X_{eq} = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-aT_S} \right]^{(1/b)}$ (II.15)	HENDERSON (1952)
Henderson-Thompson	$X_{eq} = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-a(T_S + c)} \right]^{1/b}$ (II.16)	THOMPSON (1968)
Chung-Pfost	$X_{eq} = \frac{-1}{b} \ln \left[\frac{(T_S + c)}{-a} \ln(UR) \right]$ (II.17)	CHUNG-PFOST (1967)
Chen-Clayton	$X_{eq} = \frac{-1}{cT_S^d} \ln \left[\frac{\ln(UR)}{-aT_S^b} \right]$ (II.18)	CHEN-CLAYTON (1971)
Halsey Modificada	$X_{eq} = \left[\frac{-\exp(aT_S + c)}{\ln(UR)} \right]^{1/b}$ (II.19)	OSBORN et alii (1989)

A equação de Halsey modificada, Equação (II.19), foi considerada a mais adequada para a previsão da umidade de equilíbrio das sementes de papaya com e sem mucilagem e recomendada para os estudos de modelagem e simulação do processo de secagem destas sementes.

II.1.4. TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITO FIXO

Com relação à transferência de calor em leito fixo, vários pesquisadores determinaram experimentalmente o coeficiente de transferência de calor volumétrico, h_a , desenvolvendo equações para estimar diretamente os valores de h_a ou calcular o número de Nusselt (Nu).

Na Tabela II.3 é apresentado um resumo das principais equações encontradas na literatura para predizer o coeficiente de transferência de calor entre o gás e o sólido em leitos de partículas. Correlações estas, desenvolvidas desde experimentos de aquecimento e resfriamento de grãos secos como a expressão de **BOYCE (1965)** até as oriundas das operações de umidificação com sistema ar-água, **FOUST et alii (1982)**. Esta última válida para sistemas que operam com sólidos que têm água de superfície e, portanto, adequada para expressar o coeficiente de transferência de calor durante o período de taxa constante.

Tabela II.3: Principais correlações utilizadas para a estimativa do coeficiente de transferência de calor entre o gás e o sólido em leito fixo.

Correlação	Faixa de validade	Referência
$h_a = 4286,5 \cdot \left[\frac{\rho_g \cdot v_g \cdot (T_g + 273)}{P} \right]^{0,6011}$ (II.20)	$3,7 < G < 14,8$ $\text{kgm}^{-2} \text{min}^{-1}$	BOYCE (1965)
$Nu_p = \frac{h \cdot D_e \cdot \phi \cdot \varepsilon}{K_g \cdot (1 - \varepsilon)} = \left(0,5 \cdot Re_p^{1/2} + 0,2 \cdot Re_p^{2/3} \right) \cdot Pr^{1/3}$ (II.21)	$20 < Re < 80000$ $\varepsilon < 0,78$	WHITAKER (1972)
$\frac{h_a}{Cp_g \cdot P} = 0,014 \cdot F^{0,72}$ (II.22)	---	FOUST et alii (1982)
$h = \left(\frac{Cp_g \cdot G_g}{\varepsilon} \right) \cdot \left(\frac{2,876}{Re} + \frac{0,302}{Re^{0,35}} \right) \cdot Pr^{-2/3}$ (II.23)	$10 < Re < 10000$	GEANKOPLIS (1993)
$Nu = 0,664 \cdot (8/3\pi) \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3}$ (II.24)	$Re < 2 \times 10^5$	WELTY et alii (1984)
$h_a = 1,2935 \cdot G_g^{1,04}$ (II.25)	$6,8 < G < 27,1$ $\text{kgm}^{-2} \text{min}^{-1}$	KHANDKER e WOODS (1987)
$Nu = 0,249 \cdot Re^{0,64}$ (II.26)	$300 < Re < 3000$	RATTI e CAPRISTE (1995)

onde, $Re = \frac{\rho_g \cdot v_g \cdot D_e}{\mu}$, $Re_p = \left(\frac{\rho_g \cdot v_g \cdot D_e}{\mu} \right) \cdot (1 - \varepsilon)$, $Nu = \frac{h \cdot D_e}{K_g}$ e $Pr = \frac{Cp_g \cdot \mu}{K_g}$

II.1.5. CINÉTICA DE SECAGEM EM CAMADA FINA

O estudo da cinética de secagem é de fundamental importância para a predição das equações de taxa de secagem, utilizadas na modelagem dos fenômenos de transferência em leitos de camada espessa. Segundo a literatura (**BROOKER et alii, 1992**) entre outros, a maneira clássica de se abordar o problema é através de experimentos de secagem em camada fina, que seria um elemento de volume dos leitos espessos. Nestes experimentos, ar em condições constantes de umidade, temperatura e velocidade atravessa uma fina camada de material úmido. O comportamento do material, sob estas condições externas de secagem constantes, é então observado por um determinado período de tempo.

A maior divergência entre os pesquisadores está na forma de expressar a transferência de massa entre as fases. O uso do modelo difusivo por alguns autores só é aceitável para descrever a cinética de secagem de materiais que apresentam somente o período à taxa decrescente. Nos trabalhos de **CALÇADA (1994)** e **MANCINI (1996)**, a taxa de secagem foi expressa em termos de um coeficiente volumétrico global de transferência de massa com o objetivo de tornar possível a descrição do fenômeno de transferência de massa em que tanto o efeito difusivo quanto o efeito convectivo possam estar presentes.

Uma outra forma de prever o comportamento de secagem de grãos e sementes, bastante difundida na literatura, é através da utilização de equações semi-empíricas justificadas, também, como sendo uma forma de simplificar a solução do complexo sistema de equações do modelo em camada espessa. Dentre as equações empíricas de secagem em camada fina mais utilizadas estão a de **LEWIS (1921)** e a de **PAGE (1949)**.

As equações correspondentes aos modelos difusivo (coordenada esférica), de coeficientes globais e aos modelos empíricos de **LEWIS (1921)** e de **PAGE (1949)** encontram-se relacionadas na Tabela II.4.

Tabela II.4: Equações de secagem em camada fina

Modelo	Equação	Referência
Difusivo	$\frac{(X - X_{eq})}{(X_0 - X_{eq})} = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{6}{(j\pi)^2} \exp\left[-(j\pi)^2 \frac{D_{eff}}{R^2} t\right] \quad (\text{II.27})$	BARROZO (1995)
Coeficientes globais	$XR = \frac{\omega}{[1 + (\omega - 1) \cdot \exp(-\omega \cdot \tau)]} \quad (\text{II.28})$ onde, $\tau = \alpha \cdot V_{sp} \frac{(X_0 - X_{eq})}{m_{SS}} \cdot t$; $\omega = \frac{\beta/\alpha - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$; $\alpha = a_1 + a_2 \cdot T$; $\beta = b_1 + b_2 \cdot T$	MANCINI (1996)
Exponencial	$XR = \exp(-Kt) \quad (\text{II.29})$ onde, $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	LEWIS (1921)
Page	$XR = \exp(-Kt^n) \quad (\text{II.30})$ onde, $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	PAGE (1949)

Nos modelos teóricos, semi-empíricos ou empíricos utilizados para descrever a taxa de secagem, constata-se que há sempre um coeficiente a determinar, que apresenta uma forte dependência da temperatura, umidade relativa, vazão do fluido e teor de umidade da semente. Este fato faz com que a validade destes modelos fique restrita à faixa de condições operacionais na qual seus parâmetros foram estimados.

PRADO (1999), além da análise de equações de camada fina para a representação da cinética de secagem de sementes de papaya, buscou uma equação de taxa de secagem que tornasse possível um tratamento mais

generalizado do processo de secagem. A partir do método de **VAN MEEL (1958)**, os dados de taxa de secagem e teor de umidade das sementes foram normalizados com respeito à taxa de secagem constante e ao teor de umidade crítico, respectivamente, sendo ajustados por correlações empíricas semelhante à lei da potência e/ou de forma quadrática. O autor concluiu que é possível descrever a cinética de secagem das sementes através de uma única curva, independente das variáveis operacionais, apenas em condições de extrema intensidade de secagem.

II.1.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS DE RESOLUÇÃO NUMÉRICA DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DO MODELO

Um dos maiores problemas do modelo a duas fases analisado é a dificuldade matemática na resolução do sistema de equações diferenciais parciais que o constituem. Tal sistema de equações tem sido resolvido numericamente, através de três técnicas distintas, quais sejam:

- (a) discretização total nas variáveis temporal e espacial, resultando um sistema de equações algébricas não-lineares (**SUN e WOODS, 1997**);
- (b) discretização apenas em uma das variáveis, resultando um sistema de equações diferenciais ordinárias não-lineares (**COSTA e FIGUEIREDO, 1990**), e
- (c) sob a hipótese de estado pseudo-estacionário para a fase fluida, a discretização é feita na direção de escoamento do fluido, resultando um sistema de equações diferenciais ordinárias não-lineares para a fase

sólida acoplado a um sistema de equações algébricas não-lineares para a fase gasosa (**CALÇADA, 1994; OURIQUE et alii, 1995; MANCINI, 1996; VIEIRA, 1998**).

Entretanto, no trabalho de **GINER et alii (1996)** o método utilizado para a resolução do sistema de quatro equações diferenciais ordinárias, obtido considerando estado pseudo-estacionário para a fase fluida, consistiu da combinação do método de Runge-Kutta de 4^a ordem para as variáveis da fase sólida (derivadas temporais) e do método de Euler estendido para as variáveis da fase fluida (derivadas espaciais). O teor de umidade e a temperatura da fase sólida variam rapidamente com o tempo, em particular em alturas próximas à entrada do leito, de modo que o método de Runge-Kutta de 4^a ordem foi usado para integrá-las. Por outro lado, as variáveis do ar de secagem apresentam uma moderada variação ao longo do leito, tal que o método de Euler estendido, o qual é preciso e requer um menor tempo computacional, foi usado.

COSTA e FIGUEIREDO (1990) propuseram um procedimento para a resolução do modelo a duas fases, no qual os termos transientes das equações de balanço para a fase fluida não são negligenciados, bem como é levado em consideração o termo responsável pela perda de energia da fase fluida devido ao calor cedido por esta para elevar a temperatura do vapor formado à temperatura do sólido T_s até a temperatura do ar T_g . O sistema é discretizado na variável espacial resultando em um sistema de EDO's com uma natureza "stiff" (**LOEB e SCHEISSER, 1974**), resolvido por um programa simulador em linguagem

FORTRAN, usando-se o pacote computacional LSODE (Livermore Solver for Ordinary Differential Equations) .

Este trabalho foi o primeiro a incorporar no método de resolução a condensação do ar de secagem sobre o material a ser seco. De acordo com os autores, quando este fenômeno ocorre, o tempo computacional é significativamente aumentado.

No trabalho de **CALÇADA (1994)** sobre a secagem de milho em leito fixo, o autor avaliou duas possibilidades de discretização, por diferenças finitas, do sistema de equações diferenciais parciais que descreve o modelo: discretização na variável temporal gerando um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDO's); e discretização na variável espacial gerando um sistema algébrico-diferencial (EAD's). O autor concluiu que o segundo procedimento de cálculo é o mais adequado para a resolução numérica do problema, por se mostrar mais eficiente e robusto. Além disto, constatou-se a versatilidade do equacionamento algébrico-diferencial, por permitir estudos de diferentes equações constitutivas referentes aos fenômenos envolvidos na secagem.

A análise das técnicas para a simulação do processo teve como base a validação pela confrontação entre resultados experimentais e simulados, o que assegura a consistência das observações feitas pelo autor.

OURIQUE et alii (1995) utilizaram o pacote computacional DASSL para resolver o sistema de equações diferenciais no tempo simultaneamente com o sistema de equações algébricas resultantes da discretização das equações de balanço da fase fluida na direção de escoamento do fluido. Segundo os autores, a

maior dificuldade encontrada no enfoque algébrico-diferencial está na inicialização consistente das variáveis envolvidas.

A inicialização do código desenvolvido é crítica em relação às variáveis da fase fluida, devendo-se considerar perfis de temperatura e umidade consistentes com o processo de discretização aplicado. Os autores obtiveram perfis iniciais de temperatura e umidade para a fase fluida após uma primeira passagem ao longo do leito de grãos, a qual não afetaria a umidade e a temperatura da fase sólida. O procedimento adotado é complexo, devido à resolução de um sistema não linear para cada ponto de discretização, por uma rotina de Newton-Raphson.

No trabalho de **VIEIRA (1998)** foi proposto um método simples, robusto e preciso para a inicialização de sistemas algébrico-diferenciais, com base na idéia de que a maioria das simulações transientes pode ser interpretada como sistemas em equilíbrio sujeitos a perturbações descontínuas. Para o caso de secadores em leito fixo, os autores admitiram que os grãos úmidos e o ar contidos no secador estavam em equilíbrio, quando a partir de $t=0$ passou a ser alimentado ar quente e seco na região de entrada do fluido $z=0$. A descontinuidade nas condições de contorno foi, então, suavizada através da inclusão de funções de regularização.

Com o procedimento proposto, os autores reproduziram os resultados de simulações anteriores, em que eram utilizadas outras formas de inicialização, validando a técnica empregada. Cabe ressaltar que os mesmos perfis de temperatura e umidade foram obtidos sem a necessidade de determinar qualquer perfil inicial.

CALÇADA et alii (1996) incluíram as equações psicrométricas no sistema composto pelas equações de conservação de massa e energia que definem

o modelo a duas fases, a fim de levar também em consideração a condensação de parte do vapor de água na corrente do ar de secagem. De acordo com os resultados obtidos, constatou-se que a inclusão das equações psicrométricas elimina problemas numéricos que podem ocorrer durante o período em que o ar de secagem atinge a saturação, aumentando a robustez do método.

De acordo com **BROOKER et alii (1974)**, as principais fontes de erros da simulação via modelo a duas fases são a falta de precisão das equações de secagem em camada fina e das equações de isotermas de equilíbrio em umidades relativas acima de 90%, e os erros nas medidas dos parâmetros de entrada e do desempenho real do secador.

Na literatura pode ser encontrada uma série de trabalhos que tratam do problema da secagem de grãos e sementes em leito fixo com uma abordagem semelhante à de **BROOKER et alii (1974)**, com destaque para os trabalhos envolvendo feijão, milho e soja (**MANCINI, 1996**), malte (**LÓPEZ et alii, 1997**), trigo (**GINER et alii, 1996**) e cevada (**SUN e WOODS, 1997; MANDAS e HABTE, 2002**).

Constata-se que os estudos existentes estão concentrados sobre a modelagem e a simulação da secagem de grãos de cereais e sementes de oleaginosas e de gramíneas, que apresentam um teor de umidade relativamente baixo, em torno de 20 e 30% b.u.. Devido às hipóteses de encolhimento desprezível e de propriedades físicas do material constantes durante o processo, adotadas na sua formulação, o modelo a duas fases não é diretamente aplicável à secagem de sementes de frutos carnosos, que possuem teores de umidade em torno de 70 e 80% b.u. e um revestimento com características deformáveis.

Logo, há a necessidade de uma avaliação do modelo a duas fases, com o intuito de adequá-lo à realidade física do processo, incorporando na sua formulação o fenômeno de encolhimento e a variação das propriedades físicas do material.

A seguir, é apresentada uma digressão sobre as generalidades do processo de secagem de sementes, com ênfase nas informações relativas ao processo envolvendo sementes com mucilagem e, em específico, sobre as sementes de mamão.

II.2. PROCESSO DE SECAGEM

II.2.1. ASPECTOS TECNOLÓGICOS

A produção mundial de mamão em 2002, de acordo com as estimativas da “Food and Agriculture Organization” (FAO), foi de aproximadamente 8,9 milhões de toneladas. O Brasil, com uma produção de cerca de 3,5 milhões de toneladas (39%), é o maior produtor no mundo. Neste mesmo ano, o Brasil emergiu também como líder nas exportações de mamão. O crescimento do mamão brasileiro no mercado nacional e internacional de frutas frescas aumentou substancialmente a importância comercial da produção de sementes.

Dentre as etapas existentes no sistema de produção de sementes, a secagem constitui uma de fundamental importância para a preservação de suas

qualidades física e fisiológica, condição esta diretamente associada a uma produtividade elevada.

As sementes extraídas de frutos carnosos, em razão da natureza destes, apresentam um teor de umidade inadequado para um armazenamento e beneficiamento seguros, necessitando, portanto, de serem submetidas a um processo de secagem.

A secagem natural é ainda bastante utilizada para secagem de sementes, principalmente no Brasil. As sementes de mamão, por exemplo, são espalhadas normalmente em camadas finas sobre folhas de jornal e colocadas para secar à sombra, **ALVARENGA (1986)**. Informações como período de exposição ao calor, altura de camada de sementes e outros fatores importantes ficam, ainda, quase inteiramente a critério pessoal de cada produtor.

Este método se mostra inadequado para a produção em média e grande escala, devido à necessidade de uma grande quantidade de mão-de-obra, ao longo tempo de secagem e, principalmente, à baixa qualidade do produto final e à sua baixa produtividade. Problemas estes, causados pela grande dependência dos fatores climáticos que leva a um difícil controle das condições de secagem.

Por causa das limitações da secagem natural e devido ao aumento da produção de sementes de mamão, pesquisas têm sido intensificadas para obter informações sobre técnicas adequadas de pós-colheita para armazenamento e processamento das sementes, visando assegurar uma melhor qualidade do produto. Logo, há um renovado interesse no desenvolvimento de técnicas de secagem artificiais voltadas para as sementes de mamão.

Dentre as inúmeras técnicas de secagem artificial disponíveis, a secagem convectiva é a mais empregada, podendo ser efetuada numa grande variedade de equipamentos, caracterizados por configurações distintas, como em leito fixo, deslizante, fluidizado ou em transporte pneumático. A escolha da técnica de secagem depende de fatores como aqueles associados às características do próprio sistema particulado e às propriedades e produção requeridas para o produto final **(STRUMILLO e KUDRA, 1986; BROOKER et alii, 1992)**. Sementes de soja, por exemplo, têm sido secas em leitos deslizantes com escoamentos cruzados **(BARROZO, 1995)**, ao passo que feijão e milho **(MANCINI, 1996)**, trigo e canola **(LANG et alii, 1993)** têm sido secos em leito fixo. Quanto à secagem de gramíneas, esta tem sido realizada tanto em leito fixo como em leito tipo esteira com escoamentos cruzados **(ARNOSTI Jr., 1997)**.

II.2.2. SECAGEM DE SEMENTES COM MUCILAGEM

A complexidade da estrutura física de sementes extraídas de frutos carnosos como o mamão, que são providas de um revestimento mucilaginoso, conduz a uma outra interessante complexidade do ponto de vista dos fenômenos de transferência de calor e massa, tornando a sua secagem um desafio desde os aspectos tecnológicos até a modelagem e simulação do processo.

Na Figura II.2 é apresentado o esquema de uma semente de mamão.

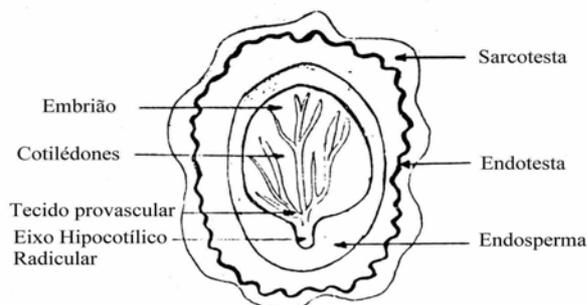


Figura II.2 - Esquema de uma semente de mamão.

O tegumento, estrutura que delimita a semente, é formado por uma capa externa sucosa, denominada sarcotesta, seguida de uma capa interna dura, a endotesta, que é provida de protuberâncias laminares meridianas.

A sarcotesta, também chamada de mucilagem, é um material rico em pectina, polissacarídeo contendo resíduos de ácidos galacturônicos. Esta mucilagem absorve grande quantidade de água devido às suas paredes celulares serem compostas por grandes quantidades destes ácidos galacturônicos não esterizados (GUTTERMAN e SHEM-TOV, 1997).

Alguns autores (CHOW e LIN, 1991; ANDREOLI e KHAN, 1993) recomendam a remoção da sarcotesta para aumentar a percentagem e a velocidade de germinação das sementes de mamão. Entretanto, de acordo com outros autores (GUTTERMAN e SHEM-TOV, 1997; RUGGIERO, 1980), a mucilagem que cobre algumas espécies de sementes atua como uma proteção natural e as possíveis vantagens de sementes com este revestimento mucilaginoso são: a recomposição mesmo em solos de regiões semi-áridas, devido à sua alta capacidade de retenção de água e o aumento de sua viabilidade.

Para sementes de mamão, **RUGGIERO (1980)** recomenda a secagem sem a remoção da sarcotesta, para manter a germinação das sementes por dois anos, armazenadas sob refrigeração à temperatura de 7 a 10°C.

Na literatura são encontrados poucos dados a respeito do processo de secagem convectiva de frutos carnosos e tampouco sobre as sementes envoltas por substâncias mucilaginosas. Para estes materiais com estrutura complexa e cujas informações sobre o seu comportamento frente a diferentes condições de secagem são escassas, o estudo em leito fixo cresce de importância pelo fato do leito fixo constituir a base para compreensão dos fenômenos fundamentais de transferência de calor e massa que permeiam os estudos em outros leitos particulados.

Além da importância técnico-científica, os secadores convectivos em leito fixo e camada espessa são ainda hoje largamente empregados devido aos baixos custos de implantação e manutenção, à facilidade de operação e à sua grande versatilidade, que lhes permitem ser utilizados para diferentes produtos. Além disto, estes secadores apresentam algumas vantagens em relação aos secadores de leitos móveis, como por exemplo: não há gasto adicional de energia para mover as partículas sólidas ao longo do leito e os danos mecânicos nos materiais são minimizados.

O Centro de Secagem do DEQ/UFSCar vem desenvolvendo, nos últimos anos, trabalhos na linha de secagem de sementes de frutos carnosos e, em particular, com sementes providas de mucilagem como as sementes de mamão papaya.

A viabilidade da técnica de secagem em leito fixo para a redução do alto teor de umidade de sementes de papaya foi avaliada no trabalho de **PRADO**

(1999). Os resultados obtidos em camada fina indicaram que este tipo de secador é promissor para esta natureza de sementes. Além da menor incidência de danos mecânicos, foi constatada a preservação das qualidades fisiológicas do produto (germinação e vigor).

Outros avanços importantes foram dados nesta linha de pesquisa através de estudos envolvendo a determinação das isotermas de equilíbrio e da cinética de secagem de sementes de papaya com e sem mucilagem, e do parâmetro de transporte de massa através deste meio especificamente (PRADO, 1999; MARINELLI et alii, 2002).

Entretanto, outras informações necessárias para o estudo do processo de secagem desta natureza de sementes frente ao modelo a duas fases são, ainda, escassas na literatura. Por exemplo, há a necessidade da caracterização física do material particulado e análise do fenômeno de encolhimento que pode ocorrer durante o processo devido às características superficiais altamente deformáveis das sementes.

II.3. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL SÓLIDO

O conhecimento de propriedades físicas como dimensões, forma, massa específica, porosidade, área específica e calor específico, é de fundamental importância para a solução das equações dos modelos de secagem. Em adição, para materiais com alto teor de umidade e que, portanto, tendem a contrair de volume, há a necessidade de determinar a dependência das propriedades físicas

em relação ao teor de umidade, a fim de se obter uma descrição real do processo de secagem.

II.3.1. DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS

Dentre as técnicas para medida do diâmetro médio de uma semente está a picnometria, onde é determinado o seu volume. A partir do volume de uma forma geométrica que seja semelhante ao volume do material de estudo, é possível determinar o diâmetro médio deste.

Outra técnica que pode ser utilizada é a de análise de imagens que fornece o diâmetro médio de Feret e o raio médio de Martin (**ARNOSTI Jr., 1997**). Podem também ser determinadas através desta técnica outras dimensões da partícula como comprimento e largura, que são importantes para o caso de materiais cuja forma difere bastante de uma esfera.

Vários pesquisadores descrevem o tamanho de grãos e sementes através de medidas das dimensões dos três principais eixos utilizando micrômetros ou paquímetros .

DUTTA et alii (1988) empregaram as médias aritmética e geométrica dos três eixos principais e o diâmetro efetivo no cálculo do volume de sementes de grama, obtendo resultados que predizem aproximadamente os valores determinados.

No trabalho de **AVIARA et alii (1999)** as dimensões das sementes de uma variedade africana de melancia foram determinadas em função do teor de umidade. Os resultados obtidos mostraram um aumento uniforme das três dimensões axiais com o teor de umidade na faixa de 4,5 a 28,2% (b.u.). Verificou-

se que as dimensões destas sementes são menores que as de melão (**RAMAKRISHNA, 1986**) e de abóbora (**JOSHI et alii, 1993**).

As variações de comprimento, largura, espessura e diâmetro geométrico de avelãs com o teor de umidade foram estudadas por **BARYEH (2001)**. O autor verificou que, na absorção de umidade, os grãos se expandem em todas as suas dimensões até um teor de umidade de 25% b.u., acima do qual nenhuma variação significativa ocorre.

DESHPANDE et alii (1993) também verificou que as dimensões de sementes de soja aumentam com o teor de umidade até 25% b.u., mas através de uma forma de dependência linear.

A expansão média de avelãs, numa faixa de 5 a 22,5% b.u., foi maior ao longo do comprimento e menor ao longo da sua largura e espessura. Por sua vez, a expansão das sementes de soja foi maior ao longo da sua espessura em comparação com os outros dois eixos principais.

Os resultados distintos obtidos por **AVIARA et alii (1999)**, por **BARYEH (2001)** e **DESHPANDE et alii (1993)** podem ser devido aos diferentes arranjos celulares nos grãos e sementes estudados.

MARTINS et alii (1997) avaliaram a variação do diâmetro da esfera equivalente de grãos de feijão com o teor de umidade. As variações máximas em torno do valor médio foram de apenas 8,5%, o que levou os autores a considerarem o diâmetro da partícula constante e igual ao diâmetro médio.

II.3.2. ESFERICIDADE

As técnicas de picnometria e de análise de imagens também são utilizadas para determinação da esfericidade da partícula, que é um parâmetro para caracterizar a forma do material.

SARTORI (1986), utilizando picnometria, determinou a esfericidade dos materiais soja, milho, arroz, vidro e areia através da seguinte equação:

$$\phi = \frac{D_e}{D_l} \quad (\text{II.31})$$

onde, D_p é o diâmetro da esfera de mesmo volume que a partícula e D_l é o diâmetro linear máximo da partícula.

ARNOSTI Jr. (1997) determinou a esfericidade de sementes de *Brachiaria brizantha* através da técnica de análise de imagens utilizando o analisador GALAI que segue a equação:

$$\phi = \frac{\text{Área Projetada}}{\text{Perímetro}^2} \cdot 4\pi \quad (\text{II.32})$$

Apesar do teor de umidade influenciar em várias propriedades físicas, **GUPTA e PRAKASH (1992)** não verificaram nenhuma variação significativa da esfericidade de sementes de girassol numa ampla faixa de teores de umidade. O mesmo comportamento foi observado por **AVIARA et alii (1999)** para sementes de melancia. De acordo com estes autores, o aumento uniforme das dimensões

explica porque a forma das sementes permanece inalterada com o teor de umidade.

A esfericidade de grãos de avelã, (BARYEH, 2001), variou não linearmente de 0,895 em 5% b.u a 0,840 em 35% b.u. DESHPANDE et alii (1993), entretanto, verificaram que a esfericidade de sementes de soja aumenta linearmente com o teor de umidade até 25 % b.u.

II.3.3. MASSA ESPECÍFICA

Para materiais particulados porosos, como grãos e sementes, existem três definições de massa específica, as quais são apresentadas a seguir.

Massa específica real: é aquela dada pela razão entre a massa do material e o seu volume sólido, de acordo com a seguinte equação:

$$\rho_s = \frac{m}{V_s} \quad (\text{II.33})$$

O volume sólido (V_s) é considerado o volume do material sólido incluindo cadeias de polímeros e líquidos como água, ácidos, etc., mas do qual o volume de todos os poros abertos e fechados é excluído (KARATHANOS et alii, 1996).

Massa específica aparente ou da partícula: é aquela obtida a partir da relação entre a massa e o volume de partículas incluindo os seus poros abertos e fechados, dada pela equação:

$$\rho_p = \frac{m}{V_p} \quad (\text{II.34})$$

Massa específica do leito ou densidade de empacotamento: é aquela obtida pela razão entre a massa e o volume do leito empacotado, dada por:

$$\rho_b = \frac{m}{V_b} \quad (\text{II.35})$$

O volume “bulk”, além do volume de sólido e de líquidos, depende do volume de poros dentro das partículas, bem como dos espaços vazios entre as partículas no leito empacotado.

Para a determinação da massa específica real de grãos e sementes, os pesquisadores têm usado ou os métodos de deslocamento de gás (**CHANG, 1988; TANG e SOKHANSANJ, 1993; JAIN e BAL, 1997; SUTHAR e DAS, 1996; GUPTA e DAS, 1997**) ou os métodos de deslocamento de líquido (**DUTTA et alii, 1988; OJE, 1994; SINGH e GOSWAMI, 1996; CHANDRASEKAR e VISWANATHAN, 1999; ARNOSTI Jr et alii, 2000, BARYEH, 2001**).

Os métodos de deslocamento de líquido são mais simples e envolvem a imersão de uma quantidade de grãos ou sementes em líquido (geralmente água, hexano ou tolueno), verificando-se a quantidade de líquido deslocado.

ZINK (1935) em seu trabalho, por exemplo, determinou a densidade real de grãos por deslocamento de mercúrio.

Quando água é utilizada, um fino recobrimento impermeável à água é aplicado sobre o grão, a fim de evitar a absorção de umidade durante o

experimento. **AVIARA et alii (1999)** recobriram sementes de melancia com uma fina camada de araldite. O aumento médio na massa devido ao adesivo foi menor que 2% e considerado, portanto, negligenciável.

O mercúrio pode apresentar maiores problemas em penetrar os poros dos grãos, por causa da sua alta tensão superficial. Segundo **CHANG (1988)**, devido à tensão superficial e à possível absorção dos líquidos utilizados, a técnica de deslocamento de líquido não é a mais adequada para determinar a massa específica real da maioria de grãos e sementes. Além disto, quando os grãos ou as sementes são recobertos, a densidade determinada não é a real, mas sim a densidade aparente ou da partícula.

Em razão dos problemas apresentados pela picnometria líquida, a utilização de picnômetros gasosos tem sido amplamente difundida para determinar o volume sólido de grãos e sementes e, conseqüentemente, a sua massa específica real. O instrumento usa o princípio de Arquimedes de deslocamento de gás, de acordo com o qual o gás é capaz de penetrar todos os poros abertos maiores que o diâmetro de sua molécula e o que não é penetrado pelo gás é considerado como o volume de sólido. Gás hélio geralmente é usado nos experimentos. O raio atômico do hélio é de aproximadamente 3Å, logo todos os poros abertos maiores que 3Å são medidos. Somente poucos poros fechados podem não ser atingidos pelas moléculas de hélio (**KARATHANOS et alii, 1996**).

No trabalho de **BARYEH (2001)**, verificou-se que a densidade real de grãos de avelã diminui linearmente de 1285 a 1160 g/cm³ à medida que o teor de umidade aumenta de 5 para 35% b.u. Este decréscimo foi atribuído ao fato de existir um menor aumento na massa dos grãos em comparação com o seu volume,

a medida que o seu teor de umidade aumenta. Comportamentos similares foram encontrados por **DESHPANDE et alii (1993)**, **JOSHI et alii (1993)** e **AVIARA et alii (1999)** para sementes de soja, abóbora e melancia, respectivamente.

Entretanto, **SINGH e GOSWAMI (1996)** para sementes de cominho, **GUPTA e DAS (1997)** para sementes de girassol, **CHANDRASEKAR e VISVANATHAN (1999)** obtiveram para grãos de café um aumento da densidade real com o teor de umidade. Ou seja, com o aumento do teor de umidade estas sementes apresentam um maior aumento na massa que no seu volume.

O decréscimo da densidade real de sementes de melancia com o aumento do teor de umidade foi atribuído por **AVIARA et alii (1999)** à composição da semente. Segundo o autor, a combinação do decréscimo da absorção de água causada pelos glóbulos de óleo e o aumento da matriz protéica com o teor de umidade pode ter causado o decréscimo da densidade real da semente.

No trabalho de **ARNOSTI Jr. et alii (2000)** verificou-se que a massa específica real de sementes de *Brachiaria brizantha*, numa faixa de 6 a 28% b.u., não varia significativamente com o teor de umidade. Segundo os autores, o fenômeno de encolhimento ocorrido durante o processo de secagem, devido à perda de umidade, resulta numa variação de volume proporcional à quantidade de água removida.

Poucos são os trabalhos existentes na literatura sobre a determinação da massa específica aparente ou da partícula, definida pela relação entre a massa e o volume aparente das sementes, o qual inclui todos os seus poros internos. No trabalho de **CHANG (1988)** foram determinadas as densidades aparente de milho, trigo e sorgo. Para a determinação do volume aparente, cada semente de uma

amostra foi recoberta, por imersão em cera de parafina líquida aquecida, de modo a isolar todos os poros intra-partícula, tornando-os inacessíveis ao gás utilizado no picnômetro.

A quantidade de cera utilizada para recobrir cada amostra foi determinada a partir da diferença de massa antes e após o recobrimento. Cada amostra de sementes recobertas teve sua massa medida e o seu volume determinado por picnometria gasosa. O volume aparente da amostra foi obtido subtraindo o volume de cera do volume total de sementes recobertas. As densidades aparentes mostraram-se 5 a 13% menores que a densidade real, como o esperado.

O método empregado por **CHANG (1988)** permite, a partir dos valores medidos de massa específica real e aparente, avaliar também a porosidade interna da partícula.

RATTI (1994) e **KARATHANOS et alii (1996)** constataram que os volumes de partículas de maçã, cenoura e batata podem ser calculados diretamente a partir de suas dimensões, em toda a faixa de teor de umidade utilizada.

Para a determinação da densidade de empacotamento, o método empregado pela maioria dos pesquisadores (**SOKHANSANJ e LANG 1996; SUTHAR e DAS, 1996; PAGANO e CROZZA, 2000**) é aquele em que um recipiente padrão é gradualmente cheio com grãos a partir de uma certa altura, nivelando-se a superfície e pesando-se o seu conteúdo.

As densidades de empacotamento de café e sementes de abóbora aumentam com o teor de umidade, enquanto as de sementes de cominho, de girassol e de soja diminuem à medida que o teor de umidade aumenta. Estas

diferenças podem ser devido à estrutura celular e às características de variação de massa e volume, próprias de cada grão ou semente, associadas à variação de umidade.

De acordo com **AVIARA et alii (1999)** o comportamento da densidade de empacotamento de sementes de melancia, contrário ao do relatado para outras sementes de frutos carnosos, em particular de curcubitáceas (melão e abóbora), pode ter sido resultado do aumento no tamanho das sementes com o teor de umidade, o qual levou a uma menor quantidade de sementes ocupando o mesmo volume “bulk”, bem como do aumento da resistência de compactação das sementes com o teor de umidade, como resultado do aumento da pressão interna.

PAGANO e CROZZA (2000) avaliaram a dependência funcional da densidade de empacotamento de sementes de milho e girassol em relação ao teor de umidade e à altura do leito. Verificou-se para os dois tipos de sementes que a densidade de empacotamento tende a diminuir linearmente com o aumento da altura do leito. Para leitos constituídos por sementes de girassol a densidade “bulk” aumenta linearmente com o teor de umidade, enquanto para sementes de milho foi observado um comportamento oposto.

ZOGZAS et alii (1994) desenvolveram modelos paramétricos, com base em definições fundamentais, para descrever a densidade real e aparente de maçãs, batatas e cenouras. Entretanto, na maioria dos estudos citados nesta revisão, a variação da massa específica de grãos e sementes com o teor de umidade é representada por equações empíricas.

II.3.4. POROSIDADE

No trabalho de **MOHSENIN (1980)** são descritos vários métodos de determinação da porosidade de sementes. Entretanto, um grande número de investigadores utiliza a sua dependência com as massas específicas real, aparente e “bulk” para calcular seus valores em vários teores de umidade. Com base nas definições de massa específica, podemos distinguir três tipos de porosidade: porosidade da partícula, porosidade “bulk” e a porosidade total do leito.

Porosidade da partícula: dada pela razão entre o volume de poros abertos e o volume total de partículas. Pode ser calculada usando a equação,

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\rho_p}{\rho_s} \quad (\text{II.36})$$

Porosidade “bulk”: dada pela relação entre o volume de vazios de ar interpartícula e o volume total do leito através da seguinte equação,

$$\varepsilon_b = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (\text{II.37})$$

Porosidade total: dada pela relação entre o volume de poros abertos intrapartícula e de vazios de ar interpartícula e o volume total do leito. Pode ser obtida pela seguinte equação,

$$\varepsilon_t = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (\text{II.38})$$

O dispositivo desenvolvido por **DAY (1964)** também é amplamente utilizado para determinar a porosidade de grãos e sementes (**VISVANATHAN et alii, 1996; ÇARMAN, 1996; CHANDRASEKAR e VISVANATHAN, 1999**). O aparato experimental consiste basicamente de dois recipientes com volumes equivalentes, um contendo ar sob uma pressão p_1 e o outro a amostra de sementes. Quando a válvula entre os dois recipientes é aberta, a pressão de ar nos dois recipientes equaliza-se a um valor p_2 . A porosidade é então calculada a partir da equação:

$$\varepsilon = \frac{(p_1 - p_2)}{p_1} \cdot 100 \quad (\text{II.39})$$

DESHPANDE et alii (1993), JOSHI et alii (1993), SUTHAR e DAS (1996) e CHANDRASEKAR e VISVANATHAN (1999) obtiveram um decréscimo linear da porosidade total com o teor de umidade para sementes de soja, abóbora, melancia e café, respectivamente. Já nos trabalhos de **SINGH e GOSWAMI (1996) e GUPTA e DAS (1997)**, os valores de porosidade de sementes de cominho e girassol, respectivamente, apresentaram um aumento com o aumento do teor de umidade.

A remoção de umidade durante a secagem de feijão em leito fixo (**MARTINS et alii, 1997**) não induziu a formação de uma estrutura mais porosa, com a porosidade do leito apresentando uma magnitude constante de $(0,40 \pm 0,03)$.

O trabalho de **BARYEH (2001)** mostrou as características peculiares da porosidade de leitões constituídos por avelãs. A porosidade do sistema aumenta não linearmente de 0,405 em 35% b.u. até 0,438 em 20% b.u., quando então

decrece, também de forma não linear com o teor de umidade. A variação observada na porosidade também não é tão alta quanto as encontradas para outros tipos de grãos e sementes.

Diante dos diferentes comportamentos existentes, constata-se que a porosidade é uma propriedade estrutural específica do sistema, conforme relatado por **LOZANO et alii (1983)**. Estes comportamentos refletem, de acordo com **MADAMBA et alii (1993)**, as características de encolhimento do sistema.

Os sistemas gelatinizados apresentam inicialmente uma baixa porosidade, entre 0 e 0,01. Durante a gelatinização, a fusão dos grânulos individuais ocorre, fazendo desaparecer os poros existentes e levando à formação de uma matriz, encapsulando moléculas de água nas pequenas cavidades. A subsequente secagem, entretanto, induz a formação de poros de ar dentro do material homogêneo, formando assim um sistema heterogêneo gás-sólido (**KARATHANOS e SARAVACOS, 1993**).

KARATHANOS et alii (1990) relataram a presença deste comportamento característico no estudo sobre o desenvolvimento da porosidade em sistemas amiláceos gelatinizados. A comparação das características de porosidade interna de materiais granulares e gelatinizados revelou que as amostras de gel têm uma estrutura compacta, com uma porosidade interna menor que 0,01, enquanto o amido granular seco sofreu um aumento na formação de poros, atingindo um valor absoluto de 0,45.

Entretanto, um comportamento contrário foi obtido por **MAROUSIS e SARAVACOS (1990)** para o desenvolvimento de poros de ar em sistemas gelatinizados. Os autores observaram a presença de uma estrutura mais porosa,

com a porosidade interna exibindo um aumento linear com o teor de umidade, aproximando-se de um valor máximo entre 0,4 e 0,6, quando seca.

II.3.5. CALOR ESPECÍFICO

Dentro da linha de estudos sobre as propriedades de diferentes materiais encontram-se trabalhos que visam a determinação do calor específico, que faz parte das equações dos balanços de energia desenvolvidos para analisar o comportamento de secagem de vários produtos, tais como, sementes.

ALMEIDA(1979), propõe os seguintes métodos para a determinação do calor específico:

- relação entre a condutividade térmica, massa específica e difusividade térmica;
- processo das misturas;
- calorimetria de varredura diferencial (DSC);
- calorimetria de gelo, e
- bomba calorimétrica.

Os quatro últimos métodos são baseados no equilíbrio térmico entre um corpo de calor específico desconhecido e um outro corpo de calor específico já determinado. A descrição de todos estes métodos pode ser encontrada em **PEDROZA et alii (1993)**.

PEDROZA et alii (1993), utilizando o processo das misturas, concluíram que o valor do calor específico das sementes de urucum teve um acréscimo com o aumento do teor de umidade das sementes, operando numa faixa de 10,0 a 20 % de umidade em base úmida.

SWEAT (1986) fez uma revisão sobre o calor específico de vários produtos e ao analisar cerca de mil pontos experimentais sugeriu uma correlação linear desta propriedade com o teor de umidade do material.

Em trabalho realizado com sementes de *Brachiaria brizantha*, **ARNOSTI Jr. (1997)** encontrou também uma relação linear entre o calor específico e o teor de umidade do material. Neste estudo, o autor utilizou o método da relação entre a massa específica, a difusividade e a condutividade térmicas. O processo das misturas foi invalidado devido à dificuldade encontrada em se promover a mistura entre o líquido e as sementes de gramíneas, que apresentam um baixo valor de densidade.

Segundo **SHARMA e THOMPSON (1973)**, apesar de ser direta, esta técnica não é muito precisa. O calor de hidratação liberado quando o material absorve umidade da água do calorímetro pode introduzir sérios erros nas medidas.

Apesar do calor específico poder ser determinado por várias técnicas calorimétricas, a de calorimetria por varredura diferencial (DSC) tem sido geralmente empregada, por se tratar de um método experimental preciso **McMINN e MAGEE (1999)**.

CHAKRABARTI e JOHNSON (1972) descreveram a metodologia para a determinação do calor específico de tabaco por DSC e observaram um aumento de até 16% no calor específico do material com o aumento na temperatura de 40 a 70°C.

MURATA et alii (1987), utilizando DSC, determinaram o calor específico de oito tipos de grãos de cereais numa faixa de temperatura de 10 a 70 °C e para

teores de umidade entre 0 e 35% b.u. O calor específico foi relacionado de forma linear ao teor de umidade e de forma quadrática com respeito à temperatura.

TANG et alii (1991) descreveram a técnica de medida por DSC para determinar o calor específico de sementes de lentilha e verificaram que o calor específico destas sementes aumenta quadraticamente com o teor de umidade, numa faixa de 2 a 35% b.s., e linearmente com a temperatura na faixa de 10 a 80°C. Os valores variaram de 0,81 a 2,2 kJ/kg.K.

ARNOSTI Jr. (1997) também utilizou a técnica de calorimetria de varredura diferencial para determinar o calor específico das sementes de gramíneas em função da temperatura. O referido autor encontrou uma relação de forma de dependência quadrática entre o calor específico do material e a temperatura, resultado condizente com as conclusões de **MUJUMDAR (1995)**, de que polinômios de segunda ordem representam de forma adequada a variação do calor específico com a temperatura.

SINGH e GOSWAMI (2000) estudaram o efeito do teor de umidade e da temperatura sobre o calor específico de sementes de cominho usando DSC. Os autores verificaram um aumento não linear do calor específico do material com o teor de umidade e a temperatura, em faixas de 1,8 a 20,5 (b.s.) e -70 a 50°C, respectivamente. Esta dependência foi melhor representada por polinômios de segunda ordem.

A partir dos valores de condutividade e difusividade térmicas e massa específica, recentemente, no trabalho de **LUCCAS et alii (2002)** foram determinados os calores específicos de sementes de *Brachiaria brizanta* e milho. Os valores medidos para o milho com e sem cobertura artificial a base

de gel foram iguais a $(0,34\pm 0,01)$ kJ/kgK e $(1,31\pm 0,01)$ kJ/kgK, respectivamente. Estes são valores médios válidos para a pressão atmosférica e temperatura na faixa de $(20\pm 1)^\circ\text{C}$ a $(40\pm 1)^\circ\text{C}$.

Diante do contexto apresentado, verifica-se que as propriedades físicas dos materiais podem ser dependentes do teor de umidade. A densidade, o tamanho da partícula e a porosidade do leito de sementes de oleaginosas e de grãos de cereais sofrem uma pequena variação com a remoção de umidade (**MARTINS et alii, 1997, SUN e WOODS, 1997; ARNOSTI Jr., 1997**). Por causa do efeito do teor de umidade ser pequeno, nos estudos sobre modelagem e simulação do processo de secagem que se concentram sobre estas sementes, os valores médios entre as propriedades são normalmente utilizados.

Entretanto, a secagem de sementes de frutos carnosos por causa de seu alto teor de umidade inicial tende a envolver uma grande variação do teor de umidade, de modo que o efeito da umidade sobre as propriedades físicas desta natureza de sementes é de importante consideração na modelagem e simulação do processo. Apesar de alguns trabalhos realizados sobre as propriedades de sementes de frutos carnosos como melão, melancia e abóbora, nenhuma informação foi encontrada na literatura sobre as propriedades físicas de sementes revestidas por uma mucilagem natural, como as sementes de mamão papaya e, tampouco, de sua dependência com o teor de umidade e com a estrutura da partícula.

Uma caracterização física mais precisa das sementes em função do teor de umidade contribui para uma análise mais profunda do fenômeno de encolhimento, o qual tende a ocorrer durante a secagem de materiais com alto teor de umidade.

II.3.6. FENÔMENO DE ENCOLHIMENTO

Um dos maiores problemas que restringem a aplicação dos modelos de secagem de sementes é a falta de informações sobre o fenômeno de encolhimento, o qual pode ocorrer simultaneamente com a transferência de calor e de massa. Uma melhor compreensão do fenômeno de encolhimento é, portanto, essencial para o aperfeiçoamento dos modelos de secagem.

O encolhimento é um fenômeno físico caracterizado pela contração de volume do material durante o processo de secagem. Na literatura são encontradas diferentes abordagens para este fenômeno que vão desde as teóricas envolvendo leis mecânicas, onde são consideradas as tensões e as deformações do material durante a secagem, até as experimentais, onde os estudos visam quantificar a dependência do volume dos materiais em função do seu teor de umidade.

A abordagem teórica foi utilizada por alguns pesquisadores (**SHISHIDO et alii, 1986; TOWNER, 1987**) na secagem de solo e de polímeros. Entretanto, uma análise similar para alimentos é extremamente complicada, devido à natureza celular e multifásica do sistema e à necessidade do conhecimento da estrutura e das propriedades mecânicas e elásticas de cada fase do sistema, bem como de suas variações com o teor de umidade e a temperatura. Assim, a abordagem mais utilizada para o estudo do encolhimento de alimentos é a experimental.

Uma grande variedade de modelos foi proposta na literatura para descrever o encolhimento durante a secagem. Entretanto, a maioria das equações, relacionando o volume do material e o seu teor de umidade, é empírica. **KILPATRICK et alii (1955)** propuseram uma equação empírica relacionando as variações da área específica de batatas e outros vegetais com o teor de umidade. A

sua aplicação aos estágios iniciais de secagem mostrou que o encolhimento volumétrico foi aproximadamente equivalente ao volume de água evaporada.

Os primeiros modelos de encolhimento teóricos foram desenvolvidos para vegetais e frutas. **SUZUKI et alii (1976)** investigaram o encolhimento durante a secagem de vegetais (cenoura, batata, batata doce e rabanetes) e propuseram três modelos para descrever a relação entre a variação de volume e o conteúdo de umidade: modelo de secagem uniforme, modelo de secagem central (“core drying”) e modelo de secagem semicentral (“semicore drying”). As equações que compõem estes modelos são apresentadas na Tabela II.5.

Tabela II.5: Equações dos modelos de encolhimento propostos por **SUZUKI et alii. (1976)**.

Modelo	Equação
Secagem uniforme	$S_b = \left(\frac{\rho_{s_0}}{X_0 + 1} \right) \cdot X + \frac{X_0 \cdot (1 - \rho_{s_0}) + 1}{X_0 + 1} \quad (\text{II.40})$
	$S_b = \left[\frac{X + X_{eq} \cdot (1/\rho_{s_{eq}} - 1) + 1/\rho_{s_{eq}}}{X_0 + X_{eq} \cdot (1/\rho_{s_{eq}} - 1) + 1/\rho_{s_{eq}}} \right] \quad (\text{II.41})$
Secagem central	$S_b = [(1 - \zeta)/(X_0 - X_{eq})] \cdot X + [(\zeta \cdot X_0 - X_{eq})/(X_0 - X_{eq})] \quad (\text{II.42})$
Secagem semi central	$S_b = \frac{(1 - \zeta)}{[(X_0 - X_{eq}) - \gamma \cdot (\zeta \cdot X_0 - X_{eq} + \zeta - 1)]} \cdot X + \frac{[\zeta - \gamma \cdot (\zeta \cdot X_0 - X_{eq} + \zeta - 1)]}{[(X_0 - X_{eq}) - \gamma \cdot (\zeta \cdot X_0 - X_{eq} + \zeta - 1)]} \quad (\text{II.43})$
	$\text{onde } \zeta = \rho_{s_0} \cdot (1 + X_{eq}) / \rho_{s_{eq}} \cdot (1 + X_0) \quad (\text{II.44})$

No modelo de secagem uniforme é assumido que o encolhimento é equivalente ao volume de água evaporada durante todos os estágios de secagem.

Duas equações alternativas, Equações (II.40) e (II.41), são propostas. A primeira tem como base o conhecimento da massa específica e do teor de umidade do material no equilíbrio termodinâmico, enquanto a segunda, dos valores iniciais de massa específica e do teor de umidade.

O modelo de secagem central, representado pelas Equações (II.42) e (II.44), assume a formação de uma camada externa seca com um centro sólido úmido, onde a densidade deste centro é equivalente à densidade inicial do material e a densidade da camada externa é igual à do material no teor de umidade de equilíbrio.

O modelo de secagem semicentral representa uma correlação intermediária entre os modelos supracitados, uma vez que considera a densidade da camada externa como um valor situado entre as densidades inicial e de equilíbrio do material. Logo, é assumido que a densidade da camada externa pode ser avaliada a partir de $\rho_{s_0} \gamma + (1 - \gamma) \rho_{s_{eq}}$, onde o parâmetro arbitrário γ pode variar de 0 a 1.

Verifica-se que o primeiro modelo resulta em duas equações alternativas: uma necessita dos dados de umidade de equilíbrio e massa específica de equilíbrio, enquanto que outra requer a umidade inicial e a massa específica inicial. O segundo e terceiro modelos necessitam dos valores iniciais e de equilíbrio para a umidade e a massa específica.

De acordo com as conclusões dos autores, o modelo de secagem central foi o mais adequado para representar o fenômeno, enquanto o modelo de secagem uniforme mostrou-se válido apenas para representar o encolhimento no estágio inicial de secagem, ou seja, no período de taxa constante.

LOZANO et alii (1983) utilizaram dois métodos alternativos para avaliar o encolhimento de frutas e vegetais. Primeiramente, os autores apresentaram uma equação desenvolvida com base na composição do material. Esta equação foi então modificada para estabelecer uma correlação empírica generalizada, que estimasse as características de encolhimento a partir do conhecimento somente do teor de umidade inicial da amostra. Os autores obtiveram com este modelo uma adequada avaliação dos dados experimentais.

TANG e SOKHANSANJ (1993) desenvolveram um modelo teórico para descrever as variações nas dimensões de lentilhas secas artificialmente. A geometria de uma semente de lentilha foi modelada como uma lente consistindo de dois segmentos hemisféricos idênticos. Os autores encontraram uma boa concordância entre a variação de volume experimental e os resultados teóricos.

LANG et alii (1993) mediram o encolhimento “bulk” de canola e trigo durante a secagem em leito fixo. Os autores verificaram que o coeficiente de encolhimento (definido como a variação de volume pela variação de umidade) de canola foi 1,1, enquanto para trigo foi de 1,3, resultado que indica uma maior redução de volume para o trigo que para canola.

No trabalho de **SOKHANSANJ e LANG (1996)** as leis das misturas foram utilizadas para desenvolver as seguintes equações para descrever o encolhimento volumétrico, tanto da matriz sólida como das partículas porosas, de trigo e canola, em função do teor de umidade:

$$\frac{V_s}{V_{s_0}} = \left[\frac{1 - X_0}{1 + (\eta - 1) \cdot X_0} \right] \cdot \left[\frac{1 + (\eta - 1) \cdot X}{1 - X} \right] \quad (\text{II.45})$$

e

$$\frac{V_b}{V_{b_0}} = \frac{[1 - (X_0 - X)] \cdot [1 + (\eta - 1) \cdot X] \cdot (1 - \varepsilon_0)}{[1 + (\eta - 1) \cdot X_0] \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (\text{II.46})$$

onde, V_s e V_{s_0} são os volumes da matriz sólida dos grãos, V_b e V_{b_0} são os volumes das partículas correspondentes aos teores de umidade em base úmida num certo tempo (X) e inicial (X_0), respectivamente, e η é a massa específica relativa do sólido seco, considerada constante para cada grão.

A comparação com os dados experimentais mostrou que a contração de volume da matriz sólida, tanto de trigo como de canola, foi adequadamente descrita pela Equação (II.45). A Equação (II.46) deu uma adequada predição da contração de volume “bulk” de canola, considerando $\varepsilon = \varepsilon_0$. Para trigo, entretanto, foi necessário incorporar a dependência funcional da porosidade com o teor de umidade. Este resultado destaca a importância de levar em consideração o significativo aumento de vazios de ar nos balanços materiais adotados para descrever o encolhimento.

Constata-se que uma grande quantidade de trabalhos vem sendo realizada para se estudar o encolhimento durante a secagem. Com exceção de alguns poucos trabalhos publicados envolvendo grãos e sementes (**LANG et alii, 1993; THAKOR et alii, 1999; ARNOSTI Jr. et alii, 2000**), a maioria trata de alimentos como frutas e vegetais e, apesar dos estudos sobre o encolhimento de partículas individuais, poucos se dedicam à descrição do fenômeno em leitos empacotados (**RATTI, 1994**) e tampouco em leitos constituídos por sementes (**SOKHANSANJ e LANG, 1996**).

Diante do contexto apresentado nesta revisão da literatura, constata-se que apesar da secagem constituir uma operação de fundamental importância no processo de produção de sementes de frutos carnosos, as informações necessárias para o projeto e a simulação de secadores convectivos voltados para esta natureza de sementes são ainda muito escassas na literatura.

A camada externa de mucilagem revestindo as sementes de algumas espécies de frutos carnosos gera uma estrutura de partícula peculiar e interessante, mas pouco conhecida do ponto de vista da interação de troca de massa e energia com um fluido de secagem.

Os avanços obtidos nos estudos conduzidos no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar sobre a secagem de sementes de mamão possibilitam a continuação da linha de pesquisa enfocando a secagem de sementes revestidas naturalmente por mucilagem, tendo em vista a compreensão dos fenômenos fundamentais de transferência de calor e massa envolvidos no processo.

Atualmente, dois grandes desafios residem nesta linha de atuação:

- o conhecimento, a partir de estudos específicos, das características de secagem em camada espessa, incluindo desde as características de encolhimento das partículas até as interações de troca de massa e energia com o fluido de secagem, e
- a utilização de modelos matemáticos fundamentados nas equações de conservação de massa e energia para as fases sólida e fluida para a representação física da secagem desta natureza de sementes.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados, o equipamento e as metodologias para a caracterização do fenômeno de encolhimento e da transferência de calor e massa durante o processo de secagem do material particulado. Também são apresentados os procedimentos para a determinação das propriedades físicas deste, bem como os métodos de tratamento dos dados, os quais incluem a solução numérica do modelo de secagem.

III.1. MATERIAIS

Nesta pesquisa foram utilizados como materiais de estudo sementes de mamão papaya e ar atmosférico aquecido como fluido de secagem.

A escolha das sementes de mamão se deve ao interesse técnico-científico no estudo do processo de secagem de sementes de frutos carnosos, as quais apresentam um alto teor de umidade inicial e encontram-se revestidas por uma camada de mucilagem. Características estas, bastante distintas de outras sementes como as de oleaginosas e de gramíneas, sobre as quais se concentra a maioria dos trabalhos da literatura.

As sementes de papaya foram adquiridas “in natura” para o processo de secagem, a partir de mamões em estado de maturação fisiológica, não necessitando, portanto, de um processo de reumidificação artificial, como geralmente ocorre para as outras sementes.

Entretanto, para evitar o efeito da variabilidade do tamanho das partículas sobre os fenômenos estudados, foi de fundamental importância a classificação e a homogeneização do material. Além disto, amostras de sementes desprovidas de mucilagem foram também preparadas a fim de avaliar a influência das características superficiais das partículas sobre os fenômenos simultâneos de transferência de calor e de massa e encolhimento durante a secagem. Assim, a obtenção das amostras de sementes envolveu não somente a extração das sementes das bagas de frutos carnosos, mas também o preparo do material para a condução dos experimentos.

III.1.1. EXTRAÇÃO DAS SEMENTES

A retirada das sementes dos frutos carnosos foi feita manualmente, visando minimizar os danos mecânicos, de acordo com o procedimento proposto por **ALVARENGA (1986)**. Os frutos maduros eram cortados longitudinalmente em duas metades e as sementes extraídas com o auxílio de uma colher.

III.1.2. PREPARAÇÃO DAS PARTÍCULAS

Após a extração manual das sementes estas eram colocadas em peneiras para serem lavadas em água corrente, a fim de eliminar os resíduos de açúcares, remover as fibras aderidas de mamão e separá-las por tamanho.

A distribuição de tamanho das sementes de papaya extraídas das bagas de mamão foi obtida a partir da utilização de três peneiras com aberturas de 4,76, 4,00 e 3,36 mm.

A fim de assegurar uma distribuição de umidade inicial uniforme, as sementes eram acondicionadas em sacos plásticos hermeticamente fechados e armazenadas por 12 horas em incubadora a 10°C (RUGGIERO, 1980).

Para a obtenção das amostras de sementes desprovidas de mucilagem, as sementes extraídas dos frutos eram imersas em água por 12 horas para facilitar a remoção da membrana presente na superfície da semente (TANG et alii., 1978). A mucilagem era então removida esfregando-se suavemente, com o auxílio de uma esponja, as sementes contra as peneiras. Após a lavagem em água corrente e retirada do excesso, as sementes sem mucilagem eram tratadas da mesma maneira descrita para as sementes revestidas.

Na Figura III.1 é mostrada uma foto das sementes de papaia com e sem a cobertura de mucilagem, a partir da qual é possível observar as suas características superficiais distintas. Enquanto as sementes revestidas (b) apresentam uma camada externa sucosa lisa, as sementes desprovidas do envoltório gelatinoso (a) mostram uma camada externa provida de protuberâncias que lhe conferem uma maior rugosidade superficial.



Figura III.1 – Foto das sementes de papaia (a) sem mucilagem (b) com mucilagem

III.2. MODELO A DUAS FASES

Sendo os modelos fundamentados nos balanços de conservação de massa e energia bastante representativos do processo de secagem em camada espessa, é proposto neste trabalho um estudo do modelo a duas fases, adequando-o de forma a reproduzir fisicamente um processo de secagem de sementes com alto teor de umidade inicial e com uma estrutura susceptível ao encolhimento, como é o caso da secagem de sementes de papaya.

O problema sob investigação, a convecção forçada de ar aquecido através de um leito empacotado de partículas úmidas e deformáveis, é esquematizado na Figura III.2.

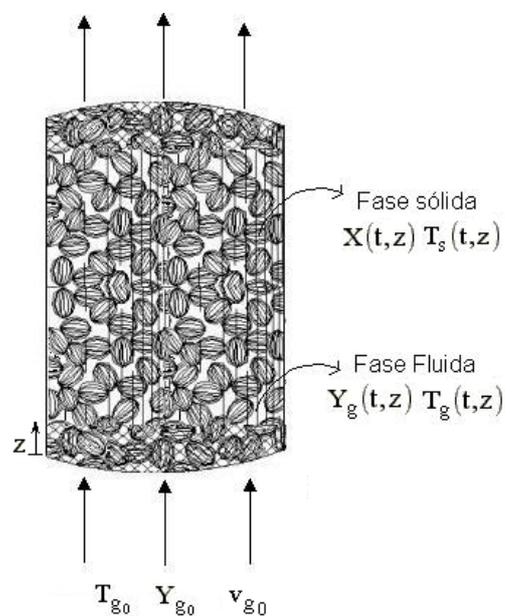


Figura III.2 - Esquema de um de leito fixo

III.2.1. HIPÓTESES DO MODELO

Para a formulação matemática do problema foram adotadas as seguintes hipóteses:

- distribuições uniformes de temperatura, umidade e velocidade do ar na entrada do secador;
- as perdas de calor pelas paredes do secador são desprezíveis;
- transferência de calor predominantemente convectiva;
- transporte unidimensional de calor e massa;
- o fenômeno de encolhimento não é desprezível, e
- as propriedades físicas do material são assumidas como funções do teor de umidade.

Estas duas últimas considerações diferem das originalmente propostas no modelo a duas fases (**BROOKER et alii, 1974, SILVA TELLES e MASSARANI, 1991**). Para assegurar a validade destas hipóteses estudos experimentais específicos serão realizados.

A fim incorporar o fenômeno de encolhimento das sementes durante a secagem, um sistema de coordenada móvel, que segue o movimento de contração do leito de partículas, foi usado. Isto foi feito tomando como base um elemento de volume que contenha sempre a mesma quantidade de massa seca, como aquela do tempo inicial. O sistema de coordenada móvel é relacionado à coordenada espacial pela seguinte equação:

$$dz = \frac{\rho_{b0}}{\rho_b} \cdot d\xi = \frac{V_1}{V_{10}} \cdot d\xi = S_b \cdot d\xi \quad (\text{III.1})$$

onde, ρ_{b0} e ρ_b são, respectivamente, as densidades de empacotamento inicial e num dado tempo t ; V_1 é o volume do leito num tempo t ; V_{10} , o volume inicial do leito; S_b , o parâmetro de encolhimento do leito; z , a coordenada espacial e ξ , a coordenada móvel.

III.2.2. EQUAÇÕES DO MODELO

Com as considerações feitas na formulação do problema da secagem em leito fixo de sementes susceptíveis ao encolhimento e com a mudança para um sistema de coordenada móvel, o sistema de equações diferenciais parciais (EDP) obtido dos balanços de massa e energia para as fases sólida e fluida num elemento de volume do leito e dado pelas Equações II.6 a II.9, passa a ser representado da seguinte forma:

- Conservação de massa:

$$\rho_g \left(\frac{v_g}{S_b} \cdot \frac{\partial Y_g}{\partial \xi} + \varepsilon \frac{\partial Y_g}{\partial t} \right) = -\rho_b \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \quad (\text{III.2})$$

- Conservação de energia para a fase sólida:

$$\rho_b \cdot (C_{pS} + X \cdot C_{p_w}) \frac{\partial T_S}{\partial t} = h a_v (T_g - T_S) + \rho_b \cdot [L_p + (C_{p_v} - C_{p_w}) \cdot T_s] \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \quad (\text{III.3})$$

- Conservação de energia para a fase fluida:

$$\frac{v_g \cdot \rho_g}{S_b} \cdot (Cp_g + Y_g Cp_v) \frac{\partial T_g}{\partial \xi} + \rho_g \cdot \varepsilon \cdot (Cp_g + Y_g Cp_v) \frac{\partial T_g}{\partial t} = \left[ha - \rho_b \cdot Cp_v \cdot \frac{\partial X}{\partial t} \right] \cdot (T_s - T_g) \quad (III.4)$$

- Equação de taxa de secagem em camada fina:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = f(X, v_g, Y_g, T_g) \quad (III.5)$$

Quatro variáveis de estado são preditas pelo modelo: umidade do sólido (X), temperatura do sólido (T_s), temperatura do fluido (T_g) e umidade de ar (Y_g) em função de tempo (t) e da coordenada ξ . As equações do modelo estão submetidas às seguintes condições iniciais e de contorno:

$$\text{Para } t = 0 \text{ e } z = 0 \left\{ \begin{array}{l} X = X_0 \\ T_s = T_{s0} \\ Y_g = Y_{g0} \\ T_g = T_{g0} \end{array} \right. \quad \text{para } t=0 \text{ e } z \neq 0 \left\{ \begin{array}{l} X = X_0 \\ T_s = T_{s0} \\ Y_g = Y_{g,\text{sat}}(T_{s0}) \\ T_g = T_{s0} \end{array} \right. \quad (III.6)$$

$$\text{Para } z = 0 \quad \forall t, \quad Y_g = Y_{g0} \text{ e } T_g = T_{g0} \quad (III.7)$$

III.2.3. EQUAÇÕES AUXILIARES DO MODELO

A) Isotermas de equilíbrio

$$X_{\text{eq}} = X_{\text{eq}}(T_g; \text{UR}) \quad (III.8)$$

B) Equação de taxa de secagem

$$f = \begin{cases} \frac{dX}{dt} = -k_c & \text{para } X_{cr} \leq X \leq X_0 \\ \frac{dX}{dt} = -K \cdot (X - X_{eq}) & \text{para } X < X_{cr} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

$$k_c = k_c(T_g, v_g), \quad K = K(T_g, v_g) \quad (\text{III.10})$$

C) Correlação para a estimativa do coeficiente de transferência de calor

$$\text{Nu} = \text{Nu}(\text{Re}, \text{Pr}) \quad (\text{III.11})$$

D) Parâmetro de encolhimento do leito

$$S_b = \frac{V_{sp}}{V_{sp0}} = S_b(\bar{X}(t)) \quad (\text{III.12})$$

E) Propriedades físicas das sementes e do leito em função do teor de umidade

Diâmetro, fator de forma e massa específica das partículas:

$$D_e = D_e(X); \quad \phi = \phi(X); \quad \rho_s = \rho_s(X) \quad (\text{III.13})$$

Massa específica do leito:

$$\rho_b = \rho_b(\bar{X}(t)) \quad (\text{III.14})$$

Área específica do leito:

$$a_v = a_v(\bar{X}(t)) \quad (\text{III.15})$$

Porosidade do leito:

$$\varepsilon = \varepsilon(\bar{X}(t)) \quad (\text{III.16})$$

Algumas informações necessárias para a aplicação do modelo a duas fases, como as que dizem respeito às isotermas de equilíbrio e às equações de taxa de secagem para as sementes em estudo, foram obtidas em trabalhos anteriores. No entanto, o estudo de simulação só foi possível de ser realizado com o conhecimento prévio, a partir de estudos específicos, dos parâmetros de encolhimento e das propriedades físicas do material em função do teor de umidade. Neste sentido, a condução de testes de secagem em unidade de laboratório foi de fundamental importância. Estes testes também foram essenciais para a obtenção de dados experimentais para posterior avaliação do modelo a duas fases.

III.3. UNIDADE EXPERIMENTAL DE SECAGEM

III.3.1. EQUIPAMENTO

Para o desenvolvimento deste estudo, foi utilizada a unidade de secagem em leito fixo existente no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, que se encontra esquematizada na Figura III.3.

A partir da unidade de secagem construída por **SILVA (1997)**, foram realizadas modificações para que a mesma pudesse atender às condições operacionais utilizadas neste trabalho. Foi inserido um trocador de calor do tipo casco e tubo com circulação de água na região coaxial, na configuração de escoamentos contra-correntes, para possibilitar atingir a faixa operacional de temperaturas utilizadas. Adicionou-se, também, um novo sistema de chave

seletora e milivoltímetro digital a fim de possibilitar a conexão de um conjunto de termopares para a aquisição de temperaturas em leito fixo e camada espessa.

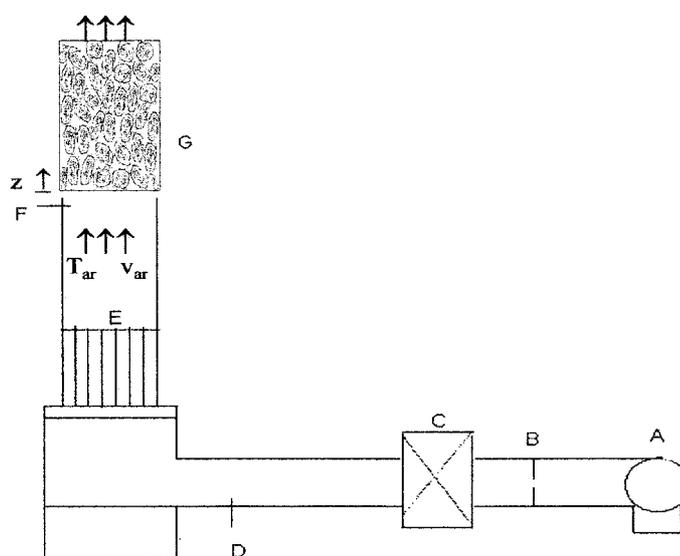


Figura III.3 – Esquema da unidade de secagem em leito fixo utilizada.

Na unidade apresentada na Figura III.3, o fluxo de ar é fornecido por um soprador (A) de 0,75 HP, passando pelo trocador de calor do tipo casco e tubo acoplado ao sistema. A medida de vazão do ar é realizada através da leitura da diferença de pressão em um manômetro tipo U com água, ligado a um medidor de vazão do tipo dupla placa de orifício (B) previamente calibrado. O ar de secagem é aquecido através de um aquecedor elétrico de 2500 W (C), ligado a um variador de voltagem, passando por um tubo de estabilização do escoamento do ar (E), atingindo a célula de medidas (G) e percolando o leito de sementes com exaustão para a atmosfera.

A tubulação posterior ao aquecedor elétrico foi isolada com placas de lã de vidro de 3 cm de espessura e recoberta com folhas de alumínio corrugado, a fim de minimizar as perdas de calor pelas paredes do sistema e garantir uma

distribuição uniforme de temperatura na região de entrada da célula de medidas, a qual também foi isolada termicamente.

III.3.2. GARANTIAS EXPERIMENTAIS DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO MODELO

Tendo em vista a garantia experimental da validade da hipótese de distribuições uniformes de velocidade, temperatura e umidade do fluido na região de entrada do secador, feita na modelagem dos fenômenos de transferência, o tubo de estabilização (E) é composto por uma câmara com telas defletoras, que asseguram a homogeneização do escoamento do fluido em cerca de 92% da área transversal da tubulação (**PRADO, 1999**). A verificação do tipo de distribuição de ar foi feita através de medidas de temperatura e velocidade, utilizando um termoanemômetro, em áreas representativas nas quais a região de entrada do leito foi subdividida de acordo com a teoria apresentada por **SOGAB (1987)**. Este estudo foi realizado com velocidades do ar entre 0,5 m/s e 2,5 m/s.

Para a garantia das condições de contorno para a fase fluida, as medidas de umidade e temperatura do ar foram monitoradas através de termosensores localizados próximos à região de entrada da célula de secagem e ligados a um conjunto de chave seletora e milivoltímetro digital. As medidas de umidade e temperatura do ar foram realizadas, respectivamente, por meio de um psicrômetro (D), através de medidas de temperatura de bulbo úmido e bulbo seco, e de um termopar de cobre-constantan (F). Um termoanemômetro também foi utilizado para determinar a velocidade e a temperatura do fluido de secagem ao longo da seção transversal da tubulação.

III.3.3. CÉLULAS DE MEDIDAS

Diferentes células de medidas foram construídas e montadas tendo em vista os estudos específicos sobre o fenômeno de encolhimento e a transferência de calor e massa durante a secagem das sementes de mamão. Estas células eram acopladas à unidade experimental por meio de um sistema que visou facilitar a retirada das mesmas para as pesagens, realizadas de forma intermitente. A fim de evitar vazamentos, “o-rings” foram utilizados para vedação.

- Encolhimento das partículas individuais

Uma célula de secagem em camada fina foi utilizada para reduzir o teor de umidade de sementes de papaya a diferentes níveis, a fim de avaliar o encolhimento das partículas individuais, bem como as propriedades físicas das sementes em função do teor de umidade. A técnica de secagem em camada fina tem sido utilizada por muitos pesquisadores (**JOSHI et alii, 1993**; **TANG e SOKHANSANJ (1993)**; **SUTHAR e DAS, 1996**) para determinar as características de secagem de sementes sob condições de secagem constantes.

Na Figure III.4 é mostrada em detalhe a célula de secagem na qual as sementes são dispostas numa monocamada.

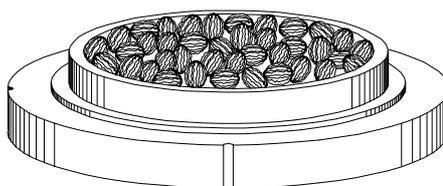


Figura III.4 - Detalhe da célula de secagem em camada fina utilizada.

- Encolhimento do leito poroso

Para a medida do encolhimento do leito de sementes durante a secagem em camada espessa foi construída uma célula cilíndrica em acrílico transparente, a fim de permitir a visualização e a medida da contração de volume do leito poroso. A célula possui $5,3 \times 10^{-2}$ m de diâmetro e $5,0 \times 10^{-2}$ m de altura. Um esquema da célula utilizada para a medida de encolhimento do sistema particulado encontra-se apresentado na Figura III.5.

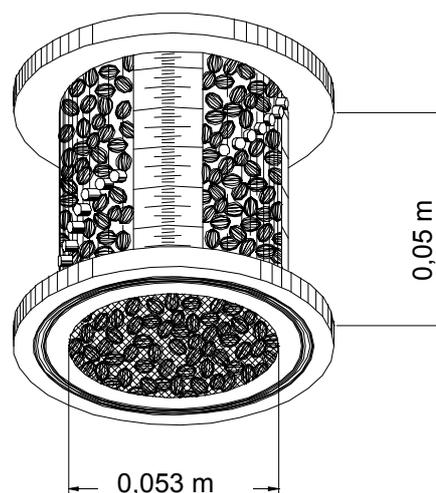


Figura III.5. Esquema da célula de secagem para a medida de encolhimento do leito de sementes.

- Determinação da distribuição de umidade

Para a determinação da distribuição do teor de umidade ao longo de um leito espesso, foi construída uma célula também com $5,3 \times 10^{-2}$ m de diâmetro e $5,0 \times 10^{-2}$ m de altura, mas com subdivisões de $1,0 \times 10^{-2}$ m que permitem a fragmentação do leito e as medidas locais de umidade. O esquema da célula de secagem, construída em PVC, é mostrado na Figura III.6.

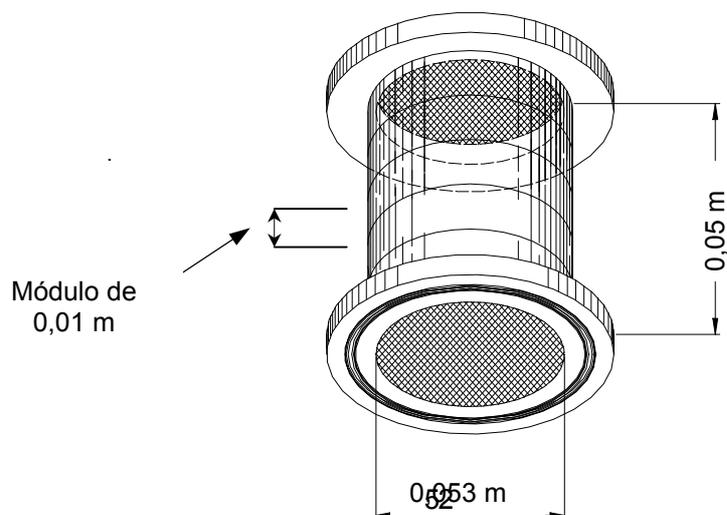


Figura III.6 - Esquema da célula de secagem para obtenção da distribuição de umidade via método de estratificação do leito.

A espessura do módulo para a estratificação do leito foi definida com base em **PRADO (1999)**. De acordo com este trabalho, 0,01 m representa a espessura de camada fina, ou seja, a espessura correspondente ao menor elemento de volume representativo do leito. Assim, para o estudo do comportamento de secagem de leitos espessos, nos quais gradientes de temperatura e umidade devem existir, foi utilizada uma altura de empacotamento igual a 5 cm.

- Determinação da distribuição de temperatura

Na Figura III.7 é apresentado o esquema da célula de secagem construída para as medidas de temperatura ao longo do leito particulado. A célula consiste também de um tubo cilíndrico de acrílico transparente, que permite a visualização da evolução da frente de secagem, com as mesmas dimensões da célula utilizada para a determinação da distribuição de umidade. A disposição helicoidal para a colocação dos termopares buscou minimizar a interferência dos termosensores sobre o escoamento do ar.

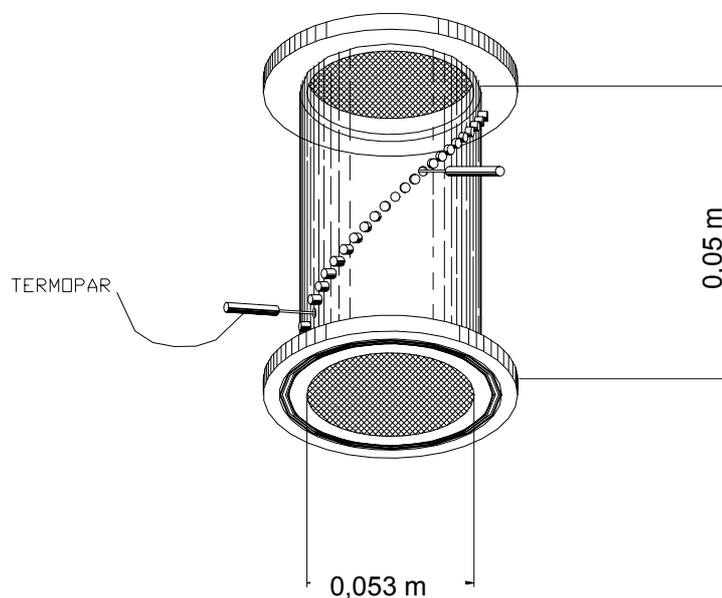


Figura III.7 - Esquema da célula de secagem para obtenção da distribuição da temperatura ao longo do leito.

III.3.4. CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Os experimentos conduzidos no secador para a caracterização do encolhimento das partículas individuais e dos leitos porosos, bem como para a caracterização do comportamento de secagem em camada espessa das sementes de papaya com e sem mucilagem, compreenderam temperaturas de 32, 41 e 50°C e velocidades do ar de secagem de 0,5, 1,0 e 1,5 m/s. Condições estas definidas com base num planejamento experimental 2^3 e que atendem aos padrões de qualidade estabelecidos para estas sementes no que diz respeito à preservação do seu poder germinativo, de acordo com **PRADO (1999)**.

Todos os experimentos foram realizados com réplicas para a verificação da reprodutibilidade dos dados obtidos.

III.4. TÉCNICAS DE MEDIDAS DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO

Uma das grandes dificuldades para mensurar as variáveis do processo encontra-se na utilização de técnicas adequadas para as fases sólida e fluida do sistema.

Optou-se neste trabalho pela adoção de técnicas de medidas para a obtenção de dados experimentais de temperatura e umidade da fase sólida, com as quais buscar-se-á assegurar a precisão das predições do modelo e, conseqüentemente a sua utilização.

A descrição das técnicas de medidas utilizadas para a determinação experimental destas variáveis é apresentada a seguir.

III.4.1. DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DO SÓLIDO

Para as medidas de temperatura do meio poroso foram utilizados termopares sem proteção, com erro provável de medida de $0,25^{\circ}\text{C}$. Os termopares de cobre-constantan utilizados nas medidas de temperatura foram aferidos através de banhos termostáticos, utilizando termômetros com precisão de $0,05^{\circ}\text{C}$.

A precisão das medidas é de $0,05^{\circ}\text{C}$, mas a aquisição do valor medido foi realizada através de um circuito de medida de temperatura com um milivoltímetro cuja flutuação é de aproximadamente $0,25^{\circ}\text{C}$, portanto, a incerteza da medida é estabelecida em função do sistema de medida do milivoltímetro.

A interpretação da temperatura registrada pelo termopar como sendo a do sólido se deve às características superficiais das sementes utilizadas, que permitem um bom contato com o termosensor.

Buscou-se também, minimizar a interferência dos termopares sobre o escoamento do ar, através de uma disposição helicoidal ao longo da célula de medidas apresentada na Figura III.7.

III.4.2. DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SÓLIDO

A fim de evitar um dos grandes problemas da experimentação em leito fixo associado à determinação da umidade do sólido via amostragem durante a secagem, que leva à descaracterização da estrutura porosa do leito e à formação de possíveis caminhos preferenciais para o escoamento do fluido, foi testado o método de estratificação e reconstituição do leito em tempos pré-determinados para a obtenção dos dados de distribuição de umidade.

Por ser um método destrutivo, a estratificação exige um grande número de experimentos, bem como a adoção de uma técnica de empacotamento que assegure homogeneidade e reprodutibilidade dos leitos reconstituídos. A técnica de empacotamento adotada será descrita no item III.5.1.

O teor de umidade das sementes foi determinado via método direto da estufa a $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$, por 24 horas.

III.4.3. ERROS PROVÁVEIS DE MEDIDAS

Os erros prováveis nas medidas (**PRADO, 1999**) de velocidade, temperatura, umidade absoluta do ar de secagem e umidade das sementes, encontram-se agrupados na Tabela III.1.

Tabela III.1 – Erros prováveis nas medidas

Medida	Erro provável
Velocidade do ar	4,0 %
Temperatura do ar e do sólido	0,25°C
Umidade absoluta do ar	4,0 %
Umidade do sólido	1,0 %

III.5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA OS TESTES DE SECAGEM CONVECTIVA

A seguir são apresentadas as metodologias empregadas nos testes de secagem convectiva tendo em vista a caracterização do fenômeno de encolhimento, das propriedades físicas das sementes e do leito durante o processo, bem como a determinação das distribuições de temperatura e umidade ao longo de leitos espessos, necessárias para a avaliação do modelo apresentado.

III.5.1.- EMPACOTAMENTO DO LEITO

Na condução dos testes de secagem utilizando a célula esquematizada na Figura III.2. foi necessário dispor o material particulado numa monocamada. Para os testes de secagem em camada espessa foi utilizada a técnica proposta por **ZOTIN (1985)** para o empacotamento do leito de sementes, visando garantir a reprodutibilidade e a homogeneidade da estrutura do leito formado.

Esta técnica consiste em:

- derramar uma quantidade fixa de partículas, em etapas, de modo a ocorrer a mesma altura de queda;
- após a adição de uma quantidade de sólidos, acomodar o meio poroso através de batidas na parede do leito, e
- quando não se observar mais a variação de altura do meio, introduzir nova quantidade de partículas no leito até atingir a altura de empacotamento desejada.

A fim de avaliar a influência das características superficiais das partículas sobre os fenômenos simultâneos de transferência de calor e de massa e encolhimento, os leitos foram constituídos separadamente por sementes com e sem mucilagem. Diferentes alturas de empacotamento (1, 3 e 5 cm) foram também empregadas.

Para evitar a influência da variabilidade do tamanho das partículas foram utilizadas amostras de sementes pertencentes a uma mesma faixa de tamanho, garantida pela metodologia empregada na preparação do material.

III.5.2- OPERAÇÃO DA UNIDADE DE SECAGEM EM LEITO FIXO

A operação de secagem para todos os experimentos foi feita após uma etapa de estabilização do sistema térmico, na qual o soprador foi ligado e o sistema de aquecimento foi regulado para que o gás atingisse a temperatura de operação desejada. O sistema foi considerado estabilizado quando a temperatura e a velocidade do ar não apresentavam variações em relação aos valores pré-estabelecidos. Nesta etapa de estabilização da temperatura, uma célula auxiliar

idêntica à principal, contendo sementes de papaya úmidas, era utilizada para manter o equilíbrio térmico e fluidodinâmico do sistema. Em seguida a célula de medidas era acoplada à unidade, iniciando-se a secagem propriamente dita.

Na condução dos experimentos de secagem, foram realizados estudos específicos para a determinação do encolhimento e das propriedades físicas das sementes e do leito, bem como das distribuições de umidade e de temperatura necessárias para a avaliação do modelo a duas fases apresentado.

III.5.3. CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DE ENCOLHIMENTO

Para medir o encolhimento das partículas individuais, testes de secagem foram realizados com uma monocamada de sementes. Em tempos pré-determinados as sementes foram coletadas do secador, pesadas numa balança analítica de precisão $1,0 \times 10^{-4}$ kg e suas dimensões, diâmetro linear máximo (D_l) e diâmetro da partícula projetada (D_p), determinadas por análise de imagens num contador de partículas Galai Macro Viewer, com o software Image Pro-Plus®. Para o cálculo da umidade, ao final de cada experimento, a massa de sementes secas era determinada via método direto da estufa a $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$, por 24 horas.

O encolhimento do leito de partículas durante a secagem foi determinado através de medidas de sua altura em três posições angulares equidistantes em 120° , com o auxílio de graduações existentes na célula de secagem apresentada na Figura III.5.

Para uma maior compreensão do encolhimento de leitos empacotados é de fundamental importância começar com o conhecimento do encolhimento das partículas individualmente, não somente em termos das alterações ocorridas nas

suas dimensões e forma, mas também em outras propriedades físicas. Uma caracterização física mais precisa das sementes em função do seu teor de umidade possibilita a análise de modelos de encolhimento mais detalhados, o que pode contribuir para o entendimento deste fenômeno.

III.5.4. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS SEMENTES E DO LEITO

- *Esfericidade das sementes*

A esfericidade (ϕ) foi calculada pela relação entre o diâmetro da esfera equivalente (D_e) e o diâmetro linear máximo da partícula projetada (D_l), dada pela equação:

$$\phi = \frac{D_e}{D_l} \quad (\text{II.31})$$

O diâmetro da esfera equivalente (D_e) foi determinado a partir do conhecimento de D_p e do coeficiente de forma, $\alpha_{v,a}$, utilizando a seguinte equação:

$$D_e = D_p \cdot \left(\frac{6\alpha_{v,a}}{\pi} \right)^{1/3} \quad (\text{III.17})$$

onde, $\alpha_{v,a}$, coeficiente que depende somente do material, foi obtido pela relação entre o volume inicial medido por picnometria gasosa e o correspondente diâmetro da partícula projetada (**KEEY, 1992**), dada por:

$$\alpha_{v,a} = \frac{V}{D_p^3} \quad (\text{III.18})$$

Para as imagens planas obtidas pelas análises microscópicas, buscou-se calcular um outro fator de forma, a circularidade (ϕ), a qual define a proximidade da partícula projetada à área de um círculo. ϕ foi determinada através da área e do perímetro projetados das sementes, obtidos por análise de imagens, conforme definido pela equação :

$$\phi = \pi \cdot \frac{D_p}{P_p} \quad (\text{III.19})$$

onde, P_p o perímetro projetado das sementes e D_p o diâmetro do círculo equivalente à área projetada.

De acordo com (ALLEN, 1997), a circularidade pode ser utilizada para avaliar também a evolução da rugosidade de partículas, principalmente aquelas susceptíveis a deformações, como é o caso das sementes de mamão.

- Massa específica real e aparente das sementes

Estas propriedades foram determinadas em diferentes teores de umidade a partir dos experimentos de secagem em monocamada. A massa específica real (ρ_s), Equação (II.37), foi determinada por meio de um picnômetro a hélio (AccuPyc 1330V3.03-Micromeritics). A massa específica aparente (ρ_p) foi

determinada pela relação entre a massa e o volume total da partícula calculado com base em D_e .

- Massa específica do leito particulado

A partir da relação entre as medidas de massa e volume do leito particulado, Equação (II.39), foi também determinada a densidade de empacotamento do leito (ρ_b) durante a secagem em camada espessa.

- Porosidade das sementes e do leito

A partir da determinação das massas específicas real, aparente e de empacotamento, a porosidade das partículas, ϵ_p , a porosidade do leito considerando apenas o volume de ar entre as partículas, ϵ_l , e a porosidade total do sistema incluindo os poros das partículas, ϵ_{total} , foram calculadas através das relações definidas pelas Equações (II.40), (II.41) e (II.42), respectivamente.

- Área específica do leito poroso

A área específica do leito de partículas, através da qual ocorre a transferência de calor e massa entre as fases sólida e fluida, foi calculada pela equação

$$a_v = \frac{6 \cdot (1 - \epsilon_t)}{D_e \cdot \phi} \quad (\text{III.20})$$

Os itens III.5.3 e III.5.4 formam a base de uma metodologia para a análise do fenômeno de encolhimento durante a secagem de sementes com diferentes características superficiais.

A partir da caracterização do encolhimento e das propriedades físicas do material em estudo e tendo em vista a representação do conjunto de dados experimentais de secagem obtidos, buscou-se, então, a solução numérica do modelo.

III.6 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS

III.6.1- SOLUÇÃO NUMÉRICA DO MODELO

O método numérico aplicado para a discretização do sistema de quatro equações diferenciais parciais não lineares acopladas, Eqs. (III.2) a (III.5), submetido às condições iniciais e de contorno especificadas pelas Eqs.(III.6) e (III.7), foi a técnica de diferenças finitas.

A partir da discretização dos termos diferenciais espaciais o sistema de equações diferenciais parciais (EDP) do modelo proposto foi convertido num sistema de equações diferenciais ordinárias no tempo. Assim, as Equações (III.2) a (III.5) tornam-se:

$$\frac{dY_g^n}{dt} = -\frac{\rho_b}{\rho_g \cdot \varepsilon} \frac{dX^n}{dt} + \frac{v_g}{\varepsilon \cdot S_b \cdot \Delta \xi} \cdot (Y_g^{n-1} - Y_g^n) \quad (III.21)$$

$$\frac{dT_s^n}{dt} = \frac{1}{\rho_b \cdot (Cp_s + X^n \cdot Cp_w)} \cdot \left[ha_v \cdot (T_g^n - T_s^n) + \rho_b \cdot \left[L_p + (Cp_v - Cp_w) \cdot T_s^n \right] \frac{dX^n}{dt} \right] \quad (III.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_g^n}{dt} = \frac{1}{\rho_g \cdot \varepsilon \cdot (Cp_g + Y_g^n \cdot Cp_v)} & \left[ha_v - \rho_b \cdot Cp_v \frac{dX^n}{dt} \right] \cdot (T_s^n - T_g^n) + \\ & + \frac{v_g}{\varepsilon \cdot S_b \cdot \Delta \xi} \cdot (T_g^{n-1} - T_g^n) \end{aligned} \quad (III.23)$$

$$\frac{dX^n}{dt} = f(X^n, Y_g^n, T_g^n) \quad (III.24)$$

(n=1, 2, ..., N)

onde $\Delta \xi = 1/N$, N é o número de células discretizadas nas quais a altura total do leito é dividida.

O vetor resultante com 4 (N+1) derivadas temporais foi resolvido utilizando o pacote computacional DASSL (**PETZOLD, 1989**), o qual é baseado no método de integração BDF (Backwards Differential Formuling).

III.6.2- ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

A solução numérica do modelo requer o conhecimento das equações auxiliares para o coeficiente de transferência de calor, equilíbrio termodinâmico, taxa de secagem, encolhimento e propriedades físicas do material. Estas equações foram oriundas de estudos específicos.

No caso do equilíbrio e da taxa de secagem, estes estudos foram realizados em trabalhos anteriores (**PRADO, 1999**), enquanto para a transferência de calor

foram analisadas as diferentes correlações existentes na literatura e apresentadas na Tabela II.3. Já os estudos relativos à determinação das equações de encolhimento do leito e das variações das propriedades físicas das sementes e do leito particulado são partes integrantes desta tese.

– *Umidade de equilíbrio, X_{eq}*

As isotermas de equilíbrio para as sementes de mamão papaya utilizadas na simulação computacional foram obtidas no trabalho desenvolvido por **PRADO (1999)**. Segundo o autor, a isoterma de Halsey modificada dada pelas equações

$$X_{eq} = \left[\frac{-\exp(-1,99 \times 10^{-2} \cdot T_g + 4,92)}{\ln(UR)} \right]^{1/2,29}, \quad (\% \text{ kg/kg}) \quad (\text{III.25})$$

para sementes com mucilagem, e

$$X_{eq} = \left[\frac{-\exp(-1,77 \times 10^{-2} \cdot T_g + 4,25)}{\ln(UR)} \right]^{1/1,90}, \quad (\% \text{ kg/kg}) \quad (\text{III.26})$$

para sementes sem mucilagem, são as mais adequadas para a previsão da umidade de equilíbrio das sementes de papaya.

– *Taxa de Secagem, f*

A equação para a taxa de secagem em camada fina, que fornece a evolução do conteúdo de umidade com relação ao tempo num elemento de volume do leito, afeta significativamente os resultados preditos pelos modelos de secagem em camada espessa. Devido ao alto teor de umidade das sementes de mamão são necessárias duas equações para representar todo o período de secagem, uma para o

período de taxa constante e outra para o período de taxa decrescente. A taxa de secagem para o período de taxa constante é descrita pela seguinte equação:

$$\frac{dX}{dt} = -k_c \quad (\text{III.27})$$

As equações apresentadas abaixo descrevem a dependência de k_c em relação à velocidade e temperatura do ar nas faixas de condições operacionais de 0,5 a 1,5 m/s e de 30 a 50°C, para sementes com e sem mucilagem, respectivamente (**PRADO, 1999**):

$$k_c = 1,3 \times 10^{-9} \cdot T^{4,112} \cdot v^{0,219}, [1/s] \quad (\text{III.28})$$

$$k_c = 5,1 \times 10^{-5} \cdot T^{2,114} \cdot v^{0,630}, [1/s] \quad (\text{III.29})$$

Para o período de taxa decrescente, uma equação de camada fina semelhante à lei de Newton para a transferência de calor por convecção é utilizada, com a força motriz ou potencial de transferência definido em termos da umidade livre, tal que:

$$f = -K \cdot (X - X_{eq}) \quad (\text{III.9})$$

A constante de secagem K é assumida depender somente da temperatura do ar. Para uma faixa de temperatura entre 30 e 50°C, as equações de K determinadas experimentalmente para sementes de mamão com e sem mucilagem (**PRADO, 1999**) são escritas, respectivamente, como:

$$K = 0,011 \exp(-201,8/T_g), [1/s] \quad (\text{III.30})$$

$$K = 0,018 \exp(-46,1/T_g), [1/s] \quad (\text{III.31})$$

– *Coefficiente de transferência de calor, h*

As diferentes correlações existentes na literatura para estimar o coeficiente de transferência de calor em leito fixo, apresentadas na Tabela II.3, foram analisadas a fim de se obter a melhor reprodução dos dados experimentais obtidos no secador em leito fixo e camada espessa, para as estruturas distintas das sementes com e sem mucilagem.

As equações de encolhimento do leito e das propriedades físicas das sementes e do leito particulado determinadas neste trabalho serão apresentadas e discutidas no capítulo concernente a Resultados e Discussões.

III.6.3. AVALIAÇÃO DO MODELO

A análise do modelo proposto foi feita com base no confronto entre os resultados experimentais e os simulados, sendo utilizado para verificar o ajuste dos mesmos o desvio relativo médio, o qual foi calculado pela seguinte equação:

$$\text{DVM}(\%) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{(y_{\text{exp}} - y_{\text{sim}})}{y_{\text{exp}}} \cdot 100 \quad (\text{III.32})$$

Com base nos desvios calculados foi feita também uma avaliação da validade da hipótese de encolhimento do leito.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos a partir da metodologia utilizada no trabalho.

Inicialmente, são apresentadas as características das sementes de mamão papaya “in natura”. Em seguida, enfoca-se a caracterização do fenômeno de encolhimento das partículas individuais e na forma de leitos empacotados, bem como, da dependência das propriedades físicas das sementes e dos parâmetros estruturais do leito em função do teor de umidade. Nas seções seguintes, são avaliadas e comparadas as características de secagem em camada espessa das sementes com e sem mucilagem.

No final, é feita a apresentação da solução numérica do modelo a duas fases, o qual considera a contração de volume do leito poroso, seguida da avaliação dos resultados preditos através do confronto com os resultados obtidos experimentalmente.

IV.1-OBTENÇÃO DAS SEMENTES COM E SEM A CAMADA EXTERNA DE MUCILAGEM

O teor de umidade inicial (X_0) das sementes de papaya extraídas pelo método via úmida foi de $(80,8 \pm 0,4)$ %b.u. para as sementes com mucilagem e de (73 ± 2) % b.u. para as sementes sem mucilagem. Valores estes extremamente elevados quando comparados com o teor de umidade de colheita apresentado por

sementes de oleaginosas, em torno de 20% b.u. para a soja, e de gramíneas, cerca de 30% b.u. para a *Brachiaria brizantha*.

Com base na abertura das peneiras utilizadas na preparação do material, as amostras de sementes extraídas das bagas de mamão foram divididas em três categorias de tamanho. A distribuição de tamanho obtida em termos da massa de sementes retida em cada peneira é apresentada na Tabela IV.1.

Tabela IV.1: Distribuição do tamanho das sementes de papaya

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (%)	
	Sementes com mucilagem (80,8 ± 0,4) %b.u.	Sementes sem mucilagem (72,7±1,9) % b.u.
4,76	24,1	2,0
4,00	65,4	76,6
3,36	10,5	21,4

Em torno de 65% em massa das sementes com mucilagem foram retidas na peneira com abertura de 4,00 mm (tamanho médio), enquanto cerca de 24 e 11% foram retidas na peneira de 4,76 mm (tamanho grande) e 3,36 mm (tamanho pequeno), respectivamente.

Quando o revestimento mucilaginoso é removido, verifica-se um decréscimo significativo da fração de sementes grandes e um aumento da fração de sementes de tamanho pequeno, predominando também a categoria de tamanho médio (cerca de 77%).

Assim, diante da maior quantidade existente e visando minimizar a influência da variabilidade de tamanho das partículas sobre os fenômenos a serem estudados, os testes de secagem em leito fixo e camada espessa, tanto das

sementes com mucilagem como sem mucilagem, foram conduzidos com as amostras de sementes de tamanho médio, provenientes das bagas de mamão.

Na Tabela IV.2 encontram-se resumidos os valores médios e os desvios-padrão das dimensões das sementes, obtidos por meio de análise de imagens, e as propriedades características do meio poroso composto por estas sementes para as condições de umidade inicial.

Tabela IV.2: Caracterização do meio poroso composto por sementes úmidas, com e sem mucilagem.

Propriedade	Sementes	
	Com mucilagem	Sem mucilagem
$X_0(\%b.u.)$	80,8 ± 0,4	72,7 ± 1,9
D_e (mm)	5,4 ± 0,1	4,4 ± 0,1
ϕ	0,89 ± 0,01	0,75 ± 0,01
ρ_b (kg/m ³)	844,1 ± 5,3	532,9 ± 0,2
ε_b	0,21 ± 0,01	0,34 ± 0,01
a_v (m ² /m ³)	986,8 ± 11,4	940,3 ± 4,5

IV.2- ENCOLHIMENTO DAS PARTÍCULAS DURANTE A SECAGEM

IV.2.1. DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS E ESFERICIDADE DAS PARTÍCULAS

Os resultados típicos obtidos no analisador de imagens para o diâmetro da partícula projetada (D_p), o diâmetro linear máximo (D_l), a esfericidade (ϕ) e a circularidade (ϕ_c), em função do teor de umidade são apresentados nas Tabelas IV.3 e IV.4. Os valores do diâmetro da esfera equivalente (D_e) encontram-se também apresentados. Estes foram calculados a partir dos dados de D_p e do coeficiente de forma volumétrico ($\alpha_{v,a}$), cujos valores foram de 0,0531 para sementes com mucilagem e de 0,0509 para as sementes sem mucilagem.

Tabela IV.3: Resultados típicos da análise de imagens para as sementes com mucilagem em diferentes teores de umidade.

X (b.s.)	Dl (mm)	Dp (mm)	D_e (mm)	ϕ	ϵ
4,00	6,04 ± 0,01	5,34 ± 0,01	5,38 ± 0,03	0,89 ± 0,03	1,02 ± 0,02
1,88	5,87 ± 0,02	4,89 ± 0,01	4,93 ± 0,02	0,84 ± 0,02	1,09 ± 0,03
1,00	5,54 ± 0,03	4,50 ± 0,02	4,53 ± 0,01	0,82 ± 0,03	1,12 ± 0,02
0,49	5,43 ± 0,01	4,40 ± 0,03	4,43 ± 0,02	0,82 ± 0,02	1,11 ± 0,03
0,33	5,34 ± 0,02	4,31 ± 0,02	4,35 ± 0,02	0,81 ± 0,02	1,11 ± 0,02
0,12	5,30 ± 0,01	4,29 ± 0,01	4,32 ± 0,02	0,81 ± 0,02	1,10 ± 0,01
0,062	5,06 ± 0,02	4,13 ± 0,01	4,16 ± 0,01	0,81 ± 0,02	1,10 ± 0,01

Tabela IV.4: Resultados típicos da análise de imagens para as sementes sem mucilagem em diferentes teores de umidade.

X (b.s.)	Dl (mm)	Dp (mm)	D_e (mm)	ϕ	ϵ
2,32	5,98 ± 0,01	5,00 ± 0,02	4,41 ± 0,01	0,75 ± 0,01	1,16 ± 0,02
1,39	5,82 ± 0,01	4,83 ± 0,02	4,25 ± 0,02	0,74 ± 0,02	1,16 ± 0,02
0,80	5,67 ± 0,02	4,68 ± 0,02	4,12 ± 0,01	0,74 ± 0,02	1,17 ± 0,02
0,35	5,57 ± 0,01	4,60 ± 0,01	4,05 ± 0,01	0,74 ± 0,01	1,18 ± 0,01
0,25	5,55 ± 0,02	4,57 ± 0,02	4,02 ± 0,02	0,74 ± 0,02	1,17 ± 0,02
0,16	5,51 ± 0,02	4,52 ± 0,03	3,98 ± 0,01	0,74 ± 0,02	1,17 ± 0,03
0,11	5,48 ± 0,01	4,49 ± 0,01	3,95 ± 0,01	0,74 ± 0,01	1,17 ± 0,02

Pode ser constatada com base nas Tabelas IV.3 e IV.4 uma redução em torno de 23 e 10 %, respectivamente, nas dimensões das sementes com e sem mucilagem. Estes resultados indicam a ocorrência do fenômeno de encolhimento durante o processo de secagem de sementes desta natureza.

Verifica-se também que o encolhimento das sementes com mucilagem é acompanhado por alterações na forma da partícula, devido principalmente às deformações ocorridas no revestimento mucilaginoso. A esfericidade inicial destas sementes, com teor de umidade de 80% b.u., é de aproximadamente 0,89, valor que decresce com a redução da umidade, tendendo para teores de umidade em torno de 50% b.u. ao valor de (0,81 ± 0,01). Por outro lado, as sementes

desprovidas da cobertura de mucilagem mantêm durante todo o processo de secagem o seu fator de forma em torno de 0,74.

Os valores de circularidade próximos de 1, correspondentes ao teor de umidade inicial, são um indicativo da superfície lisa das sementes revestidas. Superfície esta que se altera com a perda de umidade e com as deformações ocorridas, resultando num aumento dos valores de ϕ .

A partir dos dados de circularidade apresentados na Tabela IV.4, constata-se que, ao se remover o envoltório mucilaginoso, tem-se uma grande contribuição das protuberâncias das sementes para uma partícula com maior rugosidade, com valores de ϕ em torno de 1,17.

Os diâmetros equivalentes das partículas, com e sem a cobertura de mucilagem, apresentaram uma dependência linear com relação ao teor de umidade, melhor representadas pelas equações a seguir.

$$De=4,25 + 0,30. X \qquad R^2 = 0,991 \qquad (IV.1)$$

válida para SCM, $De_0 = 5,4 \pm 0,1$ mm, $X_{eq} < X < 4,1$ b.s.

$$De=3,99 + 0,18. X \qquad R^2 = 0,994 \qquad (IV.2)$$

válida para SSM, $De_0 = 4,4 \pm 0,1$ mm, $X_{eq} < X < 3,22$.b.s.

Enquanto a esfericidade das sementes sem mucilagem pode ser considerada constante durante a secagem, para as sementes revestidas a esfericidade apresenta uma dependência funcional do tipo quadrática em relação ao teor de umidade, a qual é representada pela equação

$$\phi = 0,81 + 0,0032.X + 0,0026.X^2 \quad R^2 = 0,986 \quad (\text{IV.3})$$

válida para $X_{\text{eq}} < X < 4,25 \text{ b.s.}$

Na Figura IV.1 são apresentados os resultados relativos à redução do diâmetro da semente, definida pela razão D_e/D_{e0} , em função do teor de umidade, obtidas durante experimentos de secagem conduzidos com velocidade de 0,5 m/s e temperaturas de 32 e 50°C.

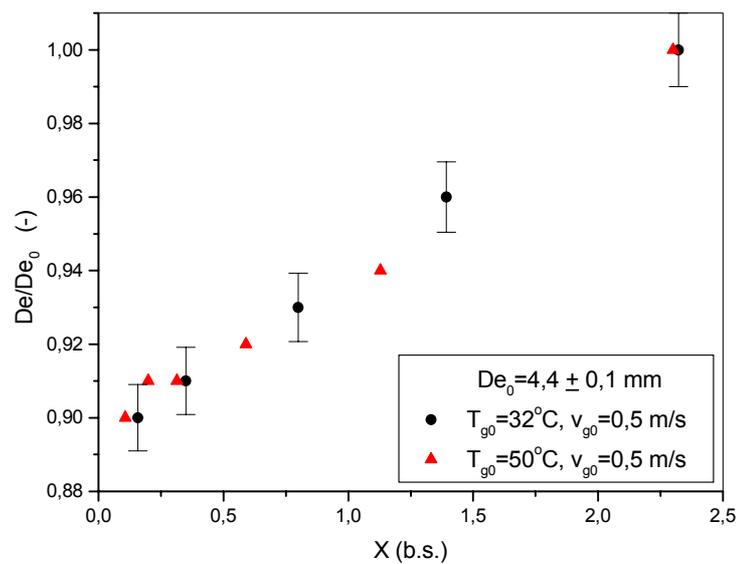


Figura IV.1 – D_e/D_{e0} em função do teor de umidade, para sementes sem mucilagem.

Os baixos desvios entre os valores de D_e/D_{e0} , menores que os erros de medida, mostram que o encolhimento das partículas individuais não é influenciado pelas condições de secagem.

IV.2.2. ANÁLISE DO ENCOLHIMENTO VOLUMÉTRICO DAS PARTÍCULAS

O encolhimento das partículas individuais, ocorrido durante a secagem em monocamada, foi analisado com base na razão de encolhimento volumétrico (S_v) definida pela relação entre o volume sólido da amostra de sementes (V_s), num dado tempo, e o seu volume inicial (V_{s0}).

$$S_v = \frac{V_s}{V_{s0}} \quad (\text{IV.4})$$

Nas Figuras IV.2 e IV.3 tem-se resultados típicos de S_b em função do adimensional de umidade, $XR = (X - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq})$, para os dois tipos de superfície da semente e em diferentes condições de temperatura e velocidade. A umidade de equilíbrio (X_{eq}) foi calculada a partir da isoterma de Halsey modificada dada pelas Equações (III.22) e (III.23) para as sementes com e sem mucilagem, respectivamente (**PRADO, 1999**).

Verifica-se a partir das Figuras IV.2 e IV.3 que as diferenças entre S_b , para um mesmo valor de XR e para o mesmo tipo de superfície da partícula, são inferiores aos erros de medida em todas as condições operacionais utilizadas. Portanto, o encolhimento das sementes independe das condições externas de secagem, sendo uma função do teor de umidade e das características superficiais do material, ou seja, da presença ou não da mucilagem.

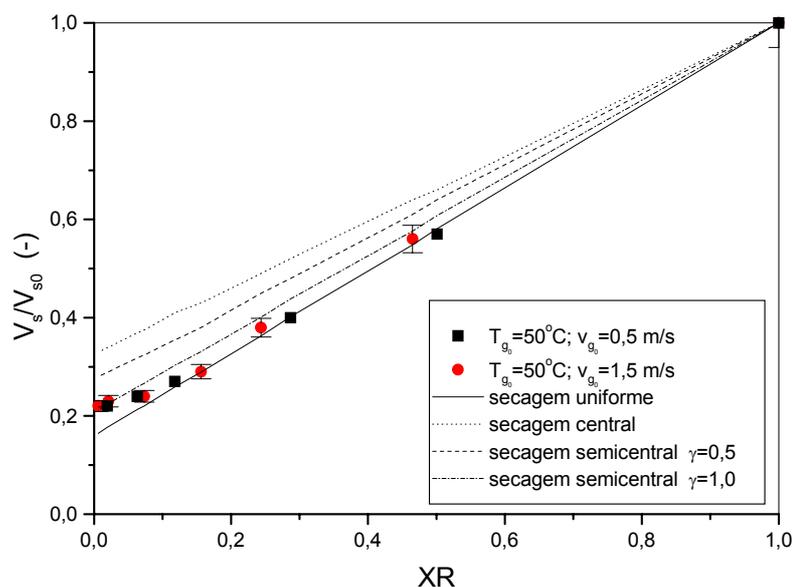


Figura IV.2 – Razão de encolhimento volumétrico em função de XR na secagem em monocamada de sementes com mucilagem.

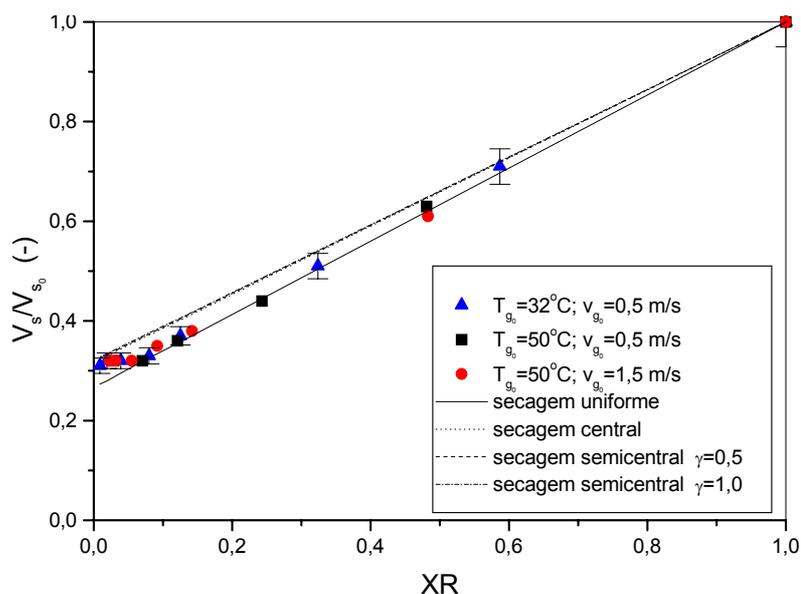


Figura IV.3 – Razão de encolhimento volumétrico em função de XR na secagem em monocamada de sementes sem mucilagem.

A fim de se obter uma representação matemática do fenômeno de encolhimento das partículas individuais cujas características mostram uma dependência linear em função do teor de umidade, foi feita uma avaliação dos modelos propostos por **SUZUKI et alii (1976)**: secagem uniforme, central (“core drying”) e semicentral (“semicore drying”), cujas equações encontram-se

apresentadas na Tabela II.5. A adequação das equações aos dados experimentais foi avaliada com base nos valores dos desvios relativos percentuais médios apresentados na Tabela IV.5.

O modelo de secagem uniforme, no qual é assumido que o encolhimento volumétrico das partículas é proporcional ao volume de água evaporada, mostra uma boa concordância com os dados experimentais das sementes com e sem a presença do envelope gelatinoso na superfície do sólido, exceto no final do processo, conforme pode ser constatado nas Figuras IV.2 e IV.3.

Tabela IV.5: Desvios relativos médios percentuais (DVM) para as equações de encolhimento propostas por SUZUKI et alii (1976).

Equação		DVM (%)	
		SCM	SSM
Secagem uniforme		7,6	4,6
Secagem central		34,3	6,6
Secagem semicentral	$\gamma=0,5$	21,0	6,7
	$\gamma=1,0$	5,9	6,6

onde, γ é o fator de proporcionalidade entre as massas específica inicial e de equilíbrio da camada externa da semente, fator atribuído arbitrariamente.

A discordância do modelo de secagem central aos dados de encolhimento das sementes com mucilagem (DVM=34,3%) mostra que a densidade do revestimento mucilaginoso provavelmente não é próxima da densidade de equilíbrio (ρ_{se}), ou seja, não há a formação de uma camada externa seca com um centro sólido úmido.

A mucilagem ao atuar como uma resistência à transferência de massa, devido provavelmente à sua natureza subácida, favorece uma migração interna de umidade que mantém um filme líquido na superfície da semente durante quase

todo o processo, que supre a taxa de evaporação nesta superfície e resulta num período pronunciado de secagem à taxa constante (PRADO, 1999).

Assim, era de se esperar uma massa específica da camada externa próxima à massa específica inicial da semente (ρ_{s0}) e não à de equilíbrio. Isto é confirmado ao se obter um melhor ajuste do modelo de secagem semicentral para $\gamma=1$, quando supõe-se que a densidade da camada externa é equivalente à densidade inicial do material úmido.

Com base nos resultados apresentados, verifica-se que para sementes sem mucilagem, todos os modelos de SUZUKI et alii. (1976) se correlacionam bem aos dados de encolhimento, com desvios iguais ou inferiores a 6,7%.

A partir da constatação do encolhimento das partículas individuais, buscou-se determinar o encolhimento de leitos fixos com camadas espessas, bem como analisar a influência da redução do tamanho da partícula, ocorrida durante a secagem, sobre a contração de volume do leito poroso.

IV.3- AVALIAÇÃO DO ENCOLHIMENTO DO LEITO DURANTE A SECAGEM

Os dados de encolhimento volumétrico do leito, expressos pela razão V/V_0 , foram plotados em conjunto com o adimensional de umidade médio do leito (X_R) em função do tempo de secagem, conforme é mostrado na Figura IV.4.

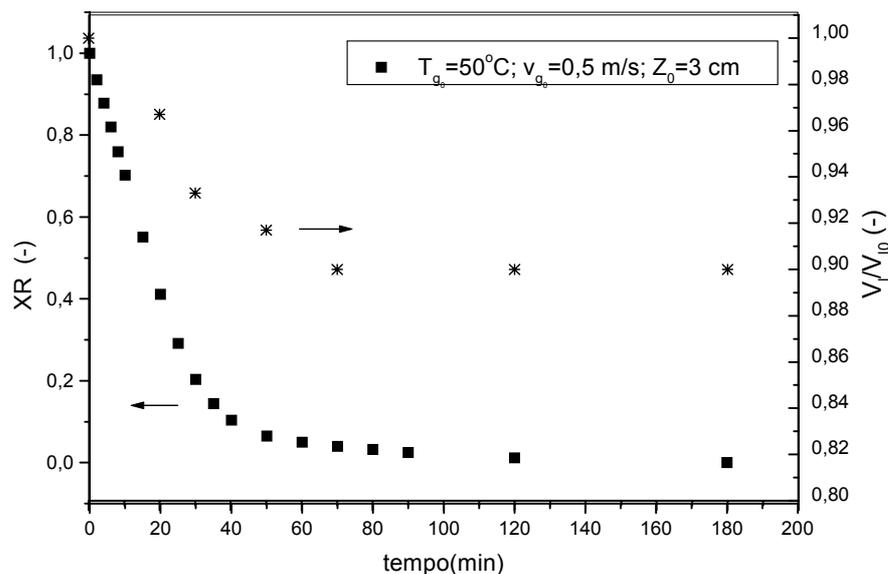


Figura IV.4 – V_t/V_{l0} e XR em função do tempo de secagem para sementes sem mucilagem.

A partir Figura IV.4. pode-se analisar a dinâmica de encolhimento do leito de sementes sem mucilagem submetido ao processo de secagem com temperatura de 50°C e velocidade do ar de 0,5 m/s. Verifica-se que a contração de volume do leito poroso apresenta um comportamento exponencial com relação ao tempo, análogo ao da cinética de secagem.

O encolhimento do leito ocorre, sobretudo, no período de secagem à taxa constante, o que indica a dependência do fenômeno com a quantidade de água evaporada na forma de água livre. A remoção da água interna no final da secagem não altera o volume do leito empacotado. Comportamento similar foi obtido para as sementes revestidas com a mucilagem.

As características de encolhimento típico do leito com mesma altura de empacotamento (5 cm), constituído por sementes com as mesmas características superficiais (sem mucilagem) e submetido a diferentes condições de temperatura e velocidade do ar de secagem são apresentadas na Figura IV.5.

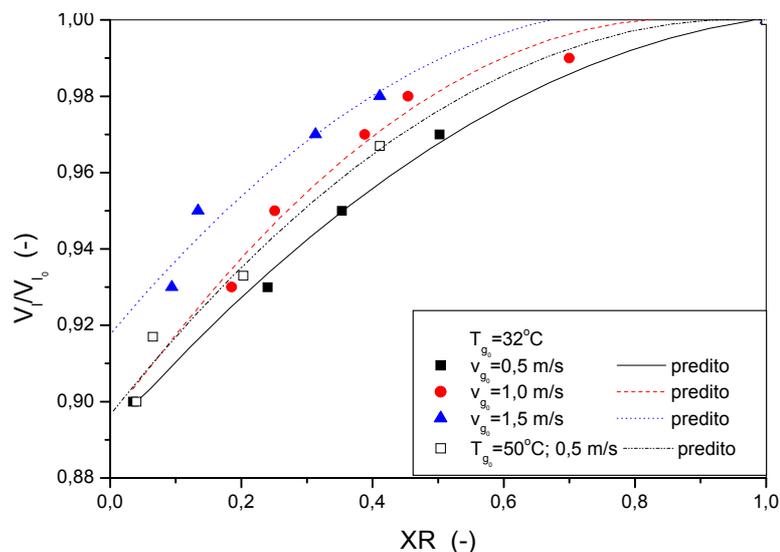


Figura IV.5 – V/V_0 em função de XR , para leitos constituídos por sementes sem mucilagem, em diferentes condições operacionais, para uma altura inicial de empacotamento (Z_0) de 5 cm.

Ao contrário do encolhimento das partículas individuais, a contração de volume do sistema particulado apresenta uma dependência com as condições operacionais, sendo representada em função do teor de umidade adimensional por polinômios de segundo grau, da forma:

$$\frac{V_1}{V_{10}} = B_0 + B_1 \cdot XR + B_2 \cdot XR^2 \quad (\text{IV.5})$$

Os resultados da regressão são apresentados na Tabela IV.6.

Tabela IV.6: Resultados da regressão não linear para o encolhimento dos leitos de partículas com e sem mucilagem (desvios-padrão entre parênteses).

Partícula	$v_{g0}(\text{m/s})$	$T_{g0}(^{\circ}\text{C})$	B_0	B_1	B_2	R^2
SSM	0,5	50	0,897 (0,006)	0,215 (0,036)	-0,112 (0,033)	0,988
	0,5	32	0,892 (0,003)	0,195 (0,016)	-0,086 (0,014)	0,997
	1,0	32	0,895 (0,010)	0,243 (0,043)	-0,139 (0,035)	0,972
	1,5	32	0,918 (0,008)	0,206 (0,043)	-0,124 (0,037)	0,971
SCM	0,5	50	0,722 (0,004)	0,315 (0,024)	-0,032 (0,024)	0,993

A redução do encolhimento do leito com o aumento da velocidade do ar pode ser devido ao fato de altas velocidades do ar aliadas à grande área específica das sementes sem mucilagem minimizarem a formação de grandes gradientes de umidade, bem como conduzirem à impermeabilização da superfície das sementes, limitando assim o encolhimento.

Apesar de em altas velocidades ocorrer uma expansão do leito, à medida que as partículas ficam menos densas, o efeito desta expansão sobre os resultados de encolhimento obtidos não pode ser levado em consideração, uma vez que as medidas de contração do leito foram realizadas nos instantes em que a célula de secagem era retirada para pesagem, quando então ocorria a reacomodação do leito particulado.

Cabe ressaltar, portanto, que os dados experimentais reportados neste trabalho correspondem ao encolhimento real e não ao encolhimento aparente do leito, o qual é influenciado pela expansão do sistema.

Na Figura IV.6 têm-se os dados típicos de contração de volume do leito de sementes com mucilagem em função do teor de umidade, parametrizados na altura de empacotamento. Com base nos desvios apresentados entre os dois conjuntos de dados verifica-se que a redução de volume do leito poroso independe da altura de empacotamento (Z_0).

Na Figura IV.7 são plotados em função do adimensional de umidade XR os dados típicos de razão de encolhimento V_1/V_{10} dos leitos constituídos por sementes com e sem mucilagem. A partir da figura pode ser observada a influência da estrutura superficial da partícula sobre o fenômeno de encolhimento do sistema. A magnitude de encolhimento foi de aproximadamente 12% para as sementes sem

mucilagem e em torno de 30% para as sementes com mucilagem, para uma altura inicial de empacotamento de 5 cm.

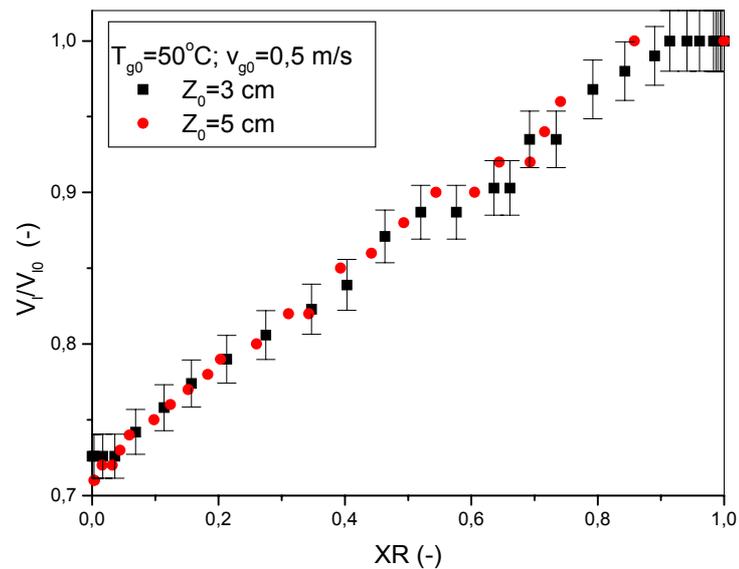


Figura IV.6 – V/V_0 em função de XR , para leitos constituídos por sementes com mucilagem, com alturas iniciais de empacotamento de 3 e 5 cm.

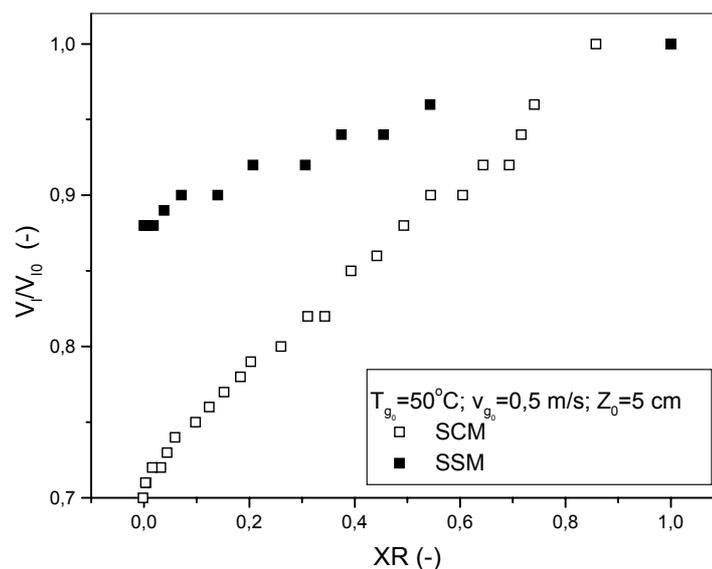


Figura IV.7 – V/V_0 em função de XR , para leitos constituídos por sementes de papaia com (SCM) e sem mucilagem (SSM), altura inicial de empacotamento de 5 cm.

O maior encolhimento do leito de sementes com mucilagem pode ser explicado com base nos dados de encolhimento obtidos para as partículas individuais. A variação no tamanho e na forma das partículas durante a secagem leva a mudanças na conformação do empacotamento. Além de permanecerem com a mesma esfericidade, dentro de um desvio de 0,01, conforme visto no item IV.2.1, as sementes sem mucilagem possuem protuberâncias que facilitam a agregação de partículas e a sustentação mecânica do leito.

A partir dos resultados obtidos foi feita uma comparação entre os coeficientes de encolhimento do leito (S_{leito}) e das partículas (S_p) definidos pelas equações:

$$S_{\text{leito}} = \frac{Z}{Z_0} \quad (\text{IV.6})$$

$$S_p = \frac{D_e}{D_{e0}} \quad (\text{IV.7})$$

Na Tabela IV.7 são apresentados os resultados típicos de S_p e S_{leito} obtidos para leitos de sementes com e sem mucilagem, com alturas de empacotamento de 3 e 5 cm, submetidos à secagem com temperaturas de 32 e 50°C e velocidades do ar de 0,5 m/s.

Pode-se afirmar com base nos baixos desvios observados, de aproximadamente 3,5 %, que o encolhimento do leito constituído por sementes desprovidas do envoltório mucilaginoso é proporcional à redução de tamanho das partículas individuais.

Entretanto, a mesma análise não pode ser feita sobre o encolhimento do leite constituído por sementes revestidas. Os desvios em torno de 12% são mais um indicativo de que a contração do leite poroso, além da redução de tamanho das sementes, é influenciada pela acomodação do leite causada pela mudança na forma das partículas.

Tabela IV.7: Resultados típicos de S_p e S_{leito} para as sementes com e sem mucilagem

Condições		Sementes com mucilagem		Sementes sem mucilagem	
Altura do leite (cm)	T (°C)	S_p	S_{leito}	S_p	S_{leito}
3	50	0,82	0,72	0,87	0,90
5	50	0,81	0,70	0,86	0,88
3	32	---	---	0,88	0,90
5	32	---	---	0,87	0,88

As variações observadas no tamanho e na forma das sementes de papaya, bem como a contração de volume do leite poroso durante a secagem, podem alterar as propriedades físicas das sementes e do leite e influenciar o transporte de calor e massa entre o fluido e o sólido. Assim, a análise do processo de secagem desta natureza de sementes foi direcionada para o estudo das alterações induzidas pelo encolhimento nas outras propriedades físicas do material e nos parâmetros estruturais do leite.

IV.4. INFLUÊNCIA DA SECAGEM NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS SEMENTES E DO LEITO

IV.4.1 – MASSA ESPECÍFICA REAL

Na Figura IV.8 são apresentados os resultados típicos de massa específica real das sementes de papaya, com (SCM) e sem mucilagem (SSM), em relação ao teor de umidade.

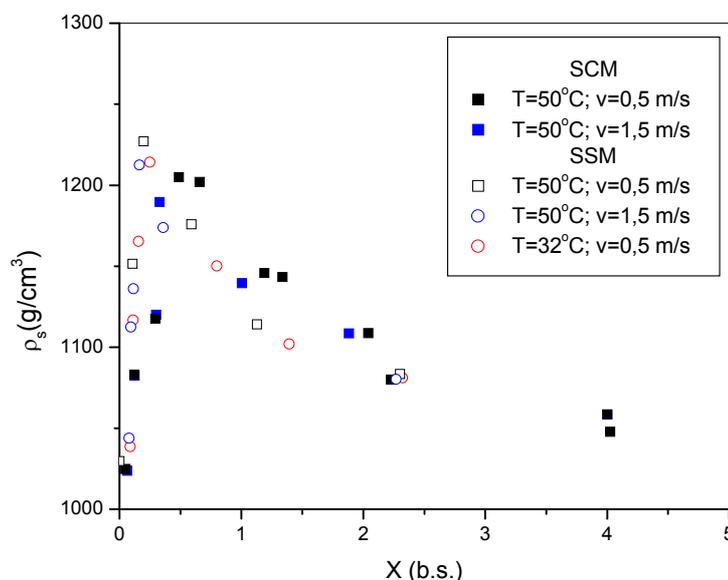


Figura IV.8 – Massa específica real das sementes com e sem mucilagem em função do teor de umidade para diferentes condições de secagem.

A massa específica real das sementes de papaya sem mucilagem aumentou durante o período inicial de secagem, atingindo num teor de umidade de aproximadamente 16,6 %b.u. um valor máximo de 1227 kg/m³. Durante o período final de secagem, a densidade do sólido diminui com o decréscimo do teor de umidade. Esta mudança de comportamento da massa específica em função da

umidade pode ser explicada pela tendência descrita pelo encolhimento. Em baixos teores de umidade, o volume da matriz sólida sofre alterações desprezíveis com relação à umidade, de modo que a densidade tende a diminuir com a remoção de umidade das partículas.

A massa específica real das sementes com mucilagem apresentaram uma dependência funcional similar, no entanto, com um valor máximo em torno de 1205 kg/m^3 , num teor de umidade maior, em torno de 32,7 % b.u., devido provavelmente à impermeabilização da sarcotesta que pode ter interrompido a variação do volume de sólidos. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por **WANG e BRENNAN (1995)** em seus estudos com fatias de batata.

Com base nos desvios dos dados experimentais obtidos, inferiores aos erros de medida, verificou-se também que a influência das condições de secagem sobre a massa específica real não foi significativa.

IV.4.2 – MASSA ESPECÍFICA APARENTE DA PARTÍCULA

A Figura IV.9 mostra os resultados de massa específica aparente das sementes com e sem mucilagem em função do teor de umidade. Pode-se observar um decréscimo da densidade da partícula à medida que a água é removida durante a secagem, devido principalmente ao grande aumento da porosidade das sementes, conforme será verificado no item IV.4.4.

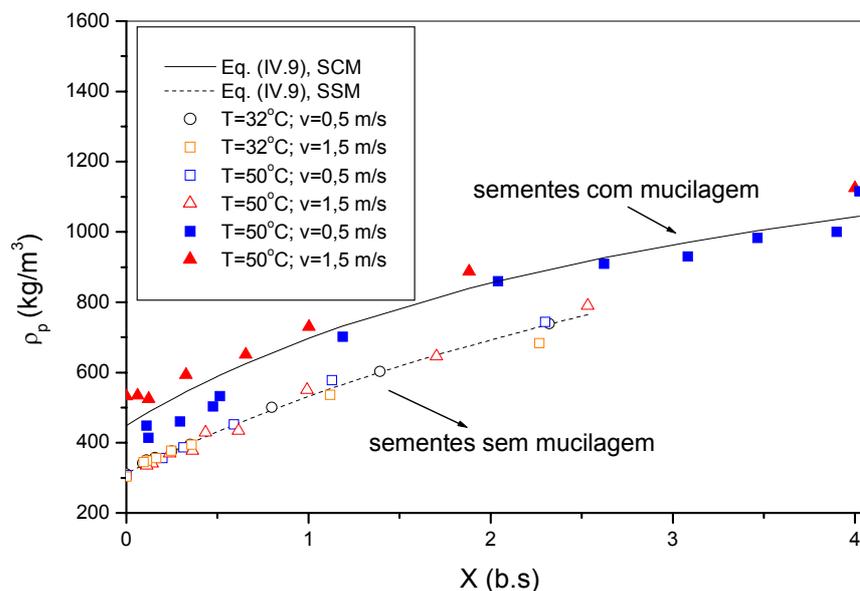


Figura IV.9 – Massa específica aparente para SCM e SSM, em função do teor de umidade, para diferentes condições de secagem.

A fim de descrever as massas específicas real e aparente em função da umidade do material, as seguintes equações propostas por **ZOGZAS et alii (1994)** foram ajustadas aos dados experimentais.

$$\rho_s = \frac{(1 + X)}{\left(\frac{1}{\rho_{ss}} + \frac{X}{\rho_w} \right)} \quad (\text{IV.8})$$

$$\rho_p = \frac{\rho_{ps} \cdot (1 + X)}{(1 + \beta \cdot X)} \quad (\text{IV.9})$$

Os resultados da estimação de parâmetros encontram-se na Tabela IV.8, com a previsão de ρ_s das SCM e SSM válida para as faixas de umidade de $0,486 \leq X \leq X_0$ e $0,164 \leq X \leq X_0$, b.s., respectivamente.

Tabela IV.8: Resultados da estimação de parâmetros das equações (IV.8) e (IV.9).

	$\rho_{ss}(\text{kg/m}^3)$	$\rho_w(\text{kg/m}^3)$	R^2	$\rho_{ps}(\text{kg/m}^3)$	β	R^2
SCM	1324,3 (20,8)	1010,5 (8,5)	0,93	447,1 (18,7)	0,288 (0,030)	0,93
SSM	1258,3 (9,2)	1025,6 (9,7)	0,94	311,0 (3,0)	0,172 (0,009)	0,99

Valores entre parênteses: desvios-padrão.

Os valores estimados para a densidade da água agregada (ρ_w), pouco maiores que os valores da água livre, já eram esperados, devido às fortes ligações existentes com o sólido seco e pela presença de açúcares que amplifica este efeito, segundo **MAROUSIS e SARAVACOS (1990)**.

Os altos valores de R^2 obtidos mostram a adequação das equações para representarem os dados de massa específica real e aparente em função do teor de umidade do material. No entanto, a Equação (IV.8) não descreve a mudança de comportamento observada para a massa específica do sólido, sendo necessário ajustar uma equação empírica no domínio de umidade com valores inferiores àquele onde ocorre um valor máximo de densidade real. Assim, obteve-se as Equações (IV.10) e (IV.11) para as sementes com e sem mucilagem, respectivamente, cujos valores obtidos para R^2 foram de 0,992 e 0,989.

$$\rho_s = 995,7 + 686,8 \cdot X - 525,9 \cdot X^2 \quad (\text{IV.10})$$

válida para $0,062 \leq X < 0,486$ b.s., com ρ_s em (kg/m^3).

$$\rho_s = 1038,1 + 873,2 \cdot X - 382,3 \cdot X^2 \quad (\text{IV.11})$$

válida para $0,089 \leq X < 0,164$ b.s., com ρ_s em (kg/m^3).

IV.4.3. DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO

Na Figura IV.10 tem-se os resultados típicos da densidade de empacotamento em função do adimensional de umidade do leito, para as sementes de papaya com e sem mucilagem, com alturas de empacotamento de 1, 3 e 5 cm e temperaturas do ar de secagem de 32 e 50°C.

Verifica-se a partir da Figura IV.10 que as diferenças de ρ_b , para um mesmo valor de XR e para o mesmo tipo de superfície da partícula são inferiores aos erros de medida em todas as condições operacionais utilizadas. Logo, a densidade de empacotamento destas sementes independe da altura do leito, sendo uma função do teor de umidade e de suas estruturas distintas, da presença ou não da camada externa de mucilagem.

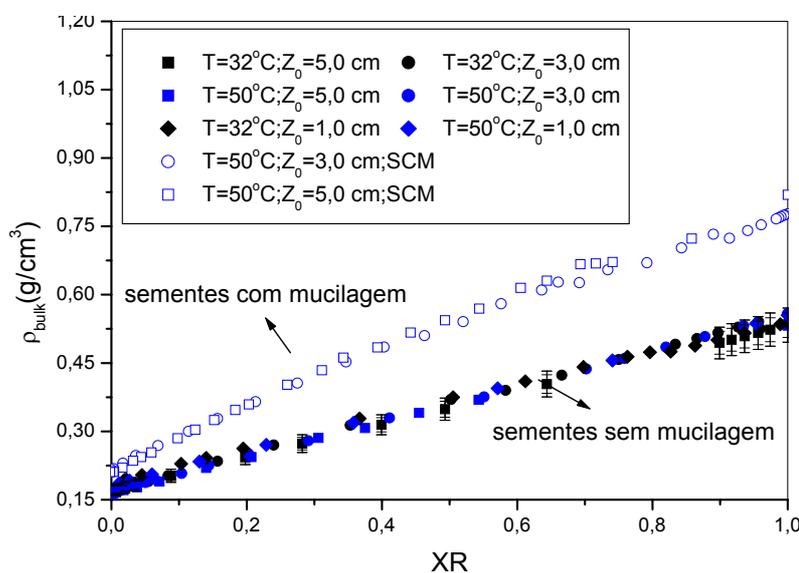


Figura IV.10 – Densidade de empacotamento em função do adimensional de umidade, parametrizada em T_{g0} , Z_0 e na estrutura da partícula, $v_{g0}=0,5$ m/s.

A densidade de empacotamento do leito de sementes com mucilagem variou de 777 a 218 kg/m³, decrescendo linearmente à medida que o material seca, devido principalmente à deformação do revestimento mucilaginoso que resulta num aumento dos poros de ar inter-partícula, que será constatado no item IV.4.4, e aos rearranjos estruturais ocorridos no leito, também associados ao fenômeno de encolhimento. Comportamentos similares foram encontrados para sementes de milho (**VISWANATHAN et alii, 1990**), canola (**JAYAS et alii, 1989**) e sementes de abóbora (**JOSHI et alii, 1993**).

Os altos valores de ρ_b observados para os leitos no início do processo podem ser atribuídos à tendência de aglomeração das partículas úmidas, decorrente das forças de coesão que se estabelecem através de pontes líquidas, segundo **HSU et alii (1991)**.

Para as sementes sem mucilagem obteve-se uma dependência funcional entre ρ_b e XR similar à encontrada para as sementes providas da sarcotesta, com os valores variando de 558 a 163 kg/m³. Valores estes, inferiores aos apresentados pelas sementes com mucilagem. Esta diferença pode ser explicada pela estrutura celular de cada semente, bem como pelas características distintas de redução de massa e volume das sementes com e sem mucilagem associadas à remoção de umidade.

Conforme mostrado na Figura IV.10, a densidade de empacotamento das sementes de mamão independe da altura do leito. Este resultado vai de encontro aos obtidos para outros produtos, especificamente grãos e sementes, como por exemplo, canola (**JAYAS et al, 1989**); milho e sementes de girassol (**PAGANO e CROZZA, 2000**). Cabe ressaltar, entretanto, que a densidade “bulk”, na maioria

dos trabalhos, foi determinada em leitos com distribuição uniforme de umidade, constituídos por sementes preparadas e condicionadas em níveis de umidade desejados, não levando em conta a dinâmica do processo, em que ocorre o desenvolvimento de gradientes de umidade ao longo do leito.

A fim de quantificar a dependência funcional entre a densidade de empacotamento e o adimensional de umidade, foram feitos ajustes lineares aos dados experimentais das sementes com e sem mucilagem. As seguintes equações empíricas foram obtidas:

$$\rho_b = 240,8 + 546,1 \cdot \overline{XR} \quad (\text{IV.12})$$

$$\rho_b = 174,0 + 372,3 \cdot \overline{XR} \quad (\text{IV.13})$$

Os altos valores de R^2 apresentados pela Equação V.12, para as sementes com mucilagem, e pela Equação IV.13, para as sementes sem mucilagem, iguais a 0,997 e 0,998, respectivamente, mostram a adequação do modelo linear para representar os dados experimentais de ρ_b nas condições de secagem utilizadas.

IV.4.4. POROSIDADE DA PARTÍCULA E POROSIDADE DO LEITO

Na Figura IV.11 têm-se os resultados de porosidade interna das sementes com e sem mucilagem em função do teor de umidade.

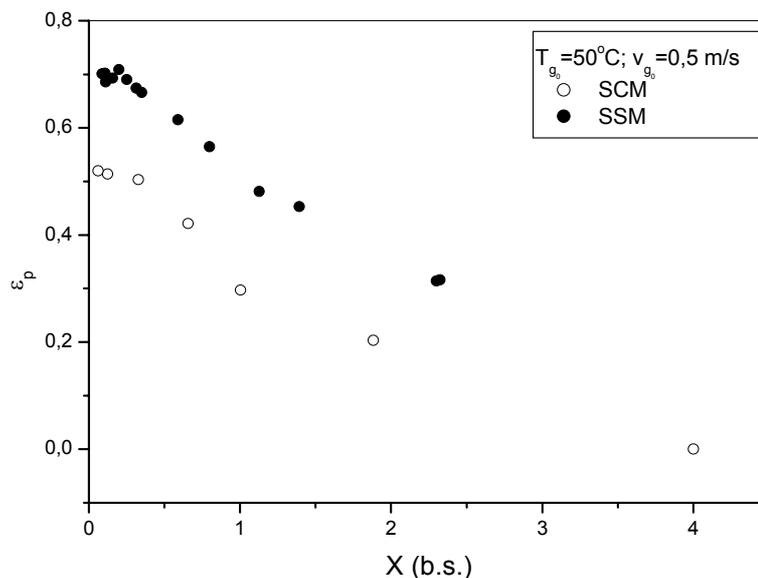


Figura IV.11 – Porosidade das sementes, com e sem mucilagem, em função do teor de umidade, para $T_{g0}=50^\circ\text{C}$ e $v_{g0} = 0,5 \text{ m/s}$.

Na Figura IV.12 são apresentados os dados experimentais típicos de porosidade total do sistema (ϵ_t), incluindo os poros das partículas, em função de X_R , para as sementes com e sem mucilagem em diferentes alturas de empacotamento e diferentes temperaturas do ar de secagem e para velocidade do ar de $0,5 \text{ m/s}$.

Pode ser observado a partir da Figura IV.12 um aumento significativo da porosidade durante a secagem em leito fixo e camada espessa, bem como ser constatada a influência da estrutura da semente sobre o volume de poros de ar no leito particulado. No início do processo, os leitos de sementes úmidas com e sem mucilagem têm, respectivamente, porosidades próximas de $0,27$ e $0,47$, as quais aumentam linearmente com a remoção de umidade até valores em torno de $0,79$ e $0,85$, quando o leito encontra-se homoganeamente seco com teores de umidade próximos ao do equilíbrio termodinâmico com o ar de secagem.

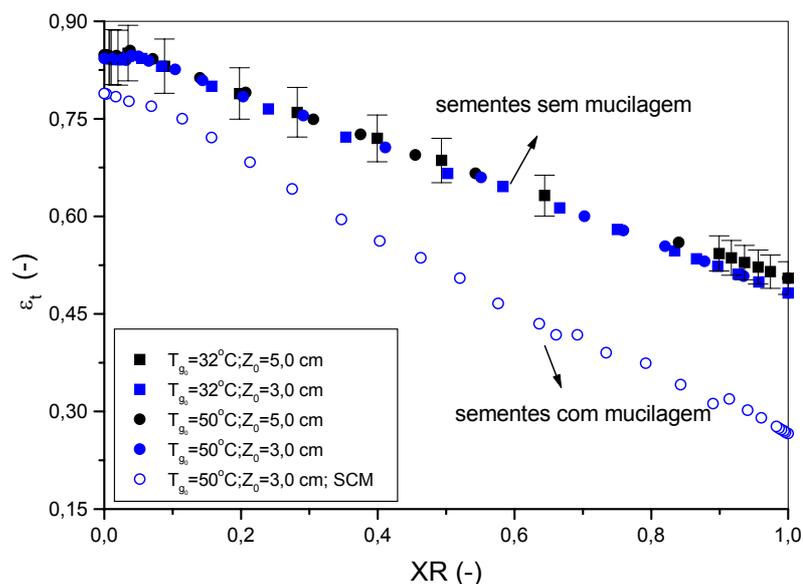


Figura IV.12 – Porosidade total do leito em função do adimensional de umidade, parametrizada na estrutura da partícula e em diferentes valores de Z_0 , T_{g0} , $v_{g0} = 0,5 \text{ m/s}$.

Os maiores valores de porosidade total dos leitos constituídos por sementes sem mucilagem evidenciam a grande contribuição do alto volume de poros destas partículas para uma simultânea incorporação de ar que substitui parcialmente a água evaporada, o que, provavelmente, pode explicar a menor redução de volume do sistema em relação àquele constituído por sementes revestidas.

Os leitos de sementes revestidas, no entanto, apresentam uma variação de porosidade total de aproximadamente 66%, maior que a ocorrida nos leitos de sementes sem mucilagem em torno de 45%. Este resultado pode ser explicado pelo fato de além do aumento da porosidade intra-partícula, a camada externa sucosa destas sementes sofre deformações que alteram a sua forma, o que resulta num maior volume de vazios de ar inter-partícula. A variação de porosidade total do leito para os dois tipos de estrutura de partícula é muito alta quando comparada

com as encontradas em outros grãos e sementes, como feijão (**MARTINS et alii, 1997**) e soja (**DESHPAND et alii, 1993**), por exemplo.

De acordo com os resultados obtidos, para leitos de até 5 cm também não foi verificada a influência da altura de empacotamento sobre a porosidade do leito. Assim sendo, a dependência do volume de vazios de ar no leito em relação ao adimensional de umidade, para as sementes com e sem mucilagem, foi representada, respectivamente, pelas Equações (IV.14) e (IV.15), ambas com $R^2=0,998$.

$$\varepsilon_t = 0,79 - 0,53 \cdot \overline{XR} \quad (\text{IV.14})$$

$$\varepsilon_t = 0,85 - 0,36 \cdot \overline{XR} \quad (\text{IV.15})$$

A fim de avaliar a influência das características superficiais das sementes sobre a estrutura porosa do leito, na Figura IV.13 são plotados em função de XR os resultados típicos de porosidade “bulk” do sistema (ε_b), os quais não levam em consideração os poros intra-partícula.

As diferenças entre os valores de porosidade das sementes com e sem mucilagem evidenciam os diferentes tipos de aderência que ocorrem entre as partículas no leito devido às suas características superficiais distintas. A superfície lisa e deformável da mucilagem facilita o contato entre as sementes, o que leva a uma maior acomodação do leito e, conseqüentemente, a um menor volume de vazios de ar interpartícula.

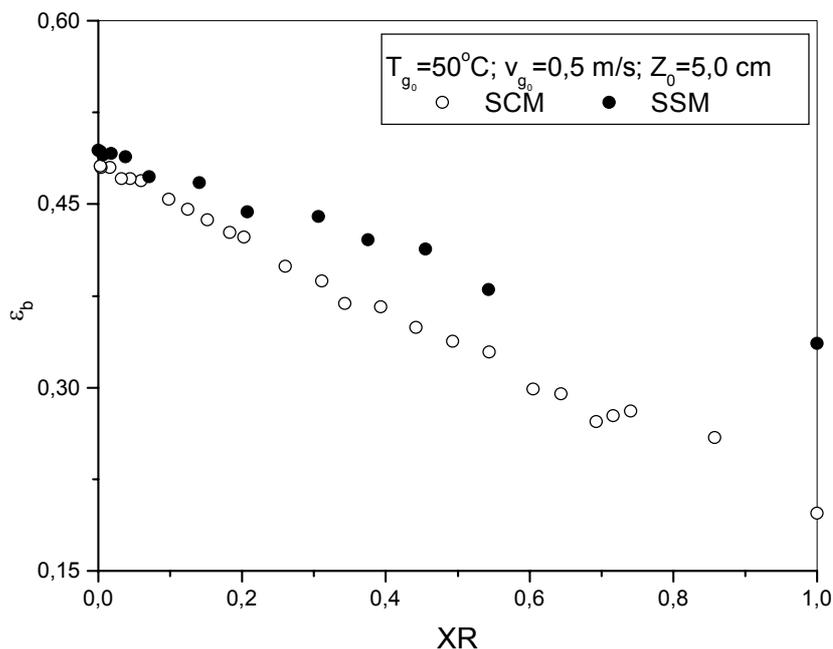


Figura IV.13 – Porosidade “bulk” do leito em função do teor de umidade, para sementes com e sem mucilagem.

De acordo com **MAY e PERRÉ (2002)**, no caso de materiais deformáveis, existe um balanço entre a contração de volume e a porosidade. Diante disto e do fato da porosidade ser uma razão entre volumes, buscou-se avaliar a variação da porosidade total ocorrida durante a secagem de sementes de mamão em leito fixo em relação à variação de volume de ar e à variação de volume do sistema.

A Figura IV.14 mostra, para cada estrutura de semente, a relação típica entre a redução de volume do leito, ΔV_{leito} , e a redução de massa, $\Delta m_{\text{H}_2\text{O}}$.

Com base nos resultados obtidos pode ser observado que, tanto para as sementes revestidas como para as sementes desprovidas do envoltório mucilaginoso, cada perda de umidade não é diretamente convertida em contração de volume do leito particulado. Isto significa que a equivalência entre a variação

de volume do leito e o correspondente volume de água evaporada (considerando a densidade da água igual a 1 g/cm^3) não pode ser assumida.

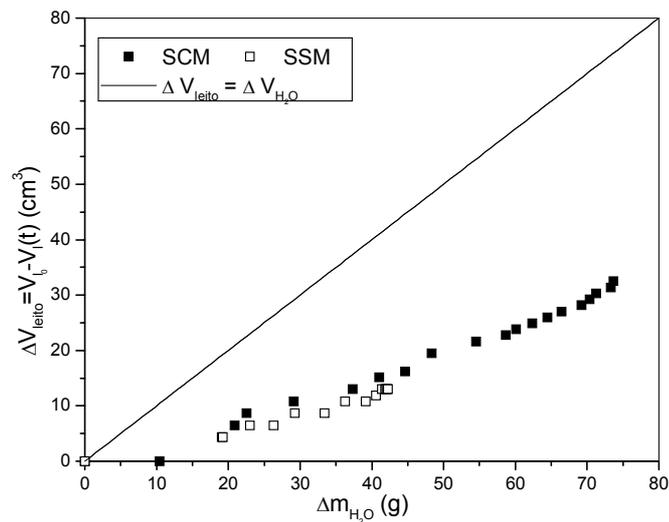


Figura IV.14 – Variação de volume do leito em função da variação de massa de água durante a secagem de sementes de papaya com e sem mucilagem, $Z_0=5 \text{ cm}$, $T_{g0}=50^\circ\text{C}$, $v_{g0}=0,5 \text{ m/s}$.

Nos leitos constituídos por sementes com e sem mucilagem a remoção de umidade resultou numa contração de volume menor que o correspondente volume de água evaporada. Logo, o aumento da porosidade do sistema pode ser explicado pelo aumento do volume de ar que substitui a quantidade de água evaporada, uma vez que sobram espaços vazios que não são preenchidos pela acomodação das partículas no leito, bem como pelo decréscimo de volume do leito devido ao encolhimento, considerando que a porosidade é uma razão entre estes volumes.

Após a determinação do tamanho, das massas específicas e da porosidade, tem-se a busca de informações sobre as áreas específicas de transferência de calor e massa dos leitos constituídos pelas sementes em estudo.

IV.4.5. ÁREA ESPECÍFICA

Na Figura IV.15 são apresentados os resultados típicos referentes à dependência da área específica de secagem com relação ao adimensional de umidade do leito, calculada através da Equação (III.20).

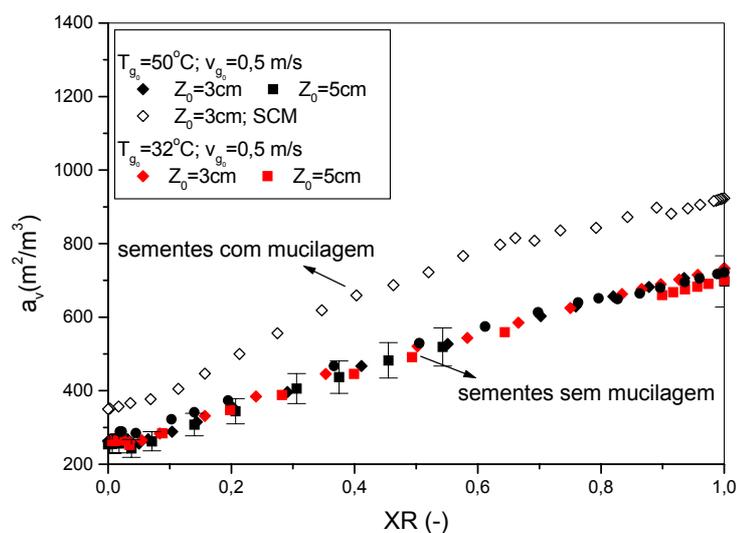


Figura IV.15 – Área específica do leito em função do adimensional de umidade.

Esta propriedade do leito mostrou-se independente da altura de empacotamento, mas dependente do teor de umidade e das características superficiais das partículas. A superfície específica do leito, através da qual ocorrem as transferências de calor e massa envolvidas na secagem, diminui com o decréscimo de umidade, com uma variação em torno de 65 % para os leitos compostos tanto por sementes revestidas como por sementes desprovidas da mucilagem. Esta redução deve-se provavelmente ao aumento significativo da porosidade do leito (Figura IV.12) quando comparado com a variação nas dimensões (Figura IV.1) e forma das sementes (Tabelas IV.3 e IV.4), conforme visto anteriormente.

A partir dos dados obtidos de a_v em função de XR e da forma de dependência observada, foram feitos ajustes da equação polinomial de segundo grau dada pela Equação IV.16. Os resultados da regressão encontram-se reunidos na Tabela IV.9.

$$a_v = p_0 + p_1 \cdot \overline{XR} + p_2 \cdot \overline{XR}^2 \quad (\text{IV.16})$$

Tabela IV.9: Resultados da regressão não linear para a área específica em função de XR.

Semente	p_0	p_1	p_2	R^2
SCM	330,2	934,0	-343,8	0,997
SSM	250,1	562,6	-90,5	0,994

Com base na Figura IV.15 constata-se que as sementes desprovidas da mucilagem constituem leitões com áreas específicas menores que aquelas dos leitões de sementes revestidas. Isto porque, ao se utilizar a porosidade total no cálculo de a_v , tem-se para as sementes sem mucilagem a grande contribuição de sua porosidade interna.

Assim, a influência das características superficiais destas partículas, isto é, da presença de protuberâncias nas sementes sem mucilagem, só pode ser verificada substituindo na equação utilizada no cálculo de a_v , Equação III.20, a porosidade total pela porosidade “bulk”, a qual considera apenas o volume de vazios de ar interpartícula.

Na Figura IV.16 são mostrados os dados típicos de a_v , obtidos desta forma, em função do adimensional de umidade.

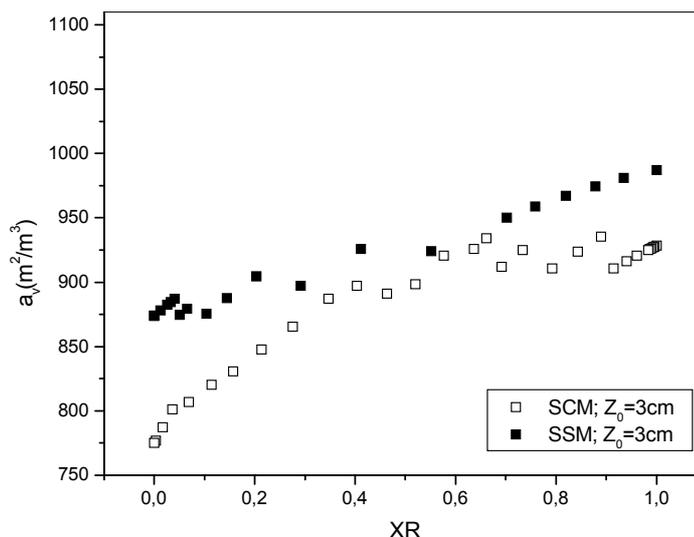


Figura IV.16 – Área específica do leito (excluindo os poros intrapartícula) em função do adimensional de umidade, para sementes com e sem mucilagem, $T_{g0}=50\text{ }^\circ\text{C}$ e $v_{g0}=0,5\text{ m/s}$.

Com base na Figura IV.16 pode ser verificado que ao se remover a película externa de mucilagem, as protuberâncias da camada interna das sementes de papaya possibilitam uma maior área de contato entre o sólido e o fluido. No entanto, diante dos resultados apresentados constata-se que a influência das protuberâncias destas sementes sobre a área específica do leito é pequena frente a sua natureza altamente porosa.

Caracterizadas as propriedades físicas das sementes e de seus leitos porosos em função do teor de umidade, a apresentação dos resultados é direcionada para aqueles relativos à transferência de calor e massa ocorrida durante a secagem em camada espessa.

IV.5. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA SECAGEM EM CAMADA ESPESSA

A seguir são feitas a análise e a comparação das características de secagem em camada espessa das sementes com e sem mucilagem, as quais incluem as taxas de secagem e os gradientes de umidade e temperatura desenvolvidos durante a operação da unidade experimental em leito fixo.

IV.5.1. DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA DO SÓLIDO AO LONGO DO SECADOR

Inicialmente, a fim de avaliar o método empregado para as medidas de temperatura ao longo do leito, foi analisada a reprodutibilidade dos dados relativos a uma mesma altura do secador, obtidos a partir de diferentes testes de secagem realizados nas mesmas condições operacionais.

Na Figura IV.17 têm-se os resultados típicos obtidos para uma altura do leito de 3,0 cm, durante a secagem com ar a 0,5 m/s e 41°C.

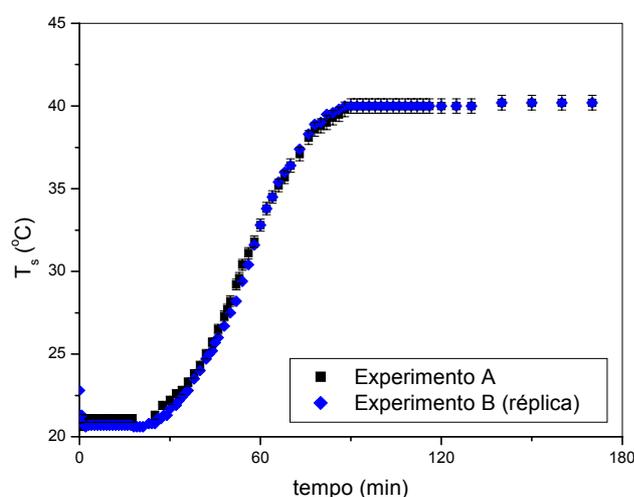


Figura IV.17 – Temperatura do sólido em função do tempo para uma altura do leito de 3,0 cm, durante testes de secagem de sementes sem mucilagem, $T_g=41^\circ\text{C}$ e $v_{g0}=0,5\text{m/s}$.

As diferenças entre os valores de temperatura das réplicas são inferiores à propagação do erro de medida, correspondente a $0,5^{\circ}\text{C}$. Logo, pode ser constatada a reprodutibilidade dos dados de temperatura obtidos, bem como a validade da metodologia empregada para a determinação desta variável do processo.

A partir das medidas de temperatura ao longo da célula apresentada na Figura III.6, foram então determinadas as distribuições de temperatura para os dois tipos de leitos utilizados, constituídos, separadamente, de sementes com e sem mucilagem. Nas Figuras IV.18 e IV.19 encontram-se apresentados os resultados típicos de distribuição de temperatura do material particulado em função do tempo em três diferentes alturas no leito.

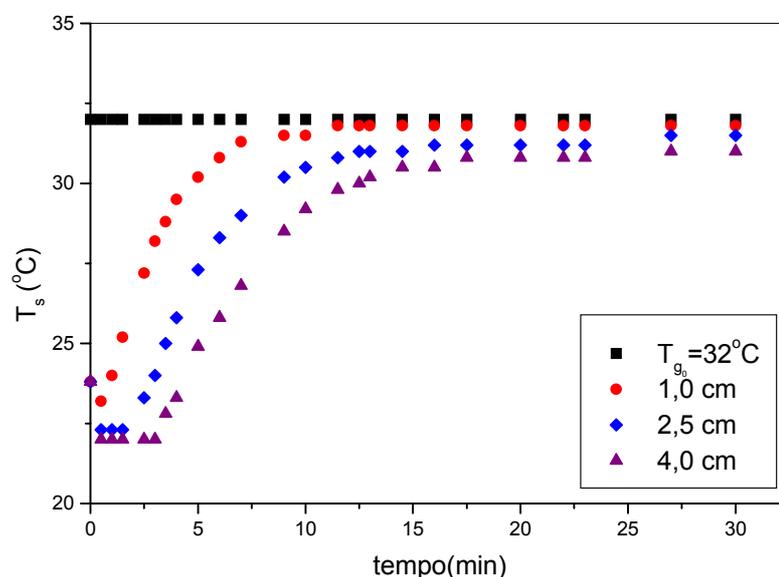


Figura IV.18 – Temperatura em função do tempo para o leito constituído de sementes com mucilagem e percolado com ar a 32°C e $0,5\text{m/s}$, parametrizadas na altura do leito.

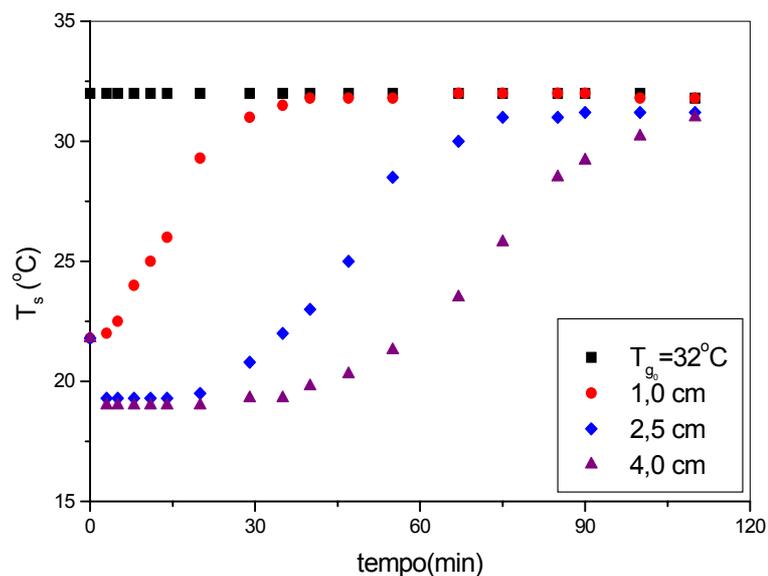


Figura IV.19 – Temperatura em função do tempo para o leito constituído de sementes sem mucilagem e percolado com ar a 32°C e $0,5\text{m/s}$, parametrizadas na altura do leito.

As Figuras IV.18 e IV.19 mostram que na secagem em camada espessa de sementes de papaya ocorrem, com respeito à transferência de calor, dois fenômenos sucessivos. No primeiro, ocorrido no início do processo, há um rápido decréscimo da temperatura com relação ao tempo, ao longo de todo o leito, causado pelo contato com a corrente de ar do meio poroso úmido com uma temperatura inicial maior que a temperatura de bulbo úmido. Em seguida, a temperatura em cada altura do leito apresenta uma tendência similar de aumento da temperatura de bulbo úmido até uma temperatura assintótica poucos graus abaixo da temperatura do ar na entrada do leito.

Pode ser observado que quanto mais próximo da região de entrada do ar de secagem, mais rápido é o aumento de temperatura, bem como menor é a diferença entre a temperatura assintótica e a temperatura do ar de secagem, tendo em vista o seu maior potencial de troca térmica.

A taxa de aquecimento do leito particulado ficou em torno de $1,6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para as sementes com mucilagem e de aproximadamente $0,3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para as sementes sem mucilagem, decrescendo à medida que a frente se move para as camadas superiores da célula.

A maior resposta à transferência de calor pelos leitos constituídos por sementes com mucilagem evidencia o maior contato entre estas partículas e, conseqüentemente, o menor volume de poros interpartículas durante o processo, conforme já verificado na Figura IV.13. Em adição, como a presença da mucilagem dificulta a perda de umidade, uma menor quantidade de energia fornecida pelo ar de secagem pode estar sendo utilizada na forma de calor latente, para vaporizar a água contida na semente, de modo a haver mais energia disponível na forma de calor sensível para aquecer o material.

IV.5.2 – DISTRIBUIÇÃO DE UMIDADE DO SÓLIDO AO LONGO DO SECADOR

A fim de avaliar a validade da técnica de estratificação do leito, na Figura IV.20 são mostrados os valores típicos de umidade do sólido em função do tempo de secagem obtidos para uma altura do leito de 2 cm, a partir de dois experimentos realizados nas mesmas condições operacionais.

A partir da Figura IV.20 é possível constatar a proximidade entre as réplicas, com diferenças entre os valores de X inferiores ao erros de medidas. Este resultado indica que os dados de umidade obtidos são reprodutíveis e que, portanto, a metodologia experimental empregada é válida para o estudo pretendido.

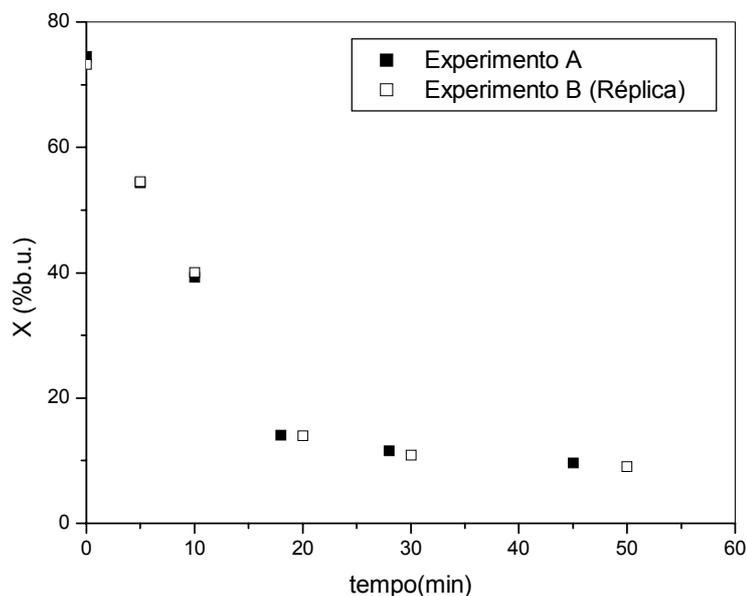


Figura IV.20 – Teor de umidade em função do tempo de secagem para uma altura do leito de 2cm, $T_{g0}= 41^{\circ}\text{C}$ e $v_{g0}=1,5\text{m/s}$, sementes sem mucilagem.

Os resultados típicos de umidade em função do tempo, parametrizados em relação à coordenada z do leito e obtidos a partir da técnica de estratificação, são apresentados nas Figuras de IV.21 e IV.22 para as sementes com e sem mucilagem, respectivamente. Os demais dados de distribuição de umidade encontram-se no Anexo A.

A partir das Figuras IV.21 e IV.22 verifica-se que, para uma mesma posição ao longo do leito, a taxa de secagem das sementes com mucilagem foi menor que aquela das sementes desprovidas do envoltório gelatinoso, o que está de acordo com os estudos realizados em camada fina (**PRADO, 1999**). Com base nos dados apresentados, por exemplo, o tempo necessário para que a camada correspondente à altura de 4 cm do leito começasse a secar foi em torno de 5 horas, para as

sementes com mucilagem, e de aproximadamente 20 minutos, para as sementes sem mucilagem.

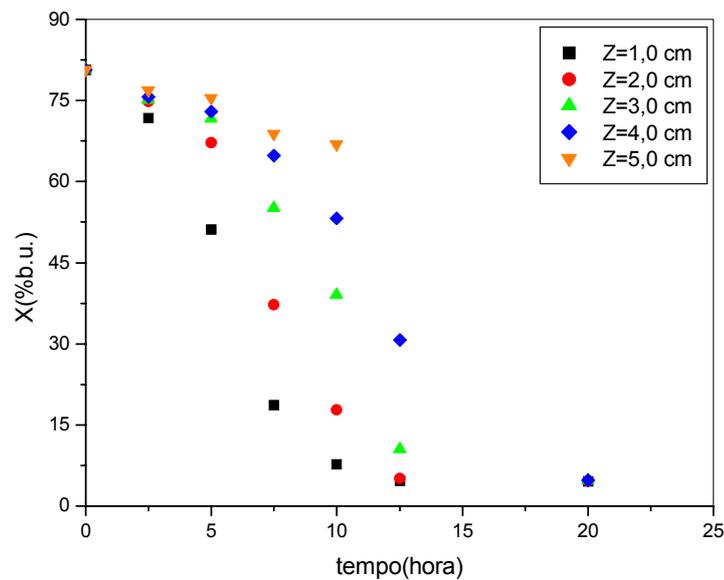


Figura IV.21 – Teor de umidade do sólido em função do tempo para o leito constituído de sementes com mucilagem e percolado com ar a 50°C e $0,5\text{m/s}$, parametrizado na altura do leito.

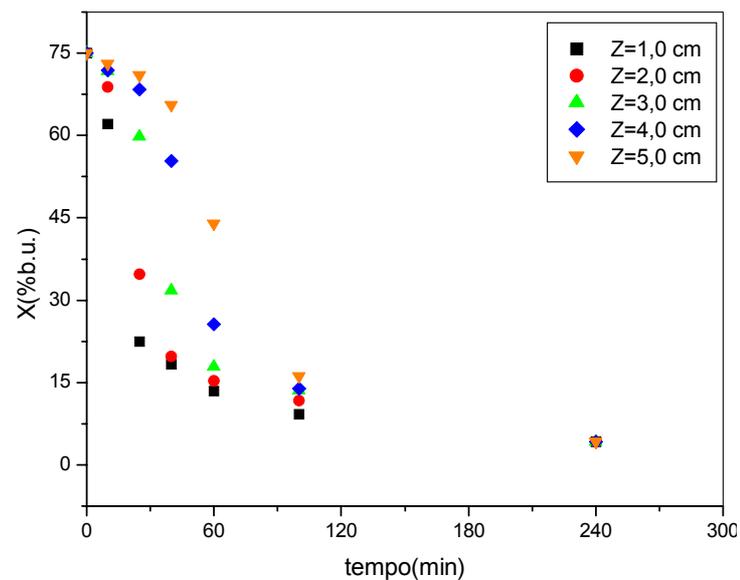


Figura IV.22 – Teor de umidade do sólido em função do tempo para o leito constituído de sementes sem mucilagem e percolado com ar a 50°C e $0,5\text{m/s}$, parametrizadas na altura do leito.

O revestimento mucilaginoso durante a secagem passa provavelmente por um processo de impermeabilização que influencia a difusividade de massa efetiva através deste meio em particular (MARINELLI et alii, 2002). Este processo dificulta a perda de umidade e se constitui em uma resistência extra à transferência de massa. A remoção da mucilagem facilita a perda de umidade, resultando numa maior taxa de secagem das sementes.

Os resultados de umidade do sólido em função da posição no secador, parametrizados no tempo de secagem, encontram-se apresentados nas Figuras IV.23 e IV.24. A partir destas figuras pode ser observada a frente de secagem que se move com o tempo e divide o leito em duas regiões: uma região úmida e uma seca. A zona de evaporação encontra-se localizada onde o gradiente de umidade é alto. A medida que o tempo de secagem aumenta, a frente de evaporação se aproxima do topo do leito resultando numa contração da região úmida.

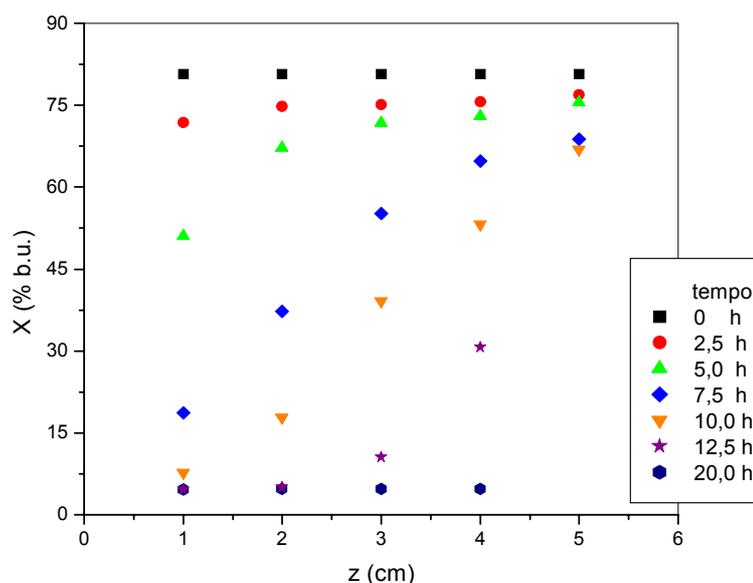


Figura IV.23 – Teor de umidade do sólido em função da altura do leito constituído de sementes com mucilagem ($X_0 = 80\%$ b.u.) e percolado com ar a 50°C e $0,5\text{m/s}$, parametrizadas no tempo.

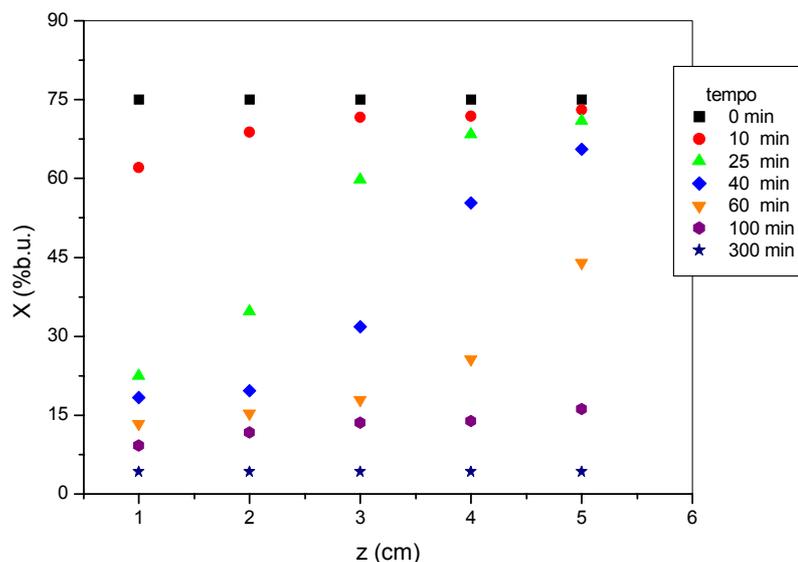


Figura IV.24 – Teor de umidade do sólido em função da altura do leito constituído de sementes sem mucilagem ($X_0 = 75\%$ b.u.) e percolado com ar a 50°C e $0,5\text{m/s}$, parametrizadas no tempo.

Em razão do alto teor de umidade inicial das sementes de papaya, o fluido ao percolar o leito, tem o seu potencial de secagem rapidamente reduzido, de modo que a secagem das camadas superiores só ocorre quando a frente de secagem atinge estas camadas. Esta frente, devido à estrutura superficial da semente sem mucilagem, move-se rapidamente ao longo do leito, conforme pode-se verificar tendo como base a Figura IV.24. No caso das sementes com mucilagem, Figura IV.23, pode ser verificada uma menor velocidade da frente de evaporação em relação àquela das sementes sem mucilagem, o que resulta numa evolução mais gradual da região seca ao longo do leito.

As Figuras IV.23 e IV.24 mostram também a obtenção de uma distribuição uniforme de umidade ao longo do leito no final da operação. Esta homogeneidade na umidade do produto final pode ser atribuída às características estruturais das sementes de papaya, bem como a uma distribuição uniforme de velocidade e temperatura do fluido de secagem na entrada do leito.

Estes resultados vêm confirmar a adequação da técnica de secagem em leito fixo para reduzir o alto teor de umidade inicial das sementes de papaya. Para sementes desta natureza, os secadores em leito fixo não apresentam desvantagem em relação aos secadores de leito móvel, pois além de garantir uma menor incidência de danos mecânicos (**PRADO, 1999**), asseguram também a obtenção de um produto homogêneo em relação à temperatura e umidade.

Pode-se verificar que durante a secagem de sementes com mucilagem a altura do leito de 5,0 cm não permaneceu constante, devido ao encolhimento de cerca de 30% que causou uma variação de espessura maior que 1,0 cm, valor correspondente a uma subdivisão da célula onde era feita a fragmentação para as medidas locais de umidade.

A fim de analisar a relação entre o encolhimento e os gradientes de umidade desenvolvidos ao longo do leito, tem-se na Figura IV.25 o resultado típico da dinâmica de encolhimento dos leitos formados por sementes de papaya com e sem mucilagem durante o processo de secagem em camada espessa com ar a 0,5 m/s e 50°C.

O percentual de encolhimento (S_{hr}) foi determinado a partir da seguinte equação:

$$S_{hr} = \left(1 - \frac{V_1}{V_{1_0}} \right) \cdot 100 \quad (\text{IV.17})$$

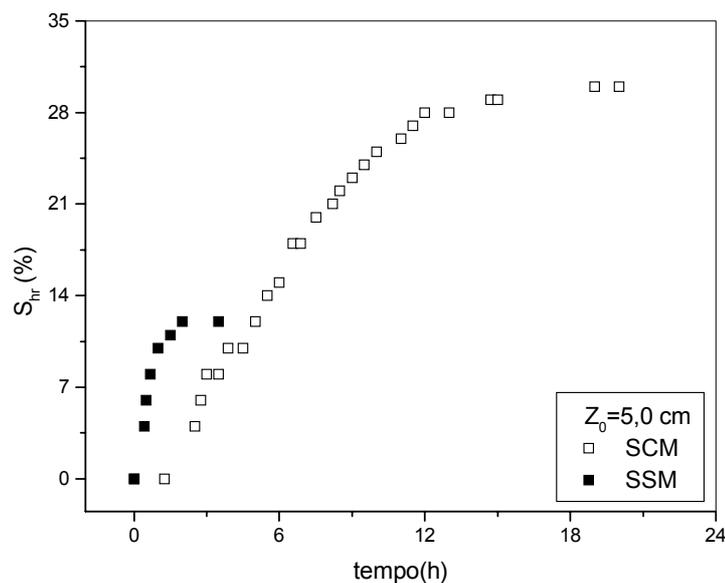


Figura IV.25 – Encolhimento do leito (%) em função do tempo de secagem, para as sementes com e sem mucilagem.

A taxa de encolhimento é constante até que se inicie a secagem da última camada de sementes, Figuras IV.21 e IV.22, quando então ocorre uma mudança para uma taxa decrescente. A taxa de encolhimento do leito de sementes sem mucilagem (cerca de 6,0 mm/h) foi maior que aquela para as sementes revestidas (em torno de 1,25 mm/h), o que pode estar associado à facilidade de remoção da umidade e à alta velocidade da frente de secagem que estabelece, num tempo curto de secagem, um alto gradiente de umidade.

Entretanto, a magnitude de encolhimento do leito no final do processo foi de aproximadamente 30 %, para as sementes com mucilagem, e em torno de 12% para sementes sem mucilagem. A secagem das sementes com mucilagem, por ocorrer de forma mais lenta, submete por mais tempo o leito particulado a altos gradientes de umidade que causam as tensões de encolhimento, segundo **GORLING (1958)**.

Além disto, a maior velocidade da frente de evaporação para as sementes sem mucilagem em relação às sementes revestidas resulta numa maior evolução da região seca ao longo do leito, o que minimiza os efeitos dos gradientes de umidade sobre a contração de volume do leito poroso.

Com base nas distribuições experimentais de temperatura e umidade apresentadas, verifica-se que os gradientes de umidade têm uma maior influência sobre o encolhimento que os gradientes de temperatura.

Os dados experimentais de temperatura e umidade obtidos na unidade de secagem em leito fixo e camada espessa foram então utilizados para a avaliação dos resultados preditos pelo modelo matemático apresentado no item III.2.

IV.6. APLICAÇÃO DO MODELO A DUAS FASES À SECAGEM DE SEMENTES DE PAPAYA

As etapas experimentais realizadas revelaram a ocorrência de alterações na densidade de empacotamento (ρ_b), porosidade (ε) e área específica (a_v) associadas ao encolhimento do leito durante a secagem em camada espessa das sementes de papaya.

As propriedades do leito utilizadas no modelo foram representadas em função do teor de umidade médio (\bar{X}), utilizando as equações apresentadas na Tabela IV.10 para os leitos formados por sementes com e sem a cobertura de mucilagem.

Os valores ou as equações para a determinação das propriedades físicas do ar e da água, também requeridas para a solução do modelo, encontram-se apresentadas no Anexo B.

O calor específico a pressão constante, usualmente utilizado para o problema da transferência de calor durante a secagem, pode ser considerado como uma propriedade física constante na faixa operacional estudada. Os valores de C_p das sementes de papaya com e sem mucilagem, os quais foram utilizados para a simulação, foram respectivamente de 1100 e 1300 J/(kg °C), de acordo com **PRADO (1999)**.

Os resultados simulados apresentados neste item foram obtidos utilizando-se a correlação de **GEANKOPLIS (1993)**.

Tabela IV.10: Equações representativas das propriedades físicas dos leitos formados por sementes com e sem mucilagem em função do teor de umidade.

Propriedades do leito	
Partículas com mucilagem	Partículas sem mucilagem
$\rho_b = 232,9 + 133,5 \cdot \bar{X}$ (IV.35)	$\rho_b = 163,4 + 138,2 \cdot \bar{X}$ (IV.38)
$\varepsilon = 0,524 - 0,063 \cdot \bar{X}$ (IV.36)	$\varepsilon = 0,500 - 0,054 \cdot \bar{X}$ (IV.39)
$a_v = 777,3 + 87,4 \cdot \bar{X} - 12,7 \cdot \bar{X}^2$ (IV.37)	$a_v = 799,3 + 53,9 \cdot \bar{X}$ (IV.40)

onde ρ_b [kg/m³], ε [-] and a_v [m²/m³].

Através do trabalho experimental foi possível obter as distribuições de temperatura e umidade do sólido ao longo de leitos espessos. A partir da resolução numérica foram obtidos os perfis simulados destas variáveis. Logo, o confronto

entre os resultados experimentais e simulados permite avaliar o modelo a duas fases, tomando como critério estatístico os desvios relativos médios.

IV.6.1. AVALIAÇÃO DO MODELO POR MEIO DOS RESULTADOS ADVINDOS DOS TESTES DE SECAGEM

A seguir, são apresentados os resultados típicos, com os demais dados experimentais e preditos pelo modelo encontrando-se no Anexo A.

Nas Figuras IV.26 e IV.27 são mostrados os resultados típicos dos teores de umidade experimentais e preditos em função do tempo, parametrizados em três alturas do leito, para leitos formados separadamente por partículas com diferentes características superficiais. Verifica-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e simulados quando o encolhimento é levado em consideração.

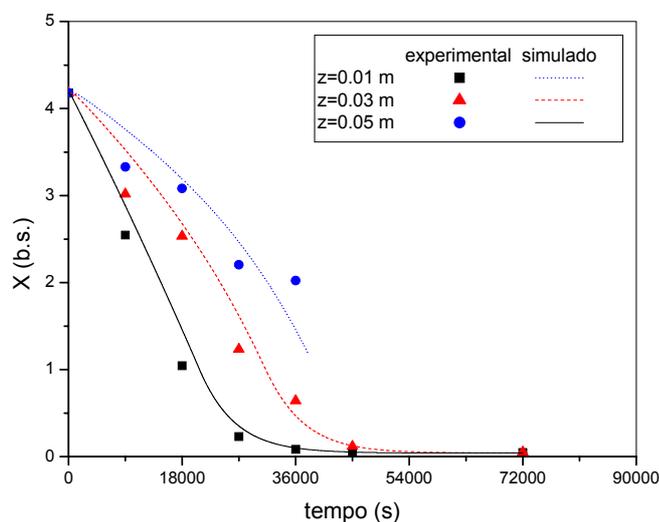


Figura IV.26 – Valores experimentais e simulados de umidade do sólido em função do tempo de secagem, parametrizados em diferentes alturas do leito, durante a secagem de sementes com mucilagem, $T_{g0}=50^{\circ}\text{C}$ $v_g=0,5$ m/s.

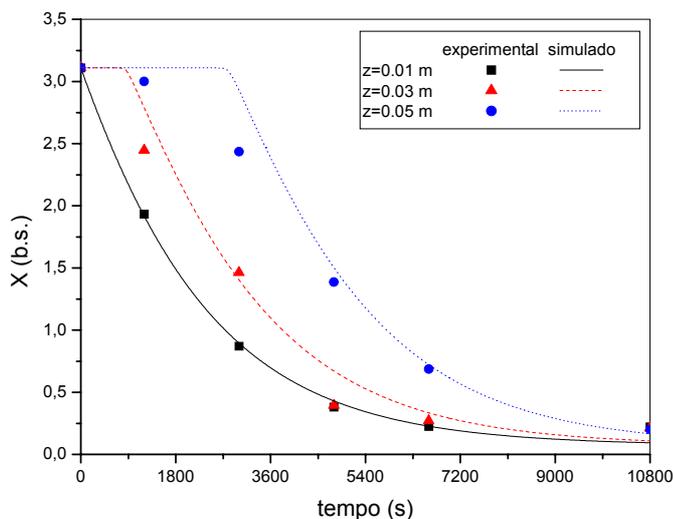


Figura IV.27 – Valores experimentais e simulados de umidade do sólido em função do tempo de secagem, parametrizados em diferentes alturas do leito, durante a secagem de sementes sem mucilagem, $T_{g0}=50^{\circ}\text{C}$ $v_g=0,5$ m/s.

A partir das Figuras IV.26 e IV.27 pode ser observado que a precisão do modelo no estágio inicial de secagem diminui à medida que a frente de secagem se desloca da base para o topo do leito. Este resultado pode ser atribuído à condensação do vapor d'água sobre o produto, à medida que o ar de secagem atinge a saturação ao percolar o leito. Quando a reumidificação do material ocorre, a equação de camada fina utilizada pode não ser apropriada.

Nas Figuras IV.28 e IV.29 são apresentados os resultados experimentais e simulados de temperatura do sólido em função do tempo, parametrizados em três posições ao longo dos leitos formados por partículas com e sem mucilagem, respectivamente. Constata-se a partir destas figuras que o modelo é capaz de prever a evolução de temperatura desde o patamar inferior correspondente à temperatura de bulbo úmido até a temperatura assintótica. A tendência verificada nestas figuras é válida para todas as outras condições operacionais analisadas.

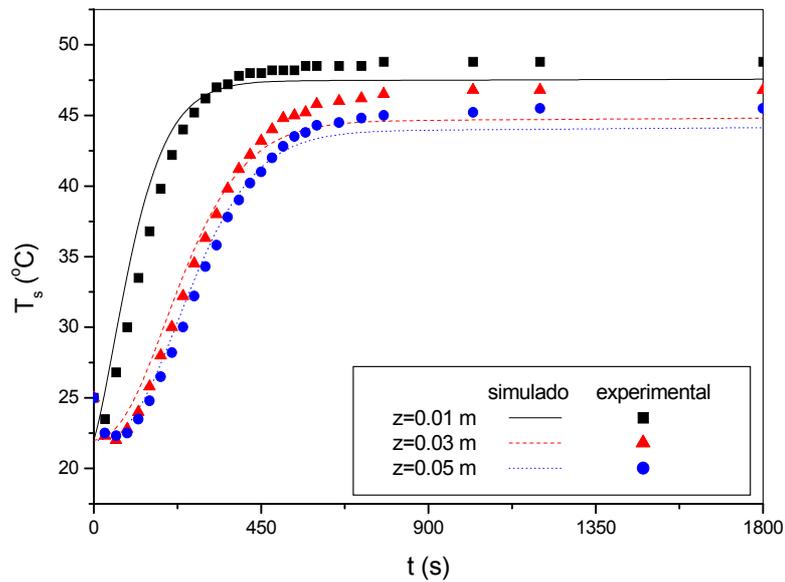


Figura IV.28 – Valores experimentais e simulados de temperatura do sólido em função do tempo, parametrizados em três alturas do leito, durante a secagem de sementes com mucilagem. com $v_g=0,5$ m/s e $T_{g0}=50^\circ\text{C}$.

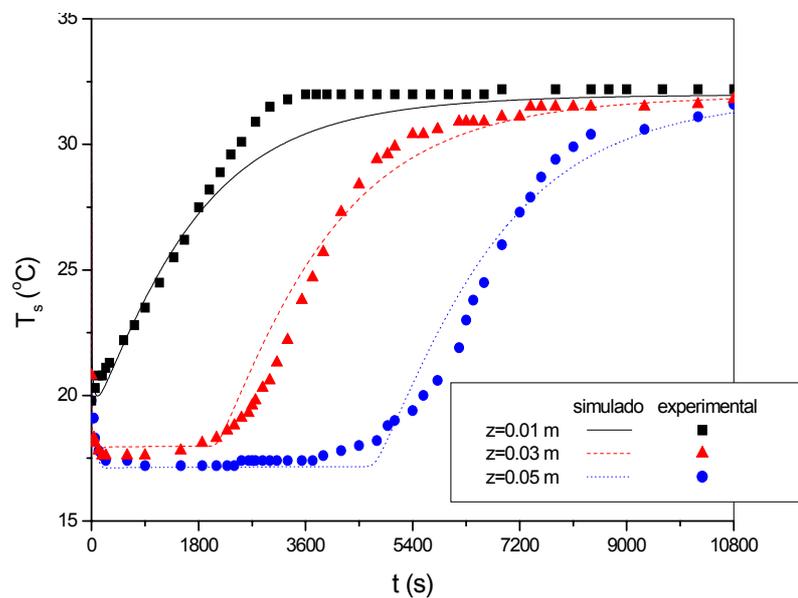


Figura IV.29 – Valores experimentais e simulados de temperatura do sólido em função do tempo, parametrizados em três alturas do leito, durante a secagem de sementes sem mucilagem. com $v_g=0,5$ m/s e $T_{g0}=32^\circ\text{C}$.

Cabe ressaltar que a melhor representação dos dados experimentais de temperatura foi obtida utilizando-se a equação de **GEANKOPLIS (1992)**, Equação (II.23), para a estimativa do coeficiente de transferência de calor. Isto se deve, provavelmente ao fato desta equação incorporar um termo que leva em conta o efeito da estrutura do empacotamento das partículas, a porosidade.

Nas Tabelas IV.11 a IV.14 são apresentados, parametrizados no tempo de secagem, os resultados experimentais e simulados de umidade ao longo do leito e os seus desvios relativos, para experimentos de secagem conduzidos com as sementes de mamão com e sem mucilagem, respectivamente.

Com base nas Tabelas IV.11 a IV.14 observa-se que os desvios relativos médios são inferiores a 10% e que o máximo desvio encontrado é em torno de 13,2 %. Constata-se, portanto, que o modelo a duas fases utilizado mostrou-se adequado para simular os perfis de umidade e temperatura durante o processo de secagem de sementes de mamão, com e sem a cobertura de mucilagem.

Tabela IV.11: Resultados experimentais e simulados de umidade das sementes com mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,01\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 1,0\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 20^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 4,1\text{ b.s.}$

t = 2,5 h				t = 7,5 h				t = 12,5 h			
z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)	z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)	z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)
0,010	2,55	2,62	2,82	0,010	0,30	0,31	3,67	0,010	0,05	0,052	5,52
0,020	3,01	2,92	1,32	0,020	0,59	0,61	2,54	0,020	0,06	0,065	10,7
0,030	3,17	3,12	0,26	0,030	1,10	1,08	8,70	0,030	0,08	0,092	8,24
0,040	3,30	3,25	0,55	0,037	1,54	1,35	12,10	0,035	0,12	0,13	4,24
0,047	3,37	3,32	1,36								
DVM = 0,92 %				DVM = 6,75%				DVM = 7,11			

Tabela IV.12: Resultados experimentais e simulados de umidade das sementes sem mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,012\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 0,5\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 19^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 2,75\text{ b.s.}$

t = 20 min				t = 80 min			
z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)	z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)
0,01	2,03	2,07	1,97	0,010	0,30	0,32	6,98
0,02	2,23	2,20	1,48	0,020	0,54	0,52	4,80
0,03	2,33	2,31	0,64	0,03	0,81	0,84	3,69
0,04	2,40	2,38	1,21	0,04	1,16	1,21	4,22
0,05	2,47	2,51	1,18	0,047	1,39	1,41	1,44
DVM = 1,30 %				DVM = 4,23%			

Tabela IV.13: Resultados experimentais e simulados de temperatura das sementes com mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,0051\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 0,8\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 20,8^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 3,5\text{ b.s.}$

t = 5 min				t = 15 min				t = 60 min			
z (m)	T_{exp} (b.s.)	T_{sim} (b.s.)	DV (%)	z (m)	T_{exp} (b.s.)	T_{sim} (b.s.)	DV (%)	z (m)	T_{exp} (b.s.)	T_{sim} (b.s.)	DV (%)
0,013	29,5	30,8	4,41	0,013	33,5	33,7	0,60	0,013	34,0	33,6	1,18
0,031	24,2	22,8	5,78	0,031	31,8	32,1	0,94	0,031	33,2	32,3	2,71
0,050	20,8	20,7	0,48	0,050	28,2	29,0	2,84	0,050	32,5	31,3	3,69
DVM = 3,56 %				DVM = 1,46%				DVM = 2,53			

Tabela IV.14: Resultados experimentais e simulados de temperatura das sementes sem mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,019\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 0,5\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 23^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 3,75\text{ b.s.}$

t = 10 min				t = 30 min				t = 90 min			
z (m)	T_{exp} (b.s.)	T_{sim} (b.s.)	DV (%)	z (m)	T_{exp} (b.s.)	T_{sim} (b.s.)	DV (%)	z (m)	T_{exp} (b.s.)	T_{sim} (b.s.)	DV (%)
0,010	35,5	40,2	13,24	0,010	49,0	45,2	7,76	0,010	50,0	49,6	0,80
0,025	25,2	28,1	11,50	0,025	34,0	37,1	9,12	0,025	48,5	48,4	0,21
0,040	24,2	24,3	0,41	0,040	25,0	26,3	5,20	0,040	47,2	46,2	2,11
DVM = 8,39 %				DVM = 7,36%				DVM = 1,04			

IV.6.2. AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES PARA O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Na Tabela II.3 foram apresentadas diferentes correlações para o cálculo do coeficiente de transferência de calor. Ao testar cada uma destas correlações no modelo, resultados distintos foram obtidos. Nas Figuras IV.30 e IV.31 são mostrados os perfis de temperatura das fases sólida e fluida, simulados utilizando as correlações de **BOYCE (1965)**, **WHITAKER (1972)** e **GEANKOPLIS (1993)**, que forneceram os melhores resultados entre as analisadas.

A partir das Figuras IV.30 e IV.31 pode ser observada durante a maior parte do processo, da temperatura de saturação até a assintótica, uma maior proximidade entre as temperaturas previstas para sólido e os dados experimentais. Isto vem reforçar a validade da interpretação adotada, de que a temperatura medida pelo termopar sem proteção no leito corresponde à temperatura das sementes.

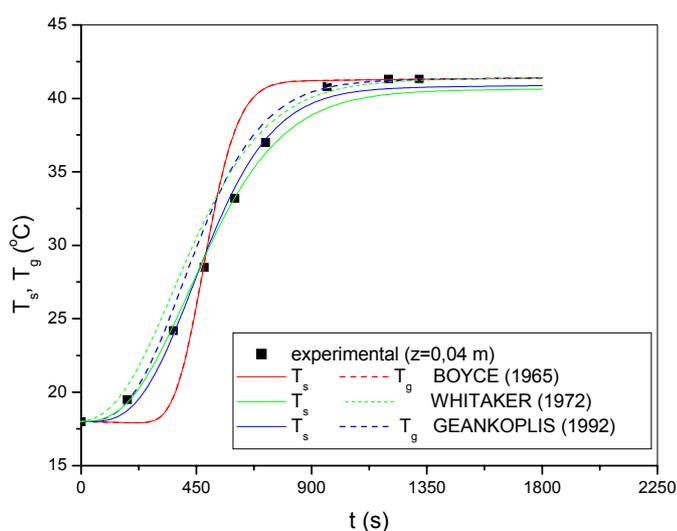


Figura IV.30 – Perfis de temperatura das fases sólida e fluida obtidos através da utilização de diferentes correlações para h . Sementes com mucilagem, $v_g=1,0$ m/s, $T_{g0}=50^\circ\text{C}$, $Y_{g0}=0,01\text{kg/kg}$, $T_{s0} = 18^\circ\text{C}$ e $X_0 = 3,9$ b.s.

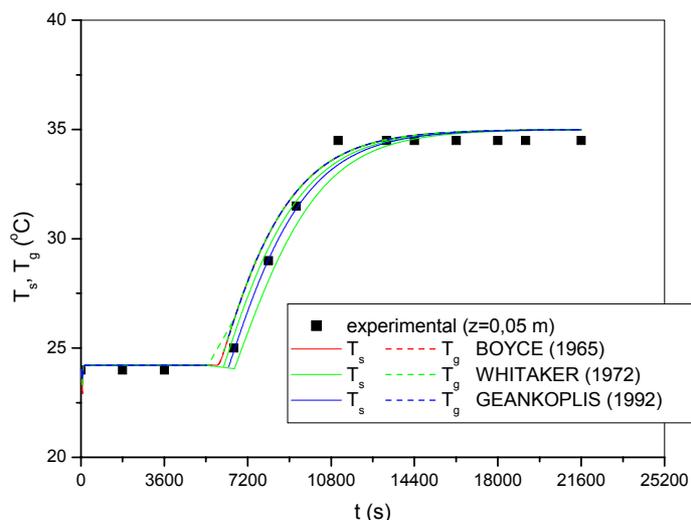


Figura IV.31 – Perfis de temperatura das fases sólida e fluida obtidos através da utilização de diferentes correlações para h . Sementes sem mucilagem, $v_g=0,5$ m/s, $T_{g0}=35^\circ\text{C}$, $Y_{g0}=0,014\text{kg/kg}$, $T_{s0} = 24^\circ\text{C}$ e $X_0 = 3,2$ b.s.

Para as condições apresentadas e para ambas as sementes, os resultados preditos pelo modelo apresentaram um menor desvio relativo médio em relação aos dados experimentais, em torno de 2%, quando utilizada a equação de **GEANKOPLIS (1993)**, Equação II.23. Com esta equação incorporada ao modelo a duas fases, foram realizadas as análises seguintes.

IV.6.3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS SIMULADOS COM E SEM A CONSIDERAÇÃO DO FENÔMENO DE ENCOLHIMENTO

A fim de constatar a importância da consideração do encolhimento para uma melhor interpretação dos fenômenos de transferência de calor e massa ocorridos na secagem de sementes de mamão, a seguir é feita uma análise comparativa dos resultados simulados com e sem a incorporação do fenômeno no modelo matemático utilizado.

A Figura IV.32 mostra os resultados simulados de umidade do sólido, com e sem a incorporação no modelo do fenômeno de encolhimento e da dependência das propriedades físicas em função do teor de umidade, para uma posição do leito de 0,03 m durante a secagem a 50°C das sementes desprovidas da mucilagem.

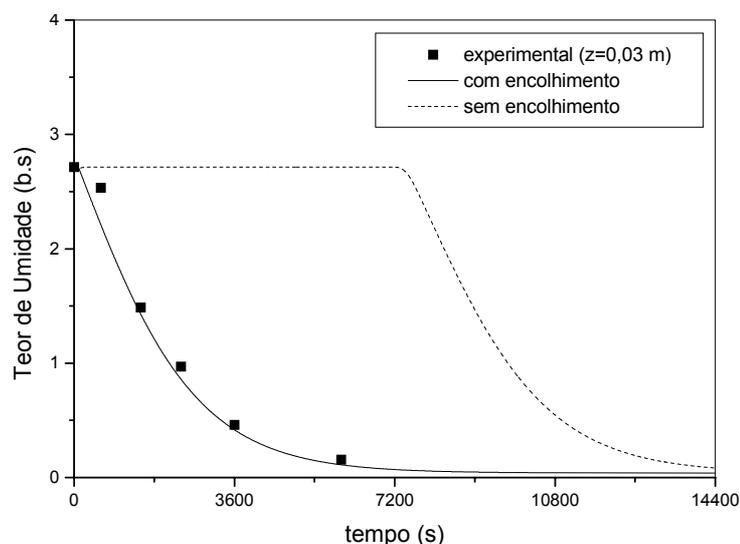


Figura IV.32 – Resultados de umidade do sólido simulados com e sem a consideração do encolhimento. Leito de sementes sem mucilagem. $z=0,03$ m, $T_{g0}=50^{\circ}\text{C}$; $v_{g0}=0,5$ m/s, $Y_{g0} = 0,099$ kg/kg, $T_{s0} = 24^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 2,72$ b.s.

Pode ser verificado que existe uma significativa diferença entre os dois conjuntos de dados. Este resultado foi confirmado pelo teste F com 5% de significância. Quando o encolhimento não é levado em consideração, o modelo tende a descrever uma secagem mais demorada que o processo físico real.

Este resultado se analisado sob o ponto de vista prático implicaria num dispêndio desnecessário de energia para a remoção de umidade do material, bem como numa possível alteração da qualidade do produto final.

Na Figura IV.33 são apresentados os resultados de temperatura do sólido em função do tempo de secagem, simulados com e sem a inclusão do efeito do

encolhimento no modelo. A solução do modelo sem a consideração do encolhimento conduz a menores valores de temperatura preditos numa certa altura do leito e num dado tempo quando comparado com o modelo que inclui este fenômeno. Neste caso, a taxa de transferência de calor entre as fases é aumentada devido ao aumento da contração de volume do leito.

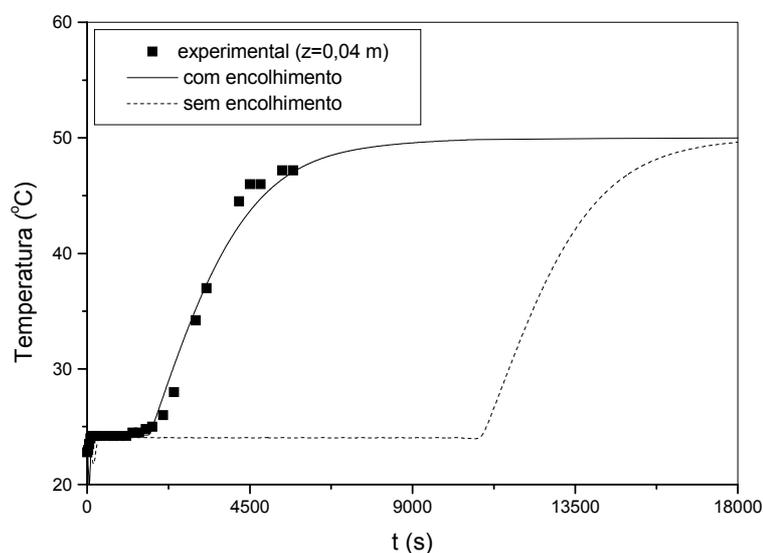


Figure IV.33 – Resultados de temperatura do sólido simulados com e sem a consideração do encolhimento. Leito de sementes sem mucilagem, $z=0,04$ m; $T_{g0}=50^{\circ}\text{C}$; $v_{g0}=0,5$ m/s, $Y_{g0} = 0,099$ kg/kg, $T_{s0} = 24^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 2,72$ b.s..

IV.6.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA AS DIFERENTES ESTRUTURAS DE SUPERFÍCIE DAS PARTÍCULAS

A fim de avaliar a influência das características superficiais das partículas sobre a transferência de calor e massa entre as fases sólida e fluida, as Figuras IV.34 e IV.35 mostram como gradientes de umidade bem definidos foram desenvolvidos ao longo dos leitos formados por estas partículas. Pode ser

constatada também a partir destes perfis simulados, a redução que ocorre na altura do leito poroso durante o processo de secagem.

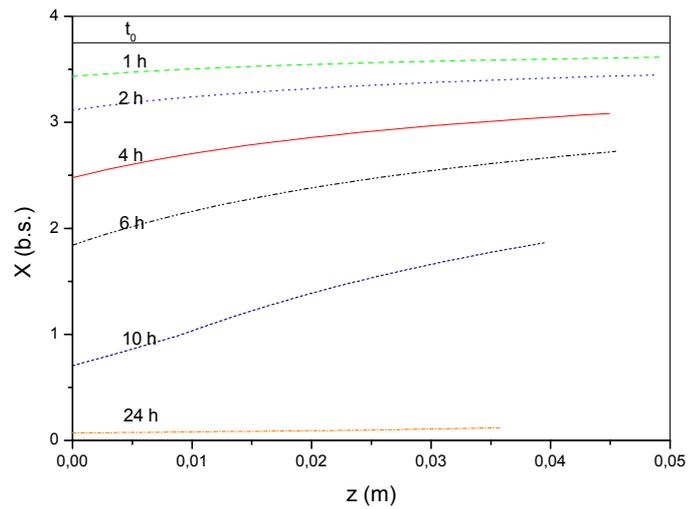


Figura IV.34. Perfis simulados de umidade ao longo do leito durante a secagem de sementes com mucilagem, $T_{g0}=41^{\circ}\text{C}$, $v_g=0,5\text{ m/s}$, $Y_{g0}=0,015\text{ kg/kg}$; $T_{s0}=26^{\circ}\text{C}$, $X_0=3,75\text{ b.s.}$

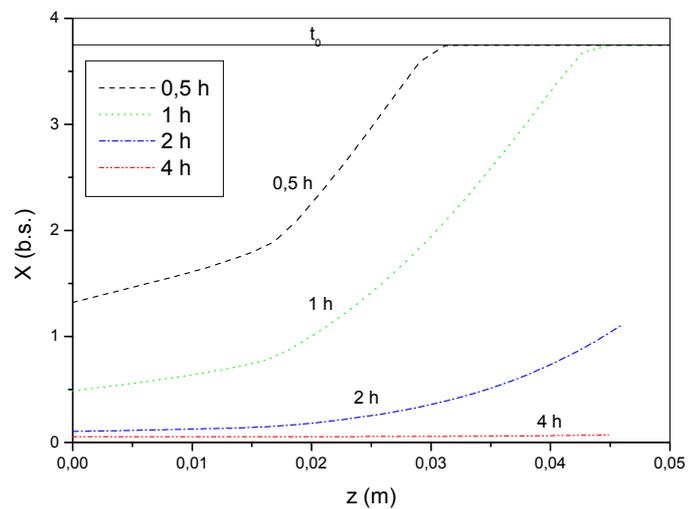


Figura IV.35. Perfis simulados de umidade ao longo do leito durante a secagem de sementes sem mucilagem, $T_{g0}=41^{\circ}\text{C}$, $v_g=0,5\text{ m/s}$, $Y_{g0}=0,015\text{ kg/kg}$; $T_{s0}=26^{\circ}\text{C}$, $X_0=3,75\text{ b.s.}$

Com base nas Figuras IV.34 e IV.35 verifica-se que diferença entre os comportamentos de secagem nestes leitos foi evidente. Os gradientes foram maiores para os leitos formados por partículas sem o revestimento mucilaginoso. Por outro lado, os leitos de partículas com mucilagem desenvolveram gradientes de umidade durante mais de 10 horas.

A alta velocidade da frente de evaporação na secagem de sementes de papaya sem mucilagem pode ser atribuída à estrutura superficial destas partículas contendo protuberâncias que fornecem uma grande área específica. No caso das sementes revestidas, devido à resistência extra à transferência de massa fornecida pelo revestimento mucilaginoso, a frente de evaporação tem uma evolução mais gradual ao longo do leito.

Com base nos resultados experimentais e simulados apresentados neste item pode-se afirmar que o modelo utilizado mostrou-se adequado para descrever a operação de secagem convectiva das sementes de mamão, possuindo diferentes características superficiais.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos têm-se, para as condições utilizadas neste trabalho, as seguintes conclusões.

A metodologia experimental empregada mostrou-se adequada para atingir os objetivos do trabalho. As técnicas de análise de imagens e de picnometria gasosa permitiram identificar e quantificar o fenômeno de encolhimento, bem como determinar as propriedades físicas das sementes de mamão em função do teor de umidade. A técnica de estratificação do leito mostrou-se adequada para a determinação da distribuição experimental de umidade durante a secagem em camada espessa.

O encolhimento volumétrico das partículas individuais apresentou uma dependência linear com o teor de umidade, mostrando-se independente das condições operacionais, mas dependente da característica superficial da semente. O encolhimento das sementes com mucilagem é acompanhado por alterações na forma das partículas devido às deformações na mucilagem. A aplicação dos modelos de **SUZUKI et alii (1976)** permitiu a descrição e a compreensão do fenômeno.

O encolhimento do leito predominou no período à taxa constante, seguindo a evaporação de água, apresentando uma relação não linear com a umidade e sendo influenciado pela estrutura da superfície da partícula, velocidade de secagem e altura de empacotamento do leito.

A redução do tamanho e forma das sementes de papaya, devido à remoção de umidade, influenciou direta e proporcionalmente o encolhimento dos leitos porosos, os quais sofreram alterações em seus parâmetros estruturais.

A massa específica aparente, a área específica e a porosidade dos leitos constituídos por sementes de papaya apresentaram uma dependência com o teor de umidade e com as características superficiais das partículas, não sendo influenciadas pela altura de empacotamento do leito.

A densidade de empacotamento decresceu linearmente com o teor de umidade. A remoção de umidade foi acompanhada por um aumento significativo da porosidade do leito, em torno de 66% e 45%, para sementes com e sem mucilagem, respectivamente.

Em razão do grande aumento da porosidade do leito, a superfície específica de secagem decresceu através de uma relação quadrática com o teor de umidade, apresentando uma variação de aproximadamente 65% para os dois tipos de estruturas de partículas.

Os leitos espessos formados por sementes, com e sem mucilagem, apresentaram comportamentos de secagem diferentes. Apesar de uma resposta mais rápida à transferência de calor, a taxa de secagem das sementes com mucilagem numa mesma altura ao longo do leito, foi menor que aquela das sementes sem mucilagem.

A contração de volume do meio poroso foi significativa, cerca de 30% para as sementes com mucilagem e, em torno de 12% para as sementes sem mucilagem.

Os resultados experimentais obtidos mostraram a necessidade da inclusão de equações de encolhimento e de propriedades físicas em função do teor de umidade na modelagem e simulação da secagem em leito fixo e camada espessa das sementes de papaya, com e sem mucilagem, a fim de se obter uma representação física adequada do processo.

A análise da secagem em leito fixo de sementes de papaya com base no modelo a duas fases corroborou a importância do encolhimento do leito para uma interpretação mais precisa dos fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos na secagem de partículas com alto teor de umidade. Uma melhor predição dos perfis de temperatura e umidade foi obtida quando o fenômeno foi incorporado no modelo.

A avaliação das correlações para o coeficiente de transferência de calor mostrou que a correlação de **GEANKOPLIS (1993)** foi a mais adequada para uma melhor reprodução dos dados experimentais de temperatura.

O estudo realizado possibilitou uma melhor compreensão dos fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos na secagem em leito fixo de partículas susceptíveis ao encolhimento. O modelo desenvolvido mostrou-se promissor para a predição das variáveis do processo de secagem, devendo ser testado em estudos correlatos.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se:

- o estudo da secagem de sementes de papaya em leitos com maiores espessuras e com maior diâmetro, a fim de analisar a condensação do vapor d'água contido no fluido de secagem sobre o produto e o transporte bidimensional de calor e massa;
- estudo da resistência ao escoamento do ar em leitos particulados constituídos por estas sementes que apresentam um grande aumento de porosidade associado ao encolhimento;
- avaliação da melhoria da eficiência energética na secagem em leito fixo de materiais particulados com encolhimento, e
- a utilização de outros tipos de sementes com mucilagem e de diferentes formas, a fim de avaliar a validade da metodologia utilizada para a investigação do encolhimento e da transferência de calor e massa em leito fixo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, T.** “Particle Size Measurement”, Chapman & Hall, 5ª edição, vol. 2, 251 p., 1997.
- ALMEIDA, B.V.** “Determinação de propriedades físicas de amêndoas de cacau (*Theobroma cacao L.*)”, Dissertação de Mestrado, UFV, Viçosa, MG, 70 p., 1979.
- ALVARENGA, L.R.** Propagação do mamoeiro. *Informe Agropecuário*, 12(134), pp. 18-24, 1986.
- ANDREOLI, C. e KHAN, A. A.** “Improving papaya seedling emergence by matriconditioning and gibberellin treatment”, *Hortscience*, 28, pp. 708-709, 1993.
- ARNOSTI JÚNIOR, S.** “Desenvolvimento de um Secador Transportador do Tipo Esteira com Escoamento Cruzado e Caracterização de Sementes de Gramíneas”; Tese de Doutorado, PPG-EQ/UFSCAR, 95 p., 1997.
- ARNOSTI JR., S., FREIRE, J. T. E SARTORI, D. J. M.** “Analysis of shrinkage phenomenon in *Brachiaria brizantha* seeds”, *Drying Technology*, 18 (6), pp. 1339-1348, 2000.
- AVIARA, N.A., GWANDZANG, M.I., HAQUE, M.A.** “Physical properties of guna seeds”, *J. Agric. Eng. Res.*, 73, pp. 105-111, 1999.
- BAKKER-ARKEMA, F.W., LEREW, L.E., DE BOER, S.F., ROTH, N.G.** “Simultaneous heat and mass transfer during the cooling of a deep bed of biological products under varying inlet air conditions”, *J. Agric. Eng. Res.*, 12, pp.297-307, 1967.

- BARROZO, M. A. S.** "Transferência de Calor e Massa entre o Ar e Sementes de Soja em leito Deslizante e Escoamentos Cruzados"; Tese de Doutorado, PPG-EQ/UFSCAR, 163 p., 1995.
- BARYEH, E.A.** "Physical properties of bambara groundnuts", J. Food Eng., 47, pp. 321-326, 2001.
- BOYCE, D.S.** "Grain moisture and temperature changes with position and time during through drying", J. Agric. Eng. Res., 10, pp.333-341, 1965.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W.** Drying of cereal grains. Inc. Westport, CN, The AVI Publishing Co., 265 p., 1974.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W.** Drying and storage of grains and oilseeds. An AVI Book published by Van Nostran Reinhold, New York, 450 p., 1992.
- CALÇADA, L.A.** "Modelagem e simulação de secadores em leito fixo", Dissertação de M.Sc., PEQ/COPPE/UFRJ, RJ, 1994.
- CALÇADA, L.A., BISCAIA Jr., E.C., MASSARANI, G.** "Secagem de material particulado: Modelo a três fases", Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Uberlândia, MG, vol.2, pp.181-184, 1996.
- CENKOWSKI, S., JAYAS, D. S., PABIS, S.** "Deep-bed grain drying – A review of particular theories", Drying Technology, 11 (7), pp. 1553-1581, 1993.
- CHAKRABARTY, S.M., JOHNSON, W.H.** "Specific heat of flue cured tobacco by Differential Scanning Calorimetry", Transactions of the ASAE, 15 (5), pp. 928-931, 1972.

- CHANDRASEKAR, V., VISVANATHAN, R.** “Physical and thermal properties of coffee”. *J. Agric. Eng. Res.*, 73, pp.227-234, 1999.
- CHANG, S.** “Measuring density and porosity of grain kernels using a gas pycnometer”, *Cereal Chemistry*, 65 (1), pp.13-15, 1988.
- CHEN, C. S. e CLAYTON, J. T.** “The Effect of Temperature on Sorption Isotherms of Biological Materials”; *Transactions of the ASAE*, pp. 927-929, 1971.
- CHOW, Y. J. e LIN, C. H.** “Para-hydroxybenzoic acid as the major phenolic germination inhibitor of papaya seed”, *Seed Science & Technology*, 19, 167-174, 1991.
- CHUNG, D. S. e PFOST, H. B.** “Adsorption and Desorption of Water Vapour by Cereal Grains and their Products”, *Transactions of the ASAE*, pp 549-551, 1967.
- COSTA, V.A.F, FIGUEIREDO, R.A.** “The mixing cells model applied to a fixed bed dryer”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 68, pp. 876-880, 1990.
- ÇARMAN, K.** “Some physical properties of lentil seeds”, *J. Agric. Eng. Res.*, 63, pp. 87-92, 1996.
- DAY, C.L.** “Device for measurement voids in porous materials”, *Agricultural Engineering*, 45 (1), pp. 36-37, 1964.
- DESHPANDE, S.D., BAL, S., OJHA, T.P.** “Physical properties of soybeans”, *J. Agric. Eng. Res.*, 56, pp.89-98, 1993.

DUTTA, S.K., NEMA, V.K., BHARDWAJ, R.K. “Physical properties of gram”, J. Agric. Eng. Res., 39, pp.259-268, 1988.

FOUST, A.S., WENZEL, L.A., CLUMP, C.W., MAUS, L., ANDERSEN, L.B. “Princípios das Operações Unitárias”, 2nd ed., Ed. Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, RJ, 1982.

GEANKPOLIS, C. J. Transport Processes and Unit Operations. Rio de Janeiro: Ed. Prentice-Hall do Brasil Ltda, 1993.

GINER, S.A., MASCHERONI, R.H., NELLIST, M.E. “Cross-flow drying of wheat: a simulation program with a diffusion-based deep-bed model and kinetic equation for viability loss estimation”, Drying Technology, 14 (10), pp. 2255-2292, 1996.

GORLING, P. “Physical phenomena during the drying of foodstuffs”, In: Proc. 1958 Conf. on fundamental aspects of dehydration in foodstuffs”, Soc. Chem. Ind., pp.42-53, 1958.

GUPTA, R.K., PRAKASH, S. “The effect of seed moisture on the physical properties of JSF-1 safflower”, J. of Oilseeds Res., 9, pp.209-216, 1992.

GUPTA, R.K., DAS, S.K. “Physical properties of sunflower seeds”, J. Agric. Eng. Res., 66, pp.1-8, 1997.

GUTTERMAN, Y. AND SHEM-TOV, S. “Mucilaginous seed coat structure of *Carrichtera annua* and *Anastatica hierochuntica* from the Negev Desert highlands of Israel, and its adhesion to the soil crust”. Journal of Arid Environment, v. 35, p. 695-705, 1997.

HENDERSON, S. M. “A Basic Concept of Equilibrium Moisture”; Agricultural Engeneering, pp 29-32, 1952.

HSU, M.H., MANNAPPERUMA, J.D., SINGH, R.P. “Physical and thermal properties of pistachios”, J. Agric. Eng. Res., 49 (4), pp.311-321, 1991.

JAIN, R.K., BAL, S. “Physical properties of pearl millet”, J. Agric. Eng. Res., 66, pp. 85-91, 1997.

JAYAS, D.S., SOKHANSANJ, S., WHITE, N.D.G. “Bulk density and porosity of two canola species”, Trans. ASAE, 32(1), pp. 291-294, 1989.

JOSHI, D.C., DAS, S.K., MUKHERJI, R.K. “Physical properties of pumpkin seeds”, J. Agric. Eng. Res., 54, pp.219-229, 1993.

KHANDKER, M.H.K., WOODS, J.L. “The heat transfer coefficient transfer in grain beds”, Agricultural Mechanisation in Asia, Africa and Latin America, 18 (4), pp. 39-44, 1987.

KARATHANOS, V.T., VILLALOBOS, G., SARAVACOS, G.D. "Comparison of two methods of estimation of effective diffusivity from drying data ", Journal of Food Science, 55 (1), pp. 218-223, 1990.

KARATHANOS, V.T., SARAVACOS, G.D. "Porosity and pore size distribution of starch materials "; Journal of Food Engineering, 18, pp. 259-280, 1993.

KARATHANOS, V.T., KANELLOPOULOS, N.K., BELESSIOTIS, V.G. "Development of porous structure during air drying of agricultural plant products"; Journal of Food Engineering, 29, pp. 167-183, 1996.

KEEY, R. B. “Drying of Loose and Particulate Materials”; Hemisphere Publishing Corporation, 1^a edição, 504 p., 1992.

- KILPATRICK, P.W., LOWE, E., VAN ARSDEL, W.B.** “Tunnel dehydrators for fruit and vegetables”, In: *Advances in Food Research*, Van Arsdel, W.B.(ed), vol. 6, Academic Press, New York, pp. 313-372, 1955.
- LANG, W., SOKHANSANJ, S., SOSULSKI, F.W.** “Comparative drying experiments with instantaneous shrinkage measurements for wheat and canola”, *Canadian Agricultural Engineering*, 35(2), pp. 127-132, 1993.
- LEWIS, W. K.** “The Rate of Drying of Solids Materials”. In: The Symposium on Drying, The Journal of I. & E. Ch. 13(5) pp.427-432, 1921.
- LOEB, A.M., SCHEISSER, W.E.** “Stiffness and accuracy in the method of lines integration of partial differential equations”, *International Symposium on Stiff Differential Systems*, edited by Willoughby, R.A., Plenum Press, pp. 229-243, 1974.
- LÓPEZ, A., PIQUÉ, M. T., ROMERO, A.** “Simulation of deep bed drying of hazelnuts”, *Drying Technology*, 16 (3-5), pp. 651-665, 1998.
- LÓPEZ, A., VÍRSEDA, P., MARTÍNEZ, G.** “Deep layer malt drying modelling”, *Drying Technology*, 15 (5), pp. 1499-1526, 1997.
- LOZANO, J.E., ROTSTEIN, E., URBICAIN, M.J.** “Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents”, *Journal of Food Science*, 48, pp. 1497-1502, 1983.
- LUCCAS, P., FERREIRA, M. M. P., SARTORI, D .J. M., FREIRE, J. T.** “Determinação de Parâmetros térmicos de gramíneas”, In: *Proceedings of the 9th Latin American Congress in Heat and Mass Transfer*, San Juan, Puerto Rico, pp. 316-325, 2002.

- MADAMBA, P.S., DRISCOLL, R.H., BUCKLE, K.A.** “Shrinkage, density and porosity of garlic during drying”, *Journal of Food Engineering*, 23, pp. 309-319, 1993.
- MANCINI, M.C.** “Transferência de massa em secadores de grãos”, Tese de D.Sc., PEQ/COPPE/UFRJ, RJ, 1996.
- MANDAS, N., HABTE, M.** “Numerical simulation static-bed drying of barley”, *Biosystems Engineering*, 82 (3), pp.313-319, 2002.
- MARINELLI, A.Z., PRADO, M.M., SARTORI, D.J.M.** “Análise da difusividade de massa efetiva na mucilagem de sementes”. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), 14, 2002, Natal, RN. Anais do XIV COBEQ. Natal: UFRN, Associação Brasileira de Engenharia Química, 2002, CD-ROM, Artigo 374.
- MAROUSIS, S.N. e SARAVACOS, G.D.** “Density and porosity in drying starch materials”, *J. Food Sci.*, 55(5), pp. 1367-1372, 1990.
- MARTINS, M.G., MARQUES, W..M., MANCINI, M.C.** “Secagem de feijão em leito fixo III”, *Anais do XXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, São Carlos, SP, pp. 555-560, 1997.
- MASSARANI, G. e SILVA TELLES, A. C. S.** “Aspectos da secagem de material sólido particulado”. In: *Tópicos Especiais de Secagem*. J. T. Freire e D. J. M. Sartori (eds.), São Carlos, SP, pp. 2-39, 1992.
- MAY, B. K., PERRÉ, P.** “The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs”, *Journal of Food Engineering*, 54, pp.271-282, 2002.

- McMINN, W. A. M, MAGEE, T .R. A.** “Principles, methods and applications of the convective drying of foodstuffs”, *Trans IchemE*, v. 77, Part C, pp. 175-193, 1999.
- MOHSENIN, N. N.** "Thermal properties of foods and agricultural materials"; 2nd ed., New York, pp.100-104, 1980.
- MUJUMDAR, A. S.** “Handbook of Industrial Drying”, Marcell Dekker, 2^a ed., vol. 1, 1995.
- MURATA, S., TAGAWA, A., ISHIBASHI, S.** “The effect of moisture content and temperature on specific heat of cereal grains measured by DSC”, *Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery*, 46 (6), pp. 547-554, 1987.
- OJE, K.** “Moisture dependence of some physical properties of cowpea”, *Ife Journal of Technology*, 4 (2), pp. 23-27, 1994.
- OSBORN, G. S.; WHITE, G. M.; SULAIMAN, A. H. e WALTON, L. R.** “Predicting Equilibrium Moisture Properties of Soybeans”, Transactions of the ASAE, 32(6), pp. 2109-2114, 1989.
- OURIQUE, C. O., HUZIWARA, W. K., BISCAIA Jr., E. C.** “Abordagem algébrico-diferencial de secadores em leito fixo”, *Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maringá, Pr*, vol.2, pp.331-339, 1995.
- PAGANO, A. M., CROZZA, D. E.** “Prediction of bulk density and bed porosity from data of bed depth and moisture content for two oilseeds”, *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, CD-ROM, Águas de São Pedro, SP*, 2000.

- PAGE, C.** “Factors Influencing the Maximum Rate of Drying Shelled Corn in Layers”; M.S. Thesis, Purdue University, 1949.
- PARRY, J. L.** “Mathematical modelling and computer simulation in agricultural grain drying – A review”, *J. Agric, Eng. Res.*, 32, pp.1-29, 1985.
- PEDROZA, J. P., DE MORAES NETO, J. M., DA SILVA, M. G., DA MOTA ROCHA, L. E.** "Determinação do calor específico de sementes de urucum (*Bixa Orellana L.*) em função do teor de umidade", In: XXII CONBEA, Campinas, 1993. *Anais do XXII CONBEA*, v.2, pp. 1101-1108, 1993.
- PETZOLD, L. R.** “DASSL: A differential algebraic system solver”, Computer and Mathematical Research Division, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, USA, 1989.
- PRADO, M. M.** “Secagem de sementes de mamão papaya”, Dissertação de Mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos-SP, 108 p., 1999.
- RAMAKRISHNA, P.** “Melon seeds: evaluation of physical characteristics”, *Journal of Food Science and Technology*, 23 (3), pp. 158-160, 1986.
- RATTI, C.** “Shrinkage during drying of foodstuffs”, *Journal of Food Engineering*, 23, pp. 91-105, 1994.
- RATTI, C., CAPRISTE, G. H.** “Determination of heat transfer coefficients during drying of foodstuffs”, *Journal of Food Process Engineering*, 18, pp. 41-53, 1995.
- RUGGIERO C.** “Propagação do mamoeiro”; In: Simpósio Brasileiro sobre a Cultura do Mamoeiro, 1^o, Jaboticabal, Anais, pp. 79-87, 6 a 11 de janeiro, 1980.

- SARTORI, D. J .M.** “Transferência de calor em leito deslizante”, Tese de Doutorado, PEQ/COPPE/UFRJ, RJ, 1986.
- SILVA TELLES, A .C. S. e MASSARANI, G.** “Sistemas particulados a duas fases multicomponentes”. In: XIX Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas, 1991. **Anais...** Campinas: UNICAMP, p. 91-101, 1991.
- SINGH, K. K., GOSWAMI, T. K.** “Physical properties of cumin seed”, J. Agric. Eng. Res., 64, pp.93-98, 1996.
- SINGH, K.K., GOSWAMI, T.K.** “Thermal properties of cumin seed”, Journal of Food Engineering”, 45, pp. 181-187, 2000.
- SHARMA, D.K., THOMPSON, T.L.** “Specific heat and thermal conductivity of sorghum”, Transactions of the ASAE, 16 (1), pp.-114-117, 1973.
- SHISHIDO, I., SUZUKI, M., OHTANI, S.** “On the drying mechanism of shrinkage materials”, Proceedings of the III World Congress of Chemical Engineering, Tokyo, 1986.
- SILVA, O.C.** “Estudo Preliminar da Secagem do Polietileno Tereftalato para Fins de Reciclagem”; Dissertação de Mestrado, PPG-EQ/UFSCAR, 74 p., 1997.
- SOGAB, M. N.** Curso de Controle de Poluição Atmosférica. CETESB – São Paulo – SP. 13 p., 1987.
- SOKHANSANJ, S., LANG, W.** “Prediction of kernel and bulk volume of wheat and canola during adsorption and desorption”, J. Agric. Eng. Res., 63, pp.129-136, 1996

- STRUMILLO, C., KUDRA, T.** Drying: Principles, Applications and Design. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1986.
- SUN, D. W. E WOODS, J. L.** "Simulation of the heat and moisture transfer process during drying in deep Grain beds", Drying Technology, 15 (10), pp. 2479-2508, 1997.
- SUTHAR, S.H., DAS, S.K.** "Some physical properties of karingda [*Citrullus lanatus* (Thumb) Mansf] seeds", J. Agric. Eng. Res., 65, pp.15-22, 1996.
- SUZUKI, K., KUBOTA, K. HASEGAWA, T., HOSAKA, H.** "Shrinkage in dehydration of root vegetables", J. Food Sci., 41, pp. 1189-1193, 1976.
- SWEAT, V.E.** "Thermal properties of foods", In: Engineering Properties of Foods, Ch. 2, ed. M.A. Rao & S.S.H. Rizhvi, Marcel Dekker, New York, pp. 49-87, 1986.
- TANG, C.S., OKAZAKI, E.N., ISHIZAKI, S.M.** "Composition of papaya seeds", Journal of Food Science, 43, pp. 255-256, 1978.
- TANG, J., SOKHANSANJ, S., YANNAKOPOULOS, Y., KASAP, S.O.** "Specific heat capacity of lentil seeds by Differential Scanning Calorimetry", Transactions of the ASAE, 34 (2), pp.517-522, 1991.
- TANG, J., SOKHANSANJ, S.** "Geometric changes in lentil seeds caused by drying", J. Agric. Eng. Res., 56, pp.313-326, 1993
- THAKOR, N.J., SOKHANSANJ, S., SOSULSKI, F.W., YANNAKOPOULOS, S.** "Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying"; Journal of Food Engineering, 40, pp. 153-160, 1999.

- THOMPSON, T.L., PEART, R.M., FOSTER, G.H.** “Mathematical simulation of corn drying – A new model”, *Transaction of the A.S.A.E.*, 11(4), pp. 582-586, 1968.
- TOWNER, G.D.** “The Tensile stress generated in clay through drying”, *J. Agric. Eng. Res.*, 37, p.279, 1987.
- TRUESDELL, C.** “Sulle basi della Termodinâmica”, (1957); citado por **MASSARANI, G. e SILVA TELLES, A. C. S.** “Aspectos da secagem de material sólido particulado”. In: ...Tópicos Especiais de Secagem. J. T. Freire e D. J. M. Sartori (eds.), São Carlos, SP, pp. 2-39, 1992.
- VAN MEEL, D. A.** “Adiabatic Convection Batch Drying with Recirculation of Air”, *Chemical Engineering Science*, vol.9, pp. 36-44, 1958.
- VIEIRA, R.C.** “Métodos diretos de iniciação de sistemas algébrico-diferenciais”, Tese de D.Sc., PEQ/COPPE/UFRJ, RJ, 1998.
- VISVANATHAN, R., VARADHARAJU, N., GOTHANDAPANI, L., SHEENARAYANAN, V.V.** Effect of moisture content on angle of repose and bulk density of selected food grains. *J. Food Sci. and Tech.*, 27(3), pp.133-136., 1990.
- VISVANATHAN, R., PALANISAMY, L., GOTHANDAPANI, L., SHEENARAYANAN, V.V.** “Physical properties of neem nut”, *J. Agric. Eng. Res.*, 63, pp.19-26, 1996.
- WANG, N. e BRENNAN, J.G.** “Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration”; *J. Food Eng.*, 24, pp. 61-76. 1995.
- WELTY, J.R., WICKS, C.E., WILSON, R.E.** “Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer”, 3rd Ed., John Wiley & Sons, New York, 1984.

WHITAKER, S. “Forced Convection Heat Transfer for Flow in Past Flat Plates, Single Cylinders, and for Flow in Packed Bed and Tube Bundles”, *AIChE J.*, Vol. 8, pp.361-371, 1972.

ZINK, F.J “Specific gravity and air space of grain and seeds”, *Agricultural Engineering*, 16, p.439, 1935.

ZOGZAS, M.K., MAROULIS, Z.B., MARINOS-KOURIS “Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying”; *Drying Technology*,12(7), pp.1653-1666, 1994.

ZOTIN, F.M.Z. “O efeito de parede em colunas de recheio”, Dissertação de Mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos-SP, 85 p., 1985.

ANEXO A

DADOS EXPERIMENTAIS RELATIVOS À SECAGEM EM LEITO FIXO E CAMADA ESPessa

Tabela A.1 – Dados experimentais de distribuição de temperatura ao longo do leito em função do tempo de secagem de sementes com mucilagem. Experimento 01.

Experimento 01			
Condições: $v_{sup}=0,5$ m/s; $T_{g0}=50^{\circ}\text{C}$, UR=12,2%			
$X_0=4,17$ (b.s), $T_{s0} = 25^{\circ}\text{C}$			
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			
t(min)	1,0 cm	2,5 cm	4,0 cm
0	25,0	25,0	25,0
1	26,8	22,0	22,3
2	33,5	24,0	23,5
3	39,8	28,0	26,5
4	44,0	32,2	30,0
5	46,2	36,3	34,3
6	47,2	39,8	37,8
7	48,0	42,2	40,2
8	48,2	44,0	42,0
9	48,2	45,0	43,5
10	48,5	45,8	44,3
11	48,5	46,0	44,5
12	48,5	46,2	44,8
13	48,8	46,5	45,0
17	48,8	46,8	45,2
20	48,8	46,8	45,5
30	48,8	46,8	45,5

Tabela A.2 – Dados experimentais de distribuição de temperatura ao longo do leito em função do tempo de secagem de sementes sem mucilagem. Experimento 02.

Experimento 02			
Condições: $v_{sup}=0,5$ m/s; $T_{g0}=50,8^{\circ}\text{C}$, UR=11,5%			
$X_0=2,5$ (b.s), $T_{s0} = 22,8^{\circ}\text{C}$			
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			
t(min)	1,0 cm	2,5 cm	4,0 cm
0	22,8	22,8	22,8
1	29,0	24,0	23,5
2	30,0	24,8	24,2
3	30,8	24,8	24,2
6	32,5	25,0	24,2
10	35,5	25,2	24,2
12	37,8	25,5	24,2
15	40,2	26,2	24,2
18	42,8	27,2	24,2
21	45,5	28,5	24,5
24	47,5	30,0	24,5
27	48,5	32,0	24,8
30	49,0	34,0	25,0
35	49,5	36,8	26,0
40	49,5	39,8	28,0
50	49,5	44,5	34,2
55	49,5	45,5	37,0
70	49,5	47,0	44,5
75	49,8	48,0	46,0
80	50,0	48,2	46,0
90	50,0	48,5	47,2
95	50,0	48,5	47,2

Tabela A.3 – Dados experimentais de distribuição de temperatura ao longo do leito em função do tempo de secagem de sementes sem mucilagem. Experimento 03.

Experimento 03			
Condições: $v_{sup}=0,5$ m/s; $T_{g0}=50^{\circ}\text{C}$, UR=15,2%			
$X_0=2,61$ (b.s), $T_{s0} = 22,5^{\circ}\text{C}$			
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			
t(min)	1,0 cm	3,0 cm	5,0 cm
0	22,5	22,5	22,5
1	31,5	23,3	23,0
2	35,0	23,3	23,0
3	37,8	23,3	23,0
4	40,5	23,5	23,0
5	42,6	23,8	23,3
6	44,5	23,8	23,3
7	46,1	24,0	23,3
8	47,5	24,5	23,3
9	48,5	24,7	23,5
10	49,0	25,5	23,5
11	49,7	26,5	23,8
12	50,0	27,7	24,0
13	50,2	29,4	24,3
14	50,2	31,5	24,7
15	50,2	33,3	25,2
16	50,2	35,7	25,7
17	50,2	37,8	26,2
18	50,2	40,0	27,0
19	50,2	41,7	27,9
20	50,2	42,8	28,9
21	50,2	44,3	30,1
22	50,2	45,7	31,5
23	50,2	46,6	33,0
24	50,2	47,3	34,7
25	50,2	47,8	36,6
30	50,2	49,0	45,0
35	50,2	49,4	48,7
40	50,2	49,7	49,4
45	50,2	50,0	49,7
50	50,2	50,0	49,7

Tabela A.4 – Dados experimentais de distribuição de temperatura ao longo do leito em função do tempo de secagem de sementes sem mucilagem. Experimento 04.

Experimento 04			
Condições: $v_{sup}=0,5$ m/s; $T_{g0}=41,0^{\circ}\text{C}$, $UR=28,4\%$			
$X_0=2,44$ (b.s), $T_{s0} = 21,4^{\circ}\text{C}$			
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			
t(min)	1,0 cm	3,0 cm	5,0 cm
0	21,4	21,4	21,4
1	21,1	21,1	20,6
2	21,3	21,1	20,8
3	21,7	21,1	20,8
5	22,2	21,1	20,8
10	23,0	21,1	20,8
15	26,2	21,1	20,8
17	27,7	21,1	20,8
20	29,9	21,1	20,8
25	33,5	21,3	20,8
30	36,6	22,2	20,8
32	37,8	22,6	20,8
34	38,8	22,8	20,8
36	39,3	23,3	20,8
38	39,8	23,8	21,1
40	40,2	24,3	21,1
42	40,5	25,0	21,1
44	40,5	25,7	21,1
46	40,5	26,5	21,3
48	40,5	27,3	21,3
50	40,5	28,2	21,7
52	40,5	29,2	21,7
54	40,5	30,4	21,9
56	40,7	31,1	21,9
58	40,7	31,8	22,2
60	40,7	32,8	22,4
62	40,7	33,8	22,6
64	40,7	34,5	22,8
66	41,0	35,2	23,0
68	41,0	35,7	23,3
70	41,0	36,4	23,5
73	41,0	37,1	24
76	41,0	38,1	24,5
78	41,0	38,6	24,7

Continuação da Tabela A.4			
80	41,0	38,8	25,2
82	41,0	39,0	25,7
84	41,0	39,3	26,5
86	41,0	39,5	27,3
88	41,0	39,8	27,9
90	41,0	40,0	28,7
92	41,0	40,0	29,4
94	41,0	40,0	30,1
96	41,0	40,0	30,9
98	41,0	40,0	31,8
100	41,0	40,0	32,6
102	41,0	40,0	33,5
104	41,0	40,0	34,2
106	41,0	40,0	35,0
108	41,0	40,0	35,7
110	41,0	40,0	36,4
112	41,0	40,0	36,9
114	41,0	40,0	37,6
116	41,0	40,0	38,1
120	41,0	40,0	38,6
125	41,0	40,0	39,0
130	41,0	40,0	39,3
140	41,0	40,2	39,5
150	41,0	40,2	39,8
160	41,0	40,2	39,8
170	41,0	40,2	39,8

Tabela A.5 – Dados experimentais de distribuição de umidade do sólido ao longo do leito parametrizados no tempo em que foi realizada a estratificação do leito. Experimento 05.

Experimento 05										
Condições: $v_{sup}=0,5$ m/s; $T_{g0}=32,0^{\circ}\text{C}$, $UR=46,4\%$										
$X_0=3,109$ (b.s), $T_{s0} = 20,4^{\circ}\text{C}$, $X_{eq} = 0,068$ b.s.										
	t = 20 min		t = 50 min		t = 80 min		t = 110 min		t = 180 min	
z (cm)	X(b.s)	XR	X(b.s)	XR	X(b.s)	XR	X(b.s)	XR	X(b.s)	XR
1	1,935	0,613	2,345	0,748	2,449	0,783	2,495	0,798	2,507	0,802
2	0,418	0,114	0,654	0,191	1,462	0,457	2,163	0,688	2,434	0,778
3	0,273	0,066	0,289	0,071	0,395	0,106	0,748	0,222	1,388	0,433
4	0,224	0,050	0,247	0,057	0,271	0,065	0,315	0,080	0,686	0,202
5	0,220	0,048	0,218	0,048	0,211	0,045	0,287	0,070	0,200	0,042

Tabela A.6 – Dados experimentais de distribuição de umidade do sólido ao longo do leito parametrizados no tempo em que foi realizada a estratificação do leito. Experimento 06.

Experimento 06										
Condições: $v_{sup}=1,5$ m/s; $T_{g0}=32,0^{\circ}\text{C}$, $UR=40,3\%$										
$X_0=2,710$ (b.s), $T_{s0} = 20,0^{\circ}\text{C}$, $X_{eq} = 0,064$ b.s.										
	t = 5 min		t = 12 min		t = 22 min		t = 35 min		t = 60 min	
z (cm)	X(b.s)	XR	X(b.s)	XR	X(b.s)	XR	X(b.s)	XR	X(b.s)	XR
1	1,673	0,607	2,407	0,885	2,691	0,993	2,685	0,990	2,689	0,992
2	0,702	0,240	1,170	0,417	2,132	0,781	2,608	0,961	2,653	0,978
3	0,555	0,184	0,611	0,206	0,901	0,315	1,746	0,635	2,531	0,932
4	0,400	0,126	0,428	0,136	0,407	0,128	0,454	0,146	0,724	0,248
5	0,357	0,109	0,360	0,111	0,344	0,104	0,358	0,110	0,428	0,136

Tabela A.7 – Dados experimentais de distribuição de umidade do sólido ao longo do leito parametrizados no tempo em que foi realizada a estratificação do leito. Experimento 07.

Experimento 07										
Condições: $v_{sup}=0,5$ m/s; $T_{g0}=41,0^{\circ}\text{C}$, $UR=30,2\%$										
$X_0=3,667$ (b.s), $T_{s0} = 22,5^{\circ}\text{C}$, $X_{eq} = 0,053$ b.s.										
	t = 5 min		t = 12 min		t = 22 min		t = 35 min		t = 60 min	
z (cm)	X(b.s)	XR	X(b.s)	XR	X(b.s)	XR	X(b.s)	XR	X(b.s)	XR
1	3,667	1,000	3,667	1,000	3,667	1,000	3,667	1,000	3,667	1,000
2	2,638	0,715	3,068	0,834	3,260	0,887	3,198	0,870	3,260	0,887
3	1,524	0,407	2,135	0,576	2,995	0,814	3,222	0,877	3,267	0,889
4	0,465	0,113	0,834	0,216	2,015	0,542	2,922	0,794	2,869	0,779
5	0,427	0,103	0,459	0,112	0,702	0,179	1,501	0,400	2,310	0,624

Tabela A.8 – Dados experimentais de teor de umidade médio do sólido no leito em função do tempo de secagem, para sementes com mucilagem. Experimento 08.

Experimento 08		
Condições: $v_{sup}=0,5$ m/s; $T_{g0}=50,0^{\circ}\text{C}$, UR=13,9%		
$X_0=4,21$ (b.s), $T_{s0} = 20,0^{\circ}\text{C}$, $X_{eq} = 0,041$ b.s.		
t(h)	X (b.s)	XR
0	4,210	1,000
1,25	3,618	0,858
2,5	3,131	0,741
2,75	3,027	0,716
3	2,932	0,693
3,5	2,727	0,644
4,5	2,308	0,544
5	2,097	0,493
5,5	1,885	0,442
6	1,680	0,393
7,5	1,123	0,260
8,2	0,887	0,203
8,5	0,803	0,183
9	0,676	0,152
10	0,448	0,098
11	0,289	0,059
12	0,173	0,032
13	0,107	0,016
15	0,052	0,003
19	0,035	0,001
20	0,033	0,001

Tabela A.9 – Dados experimentais de teor de umidade médio do sólido num leito de 5 cm em função do tempo de secagem, para sementes sem mucilagem. Experimento 09.

Experimento 09		
Condições: $v_{sup}=1,5$ m/s; $T_{g0}=41,0^{\circ}\text{C}$, UR=25,8%		
$X_0=3,219$ (b.s), $T_{s0} = 19,3^{\circ}\text{C}$, $X_{eq} = 0,0526$ b.s.		
t(min)	X(b.s)	XR
0	3,219	1,000
2	2,940	0,912
4	2,777	0,860
6,5	2,554	0,790
8	2,435	0,752
10	2,292	0,707
12	2,110	0,650
14	1,948	0,598
16	1,790	0,549
18	1,630	0,498
20	1,473	0,449
22	1,327	0,403
24	1,188	0,359
26	1,061	0,319
28	0,947	0,282
30	0,843	0,249
35	0,620	0,179
40	0,489	0,138
45	0,403	0,111
50	0,342	0,091
55	0,293	0,076
60	0,258	0,065
70	0,222	0,053
80	0,201	0,047
90	0,183	0,041
120	0,145	0,029
150	0,120	0,021
180	0,106	0,017
210	0,095	0,014
240	0,087	0,011
270	0,080	0,009
300	0,074	0,007
330	0,071	0,006

Tabela A.10: Resultados experimentais e simulados de umidade das sementes sem mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,013\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 1,0\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 22^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 2,9\text{ b.s.}$

t = 30 min				t = 120 min			
z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)	z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)
0,010	1,50	1,38	8,02	0,010	0,15	0,17	14,3
0,030	1,58	1,60	1,27	0,030	0,18	0,20	11,1
0,049	2,60	2,46	5,38	0,045	0,38	0,33	13,2
DVM = 4,89 %				DVM = 12,9%			

Tabela A.11: Resultados experimentais e simulados de umidade das sementes sem mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 41\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,0111\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 1,0\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 20^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 3,0\text{ b.s.}$

t = 60 min				t = 120 min			
z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)	z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)
0,010	0,42	0,45	7,15	0,010	0,08	0,09	12,5
0,030	0,53	0,49	7,55	0,030	0,13	0,11	15,4
0,049	0,75	0,69	8,0	0,045	0,15	0,13	13,3
DVM = 7,56%				DVM = 13,7%			

Tabela A.12: Resultados experimentais e simulados de umidade das sementes com mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 41\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,0115\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 0,5\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 20^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 4,33\text{ b.s.}$

t = 5 h				t = 10 h			
z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)	z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)
0,010	3,35	3,21	4,18	0,010	2,16	2,06	4,62
0,030	3,69	3,58	2,98	0,030	2,65	2,74	3,28
0,048	3,91	3,76	3,84	0,043	2,90	3,01	3,79
DVM = 3,67%				DVM = 3,90%			

Tabela A.13: Resultados experimentais e simulados de umidade das sementes com mucilagem ao longo do leito, durante a secagem realizada com $T_{g0} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Y_{g0} = 0,012\text{ kg/kg}$ e $v_{g0} = 1,5\text{ m/s}$. Condições iniciais do sólido, $T_s = 19^{\circ}\text{C}$ e $X_0 = 4,11\text{ b.s.}$

t = 5 h				t = 10 h			
z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)	z (m)	X_{exp} (b.s.)	X_{sim} (b.s.)	DV (%)
0,010	0,77	0,86	11,69	0,010	0,085	0,077	9,41
0,030	1,55	1,67	7,74	0,030	0,13	0,12	7,69
0,040	1,89	2,03	7,4	0,034	0,16	0,14	18,8
DVM = 8,95%				DVM = 11,91%			

ANEXO B

PARÂMETROS E EQUAÇÕES AUXILIARES

UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO

EM LEITO FIXO

- **Massa específica do ar (ρ_g)**

$$\rho_g = P_{\text{atm}} \cdot M_g / R_g \cdot (T + 273), \text{ kg/m}^3 \quad (\text{B.1})$$

- **Calores específicos do ar (C_{p_g}), do vapor d'água (C_{p_v}) e da água líquida (C_{p_w})**

$$C_{p_g} = 1005 \text{ J/(kg } ^\circ\text{C)}; C_{p_v} = 1883 \text{ J/(kg } ^\circ\text{C)}; C_{p_w} = 4187 \text{ J/(kg } ^\circ\text{C)}$$

- **Calor específico do sólido (C_{p_s})**

O calor específico do sólido foi considerado como uma propriedade física constante para a faixa de temperatura trabalhada. Os valores utilizados nas simulações para as sementes com e sem mucilagem foram respectivamente iguais a:

$$C_{p_s} = 1100 \text{ J/(kg } ^\circ\text{C)} \text{ e } C_{p_s} = 1300 \text{ J/(kg } ^\circ\text{C)}$$

- **Pressão de vapor na saturação (P_{sat})**

$$P_{\text{sat}} = \exp\left(54,119 - 6547,1/(T_g + 273) - 4,23 \ln(T_g + 273)\right), \text{ Pa} \quad (\text{B.2})$$

- **Pressão parcial de vapor no ar úmido (P_v)**

$$P_v = P_{\text{atm}} \left[Y_g / (0,622 + Y_g) \right], \text{ Pa} \quad (\text{B.3})$$

onde, P_{atm} local é de 695 mm Hg.

- **Umidade relativa do ar (UR)**

$$\text{UR} = P_v / P_{\text{sat}}, \text{ decimal} \quad (\text{B.4})$$