

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

**SECAGEM DE SEMENTES DE GRAMÍNEAS**  
**(*Brachiaria brizantha*) EM LEITO FLUIDIZADO**

Antonio Carlos Rizzi Júnior

São Carlos – SP

2008

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

**SECAGEM DE SEMENTES DE GRAMÍNEAS**  
**(*Brachiaria brizantha*) EM LEITO FLUIDIZADO**

Antonio Carlos Rizzi Júnior

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química 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. José Teixeira Freire

São Carlos – SP

2008

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

R627ss

Rizzi Júnior, Antonio Carlos.

Secagem de sementes de gramíneas  
(Brachiaria brizantha) em leito fluidizado / Antonio Carlos  
Rizzi Júnior. -- São Carlos : UFSCar, 2009.  
137 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,  
2008.

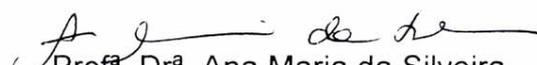
1. Leito fluidizado. 2. Secagem. 3. Calor - transmissão. 4.  
Modelo a três fases. 5. Modelo a duas fases. I. Título.

CDD: 660.28 (20ª)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **ANTONIO CARLOS RIZZI JÚNIOR**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS EM 05 DE DEZEMBRO DE 2008.

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. José Teixeira Freire  
Presidente, PPG-EQ/UFSCar

  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Ana Maria da Silveira  
DEQ/UFSCar

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

  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Meuris Gurgel Carlos da Silva  
UNICAMP

  
Prof. Dr. Nêhemias Curvelo Pereira  
UEM

## **AGRADECIMENTOS**

A minha noiva Juliana, pelo apoio incondicional, compreensão, carinho e auxílio na etapa final deste doutorado.

Aos meus pais e irmãos, por terem apoiado sempre os meus passos de todas as formas.

Ao professor, orientador e amigo José Teixeira Freire, pela grande orientação e simplicidade com que lida com os problemas, pelo exemplo e pelo incentivo.

Aos professores do Centro de Secagem Ana Maria da Silveira, Maria do Carmo Ferreira, Dermeval José Mazzini Sartori e Ronaldo Guimarães Corrêa que, em algum momento, contribuíram para o desenvolvimento e melhoria deste trabalho.

Ao técnico mecânico Oscar da Silva, pela ajuda na construção e na montagem do equipamento.

À professora Maria Laura de Azevedo Passos, pelas valiosas contribuições dadas ao longo do trabalho.

Ao João Francisco de Almeida Vitor, pela cessão gratuita das rotinas computacionais em FORTRAN.

A todos os meus colegas e amigos do DEQ/UFSCar.

A CAPES, pelo suporte financeiro, que viabilizou o desenvolvimento da maior parte deste trabalho.

## RESUMO

A operação de secagem é uma etapa importante do processamento que antecede o armazenamento de sementes, uma vez que com baixos teores de umidade, estas podem reter seu poder de germinação e outras qualidades por longos períodos. O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo da secagem em leito fluidizado em batelada, de sementes de gramíneas (*Brachiaria brizantha*), a fim de se avaliar o desempenho do secador do ponto de vista fisiológico e fenomenológico. Ensaio de fluidodinâmica, de transferência de calor e de secagem foram realizados a fim de se verificar as limitações operacionais do equipamento, assim como determinar os principais parâmetros experimentais característicos das sementes (tais como velocidade de mínima fluidização e coeficientes de transferência). Ademais, dois tipos de modelos foram testados (três fases e duas fases) de modo a comparar a viabilidade de seus empregos. Foram realizadas análises de sensibilidade nos principais parâmetros e propriedades dos modelos objetivando discutir os pontos fortes e fracos dos mesmos. Também se fez comparações experimentais da secagem no equipamento operando como leito fixo e fluidizado. Dentre os principais resultados, verificou-se que o modelo simplificado a duas fases proporcionou melhores previsões dos experimentos de secagem em leito fluidizado, sobretudo a temperatura do leito, do que o modelo a três fases, que leva em conta a existência das fases sólida, gás intersticial e gás bolha. Pela aplicação do teste de hipótese de igualdade entre as variáveis experimentais e simuladas, encontrou-se um *Valor P* igual a 0,829 para a variável  $T_m$  do modelo simplificado, maior do que das variáveis correspondentes do modelo a três fases. A cinética de secagem adotada representou bem o processo, que apresentou um coeficiente de correlação de 0,975 entre os dados experimentais e os preditos.

## ABSTRACT

Drying operation is an important stage of the processing that precedes the storage of seeds, since that with low moisture contents, these can retain their power of germination and other qualities for long periods. The objective of this work was to perform a study of drying of grass seeds (*Brachiaria brizantha*) in a batch fluidized bed, in order to evaluate the performance of the dryer in a physiological and phenomenological point of view. Fluid dynamics, heat transfer and drying tests were accomplished in order to verify the operational limitations of the equipment, as well as determining the main characteristic experimental parameters of the seeds (such as minimum fluidization velocity and transfer coefficients). Moreover, two types of models were tested (three-phase and two-phase models) with the purpose of comparing the feasibility of its applications. Sensitivity analyses were carried out on the main parameters and properties of the models aiming to discuss their strengths and weaknesses. Besides, experimental comparisons of the drying process in the equipment operating as fixed bed and fluidized bed were made. Among the main results, it was found that the simplified two-phase model provided better predictions of the drying experiments in fluidized bed, specially the temperature of the bed, than the three-phase model, which takes into account the existence of the solid, interstitial gas and bubble gas phases. By applying the hypothesis test of equality between the experimental and simulated variables, it was found a P-value equal to 0,829 for the simplified model  $T_m$  variable, better than the three-phase model corresponding variables. The adopted drying kinetics represented well the process, which presented a correlation coefficient of 0,975 between the predicted and experimental data.

## SUMÁRIO

Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Quadros e Tabelas .....	xiii
Nomenclatura.....	xiv
1 Introdução .....	1
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Cinética de secagem .....	6
2.2 Secadores empregados.....	13
2.3 Leito fluidizado.....	14
2.3.1 Características fluidodinâmicas .....	16
2.3.2 Secagem em leitos fluidizados.....	19
2.4 Modelos de secagem em leitos fluidizados .....	22
3 Materiais e Métodos.....	38
3.1 Material.....	38
3.2 Equipamento .....	39
3.3 Procedimento .....	43
3.3.1 Preparação do material.....	43
3.3.2 Fluidodinâmica e secagem .....	44
3.3.3 Condições operacionais.....	45
3.3.4 Técnicas de medida de temperatura.....	45
3.4 Tratamento de dados.....	46
3.4.1 O modelo matemático a três fases.....	46
3.4.2 O modelo matemático a duas fases.....	48
3.5 Análise e comparação dos modelos.....	49
3.6 Análise de sensibilidade dos modelos.....	49
4 Resultados e Discussões.....	50
4.1 Fluidodinâmica .....	50
4.2 Técnica de medida da temperatura do sólido.....	54
4.3 Comparação entre modos de operação do leito.....	57
4.4 Experimentos de transferência de calor e de secagem.....	64
4.4.1 Modelagem e simulação .....	70
4.4.2 Transferência de calor .....	70
4.4.3 Secagem.....	76
4.5 Análise de sensibilidade – modelo a três fases .....	86
4.5.1 Massa específica das sementes .....	87
4.5.2 Esfericidade .....	87
4.5.3 Calor específico .....	88
4.5.4 Diâmetro da partícula.....	89
4.5.5 Porosidade do leito .....	90
4.5.6 Velocidade mínima de fluidização, $G_{mf}$ .....	92
4.5.7 Fração de bolhas, $\Psi$ .....	94
4.5.8 Parâmetro $x_1$ .....	95
4.5.9 Parâmetro $x_2$ .....	96
4.5.10 Coeficiente de transferência de calor entre a parede do leito e o meio, $\alpha_{pa}$ .....	97
4.5.11 Cinética de secagem – parâmetros $a$ e $c$ .....	98

4.5.12	Cinética de secagem – degrau na taxa de secagem .....	99
4.5.13	Cinética de secagem – parâmetro $b$ .....	101
4.5.14	Cinética de secagem – parâmetro $d$ .....	102
4.5.15	Umidade de equilíbrio, $Y_{Seq}$ .....	103
4.6	Análise de sensibilidade – modelo a duas fases .....	104
4.6.1	Calor específico .....	104
4.6.2	Massa específica .....	105
4.6.3	Porosidade do leite, $\varepsilon$ .....	106
4.6.4	Massa de sólidos .....	107
4.6.5	Umidade de equilíbrio, $Y_{Seq}$ .....	108
4.6.6	Coeficiente de transferência de calor entre a parede do leite e o meio, $\alpha_{pa}$ .....	109
4.6.7	Vazão de ar .....	110
4.7	Análise de sensibilidade: quadros comparativos .....	110
4.8	Comparação estatística entre os modelos .....	112
4.9	Modelo a três fases: uma abordagem alternativa .....	116
4.10	Verificação experimental do modelo a duas fases .....	121
4.11	Outros resultados .....	123
4.11.1	Testes de qualidade das sementes .....	123
4.11.2	Isoterma de equilíbrio .....	125
5	Conclusões .....	128
6	Sugestões .....	131
	Referências Bibliográficas .....	132
	Apêndice .....	138

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Teor de umidade e taxa de secagem em função do tempo durante a secagem (adaptado de Brooker <i>et al.</i> , 1992).	7
Figura 2.2: Curvas da (a) queda de pressão e (b) altura do leito fluidizado em função da velocidade do gás (adaptado de Couderc, 1985).	17
Figura 3.1: Classificação de Geldart para fluidização de partículas no ar em condições ambientes (adaptado de Geldart, 1986).	39
Figura 3.2: Esquema do leito fluidizado: 1) soprador; 2) aquecedor elétrico; 3) controles de vazão e temperatura; 4) coluna de vidro; 5) termopares; 6) local de retirada de amostra; 7) manômetros de água; 8) placa de orifício; 9) transdutores de pressão e 10) sistema de aquisição de dados.	40
Figura 3.3: Foto do leito segmentado.	42
Figura 3.4: Esquema do equipamento utilizado para a umidificação das sementes.	43
Figura 4.1: Queda de pressão no leito em função da vazão de ar parametrizado na altura de partículas.	51
Figura 4.2: Queda de pressão no leito em função da vazão de ar parametrizado na temperatura de ar.	52
Figura 4.3: Queda de pressão no leito em função do fluxo de ar para as sementes usadas nos testes de transferência de calor e massa – $H_0 = 14,6$ cm.	53
Figura 4.4: Queda de pressão em função do fluxo de ar: pontos obtidos com o sistema de aquisição de dados – $H_0 = 15,2$ cm.	53
Figura 4.5: Temperatura de sólidos em função do tempo, obtida pelo método de calorímetro.	55
Figura 4.6: Temperatura em função do tempo - método da estagnação: a) decaimento da temperatura com $T_{g0}=40^{\circ}\text{C}$ ; b) decaimento da temperatura com $T_{g0}=50^{\circ}\text{C}$ .	56
Figura 4.7: Temperatura do leito em função do tempo: comparação entre o método da estagnação e tréplica sem parada da fluidização.	57
Figura 4.8: a) Umidade das sementes em função da altura do leito, parametrizado no tempo; b) Temperatura da mistura gás-sólido em função do tempo, parametrizado na altura do leito fixo, para uma temperatura do ar de secagem de $40^{\circ}\text{C}$ e $Y_{s0} = 0,37$ .	58
Figura 4.9 a) Umidade das sementes em função da altura do leito, parametrizado no tempo; b) Temperatura da mistura gás-sólido em função do tempo, parametrizado na altura do leito fixo, para uma temperatura do ar de secagem de $50^{\circ}\text{C}$ e $Y_{s0} = 0,35$ .	60
Figura 4.10 a) Umidade das sementes em função da altura do leito para um tempo de 30 min; b) Temperatura da mistura gás-sólido em função	

do tempo, parametrizado na altura do leito fixo, para uma temperatura do ar de secagem de 50°C e $Y_{s0} = 0,17$ .....	61
Figura 4.11: Umidade das partículas em função da altura do leito fluidizado, parametrizado no tempo de secagem, para temperaturas do ar de entrada de a) 40°C e b) 50°C.....	62
Figura 4.12: Temperatura experimental em função do tempo no leito fluidizado segmentado com ar de alimentação a 50°C e 40°C.....	63
Figura 4.13: Temperatura em função do tempo de secagem no leito fluidizado. ....	64
Figura 4.14: Temperatura em função do tempo para as condições do Ensaio #5 da Tabela 4.1. ....	66
Figura 4.15: Umidade em função do tempo de secagem para as condições do a) Ensaio #4 e b) Ensaio #1 na Tabela 4.2 .....	67
Figura 4.16: Umidade adimensional em função do tempo de secagem em leito fluidizado para as diferentes condições de operação mostradas na Tabela 4.2. ....	68
Figura 4.17: Caracterização do regime de escoamento das sementes para o Ensaio #1: a) $d_b$ em função de $z/H$ ; b) $u_a$ ou $u_b$ em função de $z/H$ . ....	74
Figura 4.18: Temperatura experimental e simulada pelo modelo de transferência de calor em função do tempo: a) Ensaio #8, b) Ensaio #9.....	75
Figura 4.19: a) umidade e b) temperatura de sólido em função do tempo: primeiras tentativas de estimação dos parâmetros de secagem.....	77
Figura 4.20: Temperatura em função do tempo: influência do valor de $\alpha_{pa}$ na simulação da temperatura do leito. ....	77
Figura 4.21: Temperaturas experimentais e simuladas em função do tempo de secagem a) do sólido e b) do ar de saída, para os Ensaios #1 e 3 da Tabela 4.2. Modelo a três fases. ....	80
Figura 4.22: Temperaturas de sólido e do gás experimental e simulada, em função do tempo de secagem para os Ensaios #1 e 3 da Tabela 4.2. Modelo simplificado a duas fases.....	81
Figura 4.23: Teor de umidade em função do tempo de secagem das sementes: predito pelos modelos e experimental para os Ensaios #1 e 4 da Tabela 4.2. ....	82
Figura 4.24: Umidade adimensional em função do tempo. ....	83
Figura 4.25: a) Umidade, b) Temperatura dos sólidos e c) Temperatura do ar de saída simulados em função dos valores experimentais. ....	85
Figura 4.26: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -20% a +20% na massa específica. ....	87
Figura 4.27: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -20% a +5% na esfericidade.....	88

Figura 4.28: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -30% a +20% no calor específico.....	89
Figura 4.29: Diâmetro da partícula em função do tempo. ....	90
Figura 4.30: Temperatura do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -30% a +30% no diâmetro das partículas. ....	90
Figura 4.31: Porosidade em função do tempo.....	91
Figura 4.32: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -25% a +50% na porosidade do leito.....	92
Figura 4.33: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -20% a +20% na velocidade mínima de fluidização.....	93
Figura 4.34: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -75% na fração de bolhas.....	94
Figura 4.35: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro $x_1$ . ....	95
Figura 4.36: Temperatura a) do sólido e b) do gás de saída, para perturbações de -50% a +50% no parâmetro $x_1$ , com $E_{parede} = 0$ .....	96
Figura 4.37: Temperatura a) do sólido e b) do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro $x_2$ ....	97
Figura 4.38: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro $\alpha_{pa}$ ....	97
Figura 4.39: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída, d) temperatura do gás de saída e e) umidade do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -25% a +25% no parâmetro $a$ da Equação (49). ....	99
Figura 4.40: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída, d) temperatura do gás de saída e e) umidade do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -20% a +20% na equação de taxa de secagem (Equação (53)). ....	100
Figura 4.41: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída, d) temperatura do gás de saída e e) umidade do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro $b$ .....	101
Figura 4.42: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída, d) temperatura do gás de saída e e) umidade do sólido em	

função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro d.....	102
Figura 4.43: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída, d) temperatura do gás de saída e e) umidade do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% na umidade de equilíbrio.....	103
Figura 4.44: a) umidade do sólido, b) temperatura do sistema gás-sólido, c) taxa de secagem e d) umidade do ar de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no calor específico das sementes.....	105
Figura 4.45: Porosidade do leito em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% na massa específica das sementes.....	105
Figura 4.46: a) porosidade do leito, b) taxa de secagem, c) temperatura do sistema gás-sólido e d) umidade do ar de saída: curvas-resposta para variações de -50% a +50% na porosidade do leito.....	106
Figura 4.47: a) temperatura do sistema gás-sólido e b) umidade do ar de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% na massa das sementes contida no leito.....	107
Figura 4.48: a) porosidade do leito, b) taxa de secagem, c) temperatura do sistema gás-sólido, d) umidade do ar de saída e e) umidade do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% na umidade de equilíbrio.....	108
Figura 4.49: Temperatura do sistema gás-sólido, $T_m$ , em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro $\alpha_{pa}$ .....	109
Figura 4.50: a) temperatura do sistema gás-sólido e b) umidade do ar de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% na vazão de ar.....	110
Figura 4.51: Temperatura experimental e simulada em função do tempo nas condições do Ensaio #1.....	113
Figura 4.52: Temperatura experimental e simulada em função do tempo nas condições do Ensaio #7.....	113
Figura 4.53: Gráficos BoxPlot de a) $T_s$ , b) $T_g$ e c) $T_m$ simuladas e experimentais....	115
Figura 4.54: Umidade adimensional em função do tempo de secagem – condição do ponto central dos experimentos (Ensaio #2, #3 e #7 da Tabela 4.2).....	116
Figura 4.55: Dados experimentais e simulados em função do tempo: (a) umidade do sólido; (b) temperatura das sementes; (c) umidade do ar de saída e (d) temperatura do ar de saída.....	120
Figura 4.56: Número de Nusselt (Nu) em função do número de Reynolds ( $Re_p$ ): 1: este trabalho (ensaio de secagem, Equação (56)); 2: este trabalho (ensaio de transferência de calor, Equação (43) com parâmetros da Tabela 4.4); 3: correlação de Frantz; 4: correlação de Leva, 5: correlação de Shin- Jan-Fou <i>et al.</i> , 6: correlação de	

Lykov, 7: correlação de Zabrodski, 8: correlação de Jun-Chin-Chu (Ciesielczk, 1996).....	121
Figura 4.57: Umidade do sólido em função do tempo de secagem.....	122
Figura 4.58: Temperaturas do leito em função do tempo.....	122
Figura 4.59: Umidade do ar de saída em função do tempo de secagem. ....	123
Figura 4.60: Umidade de equilíbrio das sementes em função da umidade relativa do ar, para as temperaturas de 40 e 50°C. ....	126

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 2.1: Exemplos de equações de difusividade efetiva.....	11
Quadro 2.2: Equações usadas na representação da cinética de secagem de grãos.....	12
Quadro 2.3: Vantagens e desvantagens de leitos fluidizados (Kunii e Levenspiel, 1991).....	15
Quadro 2.4: Interações entre as fases (Vitor <i>et al.</i> , 2004).....	32
Quadro 3.1: Propriedades físicas das sementes.....	38
Quadro 4.1: Equações de balanço de energia do modelo de Vitor (2003).....	71
Quadro 4.2: Resumo da análise de sensibilidade no modelo a três fases.....	111
Quadro 4.3: Resumo da análise de sensibilidade no modelo a duas fases.....	112
Tabela 4.1: Condições operacionais dos experimentos de transferência de calor....	65
Tabela 4.2: Condições operacionais dos experimentos de secagem.....	65
Tabela 4.3: Tempo para atingir faixa viável ao armazenamento nos ensaios de secagem.....	68
Tabela 4.4: Valores estimados dos parâmetros do modelo de transferência de calor.....	73
Tabela 4.5: Parâmetros estimados do modelo.....	79
Tabela 4.6: Parâmetros cinéticos da Equação de Srzdenicki <i>et al.</i> (1996). ....	83
Tabela 4.7: Parâmetros térmicos determinados para o modelo a três fases. ....	84
Tabela 4.8: Coeficientes de correlação entre as variáveis experimentais e simuladas.....	85
Tabela 4.9: Valores de t de student e P para as temperaturas do leito.....	114
Tabela 4.10: Parâmetros ajustados do modelo e suas correlações.....	119
Tabela 4.11: Valores de germinação das sementes em função das condições experimentais.....	124

## NOMENCLATURA

a	Área específica da superfície sólida em contato com o gás intersticial, $a = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p \phi}$ , [L <sup>-1</sup> ]
A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> ,	Parâmetros de ajuste da Equação (38)
A <sub>L</sub>	Área lateral da coluna do leito, $A_L = \pi D_c H_{col}$ [L <sup>2</sup> ]
A <sub>S</sub>	Área da seção transversal do leito, $A_S = \pi D_c^2 / 4$ [L <sup>2</sup> ]
b.s.	Base seca
C	Parâmetro da Equação (11) [θ]
C <sub>pg</sub>	Calor específico do gás global a pressão constante [L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> θ <sup>-1</sup> ]
C <sub>pl</sub>	Calor específico da água líquida a pressão constante [L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> θ <sup>-1</sup> ]
C <sub>ps</sub>	Calor específico do sólido a pressão constante [L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> θ <sup>-1</sup> ]
C <sub>pv</sub>	Calor específico do vapor de água a pressão constante [L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> θ <sup>-1</sup> ]
d <sub>b</sub>	Diâmetro da bolha [L]
d <sub>b0</sub>	Diâmetro inicial da bolha [L]
d <sub>bm</sub>	Diâmetro máximo da bolha [L]
d <sub>p</sub>	Diâmetro da partícula [L]
D	Coeficiente de difusão [L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]
D <sub>ef</sub>	Difusividade mássica efetiva da água no interior do grão [L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]
D <sub>c</sub>	Diâmetro da coluna [L]
D <sub>0</sub>	Difusividade efetiva inicial [L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]
<i>E<sub>parede</sub></i>	Taxa de calor dissipado pelas paredes da coluna [M L <sup>2</sup> T <sup>-3</sup> ]
<i>f<sub>E1</sub></i>	Taxa de transferência de calor entre as fases gás intersticial e sólida [M L <sup>2</sup> T <sup>-3</sup> ]
<i>f<sub>E2</sub></i>	Taxa de transferência de calor entre as fases bolha e gás intersticial [M L <sup>2</sup> T <sup>-3</sup> ]
<i>f<sub>M1</sub></i>	Taxa de transferência de massa entre as fases sólida e gás intersticial [M L <sup>-3</sup> T <sup>-1</sup> ]
<i>f<sub>M2</sub></i>	Taxa de transferência de massa entre as fases gás intersticial e bolha [M L <sup>-3</sup> T <sup>-1</sup> ]
Fo	Número de Fourier, $Fo = D_0 t / R^2$ [-]
g	Aceleração da gravidade [L T <sup>-2</sup> ]
G <sub>g</sub>	Fluxo mássico do gás global, $G_g = G_{gi} + G_{gb}$ , [M L <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup> ]

$G_{gb}$	Fluxo mássico do gás na fase bolha [ $M L^{-2} T^{-1}$ ]
$G_{gi}$	Fluxo mássico do gás na fase gás intersticial [ $M L^{-2} T^{-1}$ ]
$G_{mf}$	Fluxo mássico do gás na mínima fluidização [ $M L^{-2} T^{-1}$ ]
$h$	Coefficiente de transferência de calor efetivo entre o sólido e a fase gás intersticial [ $M T^{-3} \theta^{-1}$ ]
$h_b$	Coefficiente de transferência de calor volumétrico entre a bolha e a fase gás intersticial [ $M L^{-1} T^{-3} \theta^{-1}$ ]
$h_{bc}$	Coefficiente de transferência de calor volumétrico entre bolha e a nuvem [ $M L^{-1} T^{-3} \theta^{-1}$ ]
$h_{ci}$	Coefficiente de transferência de calor volumétrico entre nuvem e a fase gás intersticial [ $M L^{-1} T^{-3} \theta^{-1}$ ]
$H$	Entalpia específica [ $L^2 T^{-2}$ ]
$H_{col}$	Altura da coluna do leito [L]
$k_b$	Coefficiente de transferência de massa volumétrico entre a bolha e a fase gás intersticial [ $M L^{-3} \theta^{-1}$ ]
$k_{bc}$	Coefficiente de transferência de massa volumétrico entre bolha e a nuvem [ $M L^{-3} \theta^{-1}$ ]
$k_{ci}$	Coefficiente de transferência de massa volumétrico entre nuvem e a fase gás intersticial [ $M L^{-3} \theta^{-1}$ ]
$k_g$	Condutividade térmica do gás [ $M L^{-3} \theta^{-1}$ ]
$k_s$	Coefficiente de transferência de massa efetivo entre o sólido e a fase gás intersticial [ $L^2 T^{-2}$ ]
$k_y$	Coefficiente de transferência de massa [ $M L^{-2} T^{-1}$ ]
$K$	Constante de secagem [ $T^{-1}$ ]
$L$	Altura do leito fluidizado [L]
$L_{mf}$	Comprimento do leito na mínima fluidização [L]
$m$	Massa [M]
$M$	Umidade do sólido [-]
$\bar{M}$	Umidade média do sólido [-]
$M_0$	Umidade inicial do sólido [-]
$M_c$	Teor de umidade crítica [-]
$M_{eq}$	Umidade do sólido no equilíbrio [-]
$MR$	Umidade adimensional, ou razão de umidade, $MR = \frac{\bar{M}(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}}$ , [-]
$NTU$	Número de unidades de transferência (sigla em inglês)
$Nu$	Número de Nusselt, $Nu = \frac{h \cdot d_p}{k_g}$ [-]
$Q$	Vazão volumétrica de ar [ $L^3 T^{-1}$ ]

$r$	Coordenada radial [L]
$R$	Raio da esfera [L]
$Re_p$	Número de Reynolds da partícula, $Re_p = \frac{d_p G_{gi}}{\mu_{gi}}$ , [-]
$t$	Tempo [T]
$T$	Temperatura [ $\theta$ ]
$T_1, T_2,$	Parâmetros de ajuste da Equação (38)
$T_f$	Temperatura do fluido [ $\theta$ ]
$T_g$	Temperatura do gás na saída do leito [ $\theta$ ]
$T_{g0}$	Temperatura do gás na alimentação [ $\theta$ ]
$T_{gb}$	Temperatura do gás na fase bolha [ $\theta$ ]
$T_{gi}$	Temperatura do gás na fase gás intersticial [ $\theta$ ]
$T_m$	Temperatura da mistura gás-sólido [ $\theta$ ]
$T_R$	Temperatura de referência [ $\theta$ ]
$T_s$	Temperatura do sólido [ $\theta$ ]
$T_{s0}$	Temperatura do sólido nas condições iniciais [ $\theta$ ]
$u_a$	Velocidade média de ascendência de bolhas [ $L T^{-1}$ ]
$u_b$	Velocidade de ascendência de uma bolha isolada [ $L T^{-1}$ ]
$U_g$	Velocidade do ar [ $L T^{-1}$ ]
$U_0$	Velocidade superficial do gás (medido num leito vazio) [ $L T^{-1}$ ]
$U_{mf}$	Velocidade mínima de fluidização [ $L T^{-1}$ ]
$UR$	Umidade relativa do ar [-]
$V_{leito}$	Volume do leito, $V_{leito} = \pi D_c^2 L / 4$ [ $L^3$ ]
$x_1, x_2,$ $x_3$ e $x_4$	Parâmetros de transferência de calor e massa estimados pelo modelo a três fases
$x_{1I}$ e $x_{2I}$	Parâmetros de transferência de massa da Equação (54b) [-]
$x_{1II}$	Parâmetro de transferência de massa da Equação (55b) [ $L^2 T^{-1}$ ]
$X_{2II}$	Parâmetro de transferência de massa da Equação (55b) [ $\theta$ ]
$X$	Teor de umidade, base seca [ $M_{\text{água}}/M_{\text{sólido seco}}$ ]
$X_0$	Teor de umidade inicial, base seca [ $M_{\text{água}}/M_{\text{sólido seco}}$ ]
$Y_g$	Teor de água do gás global na saída do leito em base seca [-]
$Y_{g0}$	Teor de água do gás em base seca nas condições de alimentação [-]

$Y_{gb}$	Teor de água do gás na fase bolha em base seca [-]
$Y_{gi}$	Teor de água do gás na fase gás intersticial em base seca [-]
$Y_s$	Teor de água do sólido em base seca [-]
$Y_{scr}$	Teor de umidade crítica em base seca [-]
$Y_{Seq}$	Teor de água do sólido em base seca no equilíbrio [-]
$Y_{s0}$	Teor de água inicial do sólido em base seca [-]
$z$	Variável espacial ao longo do leito a partir do distribuidor [L]

### Símbolos gregos

$\alpha$	Difusividade térmica [ $L^2 T^{-1}$ ]
$\alpha_{ip}$	Coeficiente de transferência de calor entre o leito e a parede [ $M T^{-3} \theta^{-1}$ ]
$\alpha_p$	Coeficiente global de transferência de calor entre o leito e o meio [ $M T^{-3} \theta^{-1}$ ]
$\alpha_{pa}$	Coeficiente de transferência de calor entre a parede do leito e o meio [ $M T^{-3} \theta^{-1}$ ]
$\beta$	Coeficiente de ajuste da fase gás intersticial [-]
$\Delta h$	Diferença de altura [L]
$\Delta p$	Queda de pressão [ $M L^{-1} T^{-2}$ ]
$\delta$	Porosidade da bolha [-]
$\varepsilon$	Porosidade do leito [-]
$\varepsilon_{mf}$	Porosidade do leito na mínima fluidização [-]
$\varepsilon_p$	Porosidade da partícula [-]
$\varepsilon_0$	Porosidade da partícula inicial [-]
$\lambda$	Calor latente de vaporização da água [ $L^2 T^{-2}$ ]
$\mu$	Viscosidade do ar [ $M L^{-1} T^{-1}$ ]
$\rho_g$	Massa específica do gás [ $M L^{-3}$ ]
$\rho_s$	Massa específica do sólido [ $M L^{-3}$ ]
$\rho_w$	Massa específica da água [ $M L^{-3}$ ]
$\phi$	Esfericidade da partícula [-]
$\Psi$	Coeficiente de correção da vazão fase densa [-]

# 1 INTRODUÇÃO

A secagem de alimentos é um dos processos mais comuns para melhorar sua conservação, uma vez que diminui consideravelmente a atividade aquosa do material, reduz a atividade microbiológica e minimiza alterações físicas e químicas durante o armazenamento.

A secagem de produtos agrícolas é uma prática dos primórdios da civilização, quando não havia qualquer preocupação com a armazenagem e a diminuição de umidades dos grãos ocorria no próprio campo. A secagem era feita em condições naturais do ambiente, ditadas principalmente pela energia solar incidente e o movimento do ar. Mais tarde tentou-se controlar parcialmente as condições de secagem e esta passou a ser feita em fogões especiais ou salas aquecidas.

Na década de 80, a secagem natural em terreiros era usada em mais de 80% da produção agrícola brasileira, sendo muito trabalhosa, lenta e dependente, diretamente, de condições climáticas favoráveis (Ahrens e Villela, 1996). Os métodos utilizados para se processar a secagem de grãos são bastante diversos. Eles podem ser classificados em secagem natural e artificial.

A secagem natural ocorre no campo ou terreiro. Normalmente utiliza-se de energia eólica e solar para remover a umidade das sementes. Em geral, é pouco suscetível a riscos de danificação mecânica e térmica sendo, no entanto, dependente das condições psicrométricas do ar ambiente, que muitas vezes não são adequadas para a secagem das sementes. É um método adequado para reduzida quantidade de sementes.

A secagem artificial pode se dar a baixas temperaturas, com ar natural ou levemente aquecido ou a altas temperaturas, provocada por fluxos artificiais aquecidos.

A necessidade do aumento da produtividade agrícola tem contribuído para o desenvolvimento de novos projetos envolvendo sementes, com o objetivo de promover condições favoráveis às sementes, para um possível armazenamento ou para a germinação imediata.

A produção de sementes de plantas forrageiras é uma atividade de grande importância econômica e social no Brasil (Souza, 2001). Desta forma, o desenvolvimento de uma indústria de sementes de forrageiras dinâmica e forte é muito importante no país, que tem a pecuária bovina fundamentada quase que exclusivamente em pastagens. Tal desenvolvimento ocorreu a partir de meados dos anos 70, e atualmente essa agroindústria brasileira apresenta grande desenvolvimento, a ponto de permitir exportar para mais de 20 países e movimentar aproximadamente R\$ 1 bilhão por ano (Fumagalli, 2007).

O Brasil se apresenta nos dias de hoje como o maior produtor, consumidor e exportador de sementes de plantas forrageiras do planeta, superando por larga margem, em volume de produção, a Austrália que é o segundo maior produtor mundial (Hopkinson *et al.*, 1996). Entre as espécies predominantes no mercado brasileiro de cultivares de gramíneas forrageiras, encontram-se as do gênero *Brachiaria*, que são perenes, de origem africana, de introdução intencional e recente.

As técnicas de beneficiamento das sementes de gramíneas vêm crescendo em importância, aumentando as exigências de análises de germinação para maior racionalização da colheita e beneficiamento, exigindo também um aumento da eficiência do processo de secagem uma vez que as etapas limitantes da produção

de plantas forrageiras são colheita e secagem (Souza, 2001), que na grande maioria dos casos, é realizada ao ar livre (Arnosti Jr., 1997).

Em vista disso, a secagem natural vem se mostrando inadequada com o passar do tempo, sendo substituída pelo processo de secagem artificial, já que a primeira apresenta inúmeros problemas, como a necessidade de uma grande quantidade de mão-de-obra e, principalmente, a baixa qualidade do produto final e a baixa produtividade devido ao difícil controle das condições de secagem, causada pela grande dependência dos fatores climáticos.

Dentre os métodos de secagem artificial, passível de utilização em culturas comerciais, encontra-se a técnica de fluidização, empregada por proporcionar altas taxas de transferência de calor e massa devido ao bom contato entre as partículas (sementes) e o gás percolante (ar), além da mistura intensa dos sólidos resultar em temperatura e teor de umidade praticamente homogêneos ao longo do leito, durante a secagem dos grãos.

Existem diversos estudos que desenvolveram a modelagem matemática do processo de secagem em leitos fluidizados. Se já existe uma complexidade inerente aos estudos realizados em separado sobre a transferência de calor, sobre a transferência de massa ou sobre a dinâmica dos leitos fluidizados, a modelagem da secagem apresenta uma dificuldade mais acentuada, uma vez que trata da ocorrência integrada destes mecanismos.

De uma maneira geral, os modelos matemáticos de secagem em leitos fluidizados podem ser classificados em dois grandes grupos quanto ao número de fases presentes. Pesquisadores como Brooker *et al.*(1992), Ulkü e Uckan (1986), Chandran *et al.*(1990), Syahrul *et al.* (2002), Alvarez & Shene (1996), entre outros, tratam o leito como um sistema homogêneo, onde o leito é tido como uma “caixa

preta” e o sistema gás-sólido é considerado estar em equilíbrio em todas as propriedades (temperatura e umidade). Já pesquisadores como Hoebink & Rietema (1980, a e b), Palancz (1983), Zahed *et al.* (1995), Wildhagen *et al.* (2002), Vitor (2003), entre outros, fazem a distinção entre as fases do leito. Normalmente consideram a presença de bolhas e uma fase densa ou emulsão. Alguns, como Wildhagen *et al.* (2002) e Vitor (2003), ainda abrem a fase densa entre fase gás intersticial e sólida. O que falta em alguns desses modelos é a comparação com dados experimentais e a validação dos mesmos. A principal diferença entre os modelos com diversas fases está na representação dos fluxos das fases e na interação entre elas.

Visando contribuir para um melhor entendimento do processo de secagem e sabendo-se que nenhum estudo com foco específico em leito fluidizado envolvendo sementes de gramíneas foi realizado, que os estudos com essas sementes foram estritamente experimentais e que poucos modelos de secagem em leitos fluidizados são validados experimentalmente, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo da secagem em leito fluidizado em batelada de sementes de gramíneas (*Brachiaria brizantha*), a fim de se avaliar o desempenho do secador do ponto de vista fisiológico e fenomenológico. Para tanto, propôs-se o emprego e comparação de diferentes modelos físico-matemáticos do processo de secagem fundamentados nas equações de conservação de massa e energia para as fases sólida e fluida, visando a simulação e validação experimental dos mesmos.

No próximo item será apresentada uma revisão bibliográfica a respeito de fluidodinâmica, secagem e modelos de secagem em leitos fluidizados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A secagem pode ser considerada como uma das operações unitárias mais importantes e mais utilizadas numa ampla variedade de aplicações industriais tais como indústrias alimentícia, química, metalúrgica, farmacêutica e outras. Particularmente na seqüência do processamento de grãos (colheita – secagem – armazenamento – manipulação – transporte), é tida como uma etapa crítica. É de consenso geral que uma secagem imprópria é a maior causa de deterioração de grão nessa série de etapas (Brooker *et al.*, 1992).

Devido à dificuldade de se executar uma secagem realmente satisfatória, juntamente com a necessidade de uma profunda compreensão e otimização rigorosa da mesma, diversos trabalhos teóricos têm sido publicados, porém com certa discordância com a realidade, implicando em projetos mal-sucedidos de equipamentos de secagem.

Segundo Kemp e Oakley (2002), lamentavelmente muitas das teorias altamente detalhadas sobre secagem publicadas ao longo dos anos incluem pouco ou nenhum tipo de comparação com resultados práticos em secadores reais. Justificando a falha de alguns modelos através de considerações incorretas dos mesmos, os autores ressaltam a importância do entendimento físico do processo a ser modelado, além da necessidade da validação experimental da teoria sobre uma faixa suficiente de condições.

No caso específico da secagem de sementes de gramíneas, por outro lado, encontram-se alguns trabalhos estritamente experimentais envolvendo diferentes secadores, porém não lançam mão do emprego de predições matemáticas a fim de se extrapolar para situações distintas das pesquisadas. No primeiro tópico deste

capítulo, discorre-se sobre os conceitos de cinética de secagem, seguido de uma breve revisão de secadores empregados na secagem desse tipo de semente.

Na seqüência, será apresentada uma revisão sobre leito fluidizado (equipamento de secagem utilizado neste estudo) no que diz respeito ao comportamento fluidodinâmico e alguns modelos de secagem existentes para descrever os fenômenos de transferência de calor e massa no mesmo. Por fim, será apresentada uma rápida abordagem sobre identificação de regimes de fluidização.

## 2.1 Cinética de secagem

A secagem é um processo de transferência simultânea de calor e massa. O calor é requerido para evaporar a umidade que flui da superfície do produto até um meio secante externo, normalmente ar. Alguns produtos biológicos, quando secam como uma partícula individual sob condições externas constantes, exibem uma taxa de perda de umidade constante durante o período inicial de secagem, seguido por uma fase de taxa decrescente de secagem.

O teor de umidade na qual a taxa de secagem de um produto muda da taxa constante à taxa decrescente é chamado de *teor de umidade crítica* do produto ( $M_c$ ). A umidade crítica depende das características do sólido, tais como forma e textura, e das condições de secagem. As taxas de período constante e decrescente estão ilustradas na Figura 2.1. Sementes de cereais, no entanto, secam completamente no período de taxa decrescente, a menos que sejam submetidos a uma umidificação excessiva.

Durante o período de taxa decrescente de secagem, o produto não se comporta mais como se uma fina camada de água cobrisse a superfície, uma vez que a resistência interna ao transporte de umidade se torna maior do que a externa.

Desta forma, um grande número de mecanismos físicos e térmicos foi proposto para se descrever a transferência de umidade em produtos capilares porosos, higroscópicos e sem encolhimento, neste período de secagem:

- movimento do líquido devido à capilaridade;
- movimento do líquido e do vapor devido à diferença de concentração (difusão);
- movimento do líquido devido à força osmótica;
- movimento do líquido devido à gravidade e
- difusão térmica do vapor.

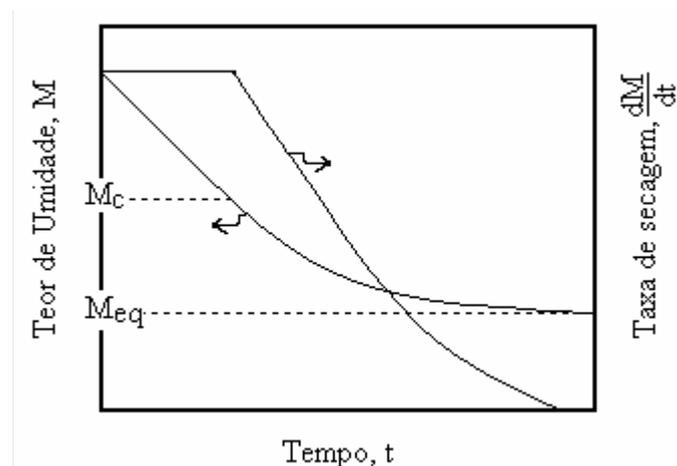


Figura 2.1: Teor de umidade e taxa de secagem em função do tempo durante a secagem (adaptado de Brooker *et al.*, 1992).

Luikov (1966) desenvolveu um modelo matemático para descrever a secagem de materiais capilares porosos, baseados nos mecanismos listados, assumindo não haver encolhimento e que o fluxo de umidade é devido à diferença de pressão total. Pela aplicação das leis da conservação de massa e energia, obteve-se o seguinte sistema de equações diferenciais parciais:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11}M + \nabla^2 K_{12}T \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21}M + \nabla^2 K_{22}T \quad (2)$$

onde  $K_{11}$  e  $K_{22}$  são coeficientes fenomenológicos ( $K_{11} = D$  e  $K_{22} = 1/\alpha$ ), e os outros ( $K_{12}$  e  $K_{21}$ ) são coeficientes de acoplamento resultantes dos efeitos combinados dos gradientes de umidade ( $M$ ) e temperatura ( $T$ ), sendo desconhecidos para a maioria dos grãos;  $D$  é o coeficiente de difusão e  $\alpha$  é a difusividade térmica.

No entanto, muitas simplificações têm sido feitas no modelo de Luikov, talvez pela dificuldade em se estimar os coeficientes de acoplamento. Husain *et al.* (1972), por exemplo, e outros autores consideraram que estes não são exigidos para muitas situações práticas. Além disso, em problemas reais o gradiente de temperatura não é considerado para a grande maioria dos grãos, pois  $K_{11} \ll K_{22}$  (Brooker *et al.*, 1992). Assim, o modelo recai num típico modelo “Fickiano”, como mostra a equação a seguir, resolvida para diversas condições e formas por Crank (1957), assumindo  $D$  constante:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (3)$$

onde  $r$  é a distância radial,  $c$  é zero para simetria plana, um (1) para corpo cilíndrico, e dois (2) para uma esfera, válido para  $0 \leq r \leq R$ . Normalmente são utilizadas as seguintes condições inicial e de contorno na secagem de grãos:

$$\text{C.I.:} \quad M(r,0) = M_0 \quad (4)$$

$$\text{C.C.1:} \quad \frac{\partial M(0,t)}{\partial r} = 0 \quad (\text{condição de simetria}) \quad (5)$$

$$\text{C.C.2:} \quad D \frac{\partial M}{\partial r} \Big|_{r=R} = k_y [M(R,t) - M_{eq}] \quad (6)$$

onde  $k_y$  é o coeficiente de transferência de massa e  $M_{eq}$  representa a umidade do sólido no equilíbrio.

A segunda condição de contorno, Equação (6), expressa que há uma resistência externa à transferência de umidade na superfície do grão. Porém, alguns pesquisadores (Becker e Sallans, 1955; Steffe e Singh, 1982; Aguerre *et al.*, 1982; além de Barrozo, 1995, no estudo com soja) verificaram que essa resistência externa pode ser desprezada para algumas situações, o que implica em equilíbrio instantâneo entre a umidade do sólido na superfície e sua umidade de equilíbrio, levando a:

$$\text{C.C.2: } M(R,t) = M_{eq} \quad (7)$$

A solução analítica da Equação (3) para geometria esférica, considerando constante a difusividade efetiva e o raio da partícula, além de uniformes a umidade inicial e a temperatura do material, com as condições inicial e de contorno representadas pelas Equações (4), (5), e (7), é expressa da seguinte forma:

$$\frac{M(t,r) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{2R}{\pi.r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \text{sen}\left(\frac{n\pi.r}{R}\right) \exp\left[\frac{-n^2\pi^2 D_{ef} t}{R^2}\right] \quad (8)$$

Por integração da Equação (8) em relação ao raio,  $r$ , a umidade média para todo o grão é dada por:

$$MR = \frac{\bar{M} - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[\frac{-n^2\pi^2 D_{ef} t}{R^2}\right] \quad (9)$$

Como na Equação (3), é assumido que o coeficiente  $D_{ef}$  é constante durante o processo de secagem e sua solução é considerada uma predição da taxa de secagem do grão, uma vez que o valor de  $D$  é uma função da temperatura e do teor de umidade. Portanto, muitas soluções numéricas em que a difusividade efetiva é função da temperatura e teor de umidade são encontradas na literatura.

Dentre os trabalhos que consideram a difusividade efetiva como função do teor de umidade, cabe destacar o de Alvarez e Shene (1996), que afirmaram que este coeficiente varia segundo a expressão:

$$D_{ef} = D_0(1 + Fo)^b, \quad Fo = \frac{D_0 \cdot t}{R^2} \quad (10)$$

onde  $b$  é um parâmetro relacionado às propriedades do sólido e ao teor de umidade,  $D_0$  é a difusividade efetiva inicial e  $Fo$  é o número de Fourier. Alvarez e Shene (1996) adicionaram a Equação (10) na (3) e utilizaram a solução truncada no primeiro termo, chamando-a de “Modelo de Difusividade Variável – 1 Termo”(MDV-1T). Compararam esse com outro modelo, que considerava  $D_{ef}$  constante, e verificaram que o MDV-1T forneceu um melhor ajuste aos dados experimentais, apesar do parâmetro  $b$  não ter mostrado uma clara correlação com as condições de operação.

Por outro lado, o trabalho de Alves Filho e Rumsey (1986), ao propor uma variação linear da difusividade efetiva com a umidade, mostrou que os resultados da simulação, quando comparados com dados experimentais de secagem de nozes, apresentaram resultados piores do que aqueles advindos da Equação (9).

A dependência com a temperatura do parâmetro difusividade efetiva é geralmente representada por uma função do tipo Arrhenius:

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(\frac{-C}{T}\right) \quad (11)$$

onde  $C$  é um parâmetro da Equação (11).

Diversos autores utilizaram a Equação (11) para representar  $D_{ef}$  em função de  $T$ , tais como Brooker *et al.* (1992), Becker e Sallans (1961), Ülkü e Uçkan (1986), entre outros. Muitos pesquisadores representam  $D_{ef}$  como uma variação exponencial com a umidade do grão e temperatura, entre eles: Chu e Hustrulid (1968), Kameoka

*et al.* (1986), Hustrulid e Flikke (1959). Alguns exemplos dessas equações de difusividade efetiva são apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1: Exemplos de equações de difusividade efetiva.

Equação	Material	Referência
$Def = 7,66 \times 10^{-3} \exp(-6140,2/T)$	trigo	Becker e Sallans (1961)
$Def = \frac{1,01 \times 10^{-2} \exp(6400/T)}{1 + \exp(4,71 - 49,5M)}$	arroz	Kameoka <i>et al.</i> (1986)
$Def = 4,20 \times 10^{-8} \exp\left[\frac{-2513}{T} + (4,5 \times 10^{-2} T - 5,5)M\right]$	milho	Chu e Hustrulid (1968)

Um certo número de pesquisadores prefere tratar o problema de secagem de grãos utilizando equações semi-empíricas, geralmente derivadas do modelo difusivo, ou ainda de analogias com outros fenômenos. O objetivo é buscar uma forma de representar a cinética de secagem que se ajuste melhor aos dados experimentais.

Brooker *et al.* (1992) apresentaram uma simplificação da solução da equação de difusão em coordenadas esféricas (Equação (9)) para tempos longos, que tem sido usada freqüentemente para prever a secagem de grãos. Ao invés de um número infinito de termos, usou-se apenas o primeiro termo, resultando em:

$$MR = \frac{\overline{M}(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{ef} t}{R^2}\right] = \frac{6}{\pi^2} \exp(-Kt) \quad (12)$$

válida para  $\pi^2 D_{ef}/R^2 > 1,2$ .

Uma relação semelhante à Equação (12), e análoga à lei de resfriamento de Newton foi proposta por Lewis (1921):

$$\frac{d\overline{M}}{dt} = k(\overline{M} - M_{eq}) \quad (13)$$

A solução desta equação para a condição inicial (Equação (4)) é:

$$MR = \frac{\overline{M}(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad (14)$$

Na literatura é encontrada uma grande quantidade de equações que representam a cinética de secagem de grãos. Em vista disso, é necessário um levantamento para saber quais podem ser aplicadas para o tipo de material desejado, escolhendo a que melhor representar o processo nas condições de operação pré-estabelecidas. Com esta finalidade, Barrozo (1995) e Arnosti Jr. (1997) analisaram cinco das equações mais usadas para descrever a cinética de secagem de grãos, para a soja e gramínea, respectivamente. Tais equações são apresentadas no Quadro 2.2:

Quadro 2.2: Equações usadas na representação da cinética de secagem de grãos.

<b>Equação</b>	<b>Referência</b>
MR = Cexp(-Kt) onde K=Aexp(-B/Tf)	(15) Brooker (1992)
MR = exp(-Kt), onde K=Aexp(-B/Tf)	(16) Lewis (1921)
MR = C[exp(-Kt) + 1/9exp(-9Kt)], onde K=Aexp(-B/Tf)	(17) Henderson- Henderson (1968)
MR = exp(-Kt <sup>n</sup> ) onde K=Aexp(-B/Tf)	(18) Page (1949)
MR = exp[-(Kt) <sup>n</sup> ], onde K=exp(A+B/Tf)	(19) Overhults (1973)

onde A, B e C são constantes, Tf é temperatura do fluido e t o tempo de secagem.

Barrozo (1995) e Arnosti Jr. (1997), em seus respectivos trabalhos, concluíram que a equação que melhor representou os resultados de cinética de secagem para sementes de soja e gramínea em camada fina, foi a equação de Overhults (Equação (19)).

Realizando um estudo específico sobre cinética de secagem em sementes de *Brachiaria brizantha*, Chicaroni *et al.* (1999) concluíram que a equação de

Szrzenicki *et al.* (1996), entre as analisadas, foi a que melhor representou a cinética de secagem em leito esteira dessa gramínea. Esta equação é da forma:

$$MR = a \cdot \exp\left[-K_1 \cdot \exp\left(\frac{-E_1}{T}\right) \cdot t\right] + b \cdot \exp\left[-K_2 \cdot \exp\left(\frac{-E_2}{T}\right) \cdot t\right] \quad (20)$$

onde  $a$ ,  $b$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $E_1$  e  $E_2$  são parâmetros do modelo.

As equações oriundas de dados experimentais obtidos na secagem em camada fina, totalmente empíricas, são geralmente usadas para grãos, pois representam o comportamento de secagem melhor do que qualquer equação teórica ou semi-empírica. No entanto, possuem validade estritamente na faixa de condições experimentais em que foram determinadas. Dois exemplos de equações empíricas foram propostas por Thompson (1968) e por Wang *et al.* (1978) respectivamente, são elas:

$$t = A \ln(MR) + B[\ln(MR)]^2 \quad (21)$$

onde  $A$  e  $B$  são específicos do produto e normalmente expressas como função da temperatura e do teor de umidade e

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (22)$$

onde  $a$  e  $b$  são funções da temperatura do grão e da umidade relativa do ar.

## 2.2 Secadores empregados

Ainda fazendo uso do método de secagem natural, Macedo *et al.* (1987) avaliaram a velocidade de redução do teor de umidade, as perdas de matéria seca e de proteína bruta, a germinação e o vigor durante o processo de secagem de três espécies de gramíneas forrageiras (*Andropogon gayanus* cv. Planaltina, *Planicum maximum* cv. Makueni e *Brachiaria decumbens*) à sombra e ao sol. Verificaram que a secagem ao sol reduziu notavelmente o tempo de secagem, como esperado, além

de ter proporcionado uma melhor germinação e um melhor vigor em duas das espécies, ao complementar a secagem à sombra. Além disso, a secagem, tanto à sombra como ao sol, não influenciou o teor de proteína bruta das sementes das diferentes espécies.

Muitos dos estudos experimentais de gramíneas registrados na literatura, classificados como secagem artificial, foram realizados no Centro de Secagem do DEQ-UFSCar, dentre os quais se destacam os trabalhos mencionados a seguir.

Arnosti Jr. (1997) desenvolveu um secador transportador do tipo esteira com escoamento cruzado. A aplicação se mostrou bastante promissora, causando baixo impacto mecânico nas partículas.

Chicaroni *et al.* (1999) compararam os dados de secagem de Souza *et al.* (1998) em leito fixo com os seus, em leito esteira, e verificaram que este último apresentou uma umidade adimensional menor para um mesmo tempo, isto é, proporcionou uma secagem mais rápida das sementes de gramíneas.

Fumagalli (2007) realizou um estudo comparativo no secador do tipo esteira, operando o equipamento em três diferentes modos: leito fixo, fluidizado e esteira. Verificou que foi possível obter condições operacionais uniformes de distribuição da velocidade e temperatura do ar e velocidade da esteira, resultando na secagem uniforme das sementes. Também concluiu que a secagem no modo fluidizado contribuiu para a obtenção de um produto com teor de umidade mais homogêneo.

No tópico seguinte são apresentadas algumas peculiaridades de um leito fluidizado, tais como vantagens e características fluidodinâmicas e agregativas.

### **2.3 Leito fluidizado**

Um leito fluidizado é formado por um fluido percolante, normalmente um gás, que sobe por um leito de partículas sustentado sobre um distribuidor. A faixa de

vazão do gás para promover a fluidização deve ser intermediária, uma vez que baixas velocidades mantêm as partículas sólidas umas sobre as outras no fundo poroso da coluna, em estado de leito fixo, enquanto altas vazões provocam o arraste das partículas, conhecido como transporte pneumático. Para valores intermediários de velocidades, cada partícula se torna individualmente suspensa no escoamento do fluido, enquanto o leito como um todo se mantém móvel em relação às paredes da coluna. São muito utilizados industrialmente devido ao alto contato entre o fluido e as partículas, e por isso é considerada uma das técnicas de secagem mais bem sucedidas. Outras vantagens desses leitos, além de algumas desvantagens, são apresentadas no Quadro 2.3. Podem ser operados como batelada ou processo contínuo.

Quadro 2.3: Vantagens e desvantagens de leitos fluidizados (Kunii e Levenspiel, 1991)

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Rápida mistura de sólidos leva a condições quase isotérmicas: facilidade de controle de temperatura.	A rápida mistura de sólidos promove tempos de residência não-uniformes no leito.
Taxas de transferência de calor e massa entre gás e sólido são altas comparadas a outros tipos de contato.	Desgaste das partículas; parte do produto deixa o leito como partículas finas.
Facilidade de automação, operação e manutenção.	Pode ocorrer erosão das paredes do leito por abrasão pelas partículas.
Apropriado para operações em larga escala.	Alta perda de carga.

A operação em batelada é preferida para produção em pequena escala e para materiais sensíveis ao calor. As condições do processo são facilmente selecionadas na secagem em batelada e o produto é de qualidade uniforme devido à homogeneidade do leito em qualquer instante durante a operação.

Em leitos fluidizados contínuos, o material úmido entra no secador como uma corrente contínua e o material seco também é removido continuamente. Apesar de ser uma operação em estado estacionário, a qualidade de secagem dos sólidos

úmidos pode não ser uniforme devido ao alto grau de mistura dos sólidos e aos diferentes tempos de residência das partículas individuais no secador nesse modo de operação, o que leva o produto apresentar partículas secas em diferentes proporções. São utilizados para grandes produções, comparado ao modo batelada.

### 2.3.1 Características fluidodinâmicas

Um leito de partículas não se torna fluidizado até que a velocidade do gás exceda o valor chamado de velocidade de mínima fluidização. Essa velocidade é dependente principalmente do tamanho e densidade das partículas. Acima desta velocidade a perda de carga no leito,  $\Delta p$ , permanece constante e igual ao peso do leito dividido pela área da seção transversal da coluna, representada pela seguinte equação:

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (\rho_s - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf})g \quad (23)$$

onde  $L_{mf}$  é altura do leito na mínima fluidização;  $\rho_s$  é a massa específica do sólido;  $\rho_g$  é a massa específica do gás,  $\varepsilon_{mf}$  é a porosidade do leito na mínima fluidização e  $g$  é a aceleração da gravidade.

Esta igualdade, que foi verificada experimentalmente diversas vezes, constitui a condição fundamental de fluidização (Couderc, 1985).

Apesar de poucos processos operarem na condição de mínima fluidização, é essencial o conhecimento da velocidade crítica,  $U_{mf}$ , uma vez que é um dos parâmetros mais importantes que caracterizam um leito fluidizado. Uma boa estimativa para a determinação de  $U_{mf}$  é feita através da intersecção de duas retas de queda de pressão no leito em função da velocidade superficial do ar, uma tangente à curva do leito fixo e a outra tangente à curva de leito fluidizado (Figura 2.2).

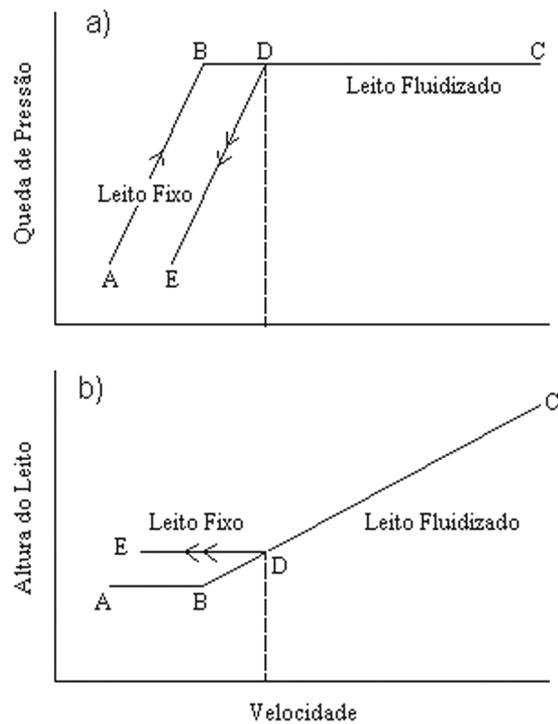


Figura 2.2: Curvas da (a) queda de pressão e (b) altura do leito fluidizado em função da velocidade do gás (adaptado de Couderc, 1985).

A Figura 2.2a é um gráfico idealizado da queda de pressão em função da velocidade em sistemas de leito fixo e fluidizado para o caso de partículas sólidas uniformes na forma e tamanho. A região AB corresponde a um leito fixo no qual as partículas são mantidas umas sobre as outras no fundo da coluna; a queda de pressão aumenta com a vazão. A fluidização se inicia no ponto B: a superfície superior do leito se torna plana e horizontal, as partículas dentro do leito conseguem se mover e se rearranjar lentamente. À medida que a velocidade do gás aumenta, a queda de pressão estabiliza e permanece constante; a altura do leito, pelo contrário, aumenta, conforme mostrado na Figura 2.2b. Este é o fenômeno de expansão, característico de leitos fluidizados.

Quando a vazão diminui a partir do ponto C, é observada uma nova curva CDE. Essa diferença resulta de variações na porosidade do leito fixo, que toma agora um valor particular  $\epsilon_{mf}$ , a porosidade de mínima fluidização, ao passo que é

exibido um valor diferente ( $\varepsilon$ ) para a curva AB, resultante do procedimento selecionado para introduzir as partículas sólidas na coluna. As condições de mínima fluidização são definidas como o ponto de transição D entre os estados de leito fixo e fluidizado observado ao se diminuir a velocidade.

A velocidade superficial nas condições de mínima fluidização,  $U_{mf}$ , é encontrada ao se combinar a Equação (23) com a correlação de Ergun, que foi originalmente proposta para leito fixo (uma extrapolação razoável para essa expressão de leito fixo). Em geral, para sólidos isotrópicos resulta numa quadrática em  $U_{mf}$ :

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left( \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (24)$$

onde  $\phi_s$  é a esfericidade das partículas,  $d_p$ , o diâmetro das partículas e  $\mu$  a viscosidade do ar.

De um ponto de vista prático, diversas equações de alta qualidade estão disponíveis para prever as condições de mínima fluidização, aconselháveis principalmente quando não se têm os valores de  $\varepsilon_{mf}$  e  $\phi$ . Várias correlações foram tabeladas de forma conveniente por Couderc (1985). Dessa forma, a escolha da equação adequada depende da faixa de condições experimentais estudada, incluindo as propriedades das partículas (diâmetro e densidade), e do gás.

Normalmente faz-se duas distinções quanto aos comportamentos de fluidização que corresponde aproximadamente aos sistemas líquido-sólido e gás-sólido: fluidização particulada e agregativa, respectivamente. A fluidização líquido-sólido resulta numa operação estável e leitos homogêneos, com uma concentração de sólidos uniformemente distribuídos pelo leito, além do fenômeno de expansão ser regular, com um aumento contínuo da distância entre as partículas.

De acordo com Couderc (1985), apesar de também existir fluidização particulada para sistemas gás-sólido numa faixa limitada de velocidades, geralmente esse tipo de sistema exibe um comportamento agregativo, completamente diferente do sistema anterior: os leitos não são mais homogêneos e apresentam consideráveis volumes de vazios. Quando esses vazios são pequenos, são chamados de bolhas, que perturbam intensamente os leitos fluidizados com gás. As bolhas são formadas no fundo do leito, perto do distribuidor, e ascendem pelo sistema se aglutinando e aumentando de tamanho. Quando o tamanho das bolhas atinge a ordem de grandeza do diâmetro da coluna, sua forma e propriedades mudam, sendo chamadas de “slugs”.

Segundo Geldart (1990), para todas as partículas dos grupos A, B e D, se a velocidade do gás exceder em cerca de  $2 \text{ cm s}^{-1}$  a velocidade de mínima fluidização, então há a presença de bolhas. Este autor ainda afirma que em leitos com bolhas, típicos de unidades comerciais, essencialmente todo o gás em excesso daquele que é exigido para suportar o leito na fluidização inicial atravessa o leito como bolhas.

Assim, há duas fases em leitos fluidizados: uma fase bolha na qual há poucas partículas, e uma fase densa, ou emulsão, que corresponde a um fluido tendo uma densidade similar àquela do leito na mínima fluidização. Este conceito simples de duas fases de fluidização é uma aproximação conveniente para os cálculos apesar de existir condições nas quais ela não é notada.

### **2.3.2 Secagem em leitos fluidizados**

A análise da secagem em leitos fluidizados é mais complicada do que apenas transferência de calor ou de massa isotérmica. Diferentes mecanismos podem controlar o processo, e podem ser observados diferentes regimes (períodos

de taxa de secagem constante e decrescente), além de existir fluidização agregativa, na qual há a formação de bolhas.

Há um grande número de estudos experimentais que fornecem boas explicações sobre o que está acontecendo no interior de um secador de leito fluidizado.

- *Efeito da altura do leito na taxa de secagem*

Reay e Baker (1985), em sua revisão sobre alguns parâmetros importantes na taxa de secagem, classificaram os materiais em duas categorias.

- I. Materiais como sílica gel, minério de ferro, e resina de troca iônica, que perdem água relativamente fácil. A maior parte da secagem é realizada numa curta distância da placa distribuidora, e o gás que deixa a fase densa provavelmente está perto do equilíbrio com os sólidos. O aumento da altura do leito acima da zona de secagem não aumenta significativamente a taxa de secagem.
- II. Materiais com uma alta resistência à transferência de massa como trigo, que seca de modo muito lento. O gás que deixa a fase densa está longe do equilíbrio com os sólidos, e o aumento da altura do leito produz um aumento proporcional na taxa de secagem.

- *Efeito da velocidade do gás na taxa de secagem*

Para materiais do tipo I, Reay e Baker (1985) verificaram como uma primeira aproximação que a taxa de secagem é diretamente proporcional à velocidade do gás, sugerindo, assim, que todo gás é igualmente efetivo no contato com os sólidos na região de secagem logo acima do distribuidor, se for pressuposto que a secagem de materiais desse tipo é um processo limitado pelo equilíbrio num leito fluidizado.

Com trigo como material fluidizado, encontrou-se que a taxa de secagem é relativamente independente da velocidade do gás. Isso é consistente com sua relativa alta resistência interna à transferência de umidade, isto é, a taxa interna de transferência controla a taxa de secagem global. A secagem de grânulos de fertilizantes NPK foi investigada por Vanecek *et al.* (1964), os quais encontraram que a taxa de secagem era independente da velocidade do gás fluidizante, sugerindo um comportamento do tipo II, como o trigo. Ajustaram com sucesso curvas da umidade de sólido em função do tempo com um modelo baseado na consideração que o transporte de umidade no interior das partículas obedece à Lei de Fick de difusão, com uma difusividade que depende somente da temperatura e da estrutura das partículas.

- *Efeito do tamanho das partículas na taxa de secagem*

A partir de dados experimentais da literatura com sílica gel (material do tipo I), Reay e Baker (1985) mostraram que um aumento do diâmetro de partícula  $d_p$  de 106 a 2247  $\mu\text{m}$  produziu um pequeno aumento na taxa de secagem, mantendo-se a velocidade do gás, temperatura e altura do leito constantes. Esses dados da literatura foram correlacionados pela seguinte equação:

$$\text{Taxa de secagem, } r \propto d_p^{0,1} \quad (25)$$

Em contraste, Vanecek *et al.* (1964) encontraram que para o fertilizante NPK (material do tipo II) o tempo exigido para remover uma dada quantidade de umidade foi proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula, estando exatamente de acordo com a predição de seu modelo difusivo.

- *Efeito da temperatura do leito na taxa de secagem*

Com dados da literatura de curvas de secagem em leitos fluidizados em diversas temperaturas para resina de troca iônica, minério de ferro (tipo I) e trigo (tipo II), Reay e Baker (1985) constataram que, como esperado, a temperatura do leito exerceu um forte efeito na taxa de secagem para todos esses três materiais, ou seja, conforme se aumentou a temperatura, aumentou-se a taxa de secagem.

## **2.4 Modelos de secagem em leitos fluidizados**

Vários modelos foram propostos na literatura com o intuito de se descrever o comportamento da operação de secagem em leitos fluidizados. Tanto aqueles que tratam o leito como um sistema homogêneo, quanto os que distinguem as diferentes fases constituintes, são apresentados a seguir, nesta seção.

De acordo com Brooker *et al.* (1992), a secagem de grãos em leito fluidizado pode ser simulada por um modelo com três equações. Sem levar em conta a existência de fases distintas, as hipóteses utilizadas foram: encolhimento desprezível, gradientes de temperatura no interior dos grãos desprezíveis, condução grão-a-grão desprezível, vazões de ar e de grãos constantes e em fluxo pistonado, estado estacionário ou pseudo-estacionário, paredes adiabáticas, capacidades caloríficas constantes para o ar úmido e para o grão num curto período de tempo, equações de secagem e de umidade de equilíbrio precisas, a evaporação da umidade ocorre na temperatura do ar de secagem, além de considerar que os grãos num leito fluidizado são perfeitamente misturados e que o ar que sai do leito está em equilíbrio térmico com os grãos. A partir de um balanço de energia em um leito de altura  $L$ , a equação resultante é:

$$\rho_s(1-\varepsilon)LCp_s \frac{dT}{dt} = \rho_s(1-\varepsilon)L\lambda \frac{dM}{dt} + \rho_g U_g Cp_g (T_{g0} - T_g) \quad (26a)$$

onde  $Cp_g$  é o calor específico do ar;  $Cp_s$  é o calor específico do sólido;  $\lambda$  é o calor latente de vaporização da água;  $U_g$  é a velocidade do ar;  $T_{g0}$  é a temperatura do ar na alimentação e  $T_g$  é a temperatura do ar de saída do leito.

Um balanço de massa no leito resulta:

$$\rho_g U_g (Y_g - Y_{g0}) = -\rho_s(1-\varepsilon)L \frac{dM}{dt} \quad (26b)$$

onde  $Y_{g0}$  e  $Y_g$  são as umidade do ar de alimentação e saída, respectivamente.

Uma terceira equação expressa a taxa de secagem de sementes individuais:

$$\frac{dM}{dt} = \text{equação de secagem de uma semente individual} \quad (26c)$$

Desta forma, para se encontrar a solução do modelo do secador de leito fluidizado (Equações ((26a) a ((26c)), são necessários uma equação para o teor de umidade de equilíbrio, as condições iniciais e os valores das propriedades do ar e dos grãos.

Ülkü e Uçkan (1986) modelaram a secagem de grão de milho num secador de leito fluidizado em batelada. Tal como em Brooker *et al.* (1992), o secador foi tratado como um sistema homogêneo, com bolhas ignoradas, e foi baseado na difusão de líquido e vapor dentro de cada semente de milho.

Lima (2004) simplificou o modelo a duas fases de Massarani e Silva Telles (1992), considerando equilíbrio térmico entre as fases gás e sólido. O modelo, que consiste de balanços de massa para a fase sólida e fase gás, além de um balanço de energia para a mistura gás-sólido, mostrou-se bastante vantajoso por não apresentar muitos parâmetros ajustáveis. Suas equações resultantes são apresentadas em seguida, juntamente com as respectivas condições iniciais:

Balanço de massa para a fase sólida:

$$(1 - \varepsilon)\rho_s \frac{d}{dt} Y_s = -f_{M1} \quad (27a)$$

onde  $Y_s$  é a umidade das partículas sólidas e  $f_{M1}$  representa a taxa de transferência de massa entre as fases sólida e gás.

Balço de massa para a fase gás:

$$\varepsilon\rho_g \frac{dY_g}{dt} + \frac{G_g}{L}(Y_g - Y_{g0}) = f_{M1} \quad (27b)$$

onde  $G_g$  representa o fluxo mássico do gás.

Balço de energia para a mistura gás-sólido:

$$\left[ \varepsilon\rho_g C_{p_g} + (1 - \varepsilon)\rho_s C_{p_s} \right] \frac{dT_m}{dt} + C_{p_g} \frac{G_g}{L}(T_m - T_{g0}) = -f_{M1}\lambda - E_{parede} \quad (27c)$$

onde  $T_m$  é a temperatura da mistura gás-sólido e  $E_{parede}$  é a taxa de dissipação térmica pelas paredes do leito.

Condições iniciais:

$$Y_s(0) = Y_{s0}$$

$$Y_g(0) = Y_{g0}$$

$$T_m(0) = T_{m0} = \frac{T_{s0} + T_{g0}}{2} \quad (27d)$$

Chandran *et al.* (1990) descreveram um modelo cinético para a secagem de resina de troca iônica e areia em um leito fluidizado, assumindo um período de secagem constante, seguido por um período de taxa decrescente de secagem linear. Realizando ensaios com operações em batelada e contínua, obtiveram bom ajuste com dados experimentais.

Os parâmetros significativos do modelo cinético analisado foram o coeficiente de secagem durante o período de taxa constante, os teores de umidade inicial, crítica e de equilíbrio do sólido, e averiguaram que são influenciados pela

escolha da temperatura e vazão de ar, pela altura do leito, e da vazão de sólidos no regime contínuo.

Syahrul *et al.* (2002) estudaram a transferência de calor e massa na secagem de milho em leito fluidizado, analisando a eficiência térmica do processo. Os efeitos da temperatura do ar de entrada, da velocidade do ar e do teor de umidade inicial foram investigados, obtendo bom ajuste com os dados experimentais. Observou-se alta eficiência térmica sempre no início do processo de secagem, uma vez que no final, com teores de umidade abaixo da umidade crítica, há uma maior resistência à transferência de massa e o efeito das variáveis externas pode não ser importante.

Hoebink e Rietema (1980, a e b) apresentaram um modelo que considera o escoamento do gás dividido de forma convencional em fase densa e fase bolha. Como simplificações é assumido tamanho uniforme da bolha ao longo do leito, e as bolhas são consideradas grandes suficientes e com velocidade de subida rápida suficiente relativa ao gás da fase densa para haver nuvens circundantes ao redor delas. Os sólidos foram assumidos estar perfeitamente misturados. Por analogia com a transferência de calor entre gás e sólido em leitos fluidizados, é considerado que o gás da fase densa atinge o equilíbrio de transferência de massa com os sólidos a uma pequena distância do distribuidor. No primeiro artigo Hoebink e Rietema (1980a) assumiram limitação difusional desprezível no interior das partículas, de modo que o teor de umidade fosse uniforme em toda a partícula. No segundo artigo Hoebink e Rietema (1980b) consideraram um modelo difusional para a transferência de massa dentro das partículas. Então, existirá um perfil de concentração definido no interior das partículas e a concentração na superfície, que define a concentração do vapor do gás da fase densa, será menor do que a

concentração média. Seus resultados da simulação apresentaram somente uma concordância qualitativa com dados da literatura.

O modelo de Hoebink e Rietema (1980, a e b) está relacionado fundamentalmente com a umidificação progressiva das bolhas à medida que sobem pelo leito. Assumiu-se que o gás deixa a bolha no topo, atravessa a nuvem em escoamento empistonado concorrentemente aos sólidos da fase densa, e entra novamente na bolha pelo fundo. Na nuvem, troca-se calor e massa entre as partículas e o gás. Além disso, ocorre transferência difusional na fronteira entre a fase densa e a nuvem. As variações no teor de umidade e temperatura nas bolhas, que são consideradas idealmente misturadas, são devido ao escoamento convectivo do gás da bolha através da nuvem. Os cálculos foram feitos segundo a teoria de nuvem de Davidson-Harrison e a de Murray. Verificaram que a taxa de umidificação das bolhas decai acentuadamente com o aumento do tamanho das bolhas.

Segundo Reay e Baker (1985), em um secador de leito fluidizado real as bolhas são pequenas quando saem do distribuidor e crescem rapidamente por aglutinação à medida que sobem pelo leito. Por essa razão a umidificação do gás da bolha ocorrerá principalmente nas partes mais baixas do leito, como indicado em dados experimentais mostrados por Mostafa (1977) *apud* Reay e Baker (1985), referentes ao efeito da altura do leito na taxa de secagem. No entanto, Hoebink e Rietema (1980, a e b) não levaram em conta o crescimento da bolha em função da altura do leito.

Palancz (1983) propôs um modelo que descreve a secagem de materiais em leito fluidizado contínuo no qual se assume que o secador pode ser dividido em três fases: uma fase diluída ou bolha, fase de gás intersticial e uma fase sólida. Foram feitas simulações computacionais para estudar o efeito do tamanho da partícula e da

bolha, da velocidade e temperatura do gás de entrada e tempo de residência e no teor de umidade final dos sólidos de saída.

Foi mostrado que se podia considerar este modelo como uma extensão dos modelos tradicionais baseados na suposição de equilíbrio entre as correntes de saída, uma vez que, se fosse desprezada a resistência externa à transferência de calor e massa, o modelo proposto poderia ser reduzido a um modelo de “equilíbrio”. No entanto, não foi levada em conta a resistência interna ao transporte de massa e calor no interior da partícula sólida.

Um aprimoramento do modelo de Palancz (1983) foi proposto por Lai *et al.* (1986) para um leito fluidizado contínuo, cujos resultados de simulações indicaram que a taxa de secagem é influenciada pela velocidade superficial do gás, temperatura do gás, temperatura da parede e pelo tempo de residência médio. Este modelo, em contraste com o de Palancz (1983), incorpora a variação do calor específico do gás de secagem devido à migração de umidade a partir das partículas sólidas. Os resultados mostraram que a consideração de calor específico constante levava a uma sobre-estimação da temperatura e umidade das partículas. Outra alteração apresentada por Lai *et al.* (1986) foi a correção da descontinuidade existente na expressão de teor de umidade do gás de secagem na superfície da partícula.

Tsotsas (1994) desenvolveu um modelo a duas fases para um secador de leito fluidizado em batelada, e suas considerações mais importantes foram: leito subdividido em fase bolha livre de partículas e uma fase densa, escoamento empistonado na fase bolha, escoamento empistonado ou perfeitamente misturado na fase densa, partículas perfeitamente misturadas. A cinética de secagem normalizada para uma partícula individual era medida separadamente numa

balança. O parâmetro cinético da transferência de massa entre as partículas e o gás da suspensão é o NTU (número de unidades de transferência).

Mais tarde, Groenewold e Tsotas (1997) apresentaram um aprimoramento do modelo anterior, apontando a principal falha do primeiro, que foram baixos números de Sherwood ( $Sh$ ), necessários para um bom ajuste. Foram feitas as seguintes mudanças no “novo modelo”: a razão volumétrica entre as vazões da fase bolha e total foi determinada por uma equação mais confiável, que depende da altura do leito e da classificação de Geldart das partículas; corrigem proporcionalmente o valor do parâmetro NTU em função da altura do leito; e a mudança mais importante está relacionada à estrutura do modelo, onde definem um Sherwood “aparente”, que serve de ligação entre dois níveis de operação, sendo que é levado em conta mistura perfeita do gás no primeiro, enquanto considera-se escoamento pistonado no segundo nível.

Utilizando-se da teoria de duas fases de fluidização, Zahed *et al.* (1995) consideram três etapas de transferência de massa, isto é, transferência de massa da fase bolha à fase densa, transferência de massa gás-partícula na fase densa e o transporte interno de umidade. Este modelo não usa nenhum parâmetro ajustável e as propriedades do sistema tais como coeficiente de difusão, calor latente e teor de umidade na superfície da partícula sólida são funções das condições operacionais (temperatura e teor de umidade médio).

Estudaram, através de simulações, o efeito da razão entre os escoamentos da fase bolha ( $G_b$ ) pela fase densa ( $G_d$ ), do diâmetro das partículas, da temperatura do ar de entrada, do tamanho da bolha, entre outros, na taxa de secagem, verificando que a umidade final do produto é menor sempre que a transferência de calor e massa é favorecida, ou seja, temperatura alta na entrada aumenta a taxa de

secagem, enquanto que tamanhos grandes da bolha ou da partícula prejudicam o processo. Apesar de não ter sido validado experimentalmente, nota-se que todas as tendências preditas pelo modelo foram consistentes com dados experimentais.

Usando serragem, soja e farinha de peixe, Alvarez e Shene (1996) apresentaram uma metodologia para estimar o coeficiente de transferência de calor utilizando dados do período de taxa constante de secagem, assumindo haver mistura perfeita de sólidos na fluidização. Encontraram valores menores do que estimados por correlações da literatura, uma vez que estas foram deduzidas a partir de experimentos de aquecimento e não de secagem.

Propuseram dois modelos baseados na Lei de Fick para descrever o processo de transferência de umidade na secagem da partícula sólida. O primeiro assumia existir resistência à transferência de massa externa e difusividade efetiva constante, enquanto o segundo considerava a difusividade efetiva uma função do histórico de secagem (umidade, tempo) e admitia equilíbrio entre a umidade do sólido e do ar (sem resistência externa ao transporte de massa). Os resultados mostraram que o segundo modelo se ajustou melhor aos dados experimentais, porém seu uso em outros sistemas (outros sólidos e/ou condições operacionais) é comprometido pelo fato de um parâmetro do modelo não ter mostrado uma relação clara com as variáveis analisadas (temperatura e tamanho das partículas).

Wildhagen *et al.* (1998), ao estudar a secagem de partículas de alumina em leito fluidizado, constataram que o modelo a duas fases (fase sólida – sólido seco e água líquida e fase gasosa – ar e vapor de água) necessitava ser modificado para levar em consideração a presença das bolhas. Visando corrigir esta falha, Wildhagen *et al.* (1999) avaliaram a influência da adição da fase bolha ao modelo a duas fases, apresentando, portanto um modelo a três fases (sólida, gás intersticial e bolha) para

descrever a secagem em leitos fluidizados. O modelo a três fases possibilitou uma melhora na simulação dos perfis de temperatura e umidade do sólido e do gás em relação aos resultados obtidos com o modelo a duas fases.

Wildhagen *et al.* (2002), utilizando o modelo a três fases (sólida, gás intersticial e bolha), proposto por Wildhagen *et al.* (1999), otimizaram a simulação da secagem em leito fluidizado, utilizando um outro pacote computacional (LSODAR) e determinaram de uma forma diferente os coeficientes de transferência de calor e massa. Os coeficientes foram determinados utilizando-se as equações propostas por Kunii e Levenspiel (1991), devido à sua simplicidade e precisão. Para a determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa, Wildhagen *et al.* (2002) realizaram um balanço de massa e de energia para as partículas sólidas, o gás intersticial e para a fase bolha. Os resultados mostraram que o modelo proposto foi capaz de prever adequadamente a influência de condições operacionais no teor de umidade, da temperatura das partículas e do gás de saída durante a secagem.

Vitor (2003) modificou o modelo de Wildhagen *et al.* (2002) ao introduzir perdas de calor pelas paredes da coluna, a condição de mistura perfeita ou empistonada para o gás intersticial na fase emulsão, e a fração verdadeira do gás em excesso que compõe a fase bolha para partículas do grupo B de Geldart. A nova versão do modelo foi representada por um sistema de equações algébrico-diferencial, fácil de ser resolvido uma vez que a entalpia para cada fase, expressa como função da temperatura, é formulada como uma restrição algébrica do modelo.

As equações de balanço de massa e energia para as fases sólida, gás intersticial e bolha são escritas, como seguem, admitindo regime de escoamento empistonado:

### 1. Fase sólida

$$(1-\varepsilon)\rho_s \frac{d}{dt} Y_s = -f_{M1} \quad (28a)$$

$$(1-\varepsilon)\rho_s \frac{d}{dt} H_{su} = f_{E1} - f_{M1} (H_u + \lambda_u) \quad (28b)$$

$$H_{su} = H_s + H_u Y_s \quad (28c)$$

### 2. Fase gás intersticial

$$\frac{\partial}{\partial t} Y_{gi} + G_{gi} \frac{\partial}{\partial z} Y_{gi} = f_{M1} - f_{M2T} \quad (29a)$$

$$(1-\delta)\varepsilon_{mf} \rho_g \frac{\partial}{\partial t} H_i + G_{gi} \frac{\partial}{\partial z} H_i = f_{E2T} - f_{E1} + f_{M1} (H_u + \lambda_u) - f_{M2T} H_{vi} - E_{parede} \quad (29b)$$

$$H_i = H_{gi} + H_{vi} Y_{gi} \quad (29c)$$

### 3. Fase bolha

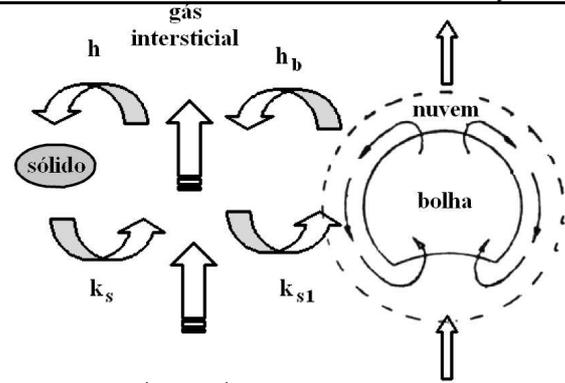
$$\delta\rho_g \frac{\partial}{\partial t} Y_{gb} + G_{gb} \frac{\partial}{\partial z} Y_{gb} = f_{M2} \quad (30a)$$

$$\delta\rho_g \frac{\partial}{\partial t} H_b + G_{gb} \frac{\partial}{\partial z} H_b = f_{M2} H_{vi} - f_{E2} \quad (30b)$$

$$H_b = H_{gb} + H_{vb} Y_{gb} \quad (30c)$$

As Equações (28a) e (28b) representam, respectivamente, os balanços de massa e energia para a fase sólida, enquanto a Equação (28c) define a entalpia dos sólidos úmidos,  $H_{su}$ , como uma função da entalpia dos sólidos secos,  $H_s$ , e a entalpia da água,  $H_u$ . Nota-se que  $f_{M1}$  e  $f_{E1}$  são, respectivamente, as taxas de transferência de massa e calor entre as fases sólida e gás intersticial ao longo da altura do leito, conforme é ilustrado no Quadro 2.4, que esquematiza as interações entre as fases do modelo proposto por Vitor *et al.* (2004).

Quadro 2.4: Interações entre as fases (Vitor *et al.*, 2004)

 <p>com <math>a = \frac{6(1 - \varepsilon_{mf})}{d_p \phi}</math></p>	$f_{E1} = ha(T_{gi} - T_s) \quad f_{M1} = k_s a(Y_s - Y_{Seq})$ $f_{E2} = h_b a_1(T_{gb} - T_{gi}) \quad f_{M2} = k_{s1} a_1(Y_{gi} - Y_{gb})$ $f_{E1T} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_{E1}^{(k)} \quad f_{M1T} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_{M1}^{(k)}$ $f_{E2T} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_{E2}^{(k)} \quad f_{M2T} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_{M2}^{(k)}$
$\frac{1}{h_b a_1} = \frac{1}{h_{bc} a_b} + \frac{1}{h_{ci} a_i}$	$h_{bc} a_b = 4,5\delta \left( \frac{Gg_{mf} Cp_g}{d_b} \right) + 5,85\delta \left( \frac{(k_g C_{pg} \rho_g)^{0,5} g^{0,25}}{d_b^{1,25}} \right)$ $h_{ci} a_i = 6,78 \cdot \delta \cdot (Cp_g \cdot \rho_g \cdot k_g)^{1/2} \left[ \frac{\varepsilon_{mf} \cdot Gg_b}{\rho_g \cdot d_b^3} \right]^{1/2}$
$\frac{1}{k_{s1} a_1} = \frac{1}{k_{bc} a_b} + \frac{1}{k_{ci} a_i}$	$k_{bc} a_b = \delta \rho_g \left\{ 4,5 \left( \frac{Gg_{mf}}{d_b \rho_g} \right) + 5,85 \left( \frac{(D_{vg})^{0,5} g^{0,25}}{d_b^{1,25}} \right) \right\}$ $k_{ci} a_i = 6,78 \cdot \delta \rho_g \cdot \left[ \frac{\varepsilon_{mf} D_{vg} \cdot Gg_b}{\rho_g \cdot d_b^3} \right]^{1/2}$

Da mesma forma, as Equações (29a) e (29b) representam, respectivamente, os balanços de massa e energia para a fase gás intersticial. A Equação (29c) define a entalpia da fase gás intersticial,  $H_i$ , como uma função das entalpias do gás seco,  $H_{gi}$ , e do vapor,  $H_{vi}$ . Semelhantemente,  $f_{M2}$  e  $f_{E2}$  representam as taxas de transferência de massa e calor entre as fases gás intersticial e gás bolha ao longo de uma altura infinitesimal do leito,  $dz$ .

Por fim, as Equações (30a) e (30b) representam, respectivamente, os balanços de massa e energia para a fase gás bolha. A Equação (30c) define a entalpia dessa fase bolha,  $H_b$ , como uma função das entalpias do gás bolha seco,  $H_{gb}$ , e do vapor,  $H_{vb}$ . Além disso, os coeficientes de transferência de calor e massa

entre as fases gás intersticial e gás bolha ( $h_b$  e  $k_{s1}$ , respectivamente) são estimados segundo as correlações propostas por Kunii e Levenspiel (1991), apresentadas no Quadro 2.4.

Burgschweiger e Tsotsas (2002) estenderam o modelo a três fases para a operação contínua, possibilitando simulações dinâmicas. As principais considerações foram: distribuição do tempo de residência das partículas comportando-se como em um reator de tanque de mistura; mistura perfeita das partículas; fases bolha e gás na suspensão empistonadas; transferência de calor e massa somente entre a suspensão e a bolha; transferência de calor entre a parede e o ambiente e cada fase; cinética de secagem em nível de uma partícula isolada, como base para a normalização. O modelo obtido é constituído pelos balanços de massa e energia da fase gás; pelo balanço de energia aplicado à parede do secador avaliaram-se as perdas de energia para o ambiente; pelas equações do balanço populacional das partículas e pelas equações da cinética da secagem. A justificativa da normalização da cinética de secagem em função da secagem de uma partícula isolada ampara-se na necessidade de remover as influências das transformações do modo batelada para o contínuo. Como não há parâmetros ajustáveis em seu modelo, conseguiu-se concordância satisfatória entre o simulado e o medido.

Satish e Pydi Setty (2005) também abordaram esse problema de “conversão” das equações empíricas de secagem em leito fluidizado em batelada. Por não existir muita informação na literatura sobre as equações empíricas que definem as relações entre condições de operação e comportamento do material, propuseram explorar o potencial das redes neurais para representar o processo de secagem em leito fluidizado contínuo. O desempenho, comparado ao modelo de “Tanques em série”, saiu-se melhor.

Izadifar e Mowla (2003) propuseram um modelo a duas fases - sólida e gás - para a simulação de secagem de arroz em casca em um secador de leito fluidizado contínuo de fluxo cruzado. Utilizaram os balanços de quantidade de movimento, massa e energia, além da discretização do leito na direção horizontal (sentido do escoamento de sólidos) e na direção vertical (sentido da corrente gasosa). A partir de apenas dois dados experimentais disponíveis foi “validado” o modelo, com resultados satisfatórios.

Como se observa, existe uma grande variedade de modelos para leitos fluidizados, sendo que a principal diferença está na representação dos escoamentos das fases e na interação entre elas. Geldart (1990), por exemplo, afirmou existir pelo menos 15 modelos de reatores químicos em leitos fluidizados, dos quais 12 se baseavam no modelo a duas fases (com bolhas). A maioria havia sido revisada por Grace (1986) e Yates (1983), e já que nenhum é claramente melhor do que o outro, prefere-se o mais simples. Destacam-se três parâmetros chave nesses modelos:  $\psi$ : fração de gás que atravessa o leito na forma de bolhas;  $K_{BD}$ : taxa de troca de massa entre as bolhas e a fase densa; e  $k_n$ : constante cinética da reação de ordem  $n$ , a qual se pode fazer analogia à cinética de secagem.

A falta de consenso reside na constante de proporcionalidade,  $\psi$ , que divide essa vazão. Além de depender do tipo de partícula (classificação de Geldart), relaciona-se com o regime de fluidização. Dessa forma, torna-se necessário conhecer os tipos de regime e como identificá-los. Em seguida, são mostrados alguns trabalhos que apresentam boas maneiras de se reconhecer, com qualidade mais refinada, a fluidodinâmica do leito. Transdutores de pressão conectados a um sistema de aquisição de dados são comumente utilizados por diversos

pesquisadores para medir a queda de pressão no leito. De um conjunto de pontos coletados em um intervalo de tempo, determina-se, por exemplo, o desvio padrão.

Oliveira Jr. (2003), Garim (1998), Camargo e Freire (2002), Daleffe (2002) usaram a técnica do desvio padrão através do uso de transdutores. Com essa técnica é possível observar as flutuações na queda de pressão, as quais geralmente não são detectadas visualmente nos manômetros de água. Garim (1998) verificou que pode se obter uma boa representação das mudanças que ocorrem na resistência do leito devido à permeabilidade, ao movimento das partículas e à formação de bolhas provenientes do escoamento de ar no leito.

DiMattia *et al.* (1997), através do perfil de flutuações de pressão, propuseram correlações para predizer a velocidade mínima e a frequência de *slugs* para partículas do Grupo D, verificando que a forma da partícula influencia o tipo de *slug* formado. Concluíram que o uso dessa técnica de conexão de uma sonda de pressão no leito a um transdutor de pressão diferencial que gera dados registráveis, apesar de simples, é um meio muito efetivo de se estudar o fenômeno de *slugging*.

Felipe e Rocha (2004) mostraram que a análise das flutuações de pressão se mostrou um método viável para identificação dos regimes de fluidização, o qual possibilitou distinguir claramente três regimes diferentes: bolha simples, bolhas múltiplas e *slugging*. Compararam o emprego dos métodos absoluto e diferencial de medida de flutuação de pressão, e encontraram comportamentos semelhantes. Também verificaram que a câmara de pleno é um local prático e confiável para as medições, uma vez que fornece as mesmas informações dos pontos usuais, além de apresentar a vantagem das sondas de pressão não serem obstruídas por sólidos finos.

Baseado no que foi exposto, nota-se que ainda há uma falta de informações sobre a secagem de sementes de gramíneas (*Brachiaria brizantha*) em secadores do tipo leito fluidizado. Muitos são os modelos propostos na literatura para descrever o processo de secagem nesse tipo de secador, porém nem todos são validados experimentalmente.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um secador para operação em batelada, e realizar um estudo da fluidodinâmica, transferência de calor e da secagem de sementes de gramíneas em leito fluidizado. Para tanto, efetuou-se o estudo sobre o tema, através do cumprimento das seguintes etapas:

- desenvolvimento da parte experimental, através da construção do leito fluidizado em coluna de vidro e instalação dos acessórios típicos de medida (placa de orifício, termopares, manômetro em U, transdutor de pressão, coletor de sólido para umidade, termohigrômetro);
- conexão do conjunto a um sistema de aquisição automática de dados (para registro de variações de temperatura e pressão);
- testes preliminares fluidodinâmicos, térmicos e de secagem no leito para aferição do sistema de medida (incluindo o método da estagnação para determinação da temperatura das partículas);
- ensaios para determinação da cinética de secagem das sementes de gramíneas utilizadas (partículas isoladas e/ou no conjunto);
- ensaios de transferência de calor e de secagem propriamente ditos com condições de temperatura e vazão de ar pré-determinadas;
- avaliação da qualidade das sementes antes e após os ensaios de secagem;

- modelagem da transferência de calor e massa em leite fluidizado a partir da aplicação das equações de conservação de massa e energia para as fases sólida, gás intersticial e bolha. Em princípio, usou-se o modelo proposto por Vitor *et al.* (2004);
- determinação, via pacotes PSO e ESTIMA (linguagem Fortran), dos parâmetros de transferência contidos no modelo a três fases proposto por Vitor (2003);
- verificação experimental dos modelos a três fases e a duas fases, propostos por Vitor (2003) e Lima (2004), respectivamente;
- simulação computacional, a partir da escolha do modelo mais apropriado, do processo de secagem em leite fluidizado para diversas condições operacionais;
- verificação experimental do(s) modelo(s) finalmente adotado(s);
- análise de sensibilidade dos modelos empregados visando discutir os pontos de incerteza dos mesmos; e
- comparação experimental dos modos de operação do equipamento (leito fixo e leite fluidizado).

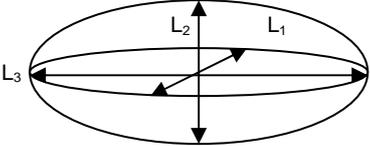
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no trabalho.

#### 3.1 Material

Neste trabalho foram utilizadas sementes de *Brachiaria brizantha* como material de estudo. A escolha desta semente se deve ao interesse técnico-científico na análise do processo de secagem desta que é uma das espécies de gramínea mais utilizadas na formação de pastagens, além ser um tipo de semente que apresenta basicamente período decrescente de taxa de secagem. O Quadro 3.1 mostra as propriedades físicas das sementes, juntamente com a técnica de medida empregada.

Quadro 3.1: Propriedades físicas das sementes.

Propriedades da partícula	Técnicas experimentais
Massa específica (em $Y_s = 0,063$ ): $\rho_s \text{ (kg/m}^3\text{)} = 1018 \pm 20$	Picnometria com éter (este trabalho).
Dimensões: $L_1 \text{ (m)} = 3,61 \times 10^{-3}$ ; $L_2 \text{ (m)} = 1,86 \times 10^{-3}$ $L_3 \text{ (m)} = 1,5 \times 10^{-3} + 2,67 \times 10^{-3} \left( \frac{y_s}{1 + y_s} \right)$	Medidas diretas das dimensões $L_1$ , $L_2$ e $L_3$ em níveis diferentes de teor de umidade (Arnosti Jr. <i>et al.</i> , 2000)
$d_p = \left[ V_p \frac{6}{\pi} \right]^{1/3}; \quad \phi = \frac{\pi d_p^2}{S_p}$ para $Y_s = 0,060$ : $d_p \text{ (m)} = 2,23 \times 10^{-3}$ ; $\phi = 0,92$	
Calor específico médio ( $0,098 < Y_s < 0,174$ ) $c_{ps} \text{ (J/kg K)} = 428$	

De acordo com a classificação de Geldart, as sementes encontram-se no grupo D – composto por partículas relativamente grandes e/ou muito densas. –, conforme pode ser visto na Figura 3.1. A experimentação constatou que, apesar de

estar na região do tipo jorro, a fluidização se mostrou bem adequada. Possivelmente isso se deve às características estruturais típicas da semente.

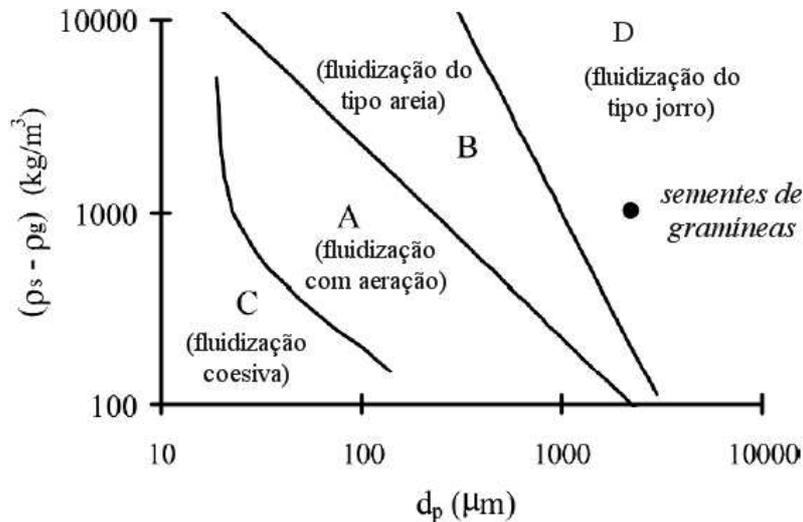


Figura 3.1: Classificação de Geldart para fluidização de partículas no ar em condições ambientes (adaptado de Geldart, 1986).

### 3.2 Equipamento

Para o desenvolvimento deste estudo, foi utilizado um secador de leito fluidizado de laboratório, fabricado por Shrewood Scientific Ltd, adquirido pelo Centro de Secagem do DEQ/UFSCar, e esquematizado na Figura 3.2.

A base do conjunto do leito fluidizado é formada por um aquecedor elétrico, um controlador de temperatura, um timer e um soprador de ar. O aquecedor de 2 kW, provido de aletas, promove temperaturas do ar de entrada até  $200^\circ\text{C}$ . O controlador de temperatura PID fornece uma precisão de  $\pm 1^\circ\text{C}$  em toda a faixa de operação. A vazão de ar é variada usando o controlador de velocidade do soprador que varia de  $0,215 \text{ m}^3/\text{min}$  até  $0,270 \text{ m}^3/\text{min}$  (faixa fluidizável até o máximo do soprador). O ar é retirado através de uma malha de filtro na base do sistema e soprado por uma hélice centrífuga, passando pelo aquecedor elétrico e através de um filtro de malha de aço inoxidável na base do corpo do secador.

O restante do equipamento, que foi construído e instrumentado no decorrer do trabalho, compõe-se de uma coluna com 7 cm de diâmetro e 40 cm de altura, e em vidro para permitir a visualização do regime de fluidização.

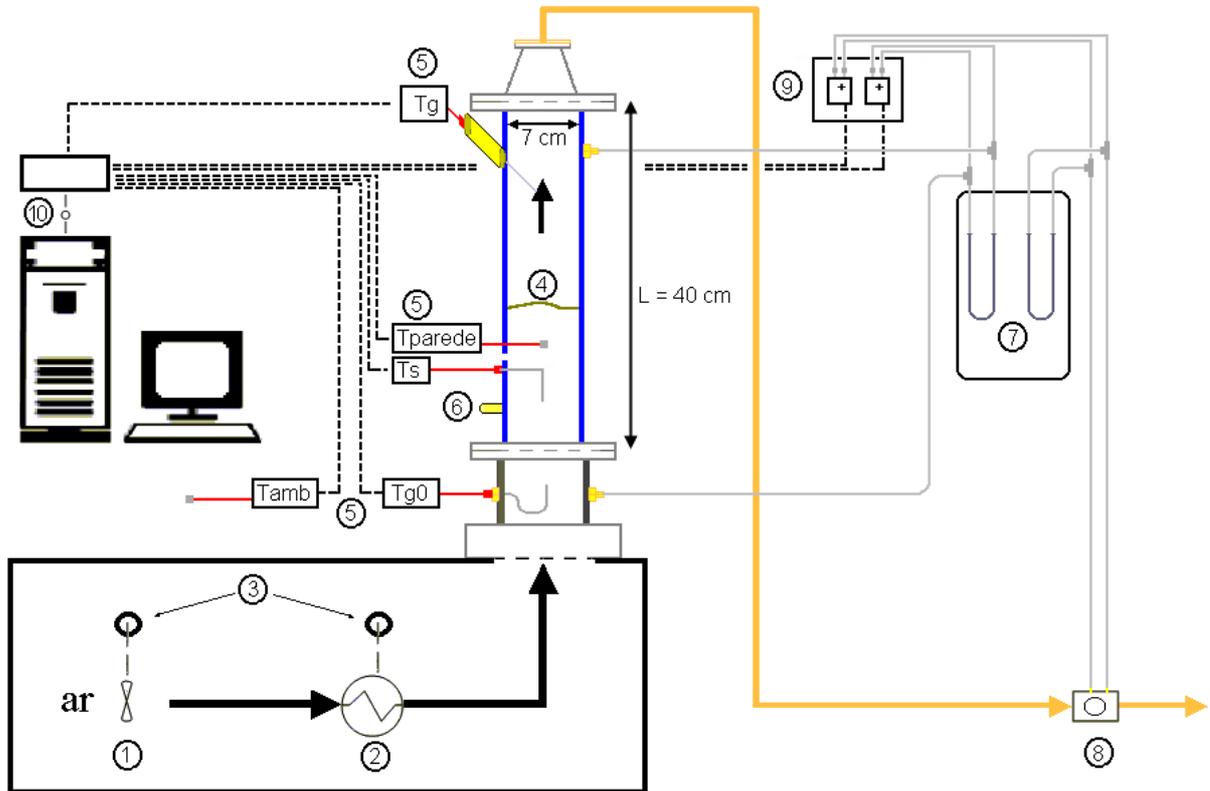


Figura 3.2: Esquema do leito fluidizado: 1) soprador; 2) aquecedor elétrico; 3) controles de vazão e temperatura; 4) coluna de vidro; 5) termopares; 6) local de retirada de amostra; 7) manômetros de água; 8) placa de orifício; 9) transdutores de pressão e 10) sistema de aquisição de dados.

O ar aquecido atravessa o leito de partículas, fluidizando-o e segue para a placa de orifício previamente calibrada ( $Q = 0,0681\sqrt{\Delta h}$ , sendo  $Q$  em  $\text{m}^3/\text{min}$ , e  $\Delta h$  em  $\text{cm H}_2\text{O}$ ), na qual é registrada e monitorada a sua vazão. Um manômetro de água em U é usado para monitorar a queda de pressão no leito. Ambos os manômetros, usados apenas para calibrar o sistema de aquisição, estão conectados a transdutores de pressão da marca Auto Tran Incorporated, que operam na faixa de 0 a 10 polegadas de água, com suprimento de voltagem de 12-24 V.

Quatro termopares de cobre-constantan encontram-se acoplados à coluna. O primeiro, inserido no interior da coluna antes da placa distribuidora, mede a

temperatura do ar de entrada. O segundo, instalado no interior da coluna, é posicionado a 10 cm acima do distribuidor de ar, registrando a temperatura média do sistema gás-sólido e a temperatura das sementes, quando da aplicação do método da estagnação. O terceiro termopar, inserido no interior da coluna a 38 cm de altura de sua base, mede a temperatura do ar de saída. O quarto termopar, fixado sobre a superfície externa da coluna (a 13 cm da base), registra a temperatura da parede da coluna ao longo dos testes. Um quinto termopar, instalado próximo à unidade experimental (distante cerca de 50 cm do quarto termopar), registra a evolução da temperatura ambiente durante os experimentos.

Tanto os transdutores de pressão como todos os termopares estão conectados a um sistema de aquisição de dados, que consiste em um módulo aquisitor externo (modelo Personal Daq 56, fabricado pela IOtech Inc.), ligado a um microcomputador, com processador AMD-K6, via porta USB. O “software” de aquisição (*Personal DaqView*, fornecido pelo fabricante) coleta a uma frequência pré-selecionada os pontos em uma determinada base de tempo, fornecendo como resposta os dados não tratados, sendo necessário um tratamento estatístico posterior.

Um sistema de coleta de amostras, localizado a 7 cm da base, é utilizado para a retirada de sementes, ao longo dos experimentos, a fim de se medir o teor de umidade das mesmas. Emprega-se, nesta medição, o método de estufa, a  $(105 \pm 3)^\circ\text{C}$  por 24 horas. A precisão da balança utilizada, da marca GEHAKA, é de  $1 \times 10^{-6}$  kg.

Além do leito já descrito, também foi desenvolvido um leito segmentado, em acrílico, para comparar os modos de operação do leito. A Figura 3.3 apresenta uma foto do leito cilíndrico seccionado, de 6,0 cm de diâmetro, onde foram executados

experimentos operando-se como leito fixo e fluidizado, com o objetivo de se verificar a existência de perfis axiais de temperatura e umidade no equipamento. Esse leito é formado por dez anéis encaixáveis de 2,5 cm e três de 5,0 cm de altura, sendo possível ajustar a altura total pela escolha do número de anéis. Trabalhou-se com o número máximo de anéis, totalizando 40 cm de altura. Em cada um dos anéis há um orifício disponível para se inserir tomadas para medidas de pressão ou temperatura.

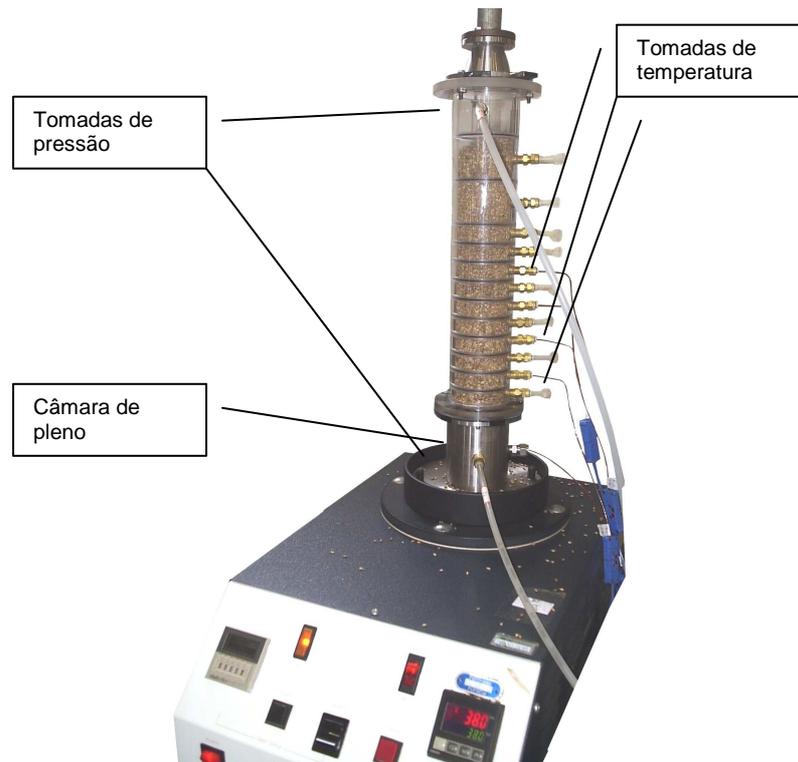


Figura 3.3: Foto do leito segmentado.

Neste trabalho, utilizou-se apenas o orifício do anel superior para tomada de pressão, sendo que a tomada de pressão inferior foi posicionada na câmara de pleno, logo abaixo da placa de distribuição de ar. No estudo com esse leito seccionado, os termopares foram instalados nas posições 1,5 cm, 6 cm, 10 cm e 14 cm acima da placa distribuidora. Através da retirada sucessiva dos anéis ao término da operação, é possível coletar amostras em pontos pré-estabelecidos para a determinação da umidade das partículas ao longo do leito. Os pontos médios

escolhidos para essas coletas encontram-se nas alturas 2 cm, 6 cm, 10 cm, 14 cm e 18 cm.

### 3.3 Procedimento

#### 3.3.1 Preparação do material

Antes de se efetuarem os testes propostos, as sementes foram submetidas a um tratamento preliminar para retirada de impurezas, as quais perfizeram 55% a 70% da massa total coletada. Três etapas compõem esta operação de separação, a saber: 1) peneiramento do material, que limita o diâmetro das partículas a uma faixa entre 2,00 a 2,36 mm; 2) passagem de ar no leito destas partículas para remover os finos e 3) coleta manual dos torrões remanescentes.

No caso de se desejar executar ensaios de secagem, após esse tratamento, as sementes são reumidificadas artificialmente em um recipiente fechado, contendo ar sob condições próximas a sua saturação. Um esquema do equipamento utilizado no processo de reumidificação das sementes é mostrado na Figura 3.4.

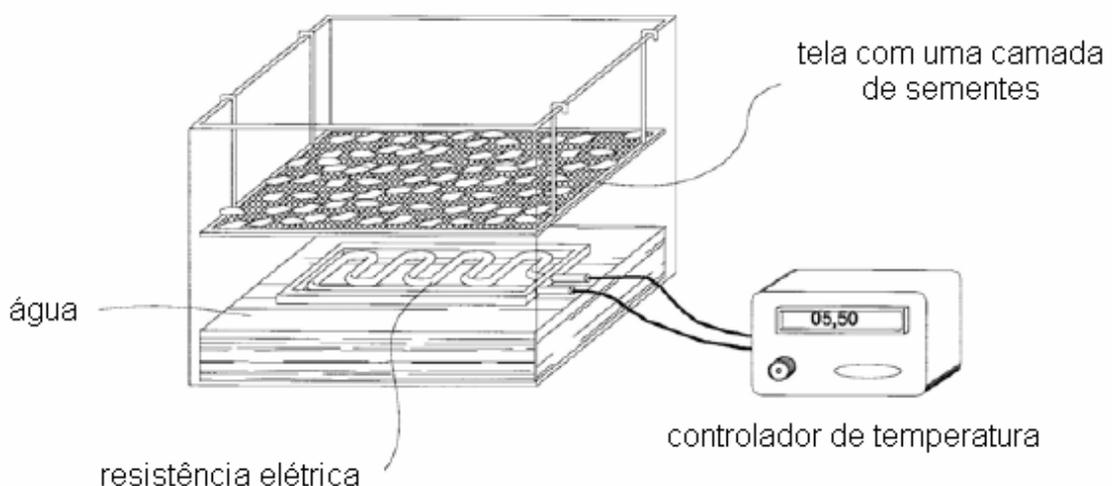


Figura 3.4: Esquema do equipamento utilizado para a umidificação das sementes.

Neste umidificador, ar e água são aquecidos por resistências elétricas, as quais se encontram acopladas a um controlador de temperatura para propiciar a saturação do ar à temperatura desejada (por exemplo, 40°C). A amostra de semente é, então, depositada em uma tela de sustentação e deixada repousar nesta atmosfera por dois dias até atingir sua umidade de equilíbrio, que, neste caso, é próxima à umidade de colheita (aproximadamente 0,20 b.s.).

### **3.3.2 Fluidodinâmica e secagem**

O procedimento padrão de determinação da fluidodinâmica do leito é obter uma curva de queda de pressão em função da velocidade ou vazão do ar que percola o leito, que é chamada de curva característica do leito. Desta curva é possível obter a queda de pressão na velocidade de mínima fluidização e a velocidade mínima de fluidização. A análise da fluidodinâmica foi feita em função da variação de parâmetros nos ensaios, como temperatura e altura do leito.

Após a fluidodinâmica foi feita a análise da secagem propriamente dita. Escolhidas as condições de operação a partir do ajuste da altura do leito, vazão do ar e temperatura do ar de entrada, os termopares distribuídos no leito forneceram a temperatura do ar, do sólido e da mistura, enquanto foram tomadas medidas de umidade do ar na saída do leito. A umidade da amostra foi medida pelo método gravimétrico.

Utilizando-se as mesmas condições de operação dos testes de secagem, foram executados ensaios de transferência de calor com o intuito de se determinar os parâmetros de transferência de calor das sementes secas. O objetivo do emprego das sementes secas nessa etapa foi para tentar descrever apenas o mecanismo de transferência de calor no leito fluidizado.

### 3.3.3 Condições operacionais

As vazões de ar de secagem estão limitadas à faixa de 0,215 m<sup>3</sup>/min, pouco acima da mínima fluidização, e 0,270 m<sup>3</sup>/min, valor máximo atingido pelo soprador do leito. Os ensaios no secador foram realizados em temperaturas de 30°C a 50°C, uma vez que valores inferiores dificilmente são conseguidos em função do aquecimento provocado pelo soprador, e valores superiores não são recomendados para não degradar as sementes. As condições térmicas também obedecem aos requisitos de qualidade estabelecidos para estas sementes, com base no trabalho de Arnosti Jr. (1997).

### 3.3.4 Técnicas de medida de temperatura

Como já descrito no item 3.2, referente ao equipamento, os termopares de cobre-constantan posicionados ao longo do leito foram utilizados para a medida das temperaturas. Destaca-se o termopar inserido no interior do leito a 10 cm da base, que mede a temperatura média da mistura gás-sólido, além de ser também usado para o registro da temperatura das partículas, ao se aplicar o método da estagnação do leito.

De acordo com Sartori (1986), em seu levantamento sobre técnicas de medidas de temperaturas, mediante a aplicação de um modelo de uma fase em meios porosos – em que não se faz distinção entre as temperaturas do constituinte fluido e do constituinte sólido –, a medida de temperatura é determinada diretamente pela introdução de um termoelemento no leito, em que a temperatura da mistura corresponde a um valor intermediário entre as temperaturas das fases gás e sólido.

Por outro lado, em situações em que se desejem conhecer as temperaturas das fases gás e sólido, as medidas são mais difíceis, pois é necessária a

determinação da temperatura de cada fase. As medidas de temperatura da fase gás são realizadas diretamente no leito, através do uso de um termopar sem proteção, por exemplo. Com relação à temperatura do sólido, duas das técnicas indicadas por Sartori (1986) e testadas neste trabalho são calorimetria e estagnação do leito. Adiante, no item 4.2, será explicado porque foi adotada a segunda técnica, cuja única exigência é que a capacidade térmica do sólido seja superior à capacidade térmica do gás.

### 3.4 Tratamento de dados

Os dados de fluidodinâmica do leito de sementes foram obtidos para se caracterizar os parâmetros de escoamento do material em estudo, tais como velocidade e pressão de mínima fluidização. Para esse fim, foram construídas curvas de queda de pressão no leito em função da velocidade de ar, para as diferentes condições operacionais testadas.

#### 3.4.1 O modelo matemático a três fases

O modelo de secagem a três fases adotado neste trabalho foi o de Vitor (2003), que considera que os sólidos estão perfeitamente misturados, enquanto as bolhas e a fase gás intersticial se deslocam pela coluna em regime de escoamento empistonado. As equações dos balanços de massa e energia para as fases sólida, gás intersticial e gás bolha são rerepresentadas nas Equações (28), (29) e (30), respectivamente:

$$(1 - \varepsilon)\rho_s \frac{d}{dt} Y_s = -f_{M1} \quad (28a)$$

$$(1 - \varepsilon)\rho_s \frac{d}{dt} H_{su} = f_{E1} - f_{M1} (H_u + \lambda_u) \quad (28b)$$

$$H_{su} = H_s + H_u Y_s; H_s = c_{ps} (T_s - T_R); H_u = c_{pl} (T_s - T_R) \quad (28c)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} Y_{gi} + G_{gi} \frac{\partial}{\partial z} Y_{gi} = f_{M1} - f_{M2T} \quad (29a)$$

$$(1 - \delta) \varepsilon_{mf} \rho_g \frac{\partial}{\partial t} H_i + G_{gi} \frac{\partial}{\partial z} H_i = f_{E2T} - f_{E1} + f_{M1} (H_u + \lambda_u) - f_{M2T} H_{vi} - E_{parede} \quad (29b)$$

$$H_i = H_{gi} + H_{vi} Y_{gi}; H_{gi} = c_{pg} (T_{gi} - T_R); H_{vi} = \lambda_u + c_{pv} (T_{gi} - T_R) \quad (29c)$$

$$\delta \rho_g \frac{\partial}{\partial t} Y_{gb} + G_{gb} \frac{\partial}{\partial z} Y_{gb} = f_{M2} \quad (30a)$$

$$\delta \rho_g \frac{\partial}{\partial t} H_b + G_{gb} \frac{\partial}{\partial z} H_b = f_{M2} H_{vi} - f_{E2} \quad (30b)$$

$$H_b = H_{gb} + H_{vb} Y_{gb}; H_{gb} = c_{pg} (T_{gb} - T_R); H_{vb} = \lambda_u + c_{pv} (T_{gb} - T_R) \quad (30c)$$

O Quadro 2.4 esquematiza as interações entre as fases do modelo empregado, e são utilizadas as correlações propostas por Kunii e Levenspiel (1991) para a determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa entre as fases bolha e gás intersticial ( $h_b$  e  $k_{s1}$ , respectivamente), apresentadas como segue:

$$\frac{1}{h_b a_1} = \frac{1}{h_{bc} a_b} + \frac{1}{h_{ci} a_i} \quad (31)$$

$$\frac{1}{k_b a_1} = \frac{1}{k_{bc} a_b} + \frac{1}{k_{ci} a_i} \quad (32)$$

$$h_{bc} a_b = 4,5 \delta \left( \frac{G g_{mf} C p_g}{d_b} \right) + 5,85 \delta \left( \frac{(k_g C_{pg} \rho_g)^{0,5} g^{0,25}}{d_b^{1,25}} \right) \quad (33)$$

$$h_{ci} a_i = 6,78 \cdot \delta \cdot (C p_g \cdot \rho_g \cdot k_g)^{1/2} \left[ \frac{\varepsilon_{mf} \cdot G g_b}{\rho_g \cdot d_b^3} \right]^{1/2} \quad (34)$$

$$k_{bc} a_b = \delta \rho_g \left\{ 4,5 \left( \frac{G g_{mf}}{d_b \rho_g} \right) + 5,85 \left( \frac{(D_{vg})^{0,5} g^{0,25}}{d_b^{1,25}} \right) \right\} \quad (35)$$

$$k_{ci} a_i = 6,78 \cdot \delta \rho_g \cdot \left[ \frac{\varepsilon_{mf} D_{vg} \cdot G g_b}{\rho_g \cdot d_b^3} \right]^{1/2} \quad (36)$$

Além disso, o termo da taxa de perda de energia pelas paredes da coluna, a qual ocorre a partir da fase gás intersticial, é uma modificação do modelo de Vitor (2003), conforme pode ser explicado mais adiante, no item 4.4.2.

### 3.4.2 O modelo matemático a duas fases

O modelo de secagem a duas fases é uma simplificação do modelo de Massarani e Silva Telles (1992), e considera equilíbrio térmico entre as fases gás e sólido. As equações do modelo – que consiste de balanços de massa para a fase sólida e fase gás, além de um balanço de energia para a mistura gás-sólido – são apresentadas em seguida, juntamente com as respectivas condições iniciais:

Balanço de massa para a fase sólida

$$(1-\varepsilon)\rho_s \frac{dY_s}{dt} = -f_{M1} \quad (27a)$$

Balanço de massa para a fase gás

$$\varepsilon\rho_g \frac{dY_g}{dt} + \frac{G_g}{L}(Y_g - Y_{g0}) = f_{M1} \quad (27b)$$

Balanço de energia para a mistura gás-sólido

$$\left[ \varepsilon\rho_g C_{p_g} + (1-\varepsilon)\rho_s C_{p_s} \right] \frac{dT_m}{dt} + C_{p_g} \frac{G_g}{L}(T_m - T_{g0}) = -f_{M1}\lambda - E_{parede} \quad (27c)$$

Condições iniciais:

$$Y_s(0) = Y_{s0}$$

$$Y_g(0) = Y_{g0}$$

$$T_m(0) = T_{m0} = \frac{T_{s0} + T_{g0}}{2}$$

(27d)

### 3.5 Análise e comparação dos modelos

Os modelos estudados – de duas fases e três fases – são analisados com base na validação através do confronto entre os resultados experimentais e os simulados, utilizando-se técnicas estatísticas apropriadas para verificar o ajuste dos mesmos. Para o modelo de Vitor (2003), a três fases, foi usado o *software* Fortran para a integração do sistema de equações algébrico-diferenciais que representam o comportamento dos fenômenos de transferência que estão ocorrendo no processo de secagem, através da rotina DASSL.

O modelo mais simplificado a duas fases, por sua vez, também foi implementado em linguagem MATLAB, por sua praticidade, através das rotinas FSOLVE e ODE23 (utilizada para equações diferenciais).

Visando avaliar o desempenho dos modelos, compararam-se, por meio de análise estatística (coeficiente de correlação e teste de hipótese), os valores das variáveis respostas simuladas – por exemplo:  $Y_s$ ,  $T_g$ ,  $T_s$  ou  $T_m$  – com os dados experimentais correspondentes.

### 3.6 Análise de sensibilidade dos modelos

Através de análise de sensibilidade dos principais parâmetros dos modelos a duas e três fases, discutiram-se os pontos de incerteza dos mesmos. Para a execução dessa etapa, adotou-se um ensaio como padrão (caso base). Foram aplicadas variações percentuais nas propriedades físicas ou parâmetros a fim de se investigar o comportamento das variáveis de saída dos modelos estudados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados relativos ao desenvolvimento do trabalho. O objetivo é verificar a viabilidade da aplicação da metodologia proposta, assim como fazer uma avaliação dos dados experimentais de fluidodinâmica, de transferência de calor e de secagem das sementes de *Brachiaria brizantha* no leito fluidizado.

Também são mostrados os dados relativos à simulação computacional de transferência de calor e massa, fazendo-se uso dos modelos a três fases de Vitor (2003) e do simplificado homogêneo a duas fases.

Com base nestes resultados e nas dificuldades encontradas no cumprimento das etapas do trabalho, direcionou-se a pesquisa de modo a conduzir os estudos.

### 4.1 Fluidodinâmica

No início foram feitos testes com sementes de gramíneas recicladas antigas para se avaliar o comportamento destas quando submetidas a uma operação em leito fluidizado. O propósito destes ensaios foi justamente verificar se esse tipo de semente fluidizava adequadamente. A curva fluidodinâmica foi construída segundo o procedimento apresentado no item 3.3.2.

A Figura 4.1 mostra a influência da altura inicial de sementes na fluidodinâmica destas partículas. Observa-se que se tratam de curvas típicas de fluidização, uma vez que é possível identificar claramente as regiões de leito fixo, na qual há um aumento da queda de pressão conforme se aumenta a vazão de ar, e as regiões de leito fluidizado, onde a queda de pressão no leito permanece constante com o aumento da vazão de ar. Nota-se que a vazão mínima de fluidização foi de aproximadamente  $0,15 \text{ m}^3/\text{min}$  para todos os casos (alturas iniciais variando de 8 a

13,5 cm), o que era esperado já que este parâmetro não é influenciado pela carga de partículas. Por outro lado, a queda de pressão no leito foi maior conforme se aumentou a altura de sementes, o que explica o comportamento da Equação (23) - p. 16 -, que afirma que a perda de carga no leito fluidizado é igual ao peso do leito dividido pela área da seção transversal da coluna. Essa é uma implicação importante no que diz respeito a um aumento de escala nesse tipo de equipamento: grandes quantidades de partículas a serem fluidizadas irão requerer um soprador com elevada potência para vencer a alta perda de carga do leito.

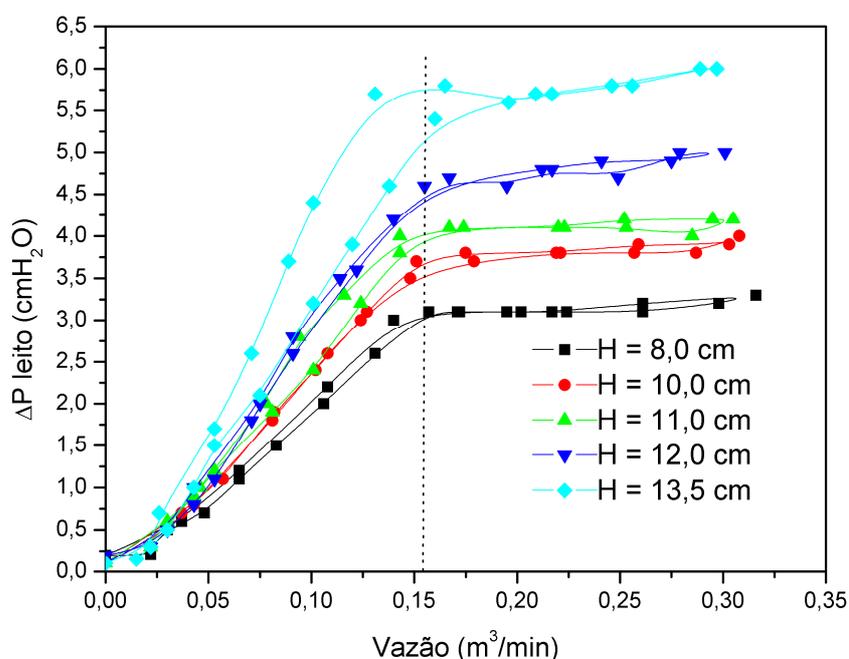


Figura 4.1: Queda de pressão no leito em função da vazão de ar parametrizado na altura de partículas.

Na Figura 4.2 avalia-se, para uma altura inicial de sementes de 10 cm, a influência da temperatura do ar de entrada na fluidodinâmica das partículas. Vê-se que, para a faixa de temperatura estudada de 35 a 60°C, sendo esta última maior do que a recomendada para a secagem das sementes de gramíneas, não houve variação perceptível no comportamento da fluidização. Observou-se, no entanto,

uma boa reprodutibilidade entre os ensaios nas diferentes condições de temperatura, destacando que foi realizada uma réplica em 35°C.

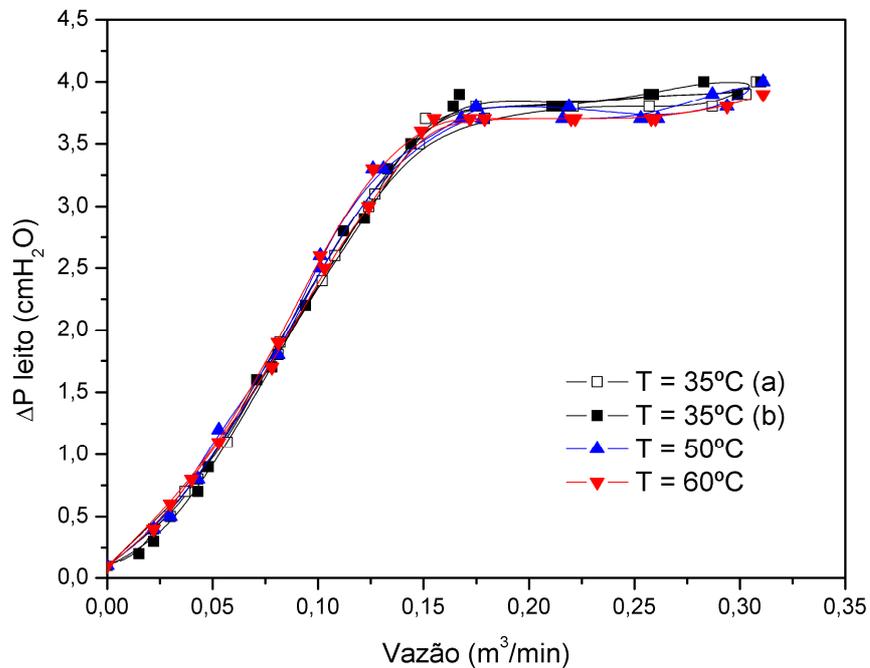


Figura 4.2: Queda de pressão no leito em função da vazão de ar parametrizada na temperatura de ar.

Com a finalidade de ratificar o valor da vazão de ar na mínima fluidização, foram efetuados ensaios de fluidodinâmica com as sementes de *Brachiaria brizantha* utilizadas nos conjuntos de testes de transferência de calor e de secagem. A Figura 4.3 mostra a curva de fluidização das sementes usadas nesses testes, com sua réplica correspondente. Obtém-se graficamente o valor do fluxo de ar na mínima fluidização de aproximadamente  $0,65 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ( $0,15 \text{ m}^3/\text{min}$ ), equivalente ao encontrado anteriormente com sementes de testes preliminares.

Destaca-se a boa reprodutibilidade dos dados principalmente na região de leito fixo, ao contrário da região fluidizada, onde as oscilações no leito dificultam a precisão da medida de queda de pressão pelo uso de manômetro de água.

Com base nisso, um teste de fluidodinâmica no leito foi realizado com o sistema de aquisição de dados, a fim de se testar o novo conjunto e comparar com os dados preliminares obtidos através da medida com o manômetro em U. A Figura

4.4 mostra a curva fluidodinâmica proveniente desse sistema. Para se obter cada ponto da curva, ajustava-se a vazão desejada e realizava a coleta, a uma frequência de 20 Hz durante 10 segundos.

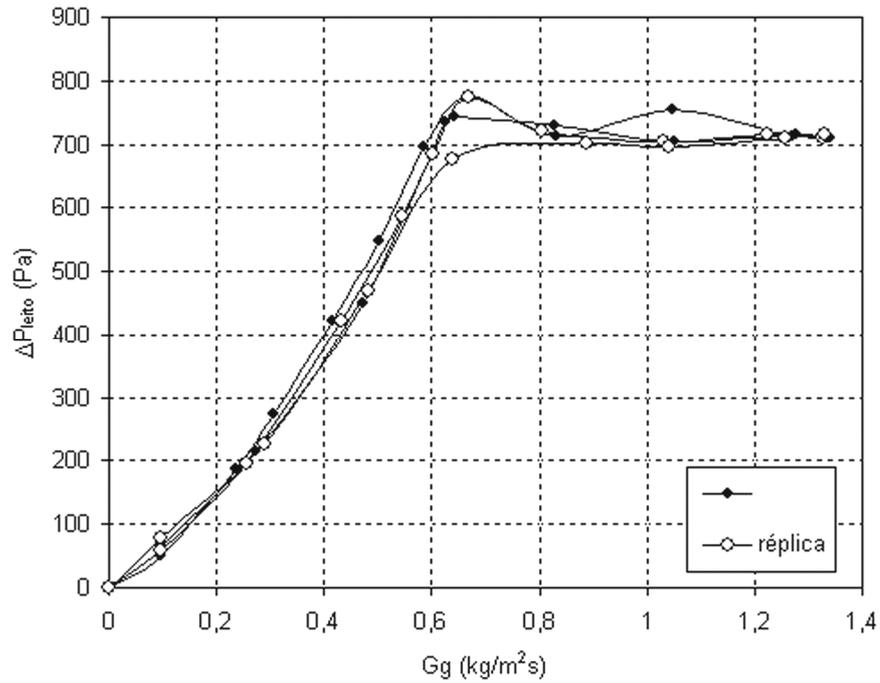


Figura 4.3: Queda de pressão no leito em função do fluxo de ar para as sementes usadas nos testes de transferência de calor e massa –  $H_0 = 14,6 \text{ cm}$ .

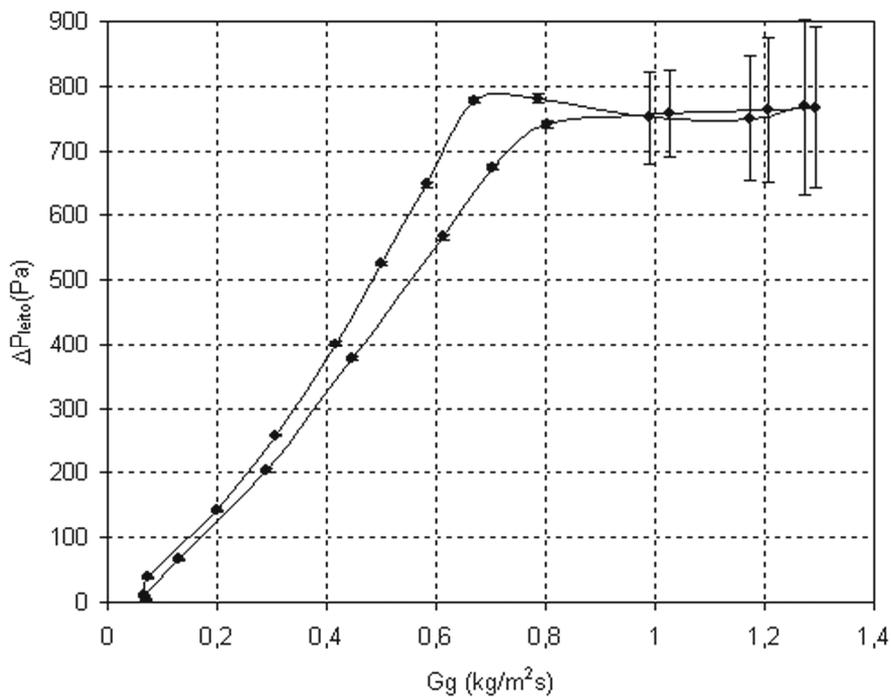


Figura 4.4: Queda de pressão em função do fluxo de ar: pontos obtidos com o sistema de aquisição de dados –  $H_0 = 15,2 \text{ cm}$ .

Observa-se claramente na região de leito fixo o fenômeno de histerese, ao passo que no método anterior não se apresentava tão evidente. Nessa região nota-se também que os desvios padrão são praticamente desprezíveis, enquanto na fluidização, em consequência dos efeitos de bolhas e turbulências, as grandes flutuações de pressão provocam altos valores de desvios padrão, facilmente detectados pelo uso de transdutores de pressão.

#### **4.2 Técnica de medida da temperatura do sólido**

Antes de serem apresentados os resultados preliminares dos ensaios de transferência de calor e de secagem das sementes, é mostrada a justificativa da metodologia proposta para a medida da temperatura de sólido.

Para a seleção do melhor método de medida da temperatura do sólido, foram testados diferentes procedimentos. O primeiro compreende a medição desta temperatura por meio de um calorímetro, construído com placas de isopor e tendo em seu interior um termopar. Entretanto, verifica-se pelos dados apresentados na Figura 4.5 que a temperatura do sólido, medida por este método, mesmo após se atingir a estabilização térmica, não convergia para a temperatura do ar de entrada, chegando, em casos extremos, a atingir uma diferença de 10°C abaixo da temperatura média do leito. Tais discrepâncias são devidas à imprecisão do método de medida, o qual, além de requerer várias retiradas de amostras para estabelecer o ponto de estabilização da temperatura do sólido no interior do calorímetro, não garante que este ponto seja o representativo da temperatura do sólido no leito uma vez que ocorrem perdas térmicas consideráveis. Outro problema agravante neste método é a necessidade de retirada de quantidades razoáveis de sementes do leito

durante os experimentos, sem a devida reposição, comprometendo assim o regime de escoamento e o nível da vazão de ar escolhida.

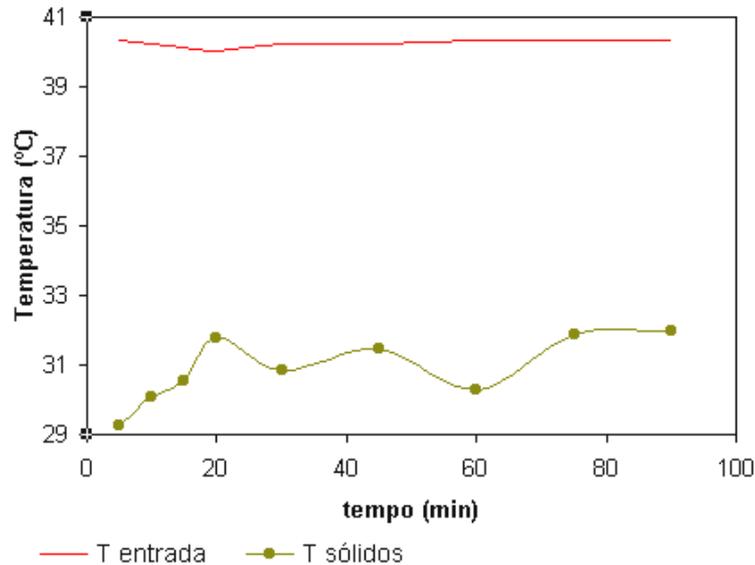


Figura 4.5: Temperatura de sólidos em função do tempo, obtida pelo método de calorímetro.

O segundo método selecionado é o de estagnação do leito, que consiste em interromper a fluidização por um determinado tempo e medir a temperatura das partículas com o termopar que se encontra inserido no interior do leito, a 10 cm da base da coluna. Note-se que este termopar mede, durante a fluidização, a temperatura média do leito (sistema gás-sólido). Conseqüentemente, é necessário, ao interromper a passagem de ar, aguardar o tempo de resposta do termopar para que a temperatura registrada por ele seja a mais próxima possível da temperatura das sementes no leito. Como após a estagnação o meio constitui-se em um leito fixo e, como o ar existente nesse meio é em pequena quantidade, a temperatura final do sistema (sementes + ar) será muito próxima da temperatura das sementes (Sartori, 1986). Este tempo morto (entre a interrupção da passagem do ar e o equilíbrio térmico do termopar e sementes) deve ser pequeno o suficiente para que as perdas de calor pelas paredes da coluna não afetem a temperatura das sementes e tampouco comprometam a continuação do teste (reinício da fluidização do leito nas

mesmas condições térmicas de sua parada, a menos de um erro na faixa do experimental).

Com base nas curvas apresentadas na Figura 4.6, pôde-se estabelecer como critério do método de estagnação para as sementes em questão, 2 minutos para o tempo morto, 3 minutos para o tempo de interrupção de ar no leito e, para a medida da temperatura do sólido, a média das temperaturas registradas pelo termopar no intervalo de tempo entre o tempo morto e o de interrupção.

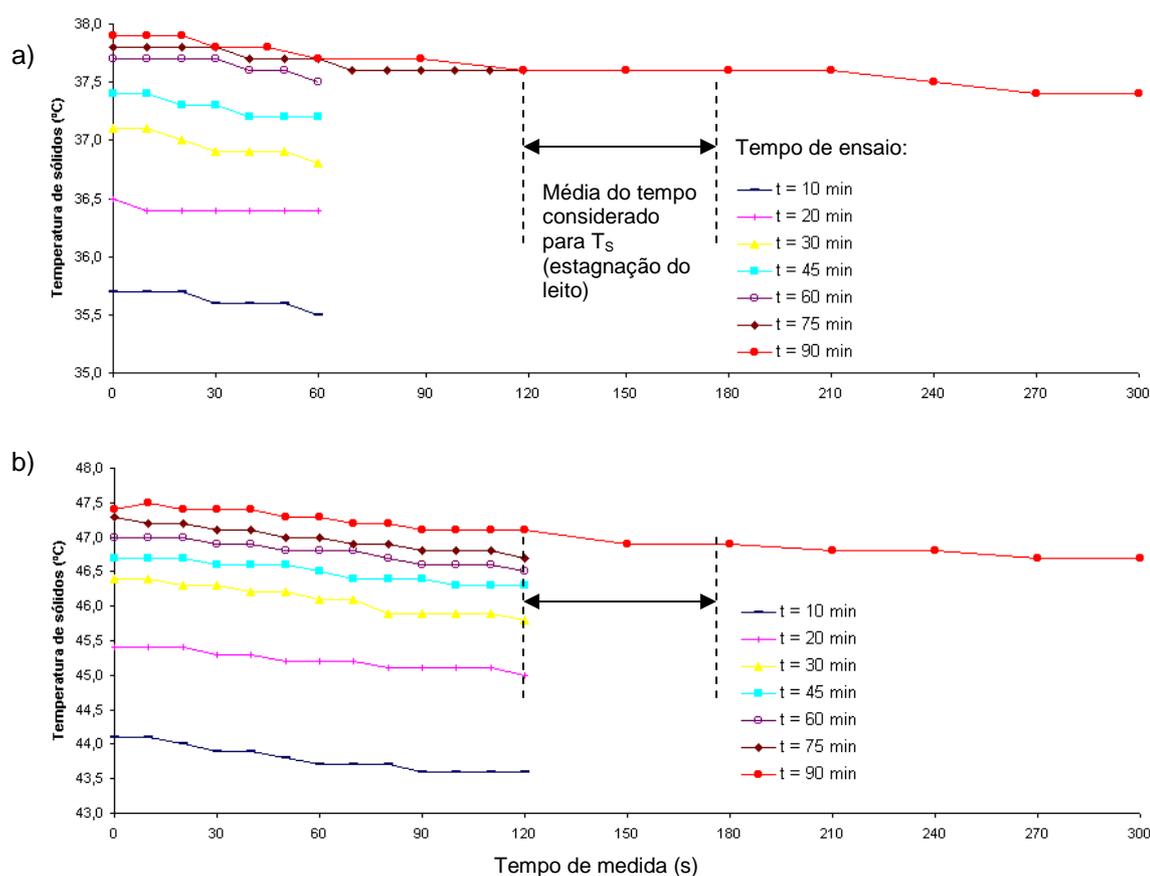


Figura 4.6: Temperatura em função do tempo - método da estagnação: a) decaimento da temperatura com  $T_{g0}=40^{\circ}\text{C}$ ; b) decaimento da temperatura com  $T_{g0}=50^{\circ}\text{C}$ .

A curva da Figura 4.7 demonstra que o uso do método da estagnação, seguindo o critério estabelecido, não afeta a dinâmica de troca térmica. Nota-se que as curvas de temperatura obtidas utilizando esse método (linhas tracejadas) sobrepõem-se àquelas registradas pelas réplicas de mesma condição de operação

sem o desligamento de ar durante o experimento. Isto indica que esse método de estagnação não só aprimora a medida da temperatura da fase sólida como também não interfere no comportamento dinâmico do leito, sendo, portanto, o selecionado.

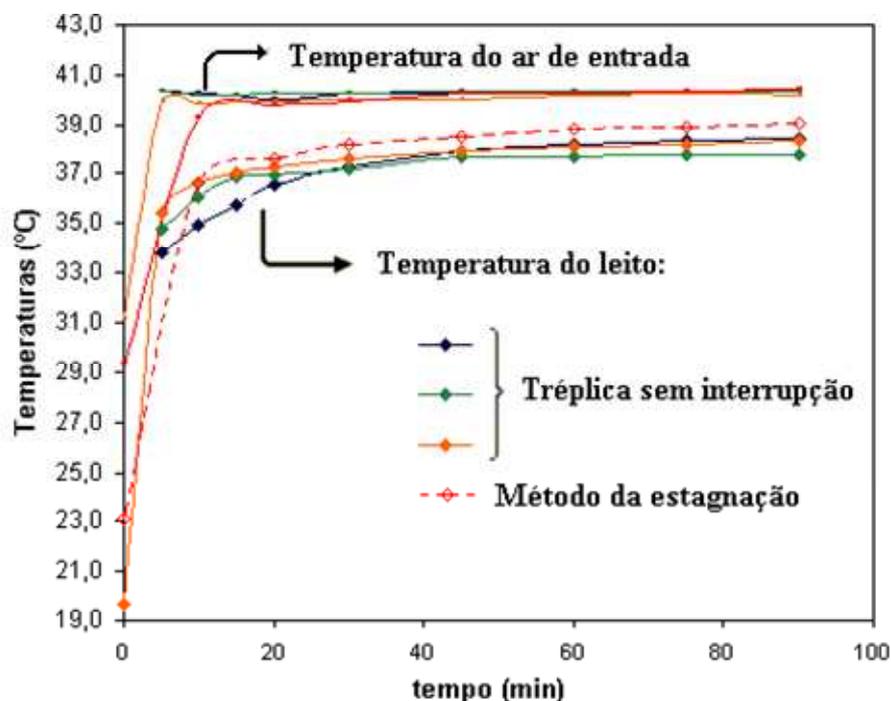


Figura 4.7: Temperatura do leito em função do tempo: comparação entre o método da estagnação e tréplica sem parada da fluidização.

### 4.3 Comparação entre modos de operação do leito

Neste trabalho foram confrontados os dados experimentais obtidos no leito de acrílico segmentado e no leito feito de vidro (apresentados no item 3.2), nos modos de operação fixo e fluidizado.

Na Figura 4.8a é apresentado o perfil de umidade das sementes em função da posição para três tempos de secagem para um ensaio em leito fixo, com ar de alimentação a 40°C.

Observa-se que, para um tempo de secagem de 10 minutos, apenas a camada mais inferior do leito ( $z = 1,5$  cm) apresentou uma redução na umidade, de 0,37 para 0,27 (b.s.), representando um desvio relativo em torno de 28% em relação

à umidade média das demais camadas do leito. Em um tempo maior de secagem, 30 minutos, por exemplo, já se nota a existência de um perfil de umidade ao longo da altura do leito fixo, além de umidades menores quanto maior é o tempo de secagem, para uma dada posição, sendo fisicamente consistente com o que se espera do fenômeno de secagem.

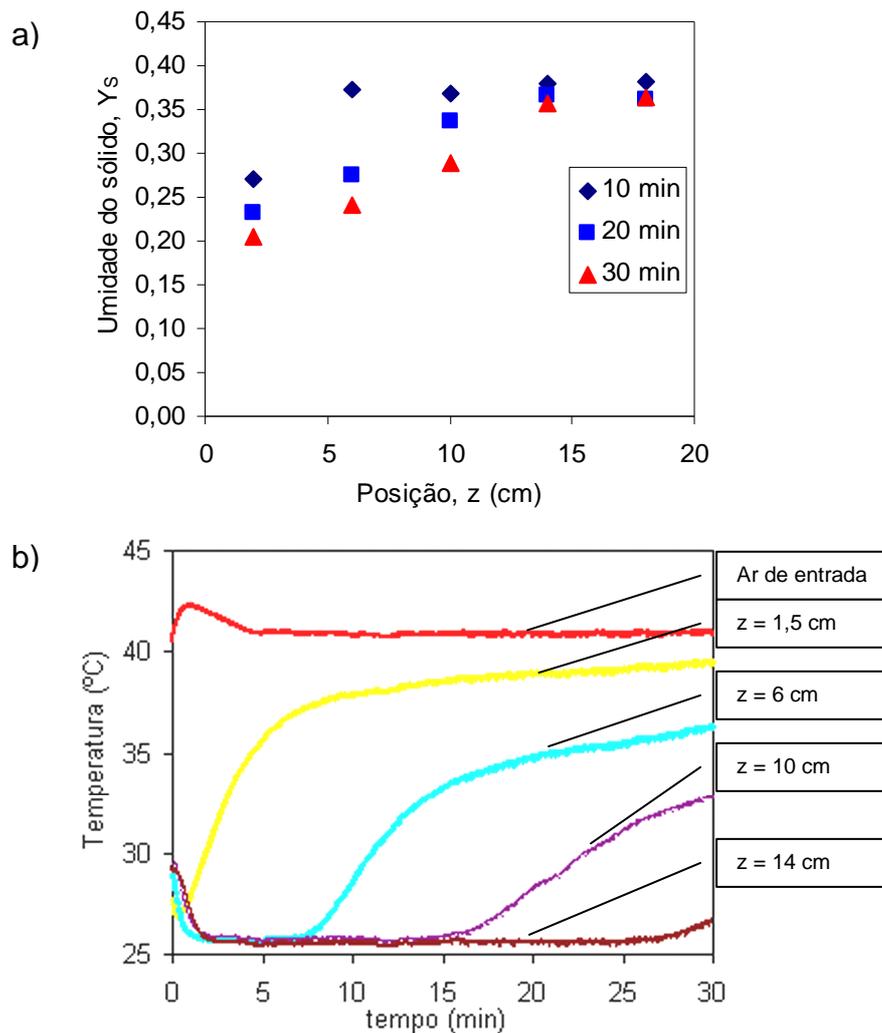


Figura 4.8: a) Umidade das sementes em função da altura do leito, parametrizado no tempo; b) Temperatura da mistura gás-sólido em função do tempo, parametrizado na altura do leito fixo, para uma temperatura do ar de secagem de  $40^{\circ}\text{C}$  e  $Y_{s0} = 0,37$ .

Para auxiliar no entendimento da formação do perfil de umidade ao longo do leito fixo, apresenta-se a evolução das temperaturas nas camadas correspondentes ao longo do tempo de secagem, para um ensaio com ar de alimentação a  $40^{\circ}\text{C}$ , na

Figura 4.8b. Observa-se um rápido aquecimento das sementes posicionadas próximas à base do leito, ao passo que a frente de calor só atinge as tomadas localizadas nas alturas de 6 cm, 10 cm e 14 cm em torno de 8 min, 16 min e 27 min, respectivamente. Esse comportamento de estratificação das temperaturas gera diferentes taxas de transferência de massa ao longo da coluna, resultando em diferentes teores de umidade para cada altura de leito, conforme mostrado na Figura 4.8a.

A mesma explicação pode ser dada para o ensaio de secagem com ar de entrada a 50°C e umidade inicial das partículas de 0,35 (b.s.), conforme mostrado na Figura 4.9. Desta vez, a frente de calor se propaga mais rapidamente pelo leito (Figura 4.9b), refletindo também no perfil de umidade (Figura 4.9a), que chega a apresentar uma diferença relativa de 50,5% entre o maior e o menor teor de umidade, para o tempo de 30 minutos de secagem.

No entanto, as velocidades de propagação da frente de calor e, conseqüentemente, da remoção de umidade ao longo da altura em um leito fixo podem não ser tão baixas quanto as observadas na Figura 4.9, por exemplo. Se as sementes forem isentas de água livre, não apresentando umidade em excesso, obtém-se maiores taxas de transferência de calor ao longo do leito, conforme pode ser observado na Figura 4.10b. O teor de umidade inicial das sementes utilizadas no ensaio dessa figura foi de 0,17 (b.s.), metade do valor da umidade do ensaio da Figura 4.9. Também são verificadas diferenças menores entre os teores de umidade entre as posições do leito (Figura 4.10a), sendo que a diferença relativa entre os pontos de maior e menor umidade foi de 17,5%.

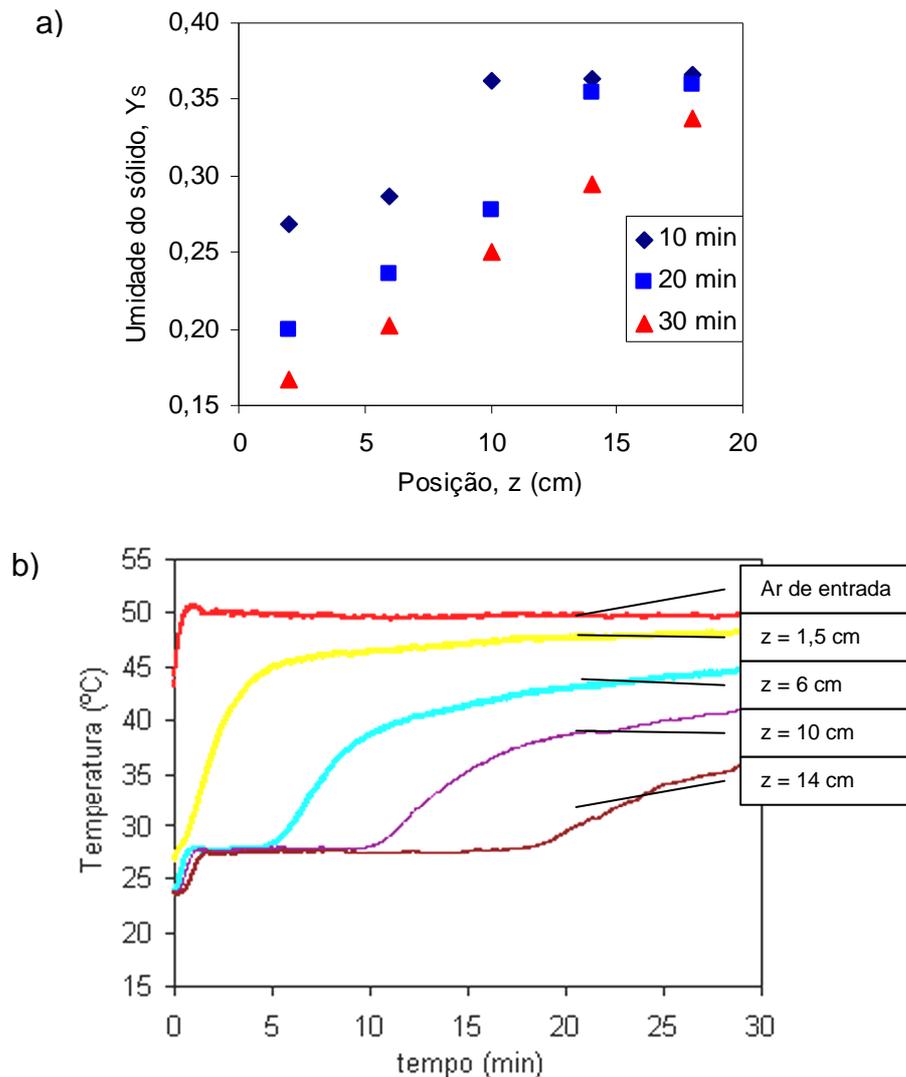


Figura 4.9 a) Umidade das sementes em função da altura do leito, parametrizado no tempo;  
 b) Temperatura da mistura gás-sólido em função do tempo, parametrizado na altura do leito fixo, para uma temperatura do ar de secagem de 50°C e  $Y_{s0} = 0,35$ .

Uma possível explicação para a menor velocidade de propagação da frente de calor observada nas sementes com maior umidade inicial pode ser dada da seguinte forma: é como se a água livre em excesso, presente nas sementes dos ensaios das Figura 4.8 e Figura 4.9, retardasse o processo de transferência de calor por convecção no leito por consumir a energia disponível na forma de calor latente de vaporização, gradativamente ao longo da altura do leito. Quando o processo difusivo de secagem passa a predominar, com sementes isentas de água superficial,

a transferência de calor ao longo do leito é mais rápida, como se nota na Figura 4.10b.

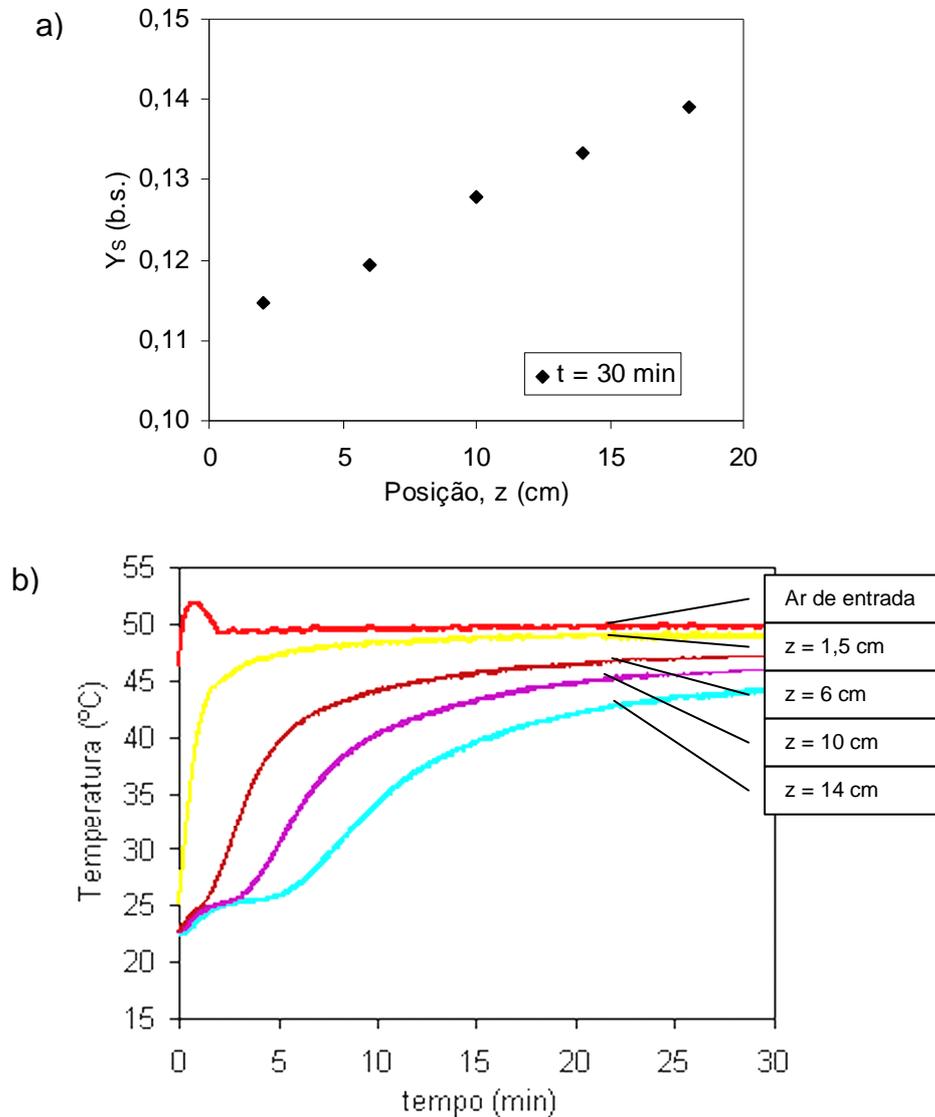


Figura 4.10 a) Umidade das sementes em função da altura do leito para um tempo de 30 min; b) Temperatura da mistura gás-sólido em função do tempo, parametrizado na altura do leito fixo, para uma temperatura do ar de secagem de  $50^{\circ}\text{C}$  e  $Y_{s0} = 0,17$ .

Na Figura 4.11a são mostrados os perfis de umidade das sementes ( $Y_s$ ) em função da posição axial do leito fluidizado para três tempos de secagem (10, 20 e 30 minutos) com temperaturas do ar de secagem de  $40^{\circ}\text{C}$  e de  $50^{\circ}\text{C}$  (Figura 4.11b). Pode-se afirmar que, nas duas situações, não se formou um perfil de umidade das sementes ao longo da altura do leito, quando esse opera no modo fluidizado. Para o

ensaio com o ar de entrada a 40°C, o maior desvio padrão das umidades ao longo da posição axial foi de 0,002, para o tempo de secagem de 30 min, representando apenas 1,5% do valor da média das umidades nesse tempo. Da mesma forma, para o ensaio a 50°C, o maior desvio padrão das umidades foi de 0,003, correspondendo a 2,3% do valor da média das umidades para o tempo de 20 minutos de secagem.

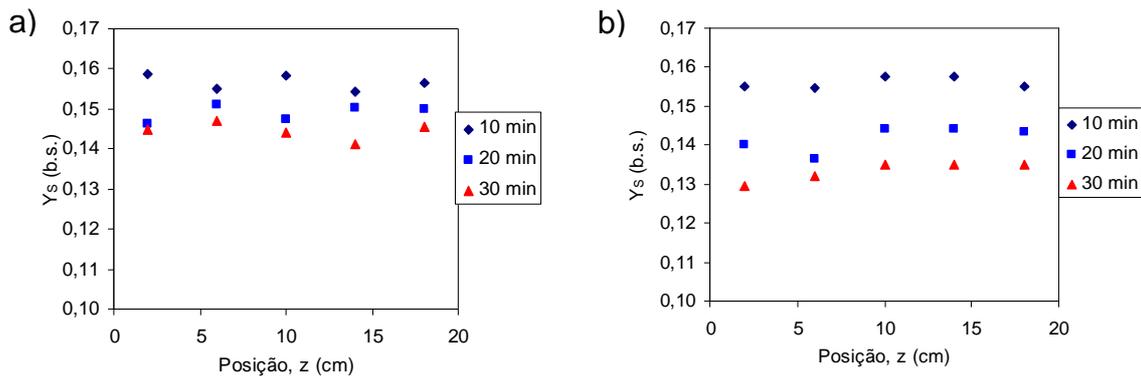


Figura 4.11: Umidade das partículas em função da altura do leito fluidizado, parametrizado no tempo de secagem, para temperaturas do ar de entrada de a) 40°C e b) 50°C.

Além da observação da homogeneidade da umidade ao longo da altura no leito fluidizado, também se verificou o perfil axial de temperatura nesse equipamento. A Figura 4.12 mostra as curvas experimentais de temperaturas em função do tempo no leito fluidizado segmentado para ensaios realizados com ar de alimentação a 50°C e 40°C. Os dados de temperatura apresentados na figura foram coletados nas alturas 1,5 cm, 6 cm, 10 cm e 14 cm. Observa-se que apenas os valores de temperatura na posição inferior do leito ( $z = 1,5$  cm) se destacam dos demais pontos, com diferença máxima de 4,9°C entre essa posição e a superior ( $z = 14$  cm) no início do processo de transferência de calor e massa. No entanto, para todo o período avaliado, a diferença média de temperatura entre os pontos extremos do leito foi de apenas 1,1°C, evidenciando certo regime de mistura perfeita entre as fases no interior do leito.

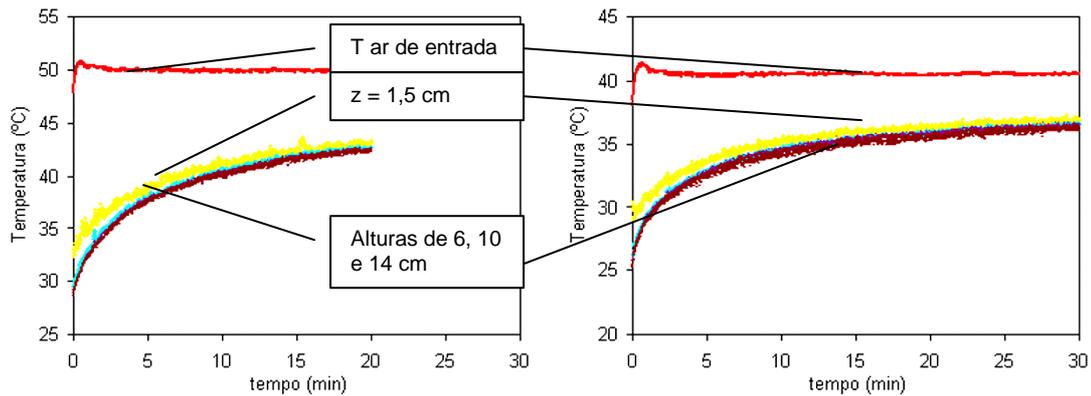


Figura 4.12: Temperatura experimental em função do tempo no leito fluidizado segmentado com ar de alimentação a 50°C e 40°C.

Confirma-se, portanto, uma das principais vantagens de um leito fluidizado em relação aos demais tipos de secadores, que se trata da rápida mistura dos sólidos, resultando em condições quase isotérmicas ao longo da posição axial.

Um ponto que merece destaque neste trabalho, até mesmo para corroborar a incorporação de um termo de perda de energia pelas paredes do leito ( $E_{parede}$ , das Equações (27c) e (29b), pp. 24 e 31, respectivamente) nas equações dos modelos utilizados, é ilustrado na Figura 4.13, a qual mostra a evolução experimental das temperaturas em função do tempo para um ensaio de secagem em leito fluidizado com ar de alimentação a 50°C. Observa-se que a temperatura do leito atinge um equilíbrio térmico em aproximadamente 50 minutos, não alcançando a temperatura do ar de entrada. Essa diferença, no estado estacionário, pode ser atribuída à dissipação de energia do leito para o ambiente, conforme é abordada no item em que se discute a influência do coeficiente de transferência de calor entre a parede do leito e o meio ( $\alpha_{pa}$ , no item 4.5.10) nas variáveis do modelo a três fases.

Ainda na Figura 4.13, nota-se que a curva da temperatura da parede externa do leito fluidizado apresenta um período transiente no início do processo de secagem, até se estabilizar em torno de 37°C. Esse fato não é levado em conta na alimentação dos modelos avaliados, o que pode ser uma fonte de imprecisão na

estimação de parâmetros, uma vez que foram empregados valores médios e constantes dessa variável.

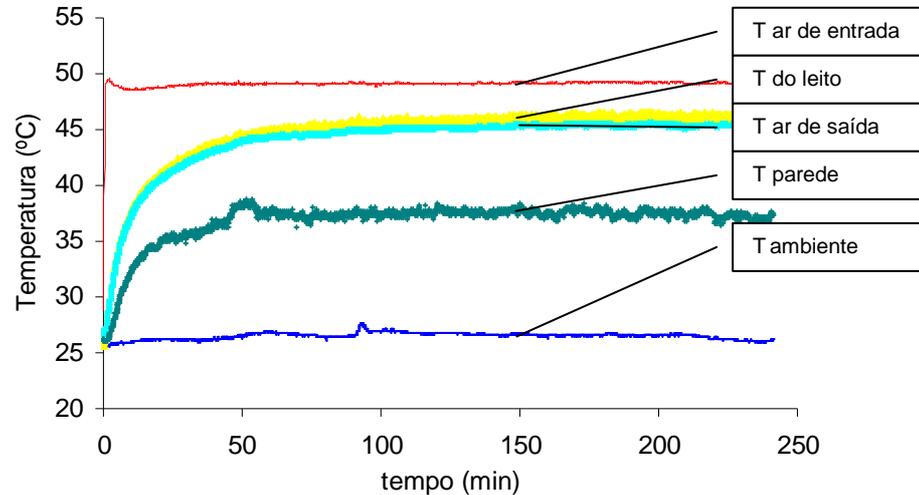


Figura 4.13: Temperatura em função do tempo de secagem no leito fluidizado.

#### 4.4 Experimentos de transferência de calor e de secagem

Os experimentos de transferência de calor e de secagem foram elaborados seguindo a técnica de planejamento fatorial a dois níveis ( $2^2$ ), com relação à temperatura de ar de entrada e à vazão de ar. A Tabela 4.1 e a Tabela 4.2 apresentam as condições operacionais estabelecidas e determinadas para os dois conjuntos de ensaios, cujas informações foram posteriormente utilizadas para alimentar os modelos de transferência de calor e massa.

Realizou-se réplica no ponto central de cada conjunto (Ensaio #3, #4 e #6 na Tabela 4.1 e Ensaio #2, #3 e #7 na Tabela 4.2) para avaliar a reprodutibilidade dos dados e os erros associados à medida. Nos ensaios de transferência de calor, a massa de sementes utilizada foi de aproximadamente 0,350 kg e a umidade média das sementes de 0,06 (b.s.), enquanto a do ar de entrada foi de 0,012 (b.s.).

Tabela 4.1: Condições operacionais dos experimentos de transferência de calor

Ensaio #	$G_g$ [kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	$T_{g0}$ [°C]	$T_{s0}$ [°C]	$T_{amb}$ [°C]	$T_{par}$ [°C]	L [m]
1	0,948	51,4	26,2	27,3	33,9	0,182
2	1,301	30,9	18,1	19,6	22,3	0,227
3	1,075	40,9	26,4	29,2	32,8	0,204
4	1,088	40,9	21,6	24,4	29,4	0,212
5	1,259	51,5	22,6	25,1	33,5	0,235
6	1,073	40,7	25,4	27,3	30,8	0,200
7	1,001	30,8	17,1	17,1	20,7	0,189
8	1,198	51,1	27,2	29,2	37,2	0,220
9	1,064	41,3	28,1	29,9	32,2	0,205

Tabela 4.2: Condições operacionais dos experimentos de secagem

Ensaio #	$G_g$ [kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	$T_{g0}$ [°C]	$T_{s0}$ [°C]	$T_{amb}$ [°C]	$T_{par}$ [°C]	L [m]	$Y_{s0}$ (b.s.)	$Y_{Seq}$ (b.s.)
1	1,202	51,5	27,6	24,8	34,7	0,226	0,186	0,054
2	1,081	40,9	28,2	25,0	29,3	0,192	0,191	0,077
3	1,092	40,8	30,2	22,3	28,8	0,206	0,195	0,064
4	0,949	35,3	30,3	25,2	27,5	0,178	0,199	0,071
5	0,925	51,5	31,5	26,6	33,5	0,175	0,222	0,052
6	1,227	37,2	29,9	25,4	28,6	0,221	0,178	0,057
7	1,100	41,5	16,9	20,7	26,5	0,210	0,173	0,080

Nos experimentos de secagem, a massa inicial de sementes foi de 0,400 kg, com um teor de umidade inicial médio igual a  $Y_{s0} = 0,192 \pm 0,015$  e temperatura inicial das partículas,  $T_{s0}$ , dada na Tabela 4.2. Calculou-se a média de 11 pontos para se obter os valores da temperatura da parede ( $T_{par}$ ) e temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), durante os ensaios.

Nos dois conjuntos de testes, mediram-se as temperaturas em intervalos de tempo pré-determinados, enquanto apenas nos ensaios de secagem coletavam-se amostras para a medida de umidade.

Um conjunto de pontos típicos de ensaio de transferência de calor é mostrado na Figura 4.14. O desvio máximo é de  $\pm 1^\circ\text{C}$  para as medidas de  $T_{amb}$  nas réplicas do ponto central. Os desvios das outras temperaturas foram de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . As tendências observadas na Figura 4.14 são esperadas. Para tempos de aquecimento maiores que 15 minutos, a temperatura de sólido iguala a temperatura do gás de saída. A temperatura da parede tende a aumentar até atingir seu valor de equilíbrio em aproximadamente 15 minutos. Neste ponto, a temperatura do ar de saída se aproxima mas não se iguala à temperatura do ar de entrada, devido às perdas de calor pelas paredes da coluna.

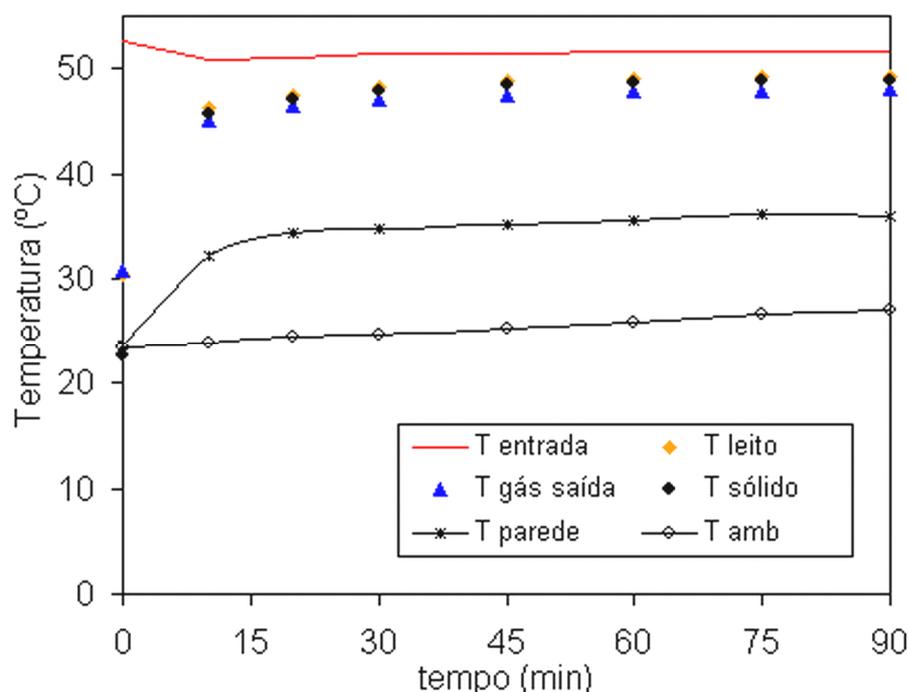


Figura 4.14: Temperatura em função do tempo para as condições do Ensaio #5 da Tabela 4.1.

Na Figura 4.15 mostram-se as curvas típicas de umidade em função do tempo para os níveis mais alto (Ensaio #1 na Tabela 4.2) e mais baixo (Ensaio #4 na

Tabela 4.2) de vazão e de temperatura do ar de entrada, relativos aos experimentos de secagem. Ressalta-se que os Ensaio #2, 3 e 7 da Tabela 4.2, na condição de réplicas do ponto central, foram usados para a determinação dos erros.

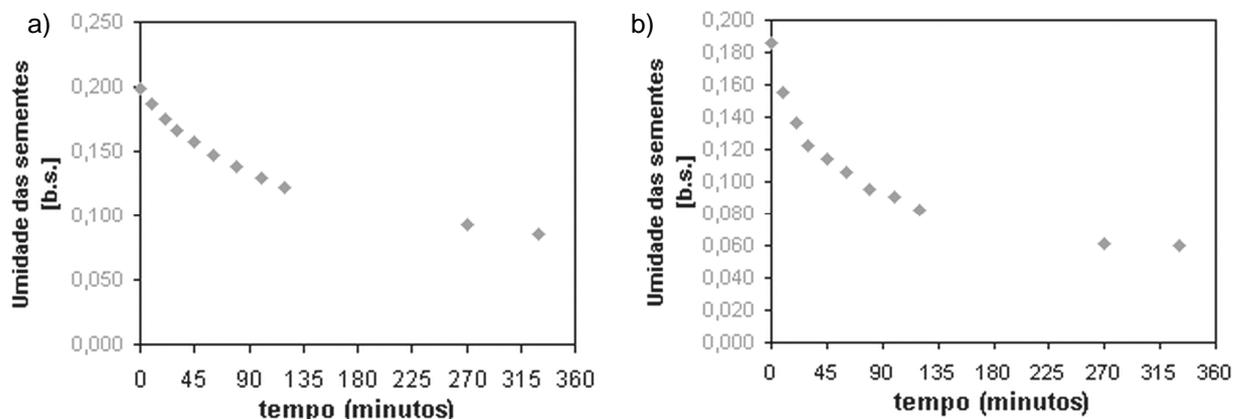


Figura 4.15: Umidade em função do tempo de secagem para as condições do a) Ensaio #4 e b) Ensaio #1 na Tabela 4.2

Com o intuito de se verificar a viabilidade da técnica de secagem empregada quanto à rapidez do processo, analisa-se o tempo necessário para se atingir a umidade apropriada de armazenamento das sementes. Tendo em vista que as sementes utilizadas no estudo são adquiridas no mercado e possuem umidade de  $(12,5 \pm 0,5)\%$  b.s., adotou-se esse valor como alvo. Os tempos aproximados necessários para alcançar essa faixa são apresentados na Tabela 4.3. Observa-se que no Ensaio #1, com as condições extremas de temperatura e vazão de ar (#1 na Tabela 4.2), a umidade final chegou à faixa satisfatória em 30 minutos, tempo razoável para um processo em batelada. Por outro lado, a condição oposta (Ensaio #4 na Tabela 4.2) mostrou-se lenta, com um tempo aproximado de 100 minutos. Deve-se, portanto, utilizar temperaturas e vazões elevadas, tomando-se cuidado para não destruir a capacidade germinativa das sementes, campo que foi investigado pelos testes de qualidade, e visto com mais detalhes por Fumagalli (2007).

Tabela 4.3: Tempo para atingir faixa viável ao armazenamento nos ensaios de secagem.

Ensaio #	4	6	2, 3 e 7	5	1
t (min)	100	75	60	60	30

As curvas de umidade adimensional em função do tempo para as condições experimentais estudadas são mostradas na Figura 4.16. Observa-se uma clara influência da temperatura do ar de entrada na cinética de secagem das sementes. Conforme esperado, constata-se que temperaturas mais altas favoreceram a remoção mais rápida de umidade das sementes. Tais resultados confirmam as conclusões de Souza *et al.* (1998), que trabalharam com leito fixo e camada fina e de Chicaroni *et al.* (1999), com leito esteira e camada delgada.

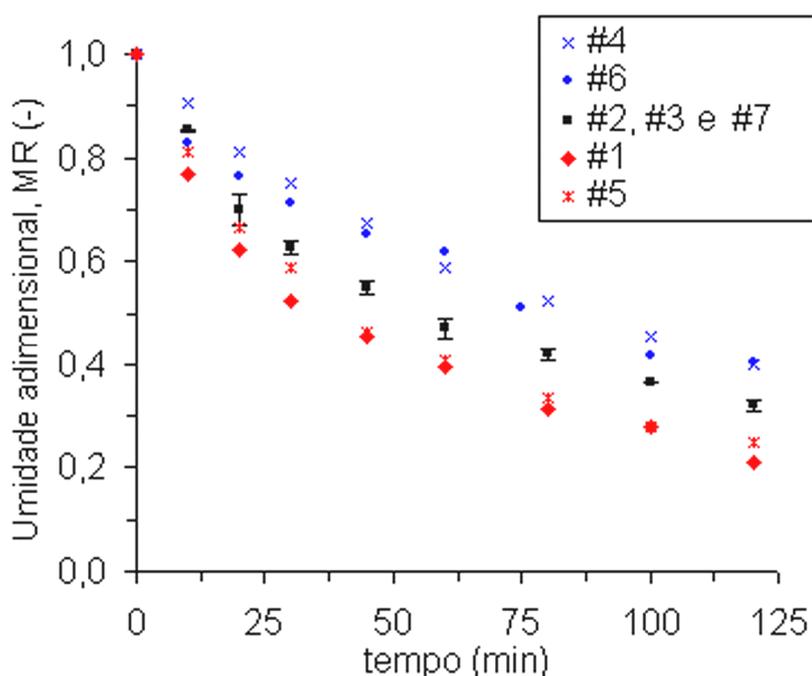


Figura 4.16: Umidade adimensional em função do tempo de secagem em leito fluidizado para as diferentes condições de operação mostradas na Tabela 4.2.

O efeito da vazão do ar, por outro lado, não é evidente. Não se pode afirmar que exista influência deste parâmetro na cinética de secagem na faixa estudada, uma vez que a pequena diferença entre as curvas é semelhante à encontrada na réplica do ponto central.

Deve ser comentado, neste ponto, o procedimento de construção da curva da Figura 4.16, sabendo-se que o adimensional de umidade adotado, MR, tem a

$$\text{seguinte forma: } MR = \frac{\bar{M} - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}}.$$

Como sugerido no trabalho de Chicaroni *et al.* (1999), a melhor forma da equação que representa a cinética de secagem das sementes de gramíneas é a de decaimento exponencial de segunda ordem (modelo de Srzdenicki *et al.*, 1996), como apresentado na Equação (20):

$$MR = a \cdot \exp\left[-K_1 \cdot \exp\left(\frac{-E_1}{T}\right) \cdot t\right] + b \cdot \exp\left[-K_2 \cdot \exp\left(\frac{-E_2}{T}\right) \cdot t\right] \quad (20)$$

Nota-se que essa forma de equação abrange dois períodos de secagem, sendo a soma de dois termos com seus respectivos pesos.

Dessa forma, sabendo-se que as curvas de umidade em função do tempo não estavam convergindo para a umidade de equilíbrio calculada a partir da equação de Henderson-Thompson, a seguir:

$$M_{eq} = \left[ \frac{\ln(1 - UR)}{-1,64 \times 10^{-4} (T(^{\circ}C) + 35,38)} \right]^{(1/1,81)} \quad (37)$$

com os parâmetros encontrados no trabalho de Arnosti Jr. *et al.* (1999), estas curvas foram construídas da seguinte forma: coletou-se pontos de estabilização da umidade no leito fluidizado, em cerca de 4 a 6 horas de ensaio de secagem e ajustou-se uma equação de “decaimento exponencial de 2ª ordem”, de acordo com a seguinte equação:

$$y = y_0 + A_1 \exp[-t/T_1] + A_2 \exp[-t/T_2] \quad (38)$$

Com todos os pontos, aplicou-se limite para tempo infinito nas equações ajustadas (apresentavam  $R^2 > 0,99$ ), obtendo-se as respectivas “umidades de

equilíbrio dinâmicas” ( $\lim_{t \rightarrow \infty} y = y_0$ ), apresentadas na coluna  $Y_{Seq}$  da Tabela 4.2,

ligeiramente maiores que as umidades de equilíbrio estáticas calculadas pela Equação (37).

Tem-se, portanto, que a forma de equação de cinética de secagem representada pelas Equações (20) ou (38) ajusta-se bem aos pontos experimentais. Inicialmente, no entanto, esse não foi o modelo de cinética empregado na simulação da secagem, como se vê no próximo item.

#### 4.4.1 Modelagem e simulação

Neste tópico serão apresentados os resultados das simulações de secagem através do uso dos modelos a três fases, proposto por Vitor (2003) e o simplificado a duas fases, utilizado por Lima (2004). Anteriormente, porém, foram feitas as estimativas de parâmetros, que por sua vez são subdivididas em duas etapas: transferência de calor e de massa.

#### 4.4.2 Transferência de calor

As equações usadas como modelo de transferência de calor são simplificações das Equações (28) a (30) - p. 31 -, referentes ao modelo de secagem a três fases, trazendo consigo todas as hipóteses do modelo original, como por exemplo, perda de calor pelas paredes através da fase gás intersticial, em cujo fluxo pode variar de mistura perfeita a empistonado. A principal simplificação para este caso específico é que não há remoção de água, sugerindo equilíbrio entre as fases sólida e gás, fazendo com que qualquer termo relacionado à variação de umidade fosse desconsiderado.

Um resumo das equações de balanço de energia deste modelo é visto no Quadro 4.1 e a taxa de perda de calor pelas paredes do leito é expressa por:

$$E_{parede} = \alpha_P \frac{A_L}{V_{leito}} (\bar{T}_{leito} - T_{amb}) = \alpha_{pa} \frac{A_L}{V_{leito}} (\bar{T}_{parede} - T_{amb}) \quad (39)$$

onde  $\alpha_P$  é o coeficiente global que combina os coeficientes leito-parede ( $\alpha_{lp}$ ) e parede-ambiente ( $\alpha_{pa}$ ), além da resistência térmica da parede;  $\bar{T}_{leito}$  é a temperatura média do gás ao longo do leito, obtido por balanço de entalpia para a mistura gás intersticial-bolha;  $\bar{T}_{parede}$  é a temperatura média da parede da coluna,  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente e  $A_L$  e  $V_{leito}$  são a área lateral da coluna e o volume do leito, respectivamente. Vitor (2003) usou  $\alpha_P$  como parâmetro do modelo para calcular  $E_{parede}$ . Para desvincular  $E_{parede}$  da temperatura do gás, neste trabalho escolheu-se utilizar o parâmetro  $\alpha_{pa}$  da Equação (39), uma vez que foram feitas medidas da temperatura da parede durante os ensaios.

Quadro 4.1: Equações de balanço de energia do modelo de Vitor (2003).

<b>Fase sólida</b>	$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{d}{dt} H_s = f_{E1}$	(40a)
	$H_s = (c_{ps} + Y_s c_{pw}) (T_s - T_R)$	(40b)
<b>Fase gás intersticial</b>	$(1 - \delta) \varepsilon_{mf} \rho_g \frac{d}{dt} \bar{H}_i + G_{gi} \beta_T \frac{\bar{H}_i - H_0}{L} = f_{E2T} - f_{E1} - E_{parede}$	(41a)
	$\bar{H}_i = (c_{pgi} + Y_g c_{pvi}) (\bar{T}_{gi} - T_R) + Y_g \lambda$	(41b)
<b>Fase gás bolha</b>	$\delta \rho_g \frac{\partial}{\partial t} H_b + G_{gb} \frac{\partial}{\partial z} H_b = -f_{E2}$	(42a)
	$H_b = (c_{pgb} + Y_g c_{pvb}) (T_{gb} - T_R) + Y_g \lambda$	(42b)
<b>Hipóteses:</b>	$T_{gi}(0, z) = T_{gb}(0, z) = T_{s0}$	
$\bar{T}_s(0) = \bar{T}_{s0}$	$T_{gi}(t, 0) = T_{gb}(t, 0) = T_{s0} + (T_{g0} - T_{s0}) [1 - \exp(-t/\tau)]$ , com $\tau \leq 0,1$ s	
$Y_s = \text{cte} = Y_{Seq}$	$Y_g = \text{constante}$ ;	
(teor de umidade em equilíbrio com $Y_g^*$ )	$1 < \beta_T \leq 1,5 \Rightarrow$ fluxo arbitrário;	
	$\beta_T = \left( \frac{L}{\bar{H}_i - H_0} \right) \frac{\partial H_i}{\partial z} \Rightarrow$ empistonado;	
	$\beta_T = 1 \Rightarrow$ mistura perfeita.	

Outra alteração importante com relação ao modelo de Vitor (2003) foi definir de antemão o tipo de fluxo da fase gás intersticial como empistonado (melhores resultados obtidos nessa forma, implicando em um coeficiente de ajuste da fase gás

intersticial,  $\beta$ , igual a  $\beta_r = \left( \frac{L}{\bar{H}_i - H_o} \right) \frac{\partial H_i}{\partial z}$ , o que reduz o número de parâmetros a ser estimado.

Por fim, os dois outros parâmetros que devem ser estimados são apresentados na seguinte equação:

$$h = \frac{k_g}{d_p} (x_1 \text{Re}_p^{x_2}) \quad (43)$$

Através da Equação (43) se determina o coeficiente de transferência de calor entre o sólido e o gás intersticial,  $h$ , expresso em função de  $\text{Re}_p$ . Logo, tem-se que realizar a estimação de três parâmetros ( $x_1$ ,  $x_2$  e  $\alpha_{pa}$ ). O coeficiente de transferência de calor entre a fase bolha e gás intersticial ( $h_b$ ) é determinado via correlações propostas por Kunii e Levenspiel (1991) - Equações (31), (33) e (34).

Além disso, algumas equações de tamanho e velocidade de ascensão de bolhas foram substituídas de modo a atender ao padrão de escoamento de fluidos em tipos de leito formado por partículas do Grupo D de Geldart, ao contrário da tapioca (Grupo B) usada por Vitor (2003).

De acordo com a teoria de três fases, o escoamento do gás é subdividido em fase bolha e fase densa segundo:

$$G_{gb} = \Psi (G_g - G_{mf}) = \rho_g \Psi (U_g - U_{mf}) \quad (44)$$

com  $\Psi = 1$ . No entanto, como mostrado por Yates (1983), há um desvio dessa teoria já que na verdade  $\Psi$  diminui na medida em que o diâmetro da partícula aumenta. Para partículas grossas pertencentes ao grupo D de Geldart,  $\Psi$  é igual a 0,26 sob o regime de bolhas (*bubbling*, Hillgardt e Werther, 1986) e 1 sob o regime de *slugging* (Geldart, 1986).

Diante dessas informações, seguiu-se o mesmo procedimento adotado por Vitor *et al.* (2004) para a estimação dos parâmetros, que consistiu em duas etapas: o método heurístico de otimização PSO (Particle Swarm Optimization, Kennedy e Eberhart, 1995), para localizar a região da solução, seguido pelo método da máxima verossimilhança ESTIMA (Noronha *et al.*, 1993) para refinar a solução e obter diversas informações estatísticas sobre os parâmetros, sendo que em ambos os códigos computacionais foram usados a rotina DASSL (Petzold, 1989), desenvolvida em linguagem FORTRAN, para a resolução do sistema de equações algébrico-diferencial. Os dados dos Ensaio #1 a 7 da Tabela 4.1 foram utilizados na determinação de  $x_1$ ,  $x_2$  e  $\alpha_{pa}$ . Destaca-se que os Ensaio #3, 4 e 6, na condição de ponto central, foram usados na determinação das variâncias, enquanto os Ensaio #8 e 9 foram usados para a verificação do modelo, ficando de fora da determinação dos parâmetros.

Os resultados obtidos dos parâmetros estimados são mostrados na Tabela 4.4, para  $\Psi = 1$  e regime de escoamento na fase gás intersticial empistonado.

Tabela 4.4: Valores estimados dos parâmetros do modelo de transferência de calor.

Parâmetros do modelo	$x_1$ (-)*	$x_2$ (-)*	$\alpha_{pa}$ (W/K m <sup>2</sup> )**
Valor estimado	$4,11 \times 10^{-2}$	$1,55 \times 10^{-1}$	$2,75 \times 10^1$
Desvio padrão ( $\sigma$ )	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-1}$

(\*) ver Equação (43) – p. 72; (\*\*) Equação (39) – p. 71.

A matriz dos coeficientes de correlação é representada por:

$$\text{coeficientes de correlação} = \begin{pmatrix} \frac{\sigma_{x_1}^2}{\sigma_{x_1}^2} & \frac{\sigma_{x_1 x_2}^2}{\sigma_{x_1} \sigma_{x_2}} & \frac{\sigma_{x_1 \alpha_{pa}}^2}{\sigma_{x_1} \sigma_{\alpha_{pa}}} \\ \frac{\sigma_{x_2 x_1}^2}{\sigma_{x_1} \sigma_{x_2}} & \frac{\sigma_{x_2}^2}{\sigma_{x_2}^2} & \frac{\sigma_{x_2 \alpha_{pa}}^2}{\sigma_{x_2} \sigma_{\alpha_{pa}}} \\ \frac{\sigma_{\alpha_{pa} x_1}^2}{\sigma_{\alpha_{pa}} \sigma_{x_1}} & \frac{\sigma_{\alpha_{pa} x_2}^2}{\sigma_{\alpha_{pa}} \sigma_{x_2}} & \frac{\sigma_{\alpha_{pa}}^2}{\sigma_{\alpha_{pa}}^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -0.20 & 0.02 \\ -0.20 & 1 & 0.03 \\ 0.02 & 0.03 & 1 \end{pmatrix} \quad (45)$$

Ela indica que há uma baixa correlação entre esses parâmetros, isto é, entre  $x_1$  e  $x_2$ ,  $x_1$  e  $\alpha_{pa}$ , e  $x_2$  e  $\alpha_{pa}$ . Retoma-se que, se dois parâmetros não são correlacionados ou são independentes, seu coeficiente de correlação tende a ser zero. Se esses coeficientes se aproximam de 0,9, existe uma forte correlação entre os dois parâmetros. Além disso, um valor negativo deste coeficiente significa que altos valores de uma variável estão associados a pequenos valores da outra (neste caso,  $x_2$  com  $x_1$ ).

A baixa correlação entre os parâmetros do modelo e seus pequenos desvios padrão comprovam a excelente estimativa estatística desses parâmetros a partir dos dados experimentais. Do ponto de vista teórico, a Figura 4.17 – que apresenta os dados simulados de diâmetro e velocidade de ascensão das bolhas – mostra que é admitido que o regime de *slugging* exista em quase todo o leito (slugs ocorrem a partir de  $z/H \leq 0,3$ ). Isso justifica a escolha de  $\Psi = 1$  e explica os melhores resultados do regime empistonado para a fase gás intersticial.

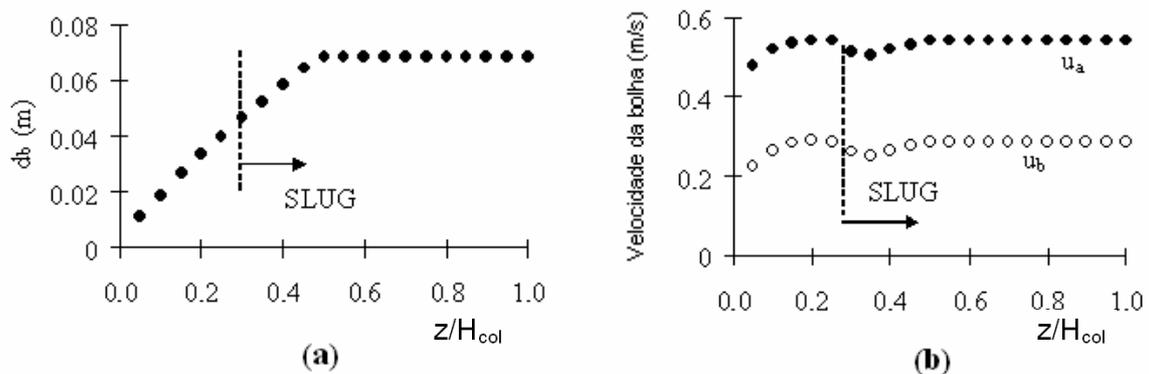


Figura 4.17: Caracterização do regime de escoamento das sementes para o Ensaio #1: a)  $d_b$  em função de  $z/H$ ; b)  $u_a$  ou  $u_b$  em função de  $z/H$ .

Através do uso dos valores dos parâmetros estimados, dados na Tabela 4.4, os Ensaio #8 e #9 foram simulados pelo modelo. Na Figura 4.18, os dados experimentais são comparados aos simulados pelo modelo, como forma de

verificação do mesmo. Vale comentar que a temperatura do ar de saída,  $T_g$ , gerada como resposta do modelo é uma combinação de  $T_{gi}$  e  $T_{gb}$ , como segue:

$$T_g = (G_{gi}T_{gi} + G_{gb}T_{gb})/G_g \quad (46)$$

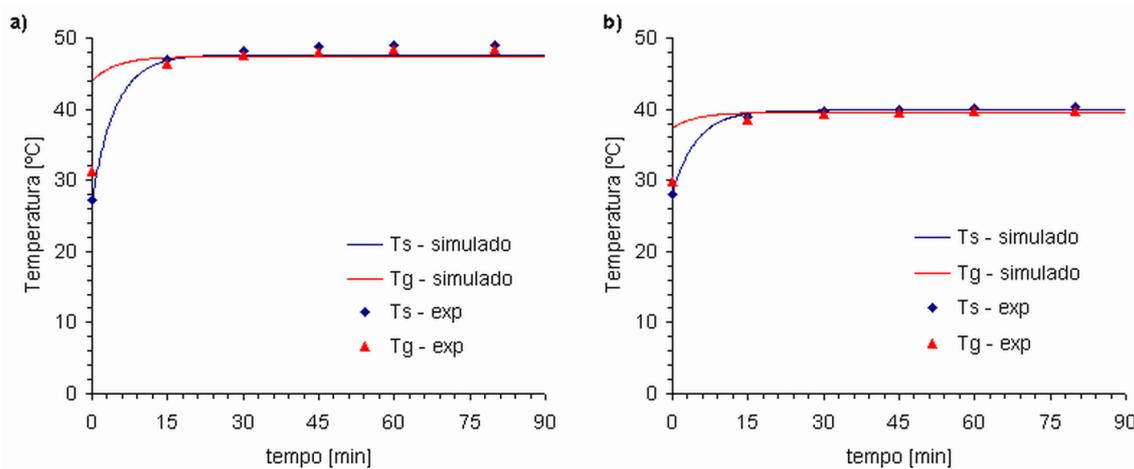


Figura 4.18: Temperatura experimental e simulada pelo modelo de transferência de calor em função do tempo: a) Ensaio #8, b) Ensaio #9.

Pela Figura 4.18, pode-se ver uma boa concordância entre os dados experimentais e os simulados pelo modelo de transferência de calor, basicamente a tempos maiores que 15 minutos. Apesar de ainda não haver nenhuma medida experimental no período inicial transiente ( $0 \leq t \leq 15$  minutos) para comparação, a temperatura do ar de saída simulada parece aumentar abruptamente durante os primeiros segundos. Tal aumento inesperado abrupto na temperatura  $T_g$  simulada deve estar relacionado à temperatura da parede, que é tomada como constante na solução do modelo, além do método de inicialização da variável na simulação. De acordo com os dados experimentais (Figura 4.13 ou Figura 4.14), porém,  $T_{parede}$  também depende do tempo, aumentando durante o período transiente até alcançar seu valor constante.

Outra hipótese que deve ser verificada é o valor de  $\Psi$ . Embora Geldart (1986) e Rhodes (1990) sugeriram  $\Psi = 1$  para o regime de *slugging*, as condições de

escoamento obtidas em leitos fluidizados de sementes são uma transição entre os regimes de bolha e de *slugging* (segundo a Figura 4.17, teórica), levando a uma mudança progressiva em  $\Psi$ , de 0,26 (grupo D de Geldart) para 1.

Apesar dessas controvérsias, o modelo de transferência de calor prediz relativamente bem os dados experimentais para a faixa de parâmetros usada neste trabalho.

Dessa forma, pretendia-se utilizar os parâmetros determinados nos ensaios de transferência de calor no modelo completo de secagem. No entanto, a etapa de secagem, discutida no item a seguir, apresentou algumas restrições a esse uso.

#### 4.4.3 Secagem

O modelo de secagem a três fases, tal como apresentado por Vitor (2003), consiste em balanços de massa e energia para as fases sólida, gás intersticial e bolha, na forma entálpica, representados pelas Equações (28) a (30) - p. 31. Como hipótese, tem-se que a fase sólida apresenta-se como mistura perfeita enquanto as fases gasosas estão em regime empistonadas. A fase gás intersticial é a responsável pela perda de energia pela parede, assim como na simplificação térmica mostrada anteriormente.

Inicialmente, foram utilizados os três parâmetros obtidos anteriormente ( $x_1$ ,  $x_2$  e  $\alpha_{pa}$ ), através dos ensaios térmicos, para a determinação dos parâmetros de transferência de massa. Mas observa-se, pela Figura 4.19, que um acerto no coeficiente de transferência de massa (a) desajustava a curva de transferência de calor (b) e vice-versa (curvas verde e vermelho). Então se decidiu reestimar os coeficientes de transferência de calor ( $x_1$  e  $x_2$ ), mas como se observa na curva azul, este procedimento resultou num desajuste de ambas as curvas.

Além disso, a curva simulada de temperatura de sólido não estava convergindo para a temperatura experimental, fato que indicou maior perda de energia para o ambiente do que realmente estava ocorrendo (Figura 4.20). Por isso decidiu-se reestimar também o coeficiente convectivo de troca térmica entre a parede e o ambiente,  $\alpha_{pa}$ . Nota-se, pela Figura 4.20, que o novo valor foi praticamente a metade do primeiro coeficiente determinado, segundo uma estimativa inicial.

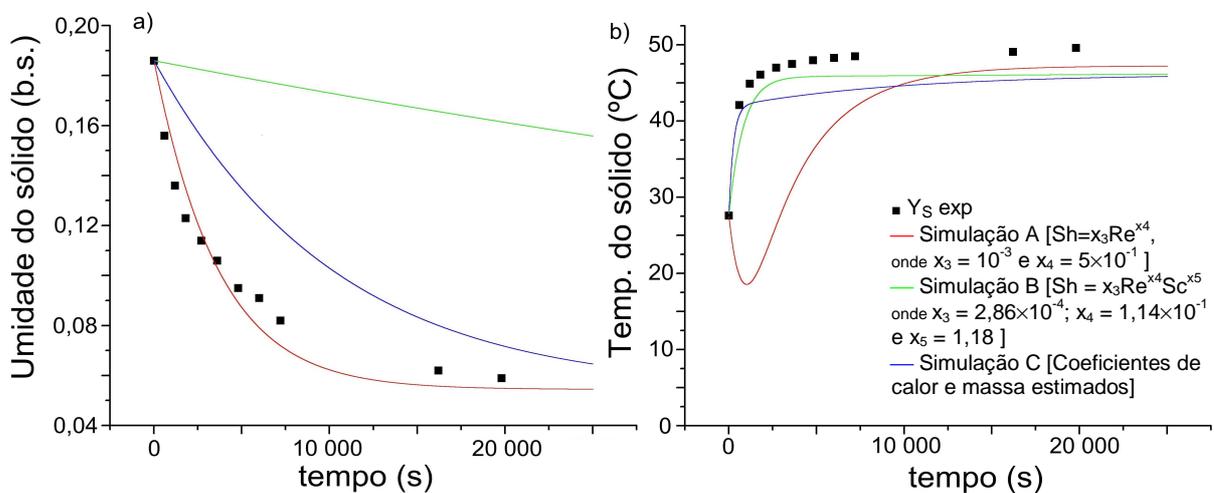


Figura 4.19: a) umidade e b) temperatura de sólido em função do tempo: primeiras tentativas de estimação dos parâmetros de secagem.

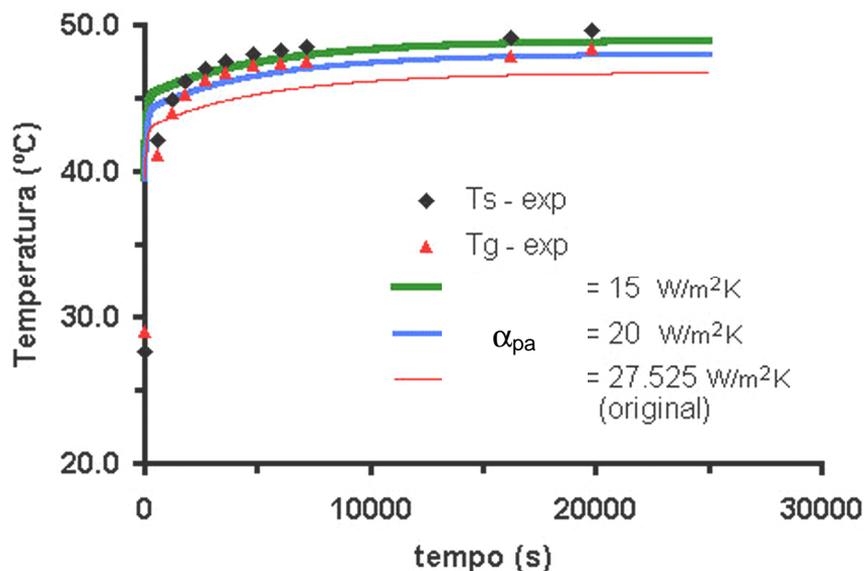


Figura 4.20: Temperatura em função do tempo: influência do valor de  $\alpha_{pa}$  na simulação da temperatura do leito.

Diante desses testes preliminares e da necessidade de determinação de todos os parâmetros, incluindo novamente os de calor, optou-se por representar a cinética de secagem das sementes através da Cinética de Lewis, representada pela seguinte equação:

$$\frac{dY_s}{dt} = -K(Y_s - Y_{seq}) \quad (47)$$

onde:

$$K = \frac{k_s a}{(1-\epsilon)\rho_s} = x_3 \cdot \exp\left(-\frac{x_4}{T_s}\right) \quad (48)$$

que é análoga à lei de resfriamento de Newton, por esta expressão possuir somente dois parâmetros,  $x_3$  e  $x_4$ .

Ressalta-se que esse tipo de equação foi diferente da forma de representação do coeficiente de transferência de massa usada por Vitor (2003), que usou  $Sh=f(Re)$ . Vale lembrar que, como discutido no item 4.4, a vazão de ar não exercia influência significativa na taxa de secagem das sementes, ao passo que a temperatura influenciava mais. Por isso, necessitava-se de uma expressão que correlacionasse o coeficiente  $k_s$  à temperatura de secagem. Ainda assim, havia a opção de se empregar o modelo de Srzdenicki *et al.* (1996), uma vez que esta cinética se ajustava perfeitamente aos dados experimentais. Entretanto, como se observa na Equação (20) - p. 13 -, seriam seis parâmetros incógnitos a serem estimados, ao invés de apenas dois no caso da Equação (48).

Com base nas Equações (39) - p. 71 -, (43) - p. 72 - e (48), cinco parâmetros ajustáveis ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  e  $\alpha_{pa}$ ) foram estimados usando os dados experimentais em conjunto com a solução do modelo. O método de resolução foi o mesmo utilizado na etapa de transferência de calor.

Considerando que o equilíbrio térmico entre as partículas e o gás é atingido quase instantaneamente, também se empregou neste trabalho o modelo simplificado a duas fases usado por Lima (2004) - Equação (27), p. 24 -, de modo a verificar a viabilidade da cinética de secagem e do parâmetro de transferência de calor entre a parede e o meio, obtidos pelo uso do modelo a três fases.

A Tabela 4.5 apresenta os valores ótimos dos cinco parâmetros ajustados pelo modelo a três fases. Esses valores, tal como os encontrados nos ensaios térmicos (Tabela 4.4), são obtidos através da minimização do desvio entre as variáveis de saída do modelo e os valores experimentais correspondentes. Esse procedimento de otimização reduziu o desvio relativo médio de  $Y_s$  para 15% e o máximo a 30%; o desvio relativo médio de  $T_s$  foi 7%, e o máximo, de 15% (Figura 4.21a). No entanto, não foi possível reduzir tanto o desvio de  $T_g$ , de modo que o desvio relativo máximo entre os dados foi de 35%, como pode ser visto na Figura 4.21b para os Ensaios #1 e 3.

Tabela 4.5: Parâmetros estimados do modelo.

<b>Parâmetros do modelo</b>	<b>Valores</b>	<b>Modelo 3-fases</b>	<b>Modelo 2-fases</b>
$x_1$ [-]	0,387	✓	não
$x_2$ [-]	0,194	✓	não
$x_3$ [ $s^{-1}$ ]	0,574	✓	✓
$x_4$ [K]	2673,4	✓	✓
$\alpha_{pa}$ [ $W/m^2K$ ]	14,23	✓	✓

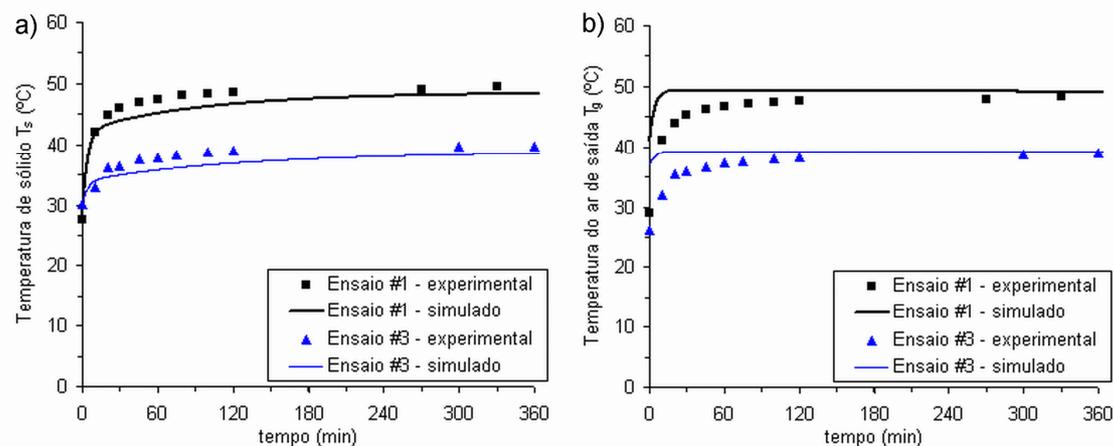


Figura 4.21: Temperaturas experimentais e simuladas em função do tempo de secagem a) do sólido e b) do ar de saída, para os Ensaio #1 e 3 da Tabela 4.2. Modelo a três fases.

Destaca-se que neste procedimento de otimização, os sete experimentos executados (Tabela 4.2) foram usados na estimativa dos cinco parâmetros ajustados do modelo. Portanto, não se pode realizar uma validação, mas somente uma verificação do ajuste com os valores ótimos desses parâmetros. Da Figura 4.21b, embora a tendência experimental seja representada pelo modelo, o ajuste aos dados experimentais necessita de algumas melhorias no começo da secagem.

Os valores ótimos de  $x_3$ ,  $x_4$  e  $\alpha_{pa}$  (Tabela 4.5) em seguida foram incorporados ao modelo simplificado a duas fases a fim de se gerar dados simulados para comparação. A Figura 4.22 apresenta a temperatura do ar de saída, que é a mesma do sólido no leito. O ajuste do modelo a duas fases é quase o mesmo, ou até superior, ao obtido pelo modelo a três fases. Isso corrobora que o equilíbrio térmico entre as partículas e o gás é atingido quase instantaneamente e as fases bolha e gás intersticial se comportam praticamente como uma fase gás única.

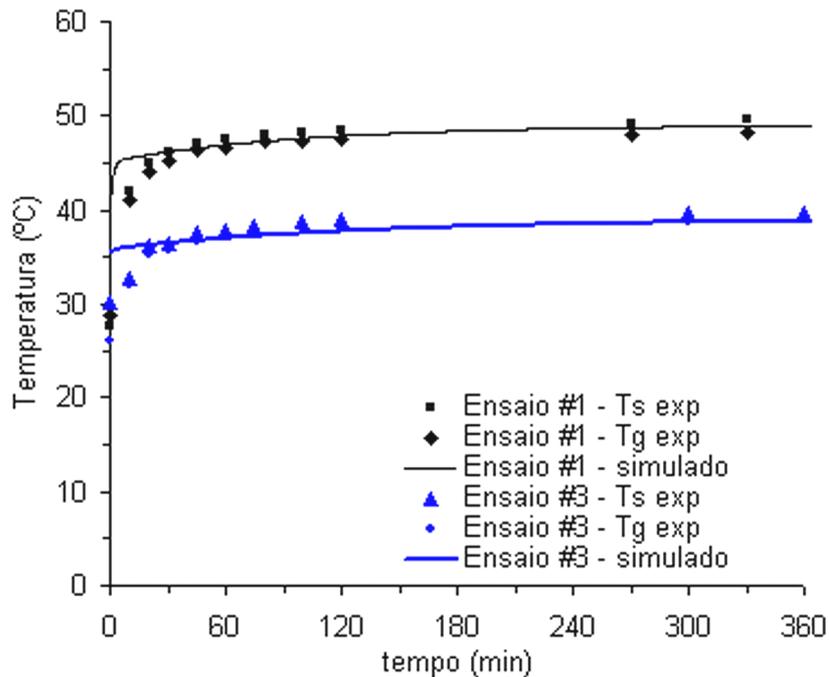


Figura 4.22: Temperaturas de sólido e do gás experimental e simulada, em função do tempo de secagem para os Ensaio #1 e 3 da Tabela 4.2. Modelo simplificado a duas fases.

Uma vez que a equação de balanço de massa para a fase sólida é a mesma para os dois modelos, é esperado que resulte num comportamento igual ao da curva de umidade de partícula em função do tempo. No começo da secagem, o ajuste de ambos os modelos aos dados experimentais não foi muito preciso. Esse grande desvio indica que provavelmente as equações constitutivas precisavam ser revistas, principalmente a que diz respeito à cinética de secagem. Os dados na Figura 4.23 comprovam que a Equação (48) - p. 78 - (com  $x_3$  e  $x_4$  dados na Tabela 4.5) não consegue prever adequadamente a secagem das sementes de gramíneas, durante um grande período do processo.

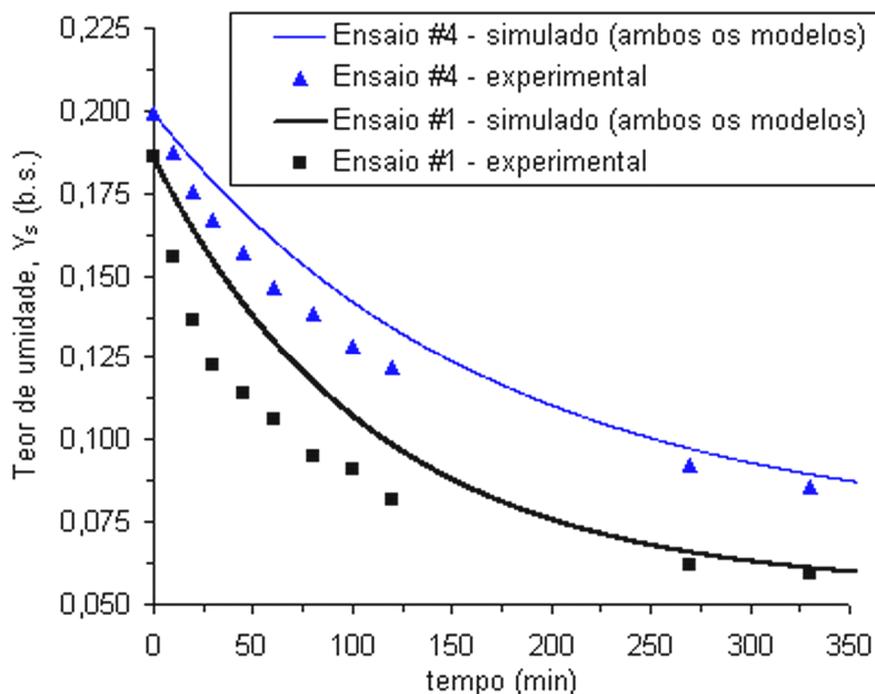


Figura 4.23: Teor de umidade em função do tempo de secagem das sementes: predito pelos modelos e experimental para os Ensaio #1 e 4 da Tabela 4.2.

#### Adequação da cinética de secagem

Diante dos resultados expostos até então, pode-se afirmar prontamente que enquanto não fosse adotada uma equação de cinética de secagem satisfatória, o modelo, seja ele qual for, dificilmente preveria simultaneamente o comportamento de remoção de umidade das partículas e as temperaturas do sistema naturalmente associadas ao processo de secagem.

Na Tabela 4.6 são mostrados os parâmetros, determinados pelo emprego do pacote MS Excel<sup>®</sup> em duas etapas, da equação caracterizada pela soma de dois termos exponenciais (Srzednicki *et al.*, 1996). Essa equação, na forma compacta como é apresentada a seguir:

$$MR = a \cdot e^{(-b \cdot t)} + c \cdot e^{(-d \cdot t)} \quad (49)$$

em que  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são parâmetros ajustáveis, também foi proposta por Ezeike e Otten (1991) e os parâmetros  $b$  e  $d$  apresentam uma dependência com a temperatura do tipo Arrhenius.

Tabela 4.6: Parâmetros cinéticos da Equação de Srzdenicki *et al.* (1996).

$a =$	0,385	$b \text{ e } d = [\text{min}^{-1}]$ $T = [\text{K}]$
$c =$	0,611	
$b_0 =$	18595,5	$b = b_0 \cdot \exp(-b_1/T)$
$b_1 =$	4100,8	
$d_0 =$	564,8	$d = d_0 \cdot \exp(-d_1/T)$
$d_1 =$	3612,9	

A Figura 4.24 mostra os pontos experimentais e os ajustados segundo os parâmetros da Tabela 4.6 (identificado como “fit global T°C”). Nota-se que o ajuste apresentou-se de melhor qualidade.

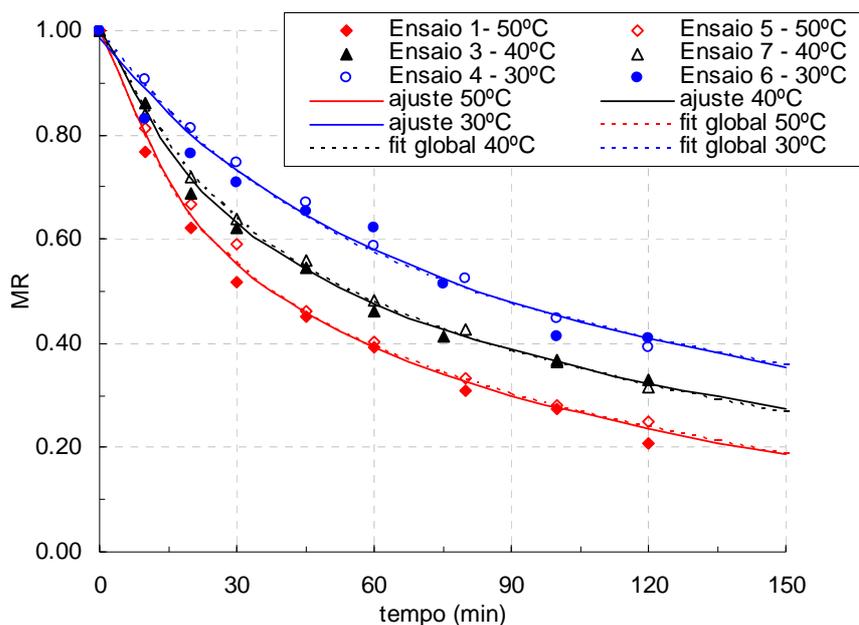


Figura 4.24: Umidade adimensional em função do tempo.

Na seqüência, inseriu-se a referida equação cinética com os respectivos parâmetros no modelo de secagem a três fases em leito fluidizado, de modo que a expressão de taxa de transferência de massa entre as fases sólida e gás intersticial tornou-se:

$$f_{M1} = -(1-\varepsilon)\rho_s \frac{dY_s}{dt} = -(1-\varepsilon)\rho_s (Y_{s0} - Y_{seq}) (-abe^{-bt} - cde^{-dt}) \quad (50)$$

Dessa forma, ao inserir a derivada da cinética de secagem na expressão de  $f_{M1}$  (taxa de secagem,  $\text{kg m}^{-3}\text{s}^{-1}$ ), elimina-se uma equação diferencial do sistema de equações, bem como os próprios parâmetros cinéticos, que passam a ser fixos, já que foram previamente determinados.

Assim, a rotina de estimação de parâmetros ESTIMA foi utilizada para se determinar apenas os parâmetros térmicos do modelo de secagem a três fases. Portanto, os parâmetros novamente estimados foram  $x_1$ ,  $x_2$  e  $\alpha_{pa}$ , das Equações (39) e (43).

Os resultados são mostrados na Tabela 4.7. Observa-se que os desvios padrão estão até maiores do que os próprios valores dos parâmetros (exceto  $\alpha_{pa}$ ). Também são apresentados os coeficientes de correlação entre os parâmetros, de acordo com a seguinte equação:

$$\text{coeficientes de correlação} = \begin{pmatrix} \frac{\sigma_{x_1}^2}{\sigma_{x_1}^2} & \frac{\sigma_{x_1 x_2}^2}{\sigma_{x_1} \sigma_{x_2}} & \frac{\sigma_{x_1 \alpha_{pa}}^2}{\sigma_{x_1} \sigma_{\alpha_{pa}}} \\ \frac{\sigma_{x_2 x_1}^2}{\sigma_{x_1} \sigma_{x_2}} & \frac{\sigma_{x_2}^2}{\sigma_{x_2}^2} & \frac{\sigma_{x_2 \alpha_{pa}}^2}{\sigma_{x_2} \sigma_{\alpha_{pa}}} \\ \frac{\sigma_{\alpha_{pa} x_1}^2}{\sigma_{\alpha_{pa}} \sigma_{x_1}} & \frac{\sigma_{\alpha_{pa} x_2}^2}{\sigma_{\alpha_{pa}} \sigma_{x_2}} & \frac{\sigma_{\alpha_{pa}}^2}{\sigma_{\alpha_{pa}}^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -0,45 & 0,23 \\ -0,45 & 1 & -0,28 \\ 0,23 & -0,28 & 1 \end{pmatrix} \quad (51)$$

Tabela 4.7: Parâmetros térmicos determinados para o modelo a três fases.

Parâmetro	Valor	Desvio padrão ( $\sigma$ )
$x_1$	0,972	1,35
$x_2$	0,079	0,95
$\alpha_{pa}$ (W/m <sup>2</sup> K)	14,15	4,42

Além disso, também se determinou os coeficientes de correlação entre os valores experimentais e os gerados por simulação, durante a estimação dos parâmetros, conforme apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Coeficientes de correlação entre as variáveis experimentais e simuladas.

Variável	$Y_s$	$T_s$	$T_g$
$R^2$	0,975	0,960	0,901

Na Figura 4.25 tem-se uma idéia do comportamento dessas variáveis ( $Y_s$  = umidade do sólido;  $T_s$  = temperatura do sólido;  $T_g$  = temperatura do ar de saída).

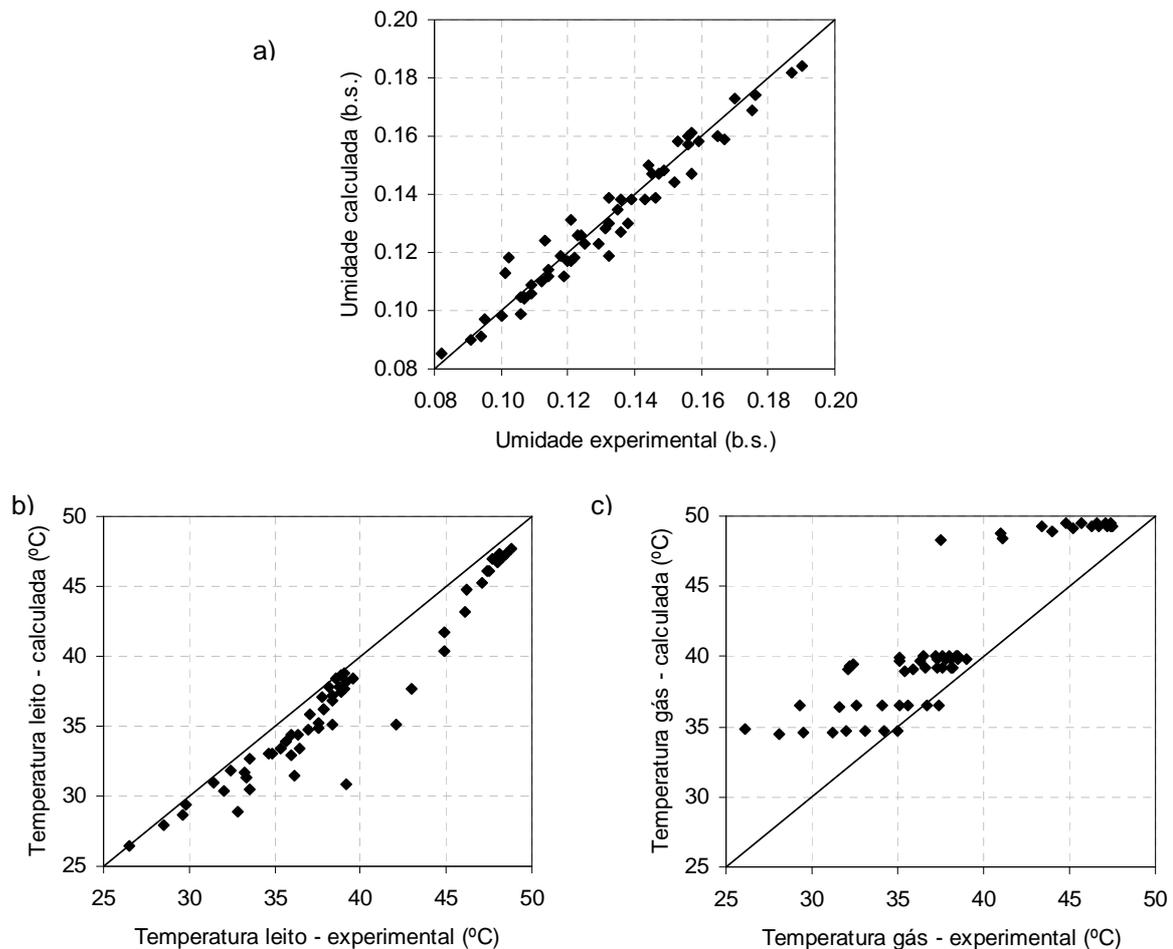


Figura 4.25: a) Umidade, b) Temperatura dos sólidos e c) Temperatura do ar de saída simulados em função dos valores experimentais.

Quanto mais os pontos se aproximam da diagonal, mais próximos os valores experimentais estão dos gerados pelo modelo. Nota-se que a variável  $Y_s$  (umidade dos sólidos) é a que apresenta o maior coeficiente de correlação entre os valores experimentais e os simulados, bem como exibe os pontos mais próximos da diagonal. Destaca-se que essa variável aplica-se tanto ao modelo a três fases como ao a duas fases. As outras variáveis, por outro lado, apresentam sempre um desvio

sistemático negativo ( $T_s$ ) ou positivo ( $T_g$ ) entre o gerado pelo modelo e o experimental.

Mesmo com esse desvio sistemático, optou-se por realizar uma análise de sensibilidade de algumas propriedades físicas ou parâmetros, a fim de se discutir as possíveis razões do modelo não prever satisfatoriamente o comportamento de transferência de calor e massa das sementes de gramínea em leito fluidizado.

#### **4.5 Análise de sensibilidade – modelo a três fases**

A seguir são mostrados os resultados em forma de curvas resposta do modelo para perturbações em algumas propriedades físicas ou parâmetros do modelo a três fases em leito fluidizado. Foram selecionadas condições experimentais de um experimento específico (Ensaio #3 da Tabela 4.2) tomado como padrão, a fim de se verificar o comportamento de algumas das variáveis de saída (taxa de secagem,  $f_{M1}$ ; temperatura do sólido,  $T_s$ ; umidade do ar de saída,  $Y_g$ ; temperatura do ar de saída,  $T_g$  e umidade das partículas,  $Y_s$ ).

Os tipos de parâmetros do modelo analisados foram os geométricos (esfericidade, diâmetro da partícula e porosidade do leito), de inércia (massa específica da fase sólida), dinâmicos (velocidade de mínima fluidização e fração de bolhas, que depende das velocidades das fases), de inércia térmica (calor específico das partículas), além de inércia mássica (representados pelos coeficientes da equação de cinética de secagem e pela umidade de equilíbrio). Também se analisou a sensibilidade direta dos parâmetros estimados ( $x_1$ ,  $x_2$  e  $\alpha_{pa}$ ) no comportamento térmico do modelo.

#### 4.5.1 Massa específica das sementes

Na Figura 4.26 são mostradas as curvas-resposta para variações de -20% a +20% na massa específica das sementes, sendo o valor original igual a 1017,9 kg/m<sup>3</sup>. Não se verifica nenhuma variação significativa nas variáveis analisadas no intervalo de massa específica avaliado. Assim, da maneira com que o modelo está proposto, é possível errar 20% em torno do valor experimental de  $\rho_s$  que esta propriedade não afeta o comportamento do modelo, sendo que a variável que apresentou maior desvio foi a temperatura do sólido, com apenas 0,6% de diferença relativa.

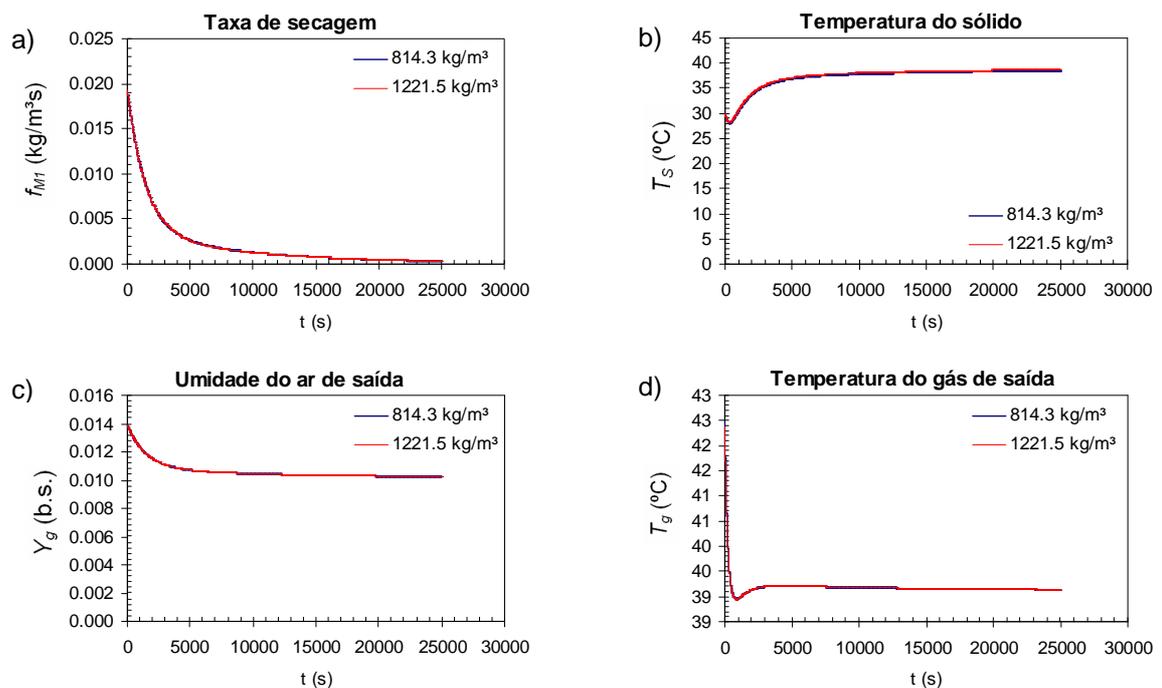


Figura 4.26: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -20% a +20% na massa específica.

#### 4.5.2 Esfericidade

Na Figura 4.27 são mostradas as curvas-resposta para variações de -20% a +5% na esfericidade das sementes, sendo o valor original igual a 0,92. A

variação percentual positiva não foi maior para não ultrapassar 1 (forma esférica). Verifica-se que a esfericidade exerce pouca influência nas propriedades estudadas, observando-se um desvio relativo máximo de 0,2% na temperatura final do sólido com o aumento da esfericidade. Pode-se, então, afirmar que esta propriedade também não afeta o comportamento mássico e térmico do modelo.

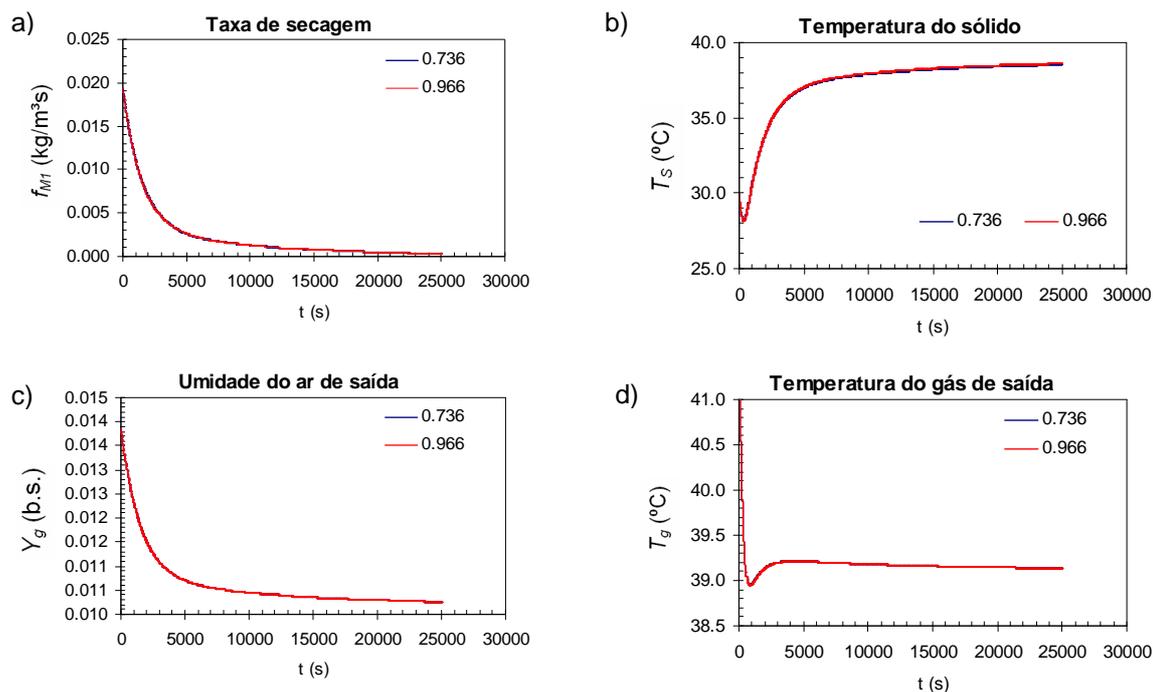


Figura 4.27: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -20% a +5% na esfericidade.

### 4.5.3 Calor específico

Na Figura 4.28 são mostradas as curvas-resposta para variações de -30% a +20% no calor específico das sementes, sendo o valor original igual a 428 J/kgK. Verifica-se que há um ligeiro desvio relativo máximo de 9% na temperatura do sólido ( $T_s$ ) no início do processo de secagem, reduzindo a zero ao longo do tempo, com desvio médio de 0,1%. Pouco mais de 2°C de diferença é observado apenas nos primeiros instantes (até 90 segundos), apresentando uma maior queda de temperatura para a simulação com menor calor específico, em função da taxa de evaporação nesse período, que se mantém constante, indicado

pela Equação (28b) - p. 31. Isso é esperado, uma vez que o calor específico é a grandeza que define a variação térmica das partículas ao receber a mesma quantidade de calor do ar de secagem. Entretanto, como há uma equalização das temperaturas em pouco tempo de processo, pode-se afirmar que esta propriedade também praticamente não influencia as variáveis estudadas.

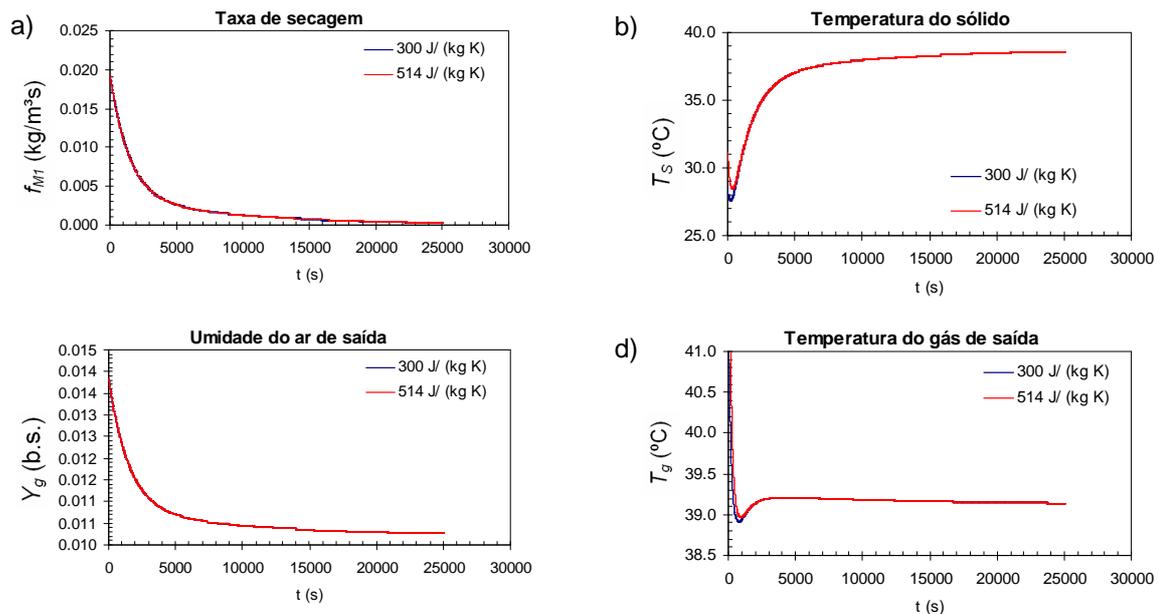


Figura 4.28: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -30% a +20% no calor específico.

#### 4.5.4 Diâmetro da partícula

Inicialmente verificou-se a evolução do diâmetro da partícula ao longo do tempo durante a simulação, já que é uma propriedade calculada pelo modelo e dependente da umidade, em virtude do encolhimento das sementes (as propriedades geométricas foram mostradas no Quadro 3.1), conforme apresentaram Arnosti Jr. *et al.* (2000). Na Figura 4.29 mostra-se o diâmetro da partícula ao longo do tempo na condição original da simulação e em duas outras situações, resultantes de variações de -30% a +30%. Para o caso original, por exemplo, a redução de tamanho das sementes é de -4,6%, desde o início até o tempo final considerado.

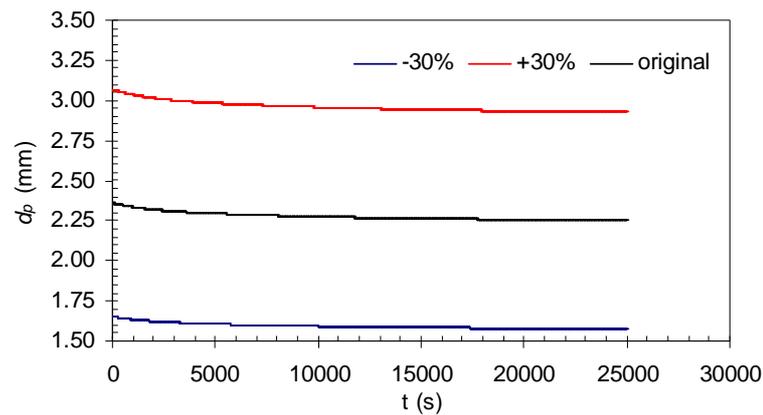


Figura 4.29: Diâmetro da partícula em função do tempo.

A Figura 4.30 apresenta as curvas-resposta para essas perturbações no diâmetro da partícula. Verifica-se que, quanto maior o tamanho da partícula, maior é a temperatura de sólido ( $T_s$ ) atingida, observando-se um desvio relativo máximo de 1,0%. As demais variáveis não são afetadas. Esse resultado de  $T_s$  é o inverso do esperado, uma vez que menores diâmetros resultam em maiores áreas superficiais e maiores coeficientes de transferência de calor entre as fases, o que aumentaria a troca térmica da fase gás intersticial à fase sólida, atingindo temperaturas mais altas de sólido.

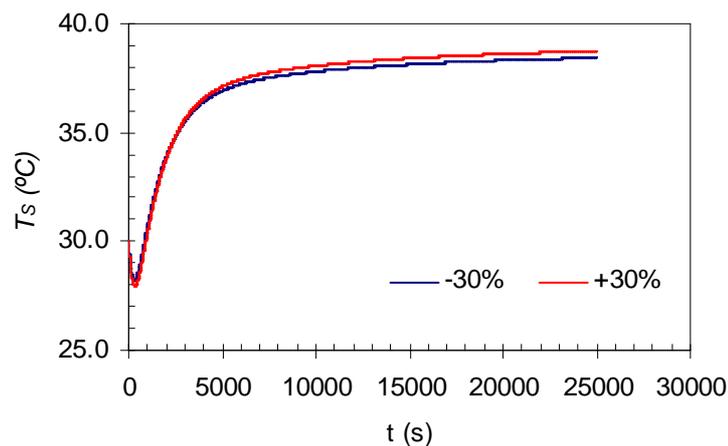


Figura 4.30: Temperatura do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -30% a +30% no diâmetro das partículas.

#### 4.5.5 Porosidade do leito

Assim como o diâmetro das partículas, verificou-se o comportamento da porosidade do leito antes de se aplicar perturbações nesta variável. A Figura 4.31

apresenta a evolução da porosidade do leito ao longo do tempo, representada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_s}{V_L} = 1 - \frac{m_s}{\rho L A_s} \quad (52)$$

onde  $m_s$  é a massa de sólidos úmidos e  $A_s$  é a área da seção transversal do leito. As variações foram de -25% a +50% em torno da curva original de porosidade.

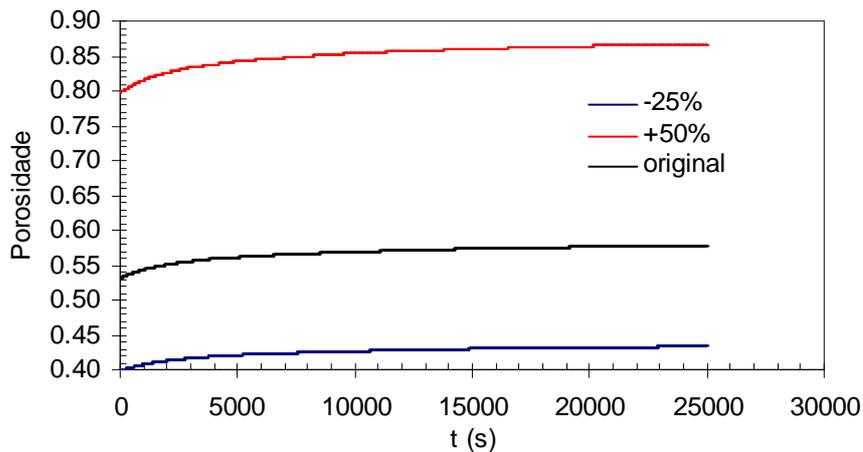


Figura 4.31: Porosidade em função do tempo.

As curvas-resposta são apresentadas na Figura 4.32. Observa-se que essa variação na porosidade do leito afeta significativamente os perfis das variáveis analisadas, verificando-se desvios máximos relativos em torno de 27%, 26% e 21% para a temperatura das partículas, umidade do ar de saída e temperatura do ar de saída, respectivamente.

Esta constatação é preocupante, considerando-se que a porosidade do leito é uma variável calculada no modelo, através de uma equação aproximada, sem o auxílio de nenhuma técnica experimental para confirmar a ordem de grandeza de seu valor real. Assim, a incerteza do uso dessa variável mostra-se como um grande ponto negativo do modelo a três fases.

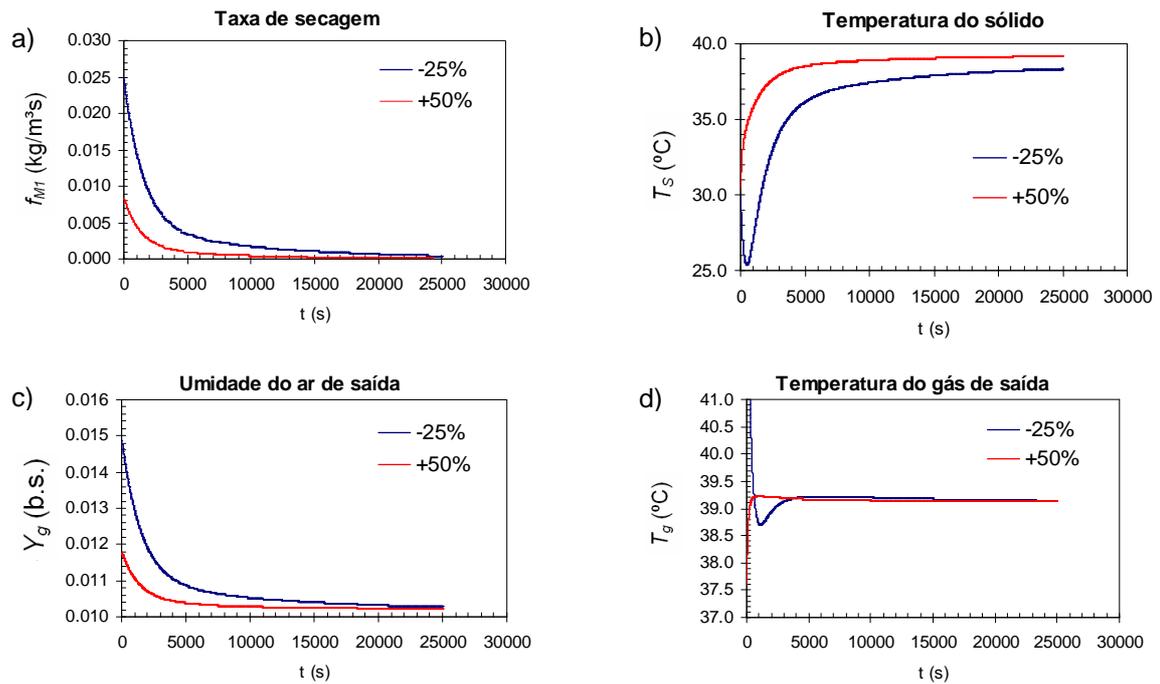


Figura 4.32: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -25% a +50% na porosidade do leito.

#### 4.5.6 Velocidade mínima de fluidização, $G_{mf}$

Na Figura 4.33 são mostradas as curvas-resposta para variações de -20% a +20% na velocidade mínima de fluidização, sendo o valor original igual a 0,682 kg/m<sup>2</sup>s. Verifica-se que influencia significativamente a temperatura do sólido, produzindo desvios relativos máximos em torno de 13,9%, no início do processo de secagem, quando é observada uma queda em  $T_s$  na curva de menor  $G_{mf}$ . Além de se averiguar desvios máximos de 6,1% nas curvas de  $T_g$ , calculou-se desvios médios de 3,7% em  $T_s$ , correspondendo a uma diferença aproximada de 1,4°C nessa variável.

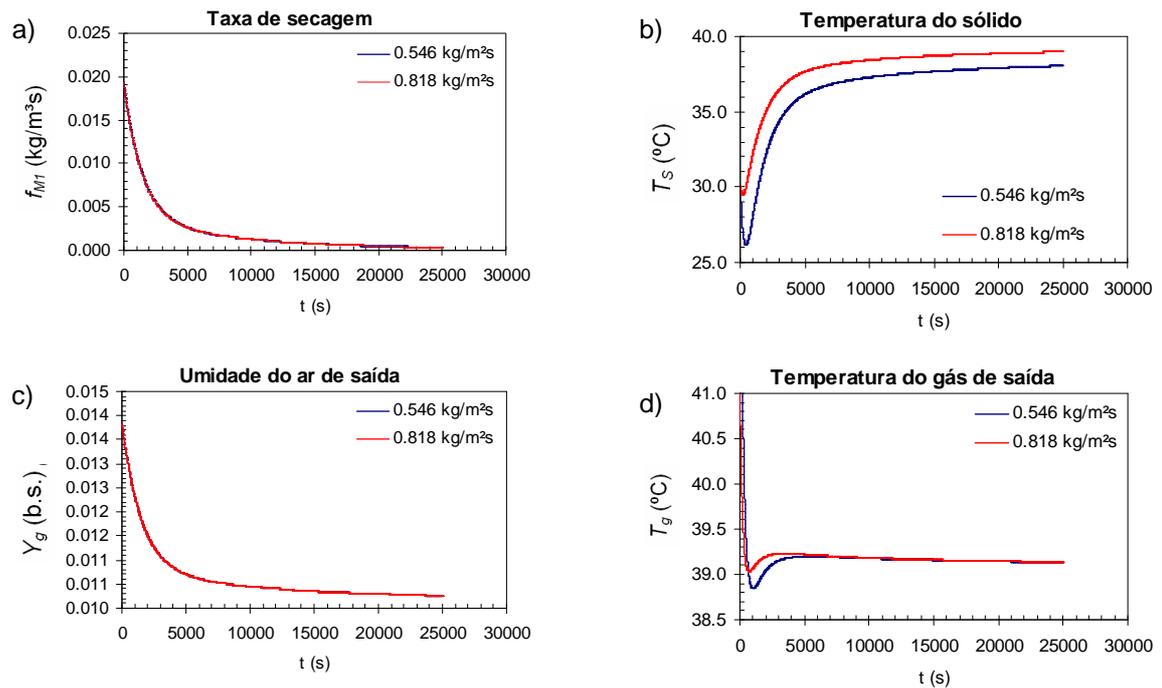


Figura 4.33: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -20% a +20% na velocidade mínima de fluidização.

Uma possível explicação para esse comportamento de maiores temperaturas de partículas para  $G_{\text{mf}}$  maiores pode ser dada da seguinte forma: segundo a teoria de três fases, a velocidade de ascensão da fase bolha ( $G_{gb}$ ) diminui se a velocidade de mínima fluidização aumenta, como pode ser visto na Equação (44) - p. 72. Isso gera uma maior velocidade da fase gás intersticial, já que  $G_{gi} = G_g - G_{gb}$ . Dessa forma, o número de Reynolds ( $Re_p$ ) torna-se maior, resultando em um maior coeficiente de transferência de calor,  $h$  da Equação (43) - p. 72 -, favorecendo o aquecimento das sementes no leito.

Assim, torna-se necessário um cuidado especial na determinação da velocidade de mínima fluidização, a fim de se reduzir as incertezas provocadas por esta variável.

#### 4.5.7 Fração de bolhas, $\Psi$

Apresentando o mesmo tipo de resposta em relação à perturbação na velocidade mínima de fluidização, uma variação no parâmetro fração de bolhas ( $\Psi$ ) de -75% (valor original igual a 1) também influencia basicamente a temperatura do sólido, com desvio relativo médio de 2,8% durante todo o período, conforme se visualiza na Figura 4.34. O ponto impactante deste parâmetro é na Equação (44) - p. 72 -, e a explicação dada anteriormente para  $G_{mf}$  pode ser aplicada aqui também.

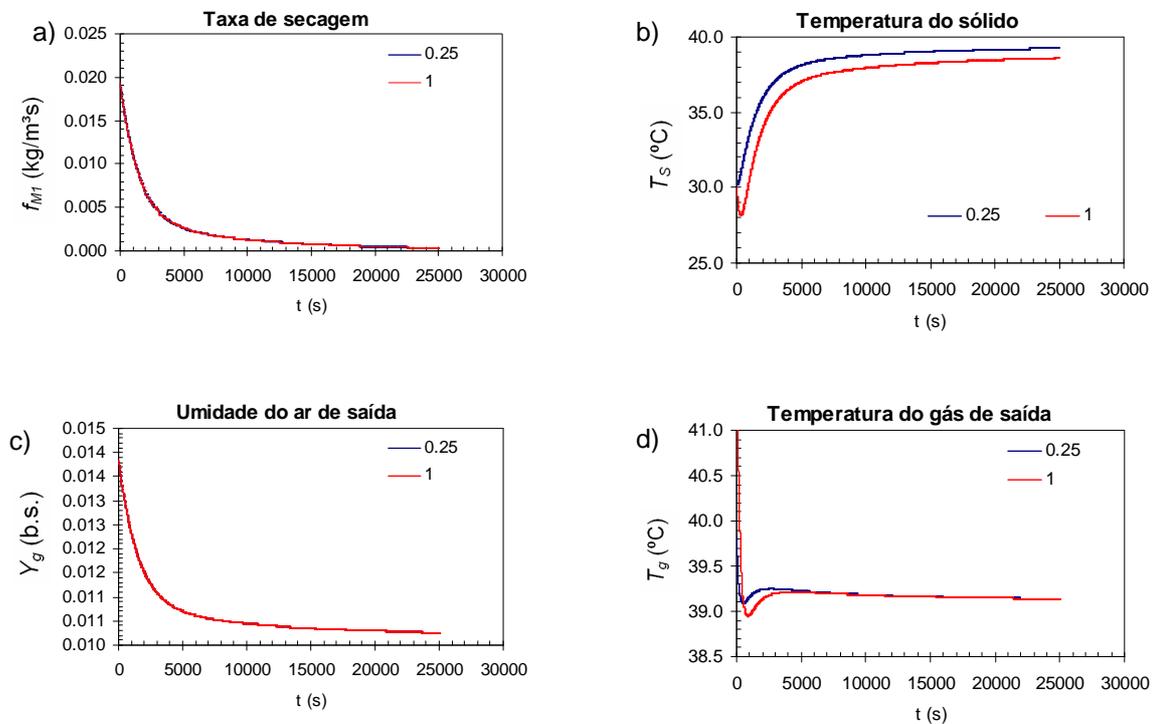


Figura 4.34: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -75% na fração de bolhas.

Este parâmetro, ao contrário de  $G_{mf}$ , que apresenta relativa facilidade de determinação experimental, é difícil de ser medido, sendo normalmente utilizados valores de literatura. Definido como fração da fase gasosa que cruza o leito na forma de bolha, é uma propriedade com significado físico confuso, principalmente no que se refere à dependência ao tipo de partícula de Geldart, que é uma aproximação

grosseira para classificação de partículas. Dessa maneira, qualquer valor assumido para  $\Psi$  já integra a hipótese do leito se comportar como trifásico, podendo-se atribuir a ele parte dos erros inerentes à adoção desse tipo de modelo.

#### 4.5.8 Parâmetro $x_1$

Na Figura 4.35 são mostradas as curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro  $x_1$ , Equação (43) - p. 72 -, sendo o valor originalmente estimado igual a 0,972. Observou-se apenas uma diferença relativa na temperatura do sólido de no máximo 2,1%, portanto exercendo influência pouco significativa.

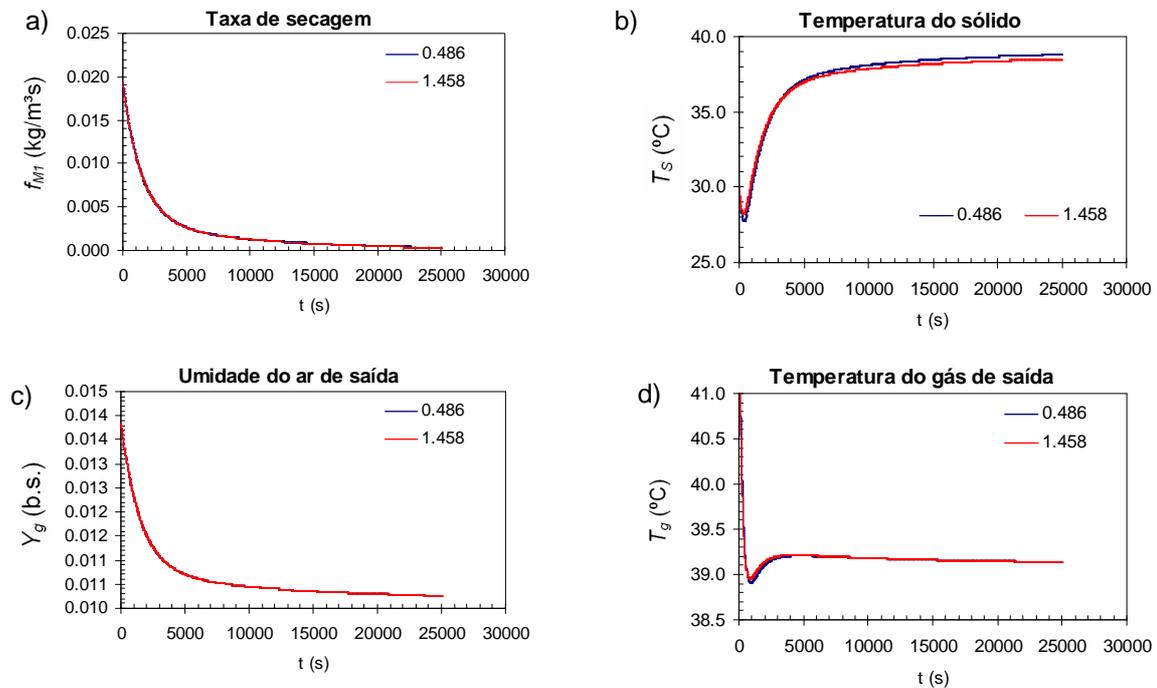


Figura 4.35: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro  $x_1$ .

Cabe destacar, no entanto, o comportamento da temperatura das partículas com a variação em  $x_1$ . Observa-se, pela Figura 4.35, que  $T_s$  atinge valores ligeiramente mais elevados com  $x_1$  mais baixo ( $x_1 = 0,486$ ). Assim como discutido no item 4.5.4, sobre o diâmetro das partículas, também se trata de uma tendência inesperada, já que o coeficiente de transferência de calor entre as fases sólida e gás

intersticial ( $h$ ) é maior com  $x_1$  mais elevado, o que favoreceria o aquecimento das partículas.

A fim de verificar essa aparente inconsistência no comportamento do aumento do parâmetro  $x_1$ , e conseqüentemente de  $h$ , resultando em menores temperaturas na fase sólida, analisou-se a mesma variação em  $x_1$ , porém zerando-se o coeficiente  $\alpha_{pa}$ , o que anula a perda de energia pelas paredes do leito. Na Figura 4.36, observa-se que desta vez a temperatura do sólido foi maior com o aumento de  $x_1$ , indicando que o termo de dissipação térmica para o meio ( $E_{parede}$ ) exerce influência significativa no balanço da fase gás intersticial, Equação (29b) - p. 31 -, justificando a redução de temperatura anteriormente discutida.

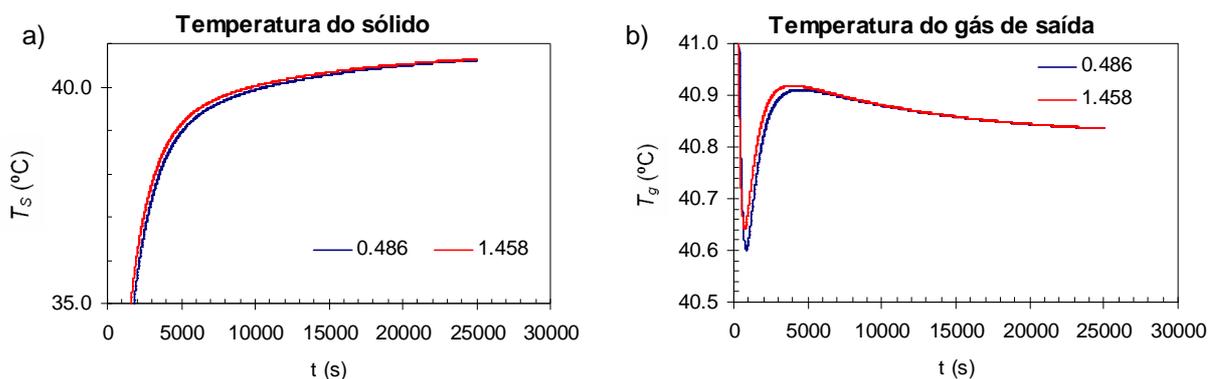


Figura 4.36: Temperatura a) do sólido e b) do gás de saída, para perturbações de -50% a +50% no parâmetro  $x_1$ , com  $E_{parede} = 0$ .

#### 4.5.9 Parâmetro $x_2$

Na Figura 4.37 são mostradas as curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro  $x_2$ , da Equação (43) - p.72 -, sendo o valor originalmente estimado igual a 0,079. Observou-se apenas um desvio relativo na temperatura do sólido de no máximo 0,3% (0,1°C), portanto menos sensível do que a perturbação semelhante em  $x_1$ .

Neste caso também é verificada uma inversão no comportamento em  $T_s$  com o aumento de  $x_2$  (que resulta num  $h$  mais elevado). A explicação dada no item anterior sobre a influência de  $E_{parede}$  também pode ser aqui admitida.

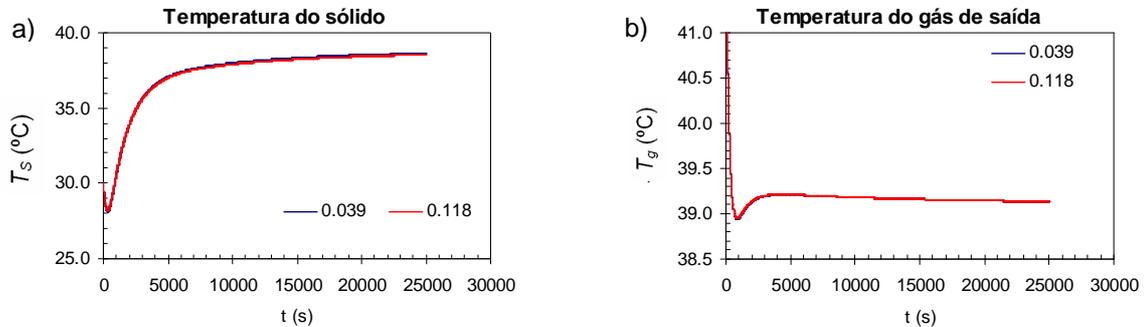


Figura 4.37: Temperatura a) do sólido e b) do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro  $x_2$

#### 4.5.10 Coeficiente de transferência de calor entre a parede do leito e o meio, $\alpha_{pa}$

Na Figura 4.38 são mostradas as curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro  $\alpha_{pa}$  (Equação (39) - p. 71 -), sendo o valor originalmente estimado igual a 14,15 W/m<sup>2</sup>K.

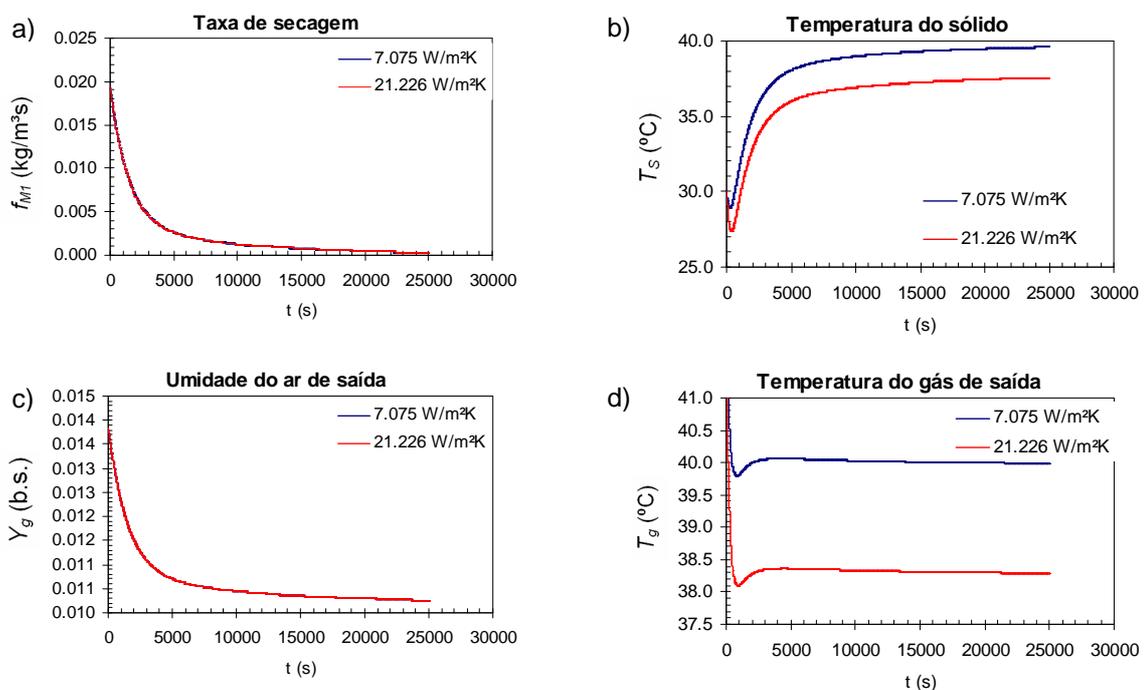


Figura 4.38: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída e d) temperatura do gás de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro  $\alpha_{pa}$ .

Observa-se que essas perturbações influenciaram significativamente as curvas de temperaturas do sólido e do ar de saída, verificando-se diferenças médias superiores a 2°C na primeira variável, e 1,7°C na segunda. Esse comportamento é esperado, uma vez que um valor elevado desse coeficiente significa maior perda de calor para o meio externo, e menos energia acumulada no leito para aquecer as partículas sólidas e o ar de saída.

#### 4.5.11 Cinética de secagem – parâmetros $a$ e $c$

Na Figura 4.39 são mostradas as curvas-resposta para variações de -25% a +25% no parâmetro  $a$  da cinética de secagem utilizada, sendo o valor original igual a 0,385. Dessa maneira, para se manter a forma adimensional da Equação (49) - p. 82 -, em que  $MR$  deve estar entre 0 e 1, o valor do parâmetro  $c$  deve ser igual a “1- $a$ ”.

Assim, procura-se avaliar a influência dos pesos dos dois termos exponenciais no comportamento das variáveis resposta estudadas.

Como esperado, ocorre uma inversão no comportamento das curvas ao se inverter os pesos (parâmetros  $a$  e  $c$ ) dos dois termos exponenciais da equação cinética adotada, observada principalmente na taxa de secagem,  $f_{M1}$ , e na evolução da temperatura de sólido. É como se fossem atribuídas importâncias diferentes para as duas etapas de secagem representadas pela Equação (49) - p. 82

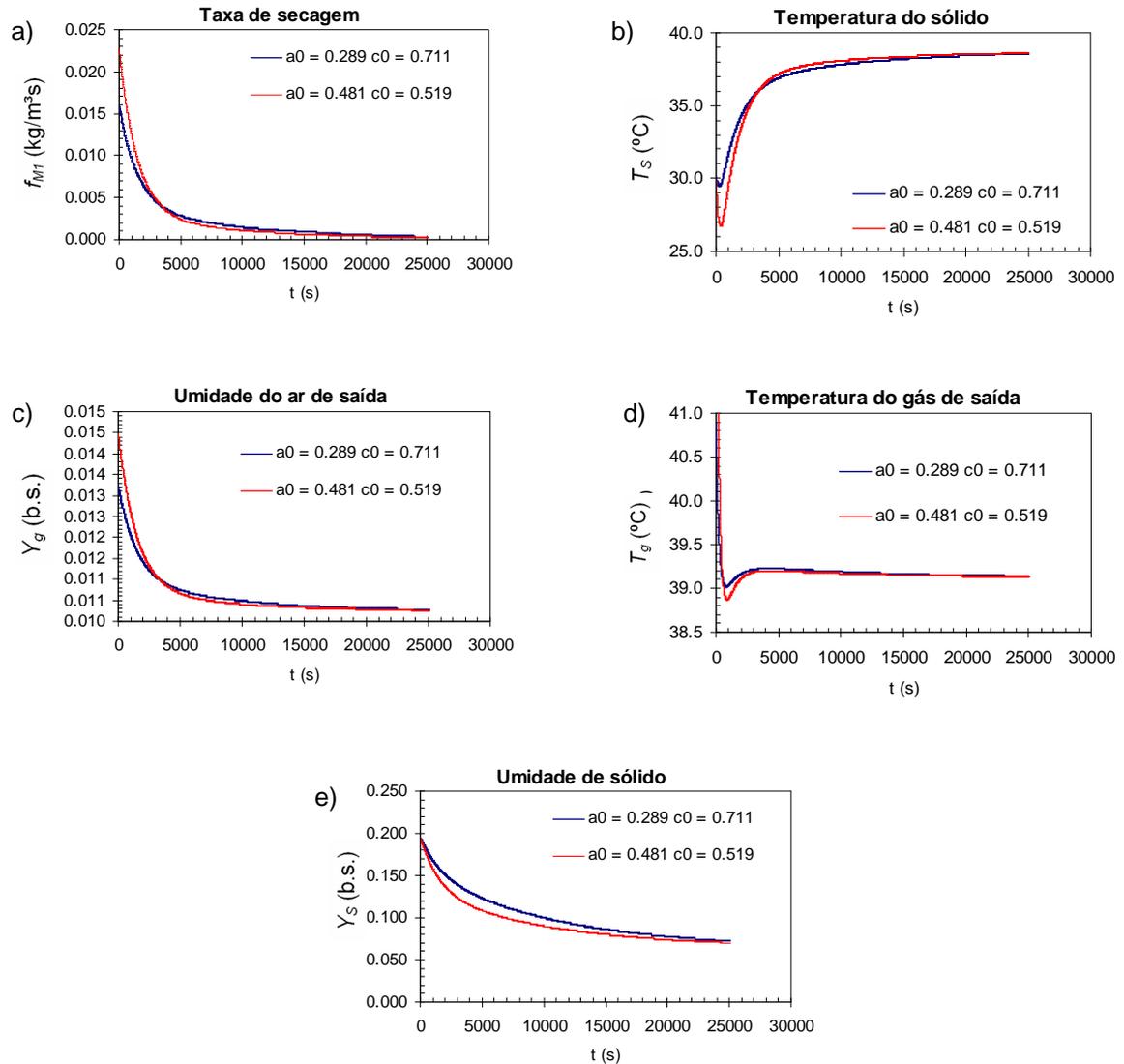


Figura 4.39: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída, d) temperatura do gás de saída e e) umidade do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -25% a +25% no parâmetro  $a$  da Equação (49).

#### 4.5.12 Cinética de secagem – degrau na taxa de secagem

A equação de taxa de secagem é dada pela seguinte equação:

$$f_{M1} = -Z \cdot (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{dY_s}{dt} = -Z \cdot (1 - \varepsilon) \rho_s (Y_{s0} - Y_{seq}) (-abe^{-bt} - cde^{-dt}) \quad (53)$$

Esta equação foi multiplicada por valores constantes (constante  $Z$  na referida equação) de 0,8 a 1,2 (variações de -20% a +20%), de modo a avaliar o comportamento das curvas resposta, conforme apresentado na Figura 4.40.

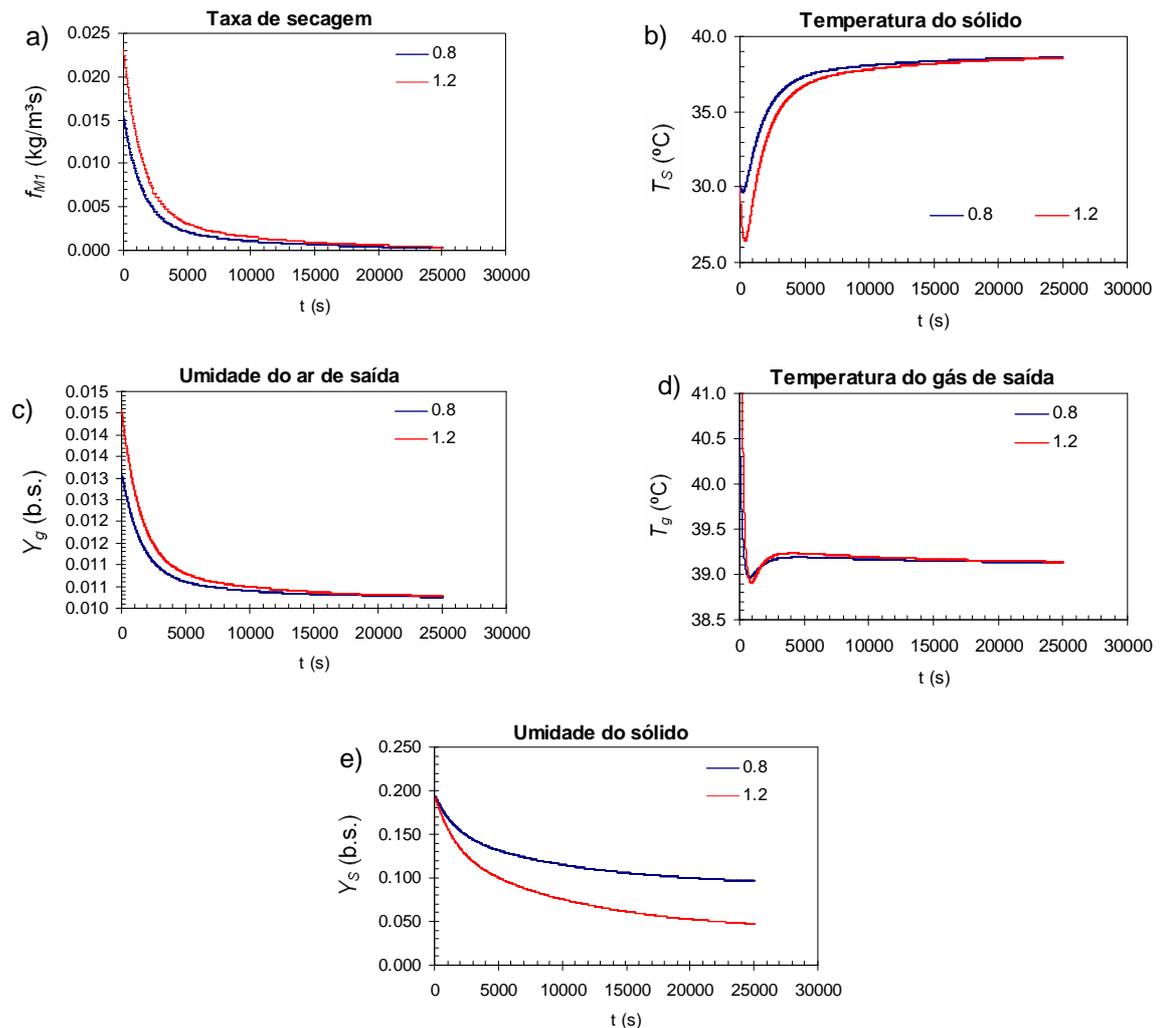


Figura 4.40: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída, d) temperatura do gás de saída e e) umidade do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -20% a +20% na equação de taxa de secagem (Equação (53)).

Como a condição inicial se mantém em  $Y_{S0}$ , ao se multiplicar a taxa de secagem por uma constante (-20% a +20%), é como se alterasse a umidade de equilíbrio,  $Y_{Seq}$ , portanto alterando o valor final de convergência da umidade do sólido em tempos infinitos (curva de umidade do sólido, na Figura 4.40).

Poder-se-ia pensar que a multiplicação da equação cinética por uma constante ( $Z$ ) fosse como alterar as resistências ligadas ao processo de secagem, mas, nos próximos itens, 4.5.13 a 4.5.15, tentar-se-á mostrar que apenas os parâmetros  $b$  e  $d$  afetam o modo de secagem e esta constante age apenas como multiplicadora da força motriz ( $Y_{s0} - Y_{Seq}$ ).

#### 4.5.13 Cinética de secagem – parâmetro $b$

A Figura 4.41 apresenta as curvas resposta para perturbações no parâmetro  $b$ , da Equação (49) - p. 82. Observa-se que alterações de -50% a +50% nesse parâmetro da cinética de secagem afeta o comportamento das variáveis analisadas. Esse parâmetro, ao contrário do mostrado no item anterior, está diretamente relacionado ao modo de eliminação de umidade do interior da partícula para o meio externo (afeta a estrutura e as resistências internas do sólido), influenciando a taxa de secagem e a forma de aquecimento do leito, como consequência.

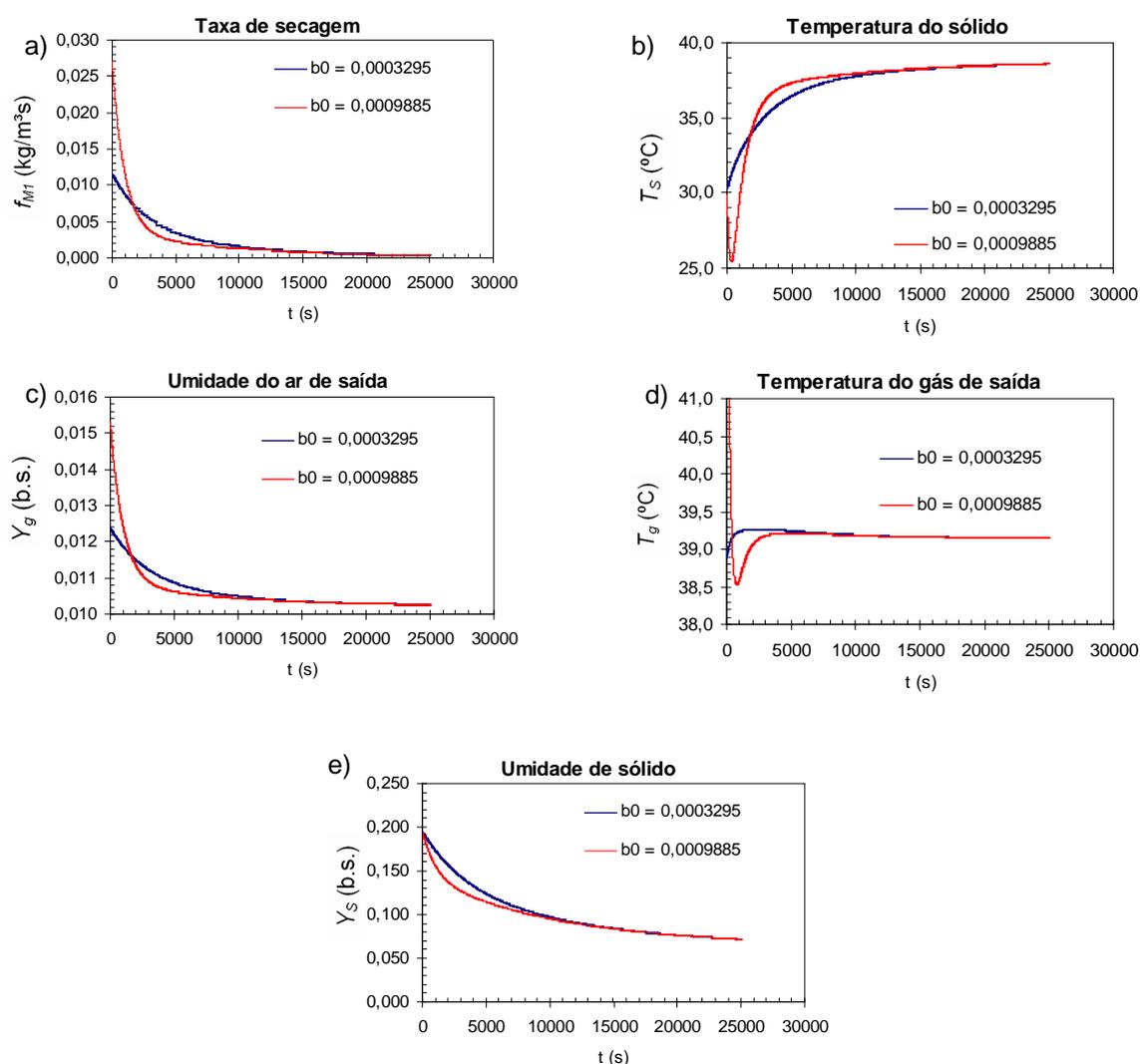


Figura 4.41: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída, d) temperatura do gás de saída e e) umidade do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro  $b$ .

#### 4.5.14 Cinética de secagem – parâmetro $d$

Da mesma forma que alterações no parâmetro  $b$ , perturbações no parâmetro  $d$  também influenciaram todas as variáveis resposta analisadas. Ao contrário do primeiro parâmetro, que exerceu maior influência no início do processo de secagem, alterações de -50% a +50% no parâmetro cinético  $d$ , do segundo termo exponencial, não provocaram variações significativas nos tempos iniciais, mas grandes desvios em tempos médios (observados principalmente na curva de umidade do sólido).

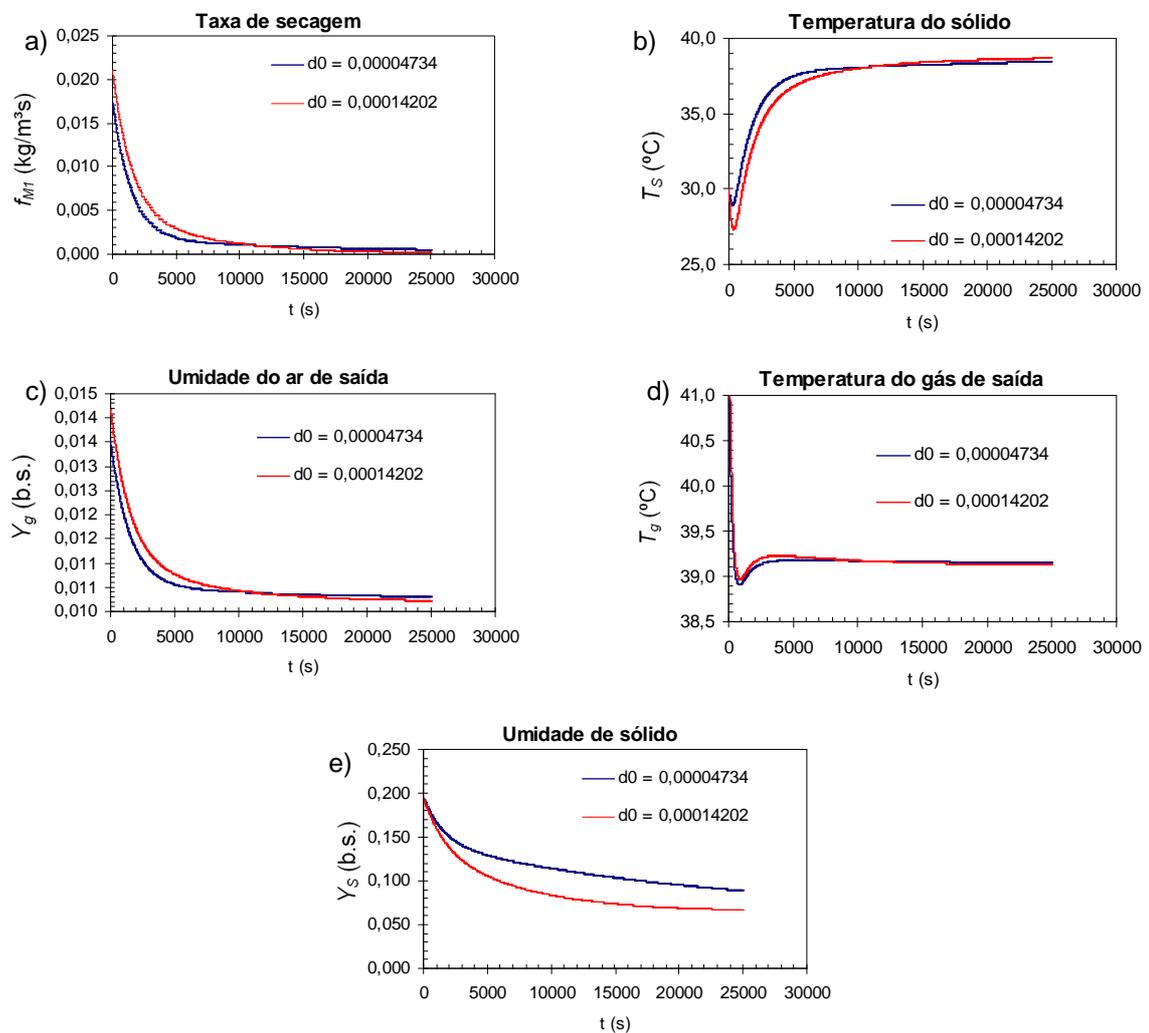


Figura 4.42: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída, d) temperatura do gás de saída e e) umidade do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro  $d$ .

#### 4.5.15 Umidade de equilíbrio, $Y_{Seq}$

Variações de -50% a +50% na umidade de equilíbrio ( $Y_{Seq}$ ) apresentaram um comportamento semelhante ao fator multiplicador da cinética de secagem (constante  $Z$ , com variação de 20%). Isto é, o principal ponto afetado é a umidade final do sólido, alterando o valor final de convergência dessa variável. As demais variáveis apresentam as conseqüências físicas de alterações na umidade de equilíbrio. Ou seja, por exemplo, a taxa de secagem é maior no início num processo com umidade de equilíbrio mais baixa, justificado pela maior força motriz ( $Y_{S0} - Y_{Seq}$ ).

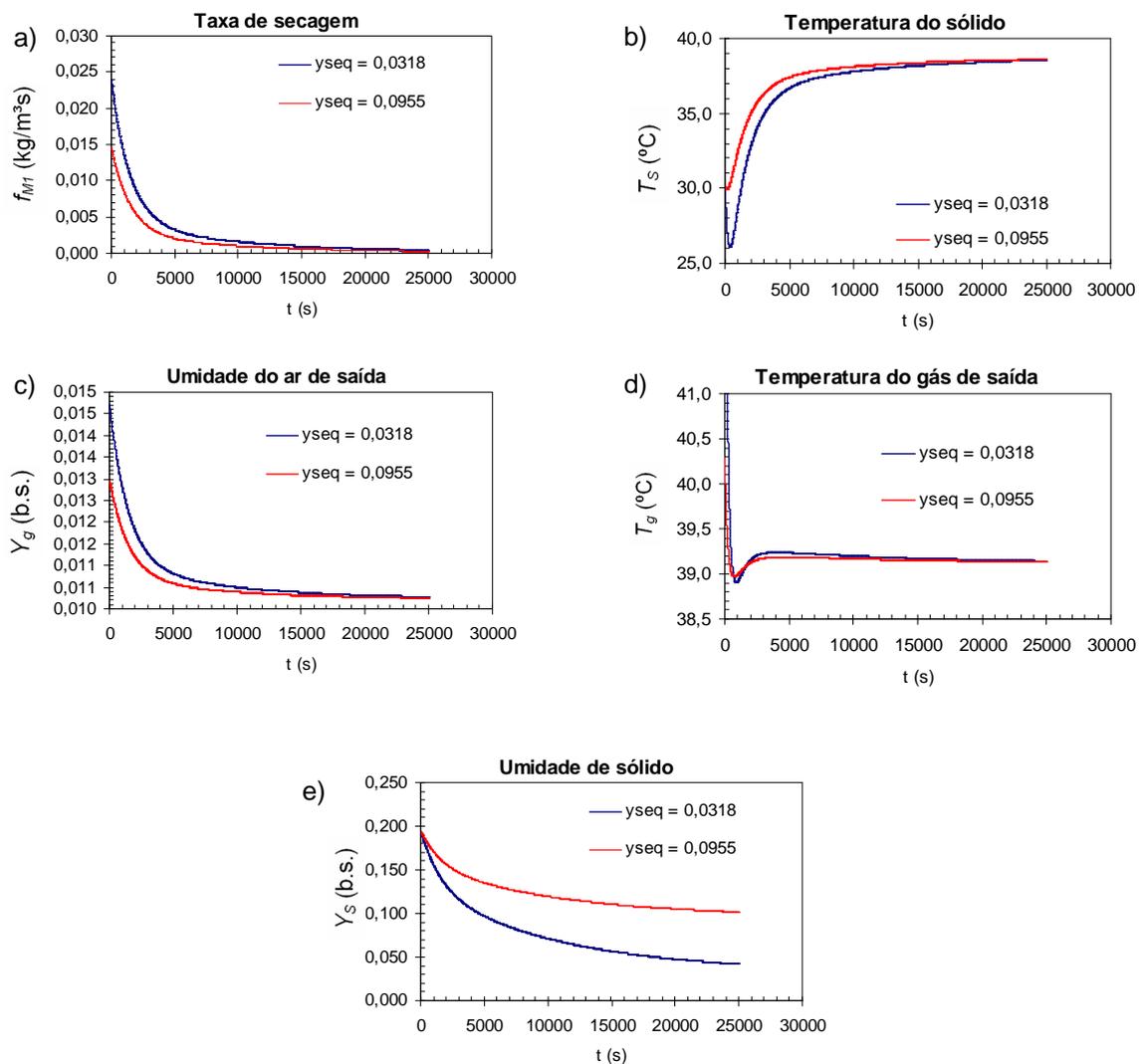


Figura 4.43: a) taxa de secagem, b) temperatura do sólido, c) umidade do ar de saída, d) temperatura do gás de saída e e) umidade do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% na umidade de equilíbrio.

## 4.6 Análise de sensibilidade – modelo a duas fases

A seguir são mostrados os resultados em forma de curvas resposta do modelo para perturbações em algumas propriedades físicas ou parâmetros do modelo a duas fases em leito fluidizado. Assim como na análise anterior, foram selecionadas as condições experimentais do Ensaio #3 como caso base, a fim de se verificar o comportamento nas variáveis de saída (taxa de secagem,  $f_{M1}$ ; temperatura do sistema,  $T_m$ ; umidade do ar de saída,  $Y_g$ ; além da umidade do sólido,  $Y_s$ )).

Em todas as propriedades estudadas, foram aplicadas variações de -50% a +50% em relação ao valor original da simulação (caso base).

### 4.6.1 Calor específico

Na Figura 4.44 são mostradas as curvas resposta às perturbações no calor específico das sementes (valor original igual a 428 J/kgK).

Assim como no modelo a três fases, não foi observado nenhum desvio nas variáveis analisadas. A máxima diferença relativa foi de apenas 0,4% para a temperatura do sistema gás-sólido ( $T_m$ ), sendo de 0,1% o valor médio desse desvio ao longo do período avaliado.

Verifica-se que um erro na determinação desta propriedade física não exerce nenhuma influência significativa nos modelos de processo de secagem.

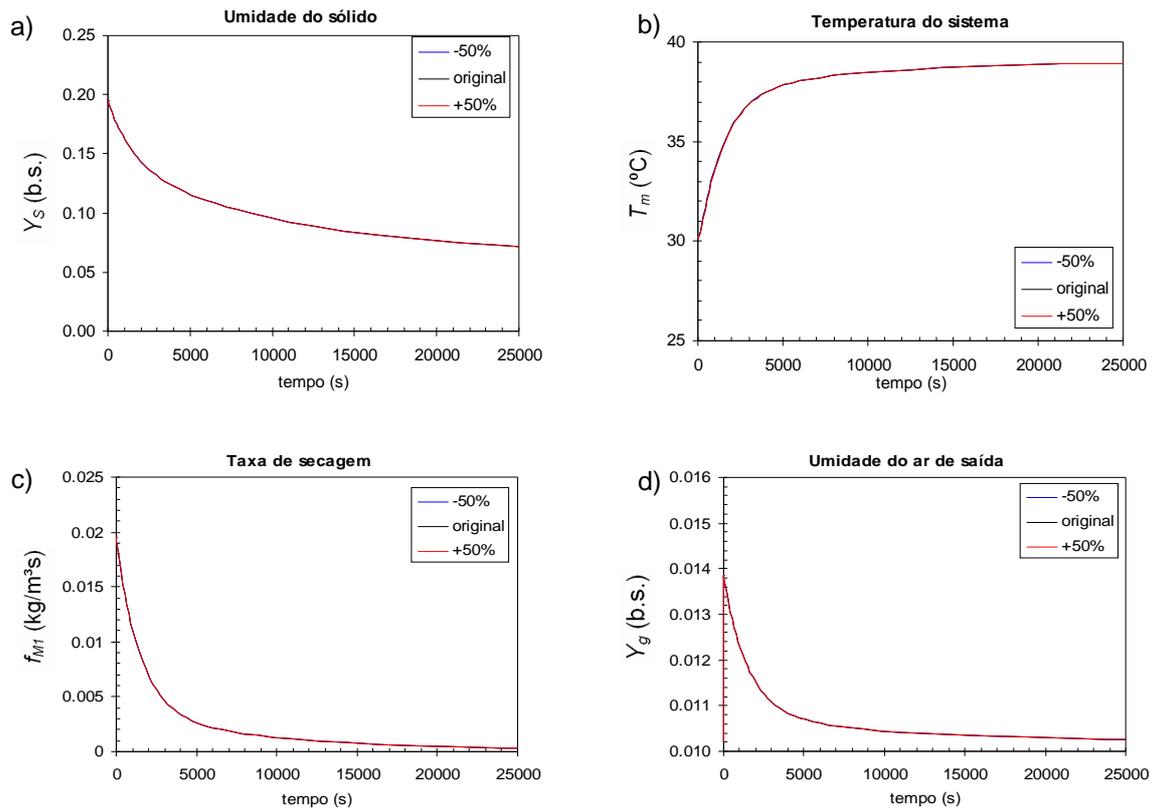


Figura 4.44: a) umidade do sólido, b) temperatura do sistema gás-sólido, c) taxa de secagem e d) umidade do ar de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no calor específico das sementes.

#### 4.6.2 Massa específica

A única variável afetada pela alteração da massa específica foi a porosidade do leito, tal como exibido na Figura 4.45. As demais propriedades geraram desvios relativos desprezíveis, apresentando comportamento idêntico ao mostrado na Figura 4.44.

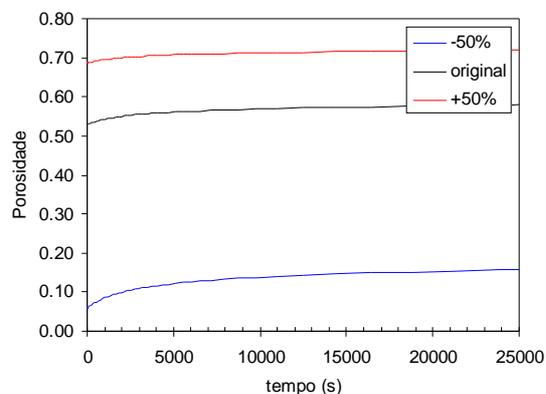


Figura 4.45: Porosidade do leito em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% na massa específica das sementes.

### 4.6.3 Porosidade do leito, $\epsilon$

Como nas outras análises, supõe-se que a cinética de secagem é igual em todos os casos. Isto é, não haveria influência da porosidade do leito no modo de secagem das partículas. Com base nisso, uma porosidade 50% maior significa maiores volumes de vazios no leito, ou seja, menores quantidades de sólidos para se submeterem ao processo de transferência de calor e massa. Da mesma forma, o contrário também é válido: porosidade menor quer dizer material mais empacotado no leito. Assim, é necessária uma maior taxa de secagem ( $f_{M1}$ ) para se obter o mesmo perfil cinético de secagem, como se vê na Figura 4.46.

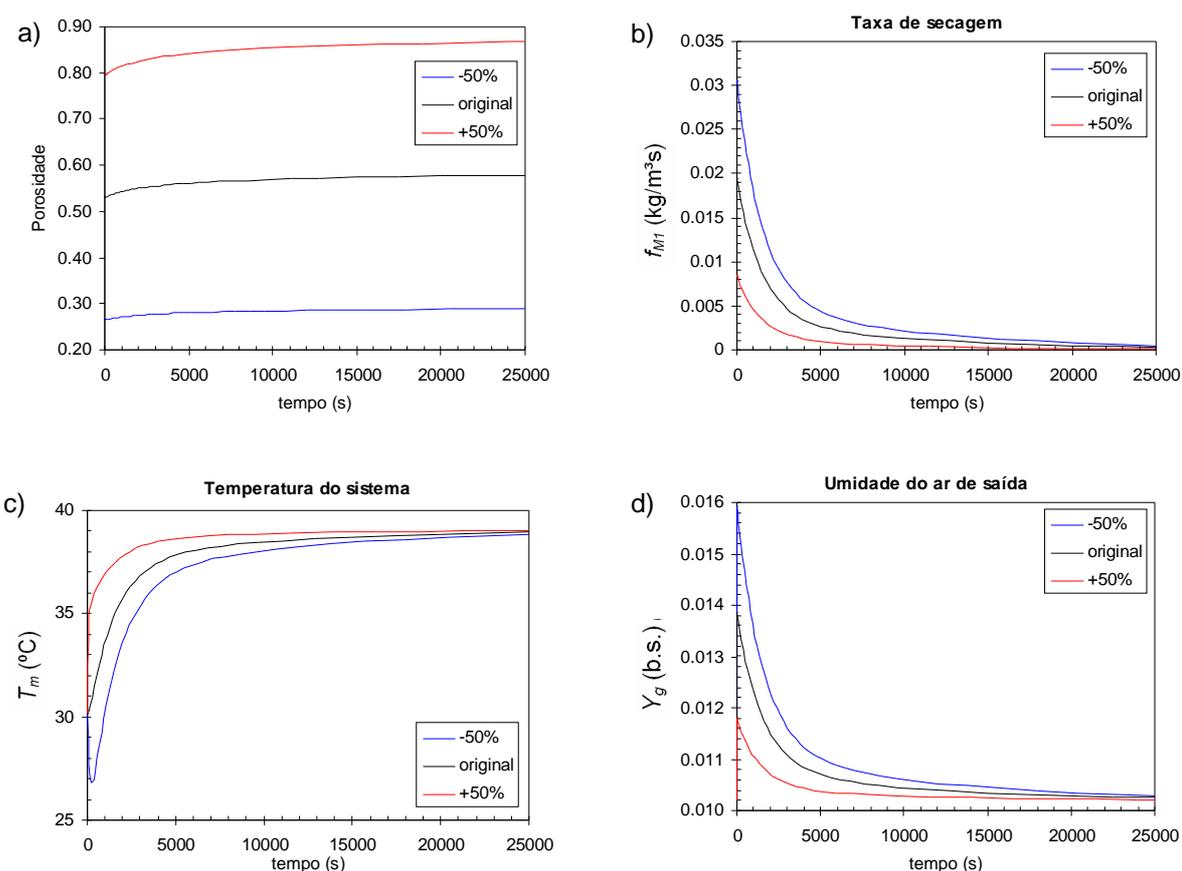


Figura 4.46: a) porosidade do leito, b) taxa de secagem, c) temperatura do sistema gás-sólido e d) umidade do ar de saída: curvas-resposta para variações de -50% a +50% na porosidade do leito.

Também se nota que a umidade do ar de saída ( $Y_g$ ) é maior para o leito com porosidade menor, visto que a massa total de água presente é maior, como

conseqüência da mesma umidade inicial das sementes ( $Y_{s0}$ ) contida numa massa maior de sementes úmidas. Além disso, a temperatura do sistema gás-sólido,  $T_m$ , tende a atingir o equilíbrio térmico mais rapidamente no leito com porosidade maior, como conseqüência da menor massa de matéria particulada a ser aquecida – considerando que a altura do leito é a mesma.

#### 4.6.4 Massa de sólidos

Uma possível explicação para o comportamento da variação de massa de sólidos é apresentada a seguir. Admitiu-se que a altura do leito fluidizado,  $L$ , variou proporcionalmente à variação da massa de sementes.

Na umidade do ar de saída é esperado que uma batelada com quantidade maior de sólidos, para um mesmo teor de umidade inicial, resulte em maiores umidades do ar de saída, visto que a massa inicial de água também é maior.

Da mesma maneira, massas maiores de sólido "roubam" energia, tornando a inércia térmica mais lenta (Figura 4.47). Isto é, demora mais tempo para estabilizar na temperatura de equilíbrio. É a mesma tendência de leito com porosidade menor, como visto na Figura 4.46.

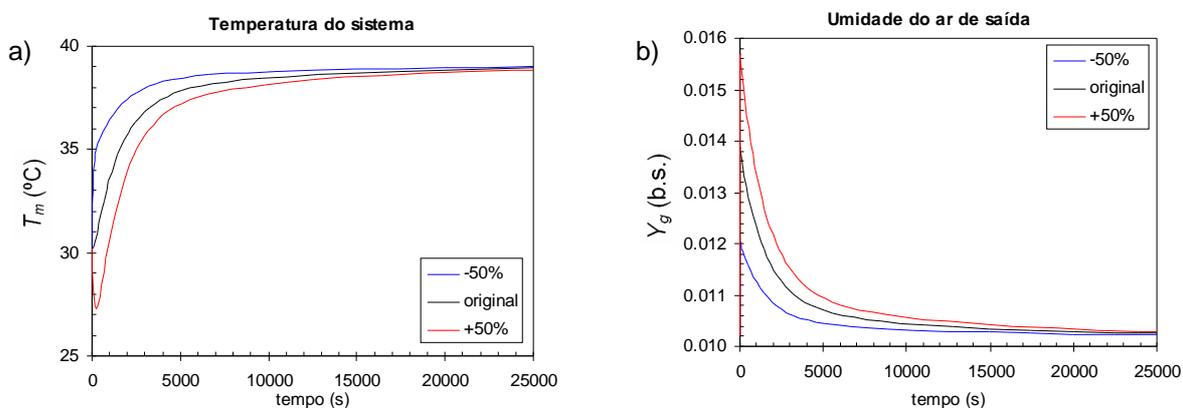


Figura 4.47: a) temperatura do sistema gás-sólido e b) umidade do ar de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% na massa das sementes contida no leito.

#### 4.6.5 Umidade de equilíbrio, $Y_{Seq}$

Na Figura 4.48 são mostradas as curvas resposta às perturbações de  $\pm 50\%$  na umidade de equilíbrio.

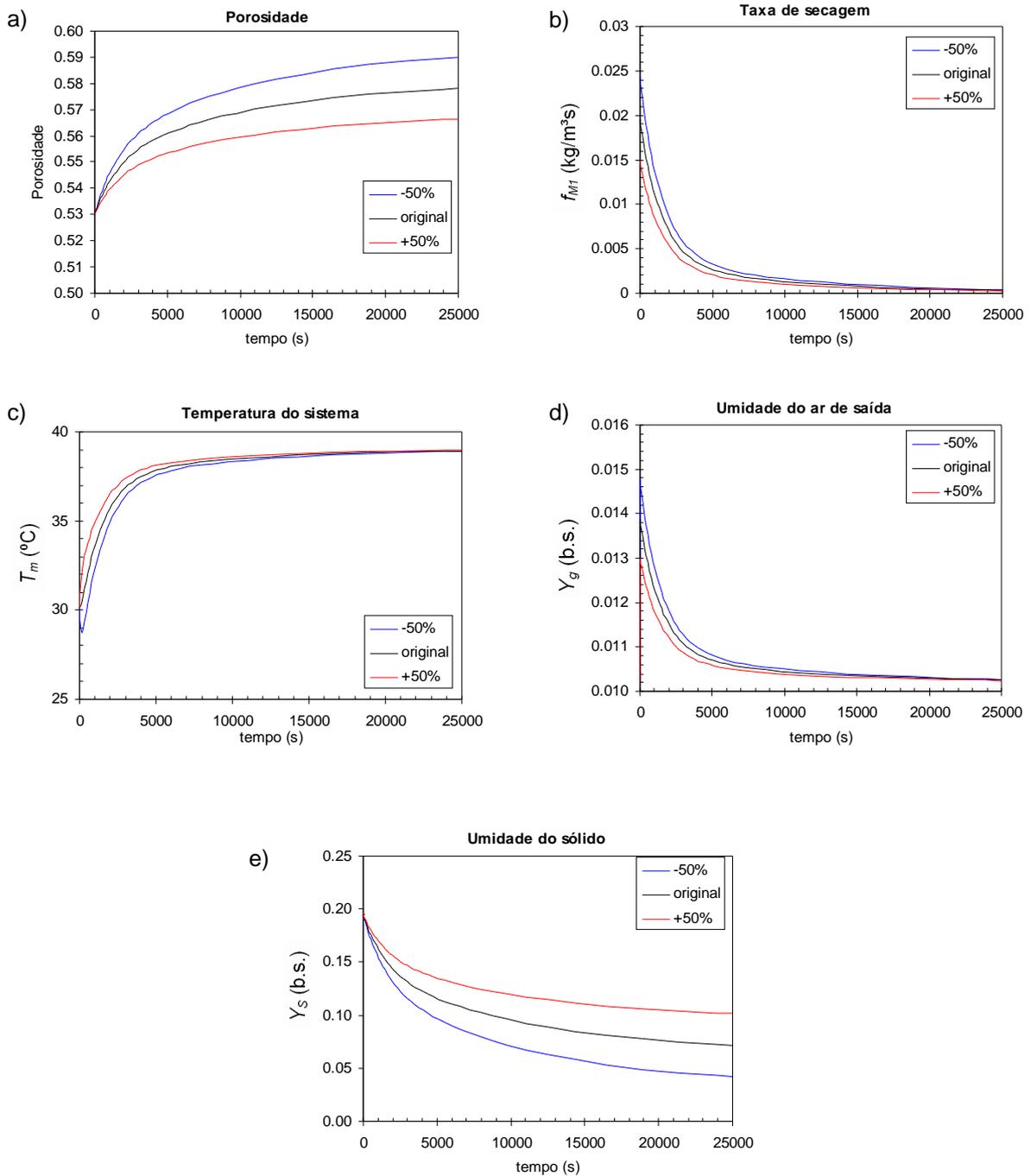


Figura 4.48: a) porosidade do leito, b) taxa de secagem, c) temperatura do sistema gás-sólido, d) umidade do ar de saída e e) umidade do sólido em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% na umidade de equilíbrio.

Uma importante observação diz respeito à curva de temperatura do sistema ( $T_m$ ). Independente da umidade de equilíbrio, é verificada uma estabilização em um valor de mesma temperatura final, na medida em que a taxa de secagem vai reduzindo. As demais variáveis apresentam comportamento semelhante à análise do item 4.5.15.

#### 4.6.6 Coeficiente de transferência de calor entre a parede do leito e o meio, $\alpha_{pa}$

Na Figura 4.49 são mostradas as curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro  $\alpha_{pa}$  (Equação (39) - p. 71), sendo o valor originalmente estimado igual a 14,2 W/m<sup>2</sup>K. Observa-se que essas perturbações influenciaram significativamente a curva de temperatura da mistura ar-sólido,  $T_m$  – também denominada temperatura do sistema –, verificando-se diferenças médias em torno de 1,3°C na variável, o que corresponde a um desvio médio relativo de 3,7% com máximo de 5,8%. Assim como no modelo a três fases, esse comportamento é esperado, uma vez que um valor elevado desse coeficiente significa maior perda de calor para o meio externo, e menos energia acumulada no leito para aquecer o leito de partículas. As demais variáveis não sofreram nenhuma influência significativa ao se perturbar o parâmetro  $\alpha_{pa}$ .

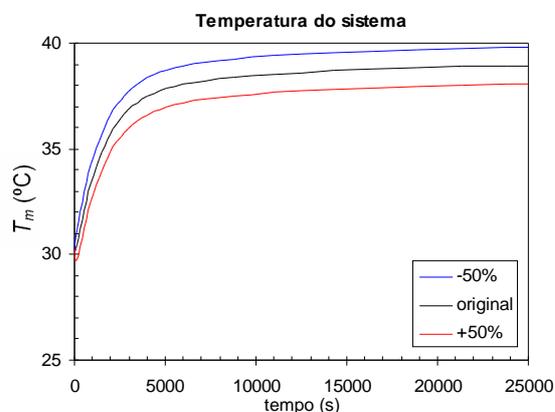


Figura 4.49: Temperatura do sistema gás-sólido,  $T_m$ , em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% no parâmetro  $\alpha_{pa}$ .

#### 4.6.7 Vazão de ar

Para aplicações de degraus de  $\pm 50\%$  na vazão volumétrica de ar de secagem,  $G_g$ , foram observadas variações significativas na temperatura do sistema ( $T_m$ ) e na umidade do ar de saída, conforme pode ser visto na Figura 4.50.

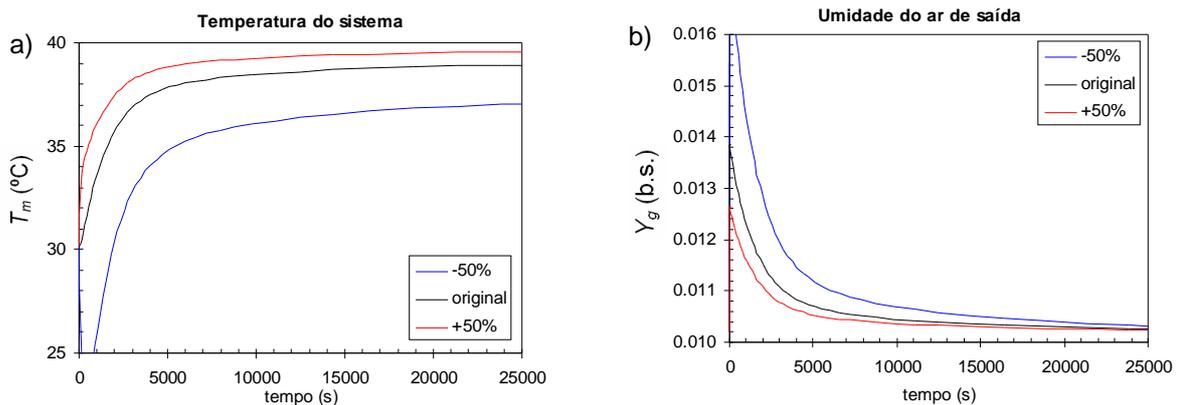


Figura 4.50: a) temperatura do sistema gás-sólido e b) umidade do ar de saída em função do tempo: curvas-resposta para variações de -50% a +50% na vazão de ar.

Cabe comentar que, diferentemente da análise da influência da massa de sólidos, não se levou em conta a variação da altura do leito quando se aplicou degrau na vazão de ar, por não se ter uma clara dependência experimental de uma variável em relação à outra.

#### 4.7 Análise de sensibilidade: quadros comparativos

Na seqüência, apresentam-se dois quadros em que são resumidas as características das respostas em função dos degraus aplicados nas variáveis analisadas para os modelos a três fases (Quadro 4.2) e a duas fases (Quadro 4.3).

Quadro 4.2: Resumo da análise de sensibilidade no modelo a três fases.

Variável	Degrau	Característica
$\rho_s$	-20% a +20%	Pouca influência.
$\phi$	-20% a +5%	Pouca influência.
$C_{p_s}$	-30% a +30%	Desvio médio de 0,1% em $T_s$ : pouca influência.
$\varepsilon$	-30% a +50%	Variável calculada: ponto de incerteza do modelo.
$d_p$	-30% a +30%	Pouca influência; $\uparrow d_p \rightarrow \uparrow T_s$ (inverso do esperado)
$G_{mf}$	-20% a +20%	Afeta significativamente $T_s$ ; $G_{gb} \downarrow$ se $G_{mf} \uparrow$ ; $\uparrow G_{gi}$
$\Psi$	-75% a 0%	Comportamento semelhante a $G_{mf}$ ; Parâmetro de difícil obtenção, teórico
$x_1$	-50% a +50%	Pouco significativo; $T_s \uparrow$ se $x_1 \downarrow$ ( $h \downarrow$ ): inesperado Porém, $T_s \uparrow$ com $x_1 \uparrow$ se $E_{parede} = 0$
$x_2$	-50% a +50%	Pouco significativo: mesmo comportamento de $x_1$
$\alpha_{pa}$	-50% a +50%	Influência significativa; $\uparrow \alpha_{pa} \rightarrow \uparrow$ perda de calor pelas paredes.
$a$ e $c$	-25% a +25%	Altera os pesos dos dois termos exponenciais da cinética de secagem.
$b$	-50% a +50%	Parâmetro relacionado ao modo de eliminação de umidade do interior da partícula para o meio. Afeta os primeiros instantes das curvas de secagem e $T_s$ .
$d$	-50% a +50%	Parâmetro relacionado ao modo de eliminação de umidade do interior da partícula para o meio. Apresenta grandes desvios em tempos médios de secagem (curva de $Y_s$ ).
$Y_{Seq}$	-50% a +50%	Afeta a força motriz da secagem ( $Y_{s0} - Y_{Seq}$ ). Curva de $Y_s$ bastante afetada.

Quadro 4.3: Resumo da análise de sensibilidade no modelo a duas fases.

Variável	Degrau	Característica
$C_{p_s}$	-50% a +50%	Pouca influência.
$\rho_s$	-50% a +50%	Pouca influência; afetou apenas a evolução da porosidade do leito.
$\varepsilon$	-50% a +50%	Influência significativa; Implica na alteração dos espaços vazios do leito.
$m_s$	-50% a +50%	Influência significativa; Comportamento inverso ao da porosidade.
$Y_{Seq}$	-50% a +50%	Afeta a força motriz da secagem ( $Y_{S0} - Y_{Seq}$ ). Curva de $Y_S$ bastante afetada.
$\alpha_{pa}$	-50% a +50%	Influência significativa; $\uparrow\alpha_{pa} \rightarrow \uparrow$ perda de calor pelas paredes.
$G_g$	-50% a +50%	Variações significativas em $T_m$ e $Y_g$ .

#### 4.8 Comparação estatística entre os modelos

A seguir são apresentadas as temperaturas em leito fluidizado, nas condições dos Ensaio #1 (Figura 4.51) e #7 (Figura 4.52) de secagem (com temperaturas de ar de entrada de 50°C e 40°C, respectivamente). Apresentam-se, além dos pontos experimentais desses ensaios, o resultado simulado através dos modelos a três fases e duas fases. Destaca-se que, como a cinética de secagem usada nos dois modelos foi a mesma (Srzednick *et al.*, 1996), não faz sentido comparar a curva de umidade de sólido em função do tempo nesta análise: o comportamento da umidade das partículas,  $Y_S$ , simulada em função da experimental para ambos os modelos é mostrado na Figura 4.25a.

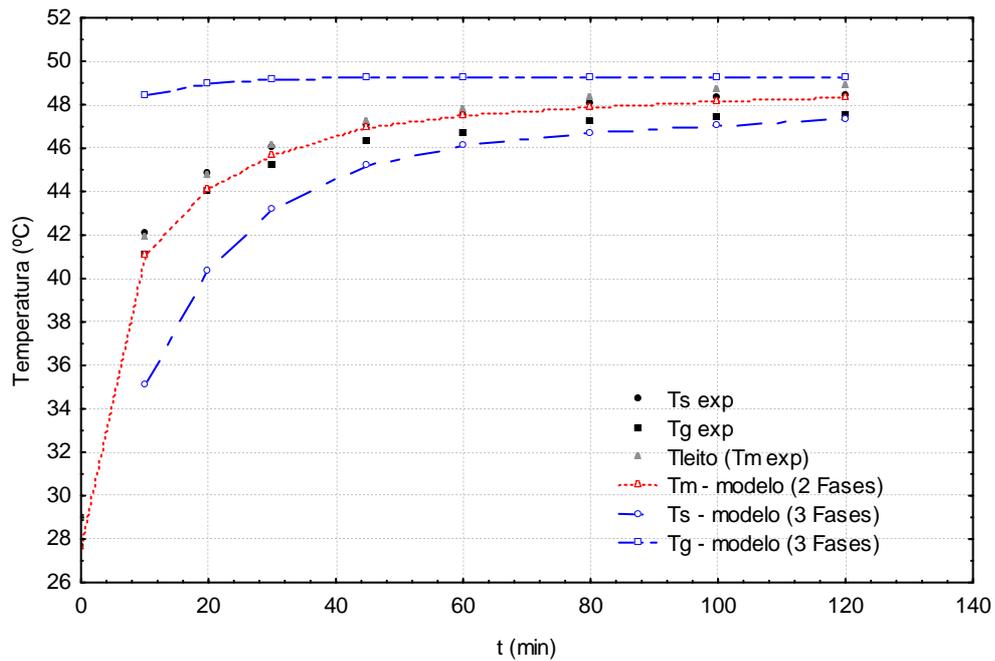


Figura 4.51: Temperatura experimental e simulada em função do tempo nas condições do Ensaio #1.

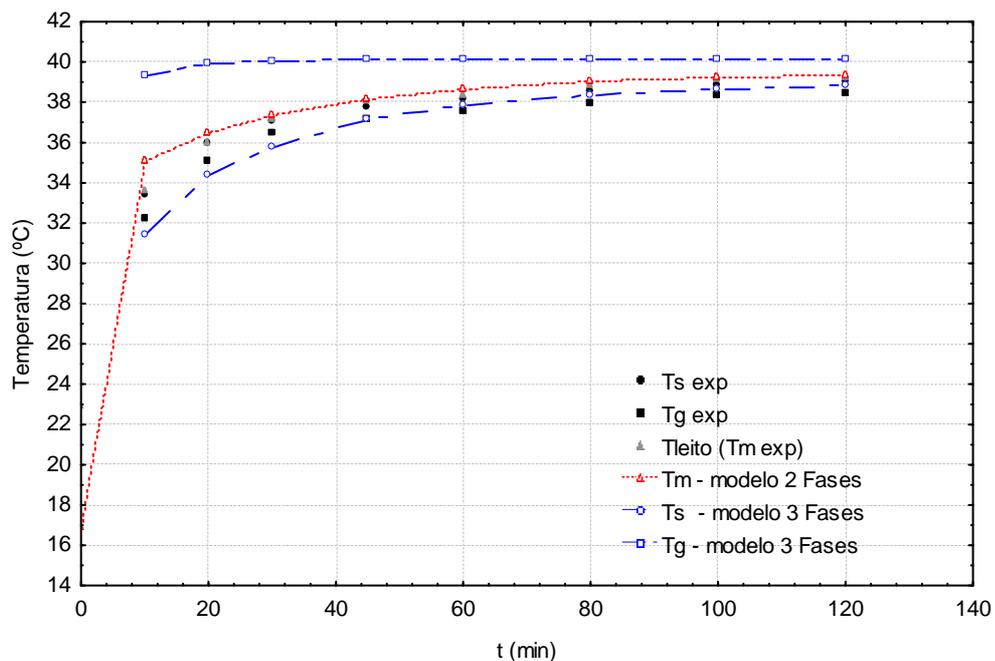


Figura 4.52: Temperatura experimental e simulada em função do tempo nas condições do Ensaio #7.

Observa-se que o modelo a duas fases proporciona uma melhor representação da evolução da temperatura do leito (temperatura da mistura gás-sólido,  $T_m$ ) em função do tempo de secagem, ao passo que o modelo a três fases, através das variáveis  $T_s$  e  $T_g$ , gera respostas com maiores desvios em relação aos dados experimentais de temperaturas de sólido e do ar de saída. Além disso, o

comportamento simulado desse modelo é invertido em relação ao experimental: encontrado temperaturas do gás de saída maiores do que do sólido na simulação, enquanto experimentalmente ocorre o oposto.

Aplicando-se o teste de hipótese de igualdade entre os valores simulados e experimentais para as variáveis  $T_s$ ,  $T_g$  (modelo a três fases) e  $T_m$  (modelo a duas fases), para um nível de significância de 0,05, obtêm-se os valores de  $t$  de student e do *valor P*, mostrados na Tabela 4.9. Ressalta-se que quanto menor o  $t$  calculado, maior é a superposição das curvas.

Tabela 4.9: Valores de  $t$  de student e  $P$  para as temperaturas do leite.

	$T_s$	$T_g$	$T_m$
$t$ de student	1,567	-3,402	0,216
Valor $P$	0,120	0,00093	0,829

Observa-se que a variável que apresenta o maior índice de aceitação da hipótese de igualdade entre os valores simulados e experimentais é  $T_m$  (com *Valor P* = 0,829, além de  $t$  de student próximo de zero). Por outro lado, embora a variável  $T_s$  tenha caído na região de aceitação (com *Valor P* > 0,05), a hipótese de igualdade é rejeitada quando se trata de  $T_g$  (com *Valor P* = 0,00093). Dessa forma, pode-se afirmar que o modelo a duas fases, através da variável  $T_m$ , representa de modo mais satisfatório o comportamento térmico do processo de secagem das sementes de gramíneas em leite fluidizado.

Também é possível visualizar o resumo dessa análise nos gráficos BoxPlot, mostrados na Figura 4.53. Observa-se claramente que a temperatura da mistura gás-sólido ( $T_m$ ), gerada pelo modelo a duas fases, apresenta média e dispersão mais semelhantes do que as outras variáveis, ao se comparar os dados simulados com os experimentais, confirmando a discussão anterior.

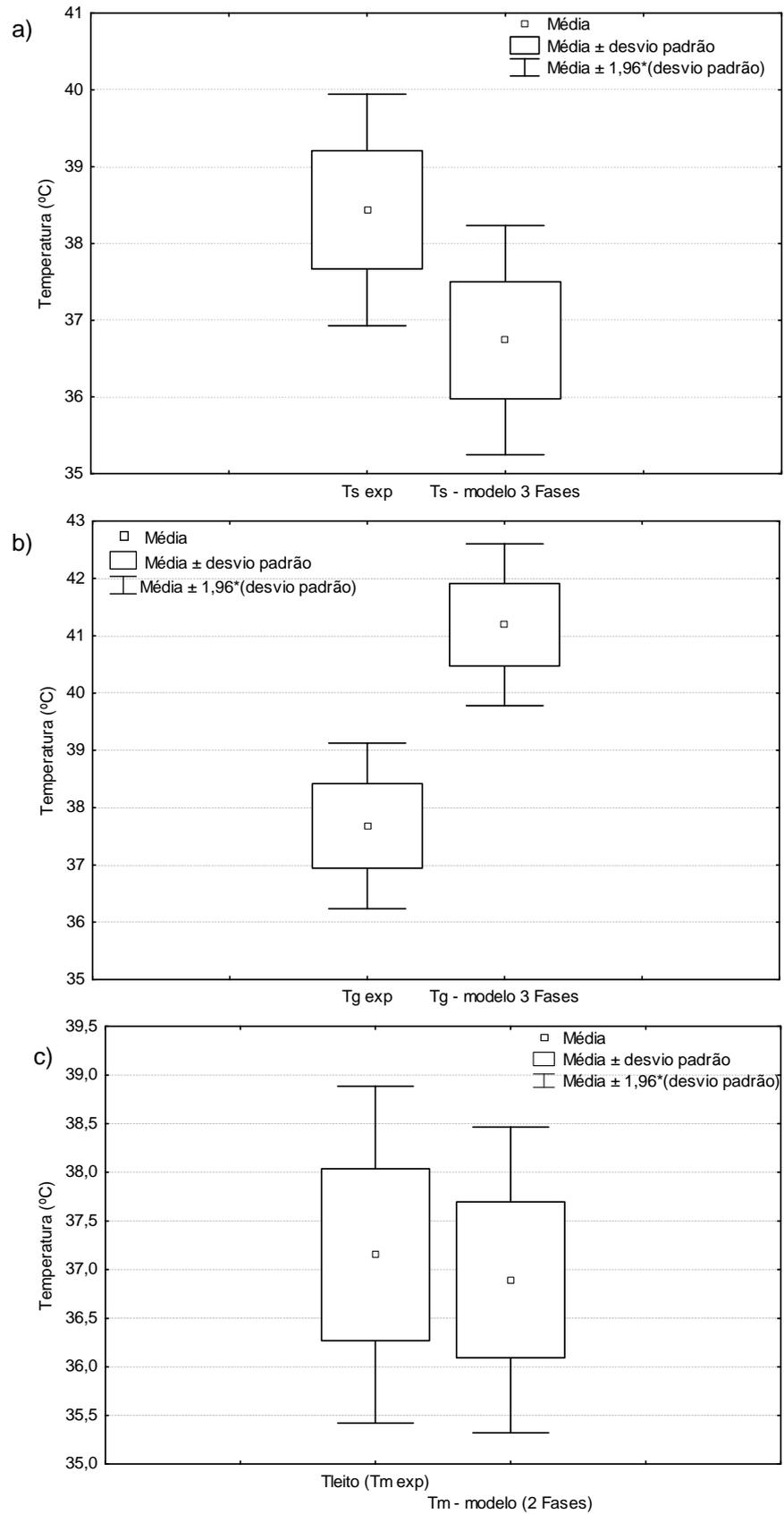


Figura 4.53: Gráficos BoxPlot de a)  $T_s$ , b)  $T_g$  e c)  $T_m$  simuladas e experimentais

#### 4.9 Modelo a três fases: uma abordagem alternativa

Este item tem como objetivo apresentar uma abordagem alternativa do modelo a três fases, cuja equação constitutiva de cinética de secagem foi formulada incluindo os períodos de taxa constante e decrescente de secagem.

Uma tentativa de melhorar o desempenho de predição do modelo a três fases foi o desmembramento da taxa de secagem em dois períodos: taxa constante e decrescente. Como mostrado na Figura 4.54, pode-se afirmar que as sementes de gramíneas apresentam dois mecanismos de secagem, o primeiro no qual o teor de umidade varia linearmente com o tempo (taxa constante) e o segundo em que há uma queda exponencial de umidade em função do tempo (taxa decrescente).

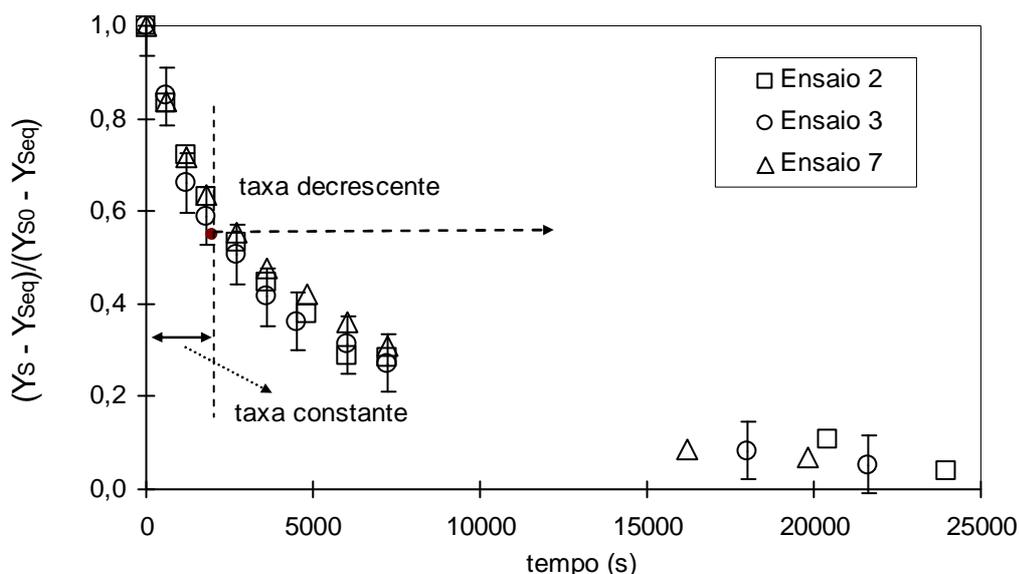


Figura 4.54: Umidade adimensional em função do tempo de secagem – condição do ponto central dos experimentos (Ensaio #2, #3 e #7 da Tabela 4.2).

O primeiro período se estende até o teor de umidade da partícula atingir seu valor crítico,  $Y_s = Y_{scr}$ . Adotou-se, como critério, um tempo de 30 minutos de secagem para se determinar a umidade crítica dos ensaios deste estudo. Encontrou-se o valor médio de  $0,140 \pm 0,001$  (b.s.), considerado constante para toda a faixa de condições operacionais dos ensaios.

Uma vez que a água evapora da superfície úmida da semente e se transfere à fase gás intersticial no primeiro período de secagem, o coeficiente de transferência de massa entre a partícula e o gás intersticial tem uma forte dependência das características de escoamento do gás, representado pelo número de Reynolds. Assim, é proposta a seguinte equação:

$$MR = \frac{Y_s - Y_{Seq}}{Y_{s0} - Y_{Seq}} = 1 - k_I t \Rightarrow \frac{dY_s}{dt} = -k_I (Y_{s0} - Y_{Seq}) \quad (54a)$$

onde  $f_{M1} = k_s a (Y_s - Y_{Seq})$ , do Quadro 2.4,

$$k_s a = (1 - \varepsilon) \rho_s k_I \frac{(Y_{s0} - Y_{Seq})}{(Y_{s0} - Y_{Seq})}, \text{ e}$$

$$k_I = \left( \frac{D_{vi}}{d_p} \right) x_{11} \text{Re}_p^{x_{21}} \quad (54b)$$

A Equação (54a) descreve o primeiro mecanismo de secagem, como confirmado pela Figura 4.54.

Para  $Y_s \geq Y_{scr}$ , a Equação (54b) é a empregada no modelo para se calcular  $f_{M1T}$ , enquanto  $x_{11}$  e  $x_{21}$  são os dois parâmetros ajustáveis para esse primeiro período.

O segundo período de secagem é formulado considerando o modelo difusivo associado ao encolhimento da partícula. De acordo com Reyes *et al.* (2002), a cinética de secagem de materiais agrícolas, que sofrem contrações de volume durante o período de taxa decrescente, pode ser descrita por uma correlação modificada de Fick, a qual incorpora uma difusividade efetiva da água e variação de tamanho da partícula. Baseada também em trabalhos de Becker (1959) e Lewis (1921), a seguinte aproximação é usada para descrever a cinética no segundo período de secagem, em que  $Y_{Seq} \leq Y_s \leq Y_{scr}$ :

$$MR = \frac{Y_s - Y_{Seq}}{Y_{s0} - Y_{Seq}} = k_{II} \exp\left(\frac{-D_{ef} t}{(d_p \phi / 6)^2}\right) \quad (55a)$$

$$\text{ou } \frac{dY_s}{dt} \cong \left(\frac{Y_s - Y_{Seq}}{Y_{s0} - Y_{Seq}}\right) \left(\frac{-D_{ef}}{(d_p \phi / 6)^2}\right) (Y_{s0} - Y_{Seq})$$

Baseada na Equação (55a), que é semelhante à Equação de Brooker (1974)

– Quadro 2.2 –, pode-se calcular  $f_{M1T}$  para o segundo período de secagem, como segue:

$$\begin{aligned} f_{M1} &= k_s a (Y_s - Y_{Seq}) \\ k_s a &= (1 - \varepsilon) \rho_s \left(\frac{36 \times D_{ef}}{(d_p \phi)^2}\right) \\ D_{ef} &= x_{1II} \exp\left(\frac{-x_{2II}}{T_s}\right) \end{aligned} \quad (55b)$$

Para o período de taxa decrescente de secagem,  $x_{1II}$  e  $x_{2II}$  são os dois parâmetros ajustáveis a serem determinados. Embora esses parâmetros substituam  $x_{1I}$  e  $x_{2I}$  para  $Y_s \leq Y_{scr}$ , eles são relacionados, uma vez que dependem dos valores dos primeiros parâmetros para a continuidade da curva de secagem.

A rotina computacional DASSL foi novamente usada para resolver o sistema de equações algébrico-diferencial do modelo a três fases, juntamente com as equações dos períodos de secagem descritas. Baseado nas Equações (54b) e (55b), cinco parâmetros devem ser estimados ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_{1I}$  (ou  $x_{1II}$ ) e  $x_{2I}$  (ou  $x_{2II}$ ), além de  $\alpha_{pa}$ ) através dos dados experimentais em conjunto com a solução do modelo.

A Tabela 4.10 mostra os valores estimados dos cinco parâmetros ajustáveis do modelo para se descrever os mecanismos de transferência de calor e massa entre as sementes e o ar intersticial durante a operação de secagem em leito fluidizado, bem como as correlações empíricas resultantes.

Tabela 4.10: Parâmetros ajustados do modelo e suas correlações.

Parâmetros do modelo	Valor	Parâmetros do modelo	Valor
$x_1$	0,630		
$x_2$	0,275		
$x_{1I}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$x_{1II}$ (m <sup>2</sup> /s)	$5,71 \times 10^{-5}$
$x_{2I}$	0,644	$x_{2II}$ (K)	4596,63
$\alpha_{pa}$ (W/m <sup>2</sup> K)	3,52		

---

Correlações constitutivas para:

Transferência de calor entre partícula e o gás intersticial:

$$Nu = 0,630 Re_p^{0,275} \quad (56)$$


---

Transferência de massa entre as partículas e o gás intersticial no primeiro período de secagem:

$$\frac{k_I d_p}{D_{vi}} = 1,1 \times 10^{-3} Re_p^{0,644} \quad (57)$$


---

Transferência de massa entre as partículas e o gás intersticial no segundo período de secagem:

$$D_{ef} = 5,71 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{4596,63}{T_s}\right) \quad (58)$$

A melhora de desempenho do modelo a três fases na predição da secagem das sementes de gramíneas pode ser visualizada na Figura 4.55. Pode-se dizer que os dados simulados se ajustam de maneira satisfatória aos pontos experimentais, com o emprego dos novos parâmetros que levam em conta a existência de dois períodos de secagem. O ganho em relação à abordagem que considera apenas uma equação de cinética de secagem é evidente. Observa-se, na Figura 4.55, que o ajuste do modelo praticamente cai sobre a faixa de erro experimental, representado pelas barras dos gráficos.

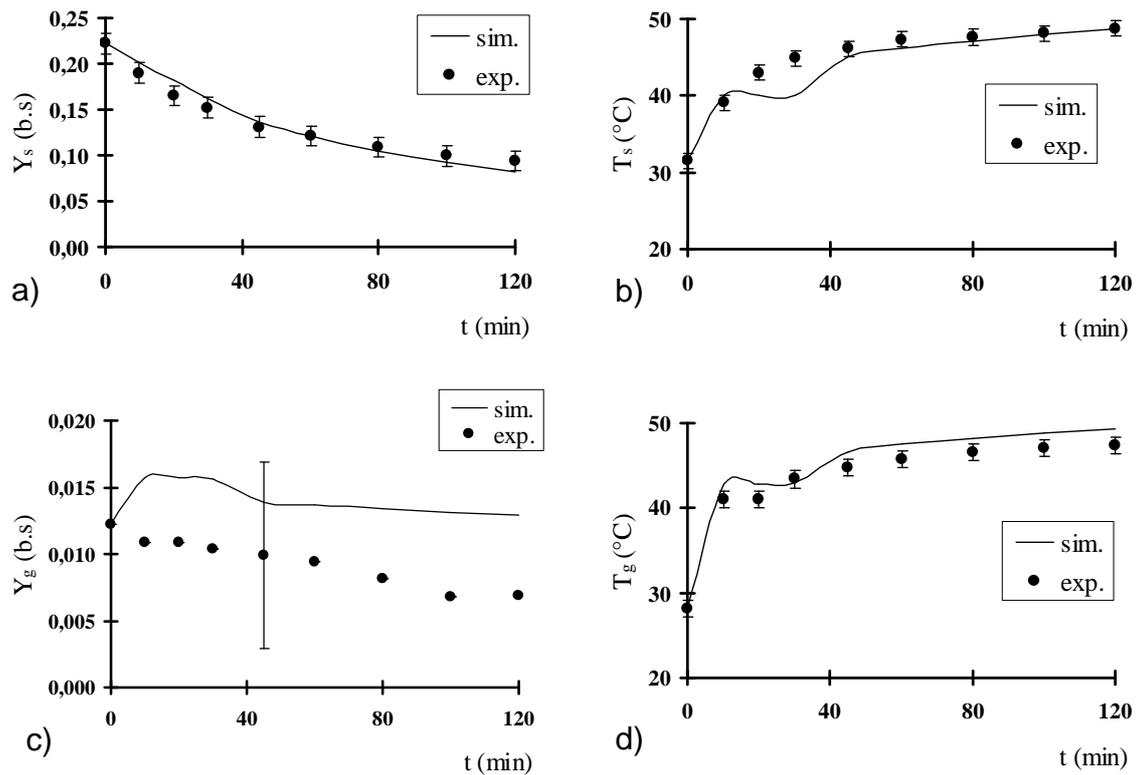


Figura 4.55: Dados experimentais e simulados em função do tempo: (a) umidade do sólido; (b) temperatura das sementes; (c) umidade do ar de saída e (d) temperatura do ar de saída. (Dados do Ensaio #5 da Tabela 4.2).

Embora a faixa experimental de  $Re_p$  seja restrita, os valores de Nusselt,  $Nu$ , obtidos pela equação da Tabela 4.10 são comparáveis com algumas correlações reportadas na literatura (Ciesielczk, 1996), em termos de ordem de grandeza da faixa de validade, como mostrado na Figura 4.56. Isso é um bom indício a respeito da funcionalidade desse modelo a três fases modificado, proposto para prever o mecanismo de transferência de calor entre as partículas e o ar intersticial em leito fluidizado.

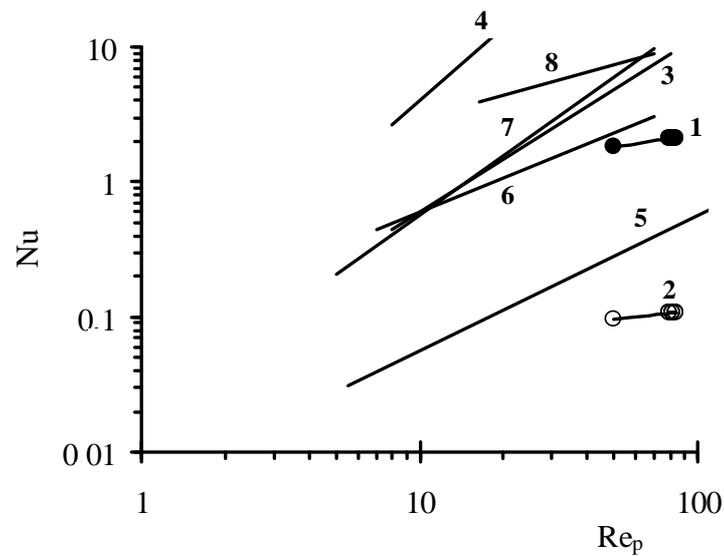


Figura 4.56: Número de Nusselt ( $Nu$ ) em função do número de Reynolds ( $Re_p$ ): 1: este trabalho (ensaios de secagem, Equação (56)); 2: este trabalho (ensaios de transferência de calor, Equação (43) com parâmetros da Tabela 4.4); 3: correlação de Frantz; 4: correlação de Leva; 5: correlação de Shin- Jan-Fou *et al.*; 6: correlação de Lykov; 7: correlação de Zabrodski; 8: correlação de Jun-Chin-Chu (Ciesielczk, 1996).

#### 4.10 Verificação experimental do modelo a duas fases

Realizou-se um ensaio extra de secagem (Ensaio #8), com aquisição automática dos dados de temperaturas e vazão de ar, visando verificar o comportamento dinâmico do melhor modelo encontrado (a duas fases).

As condições operacionais desse ensaio foram:  $T_{g0} = 50,6^\circ\text{C}$ ; vazão de ar =  $0,245 \text{ m}^3/\text{min}$  e  $Y_{g0} = 0,013$  (b.s.).

Após calcular a umidade de equilíbrio,  $Y_{\text{seq}} = 0,0504$  (b.s.), através da curva de isoterma de sorção determinada para a sementes a  $50^\circ\text{C}$  (brevemente abordada no item 4.11.2), alimentou-se o modelo a duas fases, cujos resultados são mostrados na Figura 4.57, que apresenta o decaimento do teor de umidade das sementes em função do tempo de secagem.

A Figura 4.58 apresenta os dados de temperatura da mistura gás-sólido,  $T_m$ , em função do tempo de secagem. Além de  $T_m$  simulada e experimental, também são mostradas as temperaturas medidas do ar de secagem,  $T_{g0}$ , de parede,  $T_{\text{parede}}$  e

ambiente,  $T_{amb}$ . Observa-se um ligeiro desvio entre o predito pelo modelo e o medido somente entre 10 e 35 minutos de secagem, enquanto nos demais instantes pode-se afirmar que o modelo a duas fases consegue prever adequadamente o comportamento térmico do leito fluidizado.

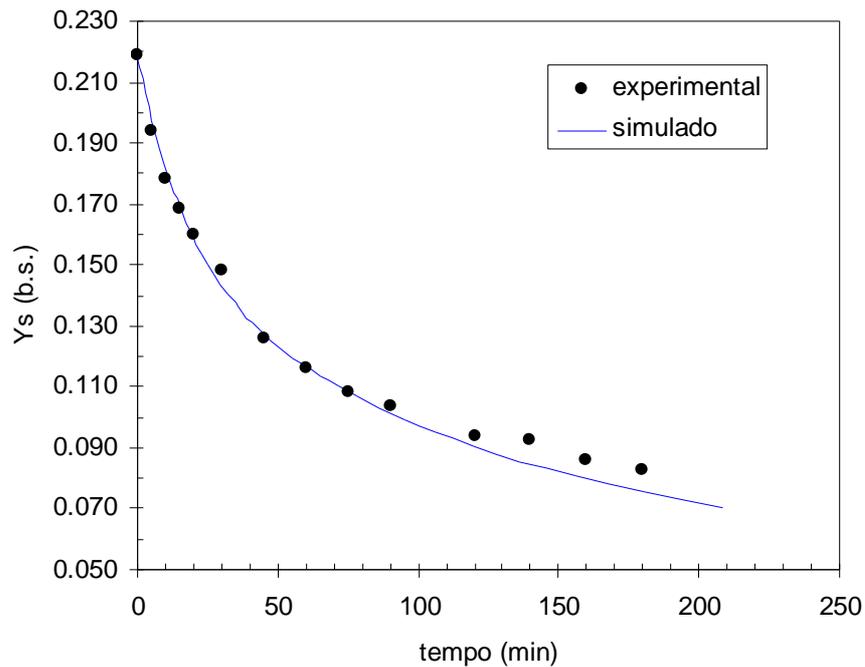


Figura 4.57: Umidade do sólido em função do tempo de secagem.

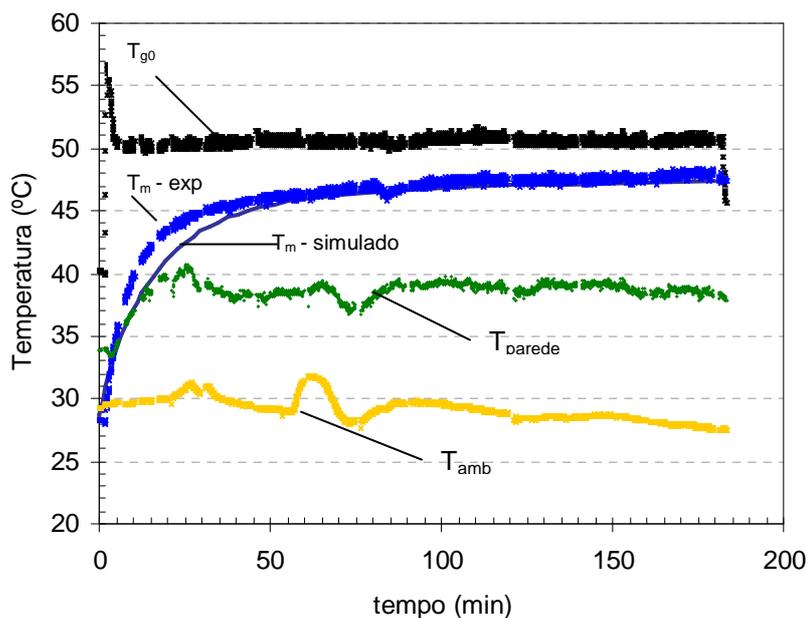


Figura 4.58: Temperaturas do leito em função do tempo.

Da mesma forma, a Figura 4.59 apresenta a evolução da umidade do ar de saída ao longo do processo de secagem. Também se pode dizer que a previsão do modelo foi adequada, quando se compara com os dados experimentais. Ressalta-se que nessa figura são mostrados dois tipos de dados experimentais: o primeiro, identificado como  $Y_g$  (verde), foi calculado a partir da aquisição dos dados de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido; o segundo, identificado como Termohigrômetro, foi medido com instrumento apropriado para esse fim (dados de temperatura e umidade relativa são adquiridos na medição). Considerando-se que a informação de umidade do ar de saída não é utilizada na estimação de parâmetros do modelo, a verificação experimental dessa variável mostrou-se bem satisfatória.

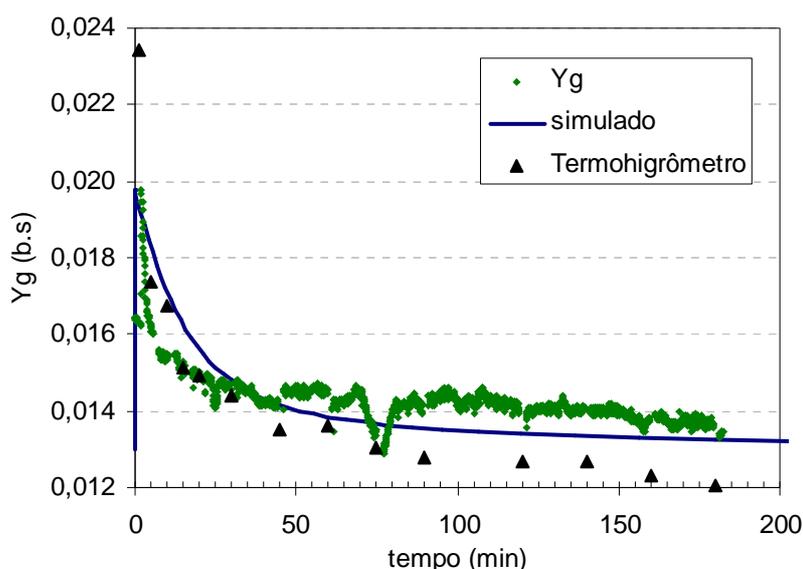


Figura 4.59: Umidade do ar de saída em função do tempo de secagem.

## 4.11 Outros resultados

### 4.11.1 Testes de qualidade das sementes

A avaliação da qualidade das sementes é realizada por testes padronizados e de aceitação universal, que visam quantificar a qualidade, permitindo desta forma

o conhecimento dos efeitos dos fatores que podem alterar a mesma. Os testes que avaliam a qualidade física das sementes visam quantificar os teores de fissuras no tegumento e os danos mecânicos. A qualidade fisiológica é avaliada classicamente através de índices de germinação. Entretanto, os testes de germinação, realizados em condições ambientais ótimas, não são suficientes para prever a capacidade de desempenho da semente no campo, onde as condições são amplamente variáveis. Por esta razão, a qualidade fisiológica das sementes deve ser avaliada também através de testes de vigor.

Alguns testes de qualidade das sementes, associados a cada condição experimental dos ensaios de secagem, foram realizados a fim de se tentar avaliar a influência dessas condições de operação no poder de germinação das sementes de gramíneas. Quatro grupos de 50 sementes foram utilizados nos testes de germinação, enquanto dois grupos de 50 amostras, nos testes de vigor (envelhecimento precoce). A Tabela 4.11 apresenta os valores de germinação e o respectivo desvio padrão, em porcentagem, das sementes depois de cada ensaio, para os dois tipos de testes. Destaca-se que a primeira linha da tabela é referente às sementes novas, sem passagem por qualquer tipo de ensaio de secagem, e o Ensaio #7, na condição de ponto central dos experimentos, foi considerado correspondente também aos Ensaios #2 e 3.

Tabela 4.11: Valores de germinação das sementes em função das condições experimentais

Ensaio #	$G_g$ [kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	$T_{g0}$ [°C]	Germinação		Vigor	
			(%)	$\sigma$	(%)	$\sigma$
novas	-	-	79,5	2,5	59,0	4,2
1	1,202	51,5	67,3	12,2	46,0	11,3
4	0,949	35,3	68,0	3,3	20,0	2,8
5	0,925	51,5	41,0	31,7	10,0	0,0
6	1,227	37,2	76,0	11,4	79,0	4,2
7	1,100	41,5	83,5	7,9	76,0	0,0

Observa-se, pela Tabela 4.11, que não há uma tendência clara dos valores de germinação em função das condições experimentais de temperatura e vazão de ar estudadas. Se como hipótese tomar-se as sementes novas como alvo, ou seja, o grau máximo de germinação a que as sementes submetidas a condições extremas de secagem podem atingir, já se encontra uma situação em que o teor de germinação de um ensaio de secagem é maior (Ensaio 7), e duas em que o teor de germinação pelo teste de vigor é maior (Ensaio 6 e 7). Porém isso é justificado por uma possível latência das sementes que pode ter sido quebrada nos referidos ensaios, favorecendo a germinação.

Contudo, não se tem claro o que explicaria os baixos índices de germinação do Ensaio 5, por exemplo, que difere do #1 apenas por ter menor de vazão de ar. E o alto desvio padrão do mesmo ensaio também deixa uma grande dúvida para se traçar qualquer tendência.

Fumagalli (2007) também observou influência pouco clara e significativa das variáveis de processo, bem como concluiu que a secagem em leito fluidizado não causou injúrias mecânicas às sementes, fornecendo valor cultural comparável ou maior que os obtidos na secagem nos leitos tradicionalmente empregados para esse tipo de material.

#### **4.11.2 Isoterma de equilíbrio**

Neste trabalho também se construiu uma curva de isoterma de equilíbrio para as sementes usadas nos testes de secagem vigentes. O propósito foi verificar se os novos valores seriam maiores do que os obtidos por Arnosti Jr. (1997) através do uso da equação de Henderson-Thompson – Equação (37), p. 69 – a fim de se contornar o problema de não convergência das umidades de equilíbrio, durante os ensaios de secagem. Amostras de sementes (de 4 g a 10 g) tiveram suas variações

de massas registradas durante 10 dias numa câmara climática com temperatura e umidade relativa controladas. O resultado, para as temperaturas de 40 e 50°C, pode ser visto na Figura 4.60.

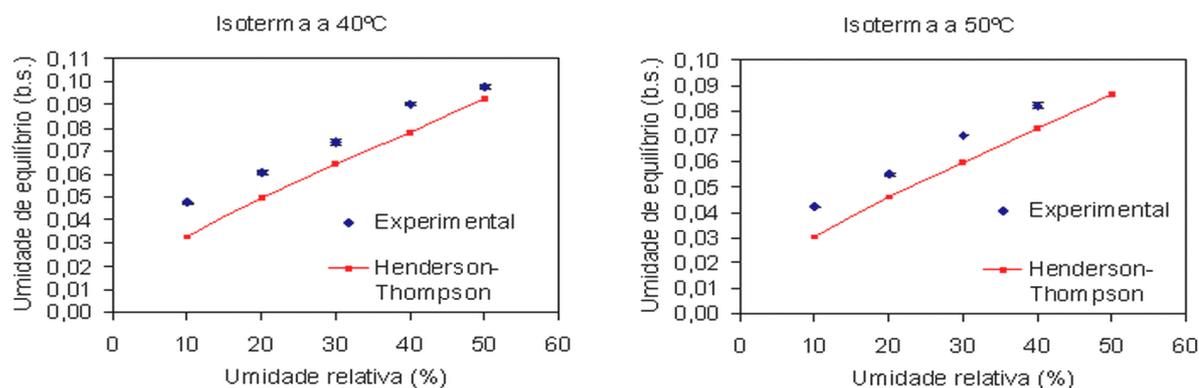


Figura 4.60: Umidade de equilíbrio das sementes em função da umidade relativa do ar, para as temperaturas de 40 e 50°C.

Observa-se que realmente foram encontrados valores mais altos do que as umidades de equilíbrio calculadas pela Equação de Henderson-Thompson. Ainda assim, ao se usar os novos valores, as curvas de umidades experimentais em função do tempo continuaram não convergindo para a umidade de equilíbrio estática. Sabe-se que existe uma diferença entre a umidade de equilíbrio estática e a dinâmica, e esta, entre outros fatos, está ligada à existência da camada limite em torno das partículas no processo dinâmico. No entanto esperava-se que essa diferença fosse menor que a obtida. Por exemplo, no Ensaio #3, tem-se que a umidade de equilíbrio dinâmica, calculada pelo procedimento mostrado no item 4.4, foi de 0,0636, ao passo que a umidade de equilíbrio estática determinada através da câmara climática, foi igual a 0,0544. Uma utilização descuidada desse valor de umidade de equilíbrio pode provocar erros significativos na adimensionalização da curva de umidade em função do tempo, levando a má interpretação da influência das diversas condições de operação.

Dessa forma, optou-se pela utilização da umidade de equilíbrio dinâmica das sementes (específico de cada ensaio) na adimensionalização das curvas de umidade em função do tempo, através do método descrito no item 4.4. A exceção foi apenas na verificação final do modelo a duas fases, apresentado no item 4.10.

## 5 CONCLUSÕES

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

Inicialmente verificou-se que as sementes de gramíneas, da espécie *Brachiaria brizantha*, pertencentes ao grupo D da classificação de Geldart, apresentaram ótimo comportamento quando submetidas a um regime de fluidização, demonstrado pelas curvas fluidodinâmicas típicas geradas. A técnica utilizada também foi adequada para a secagem das sementes estudadas.

A técnica de estagnação do leito para a medida de temperatura de sólidos mostrou-se bastante apropriada, para o caso de se necessitar distinguir as temperaturas das fases constituintes do sistema. Em estudo laboratorial cujo interesse seja a determinação dos coeficientes de transferência de calor entre as fases gás e sólida e não haja comprometimento na continuidade do ensaio, pode-se adotar esse método que, neste trabalho, foi vantajoso em relação à calorimetria.

Observou-se também que o leito fluidizado forneceu excelente homogeneidade térmica e mássica quando comparado à operação em leito fixo, comprovando uma das maiores vantagens desse equipamento. Na análise da secagem, foi constatada clara influência da temperatura do ar de entrada no tempo de secagem, ao passo que o efeito da vazão de ar não foi evidente – fato também verificado por Fumagalli (2007) –, o que caracteriza o processo como predominantemente difusivo na secagem das sementes de gramíneas.

No modelo de transferência de calor – modelo de secagem a três fases com a desconsideração de transferência de umidade entre as fases – os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) entre as variáveis simuladas e experimentais foram de 0,996 para  $T_s$  e 0,991 para  $T_g$ , com desvios de até 3,3% e 2,4%, respectivamente. Verificou-se,

assim, que o modelo de transferência de calor predisse relativamente bem os dados experimentais dos ensaios correspondentes para a faixa de parâmetros usada neste trabalho, embora esses parâmetros não tenham sido aproveitados no modelo completo de secagem.

A cinética de secagem de Srzdenicki *et al.* (1996) – soma de dois termos exponenciais – foi a que melhor representou o comportamento de remoção de umidade das sementes, e o desempenho dos modelos de secagem estudados, no que diz respeito à descrição dos dados experimentais, foi aperfeiçoado somente após a inserção da referida equação de cinética.

A partir da análise de sensibilidade de algumas propriedades físicas e parâmetros, foi constatado que variações na porosidade do leito ( $\epsilon$ ), na umidade de equilíbrio das sementes ( $Y_{Seq}$ ), nos parâmetros cinéticos e no coeficiente de transferência de calor entre a parede e o meio ( $\alpha_{pa}$ ) exerceram influência sobre as variáveis simuladas dos dois modelos estudados neste trabalho. Além disso, a velocidade mínima de fluidização ( $G_{mf}$ ) e a fração de bolhas ( $\Psi$ ) influenciaram as respostas apenas do modelo a três fases, sendo que o último é um parâmetro de difícil obtenção: assim como discutido no item 4.4.2, existem divergências na literatura sobre qual valor adotar, ressaltando ainda mais a complexidade do modelo de Vitor (2003). Outra desvantagem desse modelo é a dificuldade, ou até mesmo a impossibilidade, de se medir separadamente as temperaturas das fases gás intersticial e gás bolha. Ao contrário do modelo a duas fases, não se fez medida direta da variável de saída do modelo ( $T_g$ ), o que contribuiria para um melhor ajuste dos parâmetros.

Por outro lado, o modelo simplificado de Massarani e Silva Telles (1992) – que considera equilíbrio entre as fases – proporcionou melhores previsões das

condições térmicas do que o modelo a três fases, confirmado tanto através de visualização gráfica do ensaio de verificação como pelas análises estatísticas apropriadas. Esta conclusão é promissora do ponto de vista de aplicações industriais, já que o modelo matemático de secagem em leito fluidizado que requer menos informações foi o mais representativo do fenômeno de transferência de calor e massa. Assim, um aumento de escala dessa unidade é favorecido, corroborando a facilidade de automação e de controle de temperatura nesse tipo de equipamento.

A verificação experimental do modelo foi realizada por meio da simulação da transferência de calor e da secagem em ensaio diferente daqueles usados na determinação dos parâmetros cinéticos e térmicos. De maneira geral, foi observada boa concordância entre as curvas de temperatura do leito ( $T_m$ ) e da umidade do sólido simuladas e os dados experimentais, bem como da umidade do ar de saída, que sequer havia sido variável de alimentação do modelo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi atingido ao se descrever de maneira satisfatória o processo de secagem das sementes de gramíneas em um leito fluidizado de escala de laboratório.

## 6 SUGESTÕES

Para a continuidade deste estudo, são dadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- estender a aplicação dos modelos estudados para operação do leito fluidizado no modo contínuo;
- explorar, através de novos ensaios com o sistema de aquisição de dados, o uso do pacote computacional ESTIMA para determinação de parâmetros, se o modelo estudado requerer;
- estudar outros modelos de secagem da literatura, bem como sua verificação experimental;
- verificar experimentalmente o modelo de secagem simplificado de duas fases em leito fluidizado em escala piloto;
- realizar estudo fluidodinâmico comparativo com partículas de diferentes classes de Geldart, com ênfase na identificação dos regimes de fluidização, bem como investigar se a perda de umidade não altera o comportamento fluidodinâmico do leito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUERRE, R. J., SUAREZ, C., VIOLLAZ, P. E. "Drying Kinetics of Rough Rice Grain", *Journal of Food Technology*, 17, pp. 679-686, 1982.
- AHRENS, D., C., VILLELA, F.A., "Secagem Intermitente e seus Efeitos na Qualidade Fisiológica de Sementes de Tremoço Azul", *Sci. agric.*, 53 (2-3), 1996.
- ALVAREZ, P., SHENE, C. "Experimental Study of the Heat and Mass Transfer During Drying in a Fluidized Bed Dryer", *Drying Technology*, 14 (3&4), pp. 701-718, 1996.
- ALVES-FILHO, O., RUMSEY, T. R. "Thin-layer Drying and Rewetting Models to Predict Moisture Diffusion in Spherical Agricultural Products", *Drying '84*, pp. 434-437, 1986.
- ARNOSTI JR, S. "Desenvolvimento de um Secador Transportador do Tipo Esteira com Escoamento Cruzado e Caracterização de Sementes de Gramíneas"; Tese de Doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos/SP, 232 p., 1997.
- ARNOSTI JR, S., FREIRE, J. T., SARTORI, D. J. M. "Analysis of shrinkage phenomenon in *Brachiaria brizantha* seeds", *Drying Technology*, 18 (6), pp. 1339-1348, 2000.
- 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, São Carlos/SP, 163 p., 1995.
- BECKER, H. "A study of diffusion in solids of arbitrary shape with application to the drying of wheat kernel", *Journal of Applied Polymer Science*, 1, 212-226, 1959.
- BECKER, H. A., SALLANS, H. R. "A study of internal moisture movement in the drying of the wheat kernel", *Cereal Chemistry*, 32 (3), pp. 212-226, 1955.
- BECKER, H. A., SALLANS, H. R. "Drying Wheat in a Spouted Bed", *Chem. Eng. Science*, 13, pp. 97-112, 1961.
- BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C. W., *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*, An AVI Book published by Van Nostrand Reinhold, New York, 450 p., 1992.
- BURGSCHWEIGER, J., TSOTSAS, E. "Experimental Investigation and Modelling of Continuous Fluidized Bed Drying Under Steady-State and Dynamic Conditions", *Chem. Eng. Science*, 57, pp. 5021-5038, 2002.

- CAMARGO, C. F. S., FREIRE, J. T. "Fluidodinâmica de um Leito Vibro-Fluidizado: Análise das Curvas Características Utilizando Curvas de Desvio Padrão", Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XXIX ENEMP), São João Del Rei – MG, CD-ROM, 2002.
- CHANDRAN, A. N., SUBBA RAO, S., VARMA, Y. B. G. "Fluidized Bed Drying of Solids", AICHE Journal, 36 (1), pp. 29-38, 1990.
- CHICARONI, E. P., PIMENTEL, R. O., SARTORI, D. J. M. "Qualidade e Cinética de Secagem de Sementes de Gramíneas em Leito Esteira e Camada Delgada", Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XXVI ENEMP), Teresópolis/RJ, v. 2, pp. 413-420, 1999.
- CHU, S. T., HUSTRULID, A. "A Numerical Solution of Diffusion Equations", Transactions of the ASAE, 11, pp. 705-717, 1968.
- CIESIELCZK, W. "Analogy of Heat and Mass Transfer During Constant Rate Period in Fluidized Bed Dryer", Drying Technology, 14 (2), pp. 217-230, 1996.
- COUDERC, J. P. "Incipient Fluidization and Particulate Systems" In: DAVIDSON, J. F., CLIFT, R., HARRISON, D. *Fluidization*, 2.ed, Academic Press, Londres, Cap 1, pp. 1-46, 1985.
- CRANK, J. *The Mathematics of Diffusion*, Oxford University Press, Londres, 1957.
- DALEFFE, R. V. "Análise da Presença do Glicerol no Comportamento Fluidodinâmico de Leitos Fluidizado e Vibrofluidizado", Dissertação de Mestrado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos/SP, 205p., 2002.
- DIMATTIA, D. G., AMYOTTE, P. R, HAMDULLAHPUR, F. "Slugging Characteristics of Group D Particles in Fluidized Beds", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 75, pp.452-459, 1997.
- EZEIKE, G. O. I.; OTTEN, L. "Two compartment model for drying unshelled melon (egusi) seeds" *Canadian Agricultural Engineering* 33(1), 73-78, 1991.
- FELIPE, C. A. S. e ROCHA, S. C. S. "Time Series Analysis of Pressure Fluctuation in Gas-Solid Fluidized Beds", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 21 (3), pp. 497-507, 2004.
- FUMAGALLI, F. "Estudo da Secagem das Sementes de *Brachiaria brizantha*", Tese de Doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos/SP, 149 p., 2007.
- GARIM, M. M. "Estudo dos Coeficientes de Transferência de Massa em Leito Fluidizado e Vibro-fluidizado", Tese de Doutorado, PPG-EQ/UFSCar, São Carlos/SP, 140p., 1998.

- GELDART, D. *Gas Fluidization Technology*, John Willey & Sons Inc., New York, NY, 1986.
- GELDART, D. "Gas Fluidization" In: RHODES, M. J., *Principles of Powder Technology*, John Wiley & Sons Ltd., Cap 6, pp. 119-142, 1990.
- GRACE, J. R. "Fluid Bed as Chemical Reactors" In. GELDART D. *Gas Fluidization Technology*, John Willey & Sons Inc., New York, pp. 285-339, 1986.
- GRONEWOLD, H., TSOTSAS, E. "A New Model For Fluid Bed Drying", *Drying Technology*, 15 (6-8), pp. 1687-1698, 1997.
- HENDERSON, J. M.; HENDERSON, S. M. "A Computational Procedure for Deep-Bed Drying Analysis", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 13 (2), pp. 87-95, 1968.
- HILLIGARDT, K., WERTHER, J. "Local Bubble Gas Hold-up and Expansion of Gas/Solid Fluidized Beds", *Germ. Chem. Eng.*, 9, 215, 1986.
- HOEBINK, J. H. B. J., RIETEMA, K. "Drying Granular Solids in Fluidized Bed – I", *Chemical Engineering Science*, 35, pp. 2135-2140, 1980a.
- HOEBINK, J. H. B. J., RIETEMA, K. "Drying Granular Solids in Fluidized Bed – II", *Chemical Engineering Science*, 35, pp. 2257-2265, 1980b.
- HOPKINSON, J.M.; SOUZA, F.H.D.de; DIULGHEROFF, S.; ORTIZ, A. e SÁNCHEZ, M. Reproductive physiology, seed production, and seed quality of *Brachiaria*. In: MILES, J.W.; MAASS, B.L.; VALLE, C.B.do (eds). *Brachiaria: biology, agronomy, and improvement*. Cali, Colombia: CIAT, pp.124-140, 1996.
- HUSAIN, A., CHAN, C. S., CLAYTON, J. T., WHINTNEY, L. F. "Mathematical Simulation of Mass and Heat Transfer in High Moisture Foods", *Transactions of the ASAE*, 15, pp. 732-736, 1972.
- HUSTRULID A; FLIKKE A M. "Theoretical Drying Curve for Shelled Corn", *Transactions of the ASAE*, 2 (1), pp. 112-114, 1959.
- IZADIFAR, M., MOWLA, D. "Simulation of a Cross-Flow Continuous Fluidized Bed Dryer for Paddy Rice", *Journal of Food Engineering*, 58, pp. 325-329, 2003.
- KAMEOKA, T., HOSOKAWA, A., MORISHIMA, H. "Simulation of Heat and Mass Transfer during through-Drying Process of Rough Rice", In MUJUNDAR, A. S. *Drying of Solids: Recent International Developments*, Halsted Press, Wiley, pp. 271-301, 1986.

- KEMP, I. C., OAKLEY, D. E. "Modelling of Particulate Drying in Theory and Practice", *Drying Technology*, 20 (9), pp. 1699-1750, 2002.
- KENNEDY, J., EBERHART, R. C. "Particle Swarm Optimization", *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 1995.
- KUNII, D., LEVENSPIEL, O. *Fluidization Engineering*, 2.ed, Butterworth-Heinemann – USA, 495 p., 1991.
- LAI, F. S., YIMING CHEN, FAN, L. T. "Modelling and Simulation of a Continuous Fluidized-Bed Dryer", *Chemical Engineering Science*, 41 (9), pp. 2419-2430, 1986.
- LEWIS, W.K. "The rate of drying of solid materials", *Industrial and Engineering Chemistry*, 13, 427-432, 1921.
- LIMA, O. A. "Estudo da Secagem do Polihidroxibutirato em Leito Fluidizado", *Dissertação de Mestrado, PEQ/COPPE/UFRJ*, Rio de Janeiro, 2004.
- LUIKOV, A.V. *Heat and mass transfer in capillary porous bodies*, Pergamon Press, Oxford, 1966.
- MACEDO, G. A. R., MARQUES NETO, J., BATISTA, J. S. "Secagem à sombra e ao sol de sementes de gramíneas forrageiras", *Revista Brasileira de Sementes*, Ano 9, nº3, pp. 29-37, 1987.
- MASSARANI, G. e SILVA TELLES, A. "Aspectos da Secagem de Material Sólido Particulado", In FREIRE, J. T., SARTORI, D. J. M. *Tópicos Especiais em Secagem*, Vol. 1, DEQ/UFSCar, São Carlos/SP, pp. 1-39, 1992.
- NORONHA, F. B., PINTO, J. C., MONTEIRO, J. L., LOBÃO, M. W., SANTOS, T. J. "ESTIMA: Um Pacote Computacional para Estimação de Parâmetros e Projeto de Experimentos", *Nota Técnica, PEQ/COPPE/UFRJ*, Rio de Janeiro, 1993.
- OLIVEIRA JR., A. B. "Estudo da Transferência de Calor e Massa no Processo de Secagem em Leito Vibro-Fluidizado", *Dissertação de Mestrado, PPG-EQ/UFSCar*, São Carlos/SP, 2003.
- OVERHULTS, D. G.; WHITE, G. M.; HAMILTON, H. E.; ROSS, I. J. "Drying Soybeans with Heated Air", *Transactions of the ASAE*, pp. 1112-1113, 1973.
- PAGE, G.E. "Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers", *M.S. Thesis Dissertation (M. Sc.)*, Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Indiana, USA, 1949.

- PALANCZ, B. "A Mathematical Model for Continuous Fluidized Bed Drying", *Chemical Engineering Science*, 38 (7), pp. 1045-1059, 1983.
- PETZOLD, L.R. "DASSL: A Differential-Algebraic System Solver"; Computer and Mathematical Research Division, Lawrence Livermore National Laboratory: Livermore, CA, 1989.
- REAY, D e BAKER, C. G. J. "Drying" In: DAVIDSON, J. F., CLIFT, R., HARRISON, D. *Fluidization*, 2.ed, Academic Press, Londres, Cap 16, pp. 529-562, 1985.
- REYES, A.; ALVAREZ, P.I.; MARQUARDT, F.H. "Drying of carrots in a fluidized bed. I. Effects of drying conditions and modeling", *Drying Technology*, 20 (7), 1463–1483, 2002.
- RHODES, M. J., *Principles of Powder Technology*, John Wiley & Sons Ltd., New York, NY, 1990.
- SARTORI, D. J. M. "Transferência de Calor em Leito Deslizante", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 219 p., 1986.
- SATISH, S., PYDI SETTY, Y. "Modeling of a Continuous Fluidized Bed Dryer Using Artificial Neural Networks", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32, (3-4), pp. 539-547, 2005.
- SOUZA, F. H. D. "Produção e Comercialização de Sementes de Plantas Forrageiras Tropicais no Brasil", In: *Anais do II Simpósio de Forragicultura e Pastagens – NEFOR – UFLA, Lavras-MG*, 2001.
- SOUZA, U. F., ARNOSTI JR., S., SARTORI, D. J. M. "Drying kinetics of *Brachiaria brizantha* seeds", *Drying '98*, v. B, Ziti ed., v. B, pp. 1389-1396, Thessaloniki, Greece, 1998.
- SRZDENICKI, G. S., JOENG, Y. H., DRISCOLL, R. H. "Studies on drying of australian sweet cherries", *Proc. of the 10th International Drying Symposium (IDS'96) – Drying '96*, v. B, pp. 831-838, Krakow, Poland, 1996.
- STEFFE, J. F., SINGH, R. P. "Diffusion coefficients for predicting rice drying behavior", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 27, pp. 489-493, 1982.
- SYAHRUL, S., HAMDULLAHPUR, F., DINCER, I. "Thermal Analysis in Fluidized Bed Drying of Moist Particles", *Applied Thermal Engineering*, 22, pp. 1763-1775, 2002.
- THOMPSON, T.L.; PEART, R.M., FOSTER, G.H. "Mathematical Simulation of Corn Drying: A New Model", *Transactions of the ASAE*, 11, pp. 582-586, 1968.

- TSOTSAS, E. "From Single Particle to Fluid Bed Drying Kinetics", *Drying Technology*, 12, pp. 1401-1426, 1994.
- ÜLKÜ, S., UÇKAN, G. "Corn Drying in Fluidized Beds", In: MUJUMDAR, A. S. (ed.), *Drying '86*, v. 2, Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1986.
- VANECECK, V., PICKA, J., NAJMR, S. "Some Basic Information on the Drying of Granulated NPK Fertilizers", *International Chemical Engineering*, 4 (1), pp. 93-99, 1964.
- VITOR, J. F. A. "Modelagem da Secagem de Biomassa em Leito Fluidizado", Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- VITOR, J. F. A., BISCAIA JR., E. C. AND MASSARANI, G. "Modeling of Biomass Drying in Fluidized Bed", In *Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, São Paulo/SP, CD-ROM (1104-1111), 2004.
- WANG, C.Y., SINGH, R. P. "A Single Layer Drying Equation for Rough Rice", *ASAE Paper No. 78-3001*, 1978.
- WILDHAGEN, G. R. S., CALÇADA, L. A., MASSARANI, G. "Modelagem da Secagem em Leito Fluidizado: Modelo a Três Fases", In: *Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XXVII ENEMP)*, Teresópolis/RJ, pp. 499-506, 1999.
- WILDHAGEN, G. R. S., CALÇADA, L. A., MASSARANI, G. "Drying of Porous Particles in Fluidized Beds: Modelling and Experiments", *Journal of Porous Media*, 5 (2), pp. 123-133, 2002.
- WILDHAGEN, G. R. S., SILVA, E. F., CALÇADA, L. A., MASSARANI, G. "Estimação de Parâmetros na Secagem em Leito Fluidizado", In: *Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XXVI ENEMP)*, Teresópolis/RJ, v. 2, pp. 393-398, 1998.
- YATES, J. G. *Fundamental of Fluidized-bed Chemical Processes*. Butterworths. Londres, 1983.
- ZAHED, A. H., ZHU, J. X., GRACE, J. R. "Modelling and Simulation of Batch and Continuous Fluidized Bed Dryers", *Drying Technology*, 13 (1&2), pp. 1-28, 1995.

## APÊNDICE

Publicações geradas durante o trabalho:

- RIZZI Jr., A. C.; COSTA Jr., E.; FREIRE, J. T.; PASSOS, M. L., “Modelling the Drying of Grass Seeds (*Brachiaria brizantha*) in Fluidized Bed”, *Drying Technology*, 25, pp. 123-134, 2007.
- FUMAGALLI, F., RIZZI Jr., A. C, FREIRE, J. T. “Drying of Grass Seeds [*Brachiaria brizantha* (Hochst.) Stap.] in Fluidized and Belt Fluidized Beds”, *Proceedings of the 15th International Drying Symposium (IADC 2006)*, Budapeste, Hungria, v. C., pp. 1451-1457, 2006.
- RIZZI Jr., A. C., FUMAGALLI, F., FREIRE, J. T. “Secagem de Sementes de *Brachiaria brizantha* I: Comparação entre Processos de Secagem”, *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ 2006)*, Santos/SP, pp. 309-316, 2006.
- RIZZI Jr., A. C., PASSOS, M. L., FREIRE, J. T. “Fluidized Bed Dryer for Grass Seeds (*Brachiaria brizantha*): Experimentation and Modelling”, *Proceedings of Inter-American Drying Conference (IADC 2005)*, Montreal, Canada, 1, pp. D7-1-D7-14, 2005.
- RIZZI Jr., A. C., PASSOS, M. L., FREIRE, J. T. “Modelling and Simulating the Drying of Grass Seeds (*Brachiaria brizantha*) in Fluidized Beds: Evaluation of Heat Transfer Coefficients”, *Proceedings of 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering and 4th Mercosur Congress on process Systems Engineering (ENPROMER 2005)*, Rio de Janeiro, 1, pp. 1-10, 2005. *Artigo também submetido ao **Brazilian Journal of Chemical Engineering**.*
- RIZZI Jr., A. C., PASSOS, M. L., FREIRE, J. T. “Secagem de Sementes de Gramíneas (*Brachiaria brizantha*) em Leito Fluidizado. Parte I: Estudos Preliminares”, *Anais do 31º Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XXXI ENEMP)*, Uberlândia/MG, 2004.