



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
DE PROCESSOS**

**CÉLIA MARIA RUFINO FRANCO**

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DA SECAGEM CONTÍNUA  
E INTERMITENTE DE SÓLIDOS ELIPSOIDAIIS.**

**ESTUDO DE CASO: SECAGEM DE GRÃOS DE ARROZ EM CASCA**

Campina Grande - PB, dezembro de 2016

**CÉLIA MARIA RUFINO FRANCO**

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DA SECAGEM CONTÍNUA  
E INTERMITENTE DE SÓLIDOS ELIPSOIDAIIS.**

**ESTUDO DE CASO: SECAGEM DE GRÃOS DE ARROZ EM CASCA**

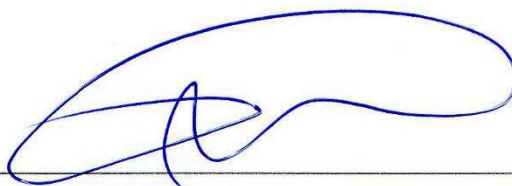
**Tese de Doutorado submetida à Coordenação do Curso  
de Doutorado em Engenharia de Processos da  
Universidade Federal de Campina Grande, como parte  
dos requisitos necessários para a obtenção do título de  
Doutor em Engenharia de Processos.**

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande - PB, dezembro de 2016


MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **CÉLIA MARIA RUFINO FRANCO** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado **aprovada** em 15 de dezembro de 2016



**Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima** - UAEM/CCT/UFCG

Orientador



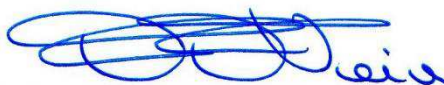
**Prof. Dr. Vera Solange de Oliveira Farias** - UAFM/CES/ UFCG

Examinador Interno



**Prof. Dr. Josivanda Palmeira Gomes** - UAEA/CTRN/ UFCG

Examinador Interno



**Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira** - DESA/CCT/ UEPB

Examinador Externo



**Prof. Dr. Fabiana Pimentel Macêdo Farias** - UATEC/CDSA/ UFCG

Examinador Externo

Campina Grande - PB, dezembro de 2016

## DEDICATÓRIA

A minha mãe Zilma Rufino Leite Franco que, com coragem e determinação, enfrentou as adversidades da vida, sendo pai e mãe, sempre priorizando a busca pelo conhecimento. O seu amor incondicional deu-me o suporte, edificou-me a coragem, levou-me ao sucesso.

A meu pai Cosme Santana Franco (*in memoriam*), que deixou em mim a semente da vida.

A minha querida irmã Zildivânia Rufino Franco e aos meus sobrinhos Rodrigo e Rafael pelo carinho, pelos momentos de alegria compartilhados e pelo apoio nos momentos difíceis.

A toda minha família, em especial aos meus tios Mecias Rufino de Lacerda (*in memoriam*) e Aleudo Rufino Leite pelo incentivo e apoio na busca pelo conhecimento.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por iluminar os meus caminhos e por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A todos os meus familiares e ao meu namorado Antonio, pelo amor, apoio e incentivo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima que me guiou com muita sabedoria e tornou possível a realização deste trabalho. Meus sinceros agradecimentos pelos seus ensinamentos, pela paciência, pelas correções e pela confiança depositada em mim.

Aos membros da banca examinadora, os professores doutores Vera Solange de Oliveira Farias, Josivanda Palmeira Gomes, Fernando Fernandes Vieira e Fabiana Pimentel Macêdo Farias, por disponibilizarem seu precioso tempo na avaliação deste trabalho e pelas valiosas contribuições.

A UAFM/CES/UFCG pela liberação integral das atividades para cursar o Doutorado.

Aos professores da UAFM/CES/UFCG Edna Cordeiro de Souza e Fábio Ferreira de Medeiros que assumiram minhas turmas no primeiro semestre de afastamento.

Ao Professor Dr. Wilton Pereira da Silva (DF/CCT/UFCG) pela disponibilidade em ajudar, pelas discussões relevantes sobre tratamento de dados e pela disponibilização dos softwares Precribed e Convective.

A minha amiga e professora Dr<sup>a</sup> Vera Solange de Oliveira Farias, sempre pronta a ajudar, pelo apoio, incentivo e amizade e pelos ensinamentos valiosos na disciplina Condução de Calor.

Ao Professor Dr. Marivaldo Pereira Matos (DM/UFPB) pelo incentivo e apoio, e pela carta de recomendação que contribuiu para o meu ingresso no Doutorado. Jamais esquecerei os seus ensinamentos.

A todos os professores e funcionários da Pós-Graduação em Engenharia de Processos que de certa forma contribuíram para realização deste trabalho.

Ao amigo José Vieira da Silva que gentilmente forneceu as amostras de grãos de arroz para realização dos experimentos.

A minha amiga, Edna Cordeiro de Souza, pela contribuição em algumas figuras deste trabalho.

Aos amigos Kalina, Juarez e Aluízio, pelo companheirismo, apoio e incentivo.

Ao amigo João Paulo da Silva Santos pelas discussões relacionadas ao tema.

Aos colegas de Doutorado pela ótima convivência que tivemos, especialmente, Edna Gomes, Vieira, Iran, Evaldo, Jacqueline, Jair, Halysen, Danielton, Verônica, Brasileiro e Vera. Que o tempo e a distância não possam interromper o companheirismo.

Aos professores do DM/UEPB que fizeram parte da minha formação, especialmente, Prof. Dr. Ormundo Alves de Lima, Prof. Dr. Aldo Trajano Lourêdo e Prof. Dr. Wandenberg Lopes, pelo constante incentivo.

Aos órgãos CAPES, CNPq e FINEP pelo apoio a projetos de pesquisa liderados pelo Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente, na realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

FRANCO, C. M. R., *Modelagem, simulação e experimentação da secagem contínua e intermitente de sólidos elipsoidais. Estudo de caso: Secagem de grãos de arroz em casca*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. 261 p. Tese (Doutorado)

Difusão de calor e massa são encontrados em vários processos de interesse tecnológico, incluindo a secagem de produtos agrícolas. Dentre as técnicas de secagem existentes, a intermitente destaca-se por reduzir o consumo de energia durante o processo e melhorar a qualidade final do produto. Neste trabalho, foram desenvolvidos modelos matemáticos para prever a difusão de calor e massa durante a secagem contínua e intermitente de sólidos elipsoidais. A solução analítica da equação de difusão bidimensional, em coordenadas cilíndricas, foi obtida via método integral baseado em Galerkin (método GBI) considerando-se o coeficiente de difusão constante e condições de contorno de equilíbrio e convectiva na superfície do sólido. O período de têmpera foi incluído na modelagem matemática e as distribuições de umidade e temperatura foram simuladas neste período. Como aplicação, a metodologia foi usada para descrever secagem de grãos de arroz em casca BRSMG Conai foram realizados em diversas condições experimentais de temperatura (40, 50, 60 e 70°C), número de pausas (1, 2 e 3) e tempo de têmpera (30, 60, 120, 180 e 240 min). As cinéticas de secagem intermitente de grãos de arroz em casca foram apresentadas fazendo comparação com a secagem contínua para análise da taxa e tempo de secagem. Testes de simulação de secagem contínua e intermitente de sólidos elipsoidais prolatos, variando a razão de aspecto e o número de Biot, são apresentados e discutidos. Resultados teóricos do teor de umidade de grãos de arroz em casca foram comparados aos resultados experimentais, permitindo a determinação do coeficiente de difusão de massa e do coeficiente de transferência de massa convectivo. Um bom ajuste foi observado entre os resultados preditos e experimentais. Verificou-se que o tempo de têmpera e o número de Biot têm influência na cinética de secagem. Também se observou aumento da difusividade de massa no período pós-têmpera, o que pode justificar a redução do tempo de operação efetiva.

**Palavras-chave:** Secagem, equação de difusão, período de têmpera, método GBI, esferoide prolato.

## ABSTRACT

FRANCO, C. M. R., *Modeling, simulation and experimentation of continuous and intermittent drying of ellipsoidal solids. Case study: drying of rough rice grains*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. 261 p. Tese (Doutorado)

Heat and mass diffusion are found in many processes of technological interest, including drying of agricultural products. Among the existing drying techniques, intermittent drying is notable for reducing the energy consumption during the process and improve final product quality. In the present work, are developed mathematical models to predict heat and mass diffusion during the continuous and intermittent drying of ellipsoidal solids. The analytical solution of the two-dimensional diffusion equation written in cylindrical coordinates is obtained via Galerkin-based integral method considering constant diffusion coefficient and, equilibrium and convective boundary conditions at the surface of the solid. The tempering period is included in the mathematical modeling and moisture and temperature distributions are simulated in this period. The methodology was applied to describe rough rice drying. Continuous and intermittent drying experiments of rough rice grains (BRSMG Conai variety) were performed in different experimental conditions of temperature (40, 50, 60 and 70°C), number of pauses (1, 2 and 3) and tempering time (30, 60, 120, 180 and 240 min). The intermittent drying kinetics of rough rice grains are presented and compared with the continuous drying for analysis of the drying rate and time. Continuous and intermittent drying simulation of prolate ellipsoid solids, for different aspect ratio and Biot number are presented and discussed. Theoretical results of the moisture content of rough rice grains are compared to experimental results, in order, to estimate both mass diffusion coefficient and convective mass transfer coefficient. A good agreement was observed between the predicted and experimental results. It has been found that the tempering time and Biot number have influence on drying kinetics. It was also observed an increase in the mass diffusivity in the after tempering period, which may justify the reduction of the effective operation time.

**Keywords:** Drying, diffusion equation, tempering time, GBI method, prolate spheroids.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação do movimento da água durante a secagem.....	34
Figura 2.2	Curvas típicas de secagem.....	36
Figura 2.3	Métodos de secagem.....	38
Figura 2.4	Secador Intermitente.....	40
Figura 2.5	Volume de controle infinitesimal $dx dy dz$ .....	59
Figura 2.6	Vetor fluxo térmico normal a uma isoterma em um sistema de coordenadas bidimensional.....	63
Figura 2.7	Elipsoide: (a) prolato; (b) oblato.....	73
Figura 3.1	Amostras de grãos de arroz em casca BRSMG Conai.....	81
Figura 3.2	Bandejas com grãos de arroz em casca BRSMG Conai <i>in natura</i> .....	82
Figura 3.3	Estufa com movimento mecânico de fabricação FANEM mod. 320E.....	83
Figura 3.4	Instrumentos de medição: (a) Balança de precisão digital (b) Termohigrômetro digital (c) Termômetro tipo pistola infravermelho digital.....	83
Figura 3.5	Amostras em recipientes herméticos durante o período de repouso.....	84
Figura 3.6	Paquímetro digital.....	85
Figura 3.7	Grão de arroz em casca e sua seção transversal .....	85
Figura 3.8	Elipsoide prolato.....	94
Figura 3.9	Elipsoide prolato no sistema de coordenadas cilíndricas ( $z \geq 0$ ).....	96
Figura 3.10	Seção plana do elipsoide prolato isolada em $\varphi = 0$ .....	99
Figura 3.11	Curva típica de secagem intermitente com uma única pausa.....	113
Figura 3.12	Cinéticas de secagem intermitente: (a) usando modelo difusivo com condição de contorno de primeira espécie (b) usando modelo difusivo com condição de contorno de terceira espécie.....	116
Figura 3.13	Diagrama do algoritmo computacional.....	117
Figura 4.1	Teor de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca durante a secagem a 40°C: (a) incluindo o período de têmpera; (b) excluindo o período de têmpera (casos E1, E2 e E3).....	122
Figura 4.2	Teor de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca durante a secagem a 50°C: (a) incluindo o período de têmpera; (b) excluindo o período de têmpera (casos E5, E6 e E7).....	122

Figura 4.3	Teor de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca durante a secagem a 60°C: (a) incluindo o período de têmpera; (b) excluindo o período de têmpera (casos E8, E9 e E10).....	123
Figura 4.4	Teor de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca durante a secagem a 70°C: (a) incluindo o período de têmpera; (b) excluindo o período de têmpera (casos E11, E12 e E13).....	123
Figura 4.5	Comparação entre os teores de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca, com diferentes teores de umidade inicial, obtidos durante a secagem contínua a 70°C (casos E11 e E14).....	124
Figura 4.6	Teor de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca durante a secagem contínua e intermitente com 01 e 02 pausas (T = 40°C): (a) incluindo o período de têmpera; (b) excluindo o período de têmpera (casos E1, E3 e E4).....	126
Figura 4.7	Teor de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca durante a secagem contínua e intermitente com 01, 02 e 03 pausas (T = 70°C): (a) incluindo o período de têmpera; (b) excluindo o período de têmpera (casos E14, E15, E16 e E17).....	127
Figura 4.8	Cinética de secagem intermitente de grãos de arroz em casca (uma pausa de 120 min), excluindo o tempo de têmpera, para várias temperaturas do ar de secagem (casos E7, E9 e E12).....	128
Figura 4.9	Temperatura superficial do grão de arroz, em função do tempo, durante a secagem com temperatura do ar de (a) 40°C (casos E1, E2, E3 e E4) e (b) 50°C (casos E5, E6 e E7).....	129
Figura 4.10	Temperatura superficial do grão de arroz, em função do tempo, durante a secagem com temperatura do ar de (a) 60°C (casos E8, E9 e E10) e (b) 70°C (casos E11, E12 e E13).....	130
Figura 4.11	Temperatura superficial do grão de arroz em função do tempo durante a secagem contínua e intermitente com uma, duas e três pausas (T = 70°C/casos E14, E15, E16 e E17).....	130
Figura 4.12	Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e por Payne et al. (1986) para o teor de umidade no centro de um elipsoide com $b/a = 2,0$ , usando o método GBI.....	135
Figura 4.13	Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho usando o método GBI e os reportados por Lima (1999) usando o método de separação de variáveis, do teor de umidade no centro de um elipsoide com $b/a = 1,1$ .....	135

Figura 4.14	Comparação entre os resultados deste trabalho e os reportados por Haji-Sheikh e Lakshminarayanan (1987) do teor de umidade na linha de simetria ( $r = 0$ ), de um elipsoide com $b/a = 2,0$ , obtidos com o método GBI considerando-se $Bi = 4,0$ .....	136
Figura 4.15	Comparação entre os resultados deste trabalho e os reportados por Haji-Sheikh e Lakshminarayanan (1987), do teor de umidade na linha de simetria ( $r = 0$ ), de um elipsoide com $b/a = 2,0$ , obtidos com o método GBI considerando-se $Bi = 0,5$ .....	137
Figura 4.16	Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho usando o método GBI e os reportados por Oliveira e Lima (2002) usando o método de separação de variáveis, do teor de umidade médio adimensional de um elipsoide com $b/a = 2,0$ , considerando-se $Bi = 0,58$ .....	138
Figura 4.17	Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho usando o método GBI e os reportados por Luikov (1968) usando o método de separação de variáveis, do teor de umidade médio adimensional de uma esfera, considerando-se $Bi = 1,0$ .....	138
Figura 4.18	Teor de umidade médio adimensional em função do número de Fourier para sólidos esferoidais com diferentes razões de aspecto (casos T1, T2 e T3).....	141
Figura 4.19	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 1,1 para um período de pausa: (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T4, T5 e T6).....	141
Figura 4.20	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para um período de pausa: (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T8, T9 e T10).....	142
Figura 4.21	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 5,0 para um período de pausa: (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T12, T13 e T14).....	142
Figura 4.22	Evolução do teor de umidade no centro e na superfície de elipsoides com razão de aspecto $b/a = 1,1; 2,0$ e $5,0$ durante período de têmpera de $\Delta Fo = 0,144$ (casos T6, T10 e T14).....	144
Figura 4.23	Distribuição radial ( $z = 0$ ) do teor de umidade no interior de elipsoides durante o período de têmpera para diferentes $Fo$ : (a) $b/a = 1,1$ e (b) $b/a = 2,0$ (casos T7 e T11).....	144
Figura 4.24	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 1,1$ durante o primeiro período de secagem	

	contínua para os tempos adimensionais: (a) $Fo = 0,006$ e (b) $Fo = 0,015$ (caso T4).....	145
Figura 4.25	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 2,0$ durante o primeiro período de secagem contínua para os tempos adimensionais: (a) $Fo = 0,006$ e (b) $Fo = 0,015$ (caso T8).....	146
Figura 4.26	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 5,0$ durante o primeiro período de secagem contínua para os tempos adimensionais: (a) $Fo = 0,006$ e (b) $Fo = 0,015$ (caso T12).....	146
Figura 4.27	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 1,1$ durante o período de têmpera: (a) $Fo = 0,018$ (início); (b) $Fo = 0,036$ ; (c) $Fo = 0,054$ e (d) $Fo = 0,162$ (caso T6).....	147
Figura 4.28	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 2,0$ durante o período de têmpera: (a) $Fo = 0,018$ (início); (b) $Fo = 0,036$ ; (c) $Fo = 0,054$ e (d) $Fo = 0,162$ (caso T10).....	148
Figura 4.29	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 5,0$ no início e no final do período de têmpera: (a) $Fo = 0,018$ (início); (b) $Fo = 0,036$ ; (c) $Fo = 0,054$ e (d) $Fo = 0,162$ (caso T14).....	149
Figura 4.30	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 1,1$ para secagem contínua e intermitente com o mesmo tempo adimensional de operação efetiva $Fo = 0,054$ : (a) secagem contínua ( $Fo = 0,054$ ); (b) $\Delta Fo = 0,018$ ( $Fo = 0,072$ ); (c) $\Delta Fo = 0,036$ ( $Fo = 0,090$ ) e (d) $\Delta Fo = 0,144$ ( $Fo = 0,198$ ) (casos T1, T4, T5 e T6).....	151
Figura 4.31	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 2,0$ para secagem contínua e intermitente com o mesmo tempo adimensional de operação efetiva $Fo = 0,054$ : (a) secagem contínua ( $Fo = 0,054$ ); (b) $\Delta Fo = 0,018$ ( $Fo = 0,072$ ); (c) $\Delta Fo = 0,036$ ( $Fo = 0,090$ ); e (d) $\Delta Fo = 0,144$ ( $Fo = 0,198$ ) (casos T2, T8, T9 e T10).....	152
Figura 4.32	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 5,0$ para secagem contínua e intermitente com o mesmo tempo adimensional de operação efetiva $Fo = 0,054$ : (a) secagem contínua ( $Fo = 0,054$ ); (b) $\Delta Fo = 0,018$ ( $Fo = 0,072$ ); (c) $\Delta Fo = 0,036$ ( $Fo = 0,090$ ); e (d) $\Delta Fo = 0,144$ ( $Fo = 0,198$ ) (casos T3, T12, T13 e T14).....	153

Figura 4.33	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 1,1 para dois períodos de pausa: (a) incluindo o período de têmpera; (b) excluindo o período de têmpera (casos T1, T15 e T16).....	154
Figura 4.34	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para dois períodos de pausa: (a) incluindo o período de têmpera; (b) excluindo o período de têmpera (casos T2, T17 e T18).....	155
Figura 4.35	Comparação entre as cinéticas de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0, para um e dois períodos de pausas, excluindo o período de têmpera (casos T2, T8, T9, T10, T17 e T18).....	155
Figura 4.36	Evolução do teor de umidade médio adimensional de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para uma, duas e quatro períodos de pausas: (a) incluindo o período de têmpera; (b) excluindo o período de têmpera (casos T2, T9, T18 e T19).....	156
Figura 4.37	Teor de umidade médio adimensional em função do número de Fourier para vários números de Biot em um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 2,0$ (casos T2, T20, T24, T28, T32, T36 e T45).....	158
Figura 4.38	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para $Bi = 1,0$ : (a) incluindo o período de têmpera e (b) excluindo o período de têmpera (casos T20, T21, T22 e T23).....	159
Figura 4.39	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para $Bi = 5,0$ : (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T24, T25, T26 e T27).....	159
Figura 4.40	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para $Bi = 7,0$ : (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T28, T29, T30 e T31).....	160
Figura 4.41	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para $Bi = 10,0$ : (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T32, T33, T34 e T35).....	160
Figura 4.42	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para $Bi = 15,0$ : (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T36, T37, T38 e T39).....	161
Figura 4.43	Distribuição radial do teor de umidade no interior ( $z = 0$ ) de um elipsoide com razão de aspecto 2,0, durante o período de têmpera para diferentes $Fo$ : (a) $Bi = 1,0$ e (b) $Bi = 5,0$ (casos T23 e T27).....	161

Figura 4.44	Evolução do teor de umidade no centro e na superfície ( $r = a, z = 0$ ) de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 2,0$ durante o período de têmpera: (a) $Bi = 1,0$ e (b) $Bi = 5,0$ (casos T23 e T27).....	162
Figura 4.45	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 2,0$ no início e no final do período de têmpera para $Bi = 1,0$ : (a) $Fo = 0,018$ (início) e (b) $Fo = 0,162$ (fim) (caso T23).....	163
Figura 4.46	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 2,0$ no início e no final do período de têmpera para $Bi = 5,0$ : (a) $Fo = 0,018$ (início) e (b) $Fo = 0,162$ (fim) (caso T27).....	163
Figura 4.47	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 2,0$ no início e no final do período de têmpera para $Bi = 10,0$ : (a) $Fo = 0,018$ (início) e (b) $Fo = 0,162$ (fim) (caso T35).....	164
Figura 4.48	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 2,0$ no início e no final do período de têmpera para $Bi = 15,0$ : (a) $Fo = 0,018$ (início) (b) $Fo = 0,162$ (fim) (caso T39).....	164
Figura 4.49	Teor de umidade médio adimensional em função do número de Fourier para elipsoides com diferentes razões de aspecto e $Bi = 15,0$ (casos T36, T40 e T42).....	165
Figura 4.50	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 1,1 para $Bi = 15,0$ (casos T40 e T41).....	166
Figura 4.51	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para $Bi = 15,0$ (casos T36 e T39).....	167
Figura 4.52	Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 5,0 para $Bi = 15,0$ (casos T42 e T43).....	167
Figura 4.53	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 1,1$ para secagem contínua e intermitente no tempo adimensional $Fo = 0,072$ , para $Bi = 15,0$ : (a) secagem contínua ( $Fo = 0,072$ ) e (b) uma pausa de $\Delta Fo = 0,144$ ( $Fo = 0,216$ ) (casos T40 e T41).....	168
Figura 4.54	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do elipsoide de razão de aspecto $b/a = 2,0$ para secagem contínua e intermitente no tempo adimensional $Fo = 0,072$ , para $Bi = 15,0$ : (a) secagem contínua ( $Fo = 0,072$ ) e (b) uma pausa de $\Delta Fo = 0,144$ ( $Fo = 0,216$ ) (casos T36 e T39).....	168
Figura 4.55	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do elipsoide de razão de aspecto $b/a = 5,0$ para secagem contínua e intermitente no tempo adimensional $Fo = 0,072$ , para $Bi = 15,0$ : (a) secagem contínua ( $Fo = 0,072$ ) e (b) uma pausa de $\Delta Fo = 0,144$ ( $Fo = 0,216$ ) (casos T42 e T43).....	169

Figura 4.56	Efeito do número de pausas na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para $Bi = 15,0$ : (a) incluindo o período de têmpera e (b) excluindo o período de têmpera (casos T36, T39 e T44).....	170
Figura 4.57	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 2,0$ no primeiro período de têmpera, para $Bi = 15,0$ : (a) $Fo = 0,018$ (início da têmpera) e (b) $Fo = 0,090$ (fim da têmpera) (caso T44).....	170
Figura 4.58	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto $b/a = 2,0$ no segundo período de têmpera, para $Bi = 15,0$ : (a) $Fo = 0,108$ (início da têmpera) e (b) $Fo = 0,180$ (fim da têmpera) (caso T44).....	171
Figura 4.59	Comparação entre os teores de umidade médio teórico (método GBI, Modelo I) e experimental durante a secagem de grãos de arroz em casca: (a) $\tau = 0$ min (secagem contínua); (b) uma pausa/ $\tau = 30$ min; (c) uma pausa/ $\tau = 60$ min e (d) duas pausas/ $\tau = 30$ min ( $T = 40^{\circ}C$ ) (casos E1, E2, E3 e E4).....	174
Figura 4.60	Curvas de secagem contínua e intermitente previstas usando o Modelo I, excluindo o período de têmpera (casos E1, E2, E3 e E4).....	175
Figura 4.61	Distribuição de erros para o ajuste do Modelo I aos dados experimentais (E1, E2, E3 e E4) de secagem contínua e intermitente na temperatura de $40^{\circ}C$ , eliminando-se a têmpera: (a) contínua ( $\tau = 0,0$ min); (b) intermitente (uma pausa/ $\tau = 30$ min); (c) intermitente (uma pausa/ $\tau = 60$ min); e (d) intermitente (duas pausas/ $\tau = 30$ min).....	176
Figura 4.62	Teores de umidade médio adimensional experimental e preditos para secagem contínua e intermitente, excluindo o período de têmpera ( $T = 40^{\circ}C$ /casos E1, E2, E3 e E4).....	177
Figura 4.63	Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo I) e experimental (E2, E3 e E4) durante a secagem de arroz em casca na temperatura de $40^{\circ}C$ , incluindo o período de têmpera: (a) uma pausa/ $\tau = 30$ min; (b) uma pausa/ $\tau = 60$ min; e (c) duas pausas/ $\tau = 60$ min.....	180
Figura 4.64	Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo I) e experimental (E5, E6 e E7) durante a secagem de arroz em casca ( $T = 50^{\circ}C$ e uma pausa): (a) $\tau = 0,0$ min (secagem contínua); (b) $\tau = 60$ min; e (c) $\tau = 120$ min .....	181
Figura 4.65	Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo I) e experimental (E8, E9 e E10) durante a secagem de arroz	

	em casca ( $T = 60^{\circ}\text{C}$ e uma pausa): (a) $\tau = 0,0$ min (secagem contínua); (b) $\tau = 120$ min; e (c) $\tau = 240$ min .....	182
Figura 4.66	Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo I) e experimental (E11, E12 e E13) durante a secagem de arroz em casca ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ e uma pausa): (a) $\tau = 0,0$ min (secagem contínua); (b) $\tau = 120$ min; e (c) $\tau = 180$ min .....	183
Figura 4.67	Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo I) e experimental (E14, E15, E16 e E17) durante a secagem de arroz em casca na temperatura de $T = 70^{\circ}\text{C}$ : (a) $\tau = 0,0$ min (secagem contínua); (b) uma pausa/ $\tau = 120$ min; (c) duas pausas/ $\tau = 60$ min; e (d) três pausas/ $\tau = 60$ min.....	184
Figura 4.68	Distribuição de erros para o ajuste do Modelo I aos dados experimentais (E2, E3 e E4) de secagem intermitente na temperatura de $40^{\circ}\text{C}$ , incluindo a têmpera: (a) uma pausa/ $\tau = 30$ min; (b) uma pausa/ $\tau = 60$ min; e (c) duas pausas/ $\tau = 30$ min.....	185
Figura 4.69	Teores de umidade médio adimensional experimental (E2, E3 e E4) e preditos a partir do Modelo I para secagem intermitente, incluindo o período de têmpera ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ).....	186
Figura 4.70	Distribui�o de erros para o ajuste do Modelo I aos dados experimentais (E5, E6 e E7) de secagem continua e intermitente na temperatura de $50^{\circ}\text{C}$ , incluindo a têmpera: (a) contínua ( $\tau = 0,0$ min); (b) intermitente (uma pausa/ $\tau = 60$ min); e (c) intermitente (uma pausa/ $\tau = 120$ min).....	188
Figura 4.71	Distribui�o de erros para o ajuste do Modelo I aos dados experimentais (E8, E9 e E10) de secagem continua e intermitente na temperatura de $60^{\circ}\text{C}$ , incluindo a têmpera: (a) contínua ( $\tau = 0,0$ min); (b) intermitente (uma pausa/ $\tau = 120$ min); e (c) intermitente (uma pausa/ $\tau = 240$ min).....	189
Figura 4.72	Distribui�o de erros para o ajuste do Modelo I aos dados experimentais (E11, E12 e E13) de secagem continua e intermitente na temperatura de $70^{\circ}\text{C}$ , incluindo a têmpera: (a) contínua ( $\tau = 0,0$ min); (b) intermitente ( uma pausa/ $\tau = 120$ min); e (c) intermitente (uma pausa/ $\tau = 180$ min).....	190
Figura 4.73	Distribui�o de erros para o ajuste do Modelo I aos dados experimentais (E14, E15, E16 e E17) de secagem continua e intermitente na temperatura de $70^{\circ}\text{C}$ , incluindo a têmpera: (a) contínua ( $\tau = 0,0$ min); (b) uma pausa/ $\tau = 120$ min; (c) duas pausas/ $\tau = 60$ min; e (d) três pausas/ $\tau = 60$ min.....	191



Figura 4.74	Teores de umidade médio adimensional experimental (casos E5, E6 e E7) e preditos (Modelo I) para secagem contínua e intermitente com uma pausa ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ) .....	192
Figura 4.75	Teores de umidade médio adimensional experimental (casos E8, E9 e E10) e preditos (Modelo I) para secagem contínua e intermitente com uma pausa ( $T = 60^{\circ}\text{C}$ ) .....	192
Figura 4.76	Teores de umidade médio adimensional experimental (casos E11, E12 e E13) e preditos (Modelo I) para secagem contínua e intermitente com uma pausa ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ ) .....	193
Figura 4.77	Teores de umidade médio adimensional experimental (casos E14, E15, E16 e E17) e preditos (Modelo I) para secagem contínua e intermitente com uma, duas e três pausas ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ ).....	193
Figura 4.78	Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca no início e no fim das têmperas de 30 e 60 min, após 15 min de secagem contínua a $40^{\circ}\text{C}$ (uma pausa/casos E2 e E3).....	195
Figura 4.79	Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca no início e no fim do período de têmpera para secagem intermitente com uma pausa após 15 min de secagem a $50^{\circ}\text{C}$ : (a) $\tau = 60$ min e (b) $\tau = 120$ min (casos E6 e E7).....	195
Figura 4.80	Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca no início e no fim do período de têmpera para secagem intermitente com uma pausa após 15 min de secagem a $60^{\circ}\text{C}$ : (a) $\tau = 120$ min e (b) $\tau = 240$ min (casos E9 e E10).....	196
Figura 4.81	Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca no início e no fim do período de têmpera para secagem intermitente com uma pausa após 15 min de secagem a $70^{\circ}\text{C}$ : (a) $\tau = 120$ min e (b) $\tau = 180$ min (casos E12 e E13).....	196
Figura 4.82	Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca no início e no fim do período de têmpera para secagem intermitente com uma pausa de 120 min, após 30 min de secagem a $70^{\circ}\text{C}$ (caso E15).....	197
Figura 4.83	Comparação entre os teores de umidade na direção radial, ao final de um período de têmpera de 120 min, para várias condições de secagem (casos E7, E9, E12 e E15).....	198
Figura 4.84	Evolução do teor de umidade na superfície do grão de arroz durante o período de têmpera de 60 min ( $T = 40^{\circ}\text{C}/$ uma pausa).....	198

Figura 4.85	Evolução do teor de umidade na superfície do grão de arroz durante o período de têmpera de 120 min, para várias condições de secagem (casos E7, E9, E12 e E15).....	200
Figura 4.86	Evolução do teor de umidade na superfície do grão de arroz durante o período de têmpera após 15 min de secagem contínua para várias temperaturas.....	200
Figura 4.87	Evolução do teor de umidade na superfície do grão de arroz durante o primeiro e o segundo períodos de têmpera de 30 min, para secagem a 40°C (caso E4).....	201
Figura 4.88	Evolução do teor de umidade na superfície do grão de arroz durante os três períodos de têmpera de 60 min, para secagem a 70°C (caso E17).....	201
Figura 4.89	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o período de têmpera, para secagem intermitente com uma pausa de 60 min, após 15 min de secagem a 40°C (caso E3): (a) t = 15 min (início); (b) t = 45 min e (c) t = 75 min (fim).....	202
Figura 4.90	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o segundo período de têmpera para o experimento de secagem intermitente (caso E4) na temperatura de 40°C (duas pausas/ $\tau$ = 30 min): (a) t = 75 min (início); e (b) t = 105 min (fim).....	203
Figura 4.91	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o período de têmpera de 120 min, após 15 min de secagem a 50°C (caso E7): (a) t = 15 min (início) e (b) t = 135 min (fim).....	204
Figura 4.92	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o período de têmpera de 120 min, após 15 min de secagem a 60°C (caso E9): (a) t = 15 min (início) e (b) t = 135 min (fim).....	205
Figura 4.93	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o período de têmpera de 120 min, após 15 min de secagem a 70°C (caso E12): (a) t = 15 min (início); e (b) t = 135 min (fim).....	205
Figura 4.94	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o período de têmpera de 240 min, após 15 min de secagem a 60°C (caso E10): (a) t = 15 min (início); e (b) t = 255 min (fim).....	206
Figura 4.95	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o período de têmpera de 180 min, após 15 min de secagem a 70°C (caso E13): (a) t = 15 min (início); e (b) t = 195 min (fim).....	206

Figura 4.96	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o segundo período de têmpera de 60 min para o experimento de secagem a 70°C (caso E17): (a) t = 90 min (início); e (b) t = 150 min (fim).....	207
Figura 4.97	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o terceiro período de têmpera de 60 min para o experimento de secagem a 70°C (caso E17): (a) t = 165 min (início); e (b) t = 225 min (fim).....	208
Figura 4.98	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão do arroz em casca para secagem contínua (T = 40°C) e intermitente (uma pausa) com o mesmo tempo de operação efetiva t = 465 min: (a) secagem contínua (t = 465 min); (b) intermitente/ $\tau$ = 30 min (t = 495 min) e (c) intermitente/ $\tau$ = 60 min (t = 525 min) (casos E1, E2 e E3).....	209
Figura 4.99	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão do arroz em casca para secagem contínua (T = 50°C) e intermitente (uma pausa) com o mesmo tempo de operação efetiva t = 465 min: (a) secagem contínua (t = 465 min); (b) intermitente/ $\tau$ = 60 min (t = 525 min) e (c) intermitente/ $\tau$ = 120 min (t = 585 min) (casos E5, E6 e E7).....	210
Figura 4.100	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão do arroz em casca para secagem contínua (T = 60°C) e intermitente (uma pausa) com o mesmo tempo de operação efetiva t = 465 min: (a) secagem contínua (t = 465 min); (b) intermitente/ $\tau$ = 120 min (t = 585 min) e (c) intermitente/ $\tau$ = 240 min (t = 705 min) (casos E8, E9 e E10).....	211
Figura 4.101	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão do arroz em casca para secagem contínua (T = 70°C) e intermitente (uma pausa) com o mesmo tempo de operação efetiva t = 465 min: (a) secagem contínua (t = 465 min); (b) intermitente/ $\tau$ = 120 min (t = 585 min) e (c) intermitente/ $\tau$ = 180 min (t = 645 min) (casos E11, E12 e E13).....	212
Figura 4.102	Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo II) e experimental durante a secagem de arroz em casca (T = 40°C) (casos E1, E2, E3 e E4): (a) $\tau$ = 0,0 min; (b) uma pausa/ $\tau$ = 30 min; (c) uma pausa/ $\tau$ = 60 min; (d) duas pausas/ $\tau$ = 30 min e (e) superposição das quatro curvas eliminando o tempo de têmpera.....	215
Figura 4.103	Distribuição de erros para o ajuste do Modelo II aos dados experimentais (E1, E2, E3 e E4) de secagem contínua e intermitente na temperatura de 40°C: (a) contínua ( $\tau$ = 0,0 min); (b) intermitente (uma pausa/ $\tau$ = 30 min); (c)	

	intermitente (uma pausa/ $\tau = 60$ min) e (d) intermitente (duas pausas/ $\tau = 30$ min).....	216
Figura 4.104	Teores de umidade médio adimensional experimental (E1, E2, E3 e E4) e preditos usando o Modelo II, incluindo o período de têmpera ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ).....	217
Figura 4.105	Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo II) e experimental durante a secagem de arroz em casca ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ ): (a) $\tau = 0,0$ min; (b) uma pausa/ $\tau = 120$ min e (c) uma pausa/ $\tau = 180$ min (casos E11, E12 e E13).....	218
Figura 4.106	Distribuição de erros para o ajuste do Modelo II aos dados experimentais (E11, E12 e E13) de secagem contínua e intermitente na temperatura de $70^{\circ}\text{C}$ , incluindo o período de têmpera: (a) contínua ( $\tau = 0,0$ min); (b) intermitente (uma pausa/ $\tau = 120$ min); e (c) intermitente (uma pausa/ $\tau = 180$ min).....	220
Figura 4.107	Teores de umidade médio adimensional experimental (E11, E12 e E13) e preditos usando o Modelo II, incluindo o período de têmpera ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ ).....	221
Figura 4.108	Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante a têmpera de 60 min ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ /caso E3).....	222
Figura 4.109	Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante a têmpera de 180 min ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ /caso E13).....	222
Figura 4.110	Gradiente do teor de umidade na direção radial gerado durante a secagem contínua nas temperaturas de 40 e $70^{\circ}\text{C}$ (casos E1 e E11).....	224
Figura 4.111	Gradiente do teor de umidade na direção radial gerado durante o primeiro período de secagem a $40^{\circ}\text{C}$ (têmpera de 60 min) e $70^{\circ}\text{C}$ (têmpera de 180 min) (casos E3 e E13).....	224
Figura 4.112	Distribuição radial do teor de umidade no interior do grão de arroz durante a secagem contínua e intermitente em $t = 195$ min: (a) $T = 40^{\circ}\text{C}$ (casos E1, E2 e E3) e (b) $T = 70^{\circ}\text{C}$ (casos E11, E12 e E13).....	226
Figura 4.113	Evolução do teor de umidade no centro e na superfície do grão de arroz durante a secagem contínua: (a) $T = 40^{\circ}\text{C}$ (caso E1) e (b) $T = 70^{\circ}\text{C}$ (caso E11).....	226
Figura 4.114	Evolução do teor de umidade no centro e na superfície do grão de arroz durante o período de têmpera: (a) após secagem a $40^{\circ}\text{C}$ ( $\tau = 60$ min/caso E3) e (b) após secagem a $70^{\circ}\text{C}$ ( $\tau = 180$ min/caso E13).....	227

Figura 4.115	Distribuições do teor de umidade no interior do grão de arroz em casca no início e no fim do período de têmpera de 60 min, após 15 min de secagem a 40°C (caso E3): (a) $t = 15$ min (início); (b) $t = 45$ min; e (c) $t = 75$ min (fim).....	228
Figura 4.116	Distribuições do teor de umidade no interior do grão de arroz em casca no início e no fim da têmpera de 120 min, após 15 min de secagem a 70°C (caso E12): (a) início ( $t = 15$ min); e (b) fim ( $t = 135$ min).....	229
Figura 4.117	Distribuições do teor de umidade no interior do grão de arroz em casca no início e no fim da têmpera de 180 min, após 15 min de secagem a 70°C (caso E13): (a) início ( $t = 15$ min); e (b) fim ( $t = 195$ min).....	229
Figura 4.118	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca para secagem contínua ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ) e intermitente (uma pausa) com o mesmo tempo de operação efetiva $t = 465$ min (casos E1, E2 e E3): (a) secagem contínua ( $t = 465$ min); (b) intermitência de 30 min ( $t = 495$ min); e (c) intermitência de 60 min ( $t = 525$ min).....	230
Figura 4.119	Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão do arroz em casca para secagem contínua ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ ) e intermitente (uma pausa) com o mesmo tempo de operação efetiva $t = 465$ min (casos E11, E12 e E13): (a) secagem contínua ( $t = 465$ min); (b) intermitência de 120 min ( $t = 585$ min); e (c) intermitência de 180 min ( $t = 645$ min).....	231
Figura 4.120	Comparação entre as temperaturas média adimensional teórica (método GBI, Modelo II) e experimental durante a secagem de arroz em casca a 40°C (casos E1, E2 e E3): (a) $\tau = 0,0$ min (secagem contínua); (b) uma pausa/ $\tau = 30$ min e (c) uma pausa/ $\tau = 60$ min.....	234
Figura 4.121	Comparação entre as temperaturas média adimensional teórica (método GBI, Modelo II) e experimental durante a secagem de arroz em casca a 70°C (casos E11, E12 e E13): (a) $\tau = 0,0$ min (secagem contínua); (b) uma pausa/ $\tau = 120$ min e (c) uma pausa/ $\tau = 180$ min.....	235
Figura 4.122	Cinéticas de secagem e aquecimento previstas utilizando-se a condição de contorno de terceira espécie, para secagem contínua de arroz em casca a 40°C (caso E1).....	237
Figura 4.123	Variação do teor de umidade e da temperatura na superfície do grão ( $r = 0,105$ cm, $z = 0$ cm), durante a pausa de 60 min após o período inicial de secagem contínua de 15 min na temperatura de 40°C (caso E3).....	237

Figura 4.124	Distribuição da temperatura adimensional no interior do grão do arroz em casca para secagem contínua a 40°C (caso E1): (a) t = 5 min; (b) t = 15 min; e (c) t = 45 min.....	238
Figura 4.125	Distribuição da temperatura adimensional no interior do grão do arroz em casca durante a têmpera de 60 min, após 15 min de secagem a 40°C (caso E3): (a) t = 15 min (início); (b) t = 25 min; e (c) t = 45 min.....	239

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição centesimal média (% na matéria seca) de arroz integral, branco polido e parboilizado polido.....	53
Tabela 3.1	Dimensões do grão de arroz (BRSMG Conai) <i>in natura</i> com casca.....	85
Tabela 3.2	Parâmetros para cada experimento de secagem de arroz em casca.....	86
Tabela 3.3	Dimensões do grão de arroz com casca para geometria elipsoide prolato.....	97
Tabela 4.1	Valores iniciais e de equilíbrio do teor de umidade e da temperatura para cada experimento de secagem.....	121
Tabela 4.2	Teor de umidade médio adimensional em alguns instantes de tempo.....	125
Tabela 4.3	Comparação entre as dimensões do grão de arroz BRSMG Conai úmido e seco (T = 40°C) com casca (caso E1).....	131
Tabela 4.4	Comparação entre as dimensões do grão de arroz BRSMG Conai úmido e seco (T = 40°C) sem casca (caso E1).....	131
Tabela 4.5	Valores de $\bar{M}^*(0)$ em função de N para vários números de Biot (b/a = 2,0).....	133
Tabela 4.6	Valores de $\bar{M}^*(0)$ em função de N para Biot infinito (b/a = 2,0).....	133
Tabela 4.7	Valores de $\bar{M}^*(t)$ em função de N para vários instantes de tempo (Biot infinito e b/a = 2,0).....	133
Tabela 4.8	Descrição dos testes teóricos para Biot infinito.....	140
Tabela 4.9	Descrição dos testes teóricos para Biot finito.....	157
Tabela 4.10	Parâmetros estatísticos obtidos com as simulações do conjunto de experimentos (E1, E2, E3, E4) usando o modelo de difusão com condição de contorno de primeira espécie, excluindo a temperatura (T = 40°C).....	173
Tabela 4.11	Parâmetros estatísticos obtidos com as simulações da secagem contínua e intermitente usando o modelo de difusão com condição de contorno de primeira espécie.....	179
Tabela 4.12	Erro médio e coeficiente de correlação entre os erros e os teores de umidade médio previstos usando o Modelo I, para os experimentos nas temperaturas 50, 60 e 70°C.....	187
Tabela 4.13	Parâmetros estatísticos obtidos com as simulações do conjunto de experimentos de secagem a 40°C (E1, E2, E3 e E4) usando o modelo de	

	difusão com condição de contorno de terceira espécie.....	213
Tabela 4.14	Parâmetros estatísticos obtidos com as simulações do conjunto de experimentos de secagem a 70°C (E11, E12, E13) usando o modelo de difusão com condição de contorno de terceira.....	213
Tabela 4.15	Erro médio e coeficiente de correlação entre os erros e os teores de umidade médio previstos usando o Modelo II, para os experimentos na temperatura 40°C.....	217
Tabela 4.16	Erro médio e coeficiente de correlação entre os erros e os teores de umidade médio previstos usando o Modelo II, para os experimentos na temperatura 70°C.....	219
Tabela 4.17	Propriedades termofísicas do grão de arroz em casca nas temperaturas 40 e 70°C.....	233
Tabela 4.18	Parâmetros estatísticos obtidos com as simulações do conjunto de experimentos de secagem nas temperaturas 40 e 70°C usando o modelo de difusão para transferência de calor com condição de contorno de terceira espécie.....	233



# NOMENCLATURA

## Letras Latinas

$A$ - Área da superfície do sólido de revolução	[cm <sup>2</sup> ]
$a$ - Semi-eixo menor do elipsoide	[cm]
$b$ - Semi-eixo maior do elipsoide	[cm]
$a'$ - Espessura do grão de arroz	[mm]
$b'$ - Comprimento do grão de arroz	[mm]
$c'$ - Largura do grão de arroz	[mm]
$Bi$ - Número de Biot	[-]
$Bi_m$ - Número de Biot para transferência de massa	[-]
$Bi_c$ - Número de Biot para transferência de calor	[-]
$c_n$ - Constantes	[-]
$c_p$ - Calor específico do produto	[J / (kg · K)]
$D$ - Difusividade de massa efetiva	[cm <sup>2</sup> / s]
$d_n$ - Autovetores	[-]
$f_i$ - Funções de base	[-]
$Fo$ - Número de Fourier (tempo adimensional)	[-]
$\dot{G}_{ent}$ - Taxa de entrada da variável de transporte	[-]
$\dot{G}_{sai}$ - Taxa de saída da variável de transporte	[-]
$\dot{G}_g$ - Taxa de geração da variável de transporte	[-]
$h_c$ - Coeficiente de transferência de calor por convecção	[W/cm <sup>2</sup> ·K]
$h_m$ - Coeficiente de transferência de massa por convecção	[cm/s]
$H$ - Parâmetro da função de base de segunda espécie	[-]
$\bar{H}$ - Parâmetro da função de base de terceira espécie	[-]
$\vec{J}$ - Fluxo difusivo de massa	[kg/cm <sup>2</sup> s]
$L_c$ - Comprimento característico	[cm]
$L$ - Operador diferencial de $C^2(\bar{\Omega})$	[-]
$k$ - Condutividade térmica	[W / cm · K]
$M$ - Teor de umidade (base seca)	[kg / kg]
$M_0$ - Teor de umidade inicial (base seca)	[kg / kg]

$M_{eq}$ - Teor de umidade de equilíbrio (base seca)	[kg / kg]
$\bar{M}$ - Teor de umidade médio (base seca)	[kg / kg]
$M^*$ - Teor de umidade adimensional	[-]
$\bar{M}^*$ - Teor de umidade médio adimensional	[-]
$q''$ - Fluxo de calor por unidade de área	[W/cm <sup>2</sup> ]
$\vec{n}$ - Vetor unitário normal exterior à superfície	[-]
$r, z$ - Coordenadas cilíndricas	[-]
$r^2$ - Coeficiente de determinação	[-]
$s$ - Desvio padrão do ajuste (desvio quadrado médio)	[-]
$S$ - Contorno (fronteira) do sólido	[-]
$S^\Phi$ - Termo fonte da equação de transporte	[-]
$\dot{S}$ - Taxa de transferência da grandeza transportada	[-]
$t$ - Tempo	[s]
$t_i$ - Tempo inicial do período de têmpera	[s]
$T$ - Temperatura	[°C]
$\bar{T}$ - Temperatura média	[°C]
$T^*$ - Temperatura adimensional	[-]
$\bar{T}^*$ - Temperatura média adimensional	[-]
$T_0$ - Temperatura inicial	[°C]
$T_{eq}$ - Temperatura de equilíbrio	[°C]
UR - Umidade relativa	[%]
$V$ - Volume do sólido de revolução	[cm <sup>3</sup> ]
$V'$ - Volume do grão de arroz	[cm <sup>3</sup> ]
$\vec{v}$ - Vetor velocidade do meio	[m/s]
$v$ - Velocidade	[m/s]
$\vec{w}''$ - Fluxo de $\Phi$ por unidade de área	[-]
$x, y, z$ - Coordenadas cartesianas	[-]

### Letras Gregas

$\alpha$ - Difusividade térmica	[cm <sup>2</sup> /s]
$\alpha_i$ - Constantes	[-]

$\rho$ - Densidade (massa específica)	[kg / cm <sup>3</sup> ]
$\nabla$ - Operador Gradiente	[-]
$\nabla^2$ - Operador Laplaciano	[-]
$\Gamma^\Phi$ - Coeficiente de transporte	[-]
$\lambda$ - Coeficiente de transporte	[-]
$\Phi$ - Grandeza transportada	[-]
$\Phi_0$ - Valor inicial da variável de transporte	[-]
$\Phi_{eq}$ - Valor de equilíbrio da variável de transporte	[-]
$\Phi_\infty$ - Variável de transporte para um fluido ambiente	[-]
$\tau$ - Tempo de têmpera	[s]
$\Omega$ - Domínio limitado	[-]
$\bar{\Omega}$ - Designa a união de $\Omega$ com a sua fronteira	[-]
$\gamma_n$ - Autovalores	[-]
$\theta$ - Coordenada angular	[�]
$\chi^2$ - Soma das diferenças ao quadrado	[-]

### Subescrito

exp - experimental

pre - predito

S - Fronteira do sólido

o - Inicial

eq - Equilíbrio

### Abreviaturas

AGEITEC - Agência Embrapa de Informa o Tecnológica.

EPAMIG - Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais.

IPA - Instituto de Pesquisa Agropecuária.

LCTF - Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	29
1.1 Objetivo geral.....	32
1.2 Objetivos específicos.....	32
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	33
2.1 O processo de secagem.....	33
2.1.1 Características gerais.....	33
2.1.2 Secadores.....	39
2.1.3 A técnica de secagem intermitente.....	41
2.1.3.1 Estudos sobre secagem intermitente.....	43
2.1.4 Aspectos gerais de consumo, produção e secagem de grãos de arroz.....	51
2.2 Modelagem matemática do processo de secagem.....	54
2.2.1 Fundamentos.....	54
2.2.2 Equação geral de transporte.....	57
2.2.3 A equação de difusão.....	58
2.2.4 Modelo de difusão de calor.....	61
2.2.5 Modelo de difusão mássica.....	64
2.2.6 Condições de contorno.....	65
2.3 Soluções para a equação de difusão.....	67
2.3.1 Estudos analíticos e numéricos para equação de difusão.....	69
2.3.1.1 Difusão em corpos esferoidais.....	72
2.4 O método de Galerkin.....	76
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	80
3.1 Metodologia experimental.....	80
3.1.1 Material.....	80
3.1.2 Métodos experimentais.....	81
3.2 Metodologia matemática.....	87
3.2.1 O modelo.....	87
3.2.2 Solução da equação de difusão via método integral baseado em Galerkin.....	88
3.2.3 A geometria do problema.....	94
3.2.4 Funções de base para a geometria elipsoidal.....	97
3.2.5 Modelos de difusão para secagem contínua e intermitente de sólidos elipsoidais prolatos.....	103

3.2.5.1 Modelagem da secagem contínua.....	105
3.2.5.2 Modelagem da secagem intermitente.....	112
3.3 Metodologia computacional.....	116
3.3.1 O programa computacional.....	116
3.3.2 Estimativa dos coeficientes de transporte.....	118
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>120</b>
4.1 Experimentais.....	120
4.1.1 Cinéticas de secagem contínua e intermitente.....	120
4.1.2 Cinética de aquecimento.....	128
4.1.3 Variações dimensionais.....	131
4.2 Teóricos.....	132
4.2.1 Estudo de convergência da solução.....	132
4.2.2 Validação dos modelos.....	134
4.2.3 Testes de simulação de secagem contínua e intermitente.....	139
4.2.3.1 Simulação de casos gerais para elipsoides prolatos.....	139
4.2.3.1.1 Utilizando condição de contorno de primeira espécie.....	139
4.2.3.1.2 Utilizando condição de contorno de terceira espécie.....	156
4.3 Aplicação à secagem de grãos de arroz em casca.....	172
4.3.1 Utilizando condição de contorno de primeira espécie.....	172
4.3.1.1 Cinética de secagem excluindo o período de têmpera.....	172
4.3.1.2 Cinética de secagem incluindo o período de têmpera.....	177
4.3.1.3 Simulação da distribuição de umidade no interior do grão de arroz.....	194
4.3.2 Utilizando condição de contorno de terceira espécie.....	212
4.3.2.1 Cinética de secagem incluindo o período de têmpera.....	212
4.3.2.2 Simulação da distribuição de umidade no interior do grão de arroz.....	221
4.3.2.3 Cinética de aquecimento e distribuição de temperatura.....	232
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	<b>241</b>
5.1 Conclusões.....	241
5.2 Sugestões para futuros trabalhos.....	243
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>245</b>

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

Desde a antiguidade, a desidratação era usada na conservação de alimentos bem como a secagem de cereais pela ação do sol e do vento. As técnicas dos processos foram repassadas de geração para geração através dos conhecimentos adquiridos com os antepassados, e melhoradas gradativamente. Operações de desidratação ou secagem são importantes processos nas indústrias químicas e de alimentos, como também no armazenamento de grãos e outros produtos biológicos (FIOREZE, 2003).

Produtos agrícolas, tais como frutas, vegetais e grãos de cereais, têm atualmente levado um grande número de pesquisadores a realizarem estudos nos vastos campos da pesquisa de controle, secagem e armazenamento, com o objetivo de preservar a safra e conseqüentemente abastecer o mercado consumidor. Neste sentido, é comum deparar-se com problemas de transferência de calor e massa (umidade) em meios granulares. Dentre esses problemas, destaca-se o da secagem de grãos de arroz.

Arroz é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo, caracterizando-se como principal alimento de mais da metade da população mundial (CONAB, 2016). O teor de umidade é um dos fatores mais importantes que influenciam a qualidade do grão de arroz durante a armazenagem e, portanto, deve ser reduzido aplicando-se um processo de secagem adequado. Durante a secagem dos grãos ocorrem variações nas suas características físicas, químicas e biológicas, que, dependendo da intensidade do efeito, causam perda ou inutilidade para uma determinada função (alimentícia ou germinativa). Desta forma, é importante o

conhecimento dos efeitos da secagem sobre as propriedades químicas e biológicas do produto, uma vez que afetam os fenômenos de transferência de calor e massa (BROOKER et al., 1992; MILMAN, 2002).

A secagem é um processo de elevado consumo energético e consome cerca de 20 a 25% de energia utilizada pela indústria de processamento de alimentos. A eficiência energética do processo e a qualidade do produto pós-secagem são dois fatores primordiais na secagem de alimentos. Em uma indústria que utiliza intenso processo de secagem, a melhora na eficiência energética de um 1% pode resultar em até 10% de aumento no lucro (BEEDIE, 1995). A crise energética global e a procura pela qualidade dos produtos secos têm desafiado pesquisadores a explorar técnicas inovadoras de secagem de alimentos para abordar essas questões.

Dentro deste contexto ressalta-se que, com o aumento do tempo de secagem, a velocidade de secagem decresce e tem pouco efeito sobre a remoção de umidade. Assim, os métodos para melhorar o aproveitamento de energia no processo de secagem durante este período são muito importantes e devem ser estudados. Segundo Chou et al. (2000), há uma necessidade de identificar, se possível, secagem contínua ou com condições de funcionamento variável que produzam produtos de alta qualidade, bem como para reduzir o consumo de energia por unidade de água removida. Uma das principais preocupações da indústria, para além da qualidade do produto, é o tempo de processamento. Qualquer programa de secagem que pode reduzir o tempo para obter o teor de umidade desejado, reduziria custo operacional devido ao consumo de energia, aumentaria o rendimento do produto e minimizaria a degradação da qualidade devido ao maior tempo de residência no secador. Neste sentido, uma escolha adequada entre as várias técnicas de secagem existentes é altamente desejável.

Secagem intermitente é considerada uma das soluções promissoras para melhorar a eficiência energética e qualidade do produto, sem aumento do custo da secagem (KUMAR et al., 2014). Esta técnica consiste em alternar períodos de secagem contínua com períodos de repouso ou relaxamento com o objetivo de minimizar gradientes térmico e hídrico no interior do material, consequentemente reduzindo possíveis danos estruturais (trincas, deformações, etc.).

A análise do processo de secagem passa pela realização de experimentos e pelo desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de prever a evolução da temperatura e da umidade, tanto do ar que envolve o meio granular, como dos próprios grãos. Dentre os diferentes modelos matemáticos reportados na literatura que têm sido utilizados para prever a taxa de secagem de produtos agrícolas citam-se os de difusão Fickiana e correlações empíricas

ou semi-empíricas. A modelagem matemática proporciona a predição, durante o processo de secagem, das temperaturas do ar e do material poroso, das trocas de calor e massa entre esse material e o ar, bem como dos teores de umidade no interior do produto e umidade do ar em todo o secador, fornecendo subsídios para seu controle. Este controle é necessário para proporcionar condições ótimas ao processo, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia. Tais necessidades associadas aos elevados custos da construção de protótipos baseados em modelos teóricos, têm aumentado a importância do desenvolvimento de pesquisas de modelos matemáticos otimizados, com simulações de secagem a partir de dados experimentais.

No estudo da secagem intermitente, o modelo de difusão líquida em sua maioria é aplicado de forma simplificada (unidimensional) a corpos com geometrias bem conhecidas (cilindros e esferas), negligenciando o período de têmpera. Dentre os métodos reportados na literatura para obter solução da equação de difusão, o método integral baseado em Galerkin (método GBI) tem sido usado para obter solução analítica da equação de difusão para geometrias arbitrárias. No entanto, ainda são escassos os trabalhos com geometrias mais complexas e, principalmente, modelos que incorporam o período de têmpera na cinética de secagem intermitente.

Desde que o grão de arroz tem um formato aproximadamente elipsoidal e que é difícil medir, experimentalmente, a distribuição de umidade e temperatura no interior do produto, os modelos desenvolvidos neste trabalho envolvem a geometria elipsoidal e fornecem a distribuição de umidade e temperatura durante o período de têmpera, e seus efeitos sobre a cinética de secagem pós-têmpera. Além disso, o método integral baseado em Galerkin (método GBI) foi utilizado para obter solução dos modelos e constitui um diferencial das pesquisas reportadas na literatura.

Diante da escassez de pesquisas que abrangem secagem contínua e intermitente de sólidos com geometria elipsoidal, este trabalho vem contribuir com o desenvolvimento de novos modelos e procedimentos matemáticos para solução das equações que o compõe. Os modelos desenvolvidos, além de incluir o período de têmpera na cinética de secagem intermitente, permitem incluir as distribuições de umidade e temperatura. Um modelo que considere a condução de calor e determine o campo de temperatura transiente no interior do sólido é de extrema importância. Desta forma, pretende-se melhorar a compreensão do mecanismo e estabelecer estratégias para o controle do processo de secagem intermitente.



## 1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho, teórico e experimental, é desenvolver ferramentas analíticas para descrever processos de secagem contínua e intermitente de sólidos com geometria elipsoidal, baseadas na teoria de difusão líquida, via método integral baseado em Galerkin (método GBI), com particular referência aos grãos de arroz.

## 1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver modelos matemáticos para descrever processos de difusão transiente na secagem contínua e intermitente de sólidos com geometria elipsoidal;
- Apresentar solução analítica para os modelos desenvolvidos utilizando-se o método integral baseado em Galerkin (método GBI);
- Desenvolver um código computacional na plataforma Mathematica® 7.0. para simular o processo de secagem proposto;
- Simular a distribuição do teor de umidade no interior de sólidos elipsoidais e suas respectivas cinéticas de difusão;
- Analisar o efeito de temperatura e a influência da razão de aspecto na cinética de secagem contínua e intermitente de sólidos elipsoidais;
- Realizar experimentos relativos à secagem contínua e intermitente de grãos de arroz em casca para várias condições operacionais;
- Aplicar os modelos desenvolvidos no estudo da secagem de grãos de arroz em casca e simular a distribuição do teor de umidade e temperatura no interior do produto;
- Comparar valores obtidos com soluções analíticas com dados experimentais de secagem intermitente de grãos de arroz em casca, e determinar os parâmetros de transporte a partir de processos de otimização para várias condições de secagem;
- Analisar o efeito das considerações adotadas sobre a difusividade efetiva de massa;
- Estudar o efeito do tempo de temperatura e do número de pausas na taxa de secagem.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo, apresenta-se o problema físico de secagem artificial associado aos modelos matemáticos e sintetiza-se trabalhos encontrados na literatura que englobam desde secagem contínua de materiais gerais até os efeitos das relações de intermitência na secagem de grãos de arroz, que é o foco principal deste trabalho. Em seguida, uma revisão bibliográfica que irá recordar alguns dos principais modelos matemáticos utilizados para descrever processos de transferência de calor e massa e o método de Galerkin usado na solução da equação de difusão.

#### **2.1 O processo de secagem**

##### **2.1.1 Características gerais**

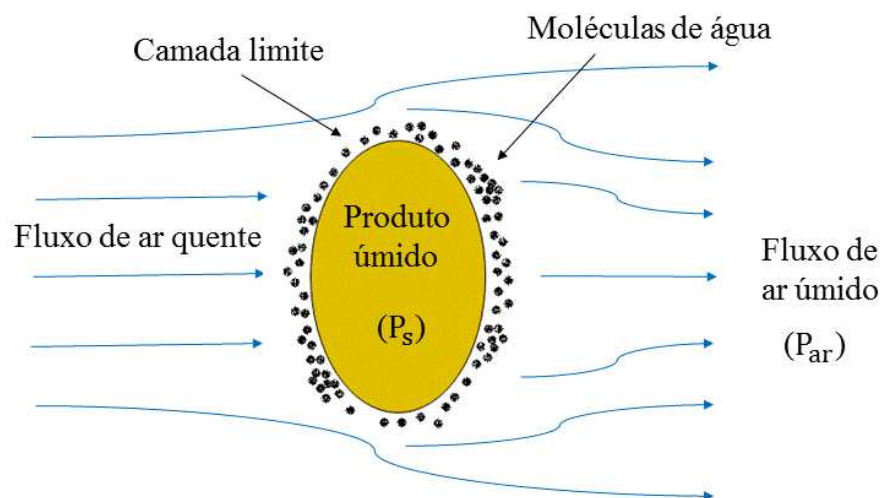
Os grãos de cereais, em particular os grãos de arroz, são formados por uma composição de matéria seca e água (BROOKER et al., 1992). Assim, teor de umidade é a quantidade relativa de água presente no grão. Reduzir o teor de umidade de produtos agrícolas até um nível seguro para armazenamento é uma prática pós-colheita usual (SILVA, 2008).

Como todo material higroscópico, a semente ou grão tem a propriedade de manter um equilíbrio definido entre seu grau de umidade e a umidade relativa do ar do ambiente que o envolve. Do ponto de vista físico e químico, se o teor de umidade ultrapassa um certo limite, a ação solvente da água favorece as reações enzimáticas e os ataques microbianos (MILMAN, 2002). Manter o teor de umidade em níveis baixos diminui a deterioração dos grãos armazenados e impede o desenvolvimento de microrganismos e insetos. Desta forma, os

processos de redução de umidade, tais como, desidratação osmótica e secagem, são de extrema importância na conservação dos grãos. Grãos que passam por processo adequado de secagem podem ser estocados por longos períodos sem comprometer seu valor nutritivo (FIOREZE, 2003).

Secagem é um processo que envolve transferência de calor e massa (umidade) entre um produto higroscópico e o ar de secagem (BROOKER et al., 1992, MILMAN, 2002; FIOREZE, 2003; SILVA, 2008). Quando a distribuição de água no interior do produto não é uniforme, formam-se gradientes de concentração, fazendo com que a água se desloque dos pontos de maior concentração para os de menor concentração. No processo de secagem com ar aquecido, o calor é transferido para o produto e provoca a mudança de fase da água, além do aquecimento da massa do produto. Formam-se, assim, gradientes de pressão de vapor que também são responsáveis pelo deslocamento de água no interior do produto (PETRY, 2007). Na superfície do produto, a retirada da umidade é obtida pela movimentação da água, decorrente de uma diferença de pressão de vapor de água na superfície do produto a ser secado e no ar que o envolve. Ocorrerá secagem do produto se a pressão de vapor de água da superfície ( $P_s$ ) supera a pressão de vapor de água no ar ( $P_{ar}$ ). A Figura 2.1 representa o movimento de água durante a secagem de um grão.

Figura 2.1. Representação do movimento da água durante a secagem



Um produto higroscópico, durante a secagem, apresenta teores de umidade comumente definidos na literatura: teor de umidade inicial, crítico e de equilíbrio. O teor de umidade inicial

é a quantidade de água do produto quando se inicia o processo de secagem. Esta água pode estar fortemente presa à massa seca do produto, sendo difícil de ser removida, ou então na forma de água livre, que pode ser removida com menor ou maior facilidade, dependendo das condições do ambiente no qual o produto é colocado. O teor de umidade crítico se dá quando acontece uma mudança na taxa de secagem, de constante para decrescente. O teor de umidade de equilíbrio é atingido quando o produto úmido está em equilíbrio com o ar de secagem, para um determinado estado termodinâmico do ar. Neste caso, não existe fluxo de umidade entre eles. Isto não significa que a umidade do produto e a do ar são iguais, mas sim que as pressões de vapor na superfície do produto e no ar são iguais. Quando este estado de equilíbrio é atingido, o teor de umidade no interior do produto passa a ser praticamente uniforme (CARMO, 2004; FIOREZE, 2003; SILVA, 2008).

O teor de umidade (M) de um produto pode ser calculado de duas formas:

- Teor de umidade em base seca (b.s):  $M = m_a/m_s$  .
- Teor de umidade em base úmida (b.u):  $M = m_a/m$ .

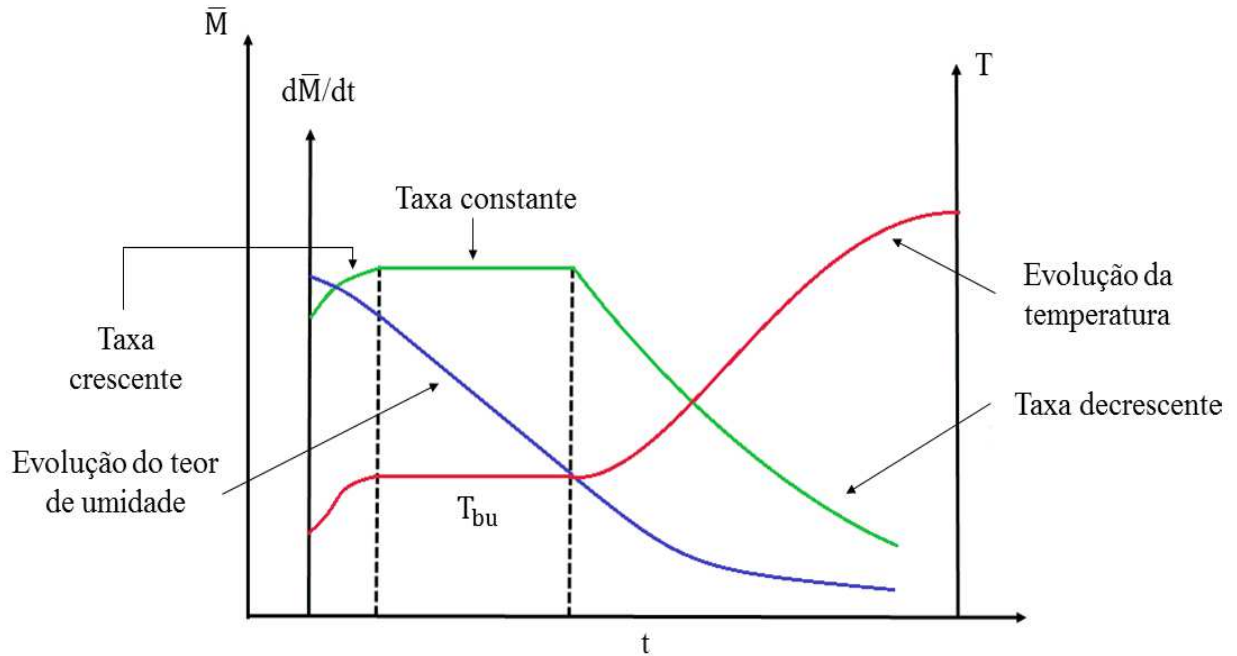
onde  $m_a$  é a massa de água contida no produto,  $m_s$  é a massa do produto seco e  $m = m_a + m_s$  é a massa total do produto úmido.

Pode-se descrever o processo de secagem em três etapas clássicas apresentadas na Figura 2.2. No início da secagem ocorre elevação da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Neste instante, a taxa de secagem é crescente, devido à umidade relativa do ar na camada limite ser menor que 100%, acontecendo o que se costuma chamar de acomodação (REEDS, 1991). Tais elevações prosseguem até o ponto onde acontece equivalência entre transferência de calor e massa (umidade), ou seja, o período de taxa constante. No período de taxa constante, a transferência de massa é influenciada pelas condições externas. No período de taxa decrescente, a transferência de massa é controlada por mecanismos de transporte de umidade internos e externos tais como: movimento de líquido devido às forças superficiais, difusão de umidade na superfície dos poros, diferença de concentração de umidade e movimento de vapor devido à diferença de concentração de umidade e diferença de temperatura. Os mecanismos de transporte são dependentes da relação entre o coeficiente de difusão de massa do sólido e o coeficiente de transferência convectiva de massa na superfície do mesmo (SANTOS, I. 2013).

No início da secagem, o produto encontra-se completamente úmido e a água escoar, na fase líquida, sob um gradiente hidráulico e, em condições naturais, a temperatura do produto se iguala à temperatura de bulbo úmido ( $T_{bu}$ ). No período de taxa constante, a água evaporada é água livre e enquanto houver umidade superficial para acompanhar o processo de evaporação,

a taxa de secagem será constante. A fase de secagem constante pode ser observada na secagem de produtos biológicos com umidade inicial acima de 70% em base úmida (BROOKER et al., 1992; MILMAN, 2002; SILVA, 2008), contudo ressalta-se que este comportamento depende do tipo e natureza do produto submetido a secagem e, portanto, não é regra geral.

Figura 2.2. Curvas típicas de secagem



Fonte: Alonso (2001).

A medida que a secagem prossegue e tenha passado pelo ponto de umidade crítica (a superfície do produto já está seca), o teor de umidade decresce e a água na fase líquida dentro do material faz a ligação entre as partículas sólidas (produto) formando as pontes líquidas. A partir deste ponto inicia-se o período de taxa de secagem decrescente. Neste período, ocorre uma redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto e a transferência de calor não é equivalente à transferência de massa. A temperatura do produto supera a temperatura de bulbo úmido até atingir a temperatura do ar de secagem ou temperatura de bulbo seco. Finalmente, a secagem ocorre no interior do produto e o teor de umidade de equilíbrio é atingido quando a quantidade de água evaporada se iguala à quantidade condensada (REEDS, 1991; BROOKER et al., 1992; SILVA, 2008).

Em geral, o período de taxa constant não é observado em produtos agrícolas, como grãos, pois, ao serem colhidos, este período já ocorreu no campo, estando, portanto, no período de taxa decrescente (FIOREZE, 2003).

A velocidade de secagem de um produto depende, além do sistema de secagem utilizado, das características de secagem do produto individualmente. Em geral, para os grãos pequenos, a velocidade de secagem é maior que para grãos de grandes dimensões, dependendo da relação área/volume do sólido. Outro fenômeno verificado nos produtos agrícolas é a velocidade de absorção de água pelo grão, que é muito mais lenta do que na dessorção (SILVA, 2008).

De uma maneira geral, alguns parâmetros que podem influenciar a taxa de secagem, são:

- Temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem;
- Umidade e temperatura iniciais do produto;
- Tipo e forma de produto a ser seco;
- Fluxo do produto no secador;
- Tipo de secador;
- Técnica de secagem.

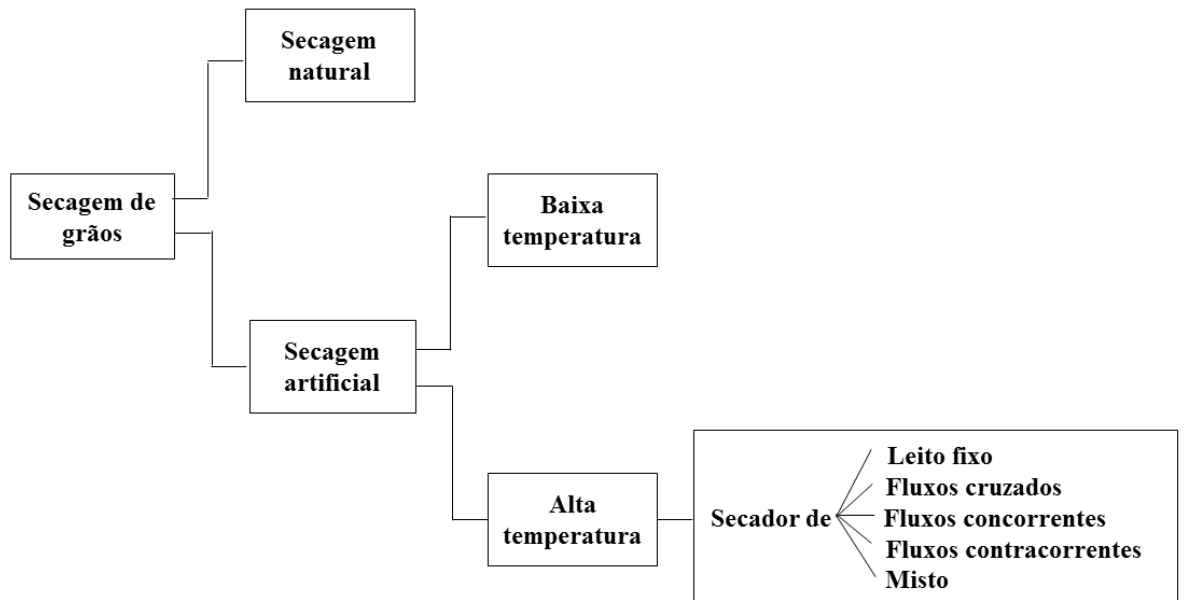
Em geral, a secagem de grãos é feita em camada espessa. No entanto, experimentos de secagem de grãos em camada fina possibilitam obter informações sobre os parâmetros que influenciam a taxa de secagem e permitem a realização de simulações para a previsão do processo de secagem em camada espessa (FIOREZE, 2003; SILVA, 2012).

A secagem pode ser realizada de forma natural ou artificial. Na secagem natural, a movimentação do ar é feita pela ação do vento e a energia para a evaporação de umidade provém do potencial de secagem do ar e da incidência direta da energia solar. Embora, com o passar do tempo, alcance um teor de umidade adequado para armazenagem, o produto fica sujeito ao ataque de pragas além de ocorrer maiores perdas nutricionais do que na secagem sob condições controladas (CELESTINO, 2010). A secagem artificial é caracterizada pela utilização de processos manuais ou mecânicos tanto no manejo do produto como na passagem do ar através do produto. Na secagem com ventilação forçada pode-se empregar baixa ou alta temperatura, secagem combinada, entre outros (BROOKER et al., 1992; PESKE et al., 1996, MILMAN, 2002; FIOREZE, 2003; SILVA, 2008; CELESTINO, 2010). Na Figura 2.3 são apresentados os métodos de secagem e a classificação dos secadores quanto aos fluxos do produto e do ar.

Na secagem artificial, do tipo convectiva, um fluxo de ar, geralmente aquecido, é forçado através de um sistema de ventilação a passar pelo produto e provoca evaporação da água periférica. Este processo gera gradientes de umidade e temperatura no interior do produto.

Através de difusão, a água mais interna se desloca para a periferia e novamente é evaporada pelo ar quente que passa pelo produto, realimentando o processo (BROOKER et al., 1992; MILMAN, 2002; FIOREZE, 2003). Em alguns casos, ocorre a vaporização da água no interior do produto, provocando migração de líquido e vapor para a superfície (LIMA e NEBRA, 2000).

Figura 2.3. Métodos de secagem



Quanto maiores a velocidade e temperatura, e menor a umidade relativa do ar de secagem, maiores serão sua capacidade evaporativa e sua troca de energia, acelerando o processo de secagem. Por outro lado, quando um produto é aquecido (elevação de temperatura) e perde água (teor de água diminui) surge encolhimento do material (principalmente em materiais com alto teor de umidade) e dilatação térmica. Estas deformações geram forças internas no material que por sua vez geram tensões. Se o produto não tem plasticidade ou capacidade elástica para suportar tensões mecânicas, hídricas ou térmicas muito elevadas, ele trinca ou até mesmo quebra, gerando desperdício ou produto de baixo valor agregado (LIMA, 1999; LIMA e NEBRA, 2000; MILMAN, 2002; CARMO, 2004).

A principal vantagem da secagem com ar aquecido é a diminuição no tempo e as desvantagens são o custo de energia necessária para aquecer o ar e o dano que se pode causar ao produto devido à elevação da temperatura e redução do volume, principalmente em materiais sensíveis ao calor.

### 2.1.2 Secadores

O projeto de equipamentos utilizados para realizar a secagem de sólidos requer constantes dados sobre as propriedades físico-químicas das substâncias que compõem o produto. Os sólidos, tais como frutas e grãos são sensíveis a tensões térmicas ou mecânicas e, portanto, necessitam de equipamentos especializados para minimizar os danos e melhorar a qualidade final do produto. Segundo Fioreze (2003), os secadores variam, por exemplo, em função de sua finalidade, tipo de produto a ser seco, capacidade de secagem e tipo de energia para aquecimento.

Quanto à operação, os secadores são classificados de duas formas (BROOKER et al., 1992; MILMAN, 2002; FIOREZE, 2003; SILVA, 2008):

- a) **Secadores contínuos:** Neste tipo de secador, o produto fica constantemente sob a ação do calor, até que seu teor de umidade atinja um valor desejado. Para isso, o produto passa por mecanismo de regulação de fluxo que determinará o tempo de exposição ao ar de secagem, também denominado tempo de residência. Durante a secagem em fluxo contínuo, ocorre uma diferença entre a umidade localizada na superfície e aquela no interior do produto. A superfície que está em contato direto com o ar seca mais rápido do que a parte central.
- b) **Secadores intermitentes:** O produto passa várias vezes pelo interior do secador antes de completar a secagem. Desta forma, o produto sofre a ação do calor durante pequenos intervalos de tempo, intercalados por período de repouso, isto é, o produto não entra em contato com o ar aquecido durante esse período (Figura 2.4).

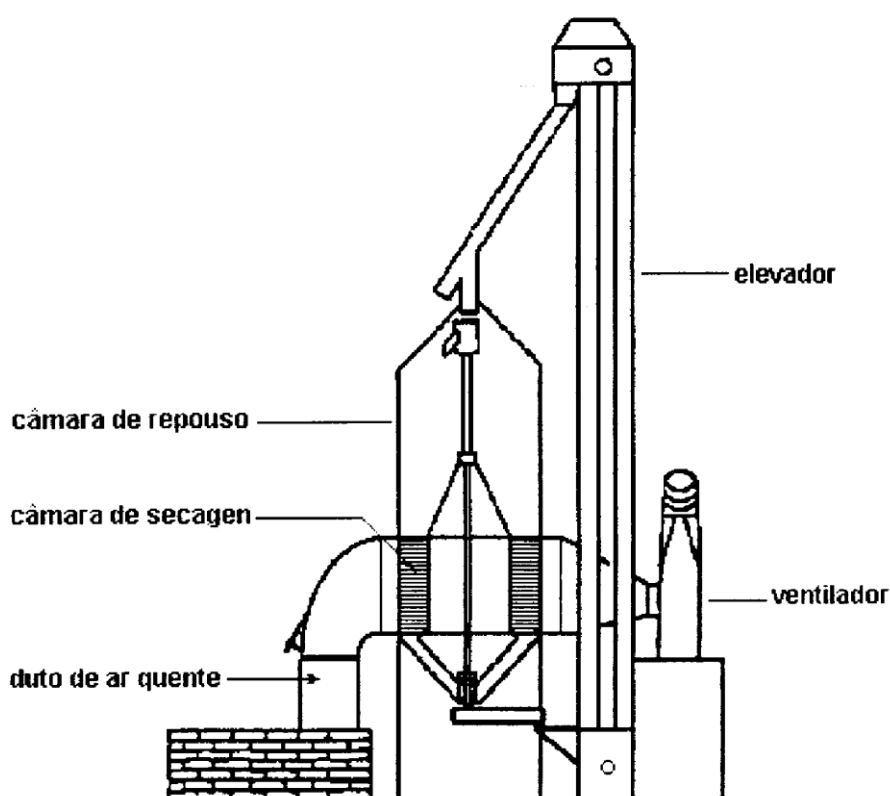
De modo geral, os secadores contínuos não são recomendados na secagem de sementes, porém admite-se essa possibilidade desde que se proceda determinadas modificações, tais como, o aumento do número de passagens do fluxo da massa de sementes através da câmara de secagem. Estas modificações tornam-se necessárias visto que na secagem contínua, a manutenção de temperaturas e fluxos de ar elevados promovem rápida remoção da água das sementes e, como consequência, pode provocar fissuras e afetar negativamente a qualidade fisiológica, particularmente durante o período de armazenamento (KUNZE, 1979; MOTTA et al., 1999; IGUAZ et al., 2006).

Na secagem de sementes de arroz irrigado, normalmente, utiliza-se o método intermitente, por meio de secadores intermitentes ou contínuos, sendo que estes apresentam, no mínimo, duas câmaras, uma de secagem e outra de resfriamento, e são adaptados para operar



dessa forma. Além disso, uma das câmaras de secagem é utilizada como câmara de equalização. Neste método é indicada uma temperatura do ar que atravessa a câmara de secagem, em geral, não superior a 70°C. A adoção de um sistema de secagem contínua, com fluxo de ar aquecido através das duas câmaras do secador e passagem das sementes diversas vezes pelo conjunto secador-elevador, constitui-se numa opção capaz de reduzir custos operacionais, pela possibilidade de diminuir o tempo de secagem e a energia consumida (MOTTA et al., 1999).

Figura 2.4. Secador Intermitente



Fonte: Garcia (2014).

Na câmara de secagem ocorrem as trocas de energia e de massa durante o contato dos grãos com o ar aquecido e, portanto, o ar cede energia térmica aos grãos, se resfria e absorve, na forma de vapor, a água periférica que evapora dos grãos de arroz. Na câmara de equalização, os grãos permanecem em repouso, sem que haja passagem de um fluxo de ar de secagem. O repouso do grão permite que a água mais interna do arroz migre para sua periferia, predominantemente por difusão (MENEGHETTI et al., 2012).

### 2.1.3 A técnica de secagem intermitente

A secagem com ar aquecido (secagem artificial) pode ser realizada de forma contínua ou intermitente. Sendo que, para determinados materiais, muito da resistência ao processo de secagem reside em seu interior, desta forma, manter determinadas condições do ar de secagem aplicadas apenas à superfície do material resulta em altos gradientes na superfície do produto, causando possíveis danos (trincas e deformações) e reduzindo a eficiência do processo. Nestes casos, a secagem intermitente é recomendável. Esta técnica é comumente usada para a secagem de materiais sensíveis ao calor tais como: grãos (arroz, trigo, soja, café, milho), legumes (batata e outros), frutas (banana, manga, goiaba) e vários tipos de ervas (CHUA et al., 2000a; CIHAN e ECE, 2001; FATOUH et al., 2006; AQUERRETA et al., 2007; THOMKAPANICH et al., 2007; BAINI e LANGRISH, 2007; DONG et al., 2010; PUTRANTO et al., 2011a; PUTRANTO et al., 2011b; HOLOWATY et al., 2012; SILVA et al., 2015) e também em produtos não alimentícios como madeira e cerâmica (SALIN, 2003; SMITH e LANGRISH, 2008; RÉMOND e PERRÉ, 2008; HERRITHSCH et al., 2010; KOWALSKI e PAWLOSKI, 2011b).

O grão de arroz é altamente higroscópico e busca o equilíbrio com o ambiente em que se encontra. Assim, após a secagem, esses grãos originalmente mais secos tornam-se mais suscetíveis à reidratação e, pela absorção de umidade diretamente do ar ambiente, contribuem para o aparecimento de grãos trincados. A principal razão para o uso de secagem intermitente é justamente minimizar os efeitos desse diferencial de umidade na massa de grãos. Os períodos de repouso do produto entre as sucessivas etapas de secagem, permitem a homogeneização do teor de umidade favorecendo o atingimento de uma situação de equilíbrio (CASTRO et al., 1999).

Desde que a velocidade de secagem diminui a medida que o produto não contém umidade suficiente a ser removida, aplica-se a secagem intermitente somente no período onde a taxa de secagem é decrescente (CHUA et al., 2003; BAINI e LANGRISH, 2007). Neste período, o uso constante de altas temperaturas do ar provoca degradação da qualidade e danos à superfície do produto. A forma mais usual de secagem intermitente é alternando períodos de secagem com períodos de repouso ou relaxamento (MILMAN, 2002; CARMO, 2004; SILVA, 2008). O produto é submetido à ação do ar aquecido na câmara de secagem à intervalos regulares de tempo. A determinação da duração e do número de pausas (ou de têmpera) no processo de secagem intermitente, têm por objetivo minimizar custos (energia) e obter uma melhor

qualidade final do produto (CHUA et al., 2003; VÁQUIRO et al., 2009; KOWALSKI e PAWŁOWSKI, 2011a).

Segundo Kumar et al. (2014), secagem intermitente também pode ser conseguida controlando o fornecimento de energia térmica, variando a velocidade, temperatura, umidade relativa ou pressão do ar de operação, ou ainda, variando o modo de entrada de energia, por exemplo, convecção, condução, radiação ou microondas. Em geral, a secagem intermitente mais estudada é a conseguida mudando as condições do ar de secagem (CHUA et al., 2000a; CIHAN e ECE, 2001; HO et al., 2002; SILVA et al., 2014).

Chua et al. (2003) apresentaram algumas formas de se aplicar o processo de secagem intermitente:

- a) Secagem intermitente pelo qual o fluxo de calor é fornecido intermitentemente, em vez de continuamente. Isto pode ser feito interrompendo o fluxo de ar ou por um fluxo de ar contínuo aquecido periodicamente.
- b) Através da seca-aeração que é um processo que envolve a combinação de secagem em alta temperatura por curto intervalo de tempo, um tempo de equalização da água no interior do produto (têmpera), resfriamento lento e o final da secagem.
- c) Reversão do ar de secagem, isto é, inverter a direção do fluxo de ar por um período de tempo e, em seguida, retornar para o seu sentido original. Com isto, minimiza os gradientes de umidade e temperatura no interior do material.
- d) Secagem cíclica que é um processo de secagem no qual a temperatura, umidade ou velocidade do ar de secagem sofre uma variação do padrão cíclico especificada como onda senoidal, onda quadrada ou padrões de dente de serra.

A técnica de secagem intermitente apresenta vantagens em relação à secagem contínua: a rapidez na secagem e uniformidade do produto são as características mais relevantes. A quantidade de água removida por unidade de tempo de secagem é consideravelmente maior na secagem intermitente quando comparada à secagem puramente contínua (NISHIYAMA et al., 2006; DONG et al., 2009; CARMO et al., 2012). Em razão da intermitência, é possível o emprego de temperaturas do ar aquecido que alcançam até 70 a 80°C, sem, no entanto, ocasionar excessivo aquecimento das sementes que, em geral, não atingem temperaturas acima de 40 a 43°C na secagem puramente contínua (JUMAH et al., 2007; GARCIA, 2014). É possível controlar a entrada de calor de tal modo que a temperatura da superfície do produto não exceda um valor pré-determinado para além da qual pode ocorrer lesão térmica do material.

Este processo resulta na redução da utilização de energia térmica, bem como da massa de ar utilizado na secagem convectiva (CHUA et al., 2003).

### **2.1.3.1 Estudos sobre secagem intermitente**

Evidências experimentais dos benefícios potenciais de variação intermitente da temperatura sobre a qualidade do produto e economia de energia têm sido demonstradas em vários estudos (CHUA et al., 2000b; SHEI e CHEN, 2002; NISHIYAMA et al., 2006; KOWALSKI e PAWLOWSKI, 2011b; PUTRANTO et al., 2011b; HOLOWATY et al., 2012; MABROUK et al., 2012; SILVA et al., 2014).

Pan et al. (1998) estudaram o efeito da secagem intermitente de fatias de abóbora na degradação de beta-caroteno. O estudo mostrou que 87,2% de betacaroteno é preservada na secagem intermitente e apenas 61,5% de betacaroteno foi preservado na secagem contínua convencional. Os autores também observaram que a capacidade de reidratação do produto submetido à secagem intermitente é maior quando comparada à secagem contínua.

A combinação de secagem por convecção com a aplicação intermitente de ultra-som, infravermelho e microondas tem sido investigado por alguns pesquisadores (ZHU et al., 2010; SCHÖSSLER et al., 2012; BOTHA et al., 2012). Botha et al. (2012) relataram que a utilização de potência de microondas variável combinada com baixas temperaturas do ar pode resultar em um processo de secagem rápido, sem significativa carbonização de pedaços de abacaxi.

Chua et al. (2000b) demonstraram que a temperatura do ar de secagem empregado de forma intermitente poderia reduzir a alteração de cor geral de amostras de batata, goiaba e banana por 87, 75 e 67%, respectivamente. Batata foi menos suscetível a mudança de cor, devido ao seu baixo teor de açúcar e alto teor de umidade.

Cihan e Ece (2001) analisaram o efeito do tempo de têmpera sobre a cinética de secagem do arroz utilizando-se o modelo de difusão líquida baseado na geometria do tipo cilindro finito. Os dados experimentais foram obtidos aplicando-se períodos de têmpera de 0, 30 e 60 min. As curvas de secagem intermitente foram plotadas usando tempo de secagem acumulado ou decorrido excluindo o tempo de têmpera, que pode ser interpretado de forma equivalente à secagem contínua com maior coeficiente de difusão. Através da diferença quadrática do erro entre os pontos experimentais e os simulados, valores da difusividade de massa foram determinados. Os autores concluíram que o tempo de têmpera afeta consideravelmente a cinética de secagem de grãos de arroz em casca. Taxas de secagem mais elevadas foram obtidas

e o tempo total de secagem é reduzido com longos períodos de têmpera. Quanto maior o tempo de têmpera maior coeficiente de difusão é obtido.

Shei e Chen (2002) realizaram experimentos envolvendo diferentes parâmetros de secagem para similar secadores de arroz de recirculação que operam de forma descontínua e são usados extensivamente nos países asiáticos. Inicialmente, o grão passa na zona de secagem do secador durante cerca de 5 a 15 min. Em seguida passa pela zona de têmpera por cerca de 40 a 120 min. Menos de 2% (b.s.) de umidade é removida a partir do produto após cada passagem. A operação de secagem inteira pode durar 20 h para cada lote de seis toneladas de arroz. As diferentes condições de secagem testadas são combinações de quatro parâmetros: temperatura e umidade absoluta do ar de secagem, duração de secagem e do período de têmpera. Foi possível concluir que, sob a mesma duração do período de secagem, uma duração do período de têmpera mais curto resultou numa taxa média de secagem mais elevada de todo o lote e promoveu uma melhor eficiência de tempo. No entanto, isso resultou em taxas mais baixas de secagem na zona de secagem, e reduziu a eficiência energética. Na gama de 5 a 15 minutos, sob a mesma duração do período de têmpera, a duração do período de secagem mais curto foi a melhor escolha para aumentar a velocidade de secagem na zona de secagem, mas reduziu a taxa média de secagem de todo o lote. O efeito da duração do período de têmpera foi insignificante para a taxa de secagem na zona de secagem com a umidade ou a temperatura do ar de secagem aumentada. Observou-se também que um maior teor de umidade inicial resultou em taxas de secagem mais elevadas.

Nishiyama et al. (2006) realizaram experimentos de secagem intermitente de trigo (Tohoku 206) e grão de arroz em casca longo (L201) e curto (Akitakomachi). As amostras de trigo e arroz em casca foram secas à 40°C e 60% de umidade relativa do ar. Após 1 h de secagem contínua, as amostras foram colocadas em sacos hermeticamente fechados e submetidas às temperaturas de têmpera de 30, 40 e 50°C durante 1 h, respectivamente numa câmara de temperatura constante (Advantec incubator, Model CI-410, Toyo Seisakusho Co. Ltd., Japan). Para cada combinação de secagem e têmpera, foram realizadas duas repetições. Foi desenvolvido um modelo de difusão simplificado envolvendo geometria esférica para descrever secagem contínua e intermitente. Para obter as curvas de secagem intermitente, incluindo o período de têmpera, o coeficiente de transferência de massa foi considerado de duas formas: durante o período de têmpera assumiram que não houve transferência de massa, isto é,  $h = 0$ ; já nos períodos de secagem, considerou-se o coeficiente de transferência de massa como equivalente ao valor obtido a partir da secagem contínua na temperatura correspondente. A

velocidade de secagem foi melhorada após a têmpera, mostrando a vantagem da redistribuição de umidade. A migração de umidade do centro para a superfície do grão de arroz longo foi mais rápida em comparação com o arroz de grão curto. Além disso, observou-se que os grãos de arroz longo têm área de superfície mais elevadas do que os grãos de arroz curto. Como resultado, a taxa de secagem do grão de arroz em casca longo é maior do que para grãos de arroz curtos. Os autores também concluíram que a temperatura de têmpera tem uma influência significativa sobre a umidade na superfície do grão: quanto mais elevada for a temperatura de têmpera, maior será o teor de umidade na superfície, para períodos de têmpera de 1 h.

Iguaz et al. (2006) estudaram o efeito da secagem e tratamentos de têmpera em arroz. As amostras foram secas sob três condições do ar de secagem e diferentes períodos de têmpera foram introduzidos durante ou no final do processo de secagem. Os resultados mostraram que a proporção de grãos fissurados aumenta a medida que a temperatura e a capacidade de evaporação do ar aumentam. Durante ou no final do processo, verificou-se que o período de têmpera, melhorou a qualidade final do arroz, diminuindo o número de grãos fissurados.

CIHAN et al. (2007) estudaram vários modelos empíricos e semi-empíricos para descrever as características da secagem intermitente de arroz em casca em camada fina. Os valores experimentais de secagem de arroz em casca foram obtidos com temperatura e velocidade do ar de secagem de 40°C e 1,5 ms<sup>-1</sup>, respectivamente. Os períodos de têmpera considerados variam de 0 a 1 h. As curvas de secagem foram plotadas eliminando-se o período de têmpera e os resultados mostraram que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Os parâmetros do modelo de Midilli foram determinados como uma função polinomial do tempo de têmpera.

Aquerreta et al. (2007) estudaram o efeito do número de ciclos de secagem associados a diferentes tratamentos de têmpera sobre fissuras de arroz em casca para teores de umidade inicial e final normalmente encontrados na indústria de processamento de arroz. A secagem foi realizada a 60°C com um, dois e três passos de secagem e estas experiências foram combinadas com um período de têmpera à temperatura ambiente, intermediária e alta temperatura. Os resultados mostraram que a têmpera pós-secagem com alta temperatura (60°C) resultou em maior absorção de umidade e que redução do tempo de secagem de até 38% podem ser obtidos. A percentagem de grãos fissurados foi bastante reduzida quando a secagem foi realizada em dois ou três passos em comparação com a secagem com um passo de têmpera. Os autores concluíram que têmpera em alta temperatura diminuiu a percentagem de grãos fissurados, independentemente do número de passos de secagem.

Cihan et al. (2008) simularam a secagem intermitente de arroz em casca em camada fina com um teor de umidade entre 22 e 24% (b.s.) por meio do modelo de difusão líquida, utilizando uma geometria esferoidal prolata. No modelo matemático, admitiu-se que o coeficiente de difusão é independente do teor de umidade a uma dada temperatura. Foi assumido que a concentração de umidade na superfície do grão de arroz alcançou seu valor de equilíbrio instantaneamente no início do processo de secagem, e que este equilíbrio não se alterou com o tempo. Além disso, foi considerado que os grãos de arroz permanecem isotérmicos e não encolhem durante a secagem. A solução da equação de difusão foi ajustada aos dados experimentais para a secagem com temperatura do ar de 40°C, velocidade do ar de secagem de 1,5 m/s e períodos de têmpera (ou de equalização da água) que variam de 0 a 1 h. Para fins de comparação, a solução da equação de difusão para a geometria de um cilindro finito também foi ajustada aos dados experimentais. Os resultados mostraram que o modelo de difusão líquida baseado na geometria esferoidal prolata descreve o comportamento da secagem do arroz em casca com mais precisão. Os autores também concluíram que as maiores variações ocorrem no coeficiente de difusão com o aumento do tempo de têmpera para a geometria esferoidal prolata, que é a geometria mais realista para grãos de arroz.

Dong et al. (2009) estudaram a distribuição de umidade em grãos de arroz durante a secagem intermitente. Experimentos de secagem intermitente de grãos de arroz em casca longo (L201) e curto (Akitakomachi) foram realizados a temperatura de 40 e 50°C e as distribuições do teor de umidade foram estimadas por um modelo de difusão simplificado, considerando o grão como uma esfera. Após um período de secagem contínua, as amostras foram colocadas em sacos hermeticamente fechados e submetidas às temperaturas de têmpera de 30, 40 e 50°C, durante diferentes períodos, numa câmara de temperatura constante. Os resultados mostraram que o modelo é capaz de simular com precisão o processo de secagem com períodos de têmpera. Segundo os autores, o teor de umidade nas camadas internas do núcleo sempre diminui durante todo o processo de secagem, enquanto que nas camadas exteriores diminui durante os períodos de secagem e aumenta durante os períodos de têmpera. Gradientes de umidade diminuem consideravelmente na fase inicial do período de têmpera e tendem a diminuir lentamente em direção a zero. Após um período de secagem de 60 min a temperatura de 50°C, uma têmpera adiabática a 50°C de 60 min removeu cerca de 50% dos gradientes de umidade e uma têmpera de 120 min a 50°C foi capaz de remover cerca de 80% dos gradientes de umidade. Todos os gradientes de umidade foram eliminados após cerca de 240 min de têmpera para as três temperaturas de têmpera testadas (30, 40 e 50°C).

Kowalski e Pawlowski (2011b) analisaram a secagem intermitente de amostras de madeira e argila em forma cilíndrica. Os autores concluíram que a secagem intermitente pode ser recomendada, principalmente para a secagem de materiais que têm uma tendência para fissuração durante a secagem, como, por exemplo, cerâmica e madeira. Através de mudanças nas condições de secagem em momentos certos pode-se evitar a fratura de material e, assim, preservar uma boa qualidade dos produtos secos. Os autores afirmaram que a secagem intermitente influencia positivamente na qualidade dos materiais secos sem prolongamento significativo do tempo de secagem. A melhor qualidade das amostras testadas foi alcançada no processo mais consumidor de energia, isto é, durante a secagem intermitente com a umidade relativa do ar variável. A secagem intermitente, com temperatura do ar variável proporciona melhor qualidade do produto quando comparada com a secagem em condições estacionárias, em tempos de secagem semelhantes, com menor consumo de energia em todos os processos testados. A melhor qualidade do produto obtido na secagem intermitente com a umidade do ar variável e o menor consumo de energia na secagem intermitente com temperatura do ar variável sugere a combinação vantajosa de ambas as técnicas para otimizar o processo de secagem, no que diz respeito ao consumo de energia e a qualidade dos produtos secos. Portanto, a combinação dessas técnicas, em geral, aumenta a eficácia do processo de secagem.

Putranto et al. (2011a) implementaram um novo procedimento matemático denominado Abordagem de Engenharia de Reação (REA) para modelar a secagem intermitente de sólidos porosos variando tempo de secagem, temperatura e umidade relativa do ar. Vários modelos foram propostos para modelar a secagem de café e arroz. Os resultados indicam que os modelos REA descrevem bem a cinética de secagem de café e arroz. Os autores concluíram que a REA pode ser aplicada em vários sistemas de secagem e prontamente adotada em indústrias como abordagem simples e precisa para melhorar projetos de secador, realizar avaliação do desempenho do secador, a previsão da qualidade do produto e avaliação do consumo de energia do processo de secagem.

Holowaty et al. (2012) estudaram economia de energia durante a secagem de ramos de erva-mate quando um ou dois períodos de têmpera de 15 min foram aplicados. O modelo empírico de Page foi utilizado para descrever a variação de umidade com o tempo durante a secagem, aplicando-se diferentes condições de operação. O comportamento de um secador industrial foi simulado, variando a altura do leito e a velocidade da correia a fim de manter constante a produção do secador. Os resultados mostraram que a secagem com um ou dois períodos de têmpera pode economizar 15 e 30 min, respectivamente, para atingir o mesmo teor



de umidade. Os melhores resultados foram obtidos trabalhando nas seguintes condições: inicialmente aplicação contínua de calor durante 15 min, seguido de 15 min de têmpera, e depois aplica o contínua de calor até o final do processo de secagem; a altura do leito (1 m) foi reduzida em 10% mantendo a produ o do secador. Trabalhando com estas condi es foi observado cerca de 10% de economia no consumo de energia.

Mabrouk et al. (2012) estudaram secagem convectiva e intermitente em camada fina de fatias de maça verde. O conjunto de equipamentos para realiza o dos experimentos consiste de um ventilador, aquecedores, túnel, lâmpadas halógenas e instrumentos para a medi o. Os experimentos de secagem intermitente foram realizados com temperaturas do ar de 40, 50 e 60 C, velocidade do ar de 1,0 ms<sup>-1</sup> e 2,0 ms<sup>-1</sup> e radia o incidente de 500 Wm<sup>-2</sup>. Os testes foram realizados com uma ou duas paradas do processo de aquecimento para vários tempos de têmpera: 60 min, 30 min, 20 min e 10 min. A retomada do aquecimento ocorreu com mesma ou diferentes temperaturas do ar. Os autores concluíram que a secagem convectiva e a secagem intermitente apresentam um ganho energético. Um significativo ganho de tempo e de energia é conseguido por um aumento da temperatura do ar e uma redu o da velocidade do ar. Também concluíram que uma fonte irradiante intermitente possibilita reduzir o tempo de secagem de fatias de maça.

Meneghetti et al. (2012) ajustaram modelos matemáticos empíricos aos valores experimentais do teor de água obtidos na secagem de gr os de arroz. Os efeitos das rela es de intermitência sobre a eficiência da opera o foram estudados. Utilizaram-se grãos de arroz em casca produzidos na Região Sul do Rio Grande do Sul. As amostras com teor de água próximo a 20% b.u. foram secas em secador de fluxos cruzados sob três condi es de rela o de intermitência entre a câmara de secagem e a de equaliza o: 1:1, 1:2 e 1:4. A rela o de intermitência 1:1 indica que o tempo de equaliza o foi o mesmo tempo de secagem, enquanto que na rela o 1:2 o tempo de equaliza o foi o dobro do tempo de secagem e na rela o 1:4 o tempo de equaliza o foi quatro vezes o tempo de secagem. Em todos os tratamentos de secagem foi mantido o mesmo manejo de temperatura do ar, sendo crescente: 70, 90, 110 ± 5  C, respectivamente, na 1<sup>a</sup> e na 2<sup>a</sup>, e da 3<sup>a</sup> até a penúltima hora, havendo redu o gradual da temperatura do ar, na última hora de opera o. Foram realizadas análises de regressão não-linear pelo método Simplex e Quasi-Newton, cujos valores são os parâmetros dos modelos estimados em fun o da temperatura do ar de secagem. Observou-se que a rela o de intermitência altera o tempo de opera o e a taxa horária de secagem dos gr os de arroz, de maneira que, com a diminui o da rela o de intermitência, é evidenciado o aumento da taxa

de secagem. A partir dos indicadores estatísticos, os autores concluíram que o modelo de Midilli foi o que melhor representou a secagem intermitente do arroz em casca.

Yang et al. (2013) realizaram um estudo de simulação comparativa em diferentes secagens com bomba de calor intermitentes no que diz respeito à difusão de umidade, o consumo de energia e tempo de secagem de sementes de couve chinesa. A razão de intermitência foi definida como sendo  $\alpha = \tau_{on}/(\tau_{on} + \tau_{of})$ , onde  $\tau_{on}$  é o tempo de secagem em segundos e  $\tau_{of}$  é o tempo de têmpera ou tempo de repouso em segundos. Três relações de intermitência foram investigadas: 1/3, 1/2 e 2/3. Os parâmetros experimentais de secagem do produto com teor de umidade inicial de 30% (b.s.) foram: temperatura do ar de 40 C, umidade relativa de 40%, velocidade do ar de 1ms<sup>-1</sup> e tempo de secagem com intervalo de 0 a 1200s para um ciclo. A melhor relação de intermitência foi de 1/3, que corresponde a 400s de ventilação contínua e 800s de interrupção, para um ciclo. Nestas condições, a economia de energia foi de 48,1% em relação à secagem contínua.

Em Silva et al. (2014) dados experimentais de secagem contínua e descontínua de p ra foram analisados. A solução da equação de difusão em coordenadas esféricas assumindo uma condição de contorno convectiva foi ajustada aos dados experimentais, permitindo a determinação do coeficiente de difusão efetivo e do coeficiente de transferência de massa sobre a superfície do produto. Observou-se uma boa concordância entre o modelo considerado e os dados experimentais. Como consequência, também é demonstrado que a adoção de uma condição de evaporação na superfície é fisicamente mais consistente do que a hipótese de condição de equilíbrio aplicada   superfície em qualquer instante, que muitas vezes   adotada em trabalhos sobre cinética de secagem de produtos biológicos. A solução da equação de difusão também foi utilizada para modelar o procedimento de secagem descontínua e verificou-se que   possível desenvolver uma estratégia de economia de energia neste tipo de processo. Na secagem intermitente, o fluxo de ar quente foi desligado durante dois períodos noturnos por 13,5 horas, com velocidade e temperatura do ar de 1,2 ms<sup>-1</sup> e 40 C, respectivamente.   possível concluir que, a duração total das pausas (durante as quais a instalação de secagem foi desligado, e, conseqüentemente, nenhuma energia foi gasta), foi cerca de 50% do tempo total de realização do experimento. Este resultado serviu para estabelecer uma estratégia de economia de energia. Em particular, verificou-se que um aumento do número de pausas pode levar a economias significativas de energia, isto é, a economia de energia é uma função crescente do número de pausas. Para tr s pausas, a economia de energia foi de 11% .

Kumar et al. (2014) analisaram os recentes avanços na secagem intermitente de alimentos. Os autores concluíram que: secagem intermitente é um método eficaz para melhorar a cinética de secagem, melhorando a qualidade do produto e reduzindo o consumo de energia por unidade de massa de umidade removida. Uma vez que é difícil medir experimentalmente a distribuição de umidade e temperatura de alimentos, o entendimento sobre secagem intermitente pode não ser suficiente. Existe ainda falta de compreensão sobre a evolução da temperatura e da umidade durante todo o processo de secagem intermitente. Modelagem adequada e investigação intensiva são necessárias para uma melhor compreensão do processo. Os autores também observaram que aplicação intermitente de energia com microondas é uma alternativa atraente, o que pode reduzir significativamente o tempo de secagem total e melhorar a qualidade do produto. Destacam ainda que novos estudos experimentais e teóricos são necessários para estabelecer uma melhor estratégia de aplicação desse método para uma melhor eficiência energética e qualidade do produto.

Lima et al. (2015) estudaram teoricamente secagem intermitente de sólidos esferoidais prolatos. A equação de difusão escrita em coordenadas esferoidais prolatas foi resolvida numericamente pelo método dos volumes finitos considerando-se coeficiente de transporte constante e condição de contorno convectiva. Foi assumido que não ocorre transferência de massa durante o período de têmpera e a distribuição de temperatura foi negligenciada. Em todos os casos estudados, a taxa de secagem após a têmpera foi maior em comparação com a secagem contínua. A taxa de secagem de esferoides prolatos em processos com dois períodos de têmpera foi maior do que os outros casos estudados. Verificou-se que, tanto, o instante em que o período de têmpera foi iniciado e a duração da pausa podem afetar a velocidade de secagem do produto após a têmpera.

Silva et al. (2015) realizaram experimentos de secagem contínua e intermitente de bananas inteiras, usando ar quente. Três processos intermitentes foram realizados com a mesma relação de intermitência (1/2), com tempos de intermitência de 0,5, 1 e 2 h. O teor de umidade adimensional como uma função do tempo foi descrito por modelos empíricos e de difusão. O modelo de Peleg permitiu observar que oito horas de secagem contínua foram equivalentes a quatro horas de processo descontínuo com quatro períodos de têmpera de 1 h. Além disso, derivando a equação de Peleg foi possível determinar a taxa de secagem para cada experimento e concluir que o processo descontínuo aumenta o valor desta taxa. O modelo de difusão com condição de contorno do terceiro tipo descreve bem os processos de secagem e tornou possível perceber que na transferência de massa o número de Biot foi reduzido de 11,5 (contínua) a 0,6

(1 h de intermitência), indicando que no caso de secagem descontínua o produto é submetido a tensões menores.

Rodrigues (2015) realizou um estudo comparativo entre o uso de secagem contínua e secagem intermitente de bananas e apresentou a viabilidade de aplicação de solução analítica e numérica da equação de difusão para descrever os processos de secagem. Os experimentos foram realizados utilizando um secador convectivo a uma temperatura de 70°C envolvendo secagem contínua e secagem intermitente com períodos de têmpera de 0,5h, 1 h e 2 h. Foi desenvolvido um software para descrever o processo, incluindo o período de têmpera na secagem intermitente, considerando o encolhimento e a difusividade de massa em função do teor de umidade local. A solução numérica da equação de difusão usando o método dos volumes finitos é apresentada para a geometria cilíndrica e condição de contorno de terceira espécie. Na modelagem da secagem intermitente, foi considerada a perda de massa durante o período de têmpera e o coeficiente de transferência de massa convectivo assume dois valores: um quando o produto está dentro do secador ( $h_{in}$ ), e outro quando está fora do secador, mas dentro de um dessecador ( $h_{out}$ ). Para determinar os parâmetros  $a$  e  $b$  da função  $D = a \exp(bM)$ ,  $h_{in}$  (para os períodos de secagem) e  $h_{out}$  (para os períodos de intermitência) foram determinados por otimização usando-se um conjunto de dados experimentais. De acordo com os indicadores estatísticos, o modelo proposto descreve bem a secagem contínua e intermitente de banana. Além disso, os resultados mostram que, para todas as secagens intermitentes, houve economia de energia quando comparada com a secagem contínua.

#### **2.1.4 Aspectos gerais de consumo, produção e secagem de grãos de arroz**

O arroz é uma cultura extremamente versátil, que se adapta a diferentes condições de solo e clima, sendo considerada a espécie que apresenta maior potencial para o combate à fome no mundo. Este cereal faz parte da alimentação de grande parte da população mundial e é cultivado nos cinco continentes, sendo a Ásia a principal produtora onde concentra-se mais de 80% da produção mundial. O Brasil é o 9º maior produtor mundial e se destaca como o maior produtor fora do continente Asiático, sendo que o Rio Grande do Sul contribui com cerca de 54% da produção nacional (EMBRAPA, 2015).

Segundo a AGEITEC (2015) os padrões de arroz produzido no mundo são definidos basicamente pelo percentual de produto quebrado, sendo o mercado de arroz de alto padrão, com menos de 10% de grãos quebrados. Nas cotações de preços internacionais somente se

distinguem as seguintes características: país de origem, percentual de arroz quebrado, aromático ou não aromático, parboilizado ou branco. No continente asiático, consome-se arroz de todo tipo, ou seja, semi-longo, longo-fino e curto. Nos países da África, a preferência é pelo arroz do tipo longo, pré-cozido e 100% quebrado. O mercado mais promissor na Europa é para o arroz do tipo longo-fino e aromático. No Oriente Médio, consome-se principalmente arroz do tipo longo e aromático. As preferências do tipo do arroz variam em função da renda per capita dos países. A preferência pode também mudar nos mercados internos, pois a exemplo do que ocorreu no Brasil, também sucedeu nos países da União Européia, onde os consumidores substituíram, nos anos 70 e 80, a preferência do arroz do tipo longo pelo longo-fino.

No Brasil, o consumo anual é de, em média, 25 quilogramas por habitante (MAPA, 2015). O Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz irrigado. Já a área plantada com arroz de sequeiro, em terras altas, fica concentrada na região Centro-Oeste (Mato Grosso e Goiás), Nordeste (Piauí e Maranhão) e Norte (Pará e Rondônia). As projeções de produção e consumo de arroz, avaliadas pela Assessoria de Gestão Estratégica do Mapa, mostram que o Brasil vai colher 14,12 milhões de toneladas de arroz na safra 2019/2020. Equivale ao aumento anual da produção de 1,15% no período de 2010 a 2020. O consumo deverá crescer a uma taxa média anual de 0,86%, alcançando 14,37 milhões de toneladas em 2019/2020. Isto mostra a necessidade do desenvolvimento de tecnologias que permitam corrigir as distorções existentes nas áreas de secagem e armazenamento e priorizem a obtenção de altos níveis de qualidade e baixo custo, como exige a atual conjuntura econômica nacional.

O teor de umidade do arroz por ocasião da colheita, assim como as condições climáticas vigentes durante o período que a antecede e que contribuem para flutuações na umidade dos grãos ainda no campo, é fator importante no comportamento do produto no beneficiamento. Assim sendo, um importante aspecto a ser considerado pelos produtores refere-se à determinação do ponto adequado de colheita, de modo a maximizar o retorno econômico que, por sua vez, pode ser estimado por ocasião da colheita com base na produtividade da lavoura, na qualidade do arroz colhido e nos custos envolvidos com a secagem do produto. De maneira geral, para obtenção de maiores rendimentos, tem sido recomendado colher o arroz com teor de umidade ainda elevado, entre 18 e 22%. Deve-se estar atento, entretanto, para as exigências específicas de cada variedade, uma vez que algumas podem ser mais exigentes quanto ao ponto de colheita (PUZZI, 1973; CASTRO et al., 1999; ELIAS et al., 2010).

Quando o teor de umidade está acima dos 14% (base úmida), limite máximo para o armazenamento e comercialização do arroz, é necessário que os grãos passem por um processo

de secagem antes do armazenamento com o objetivo de retirar água excedente. O baixo teor de umidade diminui a atividade físico-química do produto e inibe as atividades microbianas associadas (SILVA, 2008).

O grão de arroz consiste da cariopse e de uma camada protetora, a casca. A casca, composta de duas folhas modificadas, a pálea e a lema, corresponde a cerca de 20% do peso do grão. Através da descascagem, separa-se a casca da cariopse, obtendo-se o arroz integral. Este pode ser polido para remoção do farelo (pericarpo, tegumento, camada de aleurona e gérmen), que representa 8,5- 14,8% do arroz integral, obtendo-se o arroz branco polido. Os grãos também podem ser submetidos à parboilização, processo hidrotérmico através do qual se obtém o arroz parboilizado, o qual pode ser consumido na forma integral ou polido (WALTER et al., 2008; CONAB, 2016).

O arroz é constituído principalmente por amido, apresentando quantidades menores de proteínas, lipídios, fibras e cinzas (Tabela 2.1). No entanto, a composição do grão é influenciada pela variação genotípica, variações ambientais, de manejo, de processamento e de armazenamento (ZHOU et al., 2002; CONAB, 2016). Além disso, as camadas externas do grão apresentam maiores concentrações de proteínas, lipídios, fibra, minerais e vitaminas, enquanto o centro é rico em amido. Desta forma, o polimento resulta em redução de nutrientes, exceto de amido, originando diferenças na composição do arroz integral e polido (WALTER et al., 2008).

Tabela 2.1. Composição centesimal média (% na matéria seca) de arroz integral, branco polido e parboilizado polido

	Arroz integral	Arroz branco polido	Arroz parboilizado polido
Amido total	74,12	87,58	85,08
Proteínas	10,46	8,94	9,44
Lipídios	2,52	0,36	0,69
Cinzas	1,15	0,30	0,67
Fibra total	11,76	2,87	4,15

Fonte: Storck (2004).

Para se ter grãos estocados de boa qualidade e alto valor nutricional, deve-se tomar alguns cuidados de forma que sua composição química seja conservada em seu estado natural. Se a secagem com ar aquecido não é convenientemente controlada podem surgir alterações na cor do produto, formação de crosta periférica, perda de matéria seca, redução da integridade física

dos grãos, diminuição da digestibilidade das proteínas, desestruturação do amido, suscetibilidade à incidência de defeitos (quebras, fissuras) e redução da conservabilidade, além, do desperdício de tempo e de energia, aumentando portanto os custos do processo (BROOKER et al., 1992; FIOREZE, 2003; EMBRAPA, 2015).

A fissura não é uma ruptura superficial, mas resulta de uma expansão da superfície, devido a sorção de água do ar ambiente, do interior da semente ou de ambos. As células da superfície da semente ao sofrerem expansão, exercem uma compressão, enquanto as células da região interna sofrem contração e desenvolvem uma tração sobre a porção interna, a partir de um gradiente de pressão decrescente na semente, após um período de secagem rápida, ocasionando as fissuras. O fissuramento não ocorre no final da secagem, mas algum tempo após, porque os grãos parcialmente secos apresentam um gradiente de umidade, sendo necessário um certo período para anular a diferença de potencial hídrico. A medida que ocorre a transferência de água, o gradiente de potencial hídrico decresce, durante o período que transcorre entre o término da secagem e o início do fissuramento que continua até que o gradiente de umidade na semente torne-se nulo. O gradiente de umidade na semente parece ser o fator principal que causa o fissuramento e, portanto, em função das condições do ar de secagem, podem resultar diferentes gradientes de umidade (KUNZE, 1979; MOTTA et al., 1999; CNOSSEN e SIEBENMORGEN, 2000; DONG et al., 2009).

Desta forma, simular o processo de secagem de arroz de modo a predizer, sob as condições próprias de uma região, o melhor tipo de secador e as condições específicas de secagem, além do tempo necessário para realizá-la, é de grande interesse para otimizar o processo, diminuir custos e garantir uma melhor qualidade final do produto.

Compreendido o problema físico, na seção que segue serão apresentados alguns modelos encontrados na literatura que descrevem o processo de secagem de diversos produtos.

## **2.2 Modelagem matemática do processo de secagem**

### **2.2.1 Fundamentos**

O processo de secagem envolve, além de fenômenos de transferência de calor e massa, quantidade de movimento e variações dimensionais e, portanto, requer o desenvolvimento de modelos matemáticos que simulem o processo com maior realismo físico. Vários parâmetros afetam a cinética de secagem de produtos higroscópicos, tais como: teor de umidade e tipo do

produto, condições ambientais externas e variações dimensionais do produto durante a secagem (BROOKER et al., 1992; FIOREZE, 2003). No que diz respeito a predição do fenômeno de secagem, quanto maior for o número de parâmetros relevantes incluídos no modelo matemático, mais próximo se estará da situação física real. Contudo, torna-se mais complexo obter a solução do modelo.

Um modelo matemático é obtido quando se substitui a linguagem natural das hipóteses por uma linguagem matemática coerente (BASSANEZI, 2002). Por exemplo, é muito comum, em se tratando de modelar fenômenos que envolvam dados temporais, obter-se equações que interpretam as variações das quantidades (variáveis) presentes e consideradas essenciais. Neste caso, as hipóteses formuladas podem ser traduzidas por equações de variações discretas (equações de diferenças finitas, por exemplo) ou contínuas (equações diferenciais). Para o caso particular do processo de secagem de sólidos, diversos modelos têm sido propostos para descrever a taxa de perda de umidade durante a secagem. Pode-se classificar estes modelos da seguinte forma: Modelos empíricos e semi-empíricos, modelos difusivos e modelos baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis.

Os modelos logarítmicos e exponenciais foram os primeiros a serem desenvolvidos devido a simplicidade na obtenção de soluções. Na sequência, foram desenvolvidos diversos modelos empíricos e semi-empíricos baseados em balanços de massa e de calor, porém com grandes simplificações para facilitar a obtenção de soluções com recursos computacionais pouco avançados. Com a evolução da computação científica, os modelos de secagem baseados em equações diferenciais parciais vem ganhando força (PARRY, 1985; PETRY, 2007).

Os modelos empíricos consistem numa correlação direta entre o teor de umidade e o tempo de secagem, enquanto os semi-empíricos baseiam-se na hipótese da validade da lei do resfriamento de Newton, assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de umidade do produto e seu respectivo teor de umidade de equilíbrio, para as condições de secagem especificadas (LIMA, 1999; CIHAN et al., 2007; HII et al., 2009; KALETA et al., 2010; DIAMANTE et al., 2010; SILVA et al., 2013a).

Comumente, os modelos empíricos e semi-empíricos se baseiam em variáveis externas em relação ao produto, como temperatura e umidade relativa do ar de secagem não fornecendo, entretanto, indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água do interior dos grãos e, devido ao interesse prático, consideram ainda que todo o processo de secagem ocorre apenas no período de taxa decrescente (BROOKER et al., 1992). Neste sentido, existem várias teorias de secagem propostas na literatura que visam descrever o transporte de massa e calor



em meios capilares porosos, tais como: teoria de difusão líquida, teoria de vaporização - condensação, teoria de capilaridade, teoria de Krischer, teoria de Luikov, teoria de Phillip - DeVries e teoria de Fortes e Okos.

Os modelos difusivos geralmente baseiam-se na difusão de líquido e/ou vapor no interior do produto, dependendo do tipo do material e do teor de umidade. Estes modelos descrevem as taxas de transferência de calor e massa como função da posição dentro do sólido e do tempo de secagem, e consideram as resistências aos fluxos de calor e massa externa e interna. (BROOKER et al., 1992; LIMA, 1999; FIOREZE, 2003; OLIVEIRA, 2006; YILDIRIM et al., 2011; MORAIS et al., 2013).

Os modelos baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis assumem basicamente a validade das relações recíprocas de Onsager, o princípio de Curie e a existência de um equilíbrio termodinâmico local no interior do produto (LUIKOV, 1966; FORTES et al., 1981; LIMA, 1999; OLIVEIRA, 2006; MELO, 2013).

Em situações nas quais existem gradientes de concentração de uma substância, ou de temperatura, se produz um fluxo de partículas ou de calor que tende a homogenizar a dissolução e uniformizar a concentração ou a temperatura. O fluxo homogenizador é uma consequência estatística do movimento aleatório das partículas que dá lugar ao segundo princípio da termodinâmica, conhecido também como movimento térmico casual das partículas. Assim, os processos físicos de difusão podem ser vistos como processos físicos ou termodinâmicos irreversíveis (OLIVEIRA, 2006).

Em muitos problemas de secagem, a resistência interna do sólido para a transferência de massa é maior do que a sua resistência à transferência de calor. Nestes casos, difusão de umidade é o mecanismo que controla o processo durante o período de taxa de secagem decrescente, e o modelo de difusão pode ser utilizado para prever o processo de secagem. A difusão é um dos mecanismos de transporte onde a transferência de matéria ou energia ocorre pelo movimento molecular devido à existência de um gradiente de concentração de uma substância ou temperatura, enquanto o meio permanece estacionário (FARIAS, 2011). Este processo, por exemplo, descreve a velocidade de saída de água de um sólido.

Sousa et al. (2014) estudaram a cinética de secagem incluindo contração volumétrica e obtiveram valores para os coeficientes de difusão líquida durante o processo de secagem dos frutos de morango. Esses frutos foram submetidos à secagem nas temperaturas do ar de 40, 55 e 70°C. Ao longo da secagem foi observado o comportamento do fruto, relacionando a variação do volume e perda de água, desde o início até os frutos chegarem a um teor de água de,

aproximadamente, 0,25 b.s. Para simular os dados experimentais foram utilizados modelos matemáticos capazes de descrever o processo de secagem e redução do volume. Os modelos de Midilli e Bala foram os que mais se adaptaram na descrição da cinética de secagem e contração volumétrica, respectivamente.

Muitos modelos de difusão reportados na literatura consideram apenas a difusão líquida, isto é, o movimento migratório de água apenas na fase líquida no interior do sólido e estão sendo amplamente utilizados por vários pesquisadores (QUEIROZ e NEBRA, 2001; CARMO, 2004; LIMA, D. et al., 2004a; HACIHAFIZOĞLU et al., 2008; FARIAS, 2011; YILDIRIM et al., 2011; SANTOS, I. 2013; SILVA et al., 2013b).

Durante o processo de secagem, a maioria dos produtos biológicos, principalmente aqueles com alto teor de umidade inicial, apresentam uma taxa de encolhimento. Normalmente a temperatura do produto aumenta e o seu teor de umidade diminui, gerando gradientes de umidade e temperatura dentro do material que provocam encolhimento e dilatação térmica. Estas deformações, por sua vez, geram forças internas no material e força dividida pela área em que ela atua resulta em tensão. Se estas tensões, em qualquer ponto do produto, ultrapassam o limite do material, causam fendas ou até mesmo pode quebrar o produto, o que gera desperdício ou produto de baixo valor agregado. Para produtos que sofrem grandes alterações em suas dimensões e forma original, quando submetidos a um processo de desidratação ou secagem, o fenômeno de encolhimento deve ser incluído na modelagem matemática com o objetivo de se obter uma representação mais realística do processo e garantir maior confiabilidade nos valores dos parâmetros físicos determinados com a utilização do referido modelo (CARMO, 2004).

No caso específico do grão de arroz, que possui um teor de umidade relativamente baixo, o encolhimento é mínimo e, portanto, este efeito pode ser negligenciado na modelagem matemática. Resende et al. (2005) avaliaram a inclusão da contração volumétrica no modelo de difusão líquida durante a secagem de arroz em casca e concluíram que a contração volumétrica do produto foi insuficiente para melhorar o ajuste do modelo.

### **2.2.2 Equação geral de transporte**

A equação geral de transporte (equação de conservação) para um volume de controle infinitesimal é dada por (PATANKAR, 1980; BECK et al., 1992; MALISKA, 2004):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) + \nabla \cdot (\lambda\vec{v}\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^{\Phi}\nabla\Phi) + S^{\Phi} \quad (2.1)$$

onde  $\Phi$  é a variável dependente de interesse,  $\lambda$  e  $\Gamma^{\Phi}$  são coeficientes de transporte,  $\vec{v}$  é o vetor velocidade do meio e  $S^{\Phi}$  é o termo fonte.

Na Equação (2.1), o primeiro termo representa a variação temporal da grandeza sob estudo em um volume infinitesimal, sendo conhecido como termo transiente. Por outro lado, o segundo termo, denominado termo advectivo, indica a variação da grandeza com a posição em um meio onde há movimento macroscópico com uma velocidade  $\vec{v}$ . O terceiro termo representa a variação da grandeza com a posição por difusão (termo difusivo), enquanto o último termo, denominado de termo fonte, representa a geração da grandeza em um volume infinitesimal.

A seguir apresenta-se a dedução de um caso particular da Equação (2.1) conhecida como equação de difusão que é muito usada para descrever o transporte de água em meios porosos.

A equação de difusão, dependendo do problema, pode ser denominada de Lei de Fick (difusão mássica) ou Lei de Fourier (difusão térmica).

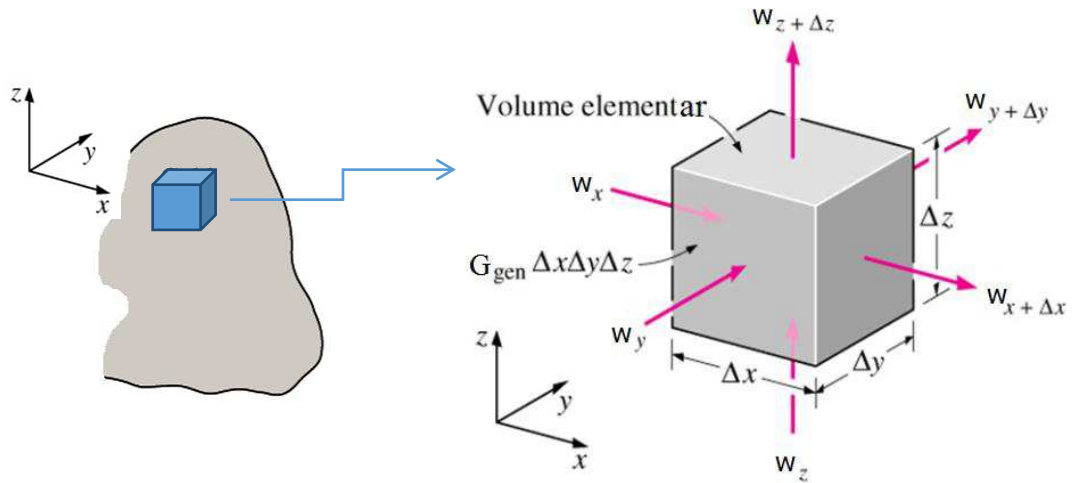
### 2.2.3 A equação de difusão

A equação que descreve o fenômeno de difusão para uma variável genérica  $\Phi$  é obtida da Equação (2.1) fazendo  $\vec{v} = 0$ , já que neste caso o meio encontra-se em repouso (velocidade nula) e a variação da grandeza dentro do volume de controle ocorre unicamente por difusão. Assim, a equação de difusão é expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^{\Phi}\nabla\Phi) + S^{\Phi} \quad (2.2)$$

Para dedução da equação (2.2), considere um meio homogêneo no interior do qual não há movimento macroscópico (advecção) e seja  $\Phi(x, y, z)$  a grandeza de interesse a ser transportada por difusão no volume de controle infinitesimalmente pequeno (diferencial),  $dx \cdot dy \cdot dz$  (Figura 2.5).

Figura 2.5. Volume de controle infinitesimal  $dx dy dz$



As taxas de transferência por difusão associadas a grandeza  $\Phi$  e perpendiculares a cada uma das superfícies de controle nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  são indicadas por  $w_x$ ,  $w_y$  e  $w_z$ , respectivamente. Assim, as taxas de transferência por difusão nas superfícies opostas podem ser aproximadas pelos dois primeiros termos da série de Taylor (INCROPERA et al., 2013):

$$w_{x+dx} = w_x + \frac{\partial w_x}{\partial x} dx \quad (2.3a)$$

$$w_{y+dy} = w_y + \frac{\partial w_y}{\partial y} dy \quad (2.3b)$$

$$w_{z+dz} = w_z + \frac{\partial w_z}{\partial z} dz \quad (2.3c)$$

Agora, fazendo-se o balanço do transporte da grandeza  $\Phi$  no volume de controle numa base de taxa, tem-se:

$$\dot{G}_{ent} - \dot{G}_{sai} + \dot{G}_g = \dot{G}_{acu} \quad (2.4)$$

onde  $\dot{G}_{ent}$  é a taxa de entrada da grandeza  $\Phi$ ,  $\dot{G}_{sai}$  é a taxa de saída,  $\dot{G}_g$  é a taxa de geração e  $\dot{G}_{acu}$  é a taxa acumulada. A Equação (2.4) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$(w_x - w_{x+dx}) + (w_y - w_{y+dy}) + (w_z - w_{z+dz}) + \dot{G}_g = \dot{G}_{acu} \quad (2.5)$$

Substituindo (2.3a-c) em (2.5), tem-se:

$$-\frac{\partial w_x}{\partial x} dx - \frac{\partial w_y}{\partial y} dy - \frac{\partial w_z}{\partial z} dz + \dot{G}_g = \dot{G}_{acu} \quad (2.6)$$

No interior do meio pode haver um termo fonte, associado à taxa de geração da grandeza  $\Phi$ , que é representado por:

$$\dot{G}_g = S^\Phi dV = S^\Phi dx dy dz \quad (2.7)$$

onde  $S^\Phi$  é a taxa na qual a grandeza  $\Phi$  é gerada por unidade de volume do meio.

Além disso, também podem ocorrer variações na quantidade da grandeza  $\Phi$  armazenada pela matéria no interior do volume de controle. O termo referente ao acúmulo da grandeza  $\Phi$  é dado por:

$$\dot{G}_{acu} = \frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} dx dy dz \quad (2.8)$$

onde  $\lambda$  é uma propriedade termodinâmica da matéria.

Substituindo (2.7) e (2.8) em (2.6), obtém-se:

$$-\frac{\partial w_x}{\partial x} dx - \frac{\partial w_y}{\partial y} dy - \frac{\partial w_z}{\partial z} dz + S^\Phi dx dy dz = \frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} dx dy dz \quad (2.9)$$

O fluxo da grandeza  $\Phi$ , por unidade de área, é uma grandeza vetorial na direção do gradiente de  $\Phi$ , isto é,

$$\vec{w}'' = -\Gamma^\Phi \nabla\Phi \quad (2.10)$$

onde o coeficiente  $\Gamma^\Phi$  é uma propriedade de transporte da matéria.

O vetor fluxo pode ser decomposto em componentes:  $w_x'' = -\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}$ ,  $w_y'' = -\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y}$  e  $w_z'' = -\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z}$ , de tal forma que cada uma dessas expressões relaciona o fluxo de uma grandeza através de uma superfície ao gradiente de  $\Phi$  em uma direção perpendicular à superfície.

Agora, multiplicando cada componente do vetor fluxo pela área da superfície de controle apropriada e substituindo em (2.9), resulta na equação:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + S^\Phi = \frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} \quad (2.11)$$

que é a equação de difusão tridimensional em coordenadas cartesianas.

De uma forma mais compacta, a Equação (2.11) pode ser escrita como segue:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi \quad (2.12)$$

onde  $\Phi$  é a variável dependente de interesse,  $\lambda$  e  $\Gamma^\Phi$  são coeficientes de transporte e  $S^\Phi$  é o termo fonte.

#### 2.2.4 Modelo de difusão de calor

Uma das equações diferenciais parciais clássicas da Física-Matemática é a equação que governa a distribuição de temperaturas em um meio. O estudo matemático de condução de calor teve início em torno de 1800 por Joseph Fourier e continua a atrair a atenção de cientistas modernos (BOYCE e DIPRIMA, 2006; QUEIROZ e PESSOA, 2013). A equação da condução de calor é usada para calcular taxas de transferência de calor em um corpo sólido e é obtida da Equação (2.12) considerando-se a grandeza de interesse como sendo a temperatura ( $\Phi = T$ ),  $\lambda = \rho c_p$  e  $\Gamma^\Phi = k$ . Assim, substituindo esses parâmetros na Equação (2.12), obtém-se:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + S^\Phi \quad (2.13)$$

onde,  $c_p$  é o calor específico à pressão constante,  $\rho$  é a densidade e  $k$  é uma importante propriedade do material chamada condutividade térmica. O produto  $\rho c_p$ , comumente chamado de capacidade calorífica volumétrica, mede a capacidade de um material de armazenar energia térmica.

Todos os processos de transmissão de calor envolvem a transferência e a conversão de energia, e assim sendo, eles devem obedecer à primeira e à segunda leis da termodinâmica. Contudo, do ponto de vista da termodinâmica clássica, os processos são analisados em seus estados de equilíbrio, ou seja, inicial e final, sem se preocupar com o tempo necessário para a transformação, nem com a taxa na qual a mesma ocorreu (MORAN e SHAPIRO, 2009; INCROPERA et al., 2013).

É possível quantificar processos de transferência de calor em termos de equações de taxa apropriadas. Para a condução térmica, a equação da taxa é conhecida como lei de Fourier. A lei de Fourier é fenomenológica, isto é, foi desenvolvida a partir de fenômenos observados em experimentos e estabelece que: se duas seções transversais paralelas de mesma área e temperaturas diferentes estiverem separadas por uma pequena distância, a quantidade de calor transferida da seção mais quente para a mais fria é diretamente proporcional a área  $A$  e à diferença de temperatura  $\Delta T$  e inversamente proporcional à distância de separação  $\Delta x$ . Assim, escreve-se (BOYCE e DIPRIMA, 2006; INCROPERA et al., 2013):

$$q_x = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.14)$$

onde  $k$  ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) é uma característica do material. Passando ao limite a expressão anterior quando  $\Delta x \rightarrow 0$ , obtém-se a taxa de transferência de calor:

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.15)$$

O sinal de menos em (2.15) é justificado pelo fato do calor ser transferido no sentido da diminuição das temperaturas.

O fluxo de calor por unidade de área  $q_x''$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) é dado por (INCROPERA et al., 2013):

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.16)$$

O fluxo de calor representa a taxa de transferência de calor na direção  $x$  por unidade de área e é proporcional ao gradiente de temperatura  $\frac{dT}{dx}$ , nesta direção. Em particular, a direção de  $q_x''$  é normal à área da seção transversal  $A$ , de temperatura constante, também chamada de superfície isotérmica.

No sistema de coordenadas cartesianas tridimensional, identificando por  $T(x, y, z)$  o campo escalar de temperaturas, a lei de Fourier, para condução em corpos isotrópicos, é dada por:

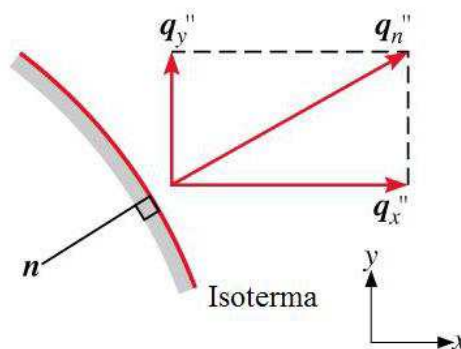
$$q'' = -k\nabla T \quad (2.17)$$

De uma forma mais compacta, a Lei de Fourier pode ser escrita por:

$$q_n'' = -k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \quad (2.18)$$

onde  $q_n''$  é o fluxo térmico na direção  $\vec{n}$  normal a uma superfície isotérmica (Figura 2.6).

Figura 2.6. Vetor fluxo térmico normal a uma isoterma em um sistema de coordenadas bidimensional



Em algumas situações, para simplificar a solução do problema, considera-se  $\rho$ ,  $c_p$  e  $k$  constantes e que não há geração de energia. Neste caso, a Equação (2.13) reduz-se a:



$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2.19)$$

onde  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  ( $m^2s^{-1}$ ) é uma importante propriedade de transporte chamada difusividade térmica. Ela mede a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la.

### 2.2.5 Modelo de difusão mássica

Transferência de massa é definida como sendo massa em trânsito como o resultado de uma diferença de concentrações de uma espécie em uma mistura (INCROPERA et al., 2013). Da mesma forma que um gradiente de temperatura é necessário para a transferência de calor, um gradiente de concentração de umidade é necessário para o transporte de água. O modelo apresentado a seguir é baseado na teoria de difusão líquida no interior de sólidos, isto é, a difusão mássica ocorre no sentido da diminuição de concentração (umidade) e a água migra apenas na fase líquida.

Do ponto de vista das origens físicas e das equações de taxas governantes, existem fortes analogias entre os processos de transferência de calor e de massa por difusão. A equação da taxa para a difusão mássica é conhecida como primeira lei de Fick e é dada na forma vetorial por:

$$\vec{J} = -D\nabla M \quad (2.20)$$

onde  $M$  é o teor de umidade e  $D$  é a difusividade efetiva de massa. O símbolo  $\vec{J}$  é definido como sendo o fluxo mássico difusivo e representa o fluxo de água por unidade de área em relação a um determinado referencial.

Considerando  $\lambda = 1$ ,  $\Phi = M$  e  $\Gamma^\Phi = D$  na equação de difusão (2.12), obtém-se a equação para o transporte difusivo de massa, dada por:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D\nabla M) + S^\Phi \quad (2.21)$$

onde  $M$  é o teor de umidade (em base seca) no instante  $t$  em um volume infinitesimal e  $S^\Phi$  é o termo fonte.

A Equação (2.21) tem sido muito usada para descrever a difusão líquida em sólidos, uma vez que estabelece a difusão de umidade em termos do gradiente de concentração no sólido. O modelo de difusão líquida apresenta bons resultados para a análise de secagem em grãos, frutas e cereais devido à peculiaridade destes produtos não apresentarem um período de taxa constante nas suas curvas características de secagem, permitindo que o processo seja totalmente controlado pelas condições internas do material (QUEIROZ, 1994; CARMO, 2004; URIBE et al., 2011; MRAD et al., 2012; GOLESTANI et al., 2013; SILVA et al., 2014).

A utilização do modelo de difusão para descrever o processo de secagem possibilita determinar as difusividades efetivas e também a energia de ativação associada ao processo. Modelos de difusão são muitas vezes mais vantajosos do que os empíricos, devido à quantidade de informações que podem ser extraídas através do modelo (SILVA et al., 2013a). Os modelos de difusão são capazes de simular a distribuição de umidade dentro do grão em qualquer instante, permitindo prever tensões, que podem danificar o produto (SILVA et al., 2010; SILVA et al., 2011a). Por outro lado, se o objetivo principal do estudo é descrever a cinética de secagem ou determinar a taxa de secagem em instantes estipulados, modelos empíricos são ferramentas úteis. Particularmente, se a transferência de calor é estudada no processo de secagem descrito por difusão líquida, a quantidade de calor necessária para evaporar a água na superfície (fronteira) é variável ao longo do tempo e depende da taxa de secagem (MARIANI et al., 2008).

Em geral, o coeficiente de difusão é considerado constante ou dependente da temperatura e/ou do teor de umidade do sólido. Contudo, observa-se discrepâncias quando o coeficiente de difusão é considerado constante já que durante a secagem de produtos biológicos, ocorre encolhimento que, por sua vez, pode produzir um efeito significativo na difusividade de massa com consequentes mudanças na taxa de secagem. Condições de contorno inadequadas também geram discrepâncias nos resultados.

### **2.2.6 Condições de contorno**

Em problemas físicos dependentes do tempo, como é o caso de fenômenos de difusão transientes, é conveniente separar a variável temporal  $t$  das variáveis espaciais. O que ocorre muitas vezes é que o valor da grandeza genérica  $\Phi$  é descrito no instante  $t = 0$  (condição inicial), ao mesmo tempo em que são impostas condições de contorno, para todo  $t > 0$ . As condições de contorno utilizadas em modelos de difusão são reportadas na literatura de três tipos distintos:

**a) Condição de contorno do primeiro tipo:** Corresponde a uma situação na qual o valor da grandeza genérica  $\Phi$  é conhecido na superfície do sólido. Também é chamada condição de contorno de primeira espécie ou ainda condição de contorno de equilíbrio. Neste caso, a grandeza assume instantaneamente o seu valor de equilíbrio  $\Phi_{eq}$  na superfície do corpo, isto é,  $\Phi$  é prescrito na superfície do corpo.

**b) Condição de contorno do segundo tipo:** Corresponde a uma situação na qual a derivada de  $\Phi$  na direção normal à superfície é conhecida, ou seja, o fluxo da grandeza  $\Phi$  na superfície do corpo é conhecido. Também chamada condição de contorno de segunda espécie, tem-se, neste caso, fluxo prescrito na superfície do sólido.

Um caso particular desta condição de contorno é quando a superfície do sólido é considerada isolada. Neste caso, o fluxo na superfície é nulo e, portanto, esta condição reduz-se a:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{n}} \right|_S = 0, t > 0 \quad (2.22)$$

onde  $\vec{n}$  é o vetor unitário normal exterior à superfície  $S$ .

**c) Condição de contorno do terceiro tipo:** Corresponde a uma situação na qual o transporte da grandeza de interesse  $\Phi$  na superfície do sólido ocorre por convecção para um fluido ambiente, com um determinado valor da grandeza dado por  $\Phi_{\infty}$ . Também é conhecida como condição de contorno de terceira espécie ou condição de contorno convectiva. Neste caso, o fluxo por difusão na parte interna da superfície do sólido é igual ao fluxo por convecção resultante da transferência da grandeza  $\Phi$  entre a superfície e o fluido, isto é,

$$-\Gamma^{\Phi} \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{n}} \right|_S = h(\Phi|_S - \Phi_{\infty}), t > 0 \quad (2.23)$$

onde  $\vec{n}$  é o vetor unitário normal exterior à superfície  $S$ ,  $\Gamma^{\Phi}$  é um coeficiente de transporte e o parâmetro  $h$  é chamado coeficiente de transferência por convecção. Este parâmetro depende das condições na camada limite, as quais, por sua vez, são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do escoamento do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido e, em algumas situações, também das propriedades do material que está envolvido pelo fluido.

Vários autores consideram a difusão líquida como principal mecanismo de transporte de umidade em produtos biológicos e utilizam condição de contorno do primeiro tipo, para descrever difusão de massa em grãos (MOHAPATRA e RAO, 2005; THAKUR e GUPTA, 2006; COSTA et al., 2011; MORAIS et al., 2013; SILVA et al., 2013a). Contudo, a condição de contorno de terceira espécie descreve de forma mais realista o transporte de calor ou de massa na superfície de um corpo uma vez que, em geral, a grandeza não assume seu valor de equilíbrio instantaneamente (QUEIROZ e NEBRA, 2001; MARIANI et al., 2008; SILVA et al., 2010; SILVA et al., 2014).

### 2.3 Soluções para a equação de difusão

Quando o corpo em estudo pode ser aproximado para uma parede infinita, retângulo ou paralelepípedo é necessário usar apenas a equação de difusão num sistema de coordenadas cartesianas adequado. Nos casos em que a difusão ocorre em corpos com a forma cilíndrica ou esférica, deve-se usar sistemas de coordenadas onde as fronteiras da região coincidam com as superfícies coordenadas, nestes casos, coordenadas cilíndricas e esféricas, respectivamente. A análise vale para as situações uni, bi ou tridimensionais (FARIAS, 2011).

Para geometrias mais simplificadas, o problema pode ser resolvido analiticamente, o que normalmente pressupõe propriedades termofísicas constantes para o meio. Os métodos analíticos mais utilizados para resolver a equação de difusão são: método de Fourier (uso da série de Fourier), transformadas e integrais de Fourier. O método de Fourier utiliza separação de variáveis para obter problemas de autovalor, para equações diferenciais ordinárias, estreitamente relacionados com a equação diferencial parcial em estudo. Com isso, obtém-se uma família de soluções da equação diferencial parcial que satisfazem as condições de contorno dadas. Em seguida, utilizá-las para compor a solução do problema como uma série cujos termos são produtos dessas soluções por coeficientes adequadamente escolhidos. A ideia central da teoria das séries de Fourier é expressar uma dada função como uma série de senos e cossenos. Quando não se supõe que essa função é periódica, é natural usar as integrais de Fourier no lugar das séries de Fourier.

Por exemplo, o problema de difusão unidimensional em uma parede infinita homogênea de espessura  $a$ , com extremidades isoladas, sem geração de energia e propriedades constantes

$\alpha = \frac{\Gamma\Phi}{\lambda}$ , consiste em obter a solução da equação:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}, \quad 0 < x < a, \quad t > 0 \quad (2.24)$$

com condições de contorno homogêneas:

$$\Phi(0, t) = \Phi(a, t) = 0, \quad t > 0 \quad (2.25)$$

e condição inicial:

$$\Phi(x, 0) = \Phi_0, \quad 0 < x < a \quad (2.26)$$

Usando o método analítico de separação de variáveis, soluções do tipo  $F(x)G(t)$  para a Equação (2.24) que satisfazem as condições de contorno são dadas por:

$$\Phi_n(x, t) = C_n \operatorname{sen} \left( \frac{n\pi x}{a} \right) \exp \left( -\alpha \frac{n^2 \pi^2}{a^2} t \right) \quad (2.27)$$

Escolhendo os coeficientes  $C_n$  de forma adequada é possível mostrar que a solução do problema físico abordado, é dada por:

$$\Phi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \operatorname{sen} \left( \frac{n\pi x}{a} \right) \exp \left( -\alpha \frac{n^2 \pi^2}{a^2} t \right) \quad (2.28)$$

Por outro lado, se o problema envolve propriedades termofísicas variáveis com condições de contorno gerais definidas em geometrias complexas, os métodos numéricos (elementos finitos, diferenças finitas e volumes finitos) são apropriados para obter a solução da equação de difusão. Soluções analíticas e/ou numéricas da equação de difusão, considerando o coeficiente de difusão constante ou variável, para diferentes geometrias (paralelepípedo, cilindro, esfera) e condições de contorno podem ser encontradas na literatura (LUIKOV, 1968; PATANKAR, 1980; CRANK, 1992; BIRD, 2004; MALISKA, 2004; KREYSZIG, 2009; INCROPERA et al., 2013).

### 2.3.1 Estudos analíticos e numéricos para equação de difusão

Queiroz e Nebra (2001) apresentaram um estudo teórico e experimental sobre a cinética de secagem de bananas com diferentes condições de secagem do ar. Modelos de difusão foram ajustados aos dados experimentais com coeficiente de difusão constante e incluindo sucessivamente, através de diferentes modelos, o efeito do encolhimento e transferência de massa convectiva na superfície. De acordo com os resultados obtidos, o modelo de difusão com coeficiente de difusão constante, condição de contorno de equilíbrio e sem considerar o efeito do encolhimento não descreveu adequadamente o processo de secagem de banana. O melhor ajuste foi obtido quando apenas a condição de contorno convectiva foi incluída no modelo de difusão com coeficiente de difusão constante, embora não tenha sido considerado o encolhimento. Como a banana encolhe aproximadamente 43 - 47% do seu diâmetro original durante a secagem, a suposição do encolhimento fornece maior confiabilidade aos cálculos dos coeficientes de difusão e convectivo. Quando o efeito do encolhimento é incluído no modelo os coeficientes de difusão são menores.

Wu et al. (2004) estabeleceram um modelo teórico tridimensional para simular a transferência de calor e massa acoplados no interior do grão de arroz. Para desenvolver o modelo considerou-se a equação de difusão tridimensional, a forma do arroz como um elipsoide e que apenas transferência de calor e massa por convecção ocorre entre a superfície do produto e o ambiente de secagem. O método dos volumes finitos foi aplicado para obter a solução numérica do modelo utilizando-se um código computacional implementado no FORTRAN-90.

Karim e Hawlader (2005) desenvolveram um modelo matemático para descrever características de produtos alimentares durante o processo de secagem. Equações de transferência de calor e massa foram resolvidas simultaneamente usando o método numérico de diferenças finitas. O modelo é capaz de prever a temperatura instantânea e distribuição da umidade no interior do material. Para fins de avaliação, o modelo foi aplicado a experimentos de secagem de banana na faixa de temperaturas do ar entre 40 e 60°C e velocidade do ar entre 0,3 e 0,7 m/s. Concluiu-se que o modelo fornece uma boa predição da taxa de secagem (temperatura e distribuição de umidade no material e do ar de secagem).

Mohapatra e Rao (2005) estudaram as características de secagem de trigo, parcialmente cozido, em camada fina para um intervalo de temperatura de 40 - 60°C usando modelos empíricos, semi-teóricos e de difusão. A secagem total ocorreu no período de taxa decrescente, o que significa a influência da difusão de umidade durante a secagem. A solução analítica da

equação de difusão em coordenadas esféricas e considerando condição de contorno do primeiro tipo foi ajustada aos dados experimentais e as difusividades efetivas variaram de  $1,218 \times 10^{-10}$  a  $2,861 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  ao longo do intervalo de temperatura. A difusividade e a temperatura foram relacionadas através da equação de Arrhenius e a energia de ativação para a difusão de umidade durante a secagem foi determinada. Concluíram que os dados experimentais são melhor representados com o modelo de Dois-termos com a dependência da temperatura linear.

Thakur e Gupta (2006) analisaram características da absorção de água em arroz com casca medidos em três temperaturas 30, 45 e 60°C. Um método de regressão não-linear foi aplicado para ajustar uma solução aproximada da equação de difusão aos dados de umidade medidos experimentalmente. O modelo de difusão considerado envolve condição de contorno do primeiro tipo e geometria do tipo cilindro infinito. A partir da curva característica de absorção de água, observou-se que a casca era uma barreira significativa no processo de absorção de água pelo arroz. O valor previsto do teor de umidade, em qualquer instante de tempo, teve boa concordância com os dados experimentais. A análise de variância mostrou que as temperaturas de imersão não tiveram efeitos significativos nos coeficientes de difusão.

Corrêa et al. (2006) verificaram a influência da contração volumétrica na determinação do coeficiente de difusão, bem como obtiveram a energia de ativação do processo de secagem do feijão sob diversas condições de ar. Foram utilizados grãos de feijão, colhidos com teor de água de 0,92 (b.s.), e submetidos à secagem nas temperaturas de 25, 35, 45 e 55°C e umidade relativa do ar de secagem entre 23 e 75%. O volume de cada grão, considerado um esferoide, foi obtido por meio da medição dos três eixos ortogonais ao longo do processo de secagem e a contração volumétrica dos grãos foi determinada pela relação entre o volume para cada teor de água e o volume inicial. Com base nos resultados obtidos, concluíram que a contração volumétrica dos grãos introduzida no modelo da difusão líquida melhora a estimativa do coeficiente de difusão durante a secagem do feijão. O coeficiente de difusão aumenta com a elevação da temperatura, apresentando valores entre  $2,21 \times 10^{-10}$  e  $9,08 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ , considerando a contração volumétrica dos grãos. A relação do coeficiente de difusão com a temperatura de secagem foi descrita pela equação de Arrhenius e apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida no processo de secagem do feijão de  $40,08 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

Saykova et al. (2009) utilizaram modelo de difusão tridimensional em coordenadas cartesianas para prever o coeficiente de difusão de placas retangulares e sólidos na forma de paralelepípedo a partir de dados experimentais de secagem de folhas de espinafre e morango. A condição de contorno aplicada foi de primeira espécie e a metodologia desenvolvida estendeu

a solução analítica, aproximada pelo primeiro termo da série, para sistema tridimensional pelo princípio da superposição. O efeito da geometria na difusividade efetiva estimada foi numericamente examinado e verificou-se que o modelo tridimensional é mais preciso. A eficácia dos modelos desenvolvidos é fortemente dependente da rapidez de convergência das séries das soluções exatas.

Silva et al. (2010) propuseram um método para a determinação simultânea da difusividade efetiva e do coeficiente de transferência de massa convectivo de sólidos que podem ser considerados como cilindros infinitos. O método inverso foi utilizado para ajustar a solução analítica da equação de difusão, com condição de contorno convectiva, aos dados experimentais de secagem em camada fina de produtos com forma cilíndrica. O método proposto foi aplicado a cinética de secagem de arroz em casca, usando dados experimentais disponíveis na literatura. A partir dos indicadores estatísticos foi possível concluir que descrever o processo de difusão com condição de contorno convectiva é mais preciso comparado com a descrição com condição de contorno do primeiro tipo, comumente encontrada na literatura.

Costa et al. (2011) estudaram o processo de secagem das sementes de crambe (*Crambe abyssinica*) em diferentes condições de ar. As sementes de crambe utilizadas foram colhidas com teor de água de 0,26 (b.s.) e secadas até o teor de 0,09 (b.s.). As temperaturas do ar de secagem foram 30, 40, 50, 60 e 70°C e umidade relativa 37,4; 22,3; 14,0; 8,3 e 5,1%, respectivamente. Dentre os modelos analisados para representar a secagem das sementes de crambe, o modelo de Wang e Singh foi o que melhor se ajustou aos dados nas diferentes condições de secagem. A solução analítica do modelo de difusão líquida foi obtida considerando a geometria esférica e condição de contorno do primeiro tipo. A relação do aumento do coeficiente de difusão com a elevação da temperatura do ar de secagem foi descrita por meio da equação de Arrhenius.

Morais et al. (2013) ajustaram diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais de secagem do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). Os grãos de feijão-caupi foram submetidos à secagem sob as temperaturas de 25, 35, 45 e 55 ± 1°C em secador experimental até o teor de água de aproximadamente 13% b.s. Consideraram 12 modelos empíricos e o modelo de difusão líquida em coordenadas esféricas com condição de contorno do primeiro tipo. Dentre os modelos empíricos considerados, o que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o modelo de Henderson e Pabis modificado. Verificou-se que o coeficiente de difusão aumenta com a elevação da temperatura, apresentando valores entre 8,84 x 10<sup>-8</sup> e 20,17 x 10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, para a faixa de temperatura de 25 a 55 °C, respectivamente. A relação do



coeficiente de difusão com a temperatura de secagem foi descrita pela equação de Arrhenius, o que permitiu determinar a energia de ativação ( $27,16 \text{ kJ mol}^{-1}$ ) associada ao processo de secagem dos grãos de feijão-caupi.

Silva et al. (2013a) aplicaram o modelo de difusão com condição de contorno de primeira espécie e geometria cilindro infinito para descrever a secagem e umidificação de grãos de bico (*Cicer arietinum* L.). Além disso, uma nova equação empírica é proposta para descrever os processos mencionados e o modelo de Page também foi ajustado aos dados experimentais. De acordo com os resultados, os dois modelos empíricos descrevem bem a secagem e umidificação, mas o modelo proposto fornece os melhores indicadores estatísticos. Segundo os autores, a utilização do modelo de difusão, além de fornecer informações do que acontece no interior do produto durante o processo de secagem, possibilita determinar as difusividades eficazes para a secagem com temperaturas do ar de 40, 50 e 60°C e também a energia de ativação associada ao processo.

Farias et al. (2013) propuseram uma solução numérica para a equação de difusão aplicada a sólidos com geometria arbitrária usando malhas estruturadas não-ortogonais para a condição de contorno do primeiro tipo. A formulação matemática tridimensional e o formalismo numérico para discretizar a equação de difusão, utilizando o método dos volumes finitos, incluindo análise numérica da solução computacional foram apresentados. Para validar a solução proposta, os resultados obtidos foram comparados com a solução numérica disponível na literatura e uma boa concordância foi observada. A solução numérica proposta foi aplicada para descrever transferência de massa no interior de telhas cerâmicas durante a secagem. Uma técnica de otimização, utilizando conjuntos de dados experimentais, foi aplicada para estimar as propriedades de transporte. A partir dos parâmetros estatísticos, foi possível concluir que a solução numérica descreve de forma satisfatória os processos de secagem.

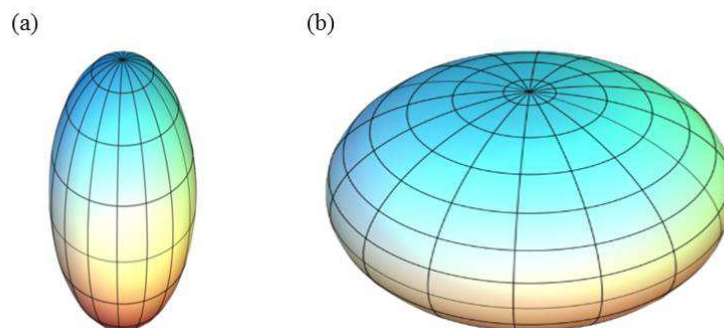
### **2.3.1.1 Difusão em corpos esferoidais**

No estudo de processos de secagem de sólidos com forma arbitrária, algumas discrepâncias são encontradas em virtude dos modelos matemáticos não representarem fielmente a geometria do corpo. Desta forma, é de fundamental importância considerar o fator forma do sólido no desenvolvimento dos modelos. Neste caso, espera-se que os desvios entre os resultados teóricos e experimentais sejam minimizados. As simplificações geométricas também facilitam a solução numérica da equação de difusão. Entretanto, este procedimento,

embora normalmente apresente bons resultados, às vezes não descreve de forma satisfatória os processos envolvidos, caso a forma geométrica do objeto em estudo seja significativamente diferente da considerada (CARMO, 2004; CIHAN et al., 2008; SANTOS et al., 2010; FARIAS, 2011).

Um elipsoide prolato (Figura 2.7a) é um sólido de revolução obtido a partir da rotação de uma elipse em torno do seu eixo maior, já o elipsoide oblato (Figura 2.7b) é obtido a partir da rotação da elipse em torno do seu eixo menor. Por exemplo, a banana, casulo do bicho-de-seda, grão de arroz e trigo são corpos com forma geométrica semelhante ao elipsoide prolato. Já a lentilha e acerola são exemplos de produtos que apresentam formas semelhantes a um elipsoide oblato.

Figura 2.7. Elipsoide: (a) prolato; (b) oblato



Haji-Sheikh e Sparrow (1966) descreveram uma solução analítica para o problema de difusão de calor em esferoide prolato considerando-se temperatura constante na superfície. Resultados das temperaturas no centro e no ponto focal são apresentados para vários esferoides.

Haji-Sheikh (1986), utilizando o método integral baseado em Galerkin, apresenta uma solução para a equação de difusão. A região de interesse pode constituir-se de sub-regiões com propriedades termofísicas variável espacialmente em uma fronteira externa irregular. Em particular, o método foi aplicado para obter solução da equação de difusão para uma geometria do tipo esferoidal e assumindo que a temperatura na superfície depende do tempo, mas independe das coordenadas espaciais.

Lima (1999) e Carmo (2004) consideraram na modelagem matemática o efeito do encolhimento durante o processo de difusão em sólidos esferoidais prolato e oblato, respectivamente. Ambos assumiram que o material se contrai linearmente com o teor de

umidade e utilizaram a seguinte equação para determinar o volume do corpo em qualquer instante t:

$$V(t) = V_0(B_1 + B_2\bar{M}) \quad (2.29)$$

onde  $\bar{M}$  é o teor de umidade médio e  $B_1, B_2$  são parâmetros a serem determinados.

Lima e Nebra (2000) consideraram o efeito do encolhimento na difusão de umidade durante o processo de secagem e aplicaram o método dos volumes finitos para resolver o problema de encolhimento e transporte de umidade simultâneos em corpos esferoidais prolatos. Equações adimensionais para difusão e encolhimento volumar e superficial foram dadas, e soluções numéricas, para o caso bidimensional, com vários coeficientes de encolhimento foram apresentadas. A análise dos resultados evidencia que a taxa de secagem é maior quando ocorre encolhimento, em comparação à obtida quando não se considera este efeito, e que esta mesma taxa cresce proporcionalmente ao aumento do coeficiente de encolhimento.

Oliveira e Lima (2002) apresentaram uma solução analítica para a equação de difusão em coordenadas esferoidais prolatas considerando propriedades de transporte contantes e condição de contorno convectiva. A solução é obtida pelo método de separação de variáveis e envolve equações transcendentais, funções de Bessel esférica e polinômios de Legendre de ordem alta. A solução foi utilizada para prever a distribuição de umidade num elipsoide prolato durante o processo de secagem. Os resultados analíticos são comparados com resultados numéricos da literatura e uma boa concordância foi obtida.

Lima, D. et al. (2004b) apresentaram uma solução analítica para prever o transporte de calor e massa em sólidos esferoidais, sem considerar o encolhimento do produto. A equação de difusão, escrita em coordenadas cilíndricas, foi resolvida via método integral baseado em Galerkin para uma condição de contorno de equilíbrio, considerando o coeficiente de difusão constante durante todo o processo. As distribuições de umidade e temperatura foram obtidas e analisadas. Verificou-se que os sólidos com maior razão de área/volume secam mais rápido e que o modelo matemático desenvolvido pode ser empregado para resolver problemas que envolvam processos de difusão, tais como secagem, umidificação, aquecimento e resfriamento, desde que a forma geométrica do corpo seja a de um disco circular, um cilindro infinito, uma esfera ou elipsoides.

Carmo e Lima (2005) estudaram de forma teórica a secagem de lentilha. O modelo considerado envolve a equação de difusão bidimensional escrita no sistema de coordenadas

esferoidal oblato considerando o efeito da variação de volume, condição de contorno convectiva na superfície e propriedades termofísicas variáveis. A equação foi discretizada utilizando o método dos volumes finitos e o sistema de equações lineares foi resolvido pelo método iterativo de Gauss-Seidel. Para validar o modelo, os resultados numéricos do teor de umidade médio foram comparados com os dados de oito experimentos e uma boa concordância foi obtida. Os coeficientes de difusão para todos os experimentos foram determinados utilizando a técnica dos mínimos quadrados e verificou-se que eles aumentam fortemente com o aumento da temperatura. O modelo considerado é preciso e eficiente para simular muitos problemas de difusão, tais como: aquecimento, resfriamento, umidificação e secagem em sólidos esféricos oblato incluindo esfera e disco circular como casos limites.

Hacihafizoğlu et al. (2008) simularam a secagem de arroz em casca baseando-se no modelo da difusão líquida aplicada à sólidos elipsoidais prolatos. A solução da equação de difusão foi ajustada aos dados experimentais e, ao compararem os resultados experimentais com os obtidos analiticamente para as formas esféricas, esféricas e cilíndricas, concluíram que a geometria esférica prolata teve uma melhor concordância.

Carmo e Lima (2008) apresentaram solução numérica da equação de difusão para descrever transferência de massa no interior de esféricos oblato, considerando-se coeficiente de difusão constante e condição de contorno convectiva. A equação de difusão, escrita no sistema de coordenadas esféricas oblato, foi considerada para o caso bidimensional. O método dos volumes finitos foi empregado para discretizar a equação básica. O conjunto de equações lineares foi resolvido de forma iterativa, utilizando-se o método de Gauss-Seidel. Conforme as aplicações, os efeitos do número de Fourier, do número de Biot e a razão de aspecto do corpo sobre a taxa de secagem e o teor de umidade durante o processo foram apresentados. Para validar a metodologia, os resultados foram comparados com resultados analíticos de teor de umidade encontrados na literatura e uma boa concordância foi obtida. O modelo pode ser usado em muitos problemas físicos de transferência de massa, tais como: difusão em disco circular, esferas e esféricos oblato e também em casos que incluem coeficiente de difusão variável e outras condições de fronteira, com pequenas modificações do procedimento numérico.

Santos et al. (2010) apresentaram solução analítica da equação de difusão para o estudo teórico da secagem de sólidos com geometria arbitrária, onde utilizou-se o método integral baseado em Galerkin e considerou-se propriedades termofísicas constantes e condições de contorno convectiva (terceira espécie). Resultados da distribuição do teor de umidade no

interior de sólidos com geometria arbitrária e sua respectiva cinética de secagem são apresentados e analisados. Observou-se que, à medida que o número de Fourier aumenta, há uma queda nos níveis do teor de umidade e que, com o aumento do número de Biot, o processo de secagem é mais rápido.

Santos, J. (2013) apresentou uma solução analítica da equação de difusão transiente para descrever o transporte de calor e massa em sólidos com forma complexa, tendo como base a teoria de difusão líquida, usando o método integral baseado em Galerkin, e considerando condições de contorno convectiva e propriedades termofísicas constantes. Resultados do teor de umidade e da temperatura dos grãos de trigo durante a secagem foram apresentados e comparados com os dados da literatura e uma boa aproximação foi verificada. O autor concluiu que os resultados obtidos são consistentes e o modelo apresentado pode ser usado para estudar problemas de transferência de calor e massa simultâneos em produtos agrícolas com geometria semelhante ao esferoide prolato. Observou-se também que, no processo de secagem, a perda de massa é mais lenta que o aquecimento do sólido, uma vez que a difusividade térmica do material é bem superior a difusividade de massa.

## 2.4 O método de Galerkin

O método de Galerkin e suas generalizações são usados tanto na teoria de equações diferenciais, como em mecânica, termodinâmica, hidrodinâmica e também no desenvolvimento de métodos numéricos como o método dos elementos finitos (COURANT e HILBERT, 1953; PETROVSKY, 1954; THOMAS, 1995; DAUTRAY e LIONS, 1998; ASSAN, 2003). É um método que permite obter solução analítica aproximada de problemas de valores de contorno em subespaços de dimensão finita.

Para um problema de valor de contorno cuja solução é  $u$ , o método de Galerkin a ser apresentado é um método analítico que, dadas as funções  $f_i$  (chamadas de funções de base ou funções de Galerkin que satisfazem certas restrições), permite determinar as constantes  $\alpha_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  de maneira tal que a função

$$u_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i \quad (2.30)$$

se aproxime de  $u$ , para  $n \rightarrow \infty$ , em algum sentido, isto é, convergência com respeito a alguma norma (convergência forte) ou convergência fraca.

Considere  $H$  um espaço de Hilbert (espaço com produto interno que é completo com a norma induzida pelo produto interno),  $L:U \rightarrow H$  um operador linear definido no subespaço  $U \subset H$ , denso em  $H$ . Dado um elemento  $g \in H$  procura-se a solução  $u \in U$  tal que,

$$L[u] = g \text{ em } \Omega \quad (2.31)$$

satisfazendo a condição de contorno homogênea:

$$u|_S = 0 \quad (2.32)$$

onde  $S$  denota a fronteira de  $\Omega$ .

Seja  $\{f_i\}_{i \in \mathbb{N}}$  uma base de  $U$  e, para cada  $n = 1, 2, 3, \dots$ , seja  $U_n = [f_1, f_2, \dots, f_n]$  o subespaço de  $U$  gerado pelas  $n$  primeiras funções de  $\{f_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ . Assim, um elemento (função) arbitrário de  $U_n$  é da forma:

$$u_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i, \quad \alpha_i \in \mathbb{R}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.33)$$

O método de Galerkin consiste na busca de aproximações  $u_n$  que são projeções ortogonais de  $u \in U$  em um subespaço de dimensão finita  $U_n \subset H$ , tal que  $L[u_n] - g$  seja ortogonal as primeiras  $n$  funções de  $\{f_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ , ou seja,

$$\int_{\Omega} (L[u_n] - g) f_j d\Omega = 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (2.34)$$

Os coeficientes  $\alpha_i$  são determinados a partir a Equação (2.34). Substituindo (2.33) em (2.34), obtém-se:

$$\int_{\Omega} \left( L \left[ \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i \right] - g \right) f_j d\Omega = 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (2.35)$$

Sendo L um operador linear, a Equação (2.35) conduz a:

$$\sum_{i=1}^n \int_{\Omega} L[f_i] f_j \alpha_i d\Omega = \int_{\Omega} g f_j d\Omega, \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.36)$$

que é um sistema de equações algébricas. Na forma matricial, tem-se:

$$K\alpha = g \quad (2.37)$$

onde,

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix}, \quad (2.38)$$

K denota uma matriz quadrada de ordem  $n \times n$  e g é uma matriz de ordem  $n \times 1$  cujos elementos são dados, respectivamente, por:

$$K_{ij} = \int_{\Omega} L[f_i] f_j d\Omega \quad (2.39)$$

$$g_j = \int_{\Omega} g f_j d\Omega \quad (2.40)$$

A solução de Galerkin para uma equação diferencial parcial elíptica está bem desenvolvida. Na maioria dos casos, o método de Galerkin é capaz de lidar com equação diferencial parcial em uma fronteira irregular. O método integral baseado em Galerkin para equação de difusão com condições de contorno homogênea e não-homogênea é apresentado na literatura (HAJI-SHEIKH, 1986; PAYNE et al., 1986; HAJI-SHEIKH e MASHENA, 1987; HAJI-SHEIKH e LAKSHMINARAYANAN, 1987). Neste caso, a solução para a equação de difusão é decomposta em duas funções: a solução quase uniforme que é responsável por todas as condições de fronteira não-homogêneas e a solução transiente que leva a um problema de autovalores. O método integral baseado em Galerkin é usado para fornecer soluções de ambos os problemas homogêneos e não-homogêneos.

A solução analítica da equação de difusão será apresentada no Capítulo 3 utilizando-se o método integral baseado em Galerkin para condições de contorno homogêneas (HAJI-SHEIKH e LAKSHMINARAYANAN, 1987; BECK et al., 1992; LIMA, D. et al., 2004a; LIMA, D. et al., 2004b; LIMA, A. et al., 2004; SANTOS et al., 2010). O problema em estudo conduz à necessidade de escrever-se uma dada função como uma série de autofunções (funções de Galerkin) de problemas de autovalor. A escolha das funções de Galerkin depende essencialmente do contorno da região considerada e, dependendo da geometria, requer um esforço adicional para sua obtenção.



## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAL E MÉTODOS**

Neste capítulo, os procedimentos experimentais e teóricos são estabelecidos. O método integral baseado em Galerkin (Método GBI) foi usado para obter solução analítica da equação de difusão. A partir da solução obtida, os modelos matemáticos são desenvolvidos para simular o transporte de calor e massa na secagem contínua e intermitente de sólidos com geometria elipsoidal. Em seguida, são apresentados os procedimentos computacionais utilizados na simulação.

#### **3.1 Metodologia experimental**

##### **3.1.1 Material**

Nesta pesquisa foram utilizados grãos de arroz em casca da variedade BRSMG Conai (arroz de terra alta ou sequeiro agulhinha). A escolha do grão de arroz está relacionada com a sua forma geométrica que é semelhante a um elipsoide prolato e, portanto, adequado para aplicar os modelos matemáticos.

A cultivar BRSMG Conai foi oriunda do cruzamento entre as cultivares Confiança e Aimoré, realizado na Embrapa Arroz e Feijão, em 1998. Procurou-se com esse cruzamento reunir em uma só cultivar as características de precocidade da Aimoré com a qualidade de grão longo fino da Confiança, o que foi obtido com a BRSMG Conai. As sementes obtidas foram enviadas a Minas Gerais em novembro de 1999, quando se realizou o primeiro plantio para

avanço de geração e seleção. A cultivar de arroz BRSMG Conai é a primeira de terras altas superprecoce que possui grãos agulhinhas, que são os preferidos e mais valorizados do mercado (EPAMIG, 2016).

O Instituto de Pesquisa Agropecuária (IPA) disponibilizou 500 g de grãos de arroz BRSMG Conai com teor de água de 14% (b.u) selecionados para o plantio com grande poder germinativo, o que possibilitou obter o produto úmido *in natura* sem necessidade de aplicar processo de umidificação dos grãos antes dos experimentos de secagem. Os grãos foram cultivados no Assentamento Florestan Fernandes na cidade de Goiana-PE. Maiores informações sobre o cultivo do grão de arroz BRSMG Conai são apresentadas em Silva (2016).

### 3.1.2 Métodos experimentais

A colheita dos grãos verdes foi realizada no campo manualmente e as amostras foram conduzidas semanalmente, em saco plástico hermético totalmente fechado (Figura 3.1), até o Laboratório Experimental de Térmicas e Fluidos da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da UFCG (Campus Campina Grande) onde iniciou-se os experimentos.

Figura 3.1. Amostras de grãos de arroz em casca BRSMG Conai



Conjuntos de dados experimentais de secagem contínua e intermitente de grãos de arroz em casca (BRSMG Conai) foram obtidos para diferentes condições de secagem.

Os experimentos de secagem contínua e intermitente em leito fixo foram realizados com arroz em casca tipo BRSMG Conai, em diferentes temperaturas (40, 50, 60 e 70°C). Considerou-se uma camada fina usando uma bandeja perfurada, permitindo que o ar flua através

da amostra de arroz em casca. Como o objeto em estudo era identificar o efeito do período de têmpera ( $\tau$ ) na taxa de secagem, cada conjunto de experimentos foi conduzido com temperatura e velocidade do ar fixadas e o período de têmpera e número de pausas foram variados.

Os grãos de arroz em casca de peso total aproximadamente igual a 20 g foram espalhados em cada bandeja (Figura 3.2) de modo a formar uma camada fina. A secagem ocorreu em estufa com movimento mecânico de fabricação FANEM (mod. 320E) com controlador de temperatura digital (Figura 3.3).

Figura 3.2. Bandejas com grãos de arroz em casca BRSMG Conai *in natura*



Em cada conjunto de experimentos, três ou quatro bandejas foram colocadas na estufa e os grãos foram secos usando ar quente com temperatura e velocidade constantes. Em uma das amostras foi aplicada a técnica de secagem contínua ( $\tau = 0$ ) e as demais foram submetidas a secagem intermitente com uma, duas ou três pausas e  $\tau$  variando de 30, 60, 120, 180 e 240 min. Os experimentos com uma pausa ocorreram nas seguintes condições: inicialmente aplicação contínua de calor durante 15 min ou 30 min, seguido de um período de têmpera, e depois aplicação contínua de calor até o final do processo de secagem. Para o experimento na temperatura de  $T = 40^{\circ}\text{C}$  com duas pausas, os grãos foram submetidos a período de secagem contínua durante 15 min, seguido de uma pausa de 30 min, subsequente período de secagem de 30 min e novamente uma pausa de 30 min. Para os experimentos na temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$  com duas ou três pausas foram intercalados períodos de secagem de 15 min. Após o último período de pausa, a aplicação contínua de calor ocorreu até o final do processo de secagem. O tempo total de processo foi de 1035 min, 825 min, 765 min e 675 min, para os experimentos nas temperaturas de 40, 50, 60 e  $70^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

Figura 3.3. Estufa com movimento mecânico de fabricação FANEM mod. 320E



A temperatura do ar de secagem foi ajustada para o valor desejado com uma unidade de controle de precisão  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ . A perda de massa foi verificada utilizando-se o método gravimétrico. O progresso do processo de secagem foi seguido pela pesagem das peneiras contendo grãos de arroz em casca em intervalos regulares de tempo em uma balança digital de precisão  $\pm 0,001\text{ g}$  (Figura 3.4a). Nos experimentos de secagem contínua, a pesagem ocorreu a cada 5 min nos primeiros 15 min de secagem e posteriormente, a cada 30 min.

A temperatura e umidade relativa do ar ambiente foram medidas usando um Termo-Higrômetro digital (Figura 3.4b). A umidade relativa do ar de secagem foi obtida utilizando-se o software CATT. No momento da pesagem também foi verificada a temperatura do produto utilizando-se um Termômetro tipo Infravermelho (Figura 3.4c).

Figura 3.4. Instrumentos de medição: (a) Balança de precisão digital; (b) Termo-higrômetro digital; e (c) Termômetro tipo pistola infravermelho digital



De acordo com Ece e Cihan (1993), a taxa de remoção de umidade de grãos de arroz em casca é muito alta na etapa inicial do processo de secagem e considerável quantidade de umidade é removida nos primeiros 20 min de secagem. As curvas de secagem, portanto, começam gradualmente a se estabilizarem. Por esta razão, na secagem intermitente as amostras foram submetidas a um período de secagem contínua inicial de 15 min. O produto foi pesado em intervalos de tempo variando de 5 min no início da secagem e, após o período de têmpera, a pesagem ocorreu a cada 30 min. A pesagem das três bandejas foi concluída em aproximadamente 1 min.

Durante o período de têmpera, duas amostras foram retiradas da estufa e colocadas em recipientes herméticos (Figura 3.5), em temperatura ambiente. Neste período, a amostra de secagem contínua permaneceu sob ação do calor, de forma que a estufa ficou sempre funcionando durante a realização dos experimentos. A secagem ocorreu até que a massa atingisse o seu valor de equilíbrio. Em seguida, as amostras foram colocadas novamente na estufa a temperatura de 105°C por 24 h para medição da matéria seca.

Figura 3.5. Amostras em recipientes herméticos durante o período de repouso



As dimensões de 100 grãos de arroz em casca (BRSMG Conai) *in natura* foram obtidas, antes da secagem, utilizando-se um paquímetro digital (Figura 3.6). A espessura, comprimento e largura são denotados por  $a'$ ,  $b'$  e  $c'$ , respectivamente, como ilustrado na Figura 3.7. Na Tabela 3.1 são apresentados os valores médios das dimensões, juntamente com o desvio padrão.

Informações gerais sobre o ar de secagem, número de pausas e duração da têmpera são apresentadas na Tabela 3.2 para cada experimento.

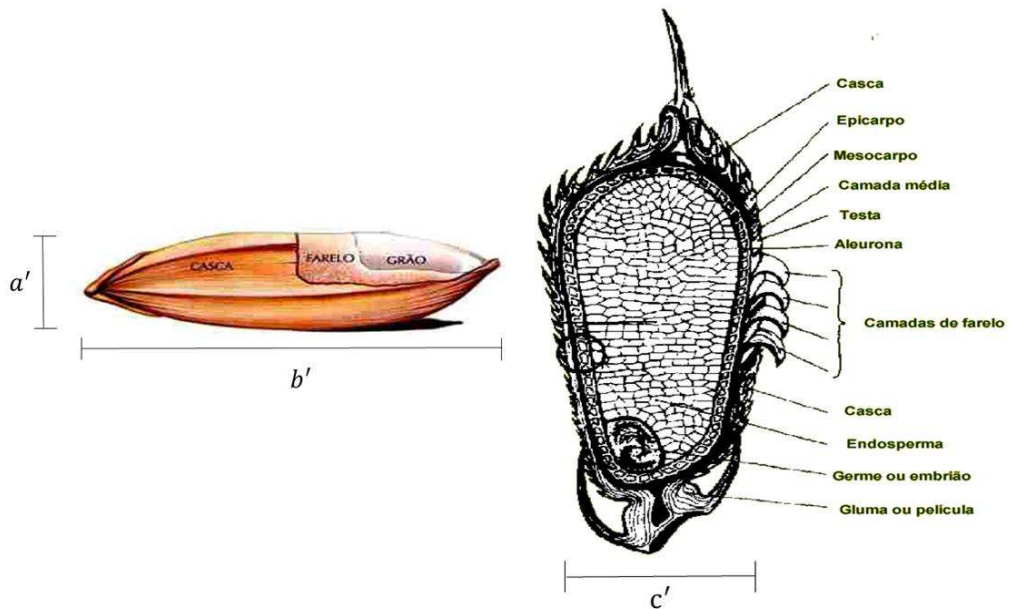
Figura 3.6. Paquímetro digital



Tabela 3.1. Dimensões do grão de arroz (BRSMG Conai) *in natura* com casca

	Espessura ( $a'$ ) (mm)	Comprimento ( $b'$ ) (mm)	Largura ( $c'$ ) (mm)
Média	1,92	9,24	2,27
Desvio Padrão	0,068937	0,436263	0,087207

Figura 3.7. Grão de arroz em casca e sua seção transversal



Fonte: Adaptado de Brooker et al. (1992)

Tabela 3.2. Parâmetros para cada experimento de secagem de arroz em casca

	Ar					Têmpera		
	Estufa			Ambiente		N° de pausas	$t_i^*$ (min)	$(\tau)^{**}$ (min)
	T (°C)	UR (%)	v (m/s)	T (°C)	UR (%)			
E1	40	32,38	0,04	28	63,21	0	-	0
E2	40	32,38	0,04	28	63,21	1	15	30
E3	40	32,38	0,04	28	63,21	1	15	60
E4	40	32,38	0,04	28	63,21	2	15	30
							75	30
E5	50	18,57	0,05	27,99	60,67	0	-	0
E6	50	18,57	0,05	27,99	60,67	1	15	60
E7	50	18,57	0,05	27,99	60,67	1	15	120
E8	60	11,31	0,06	27,05	63,17	0	-	0
E9	60	11,31	0,06	27,05	63,17	1	15	120
E10	60	11,31	0,06	27,05	63,17	1	15	240
E11	70	7,41	0,07	27,69	62,23	0	-	0
E12	70	7,41	0,07	27,69	62,23	1	15	120
E13	70	7,41	0,07	27,69	62,23	1	15	180
E14	70	7,40	0,07	26,38	67,18	0	-	0
E15	70	7,40	0,07	26,38	67,18	1	30	120
E16	70	7,40	0,07	26,38	67,18	2	15	60
							90	60
E17	70	7,40	0,07	26,38	67,18	3	15	60
							90	60
							165	60

\*  $t_i$  refere-se ao tempo de início da têmpera.

\*\*  $\tau$  representa o período de têmpera.

## 3.2 Metodologia matemática

### 3.2.1 O modelo

O modelo físico-matemático para o processo de secagem de um sólido, que pode ser influenciado por condições internas e externas e mecanismos de migração de umidade e fluxo de calor no interior do material, é apresentado a seguir.

Seja  $\Omega$  um aberto e limitado do  $\mathbb{R}^3$ , com fronteira  $S$ . A partir da equação geral de transporte aplicada a um volume de controle infinitesimal, quando o termo advectivo é nulo e na ausência de geração da grandeza  $\Phi$ , obtém-se a equação de difusão simplificada (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992; MALISKA, 2004):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi), \text{ em } \Omega, t > 0 \quad (3.1)$$

onde  $\Gamma^\Phi$  e  $\lambda$  são propriedades termofísicas,  $\Omega$  denota o domínio da posição e  $t$  representa o tempo.

A solução de problemas de difusão para várias situações físicas de interesse muitas vezes requer a necessidade de estabelecer determinadas hipóteses na descrição do processo físico. Nestes casos,  $\Omega$  denota o interior de um sólido em que ocorre o transporte da matéria ou energia. Assim, uma das hipóteses está relacionada com a geometria do sólido. A fim de permitir a solução do problema físico, as seguintes hipóteses foram consideradas: (a) o sólido é homogêneo e isotrópico; (b) as propriedades termofísicas são constantes ao longo do processo; (c) as condições de contorno são homogêneas.

Para análises considerando a condição de contorno convectiva homogênea, que é uma combinação linear dos valores da função  $\Phi$  e de sua derivada especificados na fronteira de  $\Omega$ , tem-se:

$$-\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{n}} \Big|_S = h\Phi|_S, \quad t > 0 \quad (3.2)$$

onde  $h$  denota o coeficiente de transferência convectivo e  $\vec{n}$  é o vetor unitário normal exterior a  $S$ . Se  $h$  tende para infinito, tem-se a condição de Dirichlet homogênea ( $\Phi|_S = 0$ ). Quando  $h$  tende para zero, tem-se a condição de Neumann homogênea ( $\frac{\partial \Phi}{\partial \vec{n}} \Big|_S = 0$ ).



### 3.2.2 Solução da equação de difusão via método integral baseado em Galerkin

O método apresentado nesta seção utiliza as funções e procedimentos de Galerkin e, portanto, tem as mesmas limitações que o método de Galerkin. É uma ferramenta eficiente para fornecer solução da equação de difusão em regiões com fronteira irregular. O algoritmo apresentado está voltado para uma solução generalizada da Equação (3.1) com condições de contorno homogêneas e considerando-se que no início do processo de difusão a grandeza  $\Phi$  é descrita por:

$$\Phi(x, 0) = g(x) \text{ em } \Omega \quad (3.3)$$

onde  $g$  é uma função dada.

Procura-se solução da Equação (3.1) da seguinte forma (HAJI-SHEIKH e MASHENA, 1987):

$$\Phi(x, t) = \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n(x) \exp(-\gamma_n t) \quad (3.4)$$

que consiste em uma solução aproximada com  $N$  termos, onde  $\Psi_n(x)$  é escolhida satisfazendo as condições de contorno homogêneas de modo que (3.4) seja solução da Equação (3.1).

Substituindo (3.4) na Equação (3.1), para cada  $n = 1, \dots, N$ , tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\lambda C_n \Psi_n(x) \exp(-\gamma_n t)] = \nabla \cdot \nabla [\Gamma^\Phi C_n \Psi_n(x) \exp(-\gamma_n t)] \quad (3.5)$$

Os parâmetros  $C_n$  e  $\gamma_n$  são constantes e  $\Psi_n(x)$  independe do tempo  $t$ , então, calculando a derivada temporal, a equação (3.5) é equivalente a:

$$\lambda C_n \Psi_n(x) (-\gamma_n) \exp(-\gamma_n t) = C_n \exp(-\gamma_n t) \nabla^2 [\Gamma^\Phi \Psi_n(x)] \quad (3.6)$$

ou seja,

$$\left[ \lambda \gamma_n \Psi_n(x) + \nabla^2 [\Gamma^\Phi \Psi_n(x)] \right] C_n \exp(-\gamma_n t) = 0 \quad (3.7)$$

Sendo  $\exp(-\gamma_n t) \neq 0$  e considerando-se  $C_n \neq 0$ , pois caso contrário, a solução seria nula, obtém-se de (3.7) a equação diferencial:

$$L[\Psi_n] = \nabla^2[\Gamma^\Phi \Psi_n(x)] + \lambda \gamma_n \Psi_n(x) = 0 \quad (3.8)$$

com  $\Psi_n: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  satisfazendo a condição de contorno homogênea.

Portanto, a solução transiente (3.4) conduz a um problema de autovalores. A função  $\Psi_n(x)$  torna-se autofunção se o problema admite solução exata. No entanto, para muitos problemas, a função  $\Psi_n(x)$  pode ser construída a partir de um conjunto de funções definidas em  $\Omega$ , cada uma satisfazendo as condições de contorno homogêneas mas não necessariamente a Equação (3.8) (HAJI-SHEIKH e MASHENA, 1987). Elas são selecionadas de acordo com o método de Galerkin. Portanto, a função  $\Psi_n(x)$  pode ser escrita como:

$$\Psi_n(x) = \sum_{j=1}^N d_{nj} f_j(x) \quad (3.9)$$

onde as  $N$  funções de base são escolhidas em um conjunto completo  $\{f_j(x)\}$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots$  de funções linearmente independentes,  $f_j$  definidas em  $\Omega$ , satisfazendo as condições de contorno homogêneas.

Os coeficientes  $d_{nj}$  e os autovalores  $\gamma_n$  são determinados de modo que  $L[\Psi_n]$  seja ortogonal às primeiras  $N$  funções do conjunto completo. Tem-se, portanto,

$$\int_{\Omega} L \left[ \sum_{j=1}^N d_{nj} f_j(x) \right] f_i d\Omega = 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (3.10)$$

ou seja,

$$\sum_{j=1}^N d_{nj} \left[ \int_{\Omega} f_i \nabla^2[\Gamma^\Phi f_j(x)] d\Omega + \gamma_n \int_{\Omega} \lambda f_i(x) f_j(x) d\Omega \right] = 0 \quad (3.11)$$

para cada  $i = 1, 2, \dots, N$ .

Na forma matricial, a Equação (3.11) pode ser escrita como segue:

$$(A + \gamma_n B)d_n = \bar{O}, \quad (3.12)$$

onde  $\bar{O}$  é a matriz nula de ordem  $N \times 1$ , A e B são matrizes quadradas de ordem  $N \times N$  e seus elementos são calculados, respectivamente, por:

$$a_{ij} = \int_{\Omega} f_i \nabla \cdot [\Gamma^{\Phi} \nabla f_j(x)] d\Omega \quad (3.13)$$

e

$$b_{ij} = \lambda \int_{\Omega} f_i(x) f_j(x) d\Omega \quad (3.14)$$

Usando as identidades  $\nabla \cdot (vw) = v(\nabla \cdot w) + (\nabla v) \cdot w$  (HAY, 1953) e  $\int_{\Omega} \nabla \cdot w d\Omega = \int_S w \cdot \vec{n} dS$  (Identidade de Green ou teorema da divergência de Gauss) (KAPLAN, 1973; MUNEM e FOULIS, 1978), a Equação (3.13) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} a_{ij} &= \int_{\Omega} f_i \nabla \cdot [\Gamma^{\Phi} \nabla f_j(x)] d\Omega \quad (3.15) \\ &= \int_{\Omega} \nabla \cdot [f_i \Gamma^{\Phi} \nabla f_j(x)] d\Omega - \int_{\Omega} \Gamma^{\Phi} \nabla f_i \cdot \nabla f_j d\Omega \\ &= \int_S \Gamma^{\Phi} f_i \frac{\partial f_j}{\partial \vec{n}} dS - \int_{\Omega} \Gamma^{\Phi} \nabla f_i \cdot \nabla f_j d\Omega \end{aligned}$$

onde S denota a fronteira de  $\Omega$ .

A matriz  $d_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$  é a matriz coluna de ordem  $N \times 1$ , dada por:

$$d_n = \begin{bmatrix} d_{n1} \\ d_{n2} \\ \vdots \\ d_{nN} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Os autovalores  $\gamma_n$  podem ser obtidos analiticamente se N é pequeno. Se as condições de contorno são homogêneas então as matrizes A e B são simétricas, o que simplifica o cálculo dos autovalores. Uma vez que os autovalores  $\gamma_n$  são determinados, os autovetores  $d_n$  associados

podem ser obtidos. Para cada autovalor, obtém-se de (3.12) um sistema de equações algébricas cuja solução são as componentes  $d_{n1}, d_{n2}, \dots, d_{nN}$  do autovetor associado.

Como B é simétrica, pose-se usar a decomposição de Cholesky e escrever a matriz B na forma:

$$B = GG^T \quad (3.17)$$

onde G é uma matriz triangular inferior e  $G^T$  é a sua transposta. Esta decomposição da matriz B permite, a partir da álgebra matricial elementar, escrever a equação matricial (3.12) da seguinte forma:

$$(\bar{A} + \gamma_n I)\bar{d}_n = \bar{0} \quad (3.18)$$

onde  $\bar{A} = G^{-1}AG^{-T}$ ,  $\bar{d}_n = G^T d_n$ , I é a matriz identidade de ordem  $N \times N$ ,  $G^{-1}$  e  $G^{-T}$  são as inversas de G e  $G^T$ , respectivamente.

Quando N é pequeno, os autovalores podem ser determinados analiticamente a partir do polinômio característico:

$$p(\gamma) = \det(\bar{A} + \gamma I) = 0 \quad (3.19)$$

Para  $N > 4$ , costuma-se utilizar métodos numéricos, sem fazer uso do cálculo do determinante. Como A é uma matriz simétrica, então  $\bar{A}$  também é simétrica e, portanto, o método de Jacobi pode ser utilizado para determinar os autovalores e autovetores de maneira rápida e precisa.

Observa-se que os autovetores  $\bar{d}_n$  determinados a partir da equação (3.18) são diferentes dos autovetores  $d_n$  obtidos a partir da equação (3.12). No entanto, eles estão relacionados pela equação:

$$d_n = G^{-T}\bar{d}_n \quad (3.20)$$

Após o cálculo dos autovalores  $\gamma_n$  e autovetores  $d_n$ , as autofunções  $\Psi_n$  são conhecidas e a solução (3.4) estará completa com o cálculo dos coeficientes  $C_n$ . Para isto, aplica-se a condição inicial  $\Phi(x, 0) = g(x)$ , isto é,

$$g(x) = \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n(x) \quad (3.21)$$

Analogamente a solução exata e expansão em série de Fourier, multiplica-se ambos os lados da Equação (3.21) por  $f_i$  e integrando tem-se:

$$\int_{\Omega} g(x) f_i d\Omega = \int_{\Omega} \left[ \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n(x) \right] f_i d\Omega \quad (3.22)$$

Repetindo o processo para cada função de base  $f_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , obtém-se de (3.22) um conjunto de  $N$  equações algébricas lineares que permite calcular os valores de  $C_n$ .

Por exemplo, considerando  $\Omega = (0, a)$ ,  $\alpha = k/\rho c_p$  e substituindo (3.4) na Equação (2.24) tem-se para cada  $n = 1, 2, \dots, N$ :

$$L[\Psi_n] = \frac{d^2(k\Psi_n)}{dx^2} + \rho c_p \gamma_n \Psi_n = 0 \quad (3.23)$$

com  $\Psi_n$  satisfazendo às condições de contorno:

$$\Psi_n(0, t) = \Psi_n(a, t) = 0, t > 0 \quad (3.24)$$

Tomando, em particular,  $f_j(x) = \text{sen}\left(\frac{j\pi x}{a}\right)$ ,  $j = 1, 2$  tem-se:

$$\Psi_n(x) = \sum_{j=1}^2 d_{nj} \text{sen}\left(\frac{j\pi x}{a}\right) \quad (3.25)$$

Neste caso, os elementos das matrizes  $A$  e  $B$ , usando (3.13) e (3.14) são dados, respectivamente, por:

$$a_{ij} = -k \left(\frac{j\pi}{a}\right)^2 \int_0^a \text{sen}\left(\frac{i\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{j\pi x}{a}\right) dx = 0, i, j = 1, 2 \quad (3.26a)$$

$$b_{ij} = \rho c_p \int_0^a \sin\left(\frac{i\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{j\pi x}{a}\right) dx = 0, \quad i, j = 1, 2 \quad (3.26b)$$

Agora, da Equação (3.12), obtém-se:

$$\gamma_1 = \frac{\pi^2 \alpha}{a^2}, \quad \gamma_2 = \frac{4\pi^2 \alpha}{a^2}, \quad d_{n1} = d_{n2} = 1 \quad (3.27)$$

onde  $\alpha = k/\rho c_p$ .

Portanto, a solução aproximada do problema (2.24) - (2.26) usando o método GBI é da forma:

$$\Phi(x, t) = C_1 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 \alpha}{a^2} t\right) + C_2 \sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \exp\left(-\frac{4\pi^2 \alpha}{a^2} t\right) \quad (3.28)$$

sendo as constantes  $C_1$  e  $C_2$  determinadas impondo a condição inicial  $\Phi(x, 0) = \Phi_0$ .

A solução (3.28) é idêntica aos dois primeiros termos da solução (2.28) obtida pelo método de separação de variáveis (expansão em série de Fourier) e não haverá necessidade de um grande número de valores próprios para se obter uma precisão aceitável. O método GBI promete uma convergência rápida, pelo menos quando a solução é considerada análoga à solução exata (HAJI-SHEIKH e MASHENA, 1987).

Em problema de difusão de corpos com geometria complexa,  $\Omega$  denota um sólido tridimensional e a integração em (3.26) é sobre seu volume. Neste caso, o número de funções de base é usualmente maior que 2 e o processo de escolha das funções de base torna-se complexo, sendo conveniente utilizar um software para realização dos cálculos. Em Beck et al. (1992) encontra-se um método para determinar as funções de base de acordo com a geometria e condição de contorno consideradas.

Uma vez determinado  $\Phi$  no interior do sólido em qualquer tempo de processo, pode-se calcular seu valor médio naquele instante de tempo como segue:

$$\bar{\Phi} = \frac{\int_{\Omega} \Phi \, d\Omega}{\int_{\Omega} d\Omega} \quad (3.29)$$

desde que as integrais em (3.29) existam.

### 3.2.3 A geometria do problema

Para simular o processo de secagem de grãos de arroz em casca a partir de modelos difusivos é necessário escolher a geometria que melhor representa o produto. Vários trabalhos reportados na literatura utilizaram a geometria esférica ou cilíndrica no desenvolvimento do modelo difusivo para simular secagem de arroz. Neste trabalho, foi utilizada a geometria elipsoidal prolata (Figura 3.8) no desenvolvimento dos modelos difusivos.

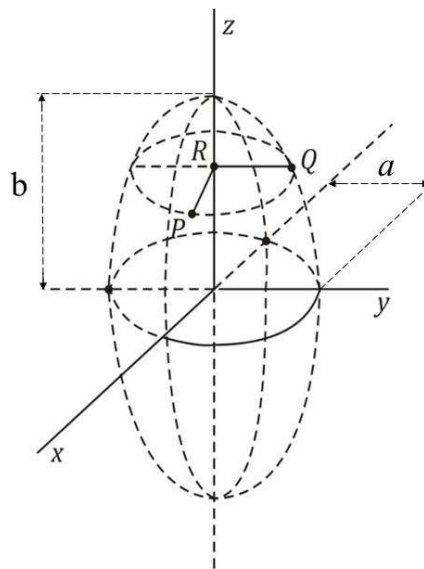
Entre os materiais que têm mesmo volume e teor de umidade, aqueles com maior área de superfície têm o maior gradiente de concentração do interior para a superfície (NISHIYAMA et al., 2006; CIHAN et al., 2008). Desta forma, é importante a geometria pressuposta para os materiais cujo comportamento de secagem será determinado.

O problema em estudo envolve a determinação da transferência de calor e massa no caso bidimensional em sólidos com geometria esferoidal prolata. A Figura 3.8 mostra o esferoide prolato que se obtém girando a elipse:

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1, b > a \quad (3.30)$$

em torno do eixo z.

Figura 3.8. Elipsoide prolato



Se  $P(x, y, z)$  é um ponto qualquer da superfície do esferoide prolato da Figura 3.8, então  $P$  pertence a uma circunferência descrita por um ponto  $Q$  da elipse, ao girar em torno do eixo  $z$ . Se  $R$  é o centro de tal circunferência, em função das coordenadas de  $P(x, y, z)$ , as coordenadas de  $R$  e  $Q$  são  $R(0, 0, z)$  e  $Q(0, r, z)$ , onde

$$\frac{r^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (3.31)$$

pois o ponto  $Q(0, r, z)$  pertence à elipse (3.30). Como  $\overline{PR}^2 = \overline{QR}^2$  segue-se que:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (3.32)$$

Agora, substituindo (3.32) em (3.31) obtém-se a equação que representa o elipsoide:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (3.33)$$

Observa-se que a interseção do esferoide prolato com o plano  $xOy$  é a circunferência:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1, z = 0 \quad (3.34)$$

Em diversos problemas físicos, as condições de contorno são tais que os valores de uma função (ou de sua derivada) são especificados em curvas ou superfícies (esferas, cilindros, etc.). Neste caso, o sistema de coordenadas cartesianas não é adequado para solucionar o problema, o que viabiliza a interligação de novos sistemas de coordenadas que sejam convenientes para descrever a fronteira do domínio a ser estudado.

A equação de uma superfície de revolução em torno do eixo  $z$  é geralmente mais simples em coordenadas cilíndricas do que em coordenadas cartesianas. Da Equação (3.31), para  $z \geq 0$ , tem-se:

$$z = b\sqrt{1 - (r/a)^2} \quad (3.35)$$

sendo  $a$  e  $b$  as medidas dos semi-eixos do elipsoide prolato.



Assim, o sólido representado na Figura 3.9 é constituído por todos os pontos cujas coordenadas cilíndricas  $(r, \theta, z)$  satisfazem as condições:

$$0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (3.36a)$$

$$0 \leq r \leq a \quad (3.36b)$$

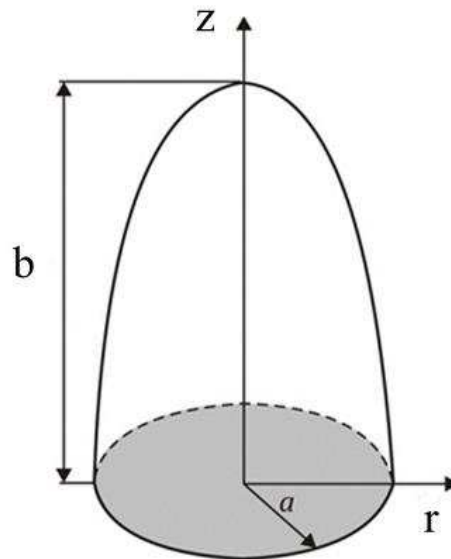
$$0 \leq z \leq b\sqrt{1 - (r/a)^2} \quad (3.36c)$$

e os pontos em coordenadas polares  $(r, \theta)$  descrevem a região limitada pela circunferência (3.34).

O volume do sólido ilustrado na Figura 3.9 é dado por:

$$V = \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} r \, dz \, dr \, d\theta = \frac{2}{3}\pi a^2 b \quad (3.37)$$

Figura 3.9. Elipsoide prolato no sistema de coordenadas cilíndricas ( $z \geq 0$ )



Variando a razão de aspecto ( $b/a$ ), o elipsoide assume as seguintes formas: (i) Se  $b > a$ , o sólido é um elipsoide prolato ( $b/a > 1$ ); (ii) Se  $b < a$ , o sólido é um elipsoide oblato ( $b/a < 1$ ); (iii) Se  $a = b$ , o sólido é uma esfera ( $b/a = 1$ ).

As dimensões características do grão de arroz em casca (BRSMG Conai), a partir de semelhança geométrica com o elipsoide prolato, são apresentadas na Tabela 3.3. O diâmetro médio é o valor médio entre a espessura ( $a'$ ) e largura ( $c'$ ) na posição central do grão (Figura 3.7). Desta forma, o semi-eixo menor  $a$  do elipsoide representado na Figura 3.9 corresponde a metade do diâmetro médio ( $a = \frac{a'+c'}{4}$ ) e o semi-eixo maior  $b$  corresponde a metade da medida do comprimento do grão ( $b = \frac{b'}{2}$ ). O volume do grão de arroz foi obtido a partir da Equação (3.37):

$$V' = \frac{4}{3} \pi a^2 b \quad (3.38)$$

e a área da superfície é dada por (MOHSENIN, 1987):

$$A = 2\pi a \left( a + b \frac{\arcsen \left[ \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}} \right]}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}}} \right) \quad (3.39)$$

onde  $a$  é a medida do semi-eixo menor,  $b$  é a medida do semi-eixo maior.

Tabela 3.3. Dimensões do grão de arroz com casca para geometria elipsoide prolato

$a$ (mm)	$b$ (mm)	$b/a$	$V(\text{mm}^3)$	$A(\text{mm}^2)$
1,05	4,62	4,40	21,33	50,04

### 3.2.4 Funções de base para a geometria elipsoidal

Para aplicar o método integral baseado em Galerkin em problemas de transferência de calor e massa, utilizando a geometria do tipo esferoide prolato, é necessário conhecer as funções de base associadas. Estas funções, além de depender da geometria do problema, devem

satisfazer as condições de contorno especificadas. O método apresentado a seguir para escolha das funções de base é reportado na literatura (BECK et al., 1992; OZISIK, 1993).

Para impor a condição de contorno de primeira espécie homogênea, é suficiente que cada função de base seja igual a zero na superfície do sólido. Desta forma, o primeiro membro  $f_1$  do conjunto de funções de base é dado pelo produto de equações que descrevem a superfície do sólido. Se uma região é delimitada por  $M$  superfícies  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M$ , então  $f_1$  é da forma:

$$f_1 = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdots \varphi_M \quad (3.40)$$

Em particular, a superfície curvada do esferoide prolato é representada pela Equação (3.35), e, neste caso, tem-se:

$$f_1(r, z) = 1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} \quad (3.41)$$

Cada membro subsequente do conjunto de funções de base é obtido multiplicando-se  $f_1$  por um elemento de um conjunto completo de funções. Por exemplo, as cinco funções de base subsequentes, no sistema de coordenadas cilíndricas, são da forma:

$$f_2(r, z) = \left(1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2}\right) r^2 = f_1 r^2 \quad (3.42)$$

$$f_3(r, z) = \left(1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2}\right) z^2 = f_1 z^2 \quad (3.43)$$

$$f_4(r, z) = \left(1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2}\right) r^4 = f_1 r^4 \quad (3.44)$$

$$f_5(r, z) = \left(1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2}\right) r^2 z^2 = f_1 r^2 z^2 \quad (3.45)$$

$$f_6(r, z) = \left(1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2}\right) z^4 = f_1 z^4 \quad (3.46)$$

Denota-se por  $f_j^{(1)}$  as funções de base que satisfazem à condição de contorno de primeira espécie homogênea. De uma maneira geral, as funções de base  $f_j^{(1)}$  são da forma:

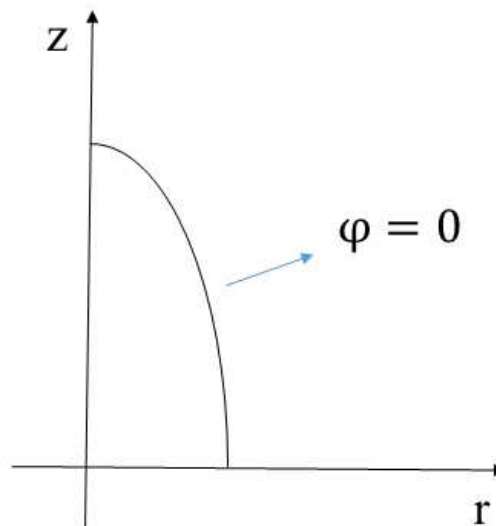
$$f_j^{(1)} = \varphi r^{m_j} z^{n_j}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad \text{e} \quad m_j, n_j = 0, 2, 4, 6, 8, \dots \quad (3.47)$$

onde  $\varphi = 1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2}$ .

Algumas funções de base, mas não todas, podem ser nulas em um ponto interior do sólido. Esta condição é assegurada já que  $f_1(r, z) \neq 0$  no interior do sólido.

Para a escolha das funções de base que satisfazem a condição de contorno de segunda espécie homogênea (fluxo nulo na superfície), considera-se a seção plana da superfície isolada com uma condição de simetria implícita sobre a superfície. Por exemplo, a Figura (3.10) mostra uma seção plana do elipsoide prolato descrito por  $\varphi = 1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 0$ , que é isolada.

Figura 3.10. Seção plana do elipsoide prolato isolada em  $\varphi = 0$



As funções de base  $f_j^{(2)}$  que satisfazem a condição de contorno de segunda espécie homogênea são definidas por (BECK et al., 1992):

$$f_j^{(2)} = f_j^{(1)}(\varphi H - 1), \quad (3.48)$$

onde o termo  $-1$  no parêntese é por conveniência de análise e não tem efeito sobre a solução final pois  $f_j^{(2)}$  pode ser multiplicada por uma constante sem perda de generalidade e  $H$  deve ser determinado. As funções  $f_j^{(1)}$  satisfazem a condição de contorno de primeira espécie ( $f_j^{(1)} = 0$ ) em toda parte, exceto na superfície  $\varphi = 0$ , que é isolada.

Uma vez que a superfície  $\varphi = 0$  é considerada isolada, então  $\frac{\partial f_j^{(2)}}{\partial \vec{n}} = 0$  em  $\varphi = 0$ .

Impondo esta última condição na equação (3.48) tem-se:

$$-\frac{\partial f_j^{(1)}}{\partial \vec{n}} + f_j^{(1)} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} \right) H = 0 \text{ na superfície } \varphi = 0 \quad (3.49)$$

De (3.49) resulta uma relação para  $H$ , dada por:

$$H = \left( \frac{\frac{\partial f_j^{(1)}}{\partial \vec{n}}}{f_j^{(1)} \frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}}} \right) \Bigg|_{\varphi=0} = \left( \frac{\nabla f_j^{(1)} \cdot \nabla \varphi}{f_j^{(1)} \nabla \varphi \cdot \nabla \varphi} \right) \Bigg|_{\varphi=0} \quad (3.50)$$

Para algumas geometrias, como é o caso do elipsoide prolato, é possível definir um conjunto de funções de base na forma polinomial com coeficientes livres. Usando esta ideia, as funções de base para o esferoide prolato, satisfazendo a condição de contorno de segunda espécie, são dadas por (HAJI-SHEIKH e LASKSHMINARAYAN, 1987):

$$f_j^{(2)} = r^{m_j} z^{n_j} (B_1 r^2 + B_2 z^2 + B_3), \quad j = 1, 2, \dots, N \text{ e } m_j, n_j = 0, 2, 4, 6 \dots \quad (3.51)$$

onde  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$  são constantes a serem determinadas impondo a condição de contorno homogênea:

$$\frac{\partial f_j^{(2)}}{\partial \vec{n}} = 0 \text{ na superfície } \varphi = 0 \quad (3.52)$$

que pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\nabla f_j^{(2)} \cdot \nabla \varphi = 0 \text{ na superfície } \varphi = 0. \quad (3.53)$$

Substituindo (3.51) em (3.53), obtém-se a seguinte igualdade polinomial:

$$\begin{aligned} & \left[ B_1 \left( \frac{m_j + 2}{a^2} + \frac{n_j}{b^2} \right) - B_2 \left( \frac{m_j}{a^2} + \frac{n_j + 2}{b^2} \right) \frac{b^2}{a^2} \right] r^2 + \\ & + \left[ B_2 \left( \frac{m_j}{a^2} + \frac{n_j + 2}{b^2} \right) b^2 + B_3 \left( \frac{m_j}{a^2} + \frac{n_j}{b^2} \right) \right] r^0 = 0 \end{aligned} \quad (3.54)$$

Como a igualdade (3.54) é válida para todo  $r$ , segue-se que:

$$\begin{cases} B_1 \left( \frac{m_j + 2}{a^2} + \frac{n_j}{b^2} \right) - B_2 \left( \frac{m_j}{a^2} + \frac{n_j + 2}{b^2} \right) \frac{b^2}{a^2} = 0 \\ B_2 \left( \frac{m_j}{a^2} + \frac{n_j + 2}{b^2} \right) b^2 + B_3 \left( \frac{m_j}{a^2} + \frac{n_j}{b^2} \right) = 0 \end{cases} \quad (3.55)$$

Tem-se, portanto, um sistema de duas equações e três variáveis  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$ . Assim, um dos coeficientes pode ser selecionado arbitrariamente (por exemplo,  $B_3 = 1$ ) e os demais são dados por:

$$B_2 = B_3 \left[ \frac{2/b^2}{\frac{m_j b^2}{a^2} + n_j + 2} - \frac{1}{b^2} \right] \quad (3.56)$$

$$B_1 = \frac{B_3}{a^2} \left[ \frac{2b^2/a^2}{\frac{(m_j+2)b^2}{a^2} + n_j} - 1 \right] \quad (3.57)$$

Observa-se que, se a grandeza de interesse não é simétrica sobre o plano  $z = 0$ , além dos  $n_j$ 's pares, devem ser incluídos os  $n_j$ 's ímpares.

As funções de base para a condição de contorno de terceira espécie homogênea são construídas a partir das funções de base que satisfazem a condição de contorno de segunda espécie. Se  $f_j^{(2)}$  satisfaz a condição de contorno de segunda espécie homogênea na superfície

$\varphi = 1 - \frac{r^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} = 0$ , então as funções de base satisfazendo a condição de contorno de terceira espécie  $f_j^{(3)}$  são definidas da seguinte forma (BECK et al., 1992):

$$f_j^{(3)} = f_j^{(2)} \left( \varphi \bar{H} + \frac{\Gamma^\Phi}{h} \right), j = 1, 2, \dots, N \quad (3.58)$$

onde  $\Gamma^\Phi$  denota a difusividade de massa ou condutividade térmica,  $h$  é o coeficiente de convecção e  $\bar{H}$  é uma função a ser determinada.

As funções de base (3.58) devem satisfazer a seguinte relação:

$$-\Gamma^\Phi \frac{\partial f_j^{(3)}}{\partial \vec{n}} = h f_j^{(3)} \text{ na superfície } \varphi = 0. \quad (3.59)$$

Substituindo (3.59) em (3.58), obtém-se:

$$-\Gamma^\Phi f_j^{(2)} \frac{\bar{H} \partial \varphi}{\partial \vec{n}} = h f_j^{(2)} \frac{\Gamma^\Phi}{h} \text{ na superfície } \varphi = 0 \quad (3.60)$$

de onde resulta uma expressão para  $\bar{H}$ :

$$\bar{H} = - \left( \frac{1}{\partial \varphi / \partial \vec{n}} \right) \Big|_{\varphi=0} \quad (3.61)$$

em que  $\varphi = 0$  denota a superfície convectiva do elipsoide prolato.

Mas,

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}} \Big|_{\varphi=0} = \left( \nabla \varphi \cdot \frac{(-\nabla \varphi)}{\|-\nabla \varphi\|} \right) \Big|_{\varphi=0} = -\|\nabla \varphi\| \Big|_{\varphi=0} \quad (3.62)$$

Portanto,  $\varphi \bar{H}$  é dado da seguinte forma:

$$\varphi\bar{H} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4r^2}{a^4} + \frac{4}{b^2}\left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)}} \quad (3.63)$$

Usando a equação (3.58) é possível encontrar um conjunto de funções de base, para o esferoide prolato, que satisfazem a condição de contorno convectiva. Substituindo (3.63) em (3.58), as funções de base na forma adimensional para o elipsoide submetido à condição de contorno convectiva são dadas por (HAJI-SHEIKH e LAKSHMINARAYANAN, 1987):

$$f_j^{(3)} = f_j^{(2)} \left\{ \frac{(b^2/a^2)(1 - r^2/a^2 - z^2/b^2)}{2(b/a)[(b^2/a^2)(r^2/a^2) - r^2/a^2 + 1]^{1/2}} + 1/\text{Bi} \right\} \quad (3.64)$$

onde  $a$  e  $b$  são as medidas dos semi-eixos do elipsoide prolato e  $\text{Bi} = \frac{ha}{\Gamma\Phi}$  é chamado número de Biot de transferência.

O número de Biot ( $\text{Bi}$ ) é um parâmetro adimensional definido como a razão entre a resistência interna e a resistência externa ao fluxo na superfície. Assim, para um corpo com comprimento característico  $L_c$ , o número de Biot é calculado por:

$$\text{Bi} = \frac{hL_c}{\Gamma\Phi} \quad (3.65)$$

onde  $h$  é o coeficiente de transferência convectivo,  $\Gamma\Phi$  é o coeficiente de difusão e  $L_c$  pode ser o comprimento de uma barra, em problema 1D, um diâmetro ou raio, em problema 2D (esfera, cilindro) ou, numa forma mais geral, a relação volume/área superficial do sólido em estudo.

### 3.2.5 Modelos de difusão para secagem contínua e intermitente de sólidos elipsoidais prolatos

As soluções analíticas dos modelos de transferência de calor e massa em sólidos com forma elipsoidal prolata foram obtidas via método GBI. No entanto, solução da equação de difusão em coordenadas esferoidais prolatas via método de separação de variáveis tem sido encontrada na literatura (HAJI-SHEIKH e SPARROW, 1966; LIMA, 1999; OLIVEIRA e LIMA, 2002). Tal solução conduz a equação de Bessel e subsequentes procedimentos numéricos.

A escolha de um sistema particular de coordenadas é motivada pela forma geométrica do corpo em estudo e resulta numa melhor adequação e validade dos resultados obtidos.



Transforma-se a equação diferencial parcial em coordenadas nas quais o contorno da região considerada é dado por fórmulas mais simples. Neste trabalho, considerou-se a equação de difusão no sistema de coordenadas cilíndricas.

No sistema de coordenadas cilíndricas, o Laplaciano  $\nabla^2$  de uma função escalar  $\Phi = \Phi(r, \theta, z)$ , é dado por:

$$\nabla^2 \Phi = \nabla \cdot (\nabla \Phi) = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \right] \quad (3.66)$$

Assim, a Equação (3.1) pode ser escrita em coordenadas cilíndricas da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\lambda \Phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \quad (3.67)$$

Afim de descrever o processo de secagem, assumiu-se uma difusão simétrica em relação ao eixo z de forma que a posição no interior do elipsoide prolato pode ser determinada pelas coordenadas (r, z) definidas através do sistema de eixos r e z com origem no centro do elipsoide. Neste caso,  $\frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = 0$  e a equação de difusão bidimensional pode ser escrita como segue:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\lambda \Phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \quad (3.68)$$

O domínio do problema em estudo consiste no elipsoide prolato representado na Figura 3.9 e as seguintes hipóteses foram consideradas na modelagem matemática:

- (a) O sólido é homogêneo, isotrópico e constituído de material sólido e água na fase líquida;
- (b) As propriedades termofísicas são constantes durante o processo de secagem;
- (c) As distribuições de umidade e temperatura no interior do sólido são uniformes no início do processo;
- (d) O fenômeno de secagem ocorre por difusão de água e difusão de calor no interior do sólido e por evaporação da água e convecção térmica na superfície do mesmo;
- (e) O sólido tem dimensões finitas e não variam durante o processo de secagem;
- (f) O sólido é simétrico em relação ao plano  $z = 0$ .

Para as hipóteses estabelecidas, a solução da equação de difusão apresentada é válida e os seguintes modelos matemáticos foram desenvolvidos para simular o processo de secagem contínua e intermitente.

### 3.2.5.1. Modelagem da secagem contínua

#### a) Modelo I – Modelo difusivo com condição de contorno de equilíbrio

Neste caso, a base do elipsoide prolato (Figura 3.9) foi considerada isolada e a superfície curvada sujeita à condição de contorno de primeira espécie (condição de contorno de Dirichlet).

##### ➤ Transferência de massa

Para descrever o transporte de massa no interior de sólidos com geometria de um elipsoide prolato, considerou-se na Equação (3.68),  $\lambda = 1$ ,  $\Gamma^\Phi = D$  (coeficiente de difusão de massa) e  $\Phi = M$  (teor de umidade em base seca). Assim, a equação de difusão de massa em regime transiente sem geração de massa (lei de Fick) é escrita como segue:

$$\frac{\partial}{\partial t}(M) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rD \frac{\partial M}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial M}{\partial z} \right) \quad (3.69)$$

O problema matemático consiste em obter uma solução  $M(r, z, t)$  da Equação (3.69) com a condição inicial:

$$M(r, z, 0) = M_0 \quad (3.70)$$

e satisfazendo a condição de contorno de primeira espécie:

$$M|_S = M_{eq}, \quad t > 0 \quad (3.71)$$

onde  $M_0$  denota o teor de umidade inicial em base seca,  $M_{eq}$  é o teor de umidade de equilíbrio em base seca e o subscrito S denota a superfície do elipsoide prolato.

O teor de umidade de equilíbrio  $M_{eq}$  é obtido quando o produto é colocado em um ambiente com temperatura e umidade relativa constantes. Após um certo tempo, o produto

atingirá o equilíbrio higroscópico e não haverá troca de umidade entre o mesmo e o ar ambiente (FIOREZE, 2003). Para a condição de contorno de primeira espécie, considerou-se que o teor de umidade de equilíbrio é atingido instantaneamente na superfície do produto no início da secagem e não se alterou durante todo o processo.

Fazendo a mudança de variável

$$M^* = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (3.72)$$

tem-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial t}(M^*) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rD \frac{\partial M^*}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial M^*}{\partial z} \right) \quad (3.73)$$

com a condição inicial

$$M^* = 1 \text{ em } t = 0 \quad (3.74)$$

e a condição de contorno homogênea:

$$M^*|_S = 0, t > 0 \quad (3.75)$$

onde S denota a superfície do elipsoide prolato.

De acordo com (3.4), a solução da Equação (3.73) é da forma:

$$M^*(r, z, t) = \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n(r, z) \exp(-\gamma_n t) \quad (3.76)$$

onde  $\Psi_n$  e  $\gamma_n$  são determinados, respectivamente, por (3.9) e (3.12) escolhendo as funções de base  $f_j^{(1)}$  dadas na Equação (3.47) que satisfazem a condição de contorno homogênea (3.75):

$$f_j^{(1)} = 0, \text{ em } S \quad (3.77)$$

onde S denota a superfície do elipsoide prolato.

Os elementos das matrizes A e B foram obtidos, respectivamente, a partir das Equações (3.13) e (3.14), da seguinte forma:

$$\begin{aligned} a_{ij} &= \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} f_i(r, z) \nabla \cdot [D\nabla f_j(r, z)] rdzdrd\theta = \\ &= - \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} D\nabla f_i(r, z) \cdot \nabla f_j(r, z) rdzdrd\theta \end{aligned} \quad (3.78)$$

$$b_{ij} = \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} f_i(r, z) f_j(r, z) rdzdrd\theta \quad (3.79)$$

onde a igualdade em (3.78) decorre da Equação (3.15).

Os coeficientes  $C_n$  foram calculados a partir da equação (3.22) considerando-se  $g(r, z) = 1$  e resolvendo o conjunto de equações algébricas dadas por:

$$\begin{aligned} &\int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} f_i(r, z) rdzdrd\theta = \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} \left[ \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n(r, z) \right] f_i(r, z) rdzdrd\theta \end{aligned} \quad (3.80)$$

O teor de umidade médio adimensional foi calculado como segue:

$$\bar{M}^*(t) = \frac{3}{2\pi a^2 b} \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} M^* rdzdrd\theta \quad (3.81)$$

### ➤ Transferência de calor

Para o transporte de calor no interior de sólidos com forma geométrica esferoidal prolata, considerou-se  $\Gamma^\Phi = k$  (condutividade térmica),  $\lambda = \rho c_p$  (densidade e calor específico) e  $\Phi = T$  (temperatura). Neste caso, a Equação 3.68 foi reescrita na forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.82)$$

Considerando  $\rho$ ,  $c_p$  e  $k$  constantes, a Equação (3.82) pode ainda ser escrita na forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \alpha \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.83)$$

onde  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  é a difusividade térmica.

A difusividade térmica indica como o calor se difunde através de um material. Materiais com elevados valores de  $\alpha$  responderão mais rapidamente a mudanças nas condições térmicas a eles impostas, enquanto materiais com valores de  $\alpha$  baixos responderão mais lentamente, levando mais tempo para atingir uma nova condição de equilíbrio (INCROPERA et al., 2013).

Neste caso, procura-se solução  $T(r, z, t)$  da Equação (3.82) com a condição inicial:

$$T(r, z, 0) = T_0 \quad (3.84)$$

e condição de contorno de equilíbrio dada por:

$$T|_S = T_{eq}, \quad t > 0 \quad (3.85)$$

onde  $T_0$  é a temperatura inicial,  $T_{eq}$  denota a temperatura de equilíbrio e o subscrito S denota o contorno do elipsoide prolato.

Desta forma, considerou-se que a temperatura de equilíbrio é atingida instantaneamente na superfície do produto no início da secagem e não se alterou durante todo o processo.

Fazendo

$$T^* = \frac{T - T_{eq}}{T_0 - T_{eq}} \quad (3.86)$$

na Equação (3.82), tem-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T^*) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k \frac{\partial T^*}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T^*}{\partial z} \right) \quad (3.87)$$

Usando o parâmetro adimensional, pode-se escrever a condição inicial na forma adimensional por:

$$T^* = 1 \text{ em } t = 0 \quad (3.88)$$

e a condição de contorno homogênea por:

$$T^*|_S = 0, t > 0 \quad (3.89)$$

onde  $S$  denota a superfície do elipsoide prolato.

De acordo com (3.4), a solução da Equação (3.87) é da forma:

$$T^*(r, z, t) = \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n(r, z) \exp(-\gamma_n t) \quad (3.90)$$

De maneira análoga,  $\Psi_n$ ,  $\gamma_n$  e  $C_n$  foram determinados, respectivamente, por (3.9), (3.12) e (3.80) escolhendo as funções de base  $f_j^{(1)}$  dadas na Equação (3.47) que satisfazem a condição de contorno homogênea (3.89):

$$f_j^{(1)} = 0, \text{ em } S \quad (3.91)$$

onde  $S$  denota a superfície do elipsoide prolato.

Os elementos das matrizes  $A$  e  $B$  foram calculados a partir das Equações (3.13) e (3.14) considerando-se  $\lambda = \rho c_p$  e  $\Gamma^\Phi = k$ , ou seja,

$$\begin{aligned} a_{ij} &= \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} f_i(r, z) \nabla \cdot [k \nabla f_j(r, z)] r dz dr d\theta = \\ &= - \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} k \nabla f_i(r, z) \cdot \nabla f_j(r, z) r dz dr d\theta \end{aligned} \quad (3.92)$$

$$b_{ij} = \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} \rho c_p f_i(r, z) f_j(r, z) r dz dr d\theta \quad (3.93)$$

onde a igualdade em (3.92) decorre da Equação (3.15).

A temperatura média adimensional no interior do sólido, em função do tempo  $t$ , foi calculada por:

$$\bar{T}^*(t) = 1 - \frac{3}{2\pi a^2 b} \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} T^* r dz dr d\theta \quad (3.94)$$

## b) Modelo II – Modelo difusivo com condição de contorno convectiva

Neste caso, a base do elipsoide prolato (Figura 3.3) foi considerada isolada e a superfície curvada sujeita à condição de contorno de terceira espécie (condição de contorno de convectiva).

### ➤ Transferência de massa

Para a condição de contorno de terceira espécie, o fluxo difusivo de massa que atravessa a fronteira é igualado ao fluxo convectivo de massa na vizinhança da mesma, isto é:

$$-D \left. \frac{\partial M}{\partial \vec{n}} \right|_S = h_m (M|_S - M_{eq}), \quad t > 0 \quad (3.95)$$

onde  $\vec{n}$  é um vetor unitário normal exterior à superfície  $S$  do elipsoide prolato,  $M_{eq}$  é o teor de umidade de equilíbrio e  $h_m$  é o coeficiente de transferência de massa convectivo.

Fazendo a mudança de variável (3.72) na Equação (3.95) tem-se a condição de contorno homogênea:

$$-D \left. \frac{\partial M^*}{\partial \vec{n}} \right|_S = h_m M_S^*, \quad t > 0 \quad (3.96)$$

onde  $M_S^* = \frac{M_S - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}}$ .

A solução analítica da equação (3.73) com a condição inicial (3.74) e a condição de contorno (3.96) é dada por:

$$M^*(r, z, t) = \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n(r, z) \exp(-\gamma_n t) \quad (3.97)$$

onde  $\Psi_n$ ,  $\gamma_n$  e  $C_n$  são determinados, respectivamente, por (3.9), (3.12) e (3.80) escolhendo as funções de base  $f_j^{(3)}$  dadas na Equação (3.64) que satisfazem a condição de contorno (3.96):

$$-D \frac{\partial f_j^{(3)}}{\partial \vec{n}} = h_m f_j^{(3)} \quad (3.98)$$

na superfície do elipsoide prolato.

O teor de umidade médio adimensional foi calculado a partir da equação:

$$\bar{M}^*(t) = \frac{3}{2\pi a^2 b} \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} M^* r dz dr d\theta \quad (3.99)$$

### ➤ Transferência de calor

Neste caso, para descrever a transferência de calor no interior do elipsoide prolato, considerou-se a Equação (3.82) como a condição inicial (3.84) e a condição de contorno convectiva dada por:

$$-k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_S = h_c (T|_S - T_{eq}), \quad t > 0 \quad (3.100)$$

onde  $\vec{n}$  é um vetor unitário normal exterior à superfície  $S$  do elipsoide prolato,  $T_{eq}$  é a temperatura de equilíbrio e  $h_c$  é o coeficiente de transferência de calor convectivo.

Fazendo a mudança de variável (3.86) na Equação (3.100) tem-se a condição de contorno homogênea:



$$-k \frac{\partial T^*}{\partial \vec{n}} \Big|_s = h_c T_s^*, \quad t > 0 \quad (3.101)$$

onde  $T_s^* = \frac{T_s - T_{eq}}{T_0 - T_{eq}}$ .

A solução analítica da equação (3.87) com a condição inicial (3.89) e a condição de contorno (3.101) é da forma:

$$T^*(r, z, t) = \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n(r, z) \exp(-\gamma_n t) \quad (3.102)$$

onde  $\Psi_n$ ,  $\gamma_n$  e  $C_n$  são determinados, respectivamente, por (3.9), (3.12) e (3.80) escolhendo as funções de base  $f_j^{(3)}$  dadas na Equação (3.64) que satisfazem a condição de contorno (3.101):

$$-k \frac{\partial f_j^{(3)}}{\partial \vec{n}} = h_c f_j^{(3)} \quad (3.103)$$

na superfície do elipsoide prolato.

A temperatura média adimensional no interior do sólido, em função do tempo  $t$ , foi obtida da seguinte forma:

$$\bar{T}^*(t) = 1 - \frac{3}{2\pi a^2 b} \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} T^* r dz dr d\theta \quad (3.104)$$

### 3.2.5.2. Modelagem da secagem intermitente

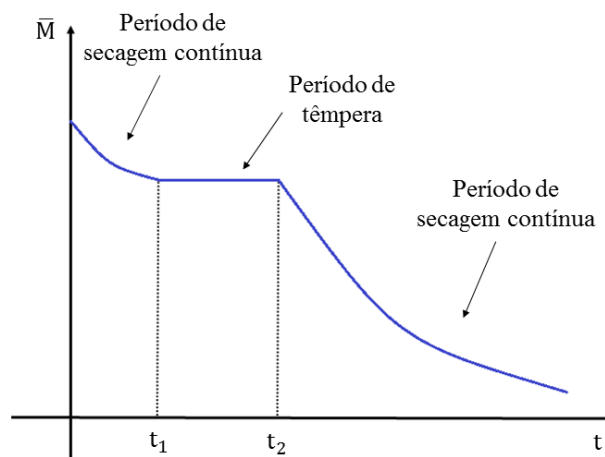
Na secagem intermitente o produto sofre a ação do calor, durante pequeno intervalo de tempo (secagem contínua), em seguida passa por um período de repouso (período de têmpera) sem contato com o ar aquecido e depois é submetido novamente ao processo de secagem contínua. O modelo desenvolvido nesta seção tem como objetivo principal identificar o efeito do período de têmpera na taxa de secagem pós-têmpera. Determinar o melhor tempo de têmpera e o número de pausas necessárias é de grande importância para aumentar a eficiência do processo. O tempo ideal de têmpera pode ser obtido considerando-se um plano de distribuição

de umidade final. Durante o período de têmpera, o teor de umidade no interior do produto será equalizado através de difusão de umidade.

Os modelos difusivos (Modelos I e II) apresentados na seção anterior foram utilizados para descrever transferência de massa durante os períodos de secagem contínua. Para descrever o período de têmpera, uma nova formulação matemática é necessária e envolve variação na condição inicial dada por  $g(r, z)$ . Uma curva típica do que deseja-se obter com o modelo é apresentada na Figura 3.11. Em  $t = t_1$  tem-se uma nova condição inicial que consiste na distribuição de umidade no final do primeiro período de secagem contínua. Quando a secagem contínua é retomada, em  $t = t_2$ , após um período de repouso, a condição inicial consiste na distribuição de umidade no final do período de repouso (período de têmpera).

No período de repouso, o sólido não foi considerado adiabático e, portanto, o mesmo continua trocando calor com o meio. Desta forma, a transferência de calor no período de pausa foi descrita utilizando-se a mesma metodologia teórica para secagem contínua (Modelos I e II).

Figura 3.11. Curva típica de secagem intermitente com uma única pausa



A modelagem para distribuição de umidade durante o período de repouso (período de têmpera) é apresentada a seguir.

#### a) Modelo III – Modelo difusivo para o período de têmpera

Idealmente, no período de repouso, não ocorre perda de umidade, e, apenas uma alteração na distribuição de umidade ocorre dentro do sólido. Na prática, existe pequena perda de umidade do sólido, mas ela é considerada desprezível. Assim, a variação do teor de umidade médio do sólido é desprezível durante o período de repouso e são aceitas variações na

distribuição do teor de umidade no interior do mesmo. Portanto, para simular a distribuição de umidade no interior do sólido durante esse período, duas condições foram admitidas:

- A distribuição de concentração no interior do sólido é conhecida no início do período de repouso;
- A superfície do sólido é considerada impermeável, isto é, a concentração média no sólido é constante durante o período de repouso.

Em termos de equação matemática, a superfície do sólido será considerada impermeável (isolada) aplicando-se a condição de contorno de segunda espécie homogênea (condição de contorno de Newmann) com fluxo nulo prescrito na superfície, de tal forma que:

$$\left. \frac{\partial M}{\partial \vec{n}} \right|_S = 0 \quad (3.105)$$

onde  $\vec{n}$  é um vetor unitário normal exterior à superfície S do elipsoide prolato e M denota o teor de umidade. Por outro lado, a condição de contorno (3.105) pode ser obtida da condição de contorno de terceira espécie (3.95) considerando-se  $h_m \rightarrow 0$ .

Assim, o modelo matemático para descrever a distribuição de umidade durante o primeiro período de pausa, consiste da Equação (3.69) com a condição de contorno de segunda espécie (3.105) e a condição inicial  $g(r, z)$  que corresponde a distribuição de umidade no final do primeiro período de secagem contínua ( $t = t_1$ ) fornecida por um dos modelos já apresentados (Modelos I e II). Por exemplo, em  $t = t_1$ , a função  $g(r, z)$  é da forma

$$\begin{aligned} g(r, z) &= \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n(r, z) \exp(-\gamma_n t_1) = \\ &= C_1(d_{11}f_1 + \dots + d_{1N}f_N) \exp(-\gamma_1 t_1) + \\ &+ C_2(d_{21}f_1 + \dots + d_{2N}f_N) \exp(-\gamma_2 t_1) + \dots + \\ &+ C_N(d_{N1}f_1 + \dots + d_{NN}f_N) \exp(-\gamma_N t_1) \end{aligned} \quad (3.106)$$

e, portanto, não é uniforme dentro do sólido, mas é contínua em relação às coordenadas espaciais.

Aplicando-se o método integral baseado em Galerkin para estas condições, a solução analítica que descreve o teor de umidade no interior do sólido assume a forma:

$$M(r, z, t) = \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n(r, z) \exp(-\gamma_n t) \quad (3.107)$$

onde  $\Psi_n$  e  $\gamma_n$  são determinados, respectivamente, por (3.9), (3.12). Neste caso, as funções de base  $f_j^{(2)}$  utilizadas foram definidas em (3.51) e satisfazem a condição de contorno homogênea (3.105):

$$\frac{\partial f_j^{(2)}}{\partial \vec{n}} = 0 \quad (3.108)$$

onde  $\vec{n}$  é um vetor unitário normal exterior à superfície S do elipsoide prolato.

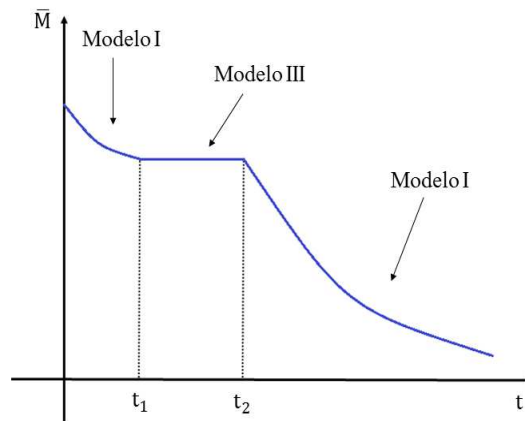
Os coeficientes  $C_n$  foram calculados a partir da equação (3.22) considerando-se  $g(r, z)$  a distribuição de umidade no final do período de secagem contínua ( $t = t_1$ ) e resolvendo o conjunto de equações algébricas dadas por:

$$\begin{aligned} & \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} g(r, z) f_i(r, z) r dz dr d\theta = \\ & = \int_0^{2\pi} \int_0^a \int_0^{b\sqrt{1-(r/a)^2}} \left[ \sum_{n=1}^N C_n \Psi_n(r, z) \right] f_i(r, z) r dz dr d\theta \end{aligned} \quad (3.109)$$

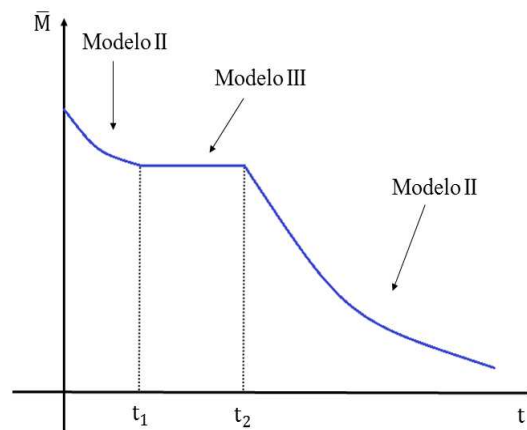
Devido à condição de impermeabilidade, o teor de umidade médio deverá permanecer constante durante o período de têmpera. Conseqüentemente, a taxa de variação do teor de umidade médio, neste período, deve ser igual a zero. Em outras palavras, a umidade que migra do centro do sólido para sua superfície, é armazenada nesta região.

Os modelos desenvolvidos foram utilizados para estudar o transporte de calor e massa durante a secagem contínua e intermitente de sólidos com forma elipsoidal prolata com aplicação na secagem de grãos de arroz e os resultados encontram-se no capítulo 4. Para descrever o transporte de umidade na secagem intermitente considerou-se uma combinação dos modelos desenvolvidos como mostra a Figura 3.12.

Figura 3.12. Cinéticas de secagem intermitente: (a) usando modelo difusivo com condição de contorno de primeira espécie (b) usando modelo difusivo com condição de contorno de terceira espécie



a)



b)

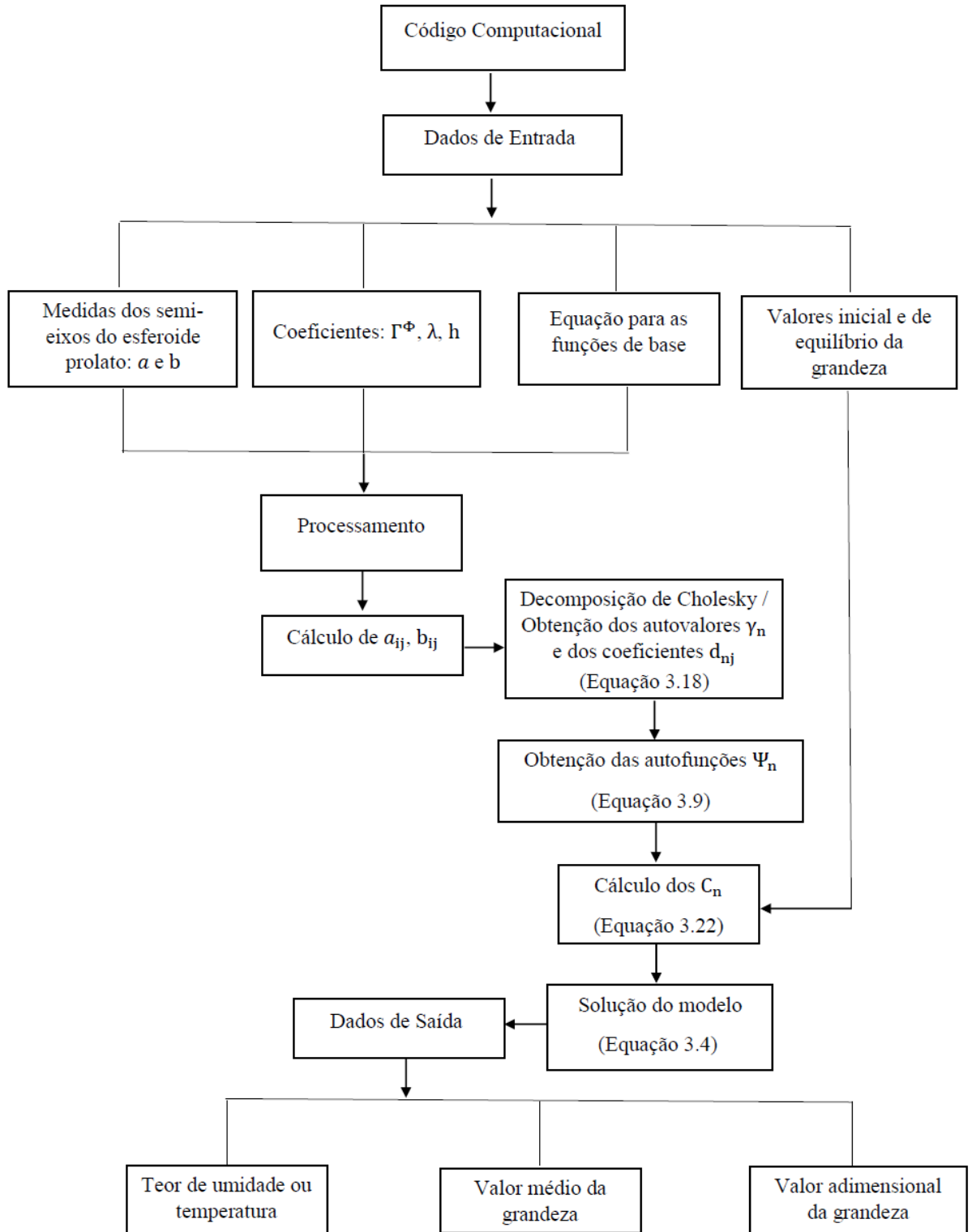
### 3.3 Metodologia computacional

#### 3.3.1 O programa computacional

A simulação efetiva do processo de secagem de sólidos com geometria do tipo esferoideal prolata foi realizada no Laboratório Computacional de Térmicas e Fluidos (LCTF) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica do CCT/UFCG, onde foi desenvolvido um código computacional na plataforma Mathematica<sup>®</sup> 7.0 para obter os autovalores  $\gamma_n$  e os coeficientes

$C_n$  necessários para completar a solução dos modelos apresentados. Um fluxograma de operação do programa, na forma de diagrama de blocos, é apresentado na Figura 3.13.

Figura 3.13. Diagrama do algoritmo computacional



### 3.3.2 Estimativa dos coeficientes de transporte

Um dos métodos utilizados para otimização é o método inverso (MARIANI et al., 2008), em que são atribuídos valores aos parâmetros de interesse, seguido da solução da equação que descreve o sistema, e os resultados obtidos são comparados com os dados experimentais relativos ao sistema. A partir da comparação, novos valores para os parâmetros são estabelecidos, e o processo continua até que os resultados simulados possam ser considerados suficientemente próximos dos resultados experimentais. Esta comparação envolve a minimização de uma função, denominada função objeto. A função objeto é definida a partir do qui-quadrado obtido pelo ajuste da solução analítica aos pontos experimentais (CHAPRA e CANALE, 1989), como segue:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n_0} [\Phi_i^{\text{pre}} - \Phi_i^{\text{exp}}]^2 \quad (3.110)$$

onde  $\Phi_i^{\text{exp}}$  é o  $i$ -ésimo ponto experimental,  $\Phi_i^{\text{pre}}$  é o valor previsto da grandeza  $\Phi$  no mesmo ponto,  $n_0$  é o número de observações.

Para estimar o parâmetro  $D$  do Modelo I (transferência de massa) de modo que a solução teórica produza resultados o mais próximo possível dos dados experimentais foram realizados testes utilizando-se o software Prescribed (SILVA e SILVA, 2009a) para geometria do tipo cilindro finito. O algoritmo de otimização utilizado neste software está descrito em Silva et al. (2013a).

O valor de  $D$  ajustado no Prescribed foi tomado como valor inicial e o qui-quadrado foi calculado a partir da solução analítica obtida no Modelo I. Em seguida, o ajuste procedeu-se de forma manual e um incremento foi dado ao valor de  $D$  inicial para obter um novo qui-quadrado. Assim, o qui-quadrado obtido foi comparado com o valor anterior. Se o novo valor é menor do que o precedente, o parâmetro recebe novamente um incremento e um novo valor de qui-quadrado é calculado e comparado com o anterior. Este procedimento se repete até que o último cálculo do qui-quadrado seja maior que o valor anterior. Deste modo, o penúltimo e último valores de  $D$  definem um intervalo que contém o valor mínimo de  $\chi^2$ . O melhor valor da difusividade efetiva corresponde ao menor valor de  $\chi^2$  obtido neste intervalo através de refinamento na segunda casa decimal.

O Modelo II (transferência de massa) envolve dois parâmetros: difusividade de massa efetiva (D) e o coeficiente de transferência de massa convectivo ( $h_m$ ). Neste caso, foi considerado como valor inicial o  $h_m$  obtido a partir do software Convective (SILVA e SILVA, 2009b) para geometria do tipo cilindro finito. Para  $h_m$  fixo, foi determinado manualmente o melhor valor para D. Em seguida, o valor de D foi considerado fixo para obter o melhor valor do parâmetro  $h_m$  até que o par ( $h_m, D$ ) corresponda ao menor  $\chi^2$ .

O coeficiente de correlação (r) e o desvio padrão (s) foram utilizados para medir a qualidade do ajuste. Estes parâmetros são definidos como segue (CHAPRA e CANALE, 1989; SILVA e SILVA, 1998):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} \Phi_i^{\text{pre}} \cdot \Phi_i^{\text{exp}} - n_0 \bar{\Phi}^{\text{pre}} \bar{\Phi}^{\text{exp}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_0} [\Phi_i^{\text{pre}}]^2 - n_0 [\bar{\Phi}^{\text{pre}}]^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n_0} [\Phi_i^{\text{exp}}]^2 - n_0 [\bar{\Phi}^{\text{exp}}]^2}} \quad (3.111)$$

e

$$s = \sqrt{\frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} [\Phi_i^{\text{pre}} - \Phi_i^{\text{exp}}]^2} \quad (3.112)$$

onde  $\Phi_i^{\text{exp}}$  é o i-ésimo ponto experimental,  $\Phi_i^{\text{pre}}$  é o valor predito da grandeza  $\Phi$  no mesmo ponto,  $n_0$  é o número de observações,  $\bar{\Phi}^{\text{exp}}$  e  $\bar{\Phi}^{\text{pre}}$  são as médias aritméticas dos  $\Phi_i^{\text{exp}}$  e  $\Phi_i^{\text{pre}}$ , respectivamente. Uma vez calculado o coeficiente de correlação, pode-se obter o coeficiente de determinação  $r^2$ .

Também foi determinada a distribuição de erros (diferença entre o valor experimental e o predito) para investigar a adequabilidade dos modelos. A distribuição de erros é apresentada em função dos valores preditos. Para avaliar a correlação entre os erros ( $e_i$ ) e os valores preditos ( $\Phi_i^{\text{pre}}$ ), o coeficiente de correlação ( $r'$ ) foi calculado a partir da Equação (3.111), substituindo os valores experimentais ( $\Phi_i^{\text{exp}}$ ) por cada erro correspondente  $e_i = \Phi_i^{\text{exp}} - \Phi_i^{\text{pre}}$ .



## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo, são apresentados os resultados referentes aos estudos experimental e teórico do processo de secagem contínua e intermitente de sólidos com forma elipsoidal. O estudo experimental foi direcionado para secagem de grãos de arroz em casca. Inicialmente, serão apresentados os resultados experimentais de secagem contínua e intermitente com uma, duas e três pausas. Em seguida, os resultados teóricos de simulação para várias condições operacionais, e aqueles referentes a aplicação dos modelos desenvolvidos aos dados experimentais de secagem nas temperaturas 40, 50, 60 e 70°C.

#### **4.1 Experimentais**

##### **4.1.1 Cinéticas de secagem contínua e intermitente**

Informações sobre a metodologia experimental da secagem de arroz em casca (BRSMG Conai) foram apresentadas no Capítulo 3, na seção 3.1.2. A influência da aplicação de 1, 2 e 3 períodos de têmpera nas cinéticas de secagem e aquecimento do grão foi avaliada e os parâmetros para cada experimento de secagem são dados na Tabela 4.1. Em todos os casos, a têmpera foi aplicada em temperatura ambiente. Os resultados obtidos dos teores de umidade médio adimensional ( $\bar{M}^*$ ), para secagem intermitente com uma pausa, variando-se a temperatura do ar de secagem e a duração da têmpera ( $\tau$ ), são apresentados nas Figuras 4.1 a 4.4 e foram comparados com a secagem contínua. A têmpera teve início em  $t = 15$  min de secagem contínua.

Tabela 4.1. Valores iniciais e de equilíbrio do teor de umidade e da temperatura para cada experimento de secagem

Caso	Temperatura do ar de secagem (°C)	Arroz				Têmpera		
		M <sub>0</sub> (b.s.)	M <sub>eq</sub> (b.s.)	T <sub>0</sub> (°C)	T <sub>eq</sub> (°C)	Nº de pausas	t <sub>i</sub> * (min)	(τ)** (min)
E1	40	22,46	5,45	29,7	39,8	1	-	0
E2	40	23,07	5,42	29,7	39,6	1	15	30
E3	40	22,98	5,43	29,7	39,7	1	15	60
E4	40	23,06	5,49	29,7	39,8	2	15	30
							75	30
E5	50	16,92	5,17	29,6	49,8	0	-	0
E6	50	16,89	5,15	29,6	49,8	1	15	60
E7	50	16,87	5,22	30	49,5	1	15	120
E8	60	36,37	3,74	28,2	57,6	0	-	0
E9	60	36,29	3,78	28,5	58	1	15	120
E10	60	36,97	3,85	28,5	57,5	1	15	240
E11	70	32,96	2,75	28	66,5	0	-	0
E12	70	32,95	2,80	28	66,1	1	15	120
E13	70	32,98	2,85	28,5	65,3	1	15	180
E14	70	21,62	2,77	27,3	67,2	0	-	0
E15	70	21,61	2,82	27,3	67,2	1	30	120
E16	70	21,38	2,76	27,9	66,2	2	15	60
							90	60
E17	70	21,28	2,81	27,9	65,2	3	15	60
							90	60
							165	60

\* t<sub>i</sub> refere-se ao tempo de início da têmpera

\*\* τ representa o período de têmpera.

Figura 4.1. Teor de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca durante a secagem a 40°C: (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos E1, E2 e E3)

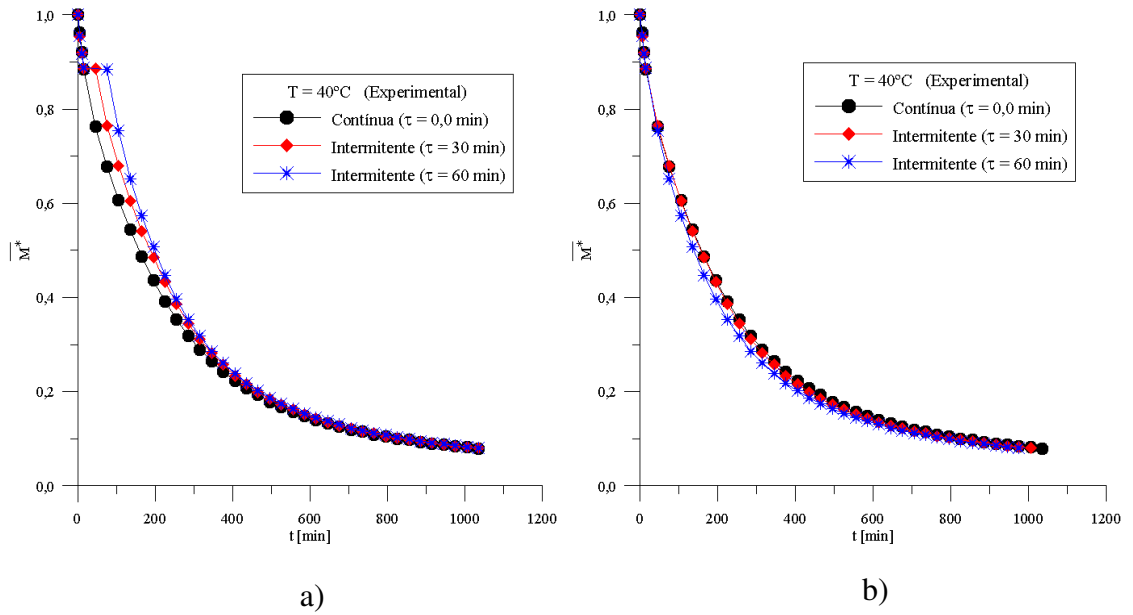


Figura 4.2. Teor de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca durante a secagem a 50°C: (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos E5, E6 e E7)

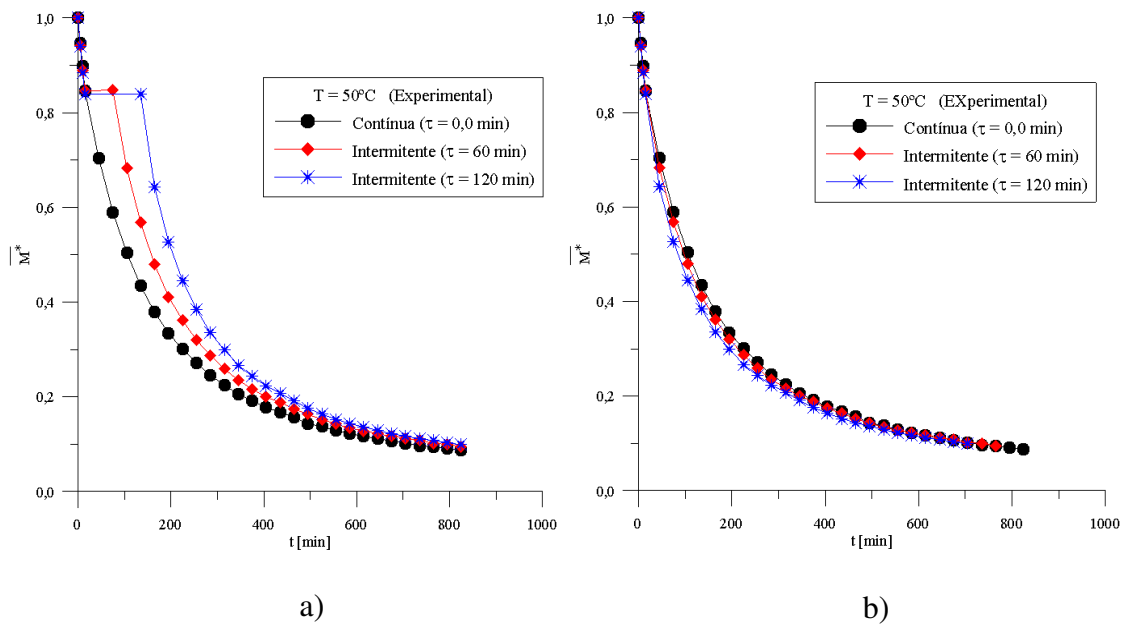


Figura 4.3. Teor de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca durante a secagem a 60°C: (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos E8, E9 e E10)

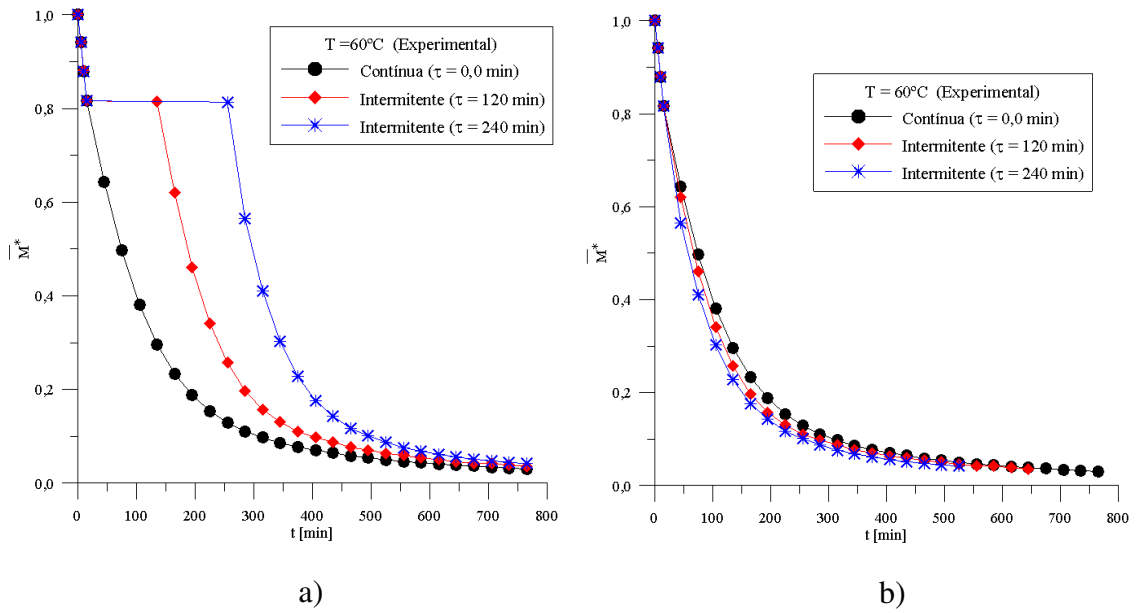
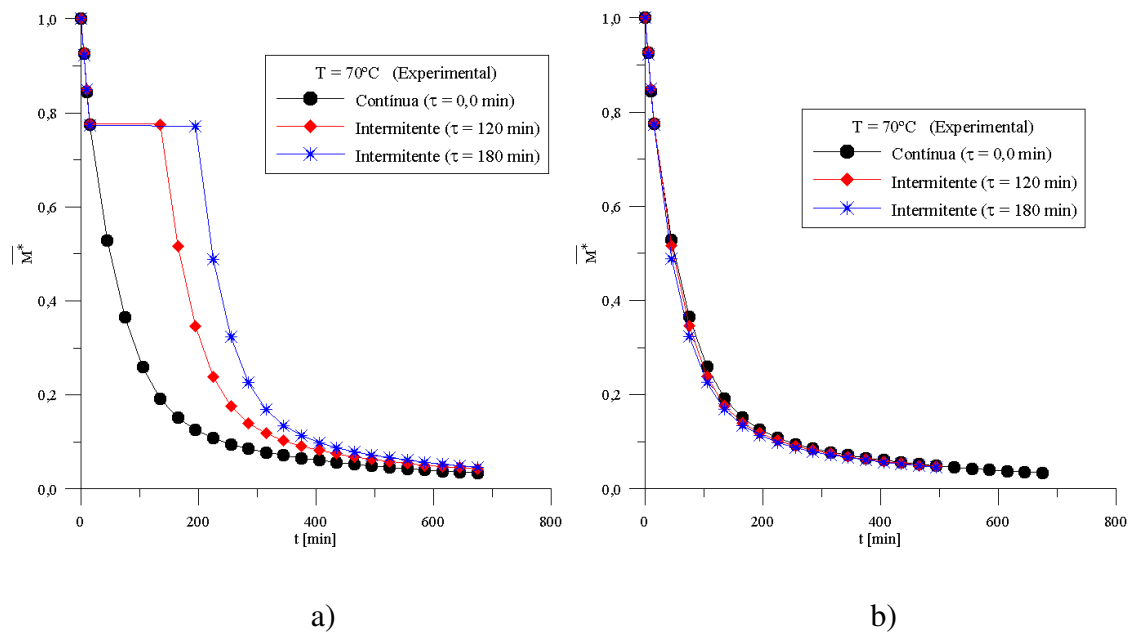


Figura 4.4. Teor de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca durante a secagem a 70°C: (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos E11, E12 e E13)

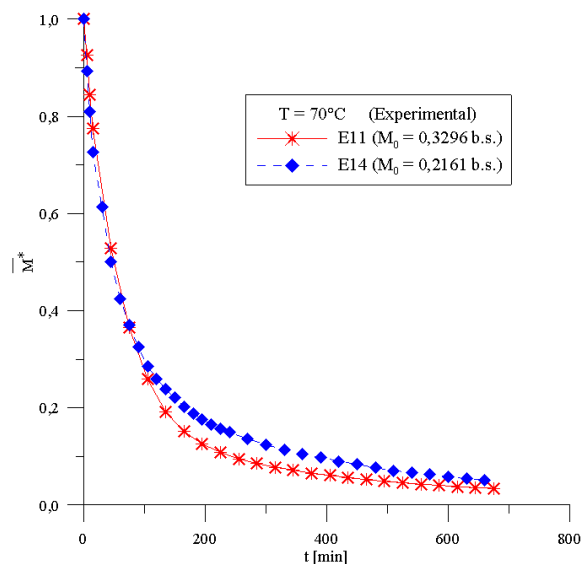


Analisando as Figuras 4.1 a 4.4, observa-se que, aplicando-se a secagem intermitente com um período de têmpera, o teor de umidade final foi muito semelhante ao obtido com a secagem contínua. No entanto, com aplicação de têmpera, o tempo de operação efetiva foi reduzido. O que indica que   possível estabelecer uma estratégia de economia de energia utilizando-se a técnica de secagem intermitente. Trabalhos reportados na literatura também comprovaram redução do tempo de operação efetiva de secagem quando se utilizou um período de têmpera (AQUERRETA et al., 2007; HOLOWATY et al., 2012).

A partir das cinéticas de secagem contínua ( $\tau = 0,0$  min) foi possível observar que o teor de umidade diminuiu mais rapidamente com o aumento da temperatura de 40 para 70 C. Por exemplo, para atingir o teor de umidade médio adimensional de aproximadamente 0,13 foi necessário um tempo de secagem contínua de 675, 555, 255 e 195 min para temperaturas de 40, 50, 60 e 70 C, respectivamente. Neste caso, pode-se atribuir a redução do tempo de secagem não apenas ao aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa do ar de secagem, mas também, ao teor de umidade inicial dos gr os de arroz.

A Figura 4.5 mostra a influência do teor de umidade inicial na cinética de secagem contínua a 70 C. Nas mesmas condições do ar de secagem, verificou-se que, quanto maior o teor de umidade inicial maior será a velocidade de secagem, o que está de acordo com resultados reportados por Shei e Chen (2002).

Figura 4.5. Comparação entre os teores de umidade médio adimensional de gr os de arroz em casca, com diferentes teores de umidade inicial, obtidos durante a secagem contínua a 70 C (casos E11 e E14)



Na Tabela 4.2 são apresentados os teores de umidade médio adimensional ( $\bar{M}^*$ ) no tempo  $t = 255$  min escolhido arbitrariamente, para os experimentos de secagem contínua e intermitente com uma única pausa. É possível observar que, para um mesmo tempo de secagem, houve pequena redução do teor de umidade, com o aumento do período de têmpera. Na Tabela 4.2 também pode ser observado o teor de umidade médio adimensional obtido no início e no término do período de têmpera. Pequenas perdas ou ganhos de umidade foram observadas no final do período de têmpera, com exceção do experimento a  $40^\circ\text{C}$ , com têmpera de 30 min, onde o teor de umidade médio se manteve. Estas variações são menores que 0,6% e foram desprezadas na simulação do processo de secagem intermitente.

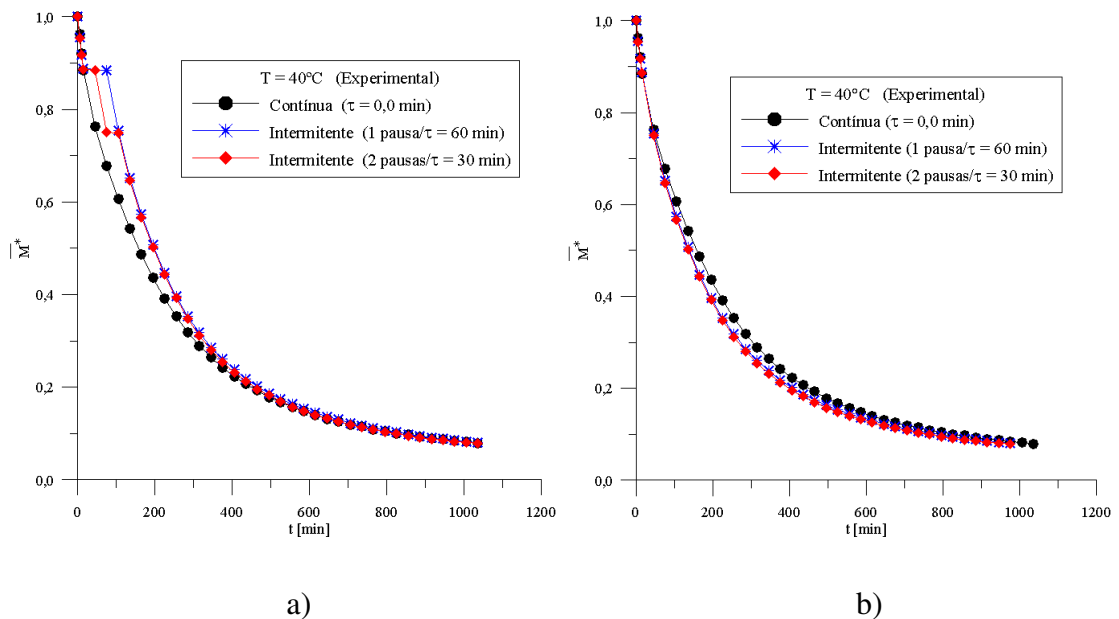
Tabela 4.2. Teor de umidade médio adimensional em alguns instantes de tempo

Caso	T ( $^\circ\text{C}$ )	$\tau$ (min)	$\bar{M}^*$ ( $t = 255$ min)	$\bar{M}^*$ (início da têmpera)	$\bar{M}^*$ (fim da têmpera)	Variação (%) (início e fim)
E1	40	0	0,3528	-	-	-
E2	40	30	0,3439	0,8868	0,8868	0,00
E3	40	60	0,3180	0,8885	0,8836	0,55
E5	50	0	0,2720	-	-	-
E6	50	60	0,2587	0,8461	0,8476	0,17
E7	50	120	0,2432	0,8388	0,8399	0,13
E8	60	0	0,1292	-	-	-
E9	60	120	0,1049	0,8163	0,8144	0,23
E10	60	240	0,1013	0,8162	0,8137	0,30
E11	70	0	0,0947	-	-	-
E12	70	120	0,0908	0,7772	0,7758	0,18
E13	70	180	0,0875	0,7731	0,7718	0,16

A Figura 4.6 mostra a comparação entre os teores de umidade médio adimensional ( $\bar{M}^*$ ), obtidos na secagem contínua e intermitente com uma e duas pausas, com temperatura do ar de secagem de  $40^\circ\text{C}$ . A primeira pausa teve início em  $t = 15$  min e a segunda em  $t = 75$  min. Observa-se que, para duas pausas de 30 min ou uma pausa de 60 min, o efeito na taxa de secagem foi semelhante. Nos dois experimentos de secagem intermitente (E3 e E4), verificou-

se mesma redução de tempo de operação efetiva quando comparado com a secagem contínua. Na secagem contínua foram necessários 1035 min para obter o teor de umidade adimensional (razão de umidade) de aproximadamente 0,079; enquanto que na secagem intermitente com uma ou duas pausas foram necessários 975 min de operação efetiva para obter o mesmo teor de umidade, o que corresponde a uma redução de 5,79% no tempo de operação efetiva.

Figura 4.6. Teor de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca durante a secagem contínua e intermitente com 1 e 2 pausas ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ): (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos E1, E3 e E4)

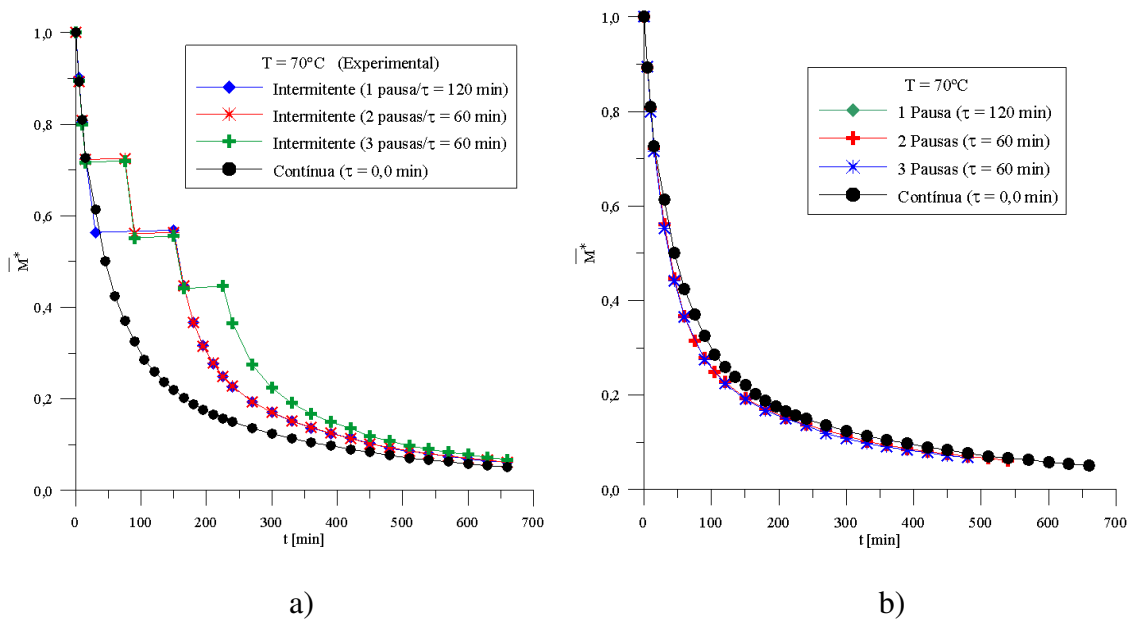


A Figura 4.7 mostra a comparação entre os teores de umidade médio adimensional ( $\bar{M}^*$ ), obtidos na secagem contínua e intermitente com uma pausa de 120 min (início em  $t = 30$  min), e com duas ou três pausas de 60 min, com temperatura do ar de secagem de  $70^{\circ}\text{C}$ . Observa-se que o teor de umidade final, para os três experimentos de secagem intermitente (E15, E16 e E17), foi próximo ao obtido na secagem contínua. Por exemplo, para obter o teor de umidade adimensional de aproximadamente 0,064 foram necessários 540 min na secagem contínua, enquanto que na secagem intermitente com uma pausa de 120 min ou duas pausas de 60 min foram necessários 510 min, enquanto que, com três pausas de 60 min, o tempo de operação efetiva foi reduzido para 480 min. Comparando com a secagem contínua, a economia de tempo de operação efetiva foi de 5,55% com uma pausa de 120 min ou duas pausas de 60 min.

Considerando-se três pausas, a redução de tempo de operação efetiva foi de 11,11%, o que é compatível com os testes de otimização de secagem de pêssego obtidos por Silva et al. (2014).

As secagens intermitentes com uma, duas e três pausas produziram efeito semelhante na cinética de secagem. No entanto, segundo constatou Aquerreta et al. (2007), a secagem intermitente com duas e três pausas reduz o número de grãos fissurados quando comparada com a secagem intermitente com uma única pausa. Shei e Chen (2002) verificaram que o aumento excessivo da taxa de secagem reduz consideravelmente o tempo de operação efetiva. Contudo, secagem rápida é uma causa para fissuras de grãos de arroz.

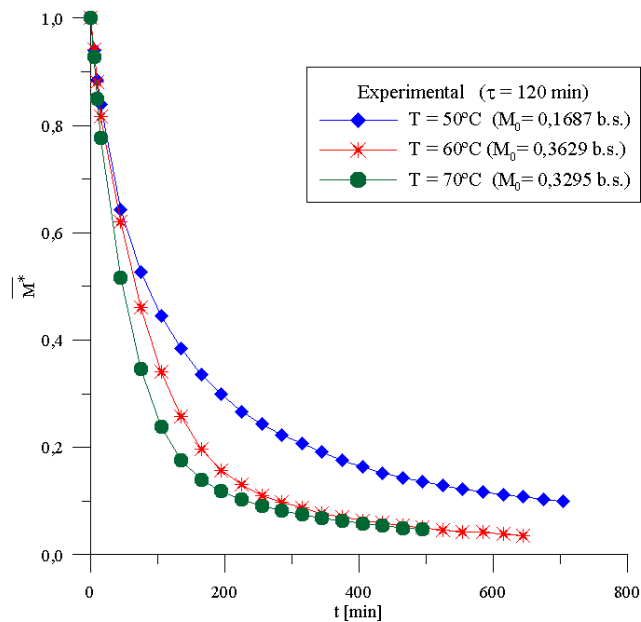
Figura 4.7. Teor de umidade médio adimensional de grãos de arroz em casca durante a secagem contínua e intermitente com 1, 2 e 3 pausas ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ ): (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos E14, E15, E16 e E17)



A Figura 4.8 ilustra o impacto da temperatura do ar na cinética de secagem de grãos de arroz em casca submetidos a uma pausa de 120 min. Observa-se que, para um tempo fixo, o teor de umidade médio adimensional diminuiu mais rapidamente com o aumento da temperatura. Para atingir o teor de umidade médio adimensional 0,13 foram necessários um tempo de operação efetiva de 525 min, 225 min e 165 min, respectivamente, para as temperaturas 50, 60 e  $70^{\circ}\text{C}$ . Quando comparada com a secagem contínua, que atingiu este mesmo teor de umidade com 555 min, 255 min e 195 min, respectivamente, a redução de tempo de processo (e com ele a energia gasta) foi de 5,4; 11,76 e 15,38% para as temperaturas 50, 60 e  $70^{\circ}\text{C}$ . Assim, para atingir o teor de umidade médio adimensional 0,13, com uma pausa de 120 min, a economia do tempo de secagem aumentou de 5,4 para 15,38% quando a temperatura do ar de secagem aumentou de 50 para  $70^{\circ}\text{C}$ .



Figura 4.8. Cinética de secagem intermitente de grãos de arroz em casca (uma pausa de 120 min), excluindo o tempo de têmpera, para várias temperaturas do ar de secagem (casos E7, E9 e E12)



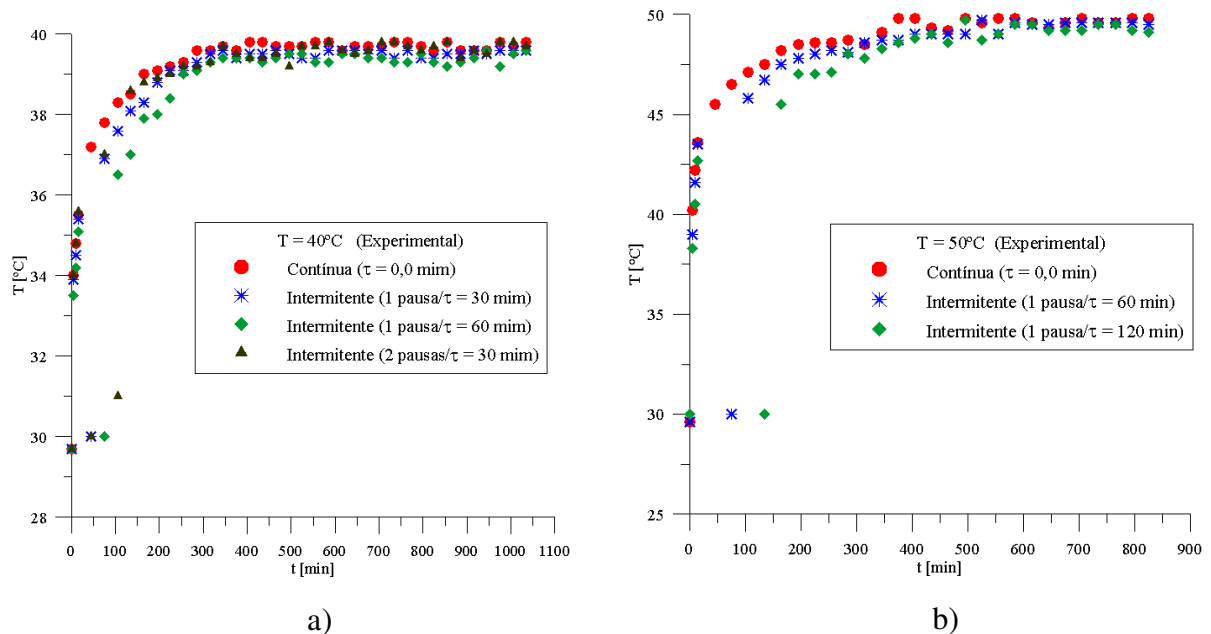
A partir da cinética de secagem contínua foi possível também verificar que a secagem de grãos de arroz em casca ocorreu no período de taxa decrescente, o que indica que a difusão é o principal mecanismo responsável pela perda de umidade, como relatado em outras pesquisas de secagem de produtos biológicos (GOLESTANI et al., 2013; SILVA et al., 2014; SILVA, 2016). Desta forma, a cinética de secagem possibilita a determinação do mecanismo predominante na transferência de massa do material para o fluido e, conseqüentemente, as equações matemáticas correspondentes para descrever o processo.

#### 4.1.2 Cinética de aquecimento

Além da migração de água do interior do grão para superfície, o processo de secagem envolve evaporação da água superficial, quando ocorrem os fenômenos de transferência de calor e massa. Nas Figuras 4.9 a 4.11 são apresentadas as medições da temperatura superficial dos grãos de arroz em casca obtidas no momento da pesagem durante os experimentos de secagem contínua e intermitente em diferentes temperaturas. Para todos os experimentos de secagem contínua, observa-se que a evolução da temperatura superficial é mais rápida nos

primeiros 200 minutos e tende a atingir a temperatura do ar de secagem, o que é compatível com os resultados reportados por Meneghetti et al. (2012).

Figura 4.9. Temperatura superficial do grão de arroz em função do tempo durante a secagem com temperatura do ar de (a) 40°C (casos E1, E2, E3 e E4); e (b) 50°C (casos E5, E6 e E7)



Para secagem intermitente (Figuras 4.9 e 4.10), observa-se que, nos primeiros 15 min de secagem ocorreu elevação da temperatura. Por exemplo, a temperatura superficial do grão aumentou de aproximadamente 29°C para 35,4; 43,5; 44,2 e 51,3°C, após 15 min de secagem nas temperaturas 40, 50, 60 e 70°C, respectivamente. Ao final do período de têmpera, a temperatura superficial do grão foi reduzida para aproximadamente 30°C, uma vez que a têmpera foi realizada na temperatura ambiente. No período pós-têmpera, novamente ocorreu elevação da temperatura, tendendo à estabilização.

Na Figura 4.11 são apresentadas as curvas de temperaturas obtidas nos experimentos de secagem contínua e intermitente com uma, duas e três pausas, com temperatura do ar de secagem de 70°C (E14, E15, E16 e E17). Ao final de cada período de têmpera, a temperatura superficial do grão se aproximou da temperatura ambiente (30°C) e no período de secagem ocorreu elevação da temperatura. A secagem intermitente produziu temperatura mais baixa na superfície do grão do que com a secagem contínua, como pode ser observado nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11.

Figura 4.10. Temperatura superficial do grão de arroz em função do tempo durante a secagem com temperatura do ar de (a) 60°C (casos E8, E9 e E10); e (b) 70°C (casos E11, E12 e E13)

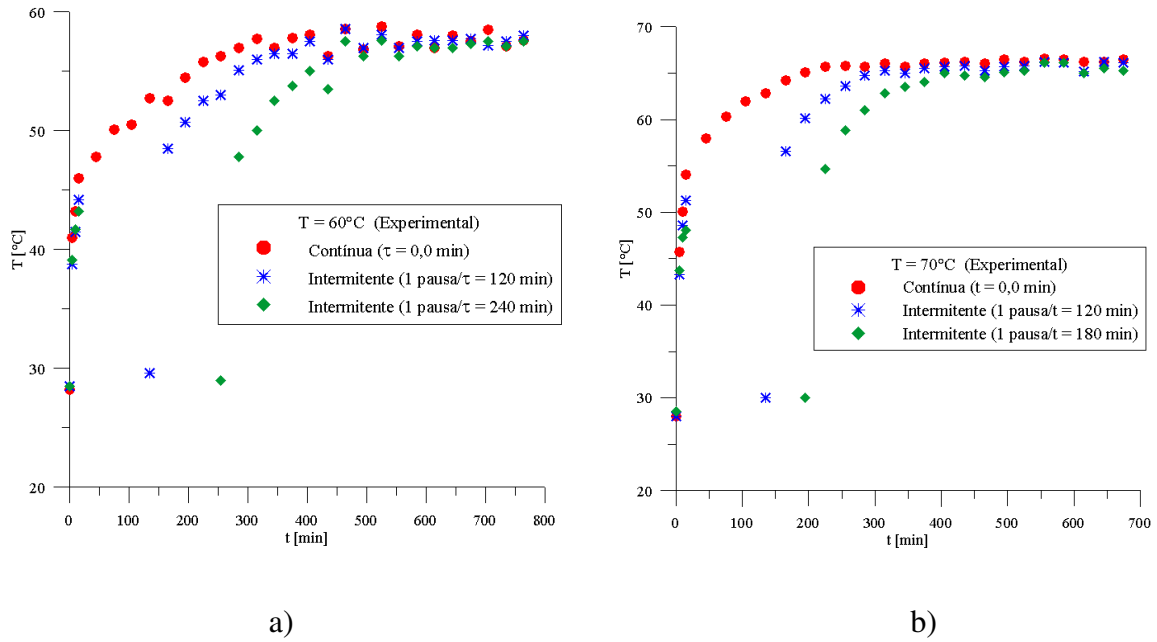
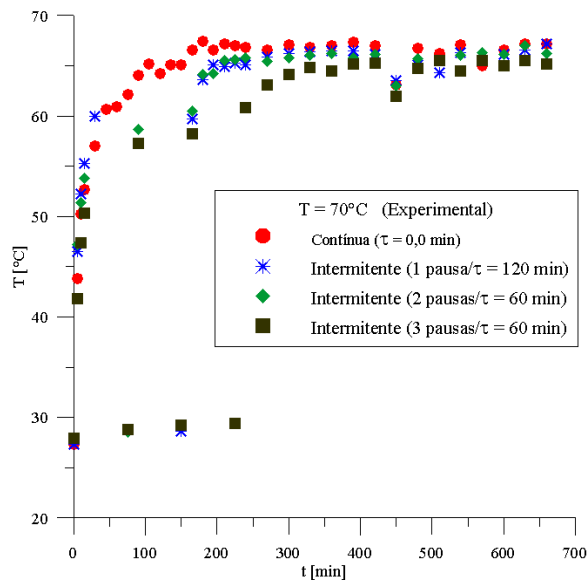


Figura 4.11. Temperatura superficial do grão de arroz em função do tempo durante a secagem contínua e intermitente com uma, duas e três pausas ( $T = 70^\circ\text{C}$ /casos E14, E15, E16 e E17)



No período de taxa de secagem decrescente, ocorre redução da migração de umidade do centro para a superfície do produto e o uso de altas temperaturas do ar de secagem ajuda a retirar água mais rapidamente como observado nas Figuras 4.1 a 4.4. No entanto, a temperatura da

massa de grãos é o parâmetro operacional intimamente ligado aos danos térmicos que podem ocorrer nos grãos em função da operação de secagem (MENEGETTI et al., 2012). Secagem severa com temperatura elevada e baixa umidade relativa do ar pode danificar o produto causando fissuras e/ou trincas e torná-lo de baixo valor agregado. Neste sentido, a técnica de secagem intermitente se destaca por proporcionar uma secagem mais uniforme, visto que o período de têmpera favorece uma situação de equilíbrio diminuindo os gradientes de umidade e temperatura.

#### 4.1.3 Variações dimensionais

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 são apresentadas a comparação entre as dimensões do grão de arroz BRSMG Conai com casca e sem casca, obtidas com o produto úmido *in natura* e após o processo de secagem ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ). Na simulação numérica foram utilizadas as dimensões do grão úmido *in natura* com casca para obter as dimensões equivalentes do elipsoide prolato (Tabela 3.3).

Tabela 4.3. Comparação entre as dimensões do grão de arroz BRSMG Conai úmido e seco ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ) com casca (caso E1)

	Média do arroz úmido <i>in natura</i> com casca (mm)	Média do arroz seco com casca (mm)	Variação (%) (úmido e seco)
Espessura ( $a'$ )	1,92	1,86	5,2
Comprimento ( $b'$ )	9,24	8,87	4
Largura ( $c'$ )	2,27	2,18	7,49
Encolhimento volumétrico			11,15

Tabela 4.4. Comparação entre as dimensões do grão de arroz BRSMG Conai úmido e seco ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ) sem casca (caso E1)

	Média do arroz úmido <i>in natura</i> sem casca (mm)	Média do arroz seco sem casca (mm)	Variação (%) (úmido e seco)
Espessura ( $a'$ )	1,73	1,68	2,89
Comprimento ( $b'$ )	6,96	6,56	5,74
Largura ( $c'$ )	2,09	1,94	7,17
Encolhimento volumétrico			15,34

O encolhimento volumétrico do grão de arroz sem casca foi de 15,34%, o que é compatível com a perda de umidade de aproximadamente 17% para o experimento E1 (Tabela 4.1).

## 4.2 Teóricos

### 4.2.1 Estudo de convergência da solução

Segundo Haji-Sheikh e Lakshminarayanan (1987), a convergência é assegurada quando a ordem das funções de base é aumentada por 1 e uma mudança insignificante na grandeza de interesse  $\Phi$  (Equação 3.4) é observada. Nos trabalhos reportados na literatura (HAJI-SHEIKH e LAKSHMINARAYANAN, 1987; HAJI-SHEIKH e MASHENA, 1987), para convergência da solução, foram considerados 10 termos da série no estudo da distribuição de temperatura em um cone usando condição de contorno de equilíbrio, e 6 termos para a distribuição de temperatura em esferoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$ , usando condição de contorno convectiva.

Se  $N \rightarrow \infty$  na Equação (3.97), então  $\bar{M}^*(0) \rightarrow 1$  na Equação (3.99) e não há erro de truncamento. Para  $N$  finito, o valor de  $\bar{M}^*(0)$  depende do número de Biot para transferência de massa. Na Tabela 4.5 é apresentada a dependência entre  $\bar{M}^*(0)$  e  $N$  para vários números de Biot (condição de contorno de terceira espécie). Nesta análise, considerou-se um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$ . Foi possível verificar que, para pequenos números de Biot, alguns termos da série são suficientes para obter resultados com erro de truncamento insignificante, fato este também relatado por Silva et al. (2012) ao utilizar a solução da equação de difusão tridimensional via método de separação de variáveis para corpos em forma de paralelepípedo. Por exemplo, para o elipsoide reportado acima, para  $Bi = 0,50$  apenas 4 termos da série foram necessários para obter-se  $\bar{M}^*(0) = 0,999426$ , que corresponde a um erro de 0,058%. Por outro lado, quando o número de Biot aumentou foi necessário aumentar significativamente o número de termos da série para se obter erros de truncamento desprezíveis. Por exemplo, para  $Bi = 10,0$ , mesmo usando 16 termos na série, obteve-se  $\bar{M}^*(0) = 0,988378$ , o que significa um erro de truncamento de 1,16%.

A Tabela 4.6 mostra os valores de  $\bar{M}^*(0)$ , em função do número de termos da série, obtidos utilizando-se condição de contorno de primeira espécie ( $Bi \rightarrow \infty$ ). Observou-se que, mesmo usando 16 termos na série,  $\bar{M}^*(0) = 0,95099$  e o erro de truncamento foi de 4,9%.

Tabela 4.5. Valores de  $\bar{M}^*(0)$  em função de N para vários números de Biot ( $b/a = 2,0$ )

Bi	4 termos	9 termos	16 termos	25 termos
0,50	0,999426	0,999894	0,999978	0,999993
1,00	0,997398	0,999539	0,999898	0,999968
5,00	0,957034	0,988403	0,996513	0,998805
10,0	0,914955	0,969439	0,988378	0,995284

Tabela 4.6. Valores de  $\bar{M}^*(0)$  em função de N para número de Biot infinito ( $b/a = 2,0$ )

	4 termos	9 termos	16 termos	25 termos	36 termos
$\bar{M}^*(0)$	0,863826	0,923336	0,95099	0,966014	0,975062

A partir da análise das Tabelas 4.5 e 4.6 foi possível perceber intuitivamente que, quando N aumenta, o valor de  $\bar{M}^*(0)$  se aproxima de 1. Para o caso de Biot infinito, mesmo usando 36 termos da série, não foi possível obter o resultado de  $\bar{M}^*(0) = 1$ .

A Tabela 4.7 mostra os valores de  $\bar{M}^*(t)$ , em função do número de termos da série, para vários instantes de tempo, obtidos utilizando-se condição de contorno de primeira espécie ( $Bi \rightarrow \infty$ ). Verificou-se que, para t fixo,  $\bar{M}^*(t)$  assume valores próximos, quando o número de termos da série aumentou de 16 para 25. Neste trabalho, foi estabelecido N = 16 termos da série, o que corresponde a 16 funções de base, gerando matrizes de ordem 16 x 16. Observou-se que, para número de Biot menor ou igual a 10, o uso de 16 termos na série gerou erros de truncamento de até 1,16% (Tabela 4.5) e o pior caso corresponde a Biot infinito (Tabela 4.6), que gerou erro de 4,9%, em  $t = 0$  s.

Tabela 4.7. Valores de  $\bar{M}^*(t)$  em função de N para vários instantes de tempo t (Biot infinito e  $b/a = 2,0$ )

t [s]	4 termos	9 termos	16 termos	25 termos
100	0,859042	0,914391	0,936928	0,946214
200	0,854308	0,905723	0,923860	0,929056
300	0,849624	0,897321	0,911678	0,914000
600	0,835866	0,873586	0,879578	0,877741
900	0,822534	0,851839	0,852702	0,850016
1200	0,809608	0,831828	0,829680	0,827312

#### 4.2.2 Validação dos modelos

Os modelos apresentados podem ser utilizados para obter resultados que descrevem fenômenos de difusão transiente em elipsoides e, como casos particulares, em esfera e cilindro infinito, variando a razão de aspecto  $b/a$ . Por exemplo, sólidos com  $b/a = 1,001$  correspondem aproximadamente a uma esfera e  $b/a = 100,0$  a um cilindro infinito.

A validação dos modelos e do código computacional foi feita por comparação com resultados disponíveis na literatura oriundos de soluções também obtidas via método GBI (PAYNE et al., 1986; HAJI-SHEIKH e LAKSHMINARAYANAN, 1987), bem como a partir da solução da equação de difusão em coordenadas esferoidais prolatas, via método de separação de variáveis, com condição de contorno de primeira e terceira espécies (LIMA, 1999; OLIVEIRA e LIMA, 2002) e da solução clássica do problema de difusão em esfera com condição de contorno de terceira espécie (LUIKOV, 1968). Os dados reportados na literatura foram digitalizados usando o software xyExtract Graph Digitizer.

Para realização dos testes, foi assumido o tempo de têmpera igual a zero (secagem contínua), um valor constante e igual a uma unidade para o parâmetro de transporte  $\lambda$ , pressupondo uma distribuição de umidade inicial uniforme e considerando-se o coeficiente de difusão  $D$  constante.

A Figura 4.12 mostra a comparação entre os teores de umidade no centro de um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  ( $a = 1,0$  cm) obtidos pelo Modelo I proposto neste trabalho e por Payne et al. (1986), ambos utilizando o método GBI e condição de contorno de primeira espécie. A escolha do coeficiente de difusão é irrelevante, visto que o teor de umidade adimensional simulado é apresentado em função do número de Fourier (tempo adimensional)  $Dt/a^2$ . Contudo, neste caso, considerou-se na simulação  $D = 3,25769 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s.

Na Figura 4.13, os resultados dos teores de umidade no centro de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 1,1$  ( $a = 1,0$  cm) obtidos neste trabalho com o método GBI (Modelo I) são comparados aos resultados da solução da equação de difusão em coordenadas esferoidais prolatas usando o método de separação de variáveis e condição de contorno de primeira espécie apresentada em Lima (1999). Neste caso, o coeficiente de difusão usado na simulação foi  $D = 1,22 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s, o mesmo utilizado por Lima (1999).

Após análise das Figuras 4.12 e 4.13, foi possível observar uma boa concordância entre os valores do teor de umidade no centro dos elipsoides considerados quando comparados com os dados reportados na literatura.

Figura 4.12. Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e por Payne et al. (1986) para o teor de umidade no centro de um elipsoide com  $b/a = 2,0$ , usando o método GBI.

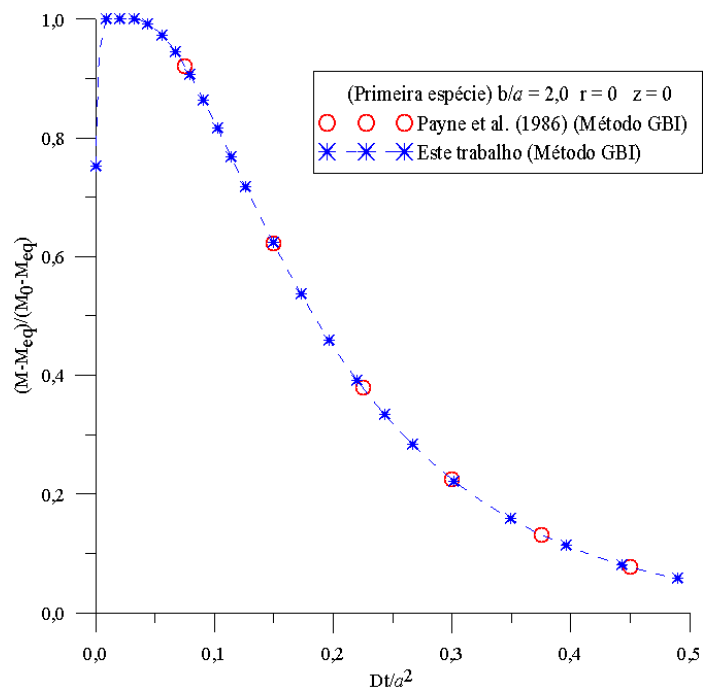
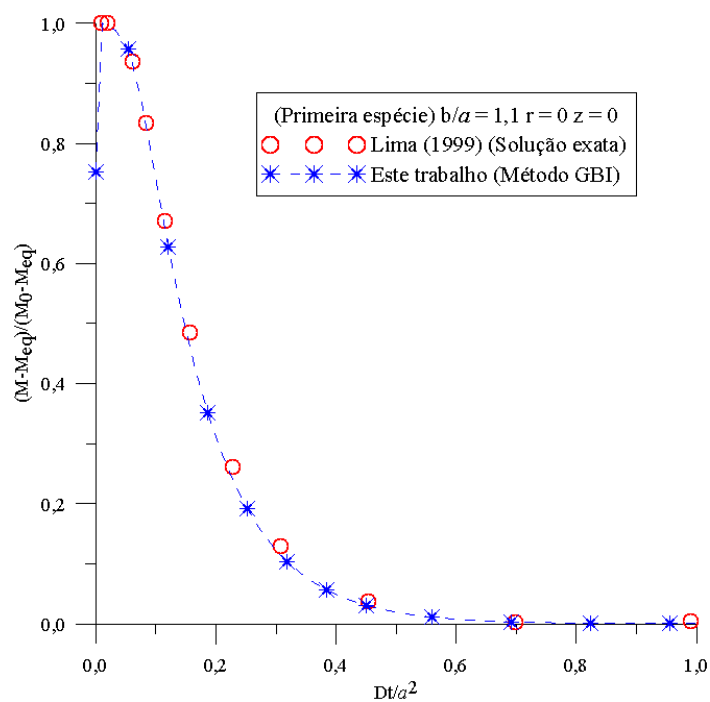


Figura 4.13. Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho usando o método GBI e os reportados por Lima (1999) usando o método de separação de variáveis, do teor de umidade no centro de um elipsoide com  $b/a = 1,1$ .





Uma peculiaridade dessa solução é que para pequenos valores do número de Fourier  $Dt/a^2$ , torna-se necessário utilizar um alto número de termos da série, resultando num considerável inconveniente. No entanto, para altos valores desta grandeza, o termo exponencial predomina e a solução converge rapidamente, em virtude do rápido decréscimo da função exponencial.

Considerando a condição de contorno de terceira espécie (número de Biot finito), as Figuras 4.14 e 4.15 mostram os valores do teor de umidade de um elipsoide prolato de razão de aspecto  $b/a = 2,0$  ( $a = 1,0$  cm) em dois pontos da linha de simetria ( $r = 0$ ) com coordenadas  $z = 0$  e  $z = 1,5$  cm obtidos neste trabalho, a partir do Modelo II, comparados com resultados reportados por Haji-Sheikh e Lakshminarayanan (1987). Na simulação dos dois casos apresentados utilizou-se um coeficiente de difusão arbitrário  $D = 3,25769 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s, sendo que no primeiro caso utilizou-se  $Bi = \frac{ha}{D} = 4,0$  e no segundo  $Bi = 0,5$ .

Analisando as Figuras 4.14 e 4.15, verificou-se uma boa concordância entre os resultados nos dois casos simulados, mostrando que o código computacional desenvolvido fornece valores compatíveis com os reportados na literatura.

Figura 4.14. Comparação entre os resultados deste trabalho e os reportados por Haji-Sheikh e Lakshminarayanan (1987) do teor de umidade na linha de simetria ( $r = 0$ ), de um elipsoide com  $b/a = 2,0$ , obtidos com o método GBI considerando-se  $Bi = 4,0$ .

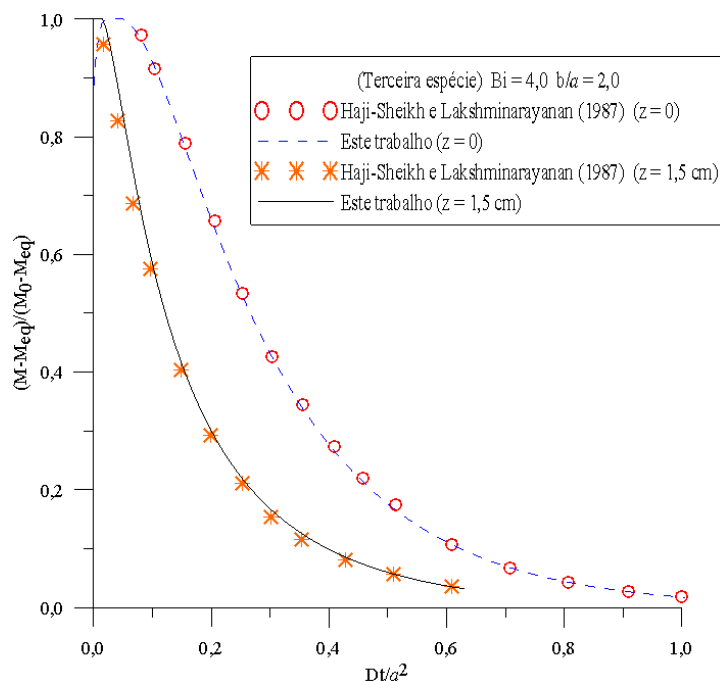
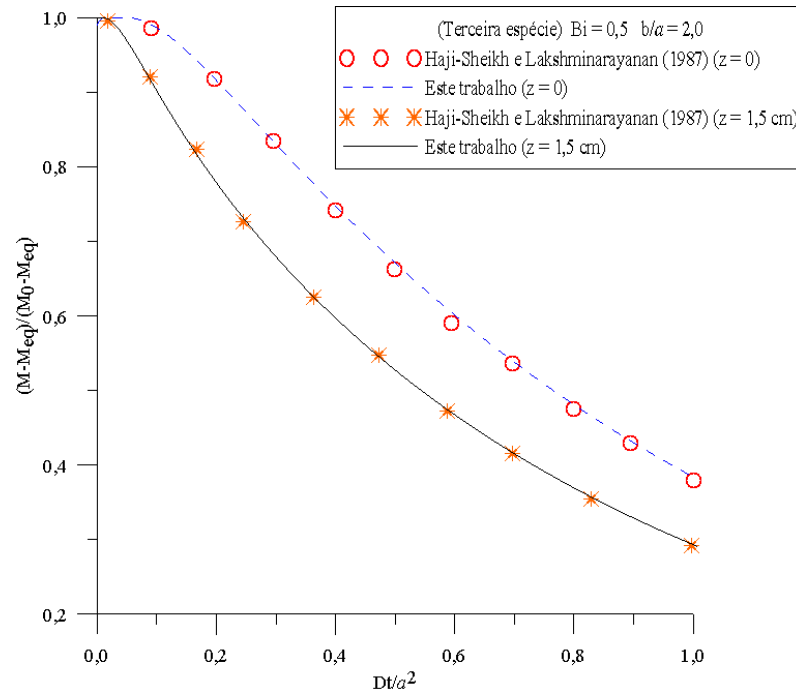


Figura 4.15. Comparação entre os resultados deste trabalho e os reportados por Haji-Sheikh e Lakshminarayanan (1987), do teor de umidade na linha de simetria ( $r = 0$ ), de um elipsoide com  $b/a = 2,0$ , obtidos com o método GBI considerando-se  $Bi = 0,5$ .



A Figura 4.16 mostra os valores do teor de umidade médio adimensional de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  ( $a = 1,0$  cm) obtidos neste trabalho a partir do Modelo II e os obtidos por Oliveira e Lima (2002) utilizando-se solução analítica da equação de difusão em coordenadas esféricas prolatas via método de separação de variáveis e condição de contorno de terceira espécie. Neste caso, utilizou-se  $Bi = 0,58$  que é o valor equivalente considerado por Oliveira e Lima (2002). Na Figura 4.17 é apresentada uma comparação entre os resultados do teor de umidade médio adimensional obtidos neste trabalho com o método GBI e os obtidos a partir da solução analítica do problema de difusão em esfera com número de Biot finito, em particular  $Bi = 1,0$ , reportada por Luikov (1968). Nos dois casos, foi considerado na simulação  $D = 1,22 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s. Uma excelente concordância foi observada entre as soluções provenientes do método GBI e do método analítico de separação de variáveis.

Nas situações analisadas, foi possível observar que a solução obtida pelo método GBI, com 16 termos da série, converge rapidamente para a solução exata, demonstrando assim a eficiência do método para o tratamento de diversos problemas de difusão. Nenhuma peculiaridade inesperada foi observada para  $Dt/a^2 > 2 \times 10^{-2}$ .

Figura 4.16. Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho usando o método GBI e os reportados por Oliveira e Lima (2002) usando o método de separação de variáveis, do teor de umidade médio adimensional de um elipsoide com  $b/a = 2,0$ , considerando-se  $Bi = 0,58$ .

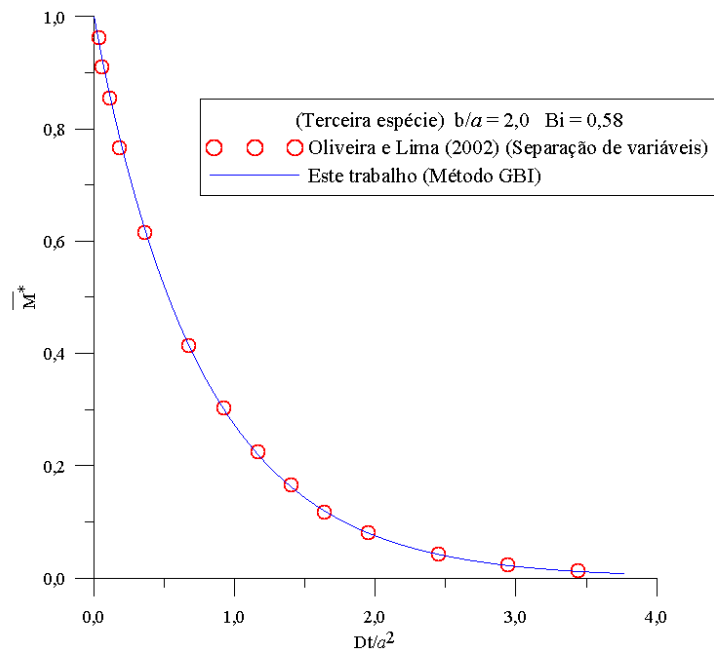
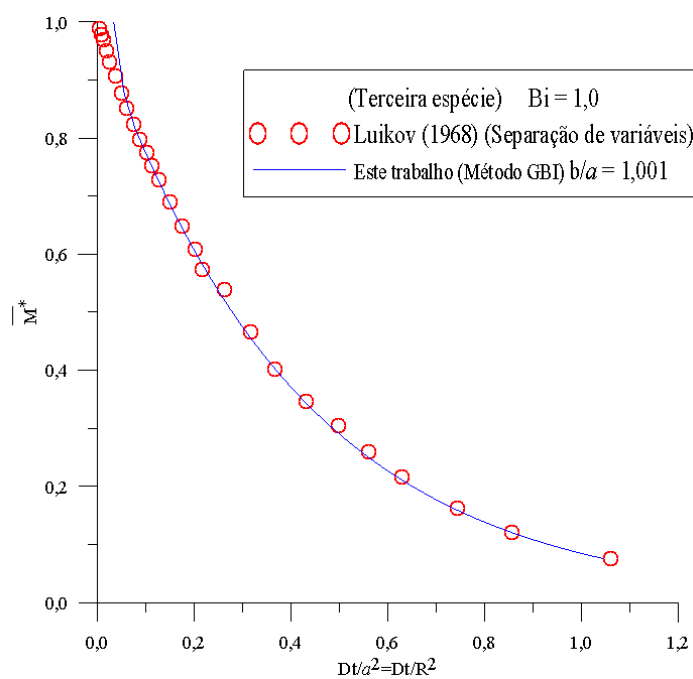


Figura 4.17. Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho usando o método GBI e os reportados por Luikov (1968) usando o método de separação de variáveis, do teor de umidade médio adimensional de uma esfera, considerando-se  $Bi = 1,0$ .



### **4.2.3 Testes de simulação de secagem contínua e intermitente**

#### **4.2.3.1 Simulação de casos gerais para elipsoides prolatos**

Os modelos desenvolvidos permitem a implementação de uma estratégia de secagem, a fim de prever possíveis economias de energia. Para prever a distribuição de umidade no interior de sólidos elipsoidais prolatos foram realizados testes de simulação de secagem contínua e intermitente. Os resultados foram obtidos com a solução analítica via método GBI e são apresentados em função do número de Fourier ( $Fo = Dt/a^2$ ).

##### **4.2.3.1.1 Utilizando condição de contorno de primeira espécie**

Testes de secagem contínua e intermitente foram simulados para diferentes condições que são descritas na Tabela 4.8. Os resultados apresentados foram simulados considerando-se sólidos com razão de aspecto  $b/a = 1,1; 2,0$  e  $5,0$ , mantendo  $a = 1,0$  cm em todos os casos, coeficiente de difusividade arbitrário  $D = 1,0 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s e Biot infinito.

A Figura 4.18 apresenta uma comparação entre as cinéticas de secagem contínua para os três sólidos considerados nos testes T1, T2 e T3. Analisando a Figura 4.18, observa-se que a razão de aspecto do elipsoide tem uma influência direta no processo de secagem, o que está de acordo com trabalhos existentes na literatura (LIMA, 1999; LIMA, D. et al., 2004a). Quanto maior for a relação área/volume, maior será a velocidade de secagem. Observa-se também que o teor de umidade médio dos sólidos considerados decresceu rapidamente no início do processo, devido aos altos gradientes de concentração gerados neste período.

O modelo de secagem intermitente foi usado para estudar o efeito do aumento do tempo de têmpera e do número de pausas na taxa de difusão de sólidos elipsoidais com razão de aspecto  $b/a = 1,1; 2,0$  e  $5,0$ . Admitindo uma única pausa, com início em  $Fo = 0,018$ , foram considerados três tempos de têmpera distintos. O primeiro, finalizando em  $Fo = 0,036$ , o segundo em  $Fo = 0,054$  e o terceiro em  $Fo = 0,162$ . Nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 são apresentadas as cinéticas de secagem contínua e intermitente para os três sólidos estudados. Eliminando-se o período de têmpera e comparando com a curva de secagem contínua, observou-se que a taxa de secagem é diretamente proporcional ao tempo de têmpera. Quanto maior o tempo de têmpera considerado, maior é a taxa de secagem pós-têmpera, o que está de acordo com resultados experimentais de secagem intermitente de produtos agrícolas reportados na literatura (CIHAN et al., 2008; YANG et al., 2013).

Tabela 4.8. Descrição dos testes teóricos para Biot infinito

Testes	Características do sólido				Têmpera			
	Razão de aspecto (b/a)	Área superficial (A) (cm <sup>2</sup> )	Volume (V) (cm <sup>3</sup> )	Relação A/V	Nº de pausas	Início da têmpera (Fo)	Fim da têmpera (Fo)	$\Delta Fo$
T1	1,1	13,4119	4,6076	2,9108	0	-	-	-
T2	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	0	-	-	-
T3	5,0	50,1968	20,9439	2,3967	0	-	-	-
T4	1,1	13,4119	4,6076	2,9108	1	0,018	0,036	0,018
T5	1,1	13,4119	4,6076	2,9108	1	0,018	0,054	0,036
T6	1,1	13,4119	4,6076	2,9108	1	0,018	0,162	0,144
T7	1,1	13,4119	4,6076	2,9108	1	0,018	0,252	0,234
T8	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,036	0,018
T9	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,054	0,036
T10	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,162	0,144
T11	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,252	0,234
T12	5,0	50,1968	20,9439	2,3967	1	0,018	0,036	0,018
T13	5,0	50,1968	20,9439	2,3967	1	0,018	0,054	0,036
T14	5,0	50,1968	20,9439	2,3967	1	0,018	0,162	0,144
T15	1,1	13,4119	4,6076	2,9108	2	0,018	0,036	0,018
						0,054	0,072	
T16	1,1	13,4119	4,6076	2,9108	2	0,018	0,054	0,036
						0,072	0,108	
T17	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	2	0,018	0,036	0,018
						0,054	0,072	
T18	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	2	0,018	0,054	0,036
						0,072	0,108	
T19	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	4	0,018	0,054	0,036
						0,072	0,108	
						0,126	0,162	
						0,180	0,216	

Figura 4.18. Teor de umidade médio adimensional em função do número de Fourier para sólidos esferoidais com diferentes razões de aspecto (casos T1, T2 e T3).

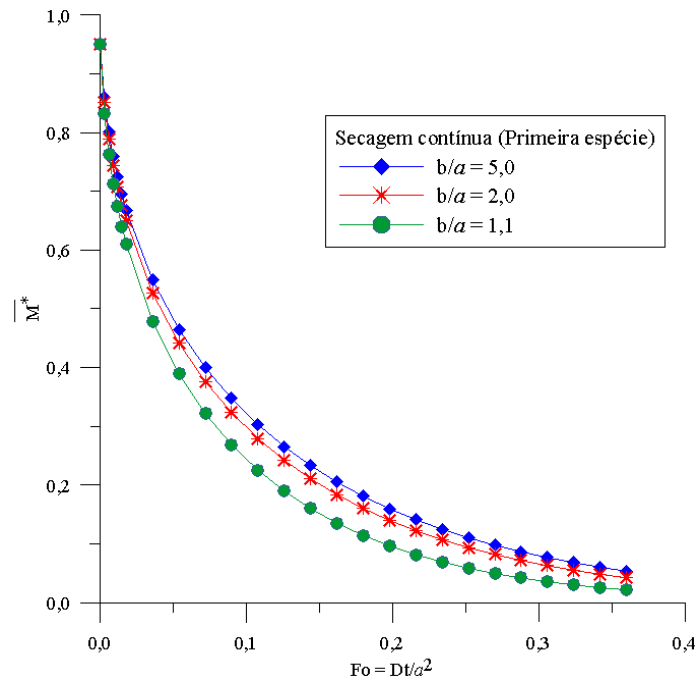


Figura 4.19. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 1,1 para um período de pausa: (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T4, T5 e T6)

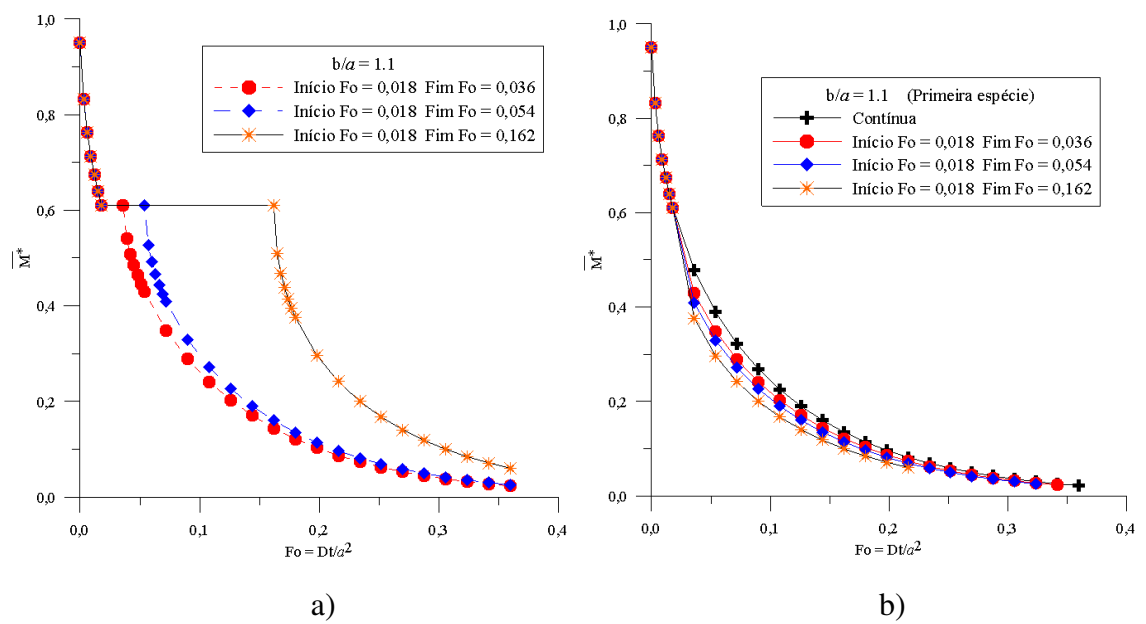


Figura 4.20. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para um período de pausa: (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T8, T9 e T10)

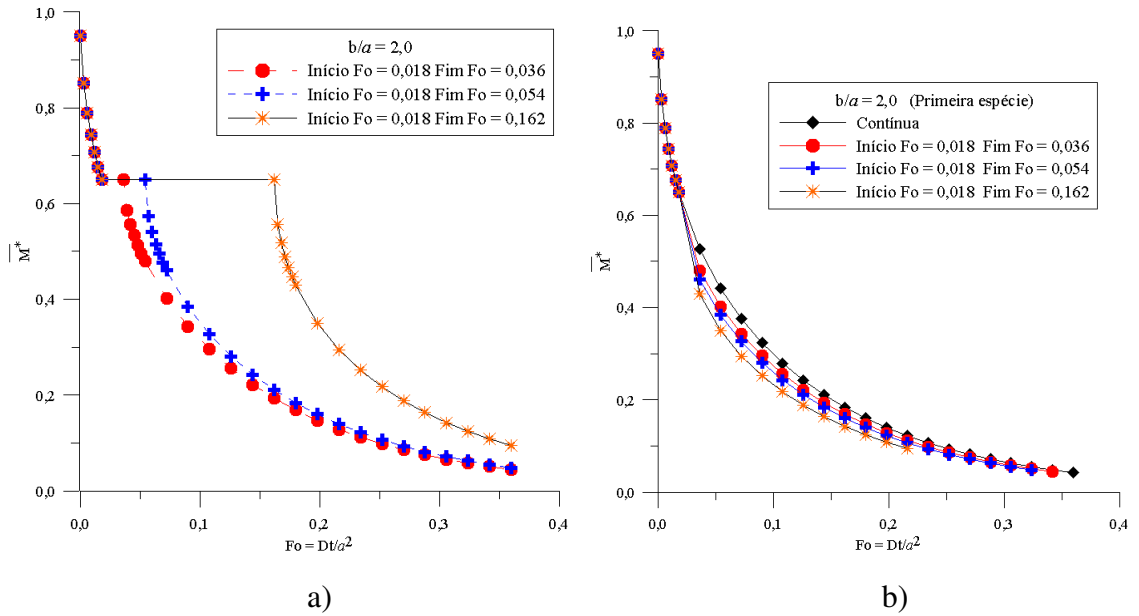
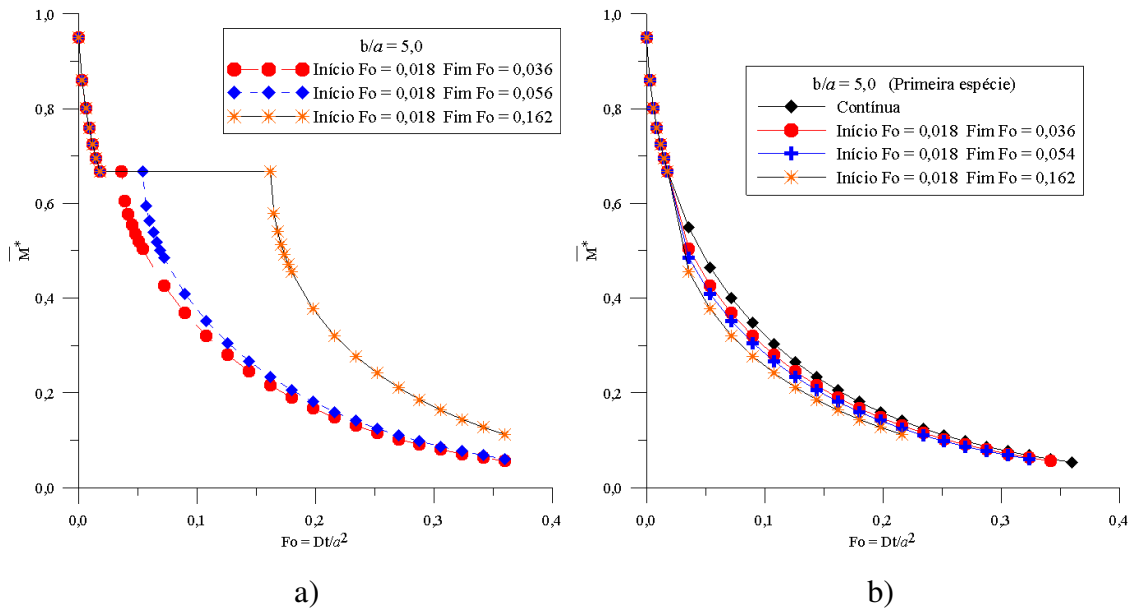


Figura 4.21. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 5,0 para um período de pausa: (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T12, T13 e T14)



Em particular, para o sólido de razão de aspecto  $b/a = 2,0$  (Figura 4.20b), eliminando-se o tempo de têmpera, após um tempo adimensional  $Fo = 0,216$  de operação efetiva de secagem contínua, o teor de umidade médio adimensional obtido por simulação foi de aproximadamente 0,12 (secagem contínua) e para os três tipos de têmpera considerados, o teor de umidade médio adimensional foi de aproximadamente 0,11; 0,10 e 0,09, respectivamente.

A Figura 4.22 mostra a evolução do teor de umidade adimensional no centro e na superfície durante o período de têmpera para sólidos de razão de aspecto  $b/a = 1,1$ ; 2,0 e 5,0. Observa-se que o teor de umidade no centro decresce, enquanto que, na superfície do sólido, o teor de umidade cresce. Este comportamento do teor de umidade confirma a migração de água do centro para a superfície do sólido durante o período de repouso. Pode-se afirmar também que, quanto menor a razão de aspecto, maior será a migração de umidade do centro para a superfície.

A Figura 4.23 ilustra o comportamento do teor de umidade adimensional de elipsoides de razões de aspecto  $b/a = 1,1$  e 2,0 como função da coordenada radial ( $z = 0$ ) para vários números de Fourier durante o período de têmpera com início em  $Fo = 0,018$ . Analisando a ilustração, verifica-se que o teor de umidade adimensional tende a ser constante e igual ao teor de umidade médio com o aumento do tempo de processo, em termos do número de Fourier (tempo adimensional). O aumento do período de têmpera proporciona uma maior uniformidade no interior do sólido e, portanto, no reinício do processo de secagem, tem-se que a superfície do produto encontra-se com teor de umidade maior, com relação ao equilíbrio, o que resulta num aumento do “driven force” do processo.

Durante a têmpera, o teor de umidade médio adimensional simulado foi mantido constante e igual a 0,61002 e 0,649357, respectivamente, para  $b/a = 1,1$  e  $b/a = 2,0$ , que correspondem aos teores de umidade médio no final do primeiro período de secagem contínua. Tomando como referência as curvas para  $Fo = 0,252$  e  $r = 0$  ( $z = 0$ ), os teores de umidade adimensional são 0,622128 e 0,695144, respectivamente, para  $b/a = 1,1$  e  $b/a = 2,0$ . Para a coordenada  $r = 1,0$  cm ( $z = 0$ ), tem-se, respectivamente, os teores de umidade adimensional 0,610488 e 0,673914. Desta forma, foi possível perceber que os teores de umidade adimensional no centro e na superfície do sólido tornam-se próximos e que esta aproximação é maior para o elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 1,1$ , que possui o volume menor. Destaca-se, portanto, a influência da geometria no processo de uniformização do teor de umidade durante o período de têmpera. Quanto maior a razão de aspecto, maiores serão o volume e área superficial do sólido e o tempo necessário para uniformidade do teor de umidade no seu interior.



Este fato fica mais evidenciado observando-se os perfis de umidade, em vários instantes de secagem, que serão apresentados a seguir para a secagem contínua e intermitente com uma única pausa.

Figura 4.22. Evolução do teor de umidade no centro e na superfície de elipsoides com razão de aspecto  $b/a = 1,1; 2,0$  e  $5,0$  durante período de têmpera de  $\Delta Fo = 0,144$  (casos T6, T10 e T14).

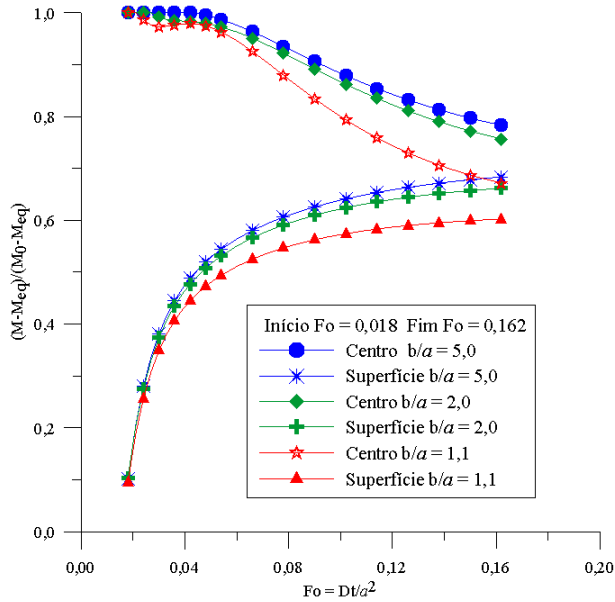
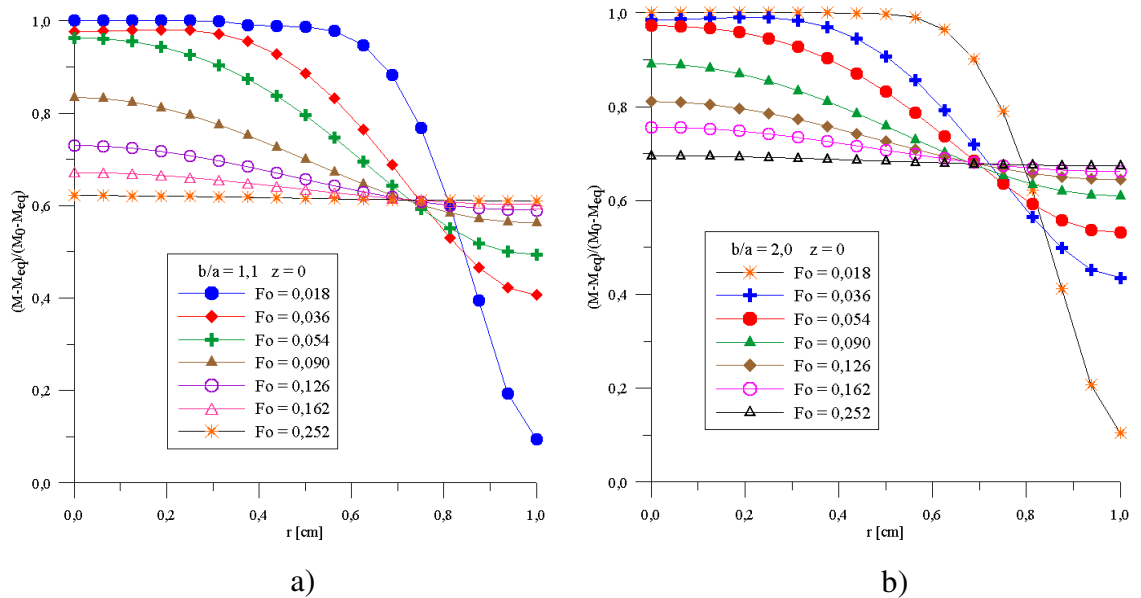


Figura 4.23. Distribuição radial ( $z = 0$ ) do teor de umidade no interior de elipsoides durante o período de têmpera para diferentes  $Fo$ : (a)  $b/a = 1,1$  e (b)  $b/a = 2,0$  (casos T7 e T11)



As Figuras 4.24 a 4.26 apresentam a distribuição do teor de umidade adimensional no interior de elipsoides com razão de aspecto  $b/a = 1,1; 2,0$  e  $5,0$  em função das coordenadas cilíndricas  $(r, z)$ , durante o primeiro período de secagem contínua em dois tempos adimensionais:  $0,006$  e  $0,015$ .

Verificou-se nos três casos a existência de altos gradientes de umidade próximo a superfície do sólido, no início do processo de secagem. As áreas onde os gradientes de umidade são elevados são as áreas com maior perda de água. Estas áreas também apresentam altos gradientes de temperatura. Estes efeitos elevam as tensões térmicas, hídricas e mecânicas e, conseqüentemente, o surgimento de trincas e deformações do produto, comprometendo a sua qualidade final. Efeitos semelhantes foram observados por Lima (1999), Oliveira e Lima (2002), Lima, D. et al. (2004a) e Santos (2013).

Ao comparar-se as Figuras 4.24 a 4.26 foi possível verificar que a razão de aspecto influencia diretamente na cinética de secagem. Quanto menor a razão de aspecto, mais rápido o sólido vai secar antes de iniciar o período de têmpera.

Figura 4.24. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 1,1$  durante o primeiro período de secagem contínua para os tempos adimensionais: (a)  $Fo = 0,006$  e (b)  $Fo = 0,015$  (caso T4)

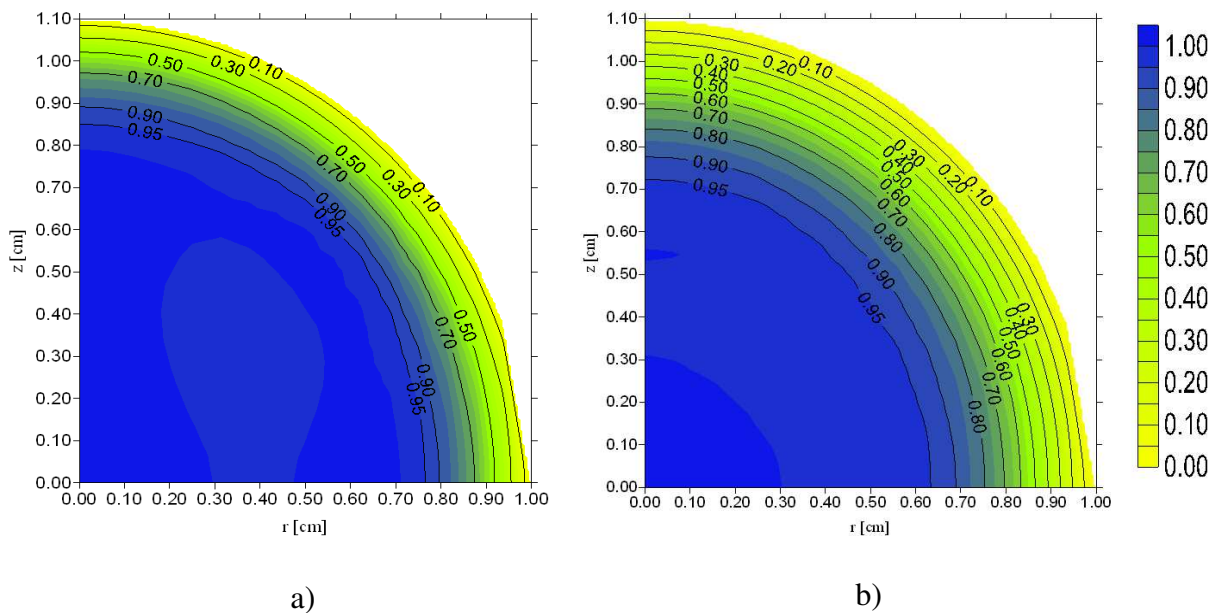


Figura 4.25. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  durante o primeiro período de secagem contínua para os tempos adimensionais: (a)  $Fo = 0,006$  e (b)  $Fo = 0,015$  (caso T8)

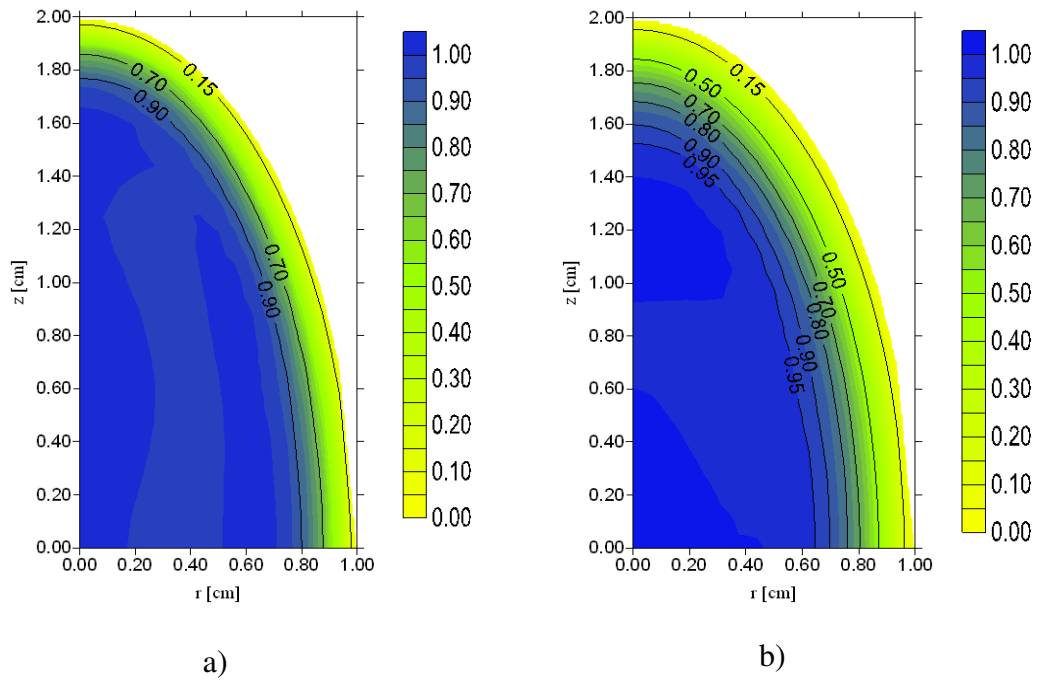
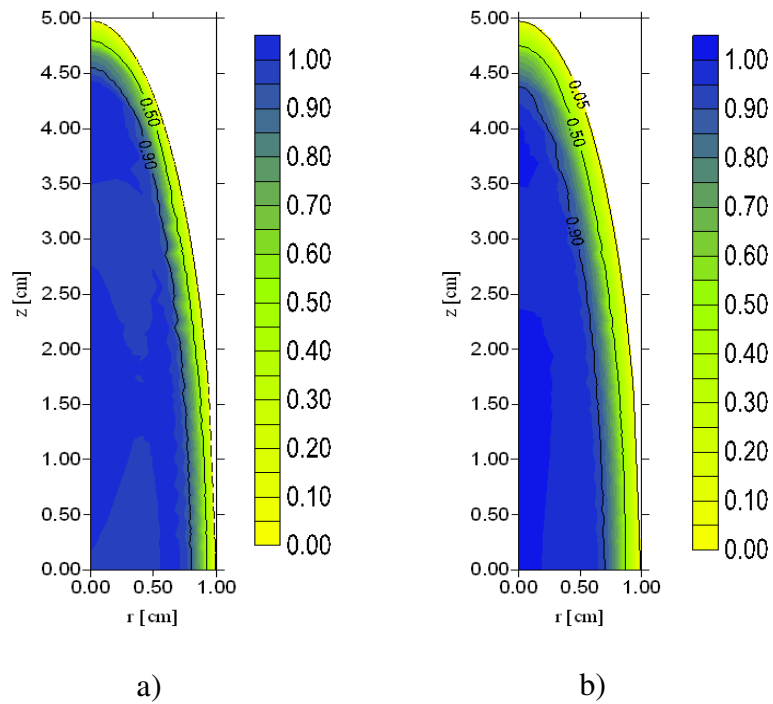


Figura 4.26. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 5,0$  durante o primeiro período de secagem contínua para os tempos adimensionais: (a)  $Fo = 0,006$  e (b)  $Fo = 0,015$  (caso T12)



As Figuras 4.27 a 4.29 apresentam a distribuição do teor de umidade adimensional em função das coordenadas cilíndricas ( $r, z$ ), no interior de elipsoides de razões de aspecto  $b/a = 1,1; 2,0$  e  $5,0$ , no início ( $Fo = 0,018$ ) e durante o período de têmpera para os tempos adimensionais:  $0,036; 0,054$  e  $0,162$ .

Figura 4.27. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 1,1$  durante o período de têmpera: (a)  $Fo = 0,018$  (início); (b)  $Fo = 0,036$ ; (c)  $Fo = 0,054$  e (d)  $Fo = 0,162$  (caso T6)

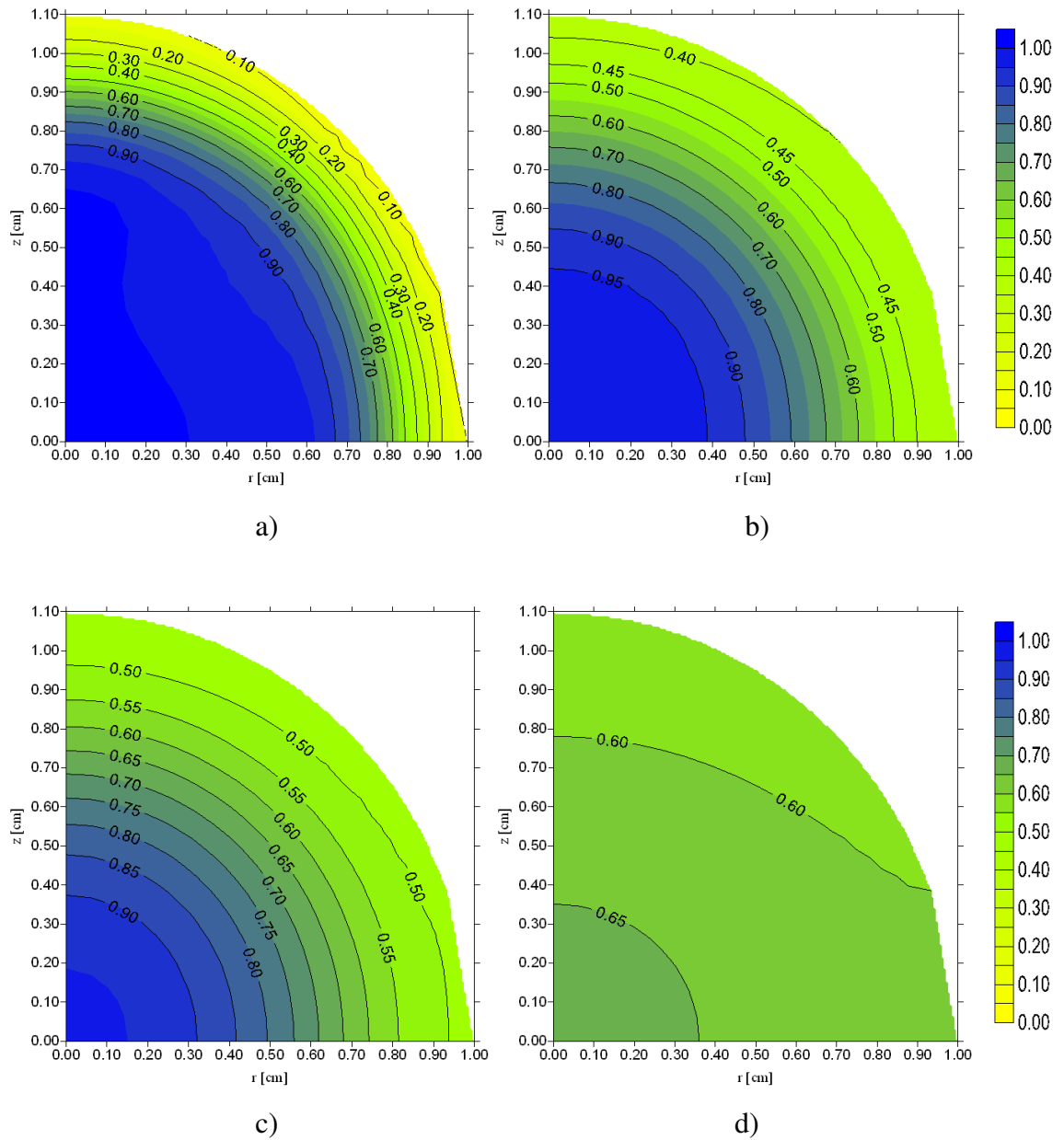
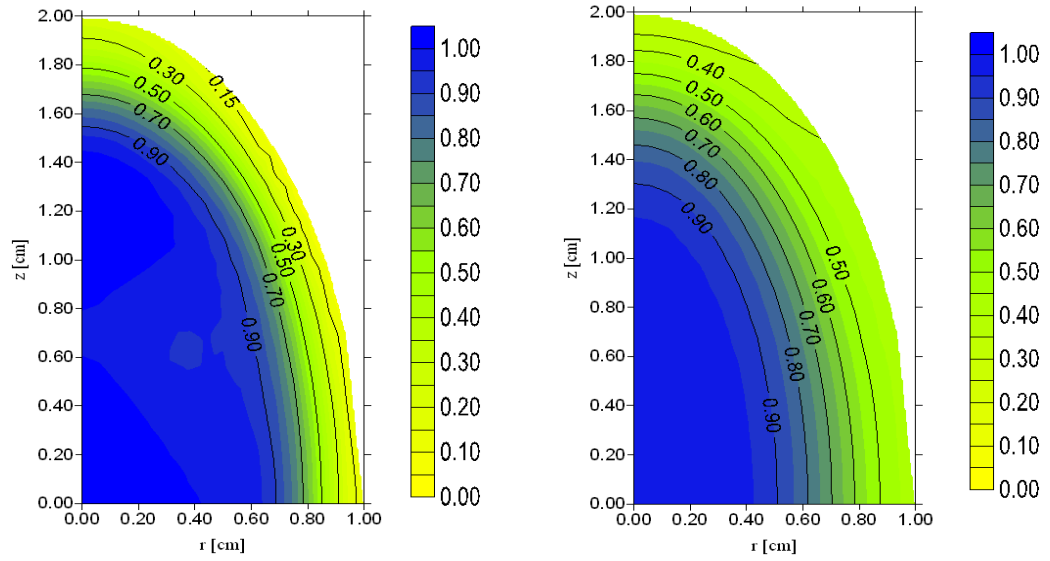
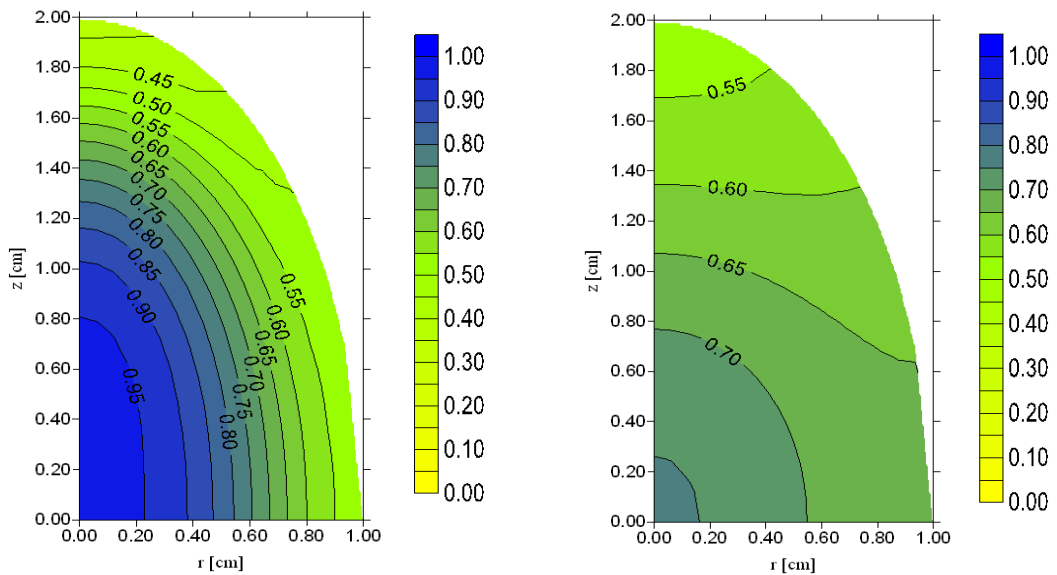


Figura 4.28. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  durante o período de têmpera: (a)  $Fo = 0,018$  (início); (b)  $Fo = 0,036$ ; (c)  $Fo = 0,054$  e (d)  $Fo = 0,162$  (caso T10)



a)

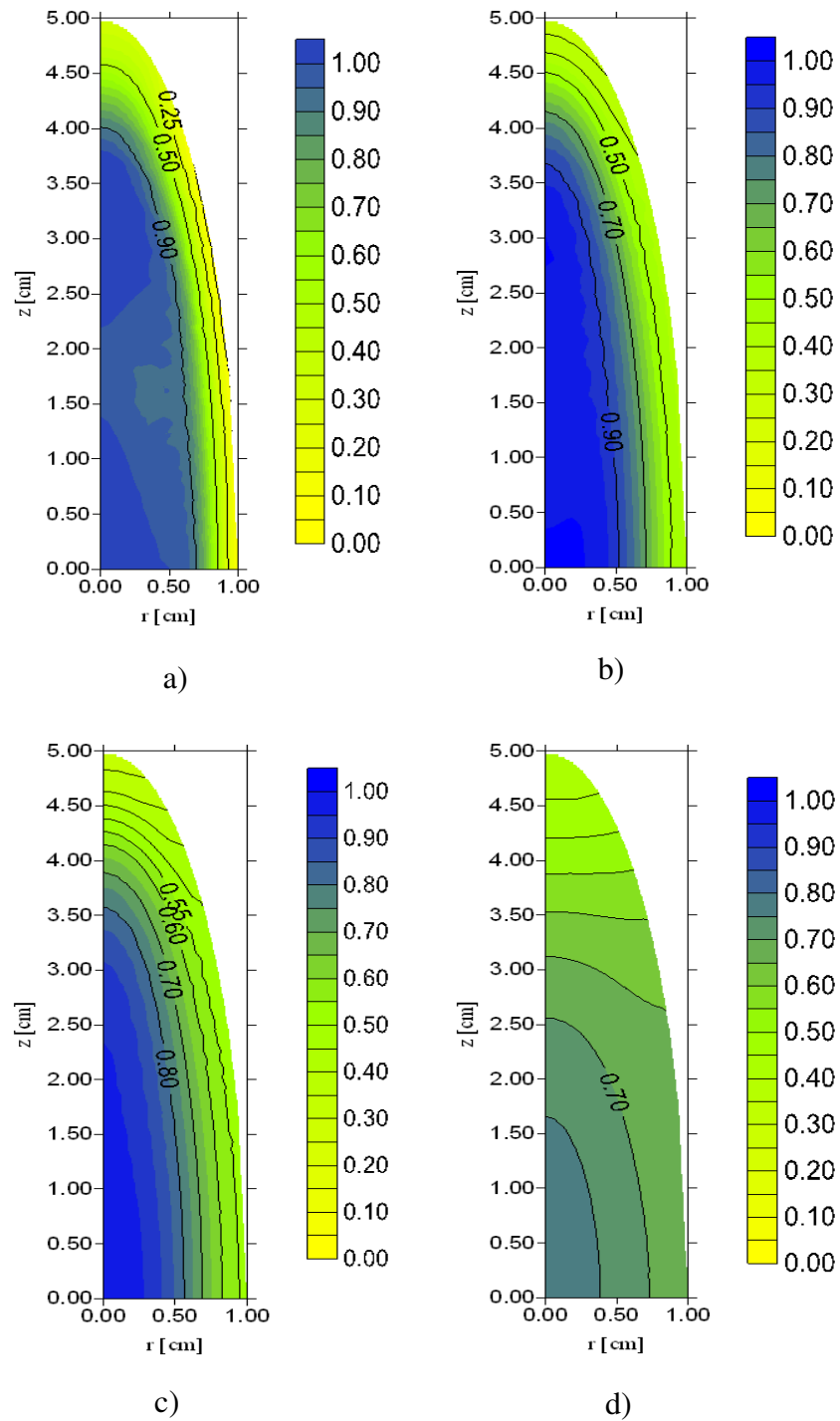
b)



c)

d)

Figura 4.29. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 5,0$  no início e no final do período de têmpera: (a)  $Fo = 0,018$  (início); (b)  $Fo = 0,036$ ; (c)  $Fo = 0,054$  e (d)  $Fo = 0,162$  (caso T14)



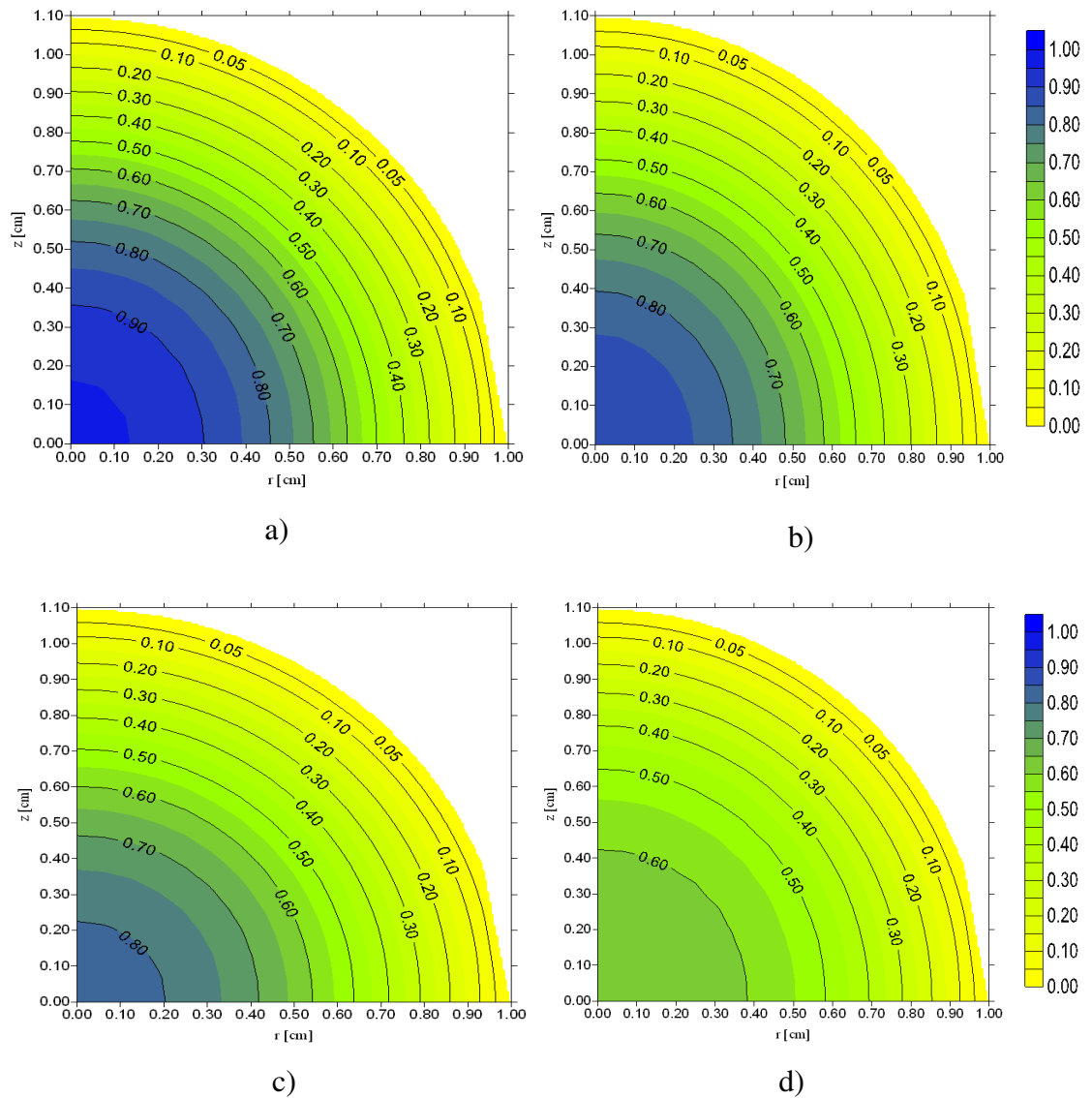
A redistribuição de umidade no interior do sólido, durante o período de pausa, pode explicar o aumento da taxa de secagem no período pós-têmpera, já que a água acumulada na superfície do sólido é retirada mais facilmente no período subsequente de secagem contínua.

A partir das Figuras 4.27 a 4.29, observa-se a redistribuição de umidade, durante o período de têmpera. Os gradientes de umidade tendem a diminuir lentamente em direção a zero. Para os três sólidos estudados, foi possível eliminar quase que totalmente os gradientes de umidade no interior do sólido em  $Fo = 0,162$ , que corresponde ao maior tempo de têmpera ( $\Delta Fo = 0,144$ ) considerado nos testes. Ao longo do tempo, o teor de umidade adimensional diminuiu na parte central da seção do elipsoide e aumentou na região periférica. Verificou-se também que, ao final dos três períodos de têmpera considerados, o sólido com menor razão de aspecto apresenta menor quantidade de água no centro, o que está de acordo com a Figura 4.22. Isto indica que, quanto menor a razão de aspecto, menor será o tempo de têmpera necessário para o nivelamento de umidade em seu interior, diminuindo, portanto, o tempo de operação total do processo.

Afim de analisar o efeito da têmpera no período subsequente de secagem contínua, foi escolhido arbitrariamente um tempo adimensional  $Fo = 0,054$ , eliminando-se o período de têmpera. As Figuras 4.30 a 4.32 apresentam a distribuição do teor de umidade adimensional em função das coordenadas cilíndricas ( $r,z$ ) no interior dos sólidos esferoidais com razões de aspecto  $b/a = 1,1; 2,0$  e  $5,0$ , no mesmo tempo adimensional  $Fo = 0,054$ , para secagem contínua e intermitente eliminando-se o período de têmpera, para os três casos estudados ( $\Delta Fo = 0,018$ ;  $\Delta Fo = 0,036$  e  $\Delta Fo = 0,144$ ). Foi possível perceber que o teste de secagem intermitente, correspondente ao maior tempo de pausa ( $\Delta Fo = 0,144$ ), proporcionou uma secagem mais rápida para os três sólidos estudados, o que está de acordo com a cinética de secagem.

Para analisar o efeito do aumento do tempo de têmpera na secagem intermitente com duas pausas, considerou-se sólidos elipsoidais com razões de aspecto  $b/a = 1,1$  e  $2,0$ . Para cada sólido, duas relações de intermitência foram testadas. No primeiro teste, aplicou-se a relação de intermitência 1:1, isto é, o tempo de secagem antes da têmpera foi considerado igual ao tempo de repouso ( $\Delta Fo = 0,018$ ). No segundo teste, considerou-se a relação de intermitência 1:2, em que o tempo de repouso ( $\Delta Fo = 0,036$ ) foi o dobro do tempo de secagem antes da têmpera ( $\Delta Fo = 0,018$ ). Da análise das Figuras 4.33 e 4.34 verifica-se que, para os dois sólidos estudados, a taxa de remoção de umidade foi maior quando se utilizou a relação de intermitência 1:2. Assim, com a diminuição da relação de intermitência melhores resultados foram obtidos, fato também observado por Meneghetti et al. (2012) para secagem de grãos de arroz em casca.

Figura 4.30. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 1,1$  para secagem contínua e intermitente com o mesmo tempo adimensional de operação efetiva  $Fo = 0,054$ : (a) secagem contínua ( $Fo = 0,054$ ); (b)  $\Delta Fo = 0,018$  ( $Fo = 0,072$ ); (c)  $\Delta Fo = 0,036$  ( $Fo = 0,090$ ) e (d)  $\Delta Fo = 0,144$  ( $Fo = 0,198$ ) (casos T1, T4, T5 e T6)



A Figura 4.35 mostra a influência do uso de um ou dois períodos de repouso na cinética de secagem intermitente para um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto  $b/a = 2,0$ . Foi possível verificar que a secagem intermitente com duas pausas proporcionou melhores resultados quando comparada com a secagem intermitente com uma única pausa, como também constatou Lima et al. (2015).



Figura 4.31. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  para secagem contínua e intermitente com o mesmo tempo adimensional de operação efetiva  $Fo = 0,054$ : (a) secagem contínua ( $Fo = 0,054$ ); (b)  $\Delta Fo = 0,018$  ( $Fo = 0,072$ ); (c)  $\Delta Fo = 0,036$  ( $Fo = 0,090$ ); e (d)  $\Delta Fo = 0,144$  ( $Fo = 0,198$ ) (casos T2, T8, T9 e T10)

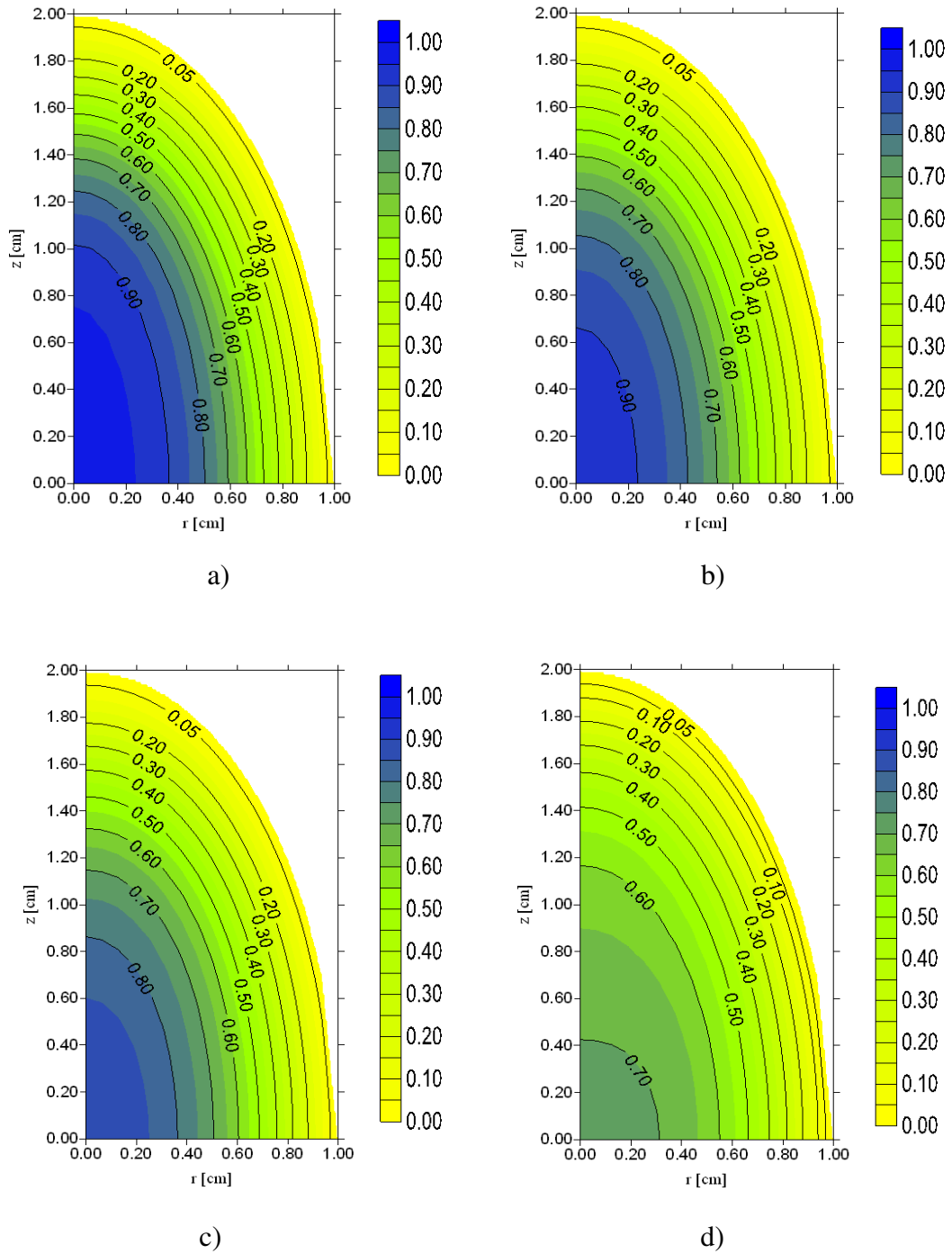


Figura 4.32. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 5,0$  para secagem contínua e intermitente com o mesmo tempo adimensional de operação efetiva  $Fo = 0,054$ : (a) secagem contínua ( $Fo = 0,054$ ); (b)  $\Delta Fo = 0,018$  ( $Fo = 0,072$ ); (c)  $\Delta Fo = 0,036$  ( $Fo = 0,090$ ); e (d)  $\Delta Fo = 0,144$  ( $Fo = 0,198$ ) (casos T3,T12, T13 e T14)

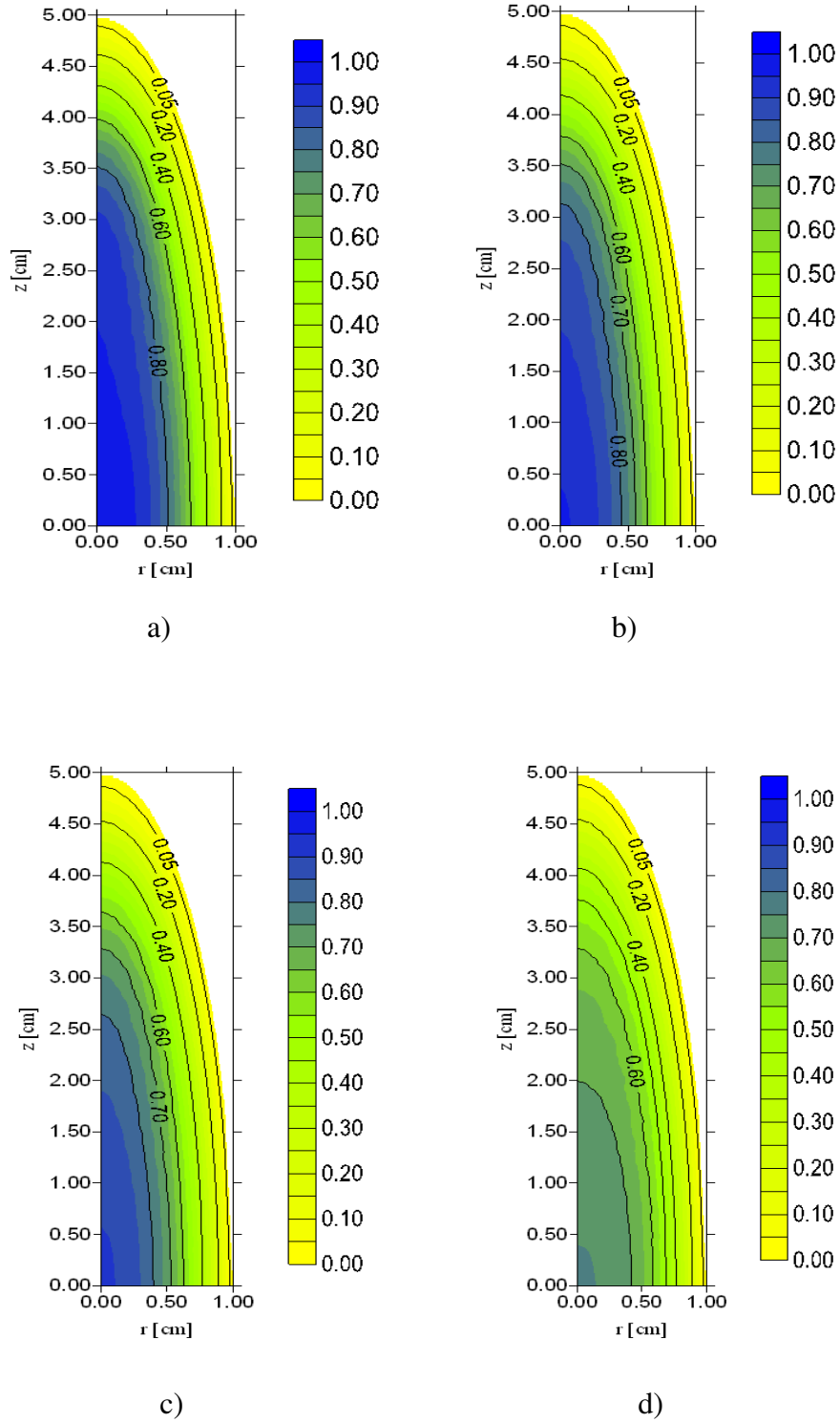


Figura 4.33. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 1,1 para dois períodos de pausa: (a) incluindo o período de têmpera; (b) excluindo o período de têmpera (casos T1, T15 e T16)

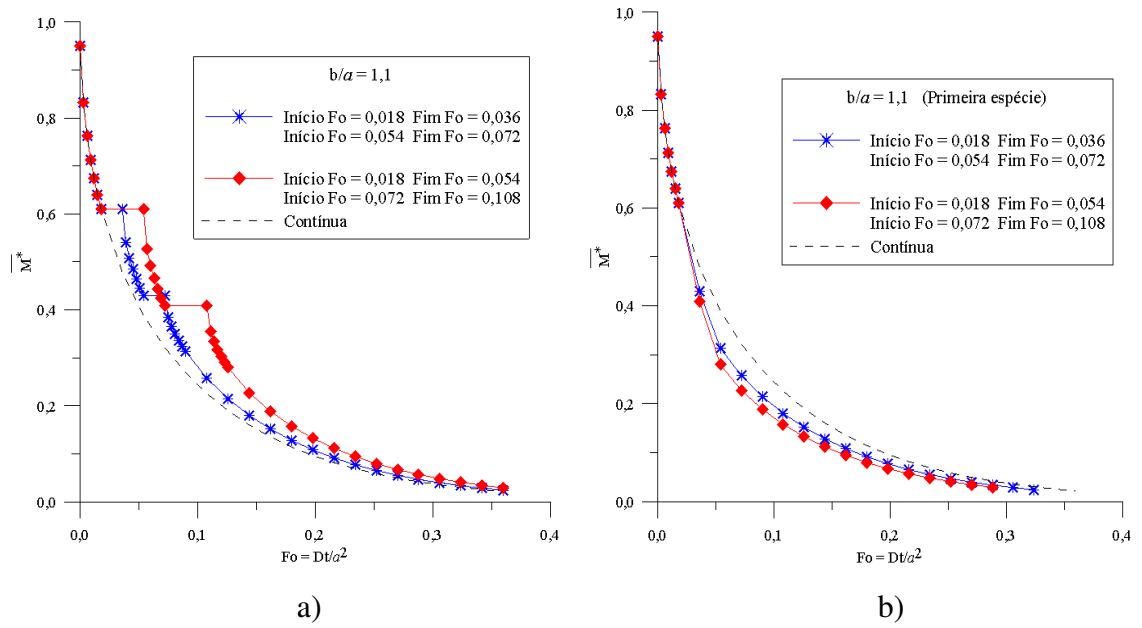
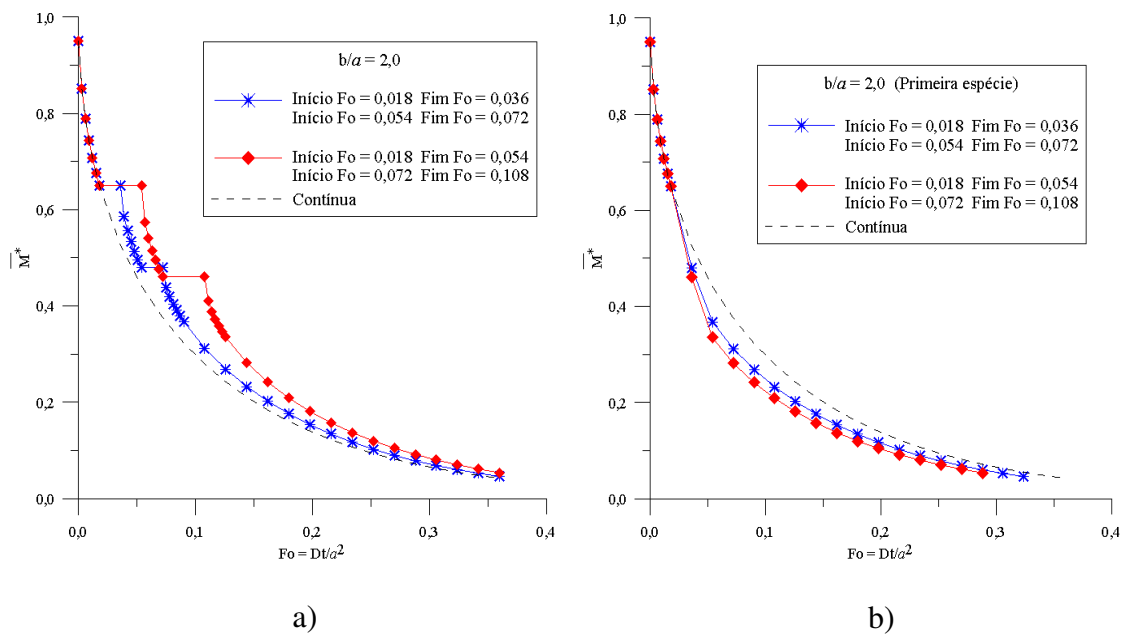
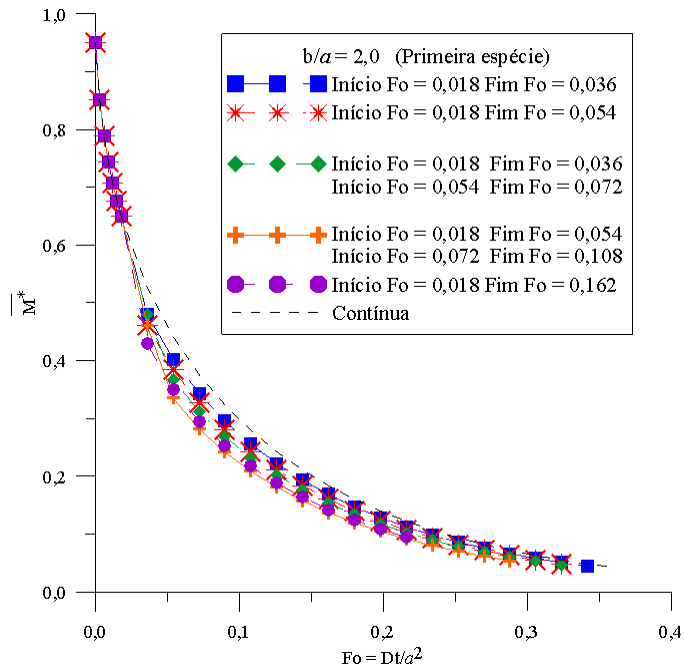


Figura 4.34. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para dois períodos de pausa: (a) incluindo o período de têmpera; (b) excluindo o período de têmpera (casos T2, T17 e T18)



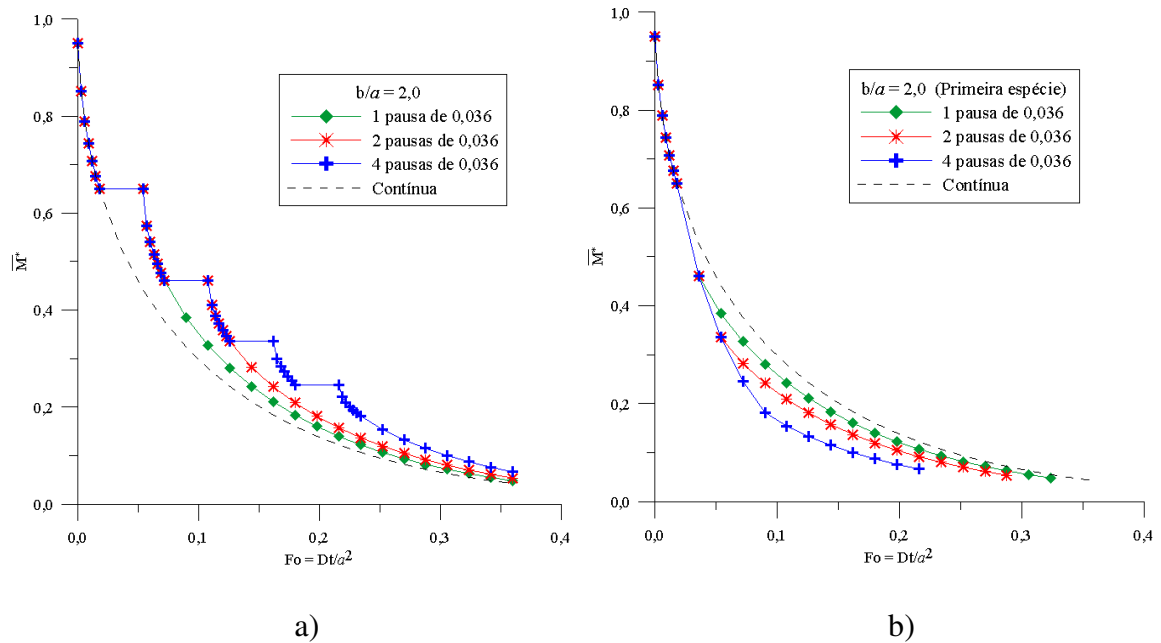
A partir da Figura 4.35, também foi possível verificar aumento na taxa de secagem com uma única pausa, aumentando  $\Delta Fo$  para que se tenha maior uniformização do teor de umidade no interior do sólido. Po exemplo, com uma pausa de  $\Delta Fo = 0,144$  o efeito na cinética de secagem foi semelhante ao obtido com duas pausas de  $\Delta Fo = 0,036$ . Neste caso, para um tempo adimensional de secagem  $Fo = 0,216$  foi possível obter o mesmo teor de umidade médio adimensional  $0,094648$ , o que indica mesma redução de tempo de processo. No entanto, o tempo total (tempo de secagem efetiva mais tempo de repouso) é aumentado com uma única pausa de  $0,144$ .

Figura 4.35. Comparação entre as cinéticas de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0, para um e dois períodos de pausas, excluindo o período de têmpera (casos T2, T8, T9, T10, T17 e T18)



Na Figura 4.36, percebe-se o efeito do número de pausas na remoção de umidade em um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto  $b/a = 2,0$ . Em todos os casos testados, o tempo de repouso ( $\Delta Fo = 0,036$ ) foi o dobro do tempo de secagem antes da têmpera ( $\Delta Fo = 0,018$ ). Eliminando-se o tempo de têmpera na cinética de secagem e escolhendo arbitrariamente o tempo adimensional  $Fo = 0,108$ , o teor de umidade médio adimensional obtido foi de aproximadamente  $0,28$  para secagem contínua, enquanto que, para os três testes de têmpera (1, 2 e 4 pausas), o teor de umidade médio adimensional foi de aproximadamente  $0,24$ ;  $0,20$  e  $0,15$ , respectivamente. A taxa de secagem aumenta com o aumento do número de pausas.

Figura 4.36. Evolução do teor de umidade médio adimensional de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para uma, duas e quatro períodos de pausas: (a) incluindo o período de têmpera; (b) excluindo o período de têmpera (casos T2, T9, T18 e T19)



#### 4.2.3.1.2 Utilizando condição de contorno de terceira espécie

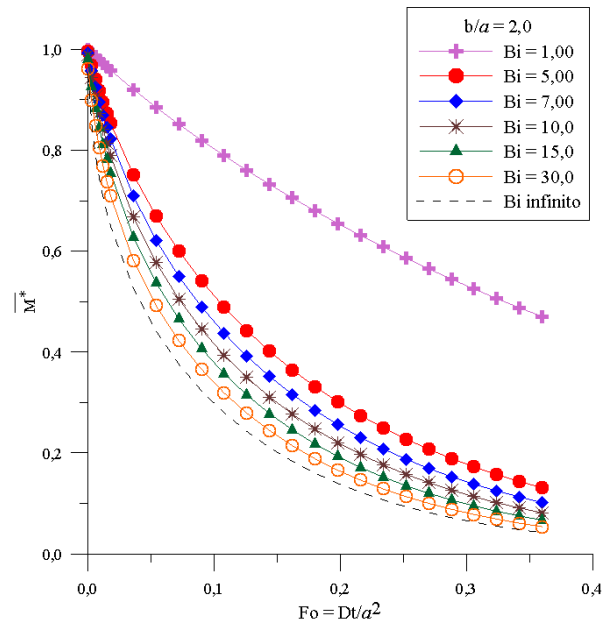
Para a condição de contorno de terceira espécie, considera-se que o teor de umidade na superfície não atinge o valor de equilíbrio instantaneamente no início do processo de secagem. Neste caso, o teor de umidade na superfície se modifica ao longo do processo e a velocidade com que essa variação ocorre é medida através do coeficiente de transferência de massa convectivo ( $h$ ) ou, de forma adimensional, a partir do número de Biot ( $Bi = ha/D$ ). Os resultados apresentados a seguir foram simulados considerando-se o número de Biot finito, como descrito na Tabela 4.9, e o coeficiente de difusividade de massa constante  $D = 1,0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

A Figura 4.37 mostra o efeito do aumento do número de Biot na remoção de umidade em um sólido esferoidal prolato com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  ( $a = 1,0 \text{ cm}$ ), submetido a secagem contínua. Analisando o gráfico verifica-se que, para o mesmo número de Fourier  $Fo = Dt/a^2$ , quanto maior o número de Biot menor será o teor de umidade médio adimensional no interior do sólido (LIMA, 1999; SANTOS et al., 2010). Isto é, o número de Biot é diretamente proporcional à velocidade de secagem e vice-versa. Quanto maior o número de Biot, mais rápida é a convecção e, conseqüentemente, mais rápido o teor de umidade de equilíbrio é atingido na superfície do sólido.

Tabela 4.9. Descrição dos testes teóricos para Biot finito

Testes	N° de Biot	Características do sólido				Têmpera			
		Razão de aspecto (b/a)	Área superficial (A) (cm <sup>2</sup> )	Volume (V) (cm <sup>3</sup> )	Relação A/V	N° de pausas	Início da têmpera (Fo)	Fim da têmpera (Fo)	$\Delta Fo$
T20	1,00	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	0	-	-	-
T21	1,00	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,036	0,018
T22	1,00	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,054	0,036
T23	1,00	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,162	0,144
T24	5,00	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	0	-	-	-
T25	5,00	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,036	0,018
T26	5,00	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,054	0,036
T27	5,00	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,162	0,144
T28	7,00	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	0	-	-	-
T29	7,00	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,036	0,018
T30	7,00	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,054	0,036
T31	7,00	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,162	0,144
T32	10,0	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	0	-	-	-
T33	10,0	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,036	0,018
T34	10,0	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,054	0,036
T35	10,0	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,162	0,144
T36	15,0	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	0	-	-	-
T37	15,0	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,036	0,018
T38	15,0	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,054	0,036
T39	15,0	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	1	0,018	0,162	0,144
T40	15,0	1,1	13,4119	4,6076	2,9108	0	-	-	-
T41	15,0	1,1	13,4119	4,6076	2,9108	1	0,018	0,162	0,144
T42	15,0	5,0	50,1968	20,9439	2,3967	0	-	-	-
T43	15,0	5,0	50,1968	20,9439	2,3967	1	0,018	0,162	0,144
T44	15,0	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	2	0,018 0,108	0,090 0,180	0,072
T45	30,0	2,0	21,4781	8,3775	2,5638	0	-	-	-

Figura 4.37. Teor de umidade médio adimensional em função do número de Fourier para vários números de Biot em um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  (casos T2, T20, T24, T28, T32, T36 e T45)



Ainda da Figura 4.37, foi possível verificar que, para número de Biot igual a 30,0, a cinética de secagem já começa a se aproximar do comportamento de secagem para Biot infinito. Desta forma, se o número de Biot for superior a 30,0, esforços de secagem intermitente que visem aumentar a taxa de secagem produziram alterações semelhantes ao que já foi analisado na seção anterior para condição de contorno de primeira espécie.

As Figuras 4.38 a 4.42 mostram como se comporta o teor de umidade médio adimensional, ao longo do tempo adimensional ( $Fo = Dt/a^2$ ), variando o tempo de têmpera e o número de Biot, para um elipsoide de razão de aspecto  $b/a = 2,0$  ( $a = 1,0$  cm). Observa-se que, para  $Bi = 1,0$ , o efeito de têmpera foi irrelevante no teor de umidade do sólido. Para  $Bi = 5,0$ , o efeito de têmpera começou a ser percebido com pequenas alterações na taxa de secagem.

A Figura 4.43 ilustra o comportamento do teor de umidade adimensional como função da coordenada radial ( $z = 0$ ) para um elipsoide de razão de aspecto  $b/a = 2,0$  para vários números de Fourier e  $Bi = 1,0$  e  $5,0$ , durante o período de têmpera com início em  $Fo = 0,018$  e término em  $Fo = 0,162$ . No instante inicial de têmpera, o teor de umidade médio adimensional é de 0,95844 para  $Bi = 1,0$ , e de 0,85357 para  $Bi = 5,0$ . Analisando a ilustração, observa-se para  $Bi = 1,0$  pequenas variações no teor de umidade ao longo da coordenada radial, isto é, o teor de umidade adimensional é praticamente constante já no início da têmpera e, para  $Bi = 5,0$  tende a ser constante com o aumento do tempo de Fourier.

Figura 4.38. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para  $Bi = 1,0$ : (a) incluindo o período de têmpera e (b) excluindo o período de têmpera (casos T20, T21, T22 e T23)

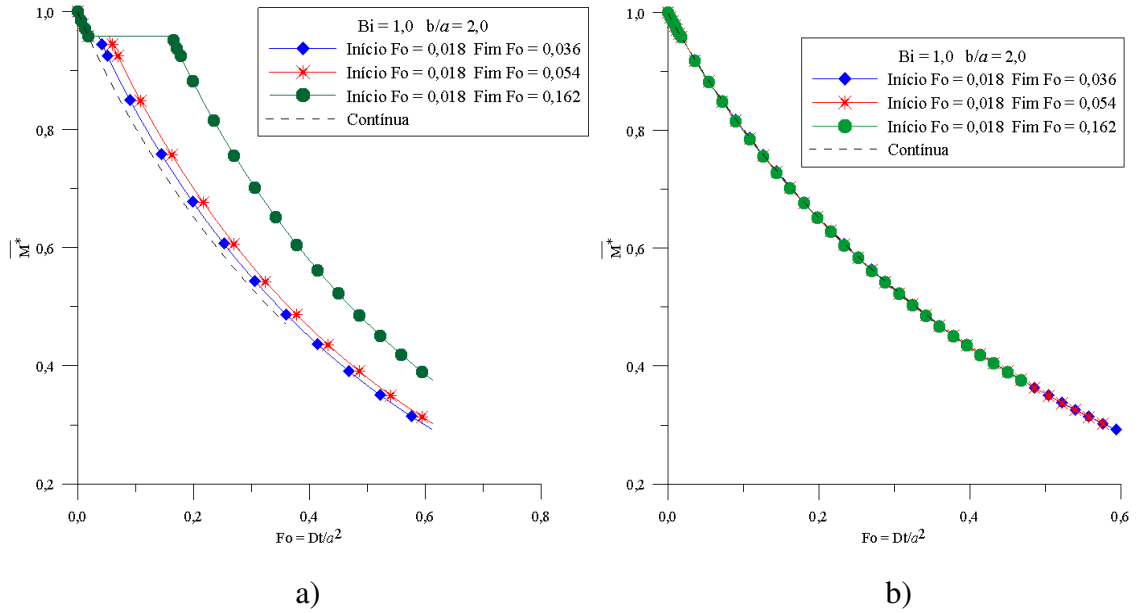


Figura 4.39. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para  $Bi = 5,0$ : (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T24, T25, T26 e T27)

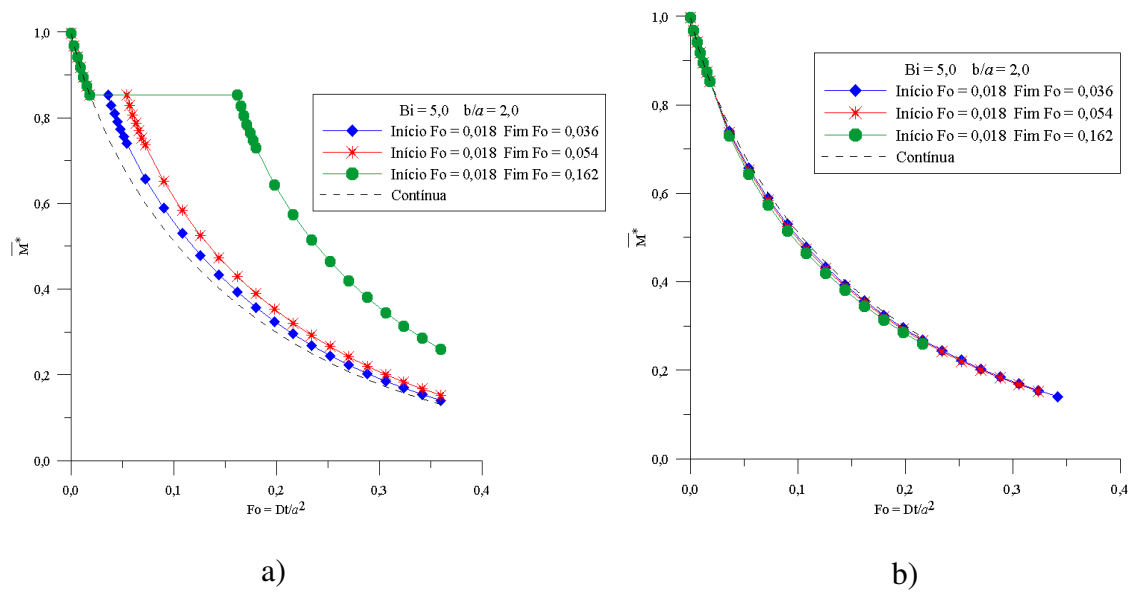




Figura 4.40. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para  $Bi = 7,0$ : (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T28, T29, T30 e T31)

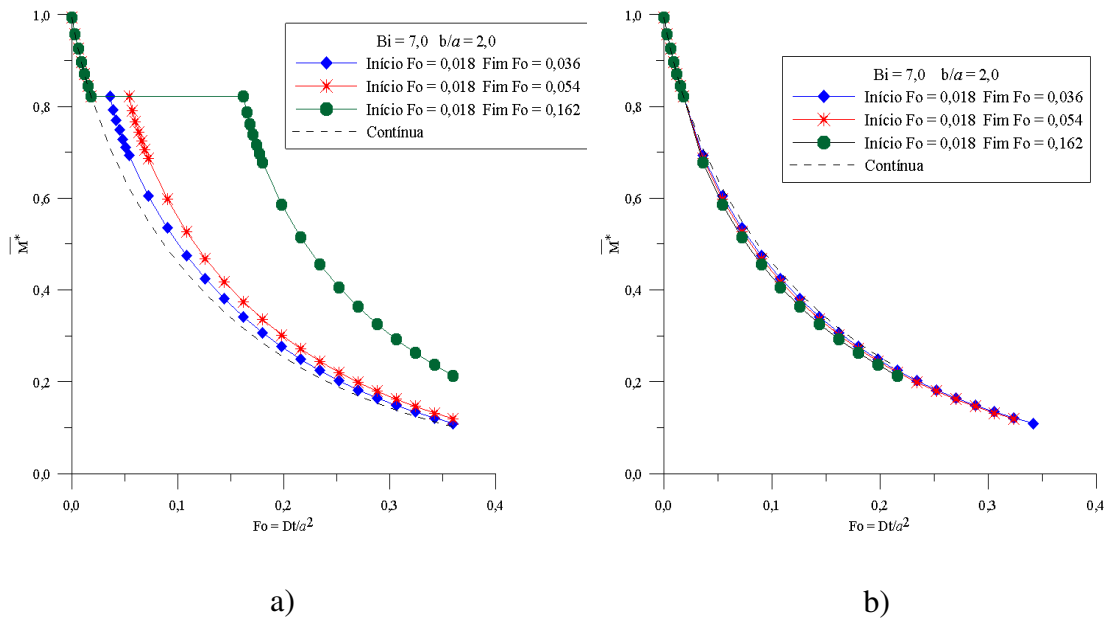


Figura 4.41. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para  $Bi = 10,0$ : (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T32, T33, T34 e T35)

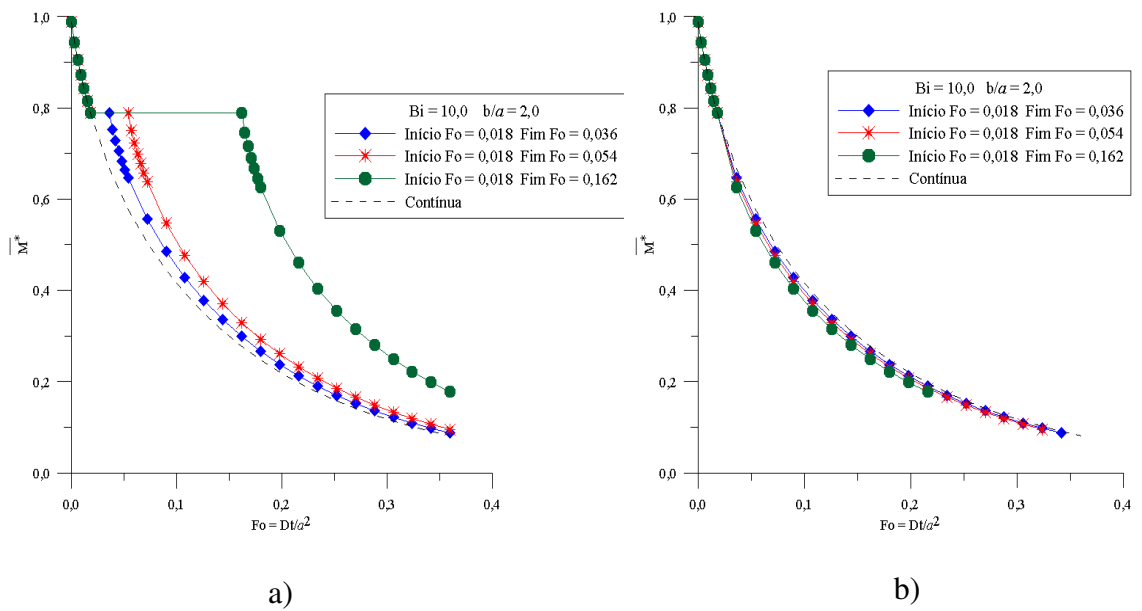


Figura 4.42. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para  $Bi = 15,0$ : (a) incluindo o período de têmpera; e (b) excluindo o período de têmpera (casos T36, T37, T38 e T39)

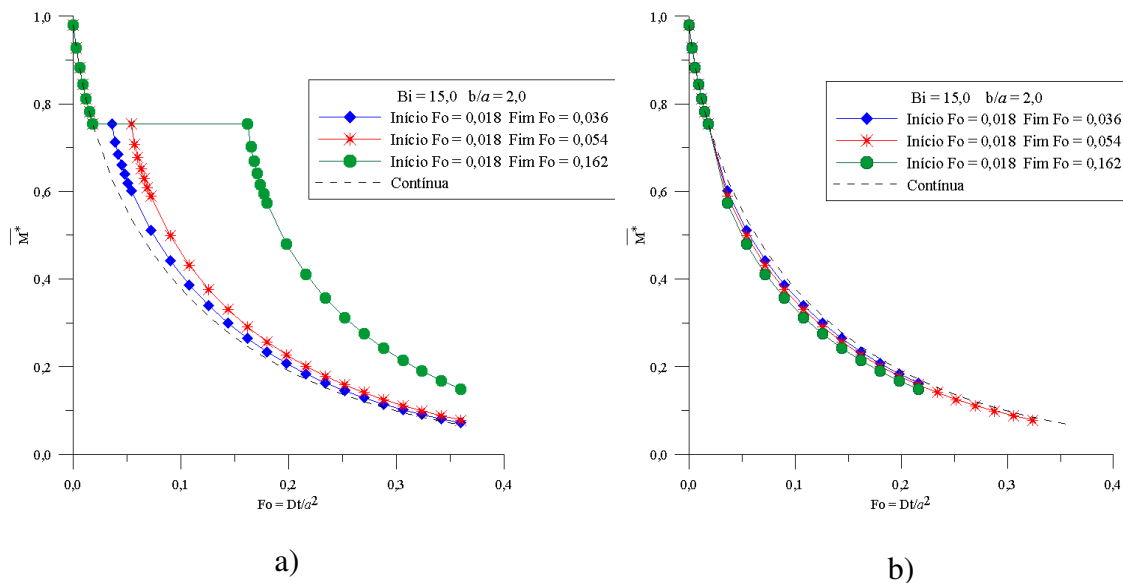
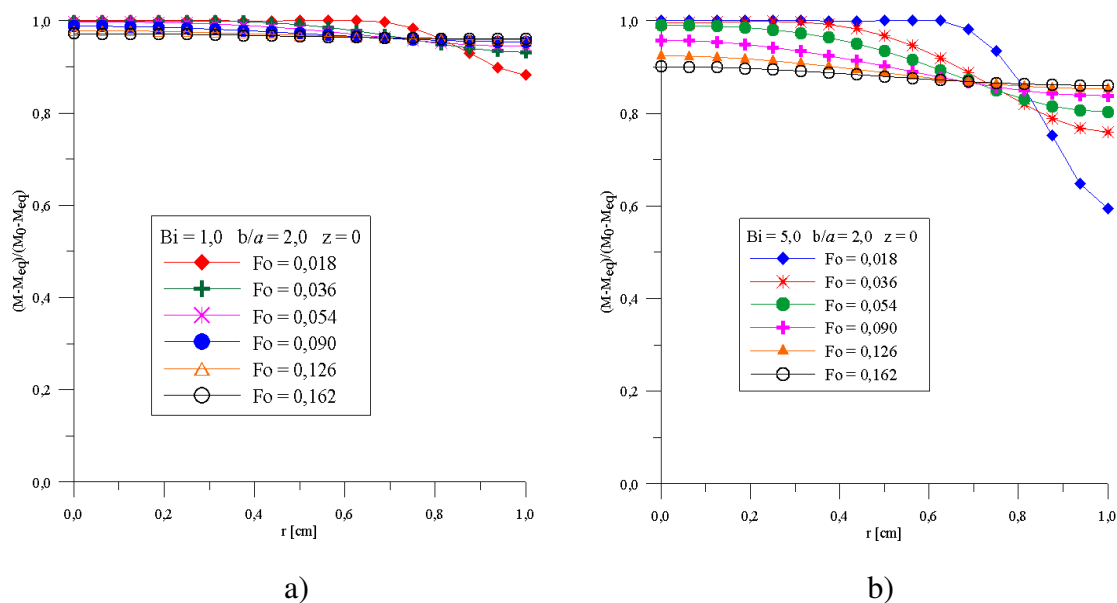
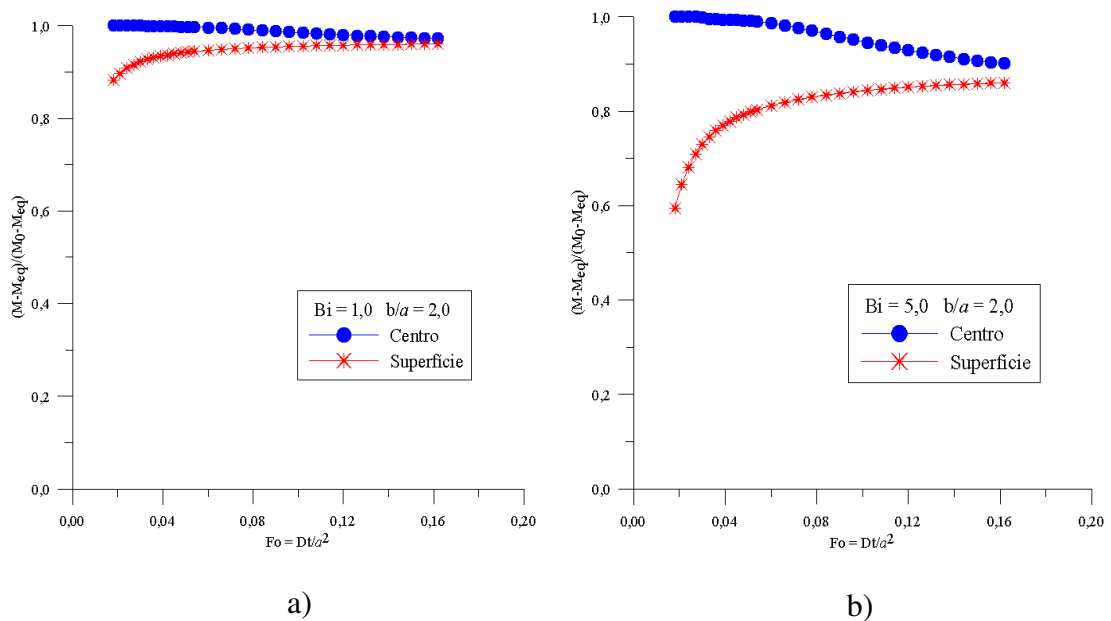


Figura 4.43. Distribui o radial do teor de umidade no interior ( $z = 0$ ) de um elipsoide com razão de aspecto 2,0, durante o período de têmpera para diferentes  $Fo$ : (a)  $Bi = 1,0$  e (b)  $Bi = 5,0$  (casos T23 e T27)



A Figura 4.44 mostra a evolução do teor de umidade adimensional no centro ( $r = 0, z = 0$ ) e na superfície ( $r = a, z = 0$ ) durante o período de têmpera para um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  e para  $Bi = 1,0$  e  $5,0$ . Observa-se, nos dois casos, que o teor de umidade no centro decresceu, enquanto que, na superfície do sólido, o teor de umidade aumentou. Para  $Bi = 1,0$  verificou-se que o teor de umidade no centro e na superfície já são próximos no início da têmpera, isto é, pequenos gradientes de umidade foram gerados no interior do sólido, o que justifica o efeito de têmpera ser irrelevante neste caso.

Figura 4.44. Evolução do teor de umidade no centro e na superfície ( $r = a, z = 0$ ) de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  durante o período de têmpera: (a)  $Bi = 1,0$  e (b)  $Bi = 5,0$  (casos T23 e T27)



As Figuras 4.45 a 4.48 apresentam a distribuição do teor de umidade adimensional em função das coordenadas cilíndricas ( $r,z$ ), no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$ , para  $Bi = 1,0; 5,0; 10,0$  e  $15,0$ , respectivamente, no início e no final do período de têmpera (início em  $Fo = 0,018$  e fim em  $Fo = 0,162$ ). Em todos os casos, a homogeneização de umidade no interior do sólido foi observada no final do período de têmpera. Quanto maior o número de Biot, maior a quantidade de água que migra do centro para a superfície do sólido, conseqüentemente menor será o tempo necessário para completa homogeneização de umidade no material.

Figura 4.45. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  no início e no final do período de têmpera para  $Bi = 1,0$ : (a)  $Fo = 0,018$  (início) e (b)  $Fo = 0,162$  (fim) (caso T23)

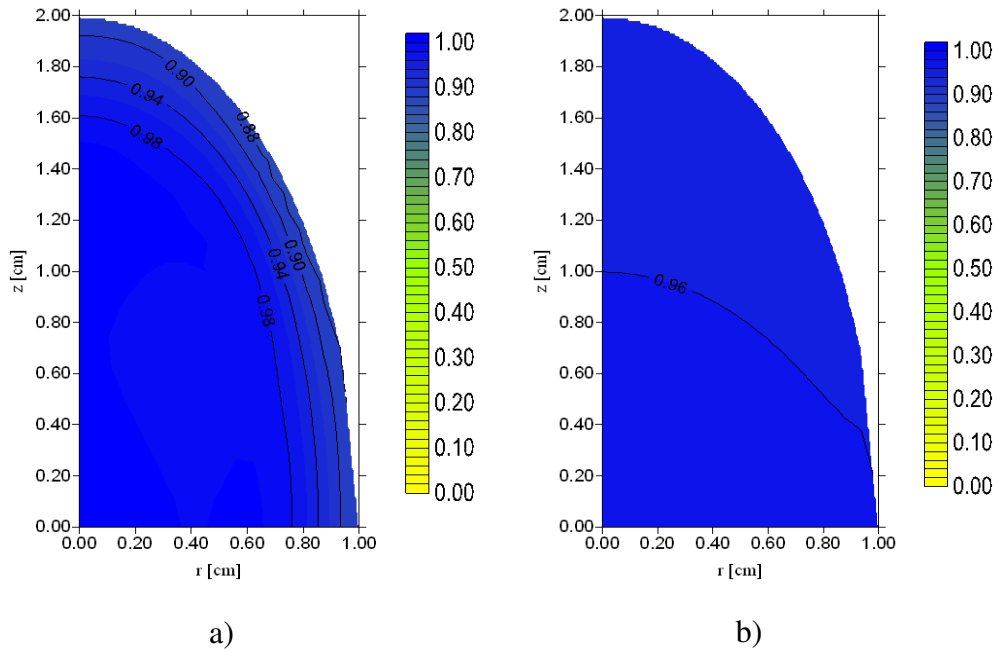


Figura 4.46. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  no início e no final do período de têmpera para  $Bi = 5,0$ : (a)  $Fo = 0,018$  (início) e (b)  $Fo = 0,162$  (fim) (caso T27)

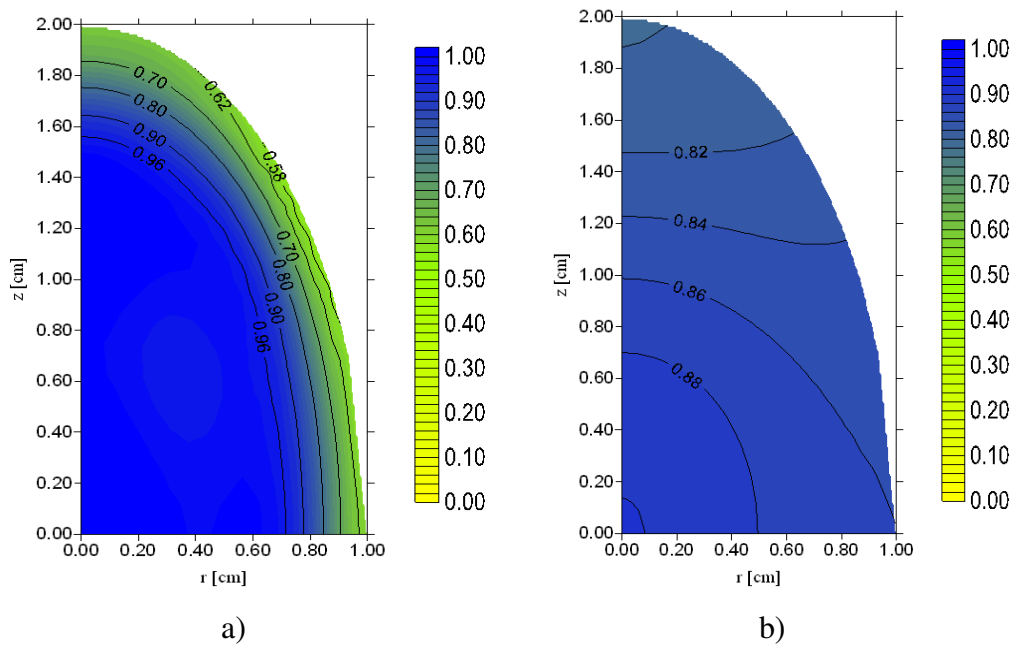


Figura 4.47. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  no início e no final do período de têmpera para  $Bi = 10,0$ : (a)  $Fo = 0,018$  (início) e (b)  $Fo = 0,162$  (fim) (caso T35)

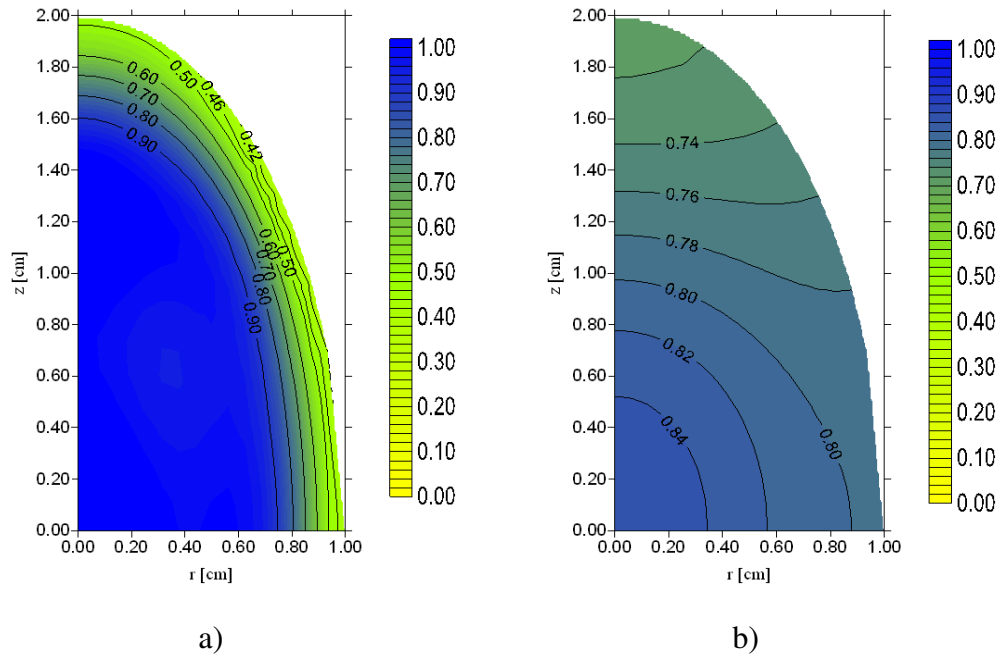
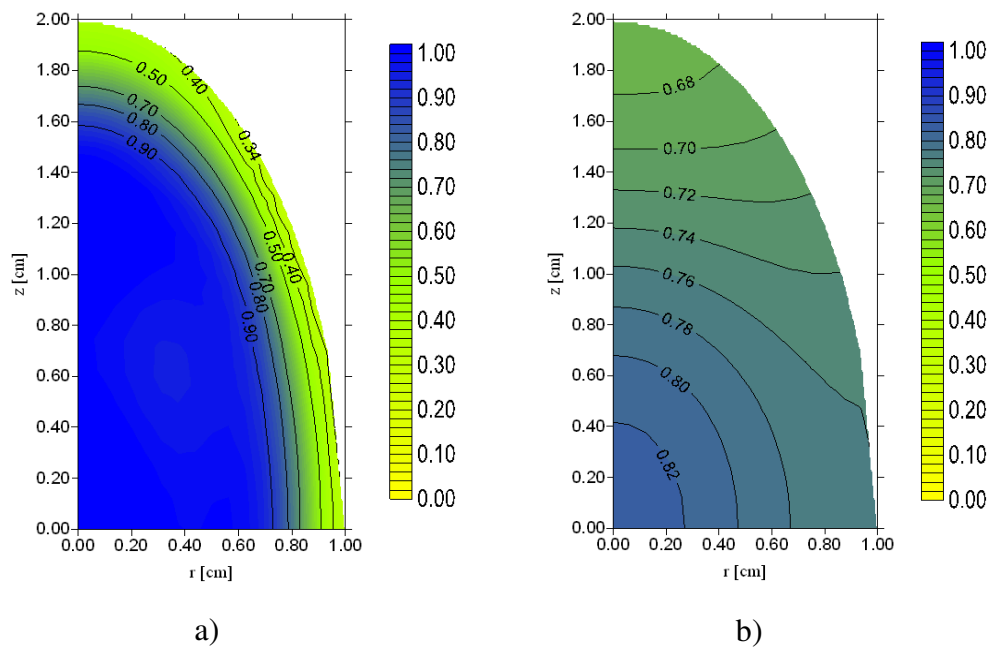


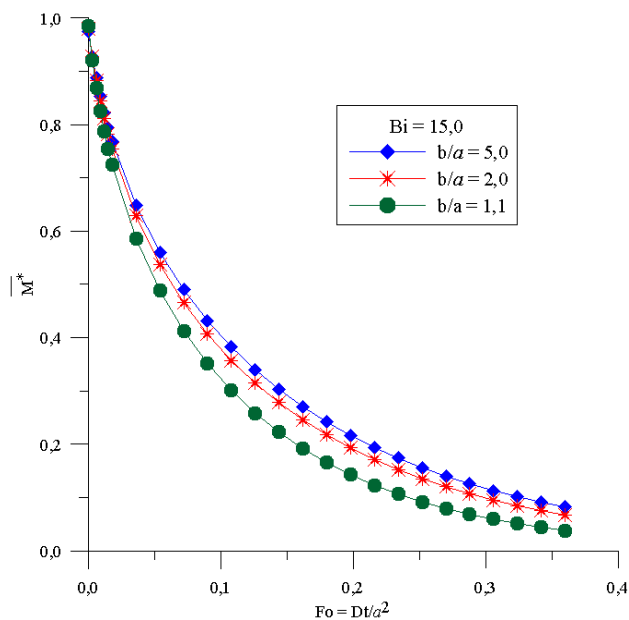
Figura 4.48. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  no início e no final do período de têmpera para  $Bi = 15,0$ : (a)  $Fo = 0,018$  (início) (b)  $Fo = 0,162$  (fim) (caso T39)



Processos de secagem produzem gradientes de umidade no interior do produto. O período de têmpera permitiu migração de umidade do centro para a superfície do sólido e, portanto, os gradientes de umidade no interior do produto diminuíram. Para  $Bi = 1,0$  a secagem ocorreu de maneira bem uniforme com baixos gradientes de umidade. Durante o período de têmpera, esses gradientes de umidade foram levemente diminuídos produzindo alterações irrelevantes no teor de umidade do sólido. Com o aumento do número de Biot ( $Bi \geq 5,0$ ), a velocidade de redução dos gradientes de umidade foi maior e, conseqüentemente, o efeito de têmpera começou a ser percebido, o que está de acordo com a cinética de secagem.

Para observar a influência da geometria na taxa de secagem, considerou-se sólidos esferoidais prolatos com razões de aspecto  $b/a = 1,1; 2,0$  e  $5,0$ . A Figura 4.49 mostra como se comporta o teor de umidade médio adimensional do sólido durante o processo de secagem contínua, variando o número de Fourier e a razão de aspecto do elipsoide para um número de Biot igual a  $15,0$ . Observa-se que, quanto menor a razão de aspecto maior será a velocidade de secagem. Desta forma, a razão de aspecto apresenta influência direta na cinética de secagem, comportamento que está diretamente ligado à relação área/volume do sólido (LIMA, 1999; LIMA, D. et al., 2004a; SANTOS, I. 2013). Quanto maior for a relação área/volume, maior será a velocidade de secagem.

Figura 4.49. Teor de umidade médio adimensional em função do número de Fourier para elipsoides com diferentes razões de aspecto e  $Bi = 15,0$  (casos T36, T40 e T42)



As Figuras 4.50 a 4.52 mostram o efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem em comparação com a secagem contínua de elipsoides com razões de aspecto  $b/a = 2,0$ ;  $1,1$  e  $5,0$ , para um número de Biot igual a  $15,0$ . Para cada sólido, considerou-se um único período de pausa com início em  $Fo = 0,018$  e retornado a secagem contínua em  $Fo = 0,162$ . Para comparar com a secagem contínua, os resultados são apresentados eliminando-se o tempo de têmpera. Com a aplicação da têmpera foi possível acelerar o processo de remoção de umidade, para os três sólidos estudados.

Afim de comparar as distribuições do teor de umidade adimensional no interior do sólido nas secagens contínua e intermitente com uma pausa (início  $Fo = 0,018$  e fim  $Fo = 0,162$ ), foi escolhido um tempo adimensional arbitrário  $Fo = 0,072$ , eliminando-se o tempo de têmpera.

As Figuras 4.53 a 4.55 apresentam a distribuição do teor de umidade adimensional no interior dos sólidos esferoidais prolatos com razões de aspecto  $b/a = 1,1$ ;  $2,0$  e  $5,0$ , no mesmo tempo adimensional  $Fo = 0,072$ , para secagem contínua e intermitente eliminando-se o período de têmpera, para  $Bi = 15,0$ . Foi possível verificar que, para um mesmo período de têmpera ( $\Delta Fo = 0,144$ ), o sólido com menor razão de aspecto (maior relação área/volume) secou mais rápido, analogamente ao que aconteceu com a secagem contínua.

Figura 4.50. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto  $1,1$  para  $Bi = 15,0$  (casos T40 e T41)

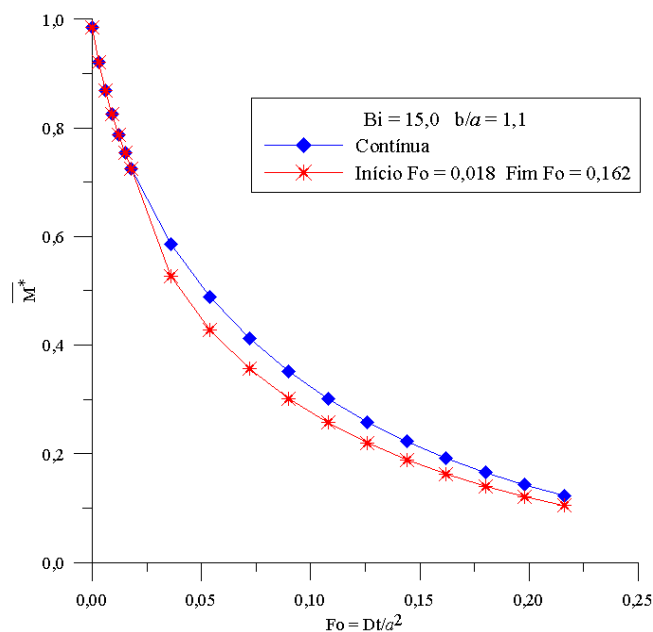


Figura 4.51. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para  $Bi = 15,0$  (casos T36 e T39)

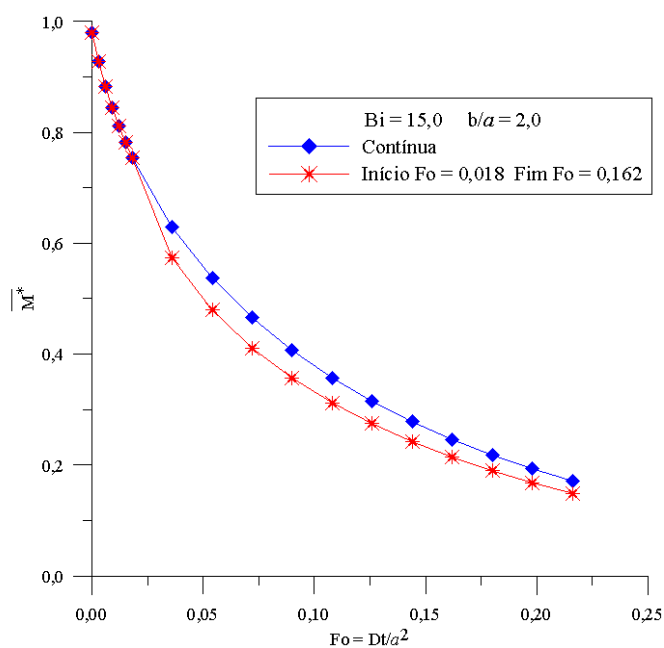


Figura 4.52. Efeito do tempo de têmpera na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 5,0 para  $Bi = 15,0$  (casos T42 e T43)

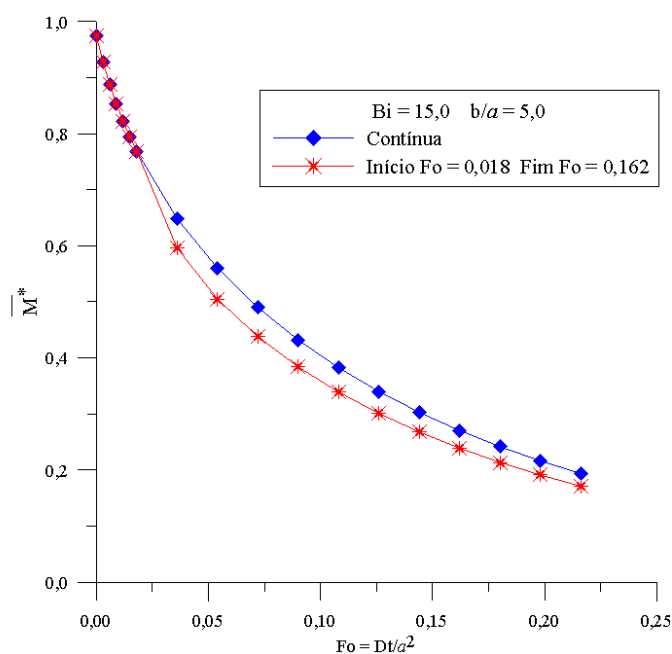




Figura 4.53. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 1,1$  para secagem contínua e intermitente no tempo adimensional  $Fo = 0,072$ , para  $Bi = 15,0$ : (a) secagem contínua ( $Fo = 0,072$ ) e (b) uma pausa de  $\Delta Fo = 0,144$  ( $Fo = 0,216$ ) (casos T40 e T41)

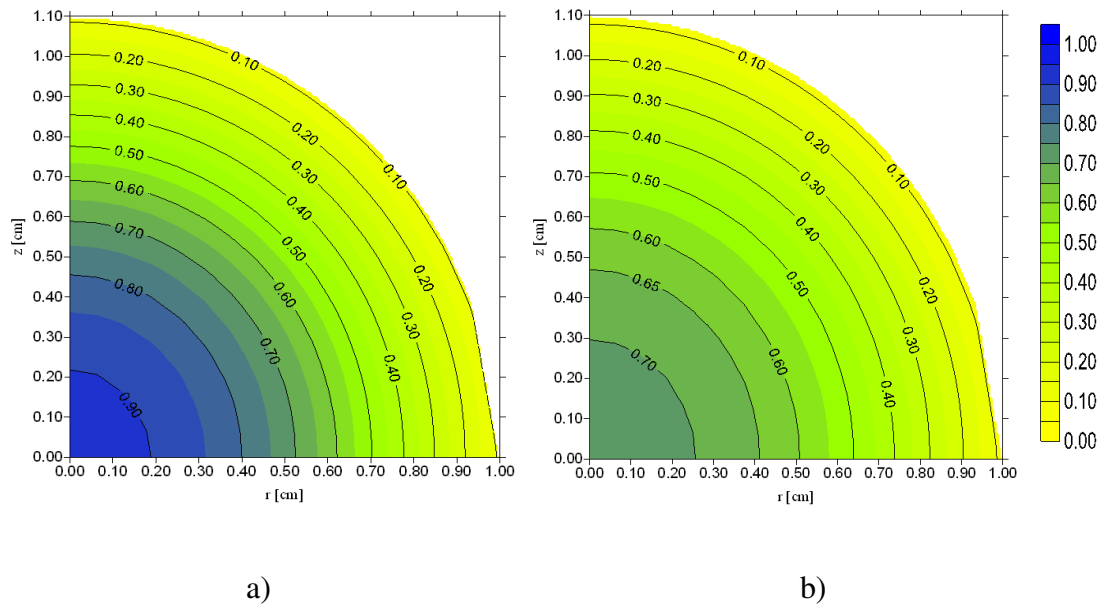


Figura 4.54. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do elipsoide de razão de aspecto  $b/a = 2,0$  para secagem contínua e intermitente no tempo adimensional  $Fo = 0,072$ , para  $Bi = 15,0$ : (a) secagem contínua ( $Fo = 0,072$ ) e (b) uma pausa de  $\Delta Fo = 0,144$  ( $Fo = 0,216$ ) (casos T36 e T39)

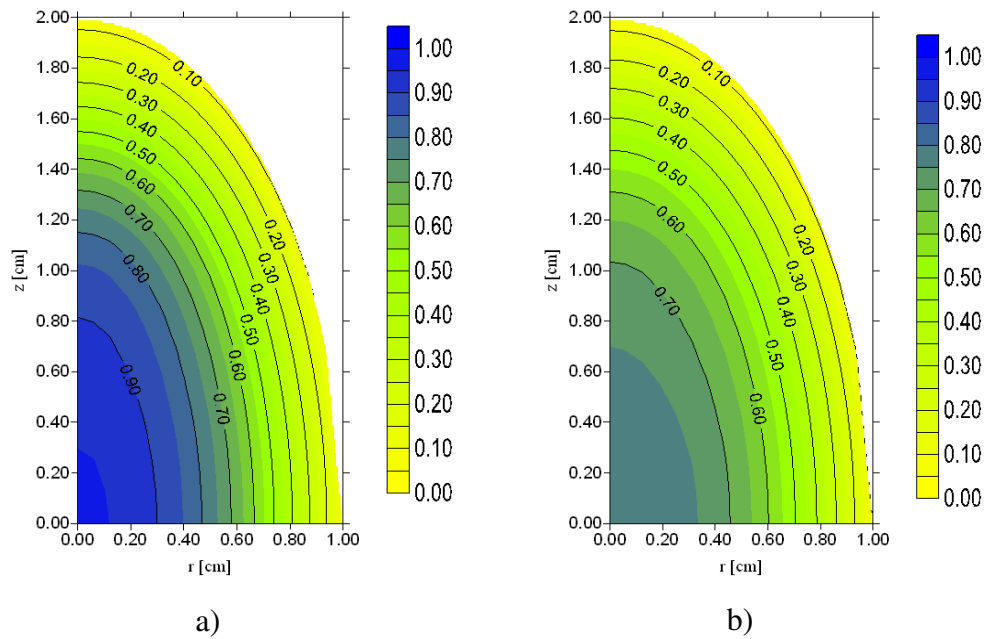
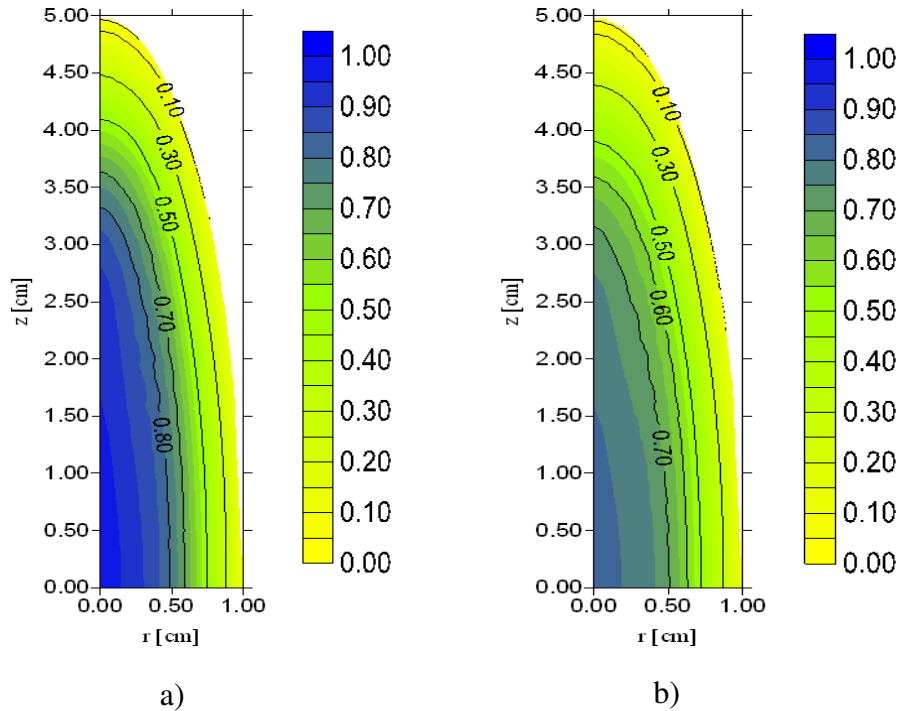


Figura 4.55. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do elipsoide de razão de aspecto  $b/a = 5,0$  para secagem contínua e intermitente no tempo adimensional  $Fo = 0,072$ , para  $Bi = 15,0$ : (a) secagem contínua ( $Fo = 0,072$ ) e (b) uma pausa de  $\Delta Fo = 0,144$  ( $Fo = 0,216$ ) (casos T42 e T43)



Para analisar o efeito de têmpera com duas pausas e Biot finito, considerou-se um sólido elipsoidal com razão de aspecto  $b/a = 2,0$ . A Figura 4.56 apresenta as cinéticas de secagem contínua e intermitente com uma pausa de  $\Delta Fo = 0,144$  e duas pausas de  $\Delta Fo = 0,072$ , para  $Bi = 15,0$ . Observa-se que as secagens intermitentes com uma e duas pausas apresentam maiores taxas de secagem em compara o com a secagem contínua. Para o tempo adimensional  $Fo = 0,108$ , o teor de umidade médio adimensional obtido na simula o foi de aproximadamente 0,35; 0,31 e 0,28 para secagem contínua, intermitente com uma pausa e intermitente com duas pausas, respectivamente. Desta forma, a secagem intermitente com duas pausas proporcionou resultados significativamente melhores.

As Figuras 4.57 e 4.58 apresentam a distribui o do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide de razão de aspecto  $b/a = 2,0$ , para secagem intermitente com duas pausas, no início e no final de cada período de têmpera ( $Bi = 15,0$ ). O primeiro período de têmpera teve início em  $Fo = 0,018$  e finalizando em  $Fo = 0,090$ ; o teor de umidade médio adimensional foi 0,75474. O segundo período de têmpera teve início em  $Fo = 0,108$  e finalizando em  $Fo = 0,180$ ; o teor de umidade médio adimensional foi 0,580249.

Figura 4.56. Efeito do número de pausas na cinética de secagem de um elipsoide com razão de aspecto 2,0 para  $Bi = 15,0$ : (a) incluindo o período de têmpera e (b) excluindo o período de têmpera (casos T36, T39 e T44)

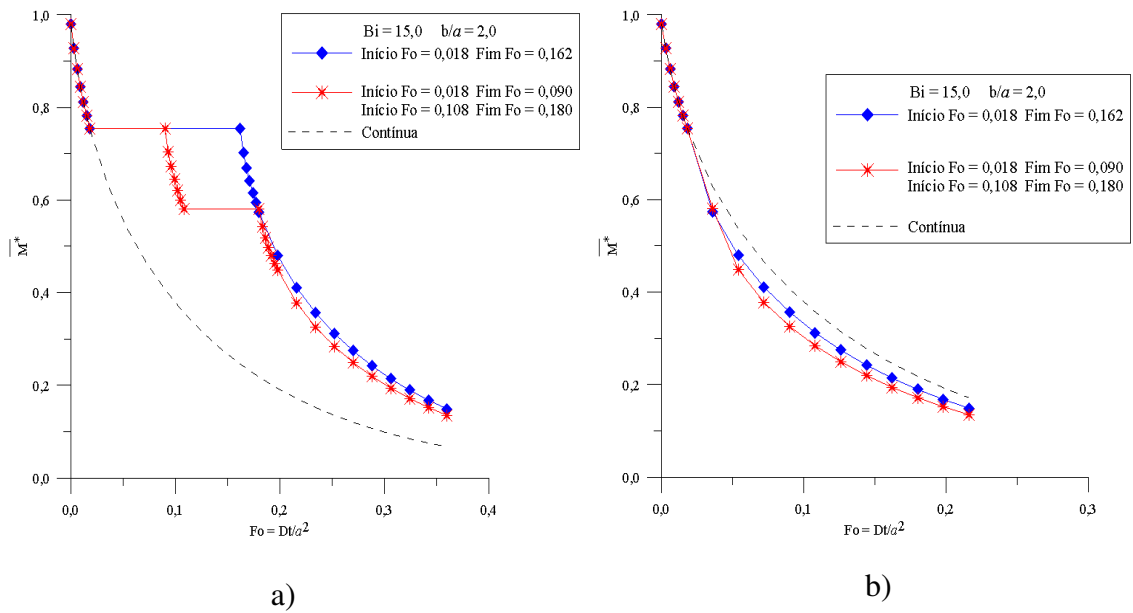


Figura 4.57. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  no primeiro período de têmpera, para  $Bi = 15,0$ : (a)  $Fo = 0,018$  (início da têmpera) e (b)  $Fo = 0,090$  (fim da têmpera) (caso T44)

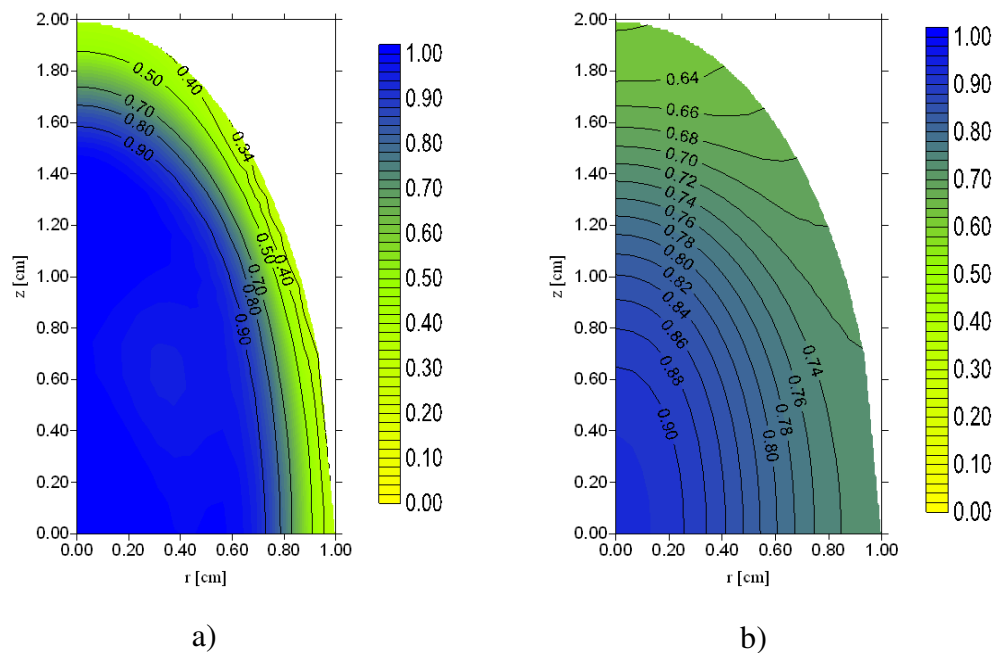
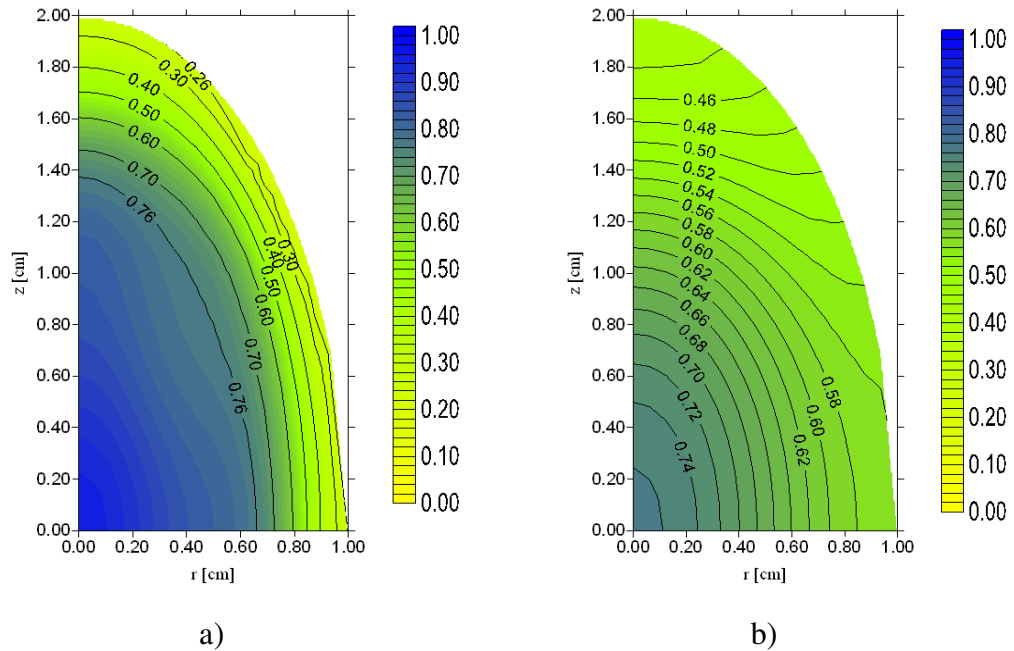


Figura 4.58. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior de um elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  no segundo período de têmpera, para  $Bi = 15,0$ : (a)  $Fo = 0,108$  (início da têmpera) e (b)  $Fo = 0,180$  (fim da têmpera) (caso T44)



Observando as Figuras 4.57 e 4.58 e comparando com a distribuição de umidade no final de uma única pausa (Figura 4.48), é possível verificar que o teor de umidade, próximo ao centro do elipsoide, é menor no final do segundo período de têmpera. Desta forma, considerando-se duas pausas, maior quantidade de água migra do centro para a superfície do elipsoide e, conseqüentemente, a velocidade de secagem aumenta no período subseqüente de secagem contínua. Na secagem intermitente com uma única pausa ( $\Delta Fo = 0,144$ ), o teor de umidade adimensional na superfície do elipsoide ( $r = 0,5$  cm e  $z = 1,73205$  cm) aumentou de 0,36 para 0,68. Na secagem intermitente com duas pausas ( $\Delta Fo = 0,072$ ), o teor de umidade na superfície do elipsoide ( $r = 0,5$  cm e  $z = 1,73205$  cm) aumentou de 0,36 para 0,65, na primeira pausa e, de 0,24 para 0,45 na segunda pausa.

Por fim, vale salientar que, para todos os casos analisados, o efeito de têmpera está relacionado com a redução dos gradientes de umidade durante o período de repouso. Quando o sólido iniciou o período de repouso já com a distribuição de umidade uniforme ( $Bi = 1,0$ ), a redistribuição de umidade foi quase nula e, portanto, não produziu ganhos significativos na taxa de secagem. O mesmo pode acontecer se o tempo de têmpera for muito curto. Desta forma, quanto mais intensa for a diminuição dos gradientes de umidade no período de repouso, melhor

será o efeito da têmpera na cinética de secagem pós-têmpera, como também observado por Cihan et al. (2007) para secagem de grãos de arroz em casca.

### **4.3 Aplicação à secagem de grãos de arroz em casca**

Neste trabalho, dois modelos difusivos, com solução via método GBI, foram usados para descrever a secagem contínua de grãos de arroz em casca. No modelo I, considera-se condição de contorno de primeira espécie (condição de contorno de equilíbrio), onde o único parâmetro a ser determinado é a difusividade de massa efetiva ( $D$ ). No modelo II, considera-se a condição de contorno de terceira espécie (condição de contorno convectiva), que pressupõe uma possível resistência ao fluxo de massa (água) na superfície do grão. Neste caso, o processo é governado não só pela difusividade de massa efetiva ( $D$ ), mas também pelo coeficiente de transferência de massa convectivo ( $h_m$ ). Para descrever a secagem intermitente utilizou-se a combinação dos Modelos I ou II (período de secagem) com o Modelo III (período de repouso). Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir de dados experimentais da secagem dos grãos de arroz em casca nas temperaturas 40, 50, 60 e 70°C, com têmpera em temperatura ambiente.

#### **4.3.1 Utilizando condição de contorno de primeira espécie**

##### **4.3.1.1 Cinética de secagem excluindo o período de têmpera**

Para secagem contínua e intermitente, a solução da equação de difusão via método GBI com condição de contorno de primeira espécie (Modelo I) foi ajustada ao conjunto de dados experimentais, para escolha adequada do coeficiente de difusão. Um valor inicial para  $D$  foi obtido do ajuste da solução analítica da equação de difusão aplicada à geometria do tipo cilindro finito. A partir deste valor inicial, foi realizado um processo de otimização para se obter o valor ótimo do coeficiente de difusão, como descrito na seção 3.3.2.

Denota-se por E1, E2, E3 e E4 os experimentos de secagem a 40°C, respectivamente, para  $\tau = 0,0$  min (secagem contínua),  $\tau = 30$  min (uma pausa),  $\tau = 60$  min (uma pausa) e  $\tau = 30$  min (duas pausas). As cinéticas de secagem são apresentadas para o conjunto de experimentos (E1, E2, E3 e E4) com  $T = 40^\circ\text{C}$ , eliminando-se o tempo de têmpera. Assim, apenas o tempo em que os grãos permaneceram na estufa foi considerado. Este tempo é chamado de tempo de operação efetiva. Neste caso, o efeito do tempo de têmpera na taxa de secagem foi incorporado

na difusividade de massa efetiva. Os resultados são apresentados na Tabela 4.10, juntamente com os indicadores estatísticos referentes ao Modelo I.

Tabela 4.10. Parâmetros estatísticos obtidos com as simulações do conjunto de experimentos (E1, E2, E3, E4) usando o modelo de difusão com condição de contorno de primeira espécie, excluindo a têmpera ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ).

$\tau$ [min]	Nº de pausas	$D \times 10^8$ [ $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ]	$\chi^2 \times 10^2$	s	$r^2$
0,0	0	6,03	3,69910	0,031200	0,994351
30	1	6,18	3,98040	0,032799	0,993761
60	1	6,61	3,72971	0,032187	0,99256
30	2	6,76	3,74050	0,032233	0,992603

Utilizando os valores obtidos para a difusividade de massa efetiva em cada condição de secagem, as cinéticas de secagem de grãos de arroz em casca juntamente com os dados experimentais são mostradas na Figura 4.59. A Figura 4.60 mostra a sobreposição das quatro curvas previstas. Neste caso, as curvas de secagem intermitente foram interpretadas como equivalentes às curvas de secagem contínua com diferentes coeficientes de difusão. Como pode ser visto, os resultados experimentais e preditos são próximos e os valores dos coeficientes de difusão ( $D$ ) encontrados nesta pesquisa foram menores do que os reportados por Cihan et al. (2008) para secagem de arroz em casca na temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ , que foram  $1,79 \times 10^{-7} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ ;  $2,54 \times 10^{-7} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$  e  $2,87 \times 10^{-7} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ , para  $\tau = 0,0$ ;  $\tau = 30$  e  $\tau = 60$  min, respectivamente. O que é compatível com a velocidade do ar de secagem que foi de  $0,04 \text{ ms}^{-1}$  neste trabalho e no trabalho de Cihan et al. (2008) foi de  $1,5 \text{ ms}^{-1}$ .

Observa-se que o efeito de têmpera na taxa de secagem do grão de arroz em casca foi refletido no aumento do coeficiente de difusão. Os resultados mostraram que, com uma única pausa, aumentando o tempo de têmpera de 30 para 60 min, ou com duas pausas de 30 min, os teores de umidade são relativamente próximos, para um tempo fixo. Por exemplo, após 465 min de tempo de operação efetiva, o teor de umidade médio adimensional obtido por simulação foi 0,2172 para secagem contínua, e para secagem intermitente com uma pausa de 30 e 60 min, e duas pausas de 30 min tem-se, respectivamente, 0,2124; 0,1964 e 0,191209. Contudo, na

secagem intermitente houve redução do tempo de operação efetiva, quando comparado com a secagem contínua.

Figura 4.59. Comparação entre os teores de umidade médio teórico (método GBI, Modelo I) e experimental durante a secagem de grãos de arroz em casca: (a)  $\tau = 0$  min (secagem contínua); (b) uma pausa/  $\tau = 30$  min; (c) uma pausa/  $\tau = 60$  min e (d) duas pausas/  $\tau = 30$  min ( $T = 40^\circ\text{C}$ ) (casos E1, E2, E3 e E4)

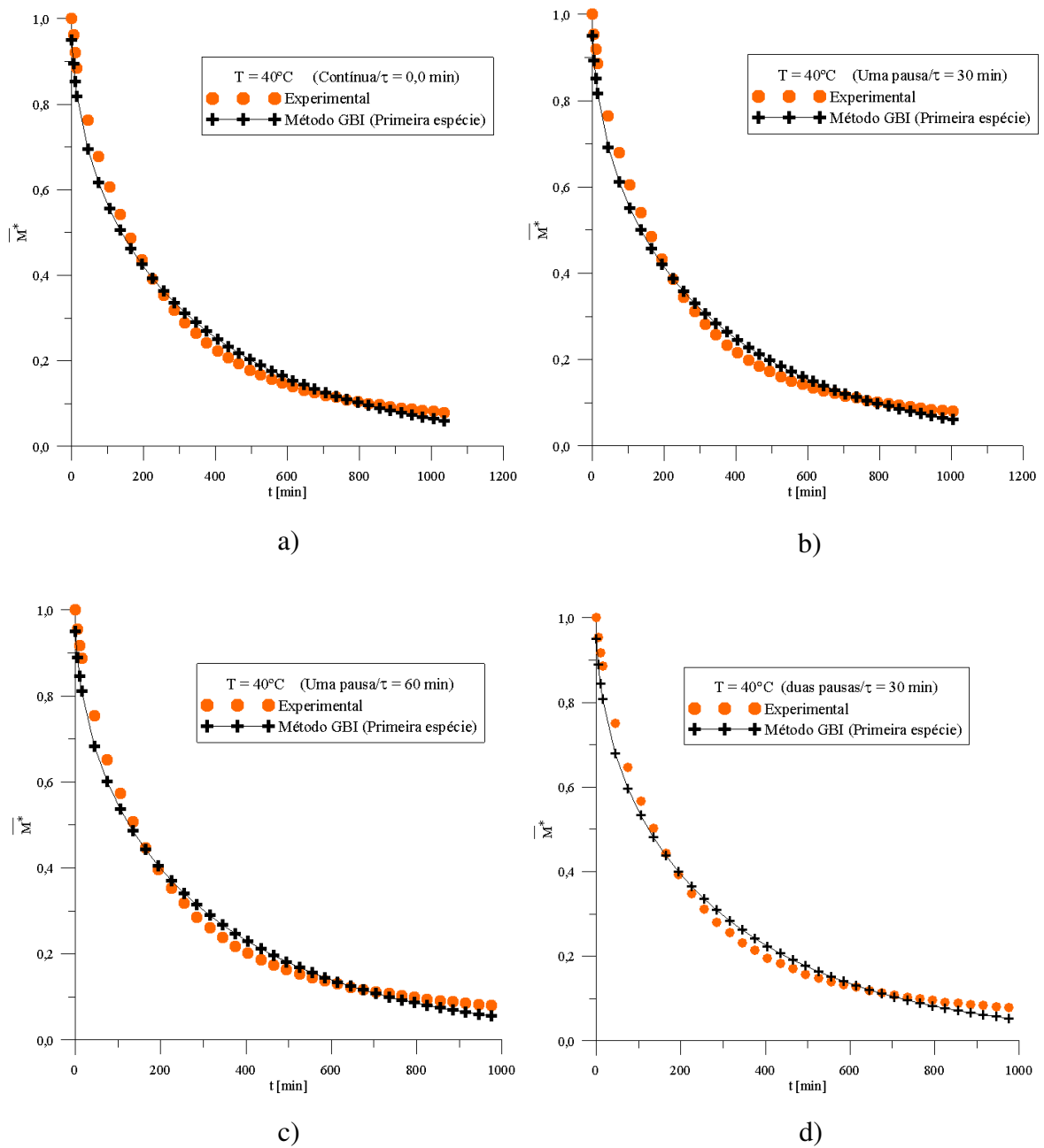
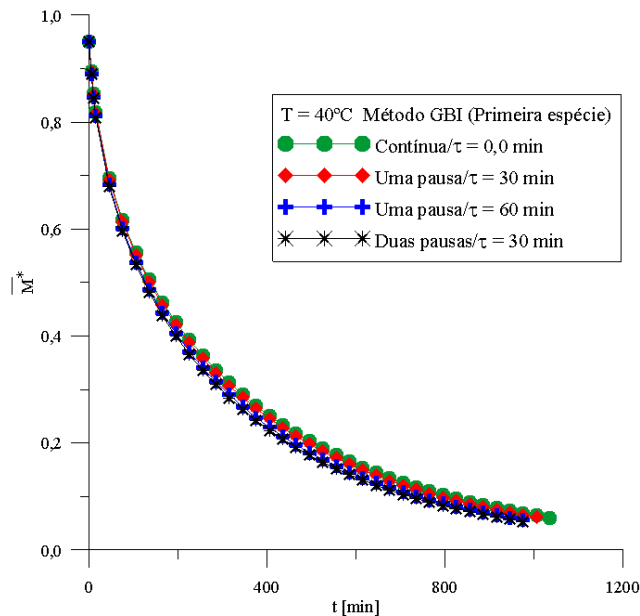


Figura 4.60. Curvas de secagem contínua e intermitente previstas usando o Modelo I, excluindo o período de têmpera (casos E1, E2, E3 e E4)

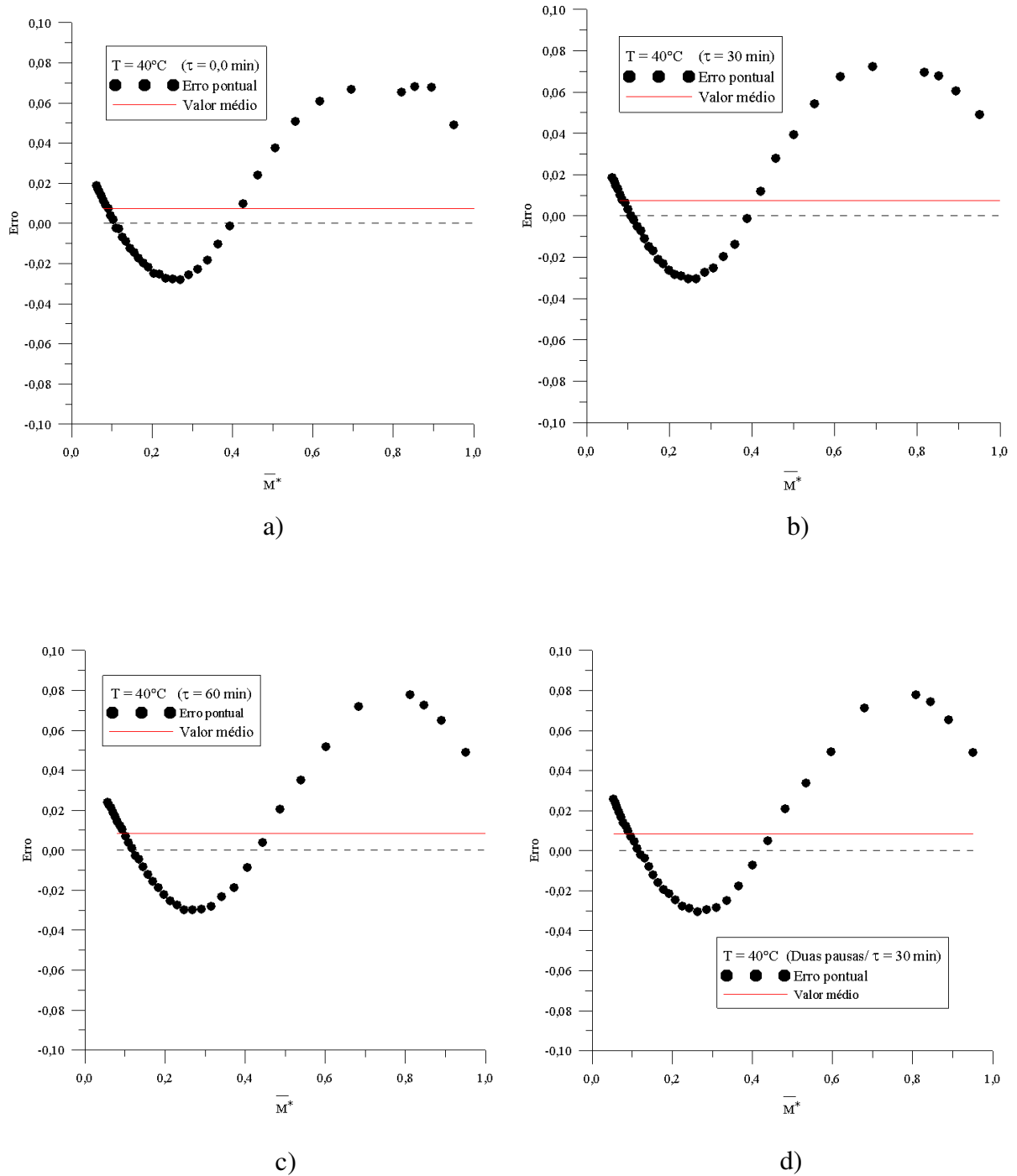


Além dos indicadores estatísticos já definidos para análise do Modelo I, foi determinada a distribuição de erros (diferença entre o valor experimental e o predito) para cada teste de secagem, eliminando-se o período de têmpera no ajuste. Na Figura 4.61 são apresentadas as distribuições de erros, em função dos valores preditos (ajustados), para secagem contínua e intermitente com uma pausa de 30 ou 60 min e duas pausas de 30 min.

O coeficiente de correlação ( $r^2$ ) entre os erros e os teores de umidade médio adimensional previstos foi 0,727197; 0,724026; 0,637423; e 0,637824, respectivamente, para secagem contínua ( $\tau = 0,0$  min) e intermitente (uma pausa/ $\tau = 30$  min), (uma pausa/ $\tau = 60$  min) e (duas pausas/ $\tau = 30$  min). Existe, portanto, uma forte correlação entre os erros e os teores de umidade médio preditos, sugerindo que a distribuição é tendenciosa. No entanto, o erro médio obtido foi muito próximo de zero (aproximadamente 0,008 para os quatro experimentos), o que consiste em mais um indicador positivo sobre a qualidade das análises, além do qui-quadrado e do coeficiente de determinação dados na Tabela 4.7. A distribuição de erros tendenciosa pode ser resultante da difusividade de massa ter sido considerada constante, como reportado na literatura (SILVA et al., 2011b; LINS, 2013).



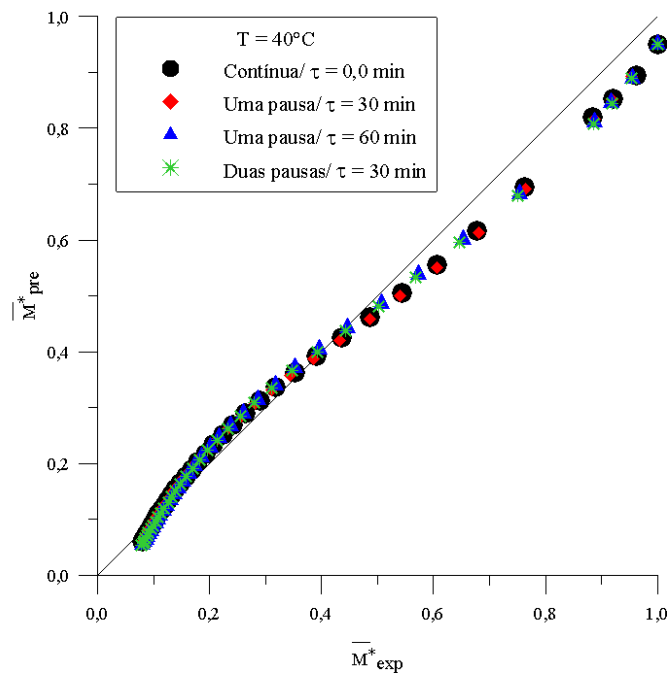
Figura 4.61. Distribuição de erros para o ajuste do Modelo I aos dados experimentais (E1, E2, E3 e E4) de secagem contínua e intermitente na temperatura de 40°C, eliminando-se a têmpera: (a) contínua ( $\tau = 0,0$  min); (b) intermitente (uma pausa/ $\tau = 30$  min); (c) intermitente (uma pausa/ $\tau = 60$  min); e (d) intermitente (duas pausas/ $\tau = 30$  min)



O erro máximo obtido entre os dados experimentais e os valores preditos do teor de umidade foi de 6,82% para o caso  $\tau = 0,0$  min; 7,22% para  $\tau = 30$  min; 7,77% para  $\tau = 60$  min e 7,77% para duas pausas de 30 min, sendo compatíveis com os reportados em Cihan et al. (2008): 5,12; 6,93 e 7,65% para  $\tau = 0,0$ ;  $\tau = 30$  e  $\tau = 60$  min, respectivamente.

A Figura 4.62 mostra a comparação entre os teores de umidade médio experimental e preditos. Os dados dos teores de umidade médio adimensional estão unidos ao longo da reta o que mostra a adequação do Modelo I para descrever o comportamento de secagem de arroz em casca. Observa-se que no início do processo de secagem os teores de umidade médio preditos foram menores do que os obtidos experimentalmente, ocorrendo uma inversão para tempos longos.

Figura 4.62. Teores de umidade médio adimensional experimental e preditos para secagem contínua e intermitente, excluindo o período de têmpera ( $T = 40^\circ\text{C}$ /casos E1, E2, E3 e E4)



#### 4.3.1.2 Cinética de secagem incluindo o período de têmpera

Para modelar o processo de secagem intermitente, incluindo o período de têmpera, utilizou-se uma combinação do Modelo I com o Modelo III, assumindo que o coeficiente de transferência de massa convectivo é zero no período de repouso, já que as perdas de massa observadas durante o repouso dos grãos, quando existem, são pequenas e da ordem de 0,01g.

Vários trabalhos encontrados na literatura também consideram  $h_m = 0$  durante o período de têmpera (NISHIYAMA et al., 2006; DONG et al., 2009; SILVA et al., 2014).

A solução teórica do Modelo I (combinado com o Modelo III) foi ajustada aos dados experimentais para escolha apropriada da difusividade de massa efetiva em cada período de secagem contínua. Denota-se por  $D_n$  a difusividade de massa efetiva no  $n$ -ésimo período de secagem contínua. Durante os períodos de têmpera foi utilizado o mesmo valor da difusividade de massa efetiva obtido no período anterior de secagem contínua. Os resultados dos ajustes são apresentados na Tabela 4.11 juntamente com os indicadores estatísticos.

Observa-se na Tabela 4.11 que a difusividade de massa efetiva aumentou com a elevação da temperatura. No período pós-têmpera, para todos os experimentos de secagem intermitente com uma pausa, também houve elevação do coeficiente de difusão de massa quando comparado com o valor obtido no período de secagem antes da têmpera. A umidade acumulada na superfície do grão, durante a têmpera, provoca aumento da pressão de vapor de água nesta região, facilitando o processo de secagem no período pós-têmpera, o que justifica o coeficiente de difusão ser maior neste período.

Comparando os resultados para os experimentos E11 e E14, com mesma temperatura do ar de secagem  $70^\circ\text{C}$ , observa-se a influência do teor de umidade inicial na difusividade de massa. Quanto maior o teor de umidade inicial, maior a velocidade de secagem (Figura 4.5) e, conseqüentemente, maior a difusividade de massa efetiva.

Analisando os resultados obtidos para os experimentos E12 e E15, percebe-se que, aumentando o tempo de secagem contínua inicial de 15 para 30 min na temperatura de  $70^\circ\text{C}$ , o valor da difusividade de massa efetiva praticamente foi dobrado.

A partir dos valores obtidos para difusividade de massa efetiva, as cinéticas de secagem contínua e intermitente de grãos de arroz em casca, justamente com os dados experimentais de secagem nas temperaturas 40, 50, 60 e  $70^\circ\text{C}$ , são mostradas nas Figuras 4.63 a 4.67.

Na Figura 4.68 são apresentadas as distribuições de erros, em função dos valores preditos, para secagem intermitente na temperatura de  $40^\circ\text{C}$ , com uma pausa de 30 e 60 min, e para duas pausas de 30 min (casos E2, E3 e E4). Neste caso, o período de têmpera foi considerado na simulação e a cinética de secagem foi obtida a partir da combinação do Modelo I com o Modelo III.

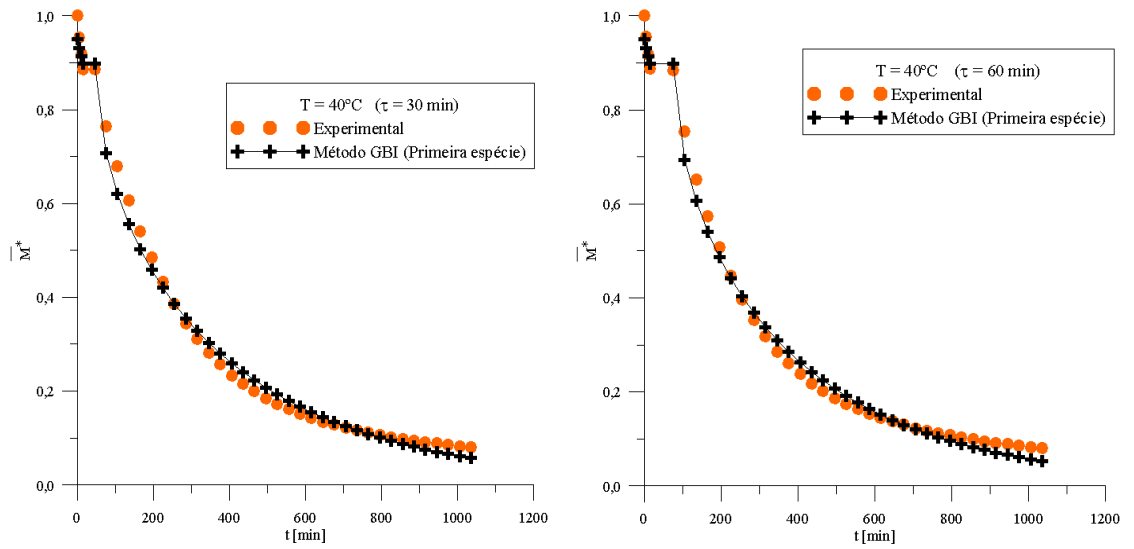
O coeficiente de correlação ( $r'$ ) entre os erros e os teores de umidade médio adimensional previstos é agora 0,333173; 0,185914; e 0,003313, respectivamente, para secagem intermitente com uma pausa de 30 e 60 min, e para duas pausas de 30 min. Os resultados indicam uma

correlação fraca e, conseqüentemente, uma distribuição mais aleatória, quando comparada com o ajuste excluindo o período de têmpera (Figura 4.61). O erro médio diminuiu de 0,008 para aproximadamente 0,004, como mostra a Figura 4.68.

Tabela 4.11. Parâmetros estatísticos obtidos com as simulações da secagem contínua e intermitente usando o modelo de difusão com condição de contorno de primeira espécie.

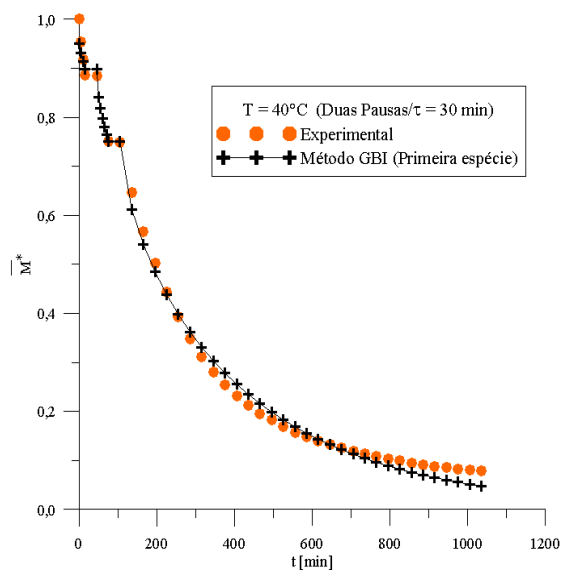
	T	D <sub>1</sub> x 10 <sup>8</sup>	D <sub>2</sub> x 10 <sup>8</sup>	D <sub>3</sub> x 10 <sup>8</sup>	D <sub>4</sub> x 10 <sup>8</sup>	χ <sup>2</sup> x 10 <sup>2</sup>	s	r <sup>2</sup>
	[°C]	[cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	[cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]			
E1	40	6,03	-	-	-	3,6991	0,031200	0,994351
E2	40	1,83	6,39	-	-	2,2290	0,024219	0,994443
E3	40	1,83	6,82	-	-	1,9611	0,023022	0,994503
E4	40	1,84	4,01	7,14	-	1,4577	0,019585	0,995796
E5	50	7,81	-	-	-	2,71330	0,029585	0,991581
E6	50	3,56	8,24	-	-	1,69920	0,023799	0,993552
E7	50	3,88	8,72	-	-	1,60590	0,023949	0,993471
E8	60	13,7	-	-	-	4,9202	0,041190	0,990729
E9	60	4,59	16,10	-	-	2,0245	0,027904	0,993597
E10	60	4,63	17,80	-	-	1,2156	0,023506	0,995863
E11	70	18,3	-	-	-	4,93910	0,043585	0,985437
E12	70	6,93	20,6	-	-	1,91660	0,028867	0,993374
E13	70	7,16	21,4	-	-	1,62220	0,027793	0,993974
E14	70	16,7	-	-	-	4,49620	0,036912	0,982562
E15	70	14,8	15,0	-	-	3,06270	0,034322	0,985068
E16	70	11,4	16,9	13,8	-	1,73760	0,025368	0,991319
E17	70	12,0	17,6	10,7	11,9	0,88050	0,019154	0,995758

Figura 4.63. Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo I) e experimental (E2, E3 e E4) durante a secagem de arroz em casca na temperatura de 40°C, incluindo o período de têmpera: (a) uma pausa/  $\tau = 30$  min; (b) uma pausa/  $\tau = 60$  min; e (c) duas pausas/  $\tau = 60$  min



a)

b)



c)

Figura 4.64. Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo I) e experimental (E5, E6 e E7) durante a secagem de arroz em casca ( $T = 50^{\circ}\text{C}$  e uma pausa): (a)  $\tau = 0,0$  min (secagem contínua); (b)  $\tau = 60$  min; e (c)  $\tau = 120$  min

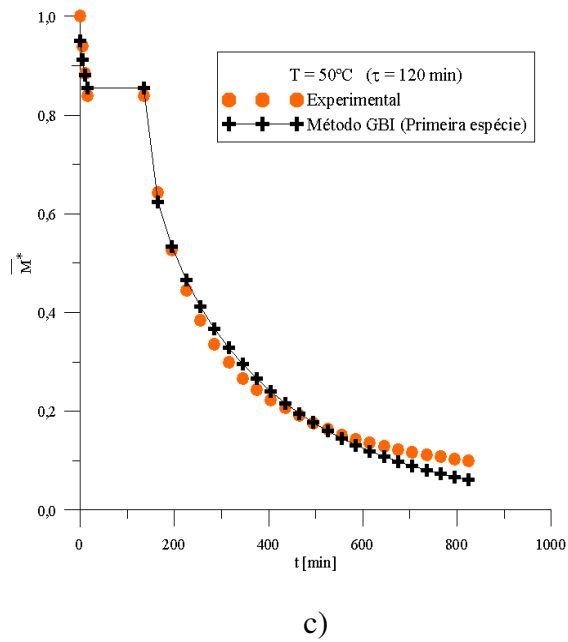
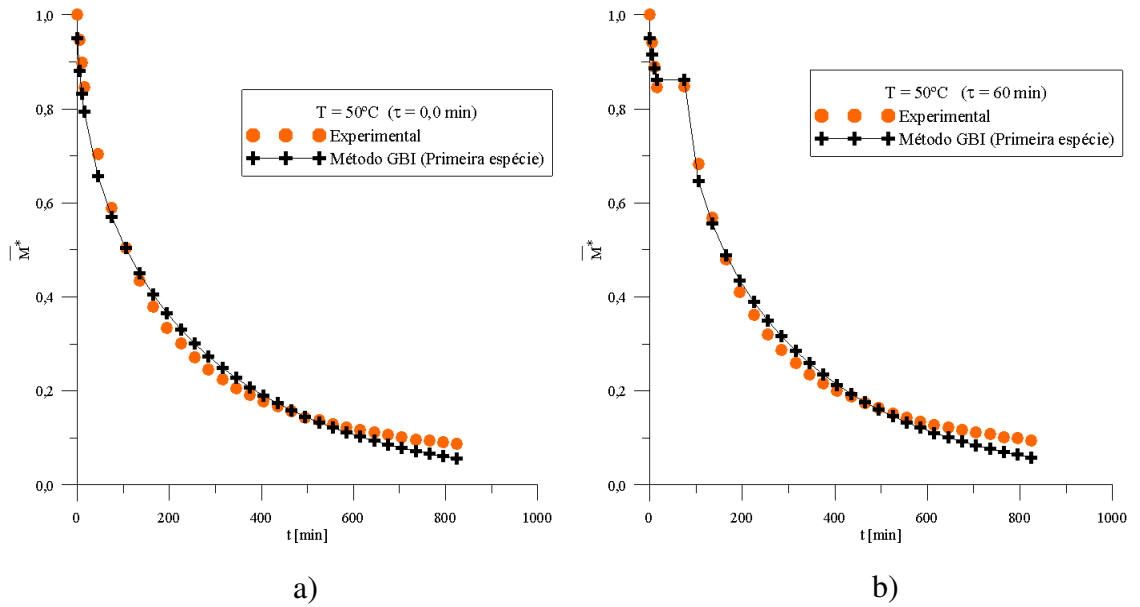
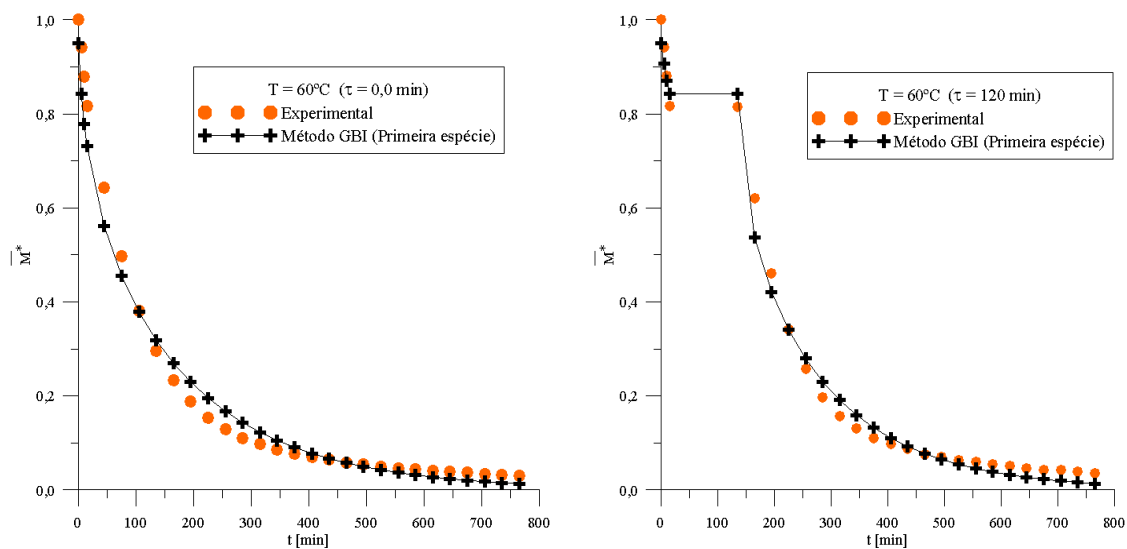
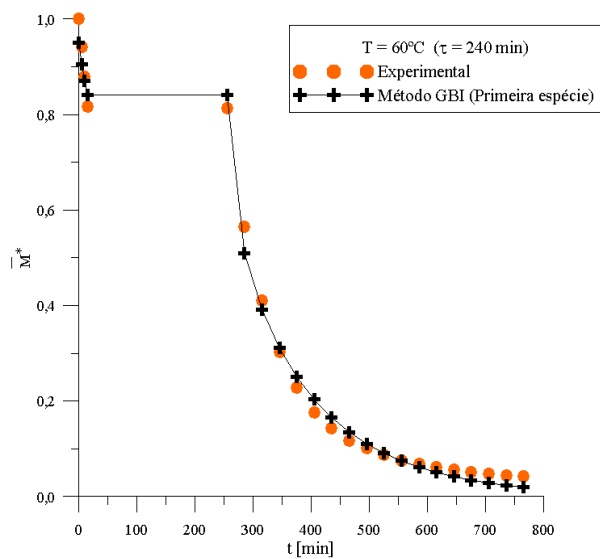


Figura 4.65. Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo I) e experimental (E8, E9 e E10) durante a secagem de arroz em casca ( $T = 60^{\circ}\text{C}$  e uma pausa): (a)  $\tau = 0,0$  min (secagem contínua); (b)  $\tau = 120$  min; e (c)  $\tau = 240$  min



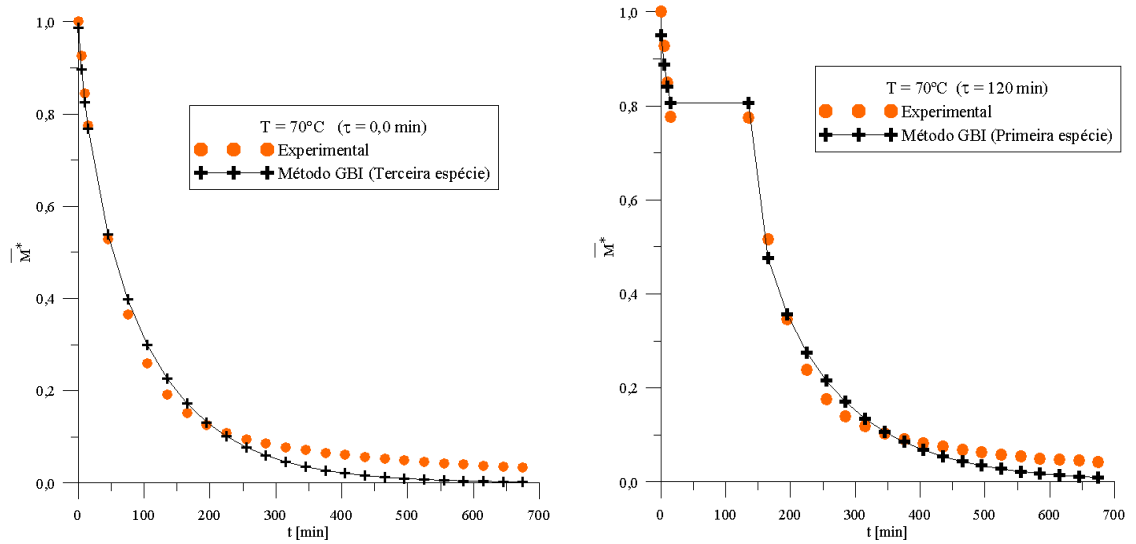
a)

b)



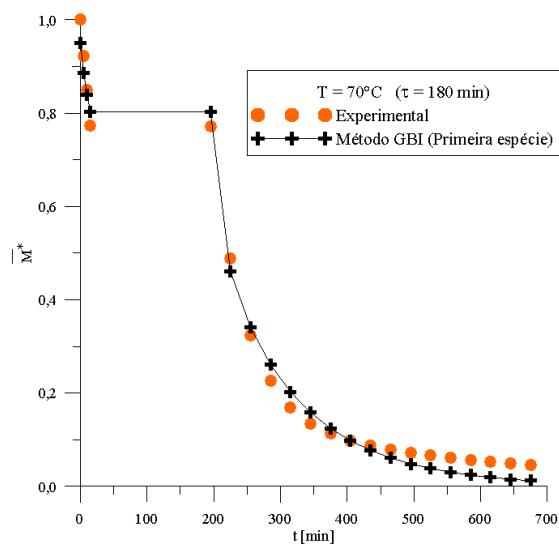
c)

Figura 4.66. Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo I) e experimental (E11, E12 e E13) durante a secagem de arroz em casca ( $T = 70^{\circ}\text{C}$  e uma pausa): (a)  $\tau = 0,0$  min (secagem contínua); (b)  $\tau = 120$  min; e (c)  $\tau = 180$  min



a)

b)



c)



Figura 4.67. Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo I) e experimental (E14, E15, E16 e E17) durante a secagem de arroz em casca na temperatura de  $T = 70^{\circ}\text{C}$ : (a)  $\tau = 0,0$  min (secagem contínua); (b) uma pausa/ $\tau = 120$  min; (c) duas pausas/ $\tau = 60$  min; e (d) três pausas/ $\tau = 60$  min

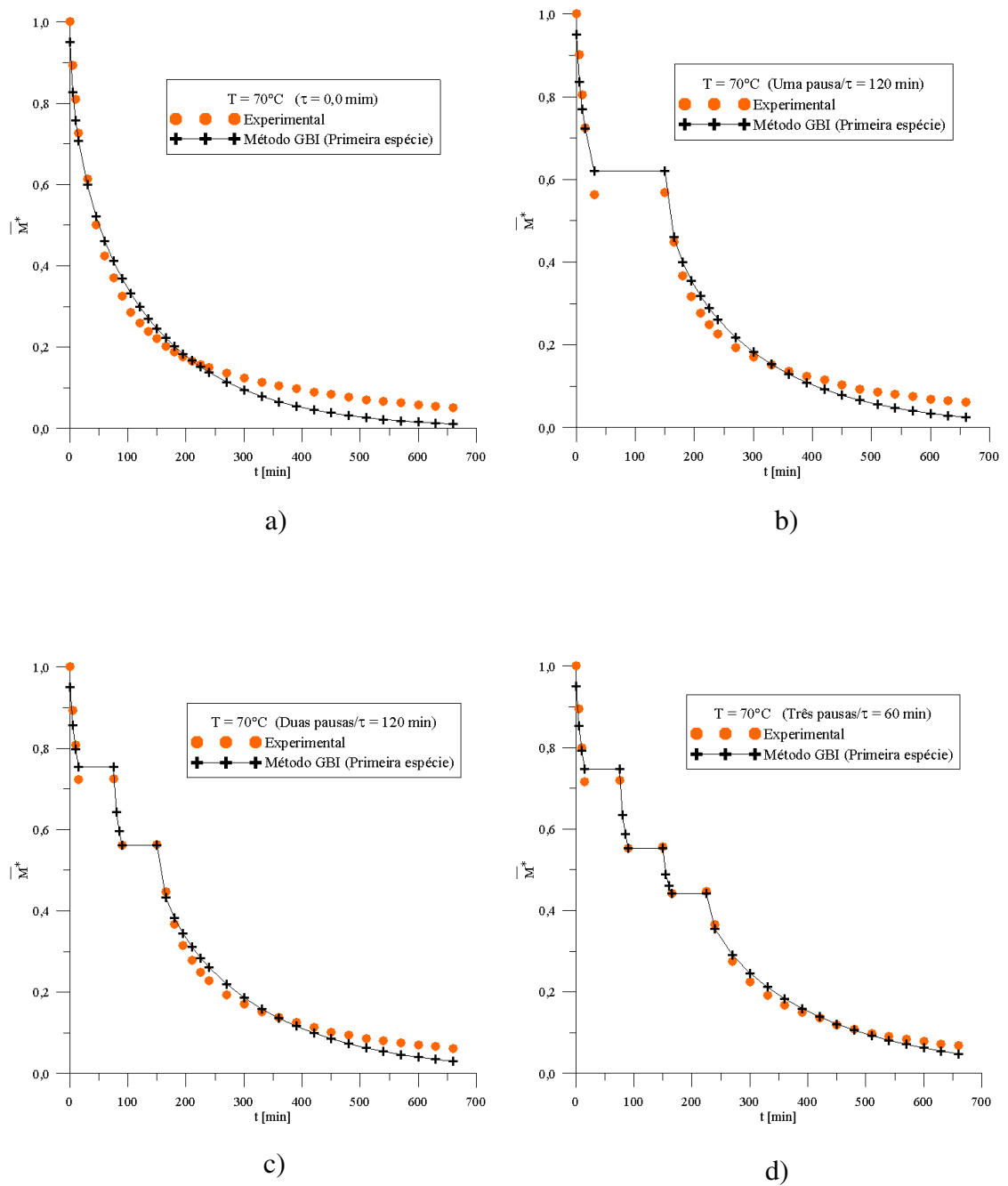
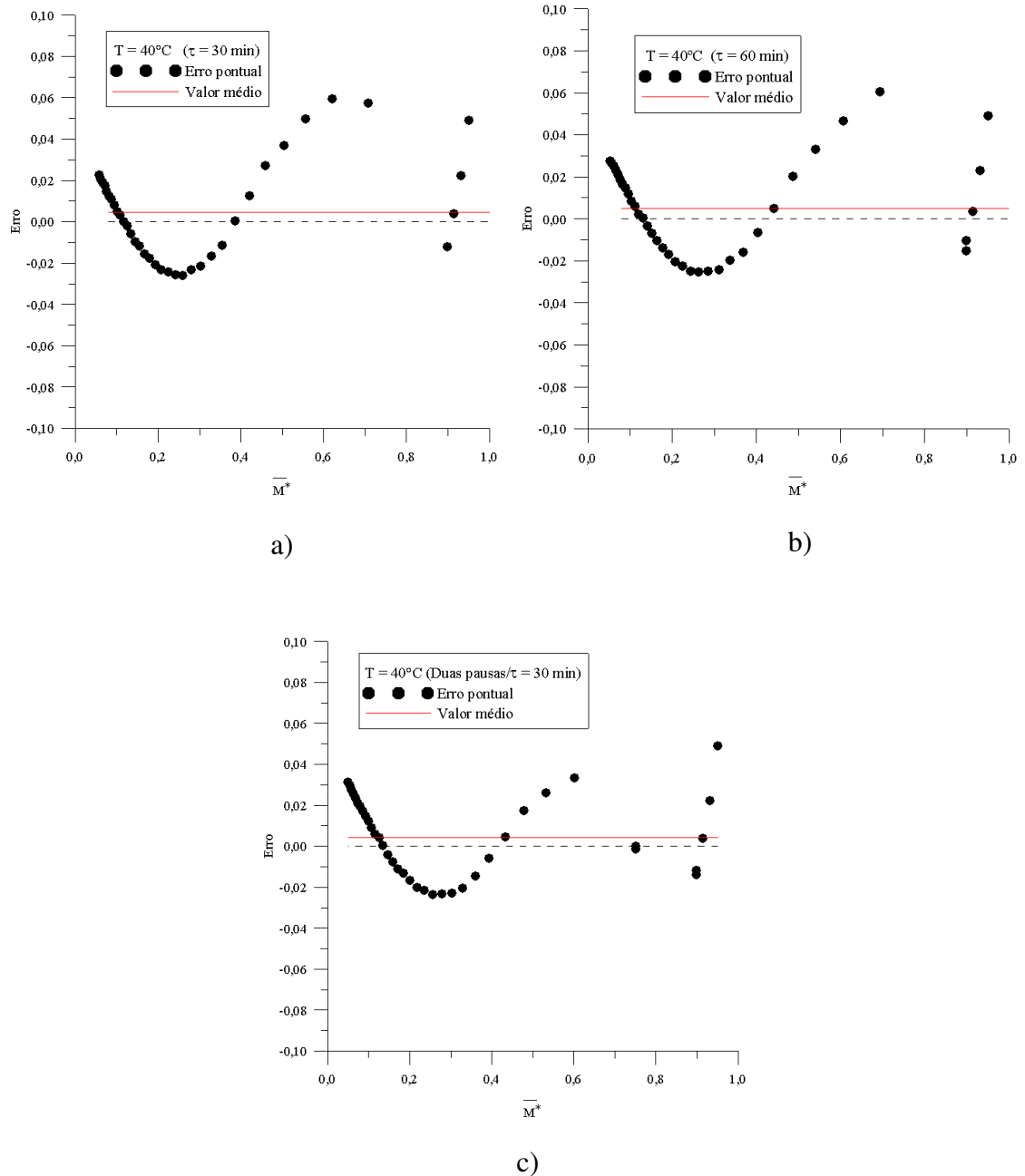


Figura 4.68. Distribuição de erros para o ajuste do Modelo I aos dados experimentais (E2, E3 e E4) de secagem intermitente na temperatura de 40°C, incluindo a têmpera: (a) uma pausa/ $\tau = 30$  min; (b) uma pausa/ $\tau = 60$  min; e (c) duas pausas/ $\tau = 30$  min

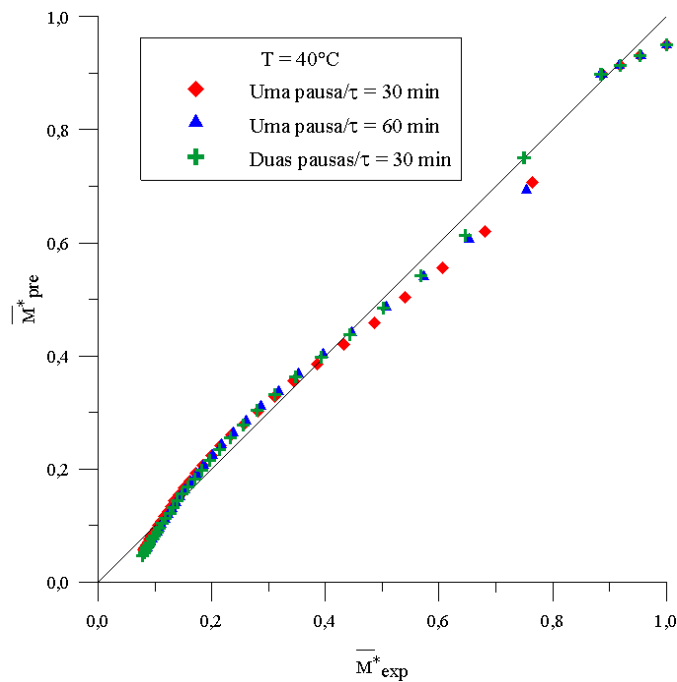


Considerando o período de têmpera na simulação, o erro máximo entre os dados experimentais e os valores preditos do teor de umidade foi de 5,95% para  $\tau = 30$  min (uma pausa), 6,06% para  $\tau = 60$  min (uma pausa), e 4,90% para  $\tau = 30$  min (duas pausas), sendo

menores quando comparado com os valores obtidos com o ajuste excluindo o período de têmpera.

A Figura 4.69 mostra a comparação entre os teores de umidade médio experimental e predito utilizando o Modelo I, incluindo o período de têmpera, para os três experimentos de secagem intermitente na temperatura de 40°C. Quando comparado com a Figura 4.62, observa-se que os dados dos teores de umidade médio adimensional estão mais unidos ao longo da reta, sugerindo que incluir o período de têmpera na cinética de secagem é mais adequado para descrever o comportamento de secagem intermitente.

Figura 4.69. Teores de umidade médio adimensional experimental (E2, E3 e E4) e preditos pelo Modelo I para secagem intermitente, incluindo o período de têmpera (T = 40°C)



A distribuição de erros (diferença entre o valor experimental e o predito) também foi determinada para analisar a qualidade do ajuste do Modelo I aos dados experimentais nas temperaturas 50, 60 e 70°C. As Figuras 4.70 a 4.73 mostram a distribuição de erros em função dos valores preditos, para cada experimento de secagem contínua e intermitente, incluindo a têmpera na simulação. A Tabela 4.12 mostra o valor médio dos erros e o coeficiente de correlação ( $r'$ ) entre os erros e o teor de umidade médio adimensional previsto usando o Modelo I. Observa-se que a correlação foi moderada para os três experimentos de secagem contínua (E5, E8 e E11), com distribuição um pouco tendenciosa. Para os demais experimentos, a

correlação foi bem fraca, sugerindo uma distribuição mais aleatória. Em todos os casos o erro médio foi relativamente pequeno, o que consiste em mais um indicador positivo sobre a qualidade das análises realizadas. O maior erro médio observado foi de 0,015513 para o experimento de secagem contínua (E11) na temperatura de 70°C.

Tabela 4.12. Erro médio e coeficiente de correlação entre os erros e os teores de umidade médio previstos usando o Modelo I, para os experimentos nas temperaturas 50, 60 e 70°C.

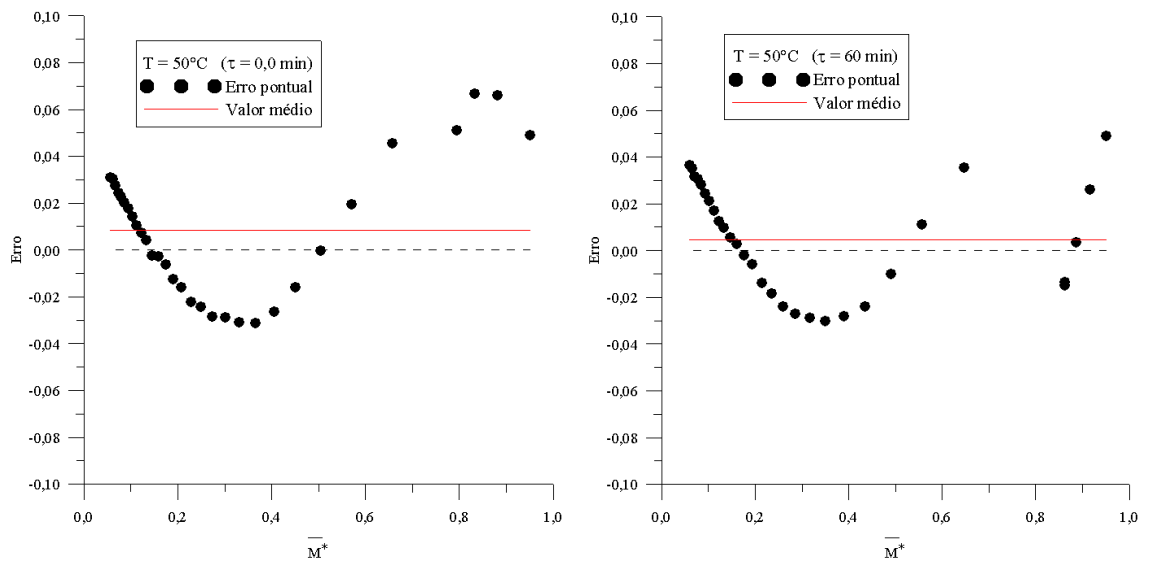
	T [°C]	$\tau$ [min]	N° de pausas	Erro médio	$r'$	Interpretação
E5	50	0,0	0	0,0084	0,443418	Correlação moderada
E6	50	60	1	0,0047	-0,08114	Correlação bem fraca
E7	50	120	1	0,004200	-0,14084	Correlação bem fraca
E8	60	0,0	0	0,010611	0,67849	Correlação moderada
E9	60	120	1	0,006581	0,131541	Correlação bem fraca
E10	60	240	1	0,005267	0,138854	Correlação bem fraca
E11	70	0,0	0	0,015513	0,45215	Correlação moderada
E12	70	120	1	0,009977	-0,12504	Correlação bem fraca
E13	70	180	1	0,008963	-0,12282	Correlação bem fraca
E14	70	0,0	0	0,013835	-0,13065	Correlação bem fraca
E15	70	120	1	0,004109	-0,10932	Correlação bem fraca
E16	70	60	2	0,003415	-0,11426	Correlação bem fraca
E17	70	60	3	0,002057	0,152587	Correlação bem fraca

As Figuras 4.74 a 4.77 mostram a comparação entre os teores de umidade experimental e predito utilizando o Modelo I, para secagem contínua e intermitente nas temperaturas 50, 60 e 70°C, incluindo o período de têmpera na simulação. Em todos os casos analisados, observou-se que os dados dos teores de umidade médio adimensional estão mais distantes da reta nos instantes iniciais de secagem, o que está relacionado com a condição de contorno considerada.

A análise dos resultados sugere que deve existir alguma resistência ao fluxo de massa na superfície do grão de arroz que não foi considerada por este modelo, já que a condição de contorno de primeira espécie não leva em conta o fluxo convectivo resultante da transferência de massa entre a superfície do grão e o ar de secagem. Contudo, o modelo difusivo com condição de contorno de equilíbrio é bem aceito para descrever secagem de grãos (CIHAN e

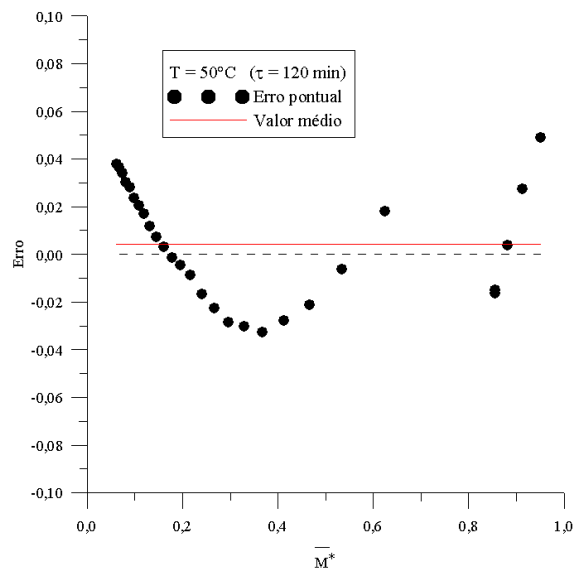
ECE, 2001; CIHAN et al., 2008; YILDIRIM et al., 2011; MENEGHETTI et al., 2012; SILVA et al., 2013a).

Figura 4.70. Distribuição de erros para o ajuste do Modelo I aos dados experimentais (E5, E6 e E7) de secagem contínua e intermitente na temperatura de 50°C, incluindo a tâmara: (a) contínua ( $\tau = 0,0$  min); (b) intermitente (uma pausa/ $\tau = 60$  min); e (c) intermitente (uma pausa/ $\tau = 120$  min)



a)

b)



c)

Figura 4.71. Distribuição de erros para o ajuste do Modelo I aos dados experimentais (E8, E9 e E10) de secagem contínua e intermitente na temperatura de 60°C, incluindo a têmpera: (a) contínua ( $\tau = 0,0$  min); (b) intermitente (uma pausa/ $\tau = 120$  min); e (c) intermitente (uma pausa/ $\tau = 240$  min)

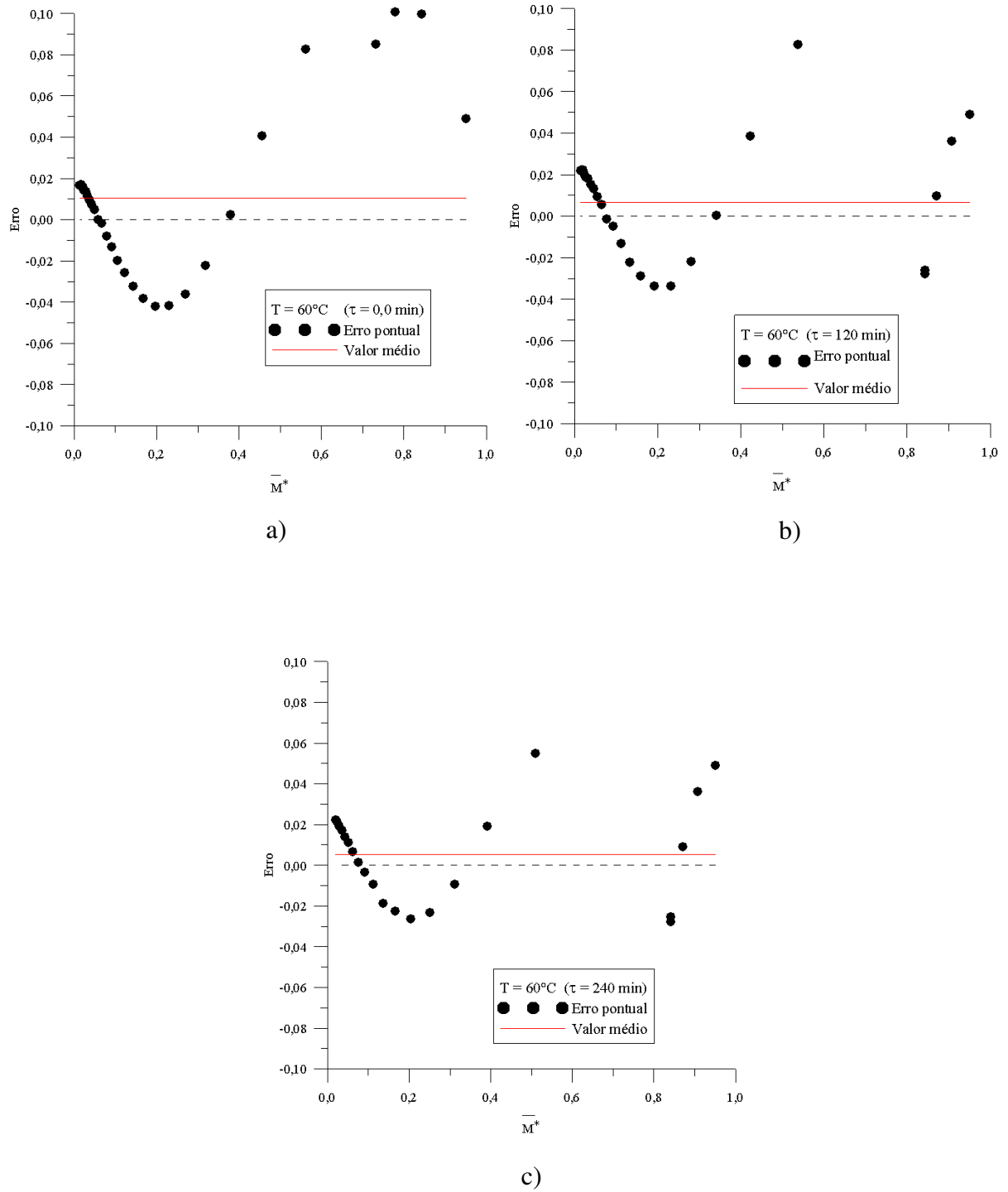


Figura 4.72. Distribuição de erros para o ajuste do Modelo I aos dados experimentais (E11, E12 e E13) de secagem contínua e intermitente na temperatura de 70°C, incluindo a têmpera: (a) contínua ( $\tau = 0,0$  min); (b) intermitente (uma pausa/ $\tau = 120$  min); e (c) intermitente (uma pausa/ $\tau = 180$  min)

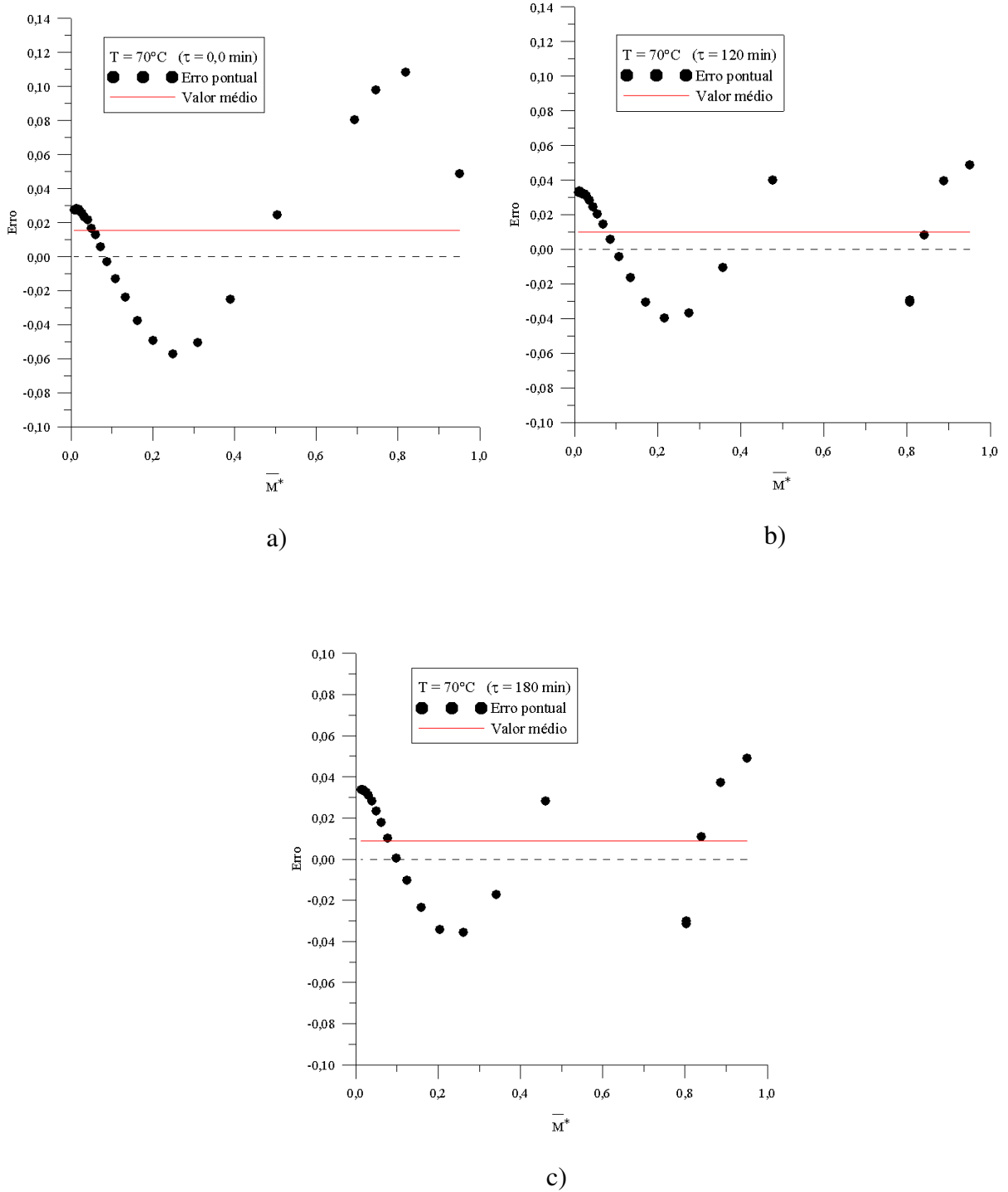
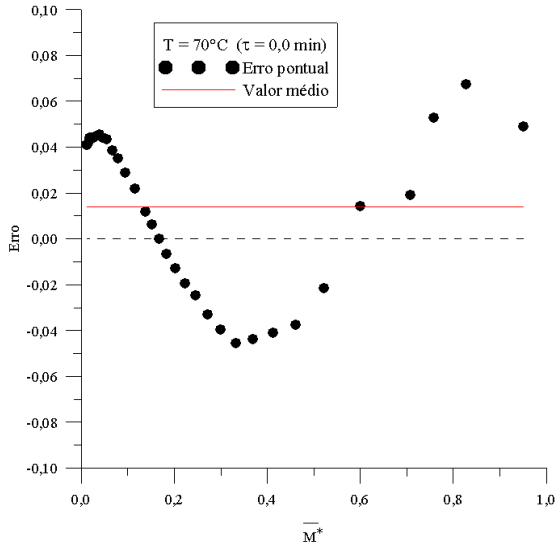
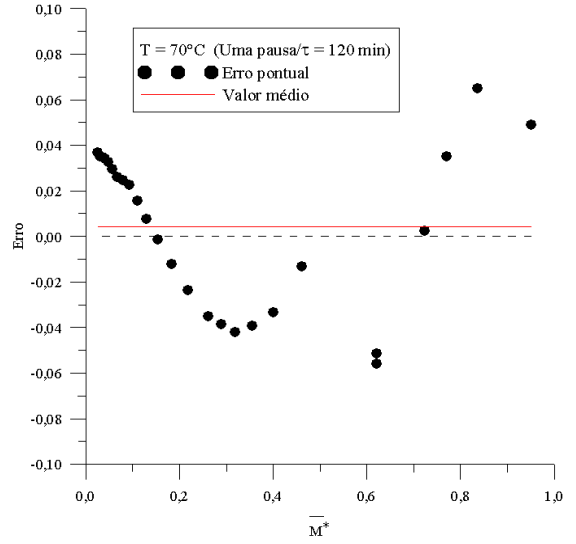


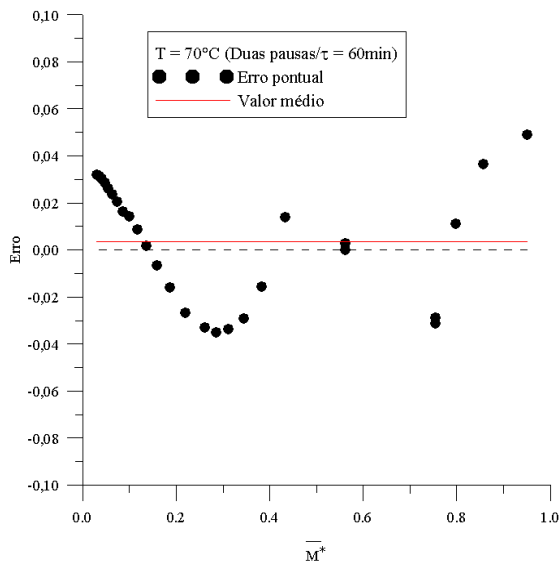
Figura 4.73. Distribuição de erros para o ajuste do Modelo I aos dados experimentais (E14, E15, E16 e E17) de secagem contínua e intermitente na temperatura de 70°C, incluindo a temperatura: (a) contínua ( $\tau = 0,0$  min); (b) uma pausa/ $\tau = 120$  min; (c) duas pausas/ $\tau = 60$  min; e (d) três pausas/ $\tau = 60$  min



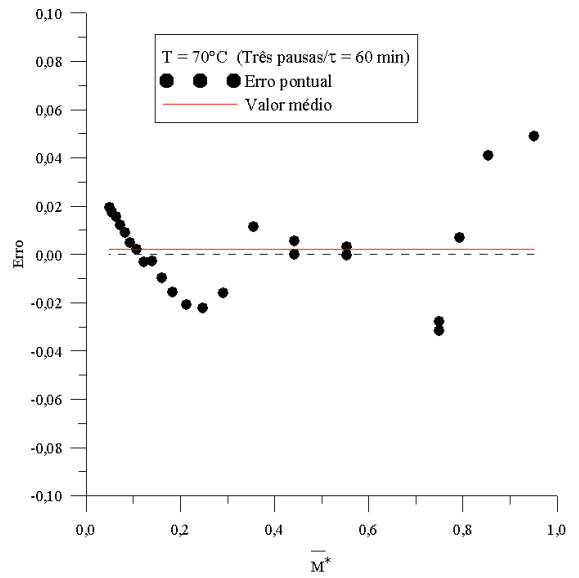
a)



b)



c)



d)



Figura 4.74. Teores de umidade médio adimensional experimental (casos E5, E6 e E7) e preditos (Modelo I) para secagem contínua e intermitente com uma pausa ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ )

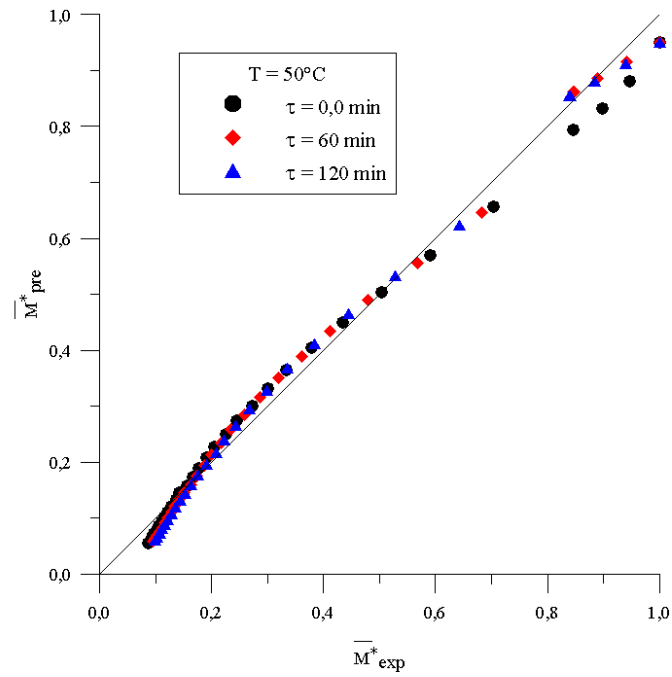


Figura 4.75. Teores de umidade médio adimensional experimental (casos E8, E9 e E10) e preditos (Modelo I) para secagem contínua e intermitente com uma pausa ( $T = 60^{\circ}\text{C}$ )

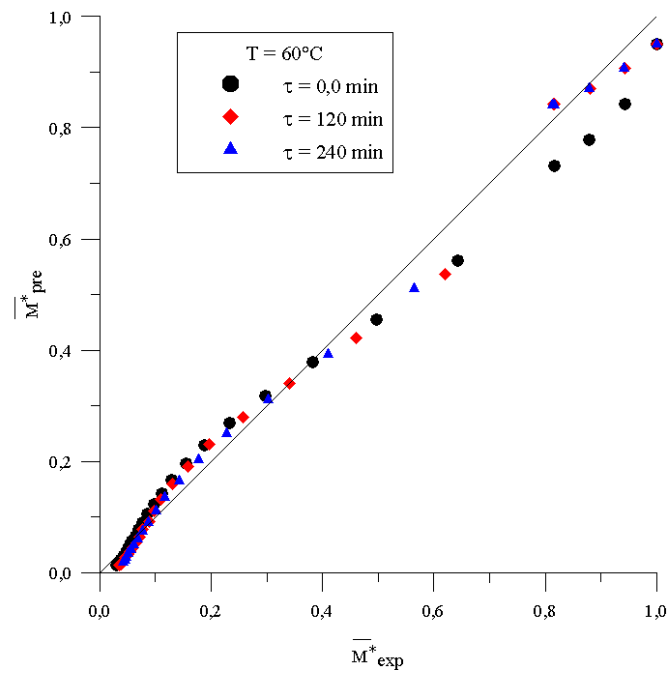


Figura 4.76. Teores de umidade médio adimensional experimental (casos E11, E12 e E13) e preditos (Modelo I) para secagem contínua e intermitente com uma pausa ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ )

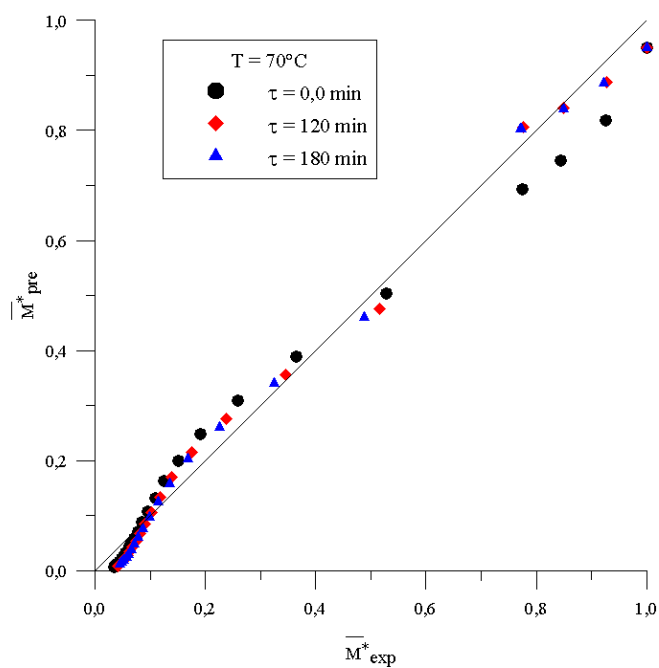
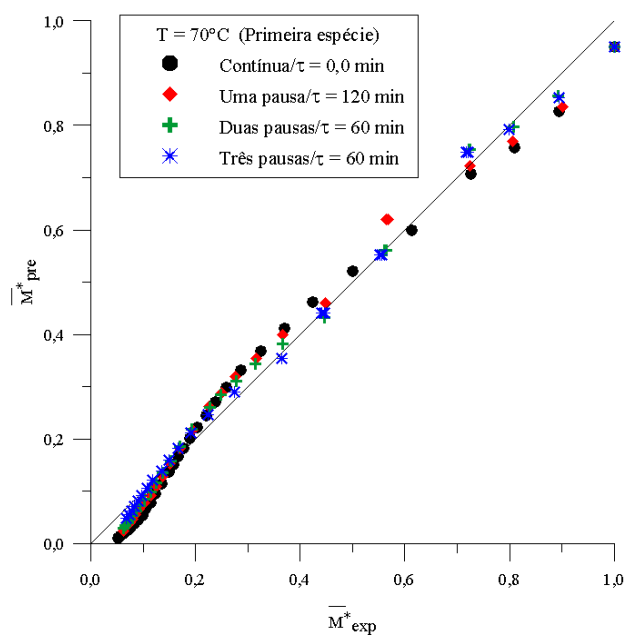


Figura 4.77. Teores de umidade médio adimensional experimental (casos E14, E15, E16 e E17) e preditos (Modelo I) para secagem contínua e intermitente com uma, duas e três pausas ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ )



#### 4.3.1.3 Simulação da distribuição de umidade no interior do grão de arroz

Os modelos matemáticos desenvolvidos neste trabalho permitiram descrever a distribuição de umidade no interior do grão de arroz durante o período de têmpera. O Modelo II foi utilizado para simular o comportamento do teor de umidade durante a têmpera e os resultados são apresentados a seguir. Neste caso, os períodos de secagem contínua foram descritos utilizando-se o Modelo I.

Com o objetivo de simular a distribuição de umidade no interior do grão de arroz durante o período de têmpera e estudar o efeito da têmpera na cinética de secagem, vários experimentos de secagem intermitente com uma pausa foram realizados variando a duração da têmpera (30, 60, 120, 180 e 240 min) e a temperatura do ar de secagem (40, 50, 60 e 70°C). A condição de fluxo nulo na superfície do grão foi imposta durante o período de têmpera e considerou-se a condição inicial como sendo a distribuição de umidade no final do período de secagem contínua que antecede a têmpera.

As Figuras 4.78 a 4.82 mostram a distribuição do teor de umidade adimensional como função da coordenada radial, no início e no fim da têmpera, para os experimentos de secagem intermitente nas temperaturas 40, 50, 60 e 70°C. Em todos os casos, considerou-se uma pausa com início em  $t = 15$  min, com exceção do experimento E15 em que a têmpera teve início em  $t = 30$  min (Figura 4.82). Analisando a ilustração, verifica-se que o teor de umidade nas camadas mais internas ( $r < 0,09$  cm) do grão de arroz diminuiu, enquanto que o teor de umidade nas camadas mais externas ( $r > 0,09$  cm) aumentou notavelmente, com o aumento da duração do tempo de têmpera. Isto é, a variação do teor de umidade adimensional, ao longo de  $r$ , diminuiu com o aumento do tempo de têmpera. Consequentemente, os gradientes de umidade gerados durante o período de secagem tendem a diminuir durante o período de têmpera. A redução dos gradientes de umidade pode evitar trincas e fissuras no grão e, conseqüentemente, melhorar a qualidade do produto seco (CIHAN e ECE, 2001; CHUA et al., 2003; KOWALSKI e PAWŁOWSKI, 2011a).

Analisando as Figuras 4.78 a 4.82 foi possível observar que, quanto maior a temperatura do ar de secagem, maior é o gradiente de umidade entre o centro e a superfície do grão de arroz no início da têmpera. Durante o período de têmpera, o gradiente de umidade ao longo da direção radial diminuiu à medida que o teor de umidade no centro diminuiu e na superfície aumentou.

Figura 4.78. Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca no início e no fim das tâmperas de 30 e 60 min, após 15 min de secagem contínua a 40°C (uma pausa/casos E2 e E3)

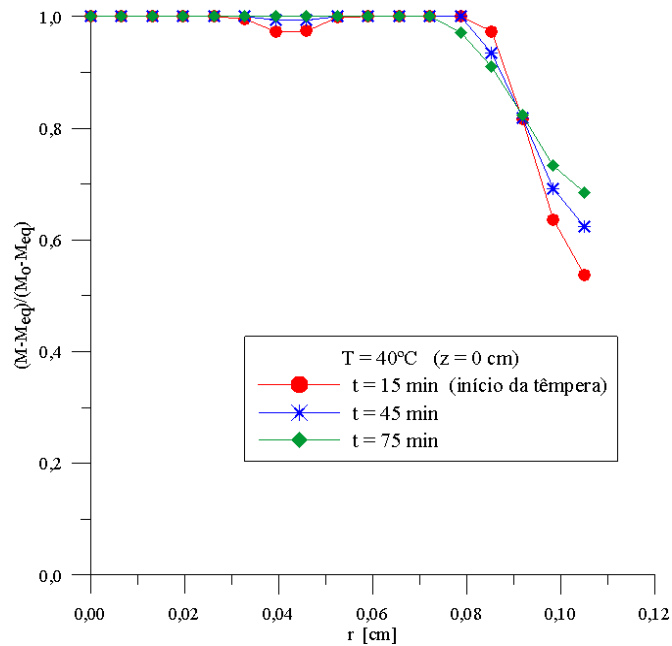


Figura 4.79. Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca no início e no fim do período de tâmara para secagem intermitente com uma pausa após 15 min de secagem a 50°C: (a)  $\tau = 60$  min e (b)  $\tau = 120$  min (casos E6 e E7)

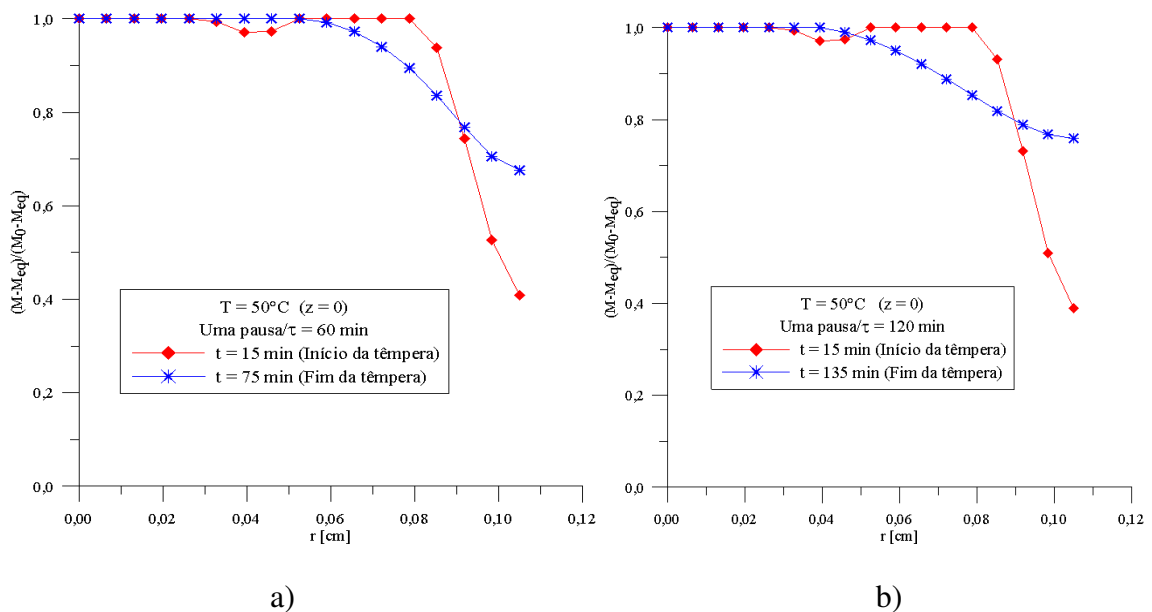


Figura 4.80. Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca no início e no fim do período de têmpera para secagem intermitente com uma pausa após 15 min de secagem a 60°C: (a)  $\tau = 120$  min e (b)  $\tau = 240$  min (casos E9 e E10)

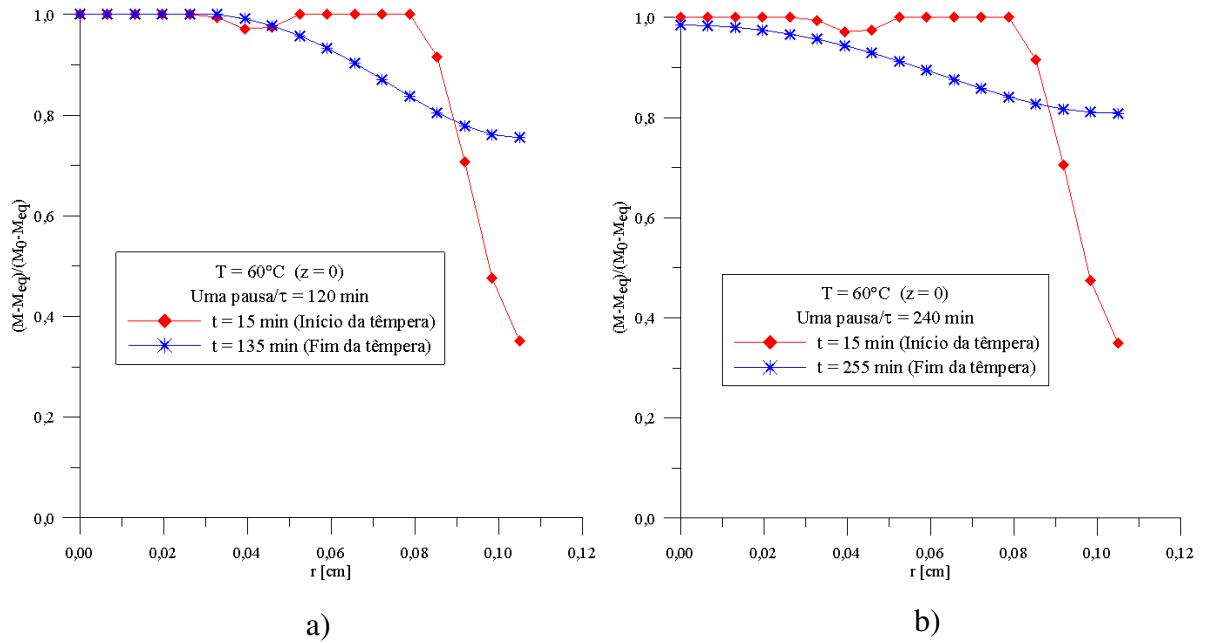


Figura 4.81. Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca no início e no fim do período de têmpera para secagem intermitente com uma pausa após 15 min de secagem a 70°C: (a)  $\tau = 120$  min e (b)  $\tau = 180$  min (casos E12 e E13)

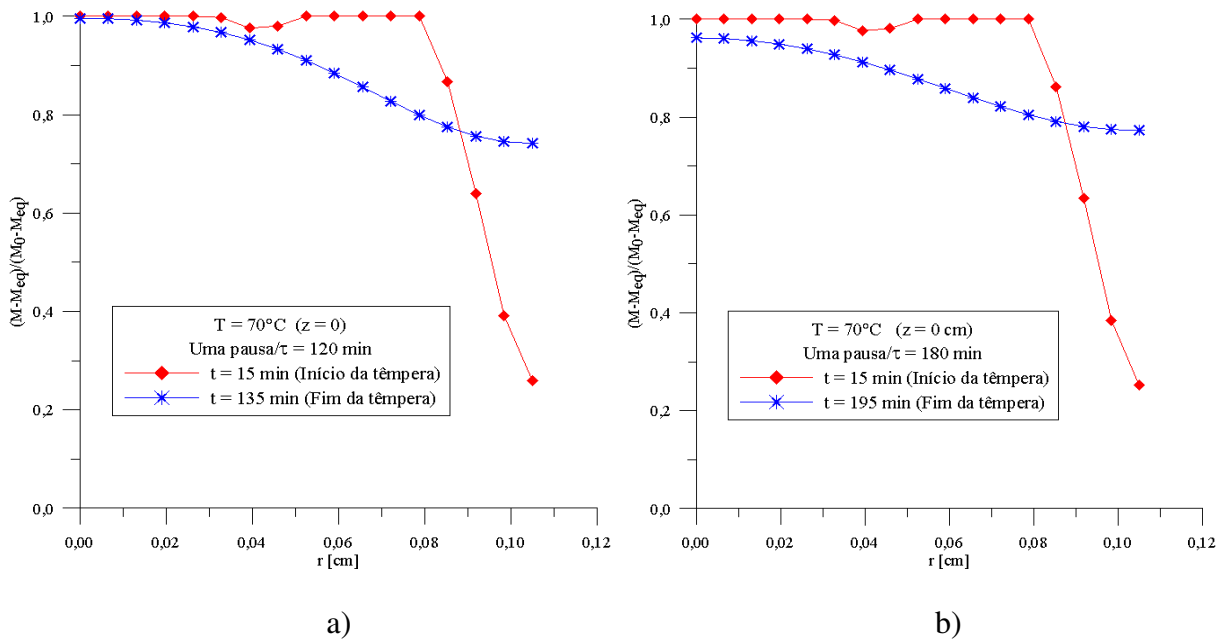
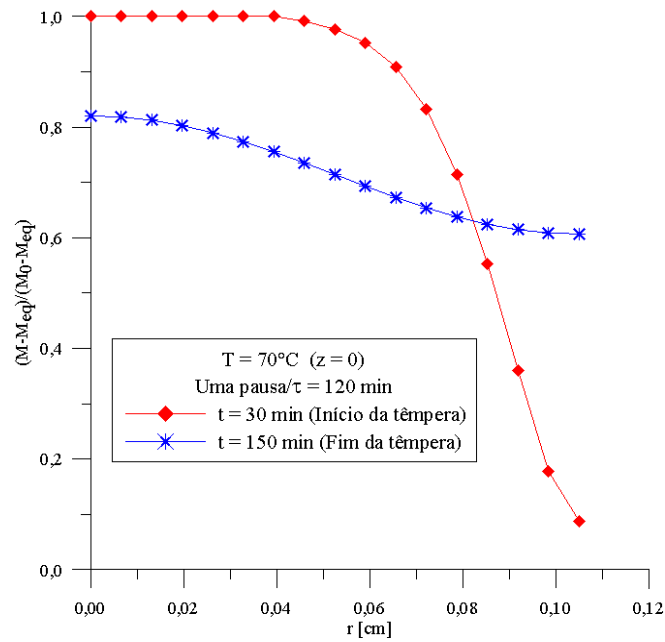


Figura 4.82. Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca no início e no fim do período de têmpera para secagem intermitente com uma pausa de 120 min, após 30 min de secagem a 70°C (caso E15)



Para avaliar a influência da temperatura e da duração do período inicial de secagem contínua no processo de redução dos gradientes de umidade, a Figura 4.83 apresenta a distribuição do teor de umidade adimensional na direção radial ao final da têmpera de 120 min, para várias condições de secagem. Considerando-se o período inicial de secagem de 15 min, observa-se que, ao final da têmpera, o teor de umidade na parte mais interna do grão foi menor com o aumento da temperatura do ar de secagem. Aumentando o período inicial de secagem de 15 para 30 min, na temperatura de 70°C, houve uma redução maior do teor de umidade na parte mais interna do grão. Assim, pode-se deduzir que quanto maior o gradiente de umidade gerado no período inicial de secagem, menor será o tempo de têmpera necessário para uniformizar a umidade no interior do grão de arroz. Consequentemente, o tempo de operação total é reduzido.

A Figura 4.84 mostra a evolução do teor de umidade adimensional na superfície do grão de arroz, durante o período de têmpera de 60 min, após 15 min de secagem contínua a 40°C. Observa-se que o teor de umidade adimensional, na superfície do grão, aumentou de 0,53 para 0,68 em ( $r = 0,105$  cm e  $z = 0$  cm) e de 0,49 para 0,54 em ( $r = 0$  cm e  $z = 0,462$  cm), ao final de uma pausa de 60 min.

Figura 4.83. Comparação entre os teores de umidade na direção radial, ao final de um período de têmpera de 120 min, para várias condições de secagem (casos E7, E9, E12 e E15)

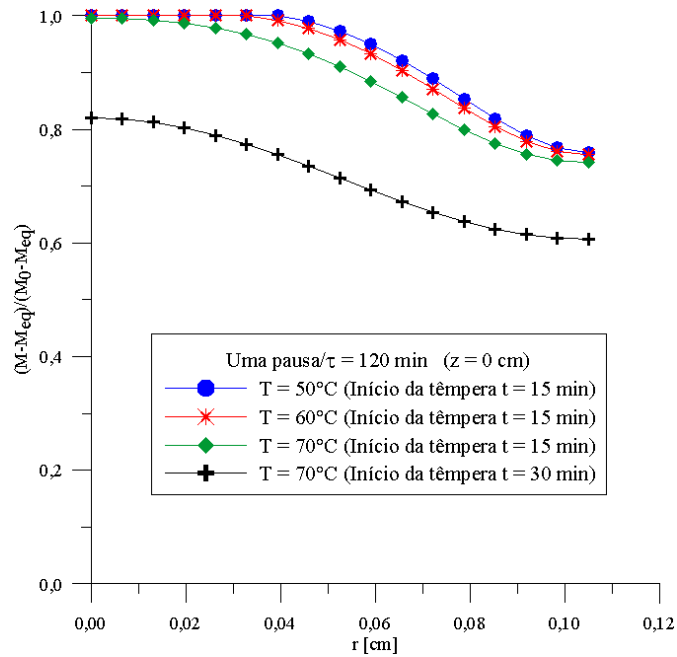
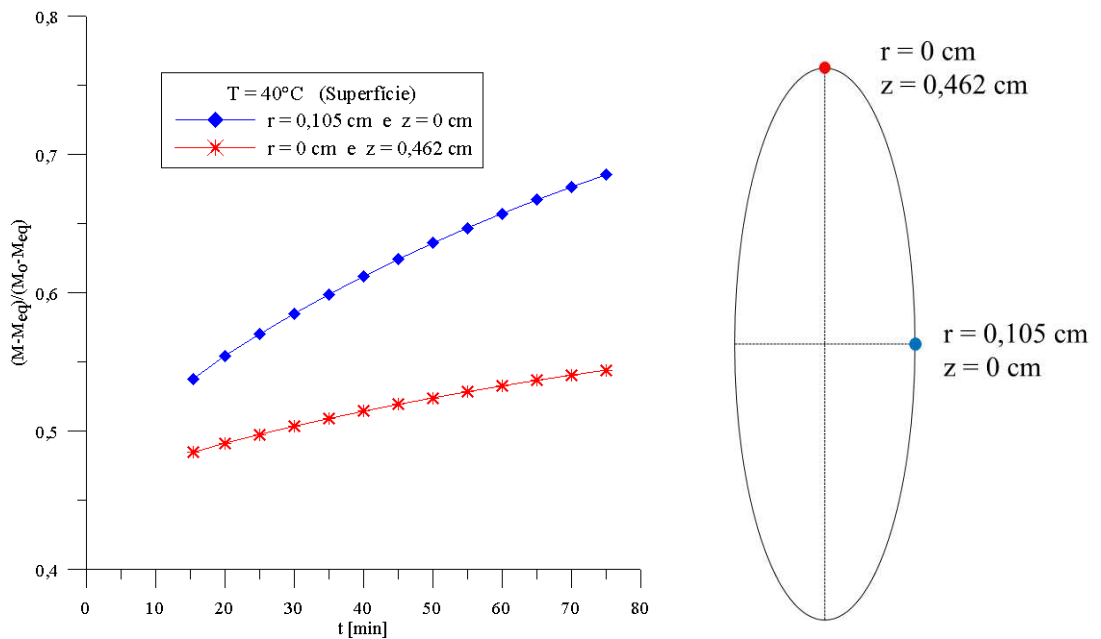


Figura 4.84. Evolução do teor de umidade na superfície do grão de arroz durante o período de têmpera de 60 min ( $T = 40^\circ\text{C}$ /uma pausa)



O processo de redistribuição de umidade no interior do grão de arroz, durante o período de têmpera, permite uma secagem mais uniforme além de acelerar a retirada de umidade no período subsequente de secagem contínua (BAINI e LANGRISH, 2007; DONG et al., 2009; KUMAR et al., 2014). A homogeneização total pode ser conseguida sem gasto de energia.

Adotando o critério de que a distribuição de umidade homogênea é atingida quando o teor de umidade na superfície do grão alcança pelo menos 95% do teor de umidade médio, foi possível estimar o tempo necessário para homogeneização da umidade. Este critério também foi adotado por Silva et al. (2014) no estudo de secagem intermitente de pêras.

Para os três experimentos de secagem intermitente com período inicial de secagem de 15 min nas temperaturas 50, 60 e 70°C, seguido de uma pausa de 120 min, o teor de umidade adimensional na superfície ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$  cm) ao final da têmpera atingiu, respectivamente, 88,78; 89,66; e 91,96% do teor de umidade médio, como pode ser observado na Figura 4.85. Assim, nestas condições de secagem, o período de repouso pode ser continuado até que a distribuição de umidade seja homogênea, sem gasto de energia. Para o experimento de secagem intermitente com período inicial de secagem de 30 min na temperatura de 70°C, seguido de uma pausa de 120 min, o teor de umidade adimensional na superfície ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$  cm) atingiu, ao final da têmpera, 97,91% do teor de umidade médio. Neste caso, o tempo de têmpera experimental de 120 min foi suficiente para atingir a homogeneidade da distribuição de umidade no interior dos grãos de arroz.

A Figura 4.86 mostra que o tempo necessário para atingir a homogeneidade da distribuição de umidade no interior dos grãos de arroz é de 360, 240, 210 e 160 min, respectivamente, para os experimentos de secagem intermitente com uma pausa, após 15 min de secagem nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C. Assim, os tempos de têmpera experimental considerados de 240 e 180 min, respectivamente, para temperatura de 60 e 70°C, foram suficientes para a homogeneidade da distribuição de umidade.

O processo de uniformização do teor de umidade no interior do grão, durante o período de têmpera, também foi avaliado para secagem intermitente com duas e três pausas. Para o experimento de secagem (E4) a 40°C com duas pausas de 30 min, o teor de umidade adimensional na superfície ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$  cm) atingiu 69,44% do teor de umidade médio na primeira pausa e 52,62% na segunda pausa, como pode ser visto na Figura 4.87. Assim, nestas condições de secagem, o período de repouso pode ser continuado até que a distribuição de umidade seja homogênea, sem gasto de energia. Observou-se que, na segunda pausa, é necessário um tempo maior para uniformização da umidade.



Figura 4.85. Evolução do teor de umidade na superfície do grão de arroz durante o período de têmpera de 120 min, para várias condições de secagem (casos E7, E9, E12 e E15)

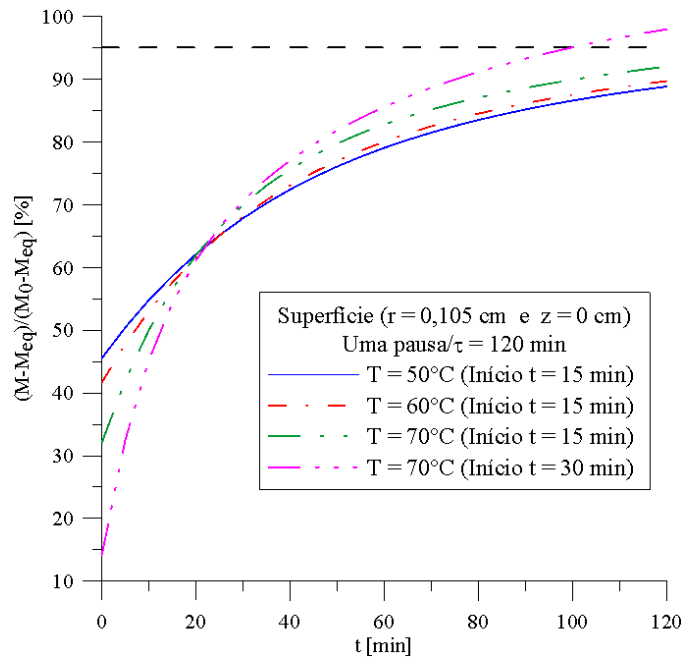


Figura 4.86. Evolução do teor de umidade na superfície do grão de arroz durante o período de têmpera após 15 min de secagem contínua para várias temperaturas

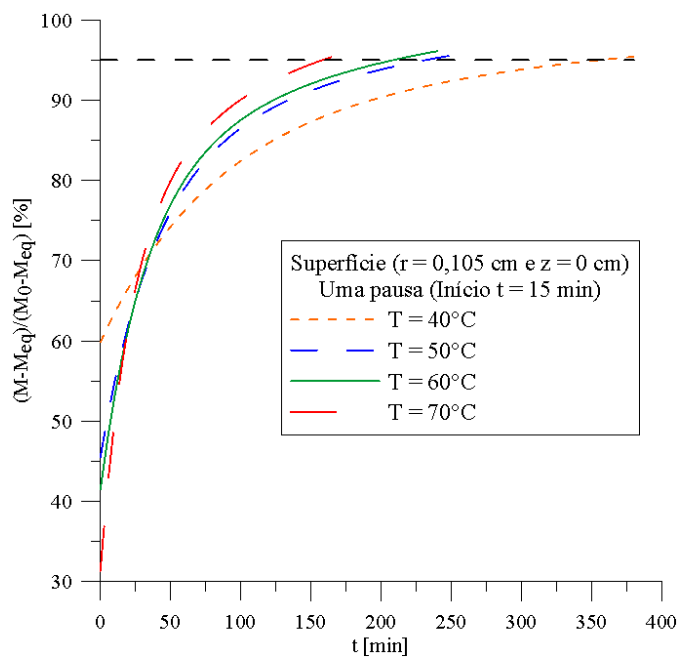


Figura 4.87. Evolução do teor de umidade na superfície do grão de arroz durante o primeiro e o segundo períodos de têmpera de 30 min, para secagem a 40°C (caso E4)

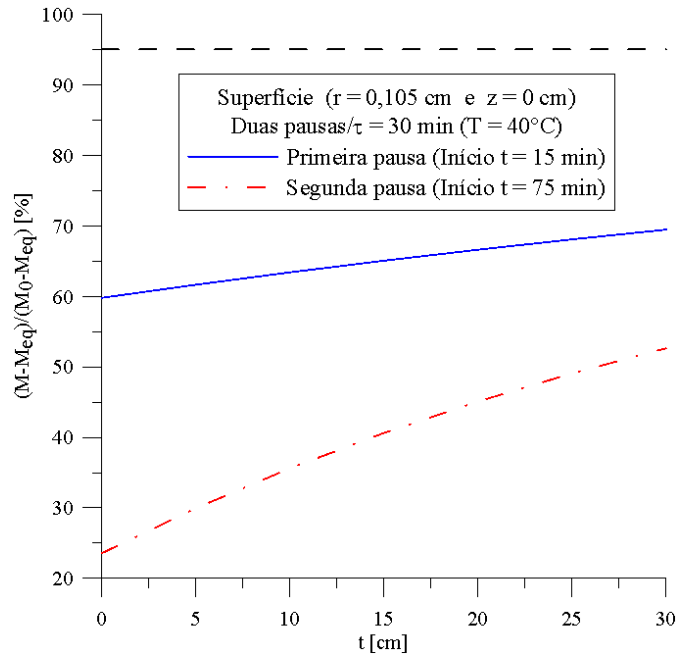
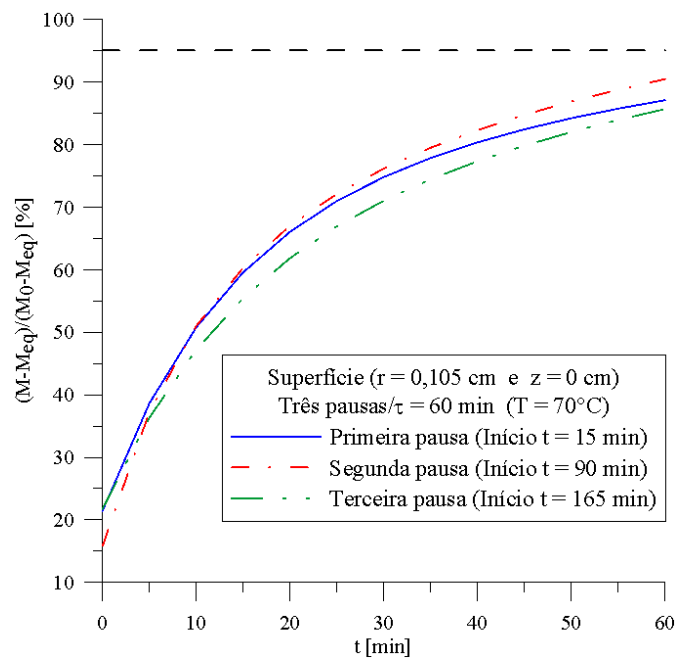


Figura 4.88. Evolução do teor de umidade na superfície do grão de arroz durante os três períodos de têmpera de 60 min, para secagem a 70°C (caso E17)

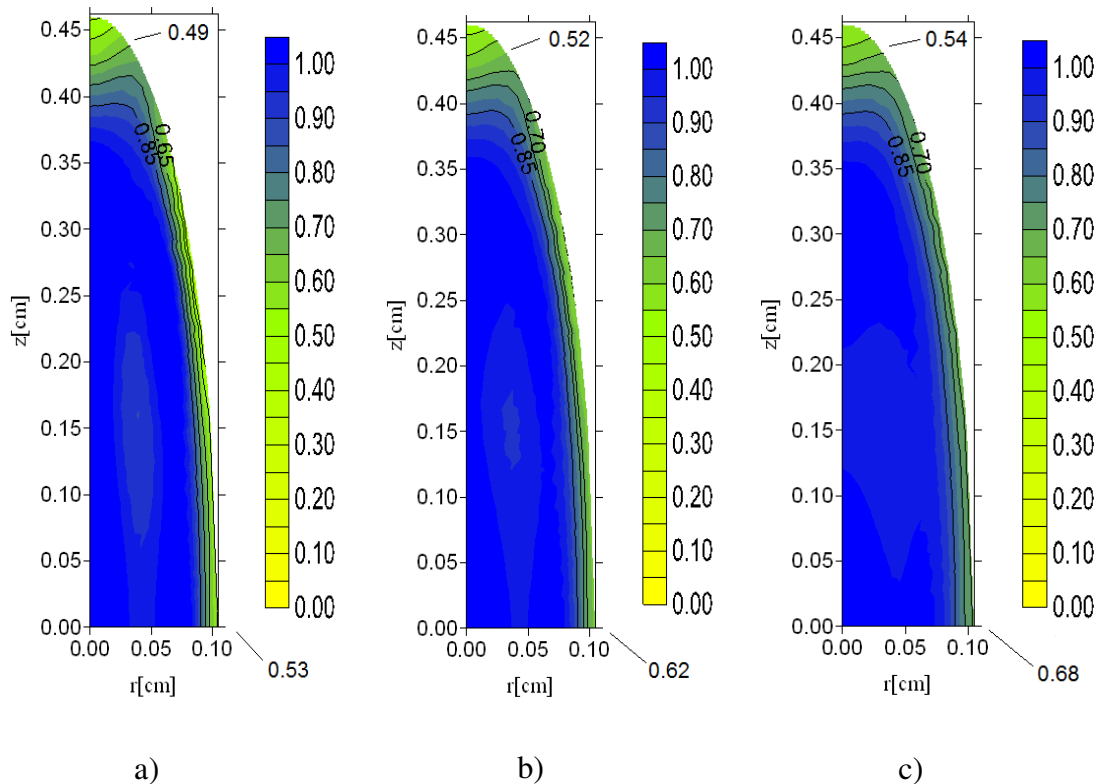


Para o experimento de secagem (E17) a 70°C com três pausas de 60 min, o teor de umidade adimensional na superfície ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$  cm) atingiu 87,04% do teor de umidade

médio na primeira pausa, 90,41% na segunda pausa e 85,62% na terceira pausa, como pode ser visto na Figura 4.88.

A Figura 4.89 apresenta a distribuição do teor de umidade adimensional em função das coordenadas cilíndricas ( $r,z$ ) no interior do grão de arroz durante o período de têmpera para o experimento de secagem com uma pausa (caso E3) de 60 min, após 15 min de secagem contínua a 40°C. Os instantes de tempo considerados são: (a)  $t = 15$  min (início); (b)  $t = 45$  min e (c)  $t = 75$  min (fim). Durante o período de têmpera, o teor de umidade médio adimensional se manteve constante e igual a 0,898759. Observa-se uma leve migração de água da parte mais interna do grão para a superfície, ao final do período de têmpera.

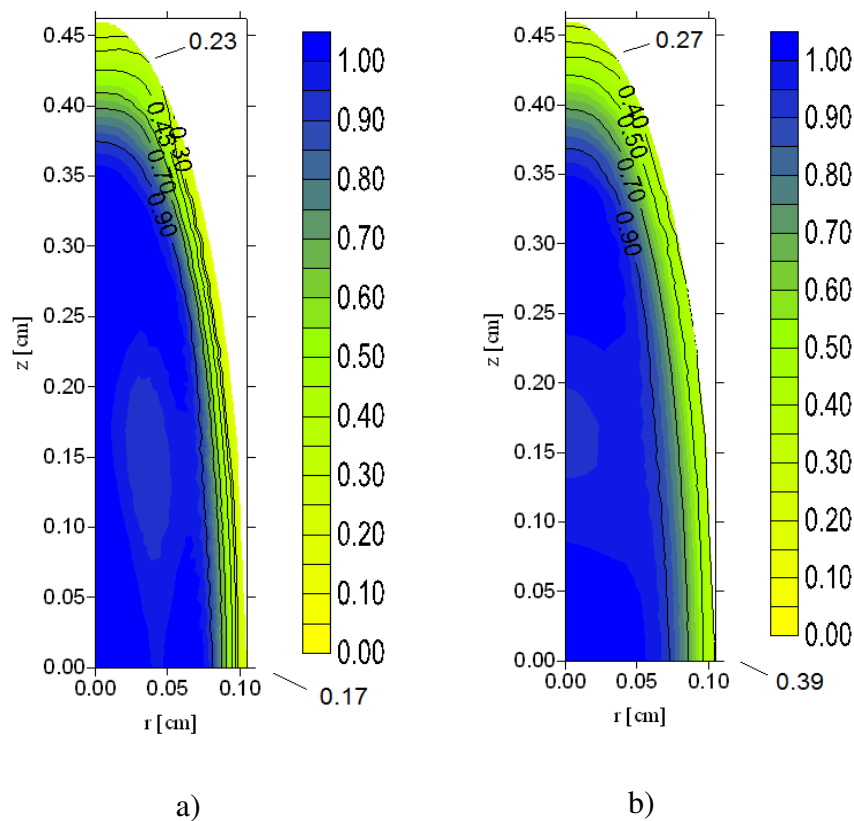
Figura 4.89. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o período de têmpera, para secagem intermitente com uma pausa de 60 min, após 15 min de secagem a 40°C (caso E3): (a)  $t = 15$  min (início); (b)  $t = 45$  min e (c)  $t = 75$  min (fim)



A Figura 4.90 apresenta a distribuição do teor de umidade adimensional em função das coordenadas cilíndricas ( $r,z$ ) no início ( $t = 75$  min) e no fim ( $t = 105$  min) do segundo período de têmpera de 30 min, para o experimento de secagem intermitente com duas pausas (caso E4) e temperatura do ar de secagem de 40°C. Durante o segundo período de têmpera, o teor de

umidade médio simulado foi 0,750478. Comparando as Figuras 4.89 e 4.90, foi possível observar que o teor de umidade na superfície do grão é menor ao final do segundo período de têmpera, indicando que a uniformização é mais lenta em relação ao primeiro período de têmpera, o que está de acordo com a Figura 4.87.

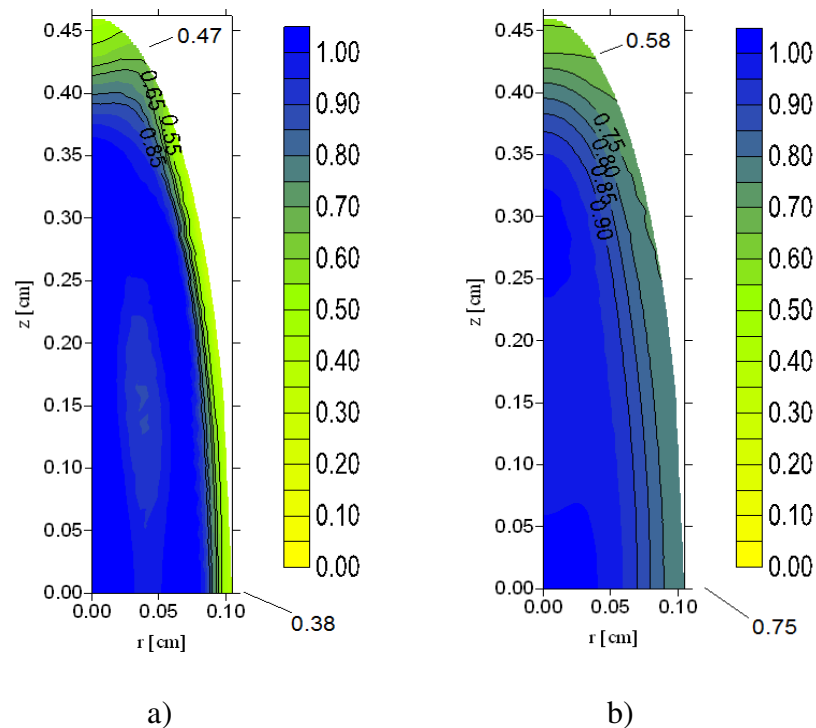
Figura 4.90. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o segundo período de têmpera para o experimento de secagem intermitente na temperatura de 40°C (duas pausas/ $\tau = 30$  min) (caso E4): (a)  $t = 75$  min (início) e (b)  $t = 105$  min (fim)



As Figuras 4.91 a 4.93 apresentam a distribuição do teor de umidade adimensional no início ( $t = 15$  min) e no fim ( $t = 135$  min) da têmpera, para os experimentos de secagem intermitente (E7, E9 e E12) com uma pausa de 120 min, após 15 min de secagem nas temperaturas 50, 60 e 70°C, respectivamente. O teor de umidade médio simulado durante o período de têmpera foi 0,854879; 0,842145 e 0,806287, respectivamente. Analisando as figuras é possível verificar que, durante o período de têmpera, ocorre difusão de umidade do centro para a superfície do grão de arroz, reduzindo os gradientes de umidade produzidos no período inicial de secagem. Embora o teor de umidade adimensional na superfície ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$

cm) atinja aproximadamente o mesmo valor 0,75 ao final do período de têmpera para os três experimentos, a distribuição de umidade está mais uniforme quando a temperatura do ar de secagem aumentou de 50 para 70°C.

Figura 4.91. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o período de têmpera de 120 min, após 15 min de secagem a 50°C (caso E7):  
(a)  $t = 15$  min (início) e (b)  $t = 135$  min (fim)



As Figuras 4.94 e 4.95 apresentam a distribuição do teor de umidade adimensional em função das coordenadas cilíndricas ( $r, z$ ) no início e no fim da têmpera para os experimentos de secagem intermitente (E10 e E13) com uma pausa de 240 e 180 min, após 15 min de secagem nas temperaturas 60 e 70°C, respectivamente. O teor de umidade médio simulado foi 0,841457 durante a têmpera de 240 min (secagem a 60°C) e 0,803163 durante a têmpera de 180 min (secagem a 70°C). Para as condições de secagem estabelecidas, observa-se nos dois casos que os gradientes de umidade foram praticamente eliminados. O grão de arroz submetido à secagem inicial a 70°C, embora com a duração do período de têmpera menor (180 min), encontra-se menos úmido na parte mais interna próxima ao centro, o que consiste em mais uma comprovação da influência da temperatura do ar de secagem no processo de homogeneização. Quanto maior a temperatura do ar de secagem no período antes da têmpera, menor será o tempo necessário para homogeneização dos grãos, o que está de acordo com a Figura 4.86.

Figura 4.92. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o período de têmpera de 120 min, após 15 min de secagem a 60°C (caso E9):

(a)  $t = 15$  min (início) e (b)  $t = 135$  min (fim)

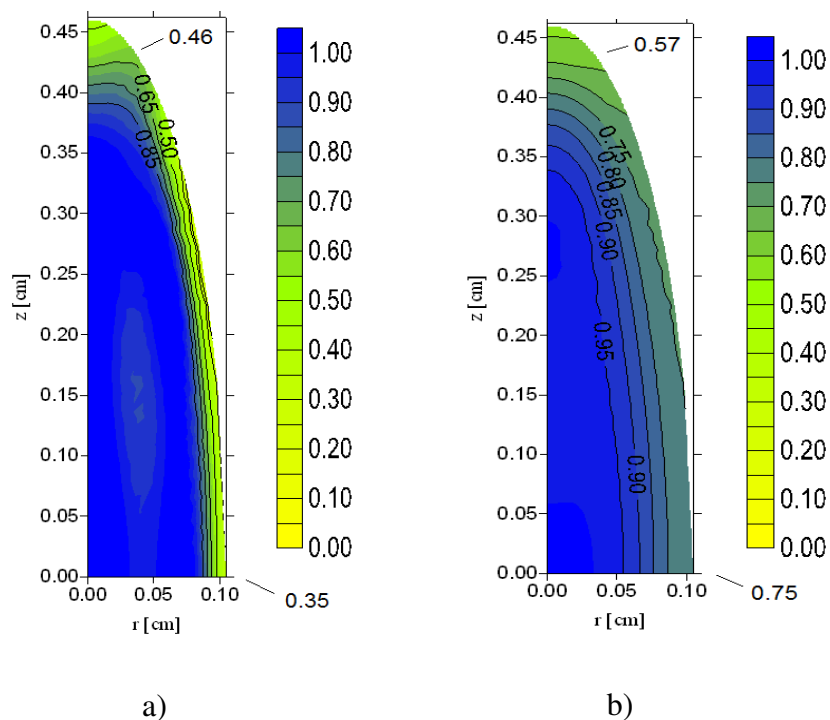


Figura 4.93. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o período de têmpera de 120 min, após 15 min de secagem a 70°C (caso E12):

(a)  $t = 15$  min (início) e (b)  $t = 135$  min (fim)

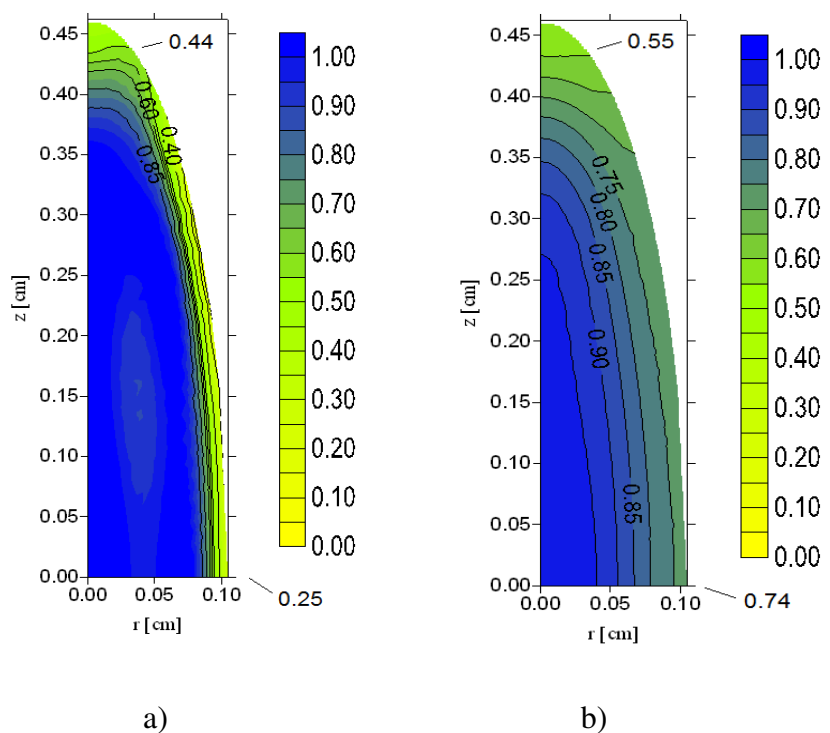


Figura 4.94. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o período de têmpera de 240 min, após 15 min de secagem a 60°C (caso E10):  
 (a)  $t = 15$  min (início) e (b)  $t = 255$  min (fim)

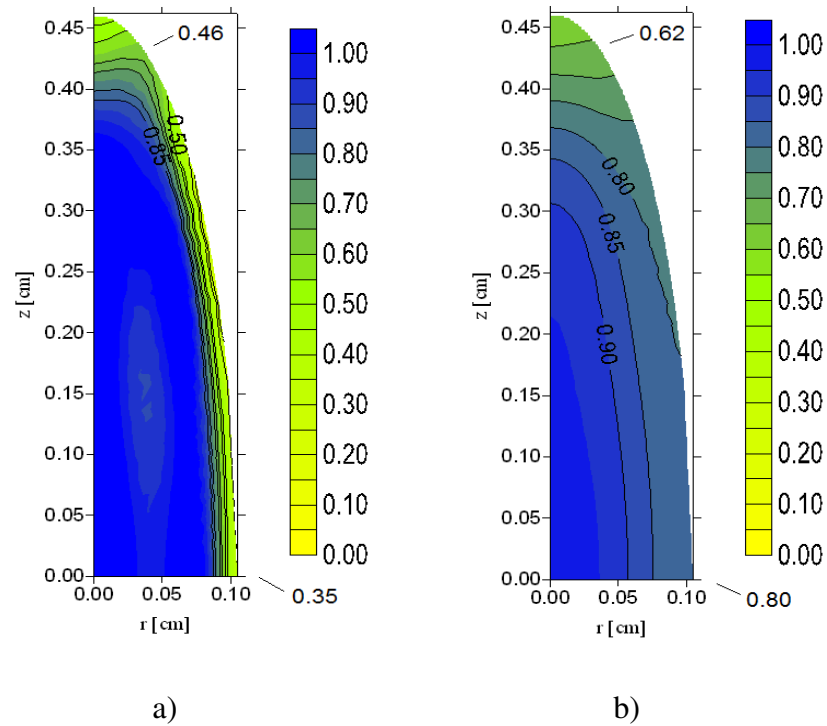
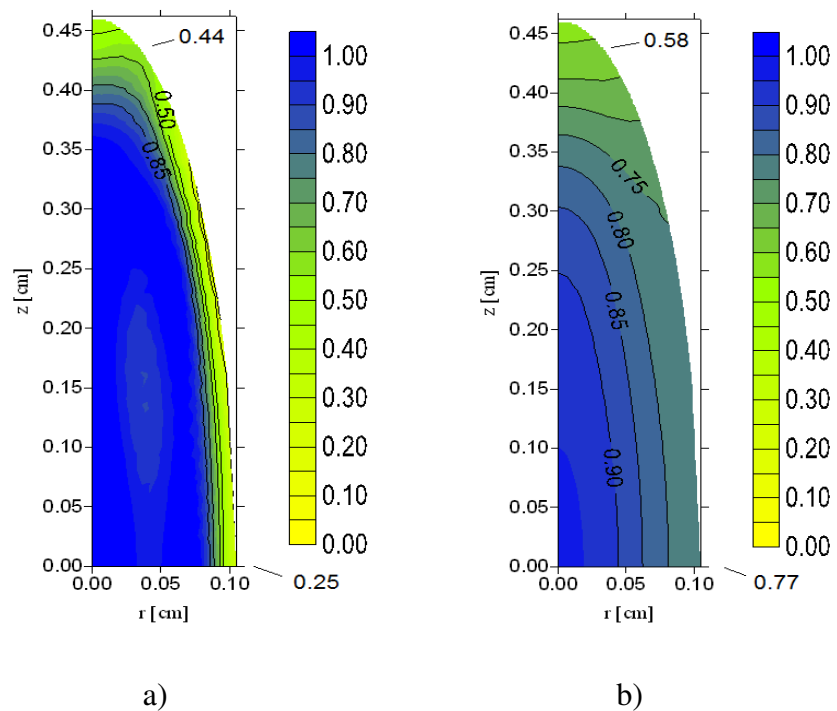


Figura 4.95. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o período de têmpera de 180 min, após 15 min de secagem a 70°C (caso E13):  
 (a)  $t = 15$  min (início) e (b)  $t = 195$  min (fim)



As Figuras 4.96 e 4.97 apresentam a distribuição do teor de umidade adimensional em função das coordenadas cilíndricas (r,z) no início e no fim do segundo e terceiro períodos de têmpera, para o experimento de secagem intermitente com três pausas de 60 min intercaladas com períodos de 15 min de secagem a 70°C (caso E17). A primeira pausa teve início após 15 min de secagem a 70°C. O segundo período de têmpera teve início em  $t = 90$  min e fim em  $t = 150$  min. Neste período, o teor de umidade médio simulado foi 0,552138. Na Figura 4.96, observa-se que o teor de umidade adimensional na superfície aumentou de 0,16 para 0,22 em ( $r = 0$  cm,  $z = 0,462$  cm) e de 0,09 para 0,50 em ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$  cm). O terceiro período de têmpera teve início em  $t = 165$  min e fim em  $t = 225$  min. Neste período, o teor de umidade médio simulado foi 0,44077. Na Figura 4.97, observa-se que o teor de umidade adimensional na superfície aumentou de 0,09 para 0,12 em ( $r = 0$  cm,  $z = 0,462$  cm) e de 0,09 para 0,37 em ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$  cm). Verifica-se que as camadas mais internas do grão de arroz sempre secaram durante todo o processo de secagem intermitente. Este fato é responsável por acelerar o processo de secagem e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia utilizada no processo (DONG et al., 2009).

Figura 4.96. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o segundo período de têmpera de 60 min para o experimento de secagem a 70°C (caso E17): (a)  $t = 90$  min (início) e (b)  $t = 150$  min (fim)

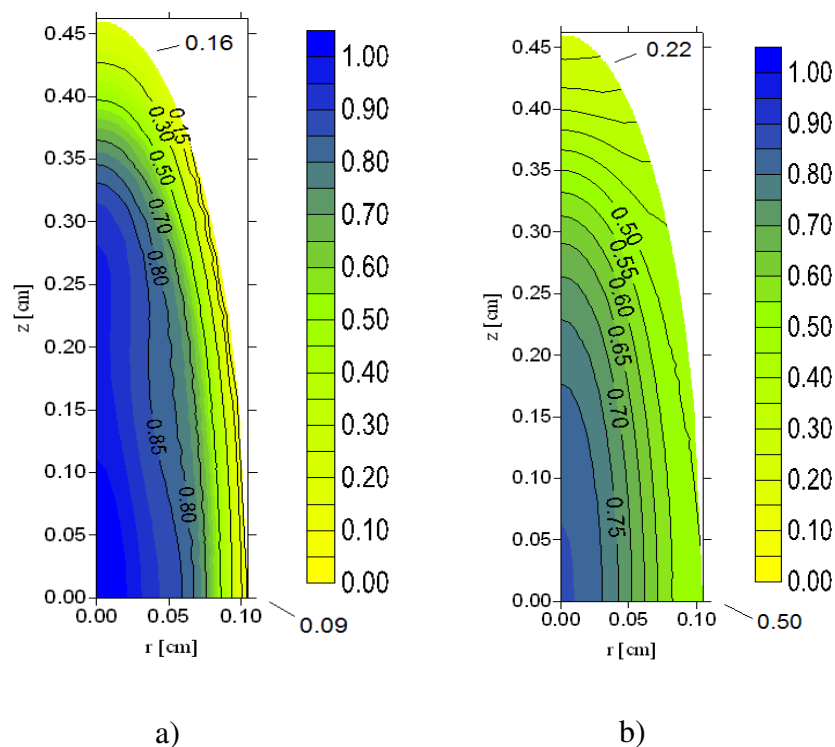
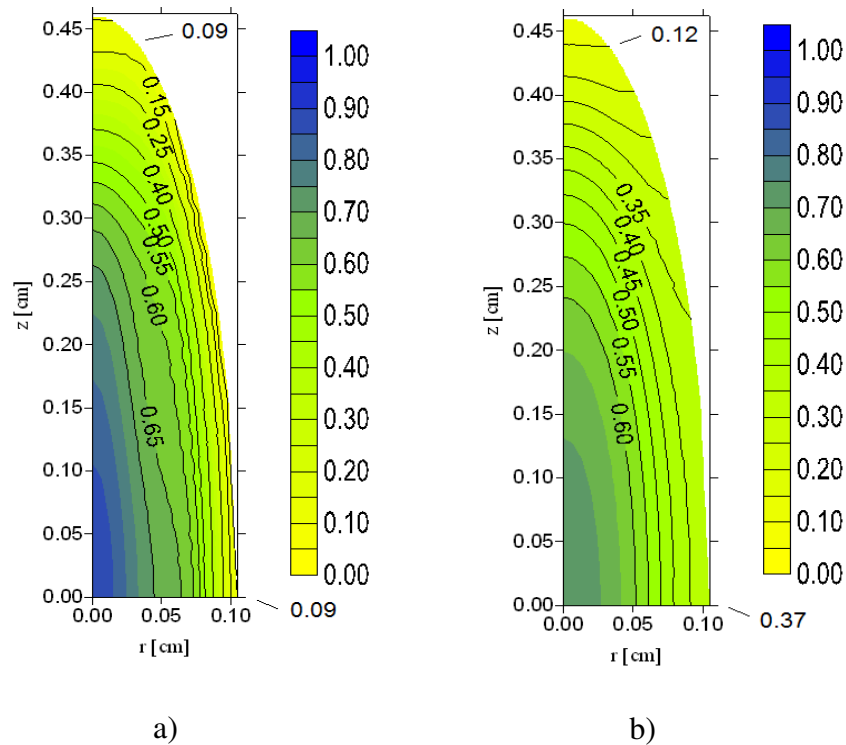


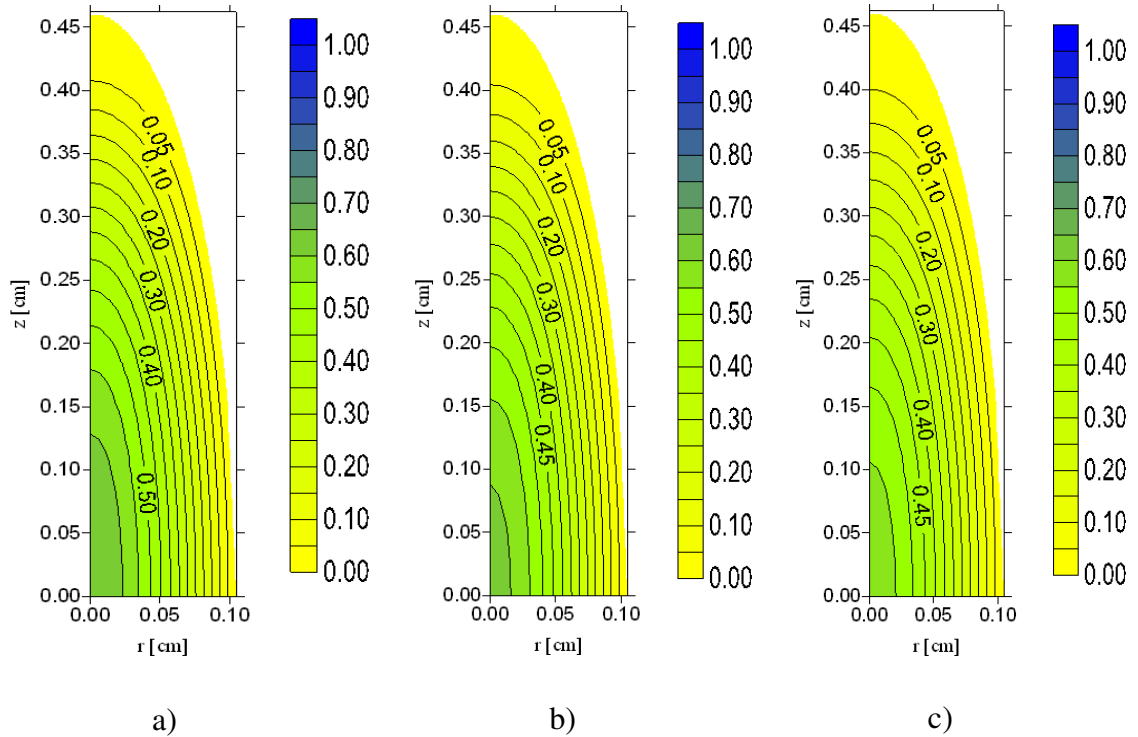


Figura 4.97. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante o terceiro período de têmpera de 60 min para o experimento de secagem a 70°C (caso E17): (a)  $t = 165$  min (início) e (b)  $t = 225$  min (fim)



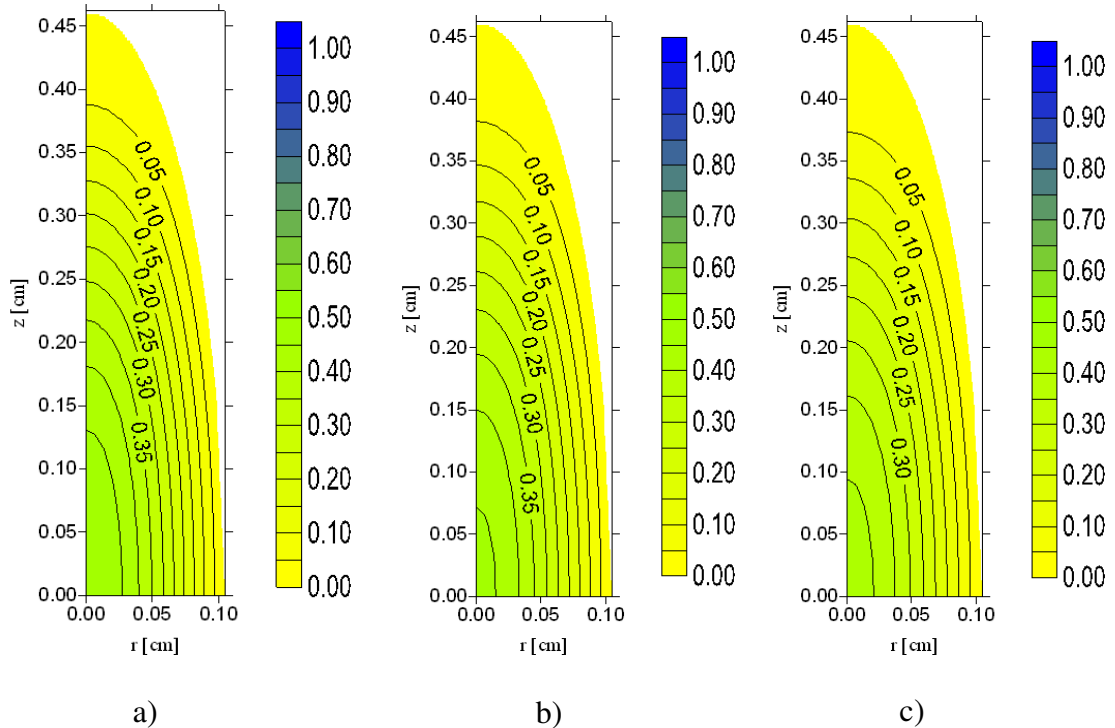
A Figura 4.98 apresenta a comparação entre a distribuição de umidade adimensional no interior do grão de arroz para a secagem contínua ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ), e para secagem intermitente com uma pausa de 30 e 60 min após 15 min de secagem a  $40^{\circ}\text{C}$ , no tempo  $t = 465$  min de operação efetiva eliminando-se a têmpera (casos E1, E2 e E3). Neste instante, o teor de umidade médio adimensional simulado foi 0,217971; 0,207485 e 0,191315, respectivamente. Observa-se que o grão de arroz está mais seco com a intermitência de 60 min, o que está de acordo com a cinética de secagem (Figura 4.59d). A quantidade de água removida por unidade de tempo de secagem foi consideravelmente maior na secagem intermitente do que na secagem contínua. Para atingir o teor de umidade final de aproximadamente 6,8% (b.s.) foram necessários 1035 min de secagem contínua. Por outro lado, quando os grãos de arroz foram submetidos a secagem intermitente, foram necessários 1005 min e 975 min de tempo de secagem efetiva para atingir o mesmo teor de umidade, respectivamente, para uma pausa de 30 e 60 min. A redução de tempo de operação efetiva passou de 2,89% para 5,79% quando o período de têmpera aumentou de 30 para 60 min.

Figura 4.98. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão do arroz em casca para secagem contínua ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ) e intermitente (uma pausa) com o mesmo tempo de operação efetiva  $t = 465$  min: (a) secagem contínua ( $t = 465$  min); (b) intermitente/ $\tau = 30$  min ( $t = 495$  min) e (c) intermitente/ $\tau = 60$  min ( $t = 525$  min) (casos E1, E2 e E3)



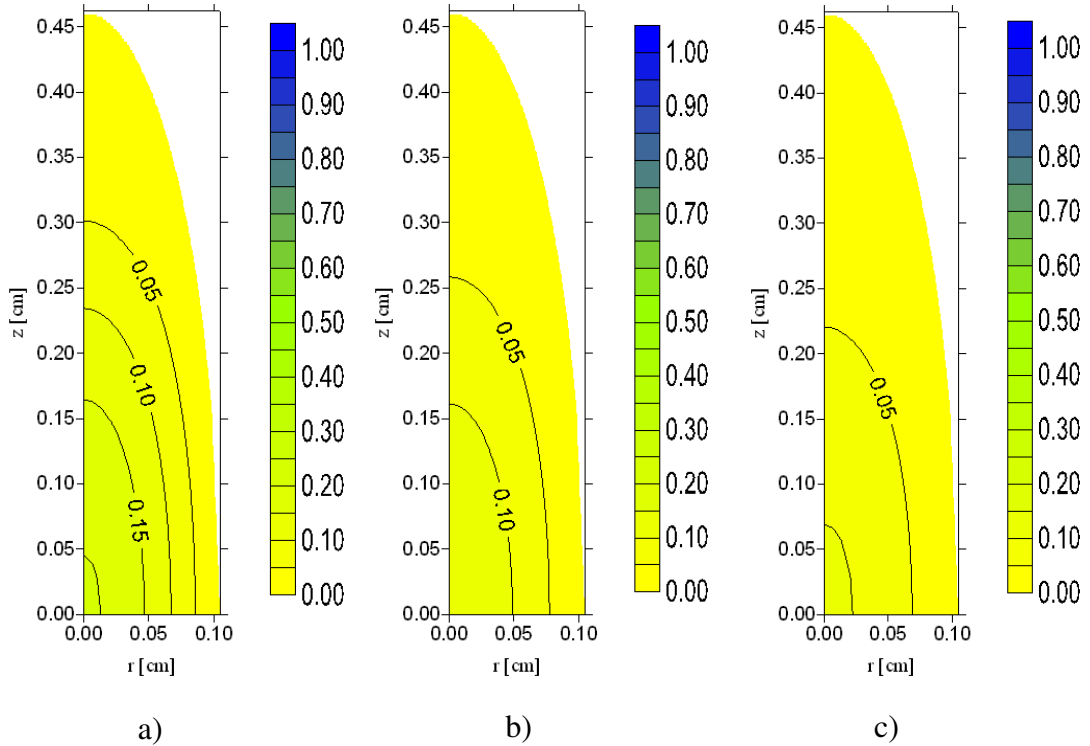
A Figura 4.99 apresenta a comparação entre a distribuição de umidade adimensional no interior do grão de arroz para a secagem contínua ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ) e para secagem intermitente, com uma pausa de 60 e 120 min após 15 min de secagem a  $50^{\circ}\text{C}$ , no tempo  $t = 465$  min de operação efetiva eliminando-se a temperatura (casos E5, E6 e E7). Neste instante, o teor de umidade médio adimensional simulado foi 0,158745; 0,146116 e 0,131437, respectivamente. Observa-se que o grão de arroz secou mais para o experimento de secagem intermitente com uma pausa de 120 min. Ao final de 825 min de operação total, o teor de umidade reduziu de aproximadamente 16,9% (b.s.) para aproximadamente 6,3% (b.s.) nos três experimentos. No entanto, na secagem intermitente o tempo de operação efetiva foi reduzido para 765 e 705 min, respectivamente, para uma pausa de 60 e 120 min. A redução de tempo de operação efetiva foi de 7,27% e 14,54%, respectivamente.

Figura 4.99. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão do arroz em casca para secagem contínua ( $T = 50^{\circ}\text{C}$ ) e intermitente (uma pausa) com o mesmo tempo de operação efetiva  $t = 465$  min: (a) secagem contínua ( $t = 465$  min); (b) intermitente/ $\tau = 60$  min ( $t = 525$  min) e (c) intermitente/ $\tau = 120$  min ( $t = 585$  min) (casos E5, E6 e E7)



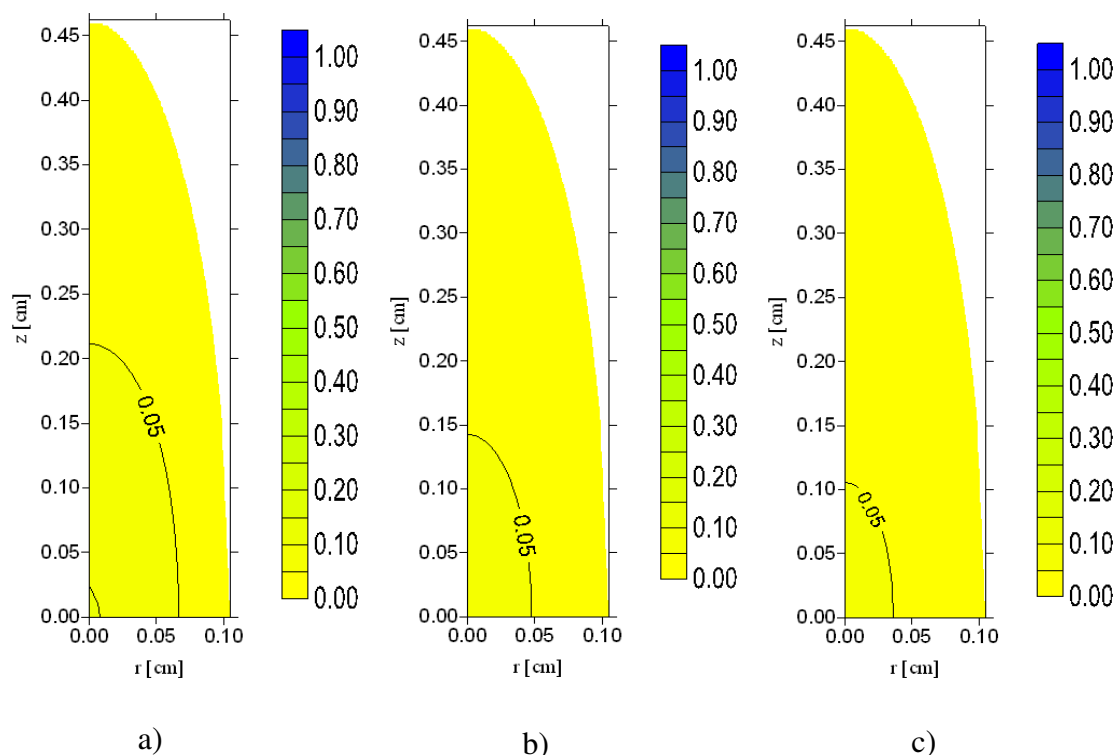
A Figura 4.100 apresenta a comparação entre a distribuição de umidade adimensional no interior do grão de arroz para a secagem contínua ( $T = 60^{\circ}\text{C}$ ) e para secagem intermitente, com uma pausa de 120 e 240 min após 15 min de secagem a  $60^{\circ}\text{C}$ , no tempo  $t = 465$  min de operação efetiva eliminando-se a têmpera (casos E8, E9 e E10). Neste instante, o teor de umidade médio adimensional simulado foi 0,057566; 0,038332 e 0,028316, respectivamente. Observa-se que o grão de arroz está mais seco para o experimento de secagem intermitente com uma pausa de 240 min. Ao final de 765 min de operação total, o teor de umidade reduziu de aproximadamente 36,3% (b.s.) para aproximadamente 4,7; 4,8 e 5,2% (b.s.), respectivamente, para os três experimentos. No entanto, na secagem intermitente o tempo de operação efetiva foi reduzido de 765 min para 645 e 525 min, respectivamente, para os casos com uma pausa de 120 e 240 min. A redução de tempo de operação efetiva foi de 15,68 e 31,37%, respectivamente.

Figura 4.100. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão do arroz em casca para secagem contínua ( $T = 60^{\circ}\text{C}$ ) e intermitente (uma pausa) com o mesmo tempo de operação efetiva  $t = 465$  min: (a) secagem contínua ( $t = 465$  min); (b) intermitente/ $\tau = 120$  min ( $t = 585$  min) e (c) intermitente/ $\tau = 240$  min ( $t = 705$  min) (casos E8, E9 e E10)



A Figura 4.101 apresenta a comparação entre a distribuição de umidade adimensional no interior do grão de arroz para a secagem contínua ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ ) e para secagem intermitente, com uma pausa de 120 e 180 min após 15 min de secagem a  $70^{\circ}\text{C}$ , no tempo  $t = 465$  min de operação efetiva eliminando-se a temperatura (casos E11, E12 e E13). Neste instante, o teor de umidade médio adimensional simulado foi 0,026579; 0,017759 e 0,015251, respectivamente. Observa-se que o grão de arroz está mais seco para o experimento de secagem intermitente com uma pausa de 180 min. Ao final de 675 min de operação total, o teor de umidade reduziu de aproximadamente 33% (b.s.) para aproximadamente 3,8; 4,0 e 4,2% (b.s.) para os três experimentos, respectivamente. No entanto, na secagem intermitente o tempo de operação efetiva foi reduzido de 675 min para 555 e 495 min, respectivamente, para os casos com uma pausa de 120 e 180 min. A redução de tempo de operação efetiva foi de 17,77 e 26,66% para uma pausa de 120 e 180 min, respectivamente.

Figura 4.101. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão do arroz em casca para secagem contínua ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ ) e intermitente (uma pausa) com o mesmo tempo de operação efetiva  $t = 465$  min: (a) secagem contínua ( $t = 465$  min); (b) intermitente/ $\tau = 120$  min ( $t = 585$  min) e (c) intermitente/ $\tau = 180$  min ( $t = 645$  min) (casos E11, E12 e E13)



### 4.3.2 Utilizando condição de contorno de terceira espécie

#### 4.3.2.1 Cinética de secagem incluindo o período de têmpera

A solução do Modelo II foi ajustada aos dados experimentais de secagem a  $40$  e  $70^{\circ}\text{C}$  para escolha apropriada da difusividade de massa efetiva ( $D$ ) e do coeficiente de transferência de massa convectivo ( $h_m$ ). Valores iniciais para  $D$  e  $h_m$  foram utilizados. De forma manual, fixando-se  $h_m$ , foi ajustado o valor de  $D$  e depois, fixando-se  $D$ , foi ajustado o valor de  $h_m$ . O processo continuou até que o erro quadrático ( $\chi^2$ ) fosse mínimo, aplicando-se um refinamento na segunda casa decimal. Na secagem intermitente, o valor da difusividade de massa efetiva foi ajustado em cada período de secagem, considerando-se o coeficiente de transferência de massa convectivo equivalente ao valor obtido a partir da secagem contínua na temperatura correspondente. Os resultados dos ajustes do Modelo II aos dados experimentais de secagem

de grãos de arroz em casca, nas temperaturas de 40 e 70°C, são apresentados nas Tabelas 4.13 e 4.14 juntamente com os indicadores estatísticos.

Observando as Tabelas 4.10, 4.11, 4.13 e 4.14 pode-se verificar que o modelo que considera condição de contorno de terceira espécie apresenta melhores indicadores estatísticos, sendo o qui-quadrado ( $\chi^2$ ) menor e o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) maior. Assim, o Modelo II descreve melhor o processo de secagem contínua e intermitente de grãos de arroz em casca. No entanto, vale salientar que o tempo computacional é significativamente menor para a simulação com o modelo que considera condição de contorno de equilíbrio (Modelo I).

Tabela 4.13. Parâmetros estatísticos obtidos com as simulações do conjunto de experimentos de secagem a 40°C (E1, E2, E3 e E4) usando o modelo de difusão com condição de contorno de terceira espécie.

	$D_1$ [cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	$D_2$ [cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	$D_3$ [cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	$h_m$ [cm s <sup>-1</sup> ]	$\chi^2 \times 10^2$	s	$r^2$
E1	9,42 x 10 <sup>-8</sup>	-	-	8,12 x 10 <sup>-6</sup>	1,5383	0,02012	0,996121
E2	1,95 x 10 <sup>-7</sup>	9,03 x 10 <sup>-8</sup>	-	8,12 x 10 <sup>-6</sup>	1,2712	0,01829	0,996293
E3	1,95 x 10 <sup>-7</sup>	9,85 x 10 <sup>-8</sup>	-	8,12 x 10 <sup>-6</sup>	1,6950	0,02140	0,995264
E4	1,95 x 10 <sup>-7</sup>	8,89 x 10 <sup>-8</sup>	9,96 x 10 <sup>-8</sup>	8,12 x 10 <sup>-6</sup>	1,55370	0,02022	0,995902

Tabela 4.14. Parâmetros estatísticos obtidos com as simulações do conjunto de experimentos de secagem a 70°C (E11, E12, E13) usando o modelo de difusão com condição de contorno de terceira espécie.

	$D_1$ [cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	$D_2$ [cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	$h_m$ [cm s <sup>-1</sup> ]	$\chi^2 \times 10^2$	s	$r^2$
E11	3,02 x 10 <sup>-7</sup>	-	2,46 x 10 <sup>-5</sup>	2,43220	0,030585	0,992018
E12	2,27 x 10 <sup>-7</sup>	2,91 x 10 <sup>-7</sup>	2,46 x 10 <sup>-5</sup>	1,82329	0,028229	0,994341
E13	2,39 x 10 <sup>-7</sup>	3,15 x 10 <sup>-7</sup>	2,46 x 10 <sup>-5</sup>	1,69770	0,028432	0,994338

A partir dos valores obtidos para difusividade de massa efetiva e coeficiente de transferência de massa convectivo, foi possível calcular o número de Biot para transferência de massa ( $Bi_m = h_m a / D$ ). Para secagem contínua a 40°C, o número de Biot foi 9,05 e para secagem contínua a 70°C, o número de Biot foi 8,55. Comparando com o valor do número de Biot obtido por Silva et al. (2010) que foi 22,25 para secagem de arroz em casca em camada fina a 60°C,

observa-se que os números de Biot para transferência de massa obtidos neste trabalho são relativamente baixos, o que confirma a existência de uma resistência ao fluxo de massa na superfície do grão. Uma explicação para este fato é que neste trabalho a velocidade do ar de secagem foi mais baixa, isto é, 0,04 e 0,07 m/s, para secagem a 40 e 70°C, respectivamente. No trabalho de Silva et al. (2010), a velocidade do ar de secagem considerada foi de 1,5 m/s.

Os valores do número de Biot para transferência de massa obtidos sugerem que a intermitência traria economia de energia e não aumentaria significativamente a taxa de secagem, o que está de acordo com os testes de simulação realizados para elipsoide com razão de aspecto  $b/a = 2,0$  (Figuras 4.38 a 4.42).

As cinéticas de secagem contínua e intermitente de grãos de arroz em casca para temperatura de 40°C, juntamente com os dados experimentais (E1, E2, E3 e E4), são mostradas na Figura 4.102. Comparando as Figuras 4.59a, 4.63 e 4.102 foi possível verificar o efeito da condição de contorno convectiva nos instantes iniciais de secagem, visto que o teor de umidade médio predito diminuiu mais lentamente e, portanto, o Modelo II se ajustou melhor aos dados experimentais.

Além dos indicadores estatísticos já definidos para análise do Modelo II, foi determinada a distribuição de erros (diferença entre o valor experimental e o predito). Na Figura 4.103 são apresentadas as distribuições de erros, em função dos valores preditos (ajustados), para os experimentos de secagem contínua e intermitente com uma pausa de 30 e 60 min e com duas pausas de 30 min (casos E1, E2, E3 e E4).

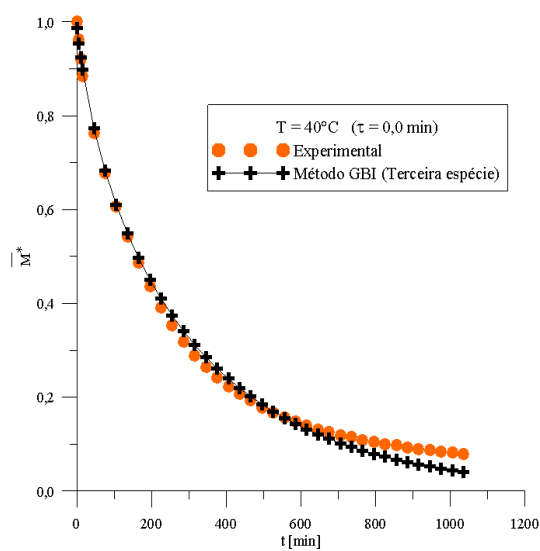
A Tabela 4.15 mostra o valor médio dos erros e a correlação entre os erros e o teor de umidade médio adimensional previsto. A comparação dos dois resultados (Modelos I e II) evidencia o quanto melhora os indicadores estatísticos quando se considera a condição de contorno de terceira espécie.

Para secagem contínua a 40°C, a distribuição de erros que variava de -0,02791 a 0,068216 (Figura 4.61a) com distribuição tendenciosa ( $r' = 0,727197$ ), é agora distribuída mais aleatoriamente ( $r' = -0,47574$ ), sendo menor a amplitude de erros, entre -0,02307 a 0,038141, e o erro médio diminuiu de 0,007434 para 0,004569.

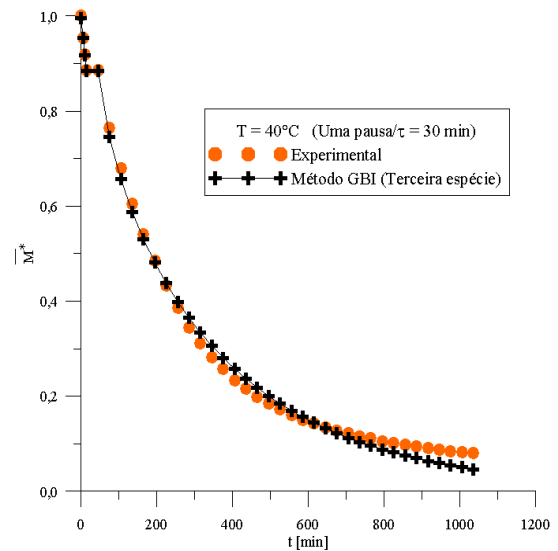
Para secagem intermitente com uma pausa de 30 min, a distribuição de erros foi mais aleatória visto que o coeficiente de correlação passou de  $r' = 0,333173$  para  $r' = -0,16935$ , e o erro máximo diminuiu de 0,059516 (Figura 4.68a) para 0,033264. No caso da secagem intermitente com uma pausa ( $\tau = 60$  min) e duas pausas ( $\tau = 30$  min) a distribuição de erros foi menos aleatória, já que o coeficiente de correlação foi maior (Tabela 4.15). No entanto, houve

redução do erro médio e o erro máximo diminuiu de 0,06062 (Figura 4.68b) e 0,04901 (Figura 4.68c) para 0,038163 e 0,038253, respectivamente.

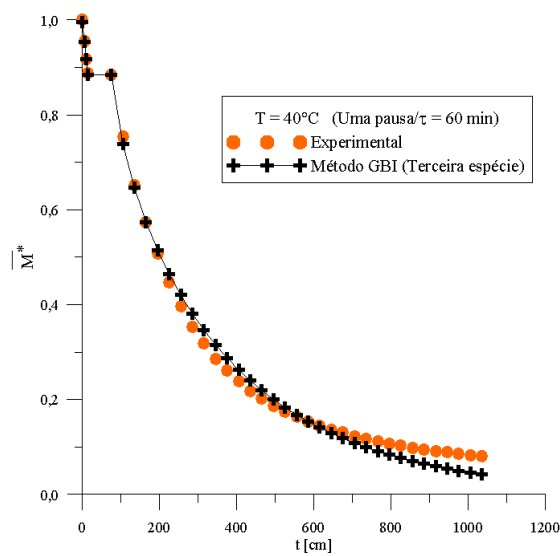
Figura 4.102. Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo II) e experimental durante a secagem de arroz em casca ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ) (casos E1, E2, E3 e E4): (a)  $\tau = 0,0$  min; (b) uma pausa/ $\tau = 30$  min; (c) uma pausa/ $\tau = 60$  min; (d) duas pausas/ $\tau = 30$  min e (e) superposição das quatro curvas eliminando o tempo de têmpera



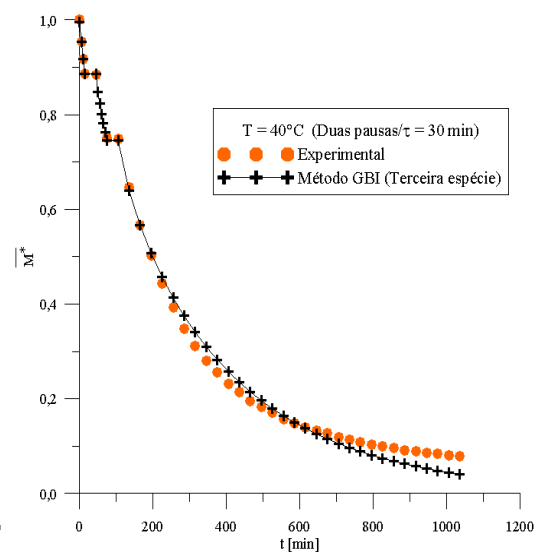
a)



b)



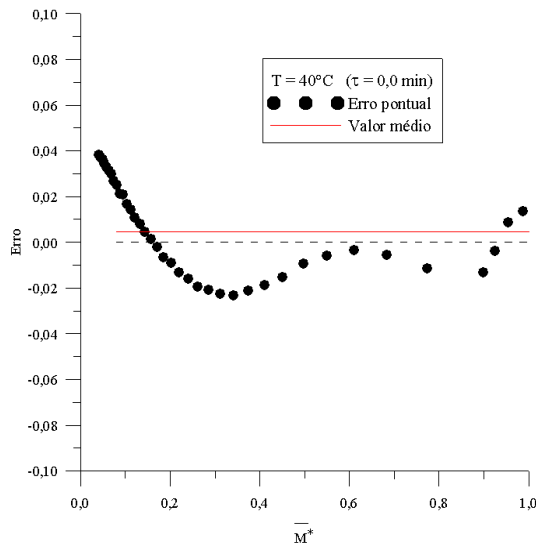
c)



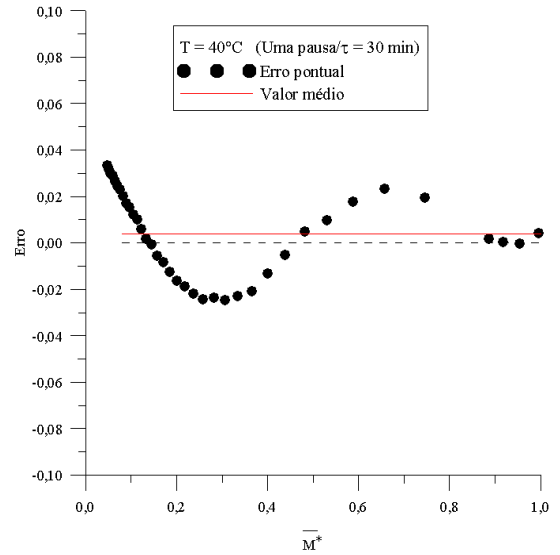
d)



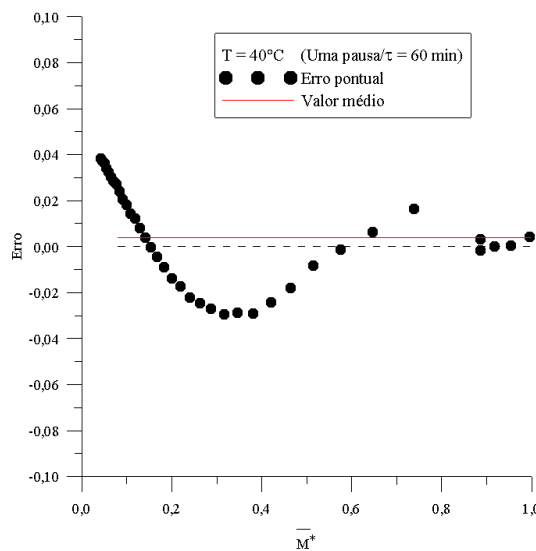
Figura 4.103. Distribuição de erros para o ajuste do Modelo II aos dados experimentais (E1, E2, E3 e E4) de secagem contínua e intermitente na temperatura de 40°C: (a) contínua ( $\tau = 0,0$  min); (b) intermitente (uma pausa/ $\tau = 30$  min); (c) intermitente (uma pausa/ $\tau = 60$  min) e (d) intermitente (duas pausas/ $\tau = 30$  min)



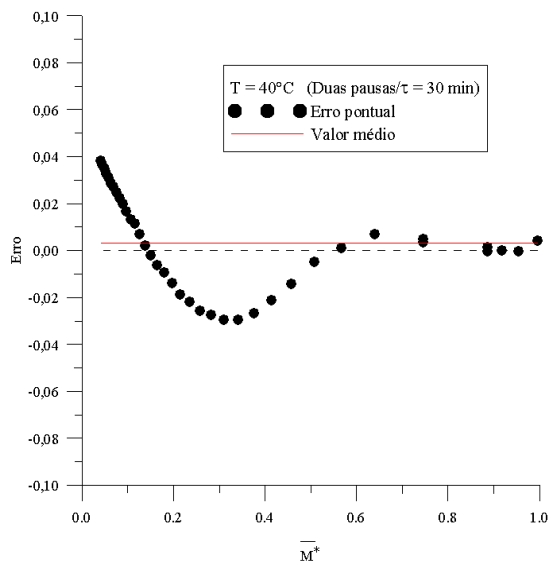
a)



b)



c)



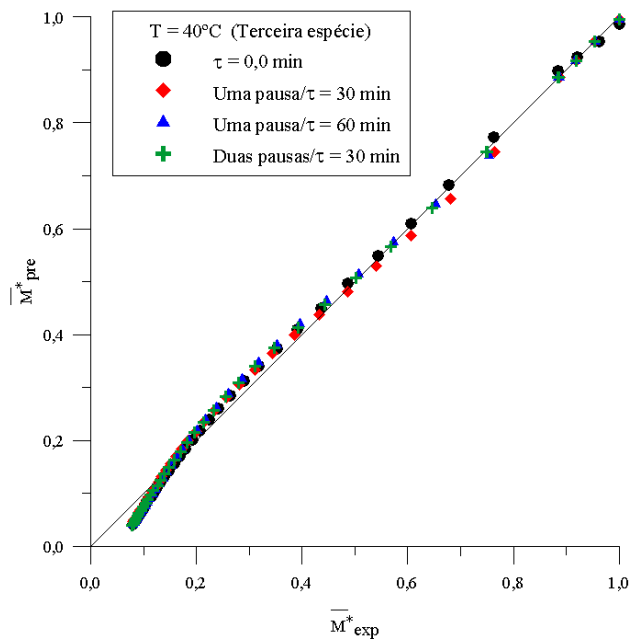
d)

Tabela 4.15. Erro médio e coeficiente de correlação entre os erros e os teores de umidade médio previstos usando o Modelo II, para os experimentos na temperatura 40°C.

	T [°C]	$\tau$ [min]	N° de pausas	Erro médio	$r^2$	Interpretação
E1	40	0,0	0	0,004569	-0,47574	Correlação moderada
E2	40	30	1	0,003853	-0,16935	Correlação bem fraca
E3	40	60	1	0,003746	-0,34425	Correlação fraca
E4	40	30	2	0,003103	-0,33183	Correlação fraca

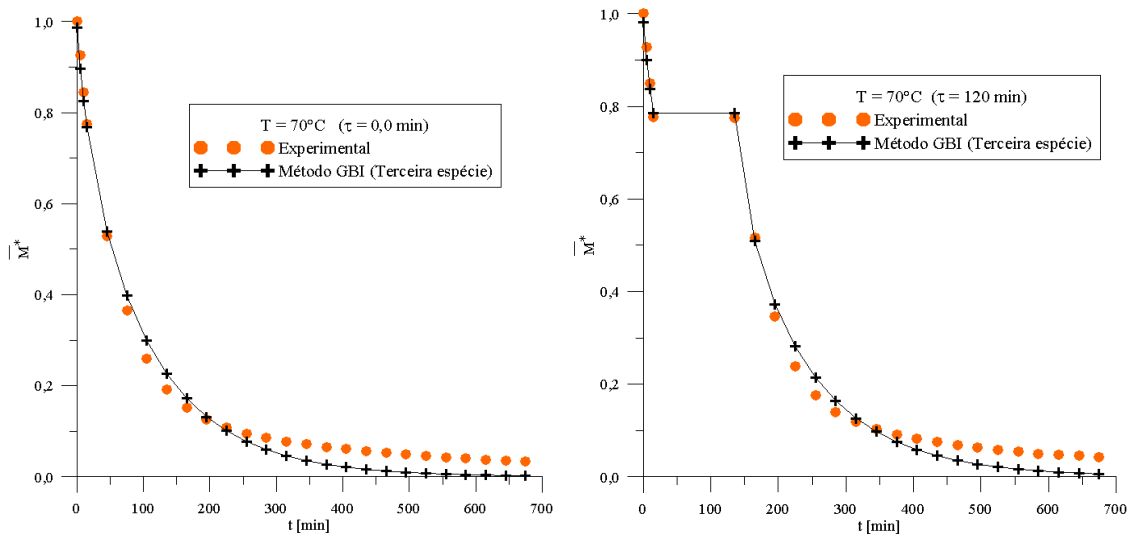
A Figura 4.104 mostra a comparação entre os teores de umidade experimental para secagem a 40°C (E1, E2, E3 e E4) e preditos utilizando-se o Modelo II, incluindo o período de têmpera na simulação. Os dados dos teores de umidade médio adimensional estão bem mais unidos ao longo da reta, quando comparado com as Figuras 4.62 e 4.69, o que comprova que o Modelo II é mais adequado para descrever o comportamento de secagem contínua e intermitente de arroz em casca na temperatura de 40°C.

Figura 4.104. Teores de umidade médio adimensional experimental (E1, E2, E3 e E4) e preditos usando o Modelo II, incluindo o período de têmpera (T = 40°C)



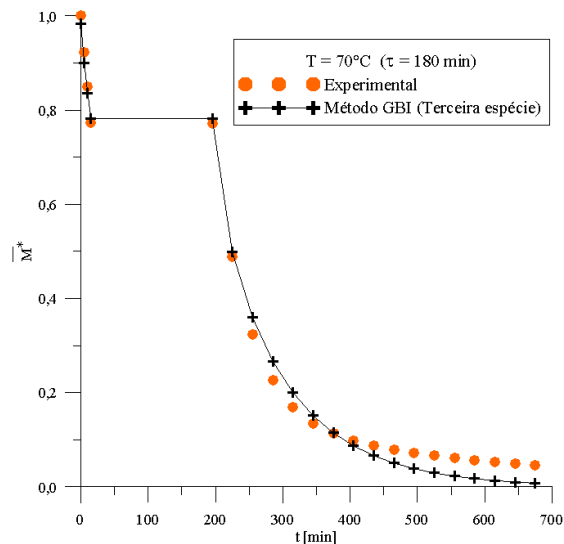
A partir dos valores obtidos para difusividade de massa efetiva e coeficiente de transferência de massa convectivo dados na Tabela 4.14, as cinéticas de secagem contínua e intermitente (uma pausa) de grãos de arroz em casca para temperatura de 70°C, juntamente com os dados experimentais (E11, E12 e E13), são mostradas na Figura 4.105.

Figura 4.105. Comparação entre os teores de umidade médio adimensional teórico (método GBI, Modelo II) e experimental durante a secagem de arroz em casca ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ ): (a)  $\tau = 0,0$  min; (b) uma pausa/ $\tau = 120$  min e (c) uma pausa/ $\tau = 180$  min (casos E11, E12 e E13)



a)

b)



c)

Na Figura 4.106 são apresentadas as distribuições de erros (diferença entre o valor experimental e o predito), em função dos valores preditos, para o ajuste do Modelo II aos dados experimentais de secagem contínua e intermitente na temperatura de 70°C. Para uma melhor análise da distribuição de erros, a Tabela 4.16 mostra o valor médio dos erros e o coeficiente de correlação ( $r'$ ) entre os erros e o teor de umidade médio adimensional previsto.

Tabela 4.16: Erro médio e coeficiente de correlação entre os erros e os teores de umidade médio previstos usando o Modelo II, para os experimentos na temperatura 70°C.

	T [°C]	$\tau$ [min]	N° de pausas	Erro médio	$r'$	Interpretação
E11	70	0,0	0	0,017229	-0,34810	Correlação fraca
E12	70	120	1	0,011764	-0,30230	Correlação fraca
E13	70	180	1	0,010748	-0,32575	Correlação fraca

A comparação do Modelo I com o Modelo II evidencia redução do erro máximo nos três ajustes analisados. Para secagem contínua a 70°C, o erro que variava de -0,05703 a 0,108606 (Figura 4.71a) com correlação moderada ( $r' = 0,45215$ ), é agora distribuído mais aleatoriamente ( $r' = -0,34810$ ), com menor amplitude, entre -0,03935 e 0,040223, sendo que o erro médio aumentou de 0,015513 (Tabela 4.12) para 0,017229 (Tabela 4.16). O aumento do erro médio decorre da redução de pontos onde o teor de umidade predito é maior do que o experimental.

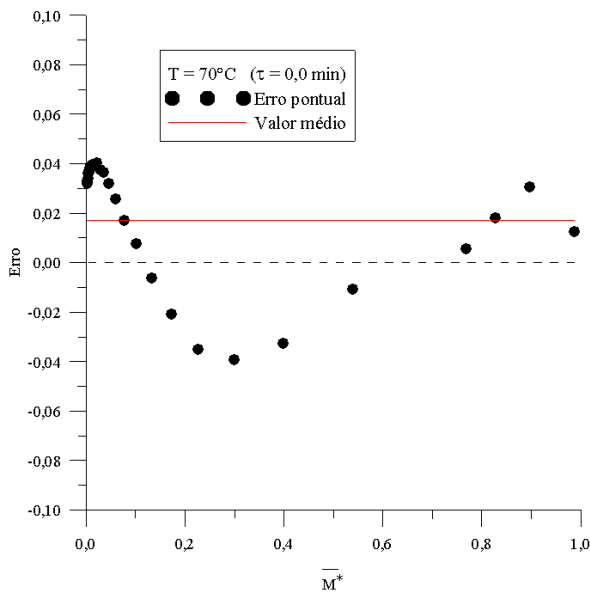
Para secagem intermitente com uma pausa de 120 e 180 min, após 15 min de secagem a 70°C, a distribuição de erros foi menos aleatória tendo em vista que os valores dos coeficientes de correlação dados na Tabela 4.16 são maiores (em valor absoluto) do que os obtidos com o Modelo I (Tabela 4.12). Embora o erro médio tenha aumentado, o erro máximo diminuiu de aproximadamente 0,04901 (Figura 4.72 b-c) para 0,037633 e 0,039297, respectivamente.

A Figura 4.107 mostra a comparação entre os teores de umidade experimental para secagem a 70°C (E11, E12 e E13) e preditos utilizando-se o Modelo II, incluindo o período de têmpera. Comparando com a Figura 4.76 percebe-se claramente o efeito da condição de contorno de terceira espécie nos instantes iniciais do processo, visto que os dados dos teores de umidade médio adimensional estão bem mais unidos ao longo da reta, o que comprova que o Modelo II é mais adequado para descrever a secagem de arroz em casca na temperatura de 70°C.

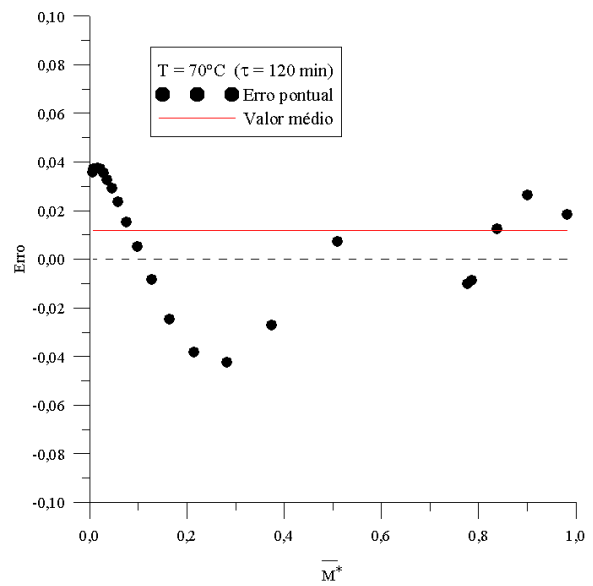
Mesmo o Modelo I sendo bem aceito para descrever secagem de arroz em casca, a utilização da condição de contorno de primeira espécie pode diminuir a precisão dos resultados

(SILVA et al., 2010). O Modelo II, que considera condição de contorno de terceira espécie, descreve o fenômeno físico de forma mais real.

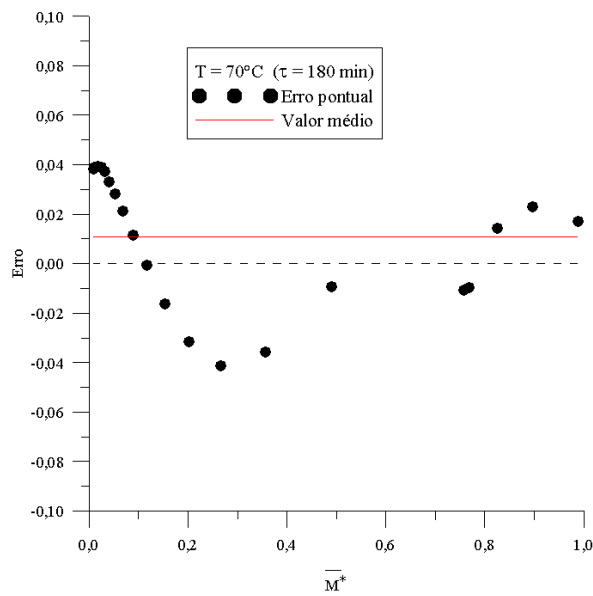
Figura 4.106. Distribuição de erros para o ajuste do Modelo II aos dados experimentais (E11, E12 e E13) de secagem contínua e intermitente na temperatura de 70°C, incluindo o período de têmpera: (a) contínua ( $\tau = 0,0$  min); (b) intermitente (uma pausa/ $\tau = 120$  min); e (c) intermitente (uma pausa/ $\tau = 180$  min)



a)

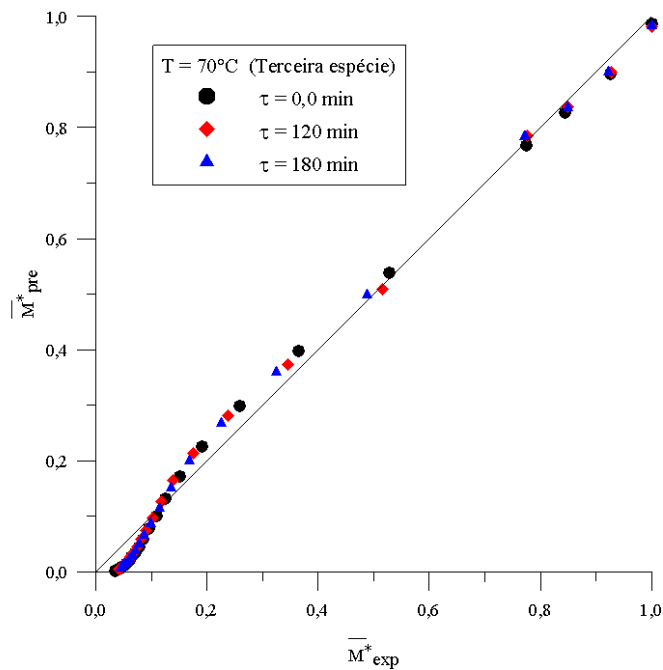


b)



c)

Figura 4.107. Teores de umidade médio adimensional experimental (E11, E12 e E13) e preditos usando o Modelo II, incluindo o período de têmpera ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ )



#### 4.3.2.2 Simulação da distribuição de umidade no interior do grão de arroz

Para simular a distribuição de umidade no interior do grão, durante o período de têmpera, considerou-se a condição de contorno de segunda espécie (fluxo nulo na superfície) com a distribuição de umidade inicial obtida no final do período de secagem contínua, antes da têmpera, usando condição de contorno de terceira espécie (Modelo II).

A Figura 4.108 ilustra o comportamento do teor de umidade adimensional como função da coordenada radial durante o período de têmpera para o experimento de secagem intermitente com uma pausa de 60 min, após 15 min de secagem contínua a  $40^{\circ}\text{C}$  (caso E3). O teor de umidade médio adimensional simulado, durante o período de têmpera, foi de 0,88516. Comparando com a Figura 4.78, observa-se uma redução maior do teor de umidade na parte mais interna do grão, ao final da têmpera de 60 min.

A Figura 4.109 ilustra o comportamento do teor de umidade adimensional como função da coordenada radial durante o período de têmpera para o experimento de secagem intermitente com uma pausa de 180 min, após 15 min de secagem contínua a  $70^{\circ}\text{C}$  (caso E13). Neste período, o teor de umidade médio adimensional previsto foi de 0,782639. Observa-se que, ao final da têmpera de 180 min, os teores de umidade no centro e na superfície do grão de arroz são

praticamente iguais. Comparando com a Figura 4.81(b), o Modelo II mostra uma uniformização maior no interior do grão para as mesmas condições de secagem.

Figura 4.108. Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante a têmpera de 60 min ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ /caso E3)

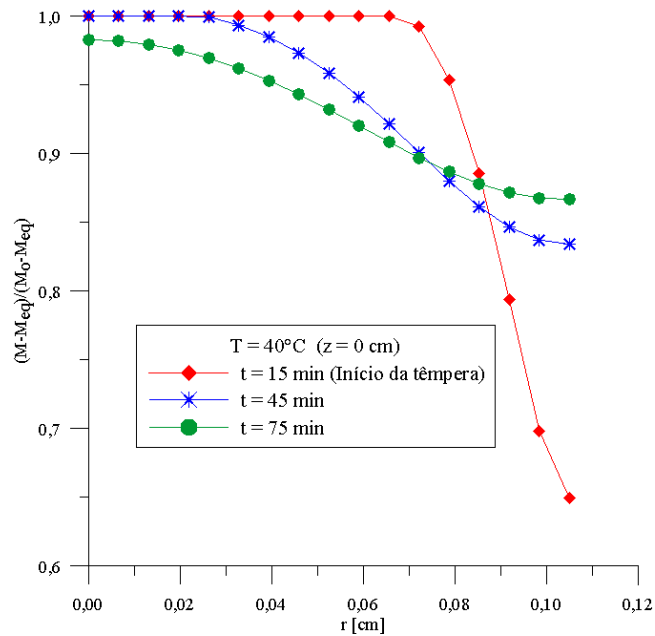
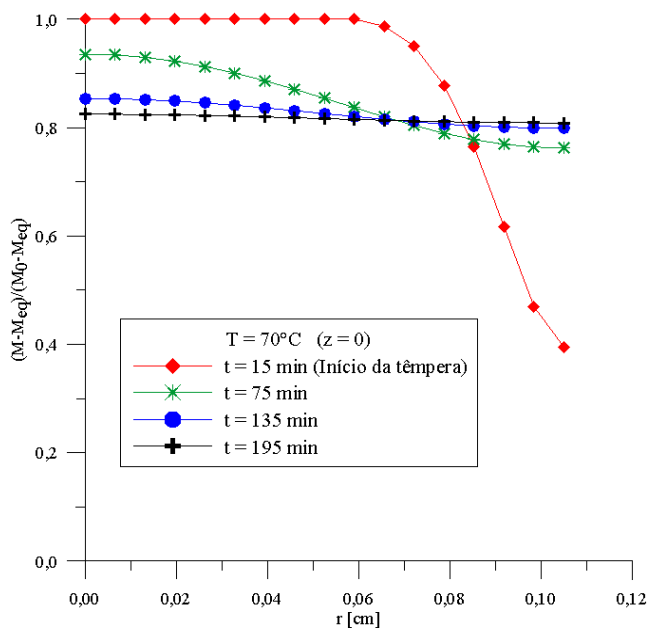


Figura 4.109. Distribuição radial do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca durante a têmpera de 180 min ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ /caso E13)



Observando as Figuras 4.108 e 4.109 é possível verificar que o teor de umidade adimensional diminuiu na parte mais interna do grão e aumentou próximo a superfície, com o aumento do tempo de têmpera. Isto é, a diferença entre o teor de umidade no centro e na superfície do grão diminuiu com o aumento do tempo de têmpera. Assim, os gradientes de umidade no interior do grão de arroz diminuíram consideravelmente durante a têmpera.

Tem sido amplamente reconhecido que os gradientes de umidade desempenham um papel importante no surgimento de fissuras nos grãos de arroz durante a secagem (CNOSSEN e SIEBENMORGEN, 2000; AQUERRETA et al., 2007; DONG et al., 2010; LIMA et al., 2015). A redistribuição de umidade, além de facilitar a secagem quando a aplicação de calor é reiniciada, reduz os gradientes hídricos e térmicos e, conseqüentemente, reduz tensões térmicas e hídricas e danos físicos (fissuras) ao produto, não violando a estrutura do material (NISHIYAMA et al., 2006; KOWALSKI e PAWLOSKI, 2010).

Quando a diferença entre o teor de umidade no centro e na superfície atinge o seu valor máximo, o gradiente de umidade na vizinhança da superfície do grão é maior (DONG et al., 2010). Assim, conhecer a diferença entre o teor de umidade no centro e na superfície do grão ajuda a estabelecer procedimentos de secagem para evitar altos gradientes de umidade e, conseqüentemente, melhorar a qualidade do produto.

O gradiente do teor de umidade adimensional no interior do grão, na direção radial, é definido como  $\frac{\partial M^*}{\partial r} \cong \frac{\Delta M^*}{\Delta r}$ , onde  $M^*$  é o teor de umidade em qualquer parte da linha de simetria ( $z = 0$ ) e  $r$  é a coordenada radial. Considerando o teor de umidade no centro e na superfície do grão ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$  cm), na Figura 4.110 são apresentados os gradientes do teor de umidade no interior do grão de arroz durante a secagem contínua nas temperaturas de 40 e 70°C (casos E1 e E11). Observa-se que os maiores gradientes de umidade (aproximadamente 8,0  $\text{cm}^{-1}$ ) ocorreram 135 e 45 min após o início do processo de secagem, respectivamente, para as temperaturas de 40 e 70°C.

A Figura 4.111 ilustra os gradientes do teor de umidade no interior do grão de arroz durante os 15 min iniciais de secagem a 40 e 70°C, seguido de uma têmpera de 60 e 180 min, respectivamente (casos E3 e E13). Comparando com a Figura 4.110, foi possível evitar o gradiente do teor de umidade máximo, visto que, após 15 min de secagem contínua, as amostras foram colocadas em repouso. Nos instantes iniciais, os gradientes do teor de umidade cresceram rapidamente com o aumento da temperatura do ar de secagem. Durante o período de têmpera, os gradientes do teor de umidade diminuíram rapidamente nos instantes iniciais e, em seguida, reduziram gradativamente em direção a zero.



Figura 4.110. Gradiente do teor de umidade na direção radial gerado durante a secagem contínua nas temperaturas de 40 e 70°C (casos E1 e E11)

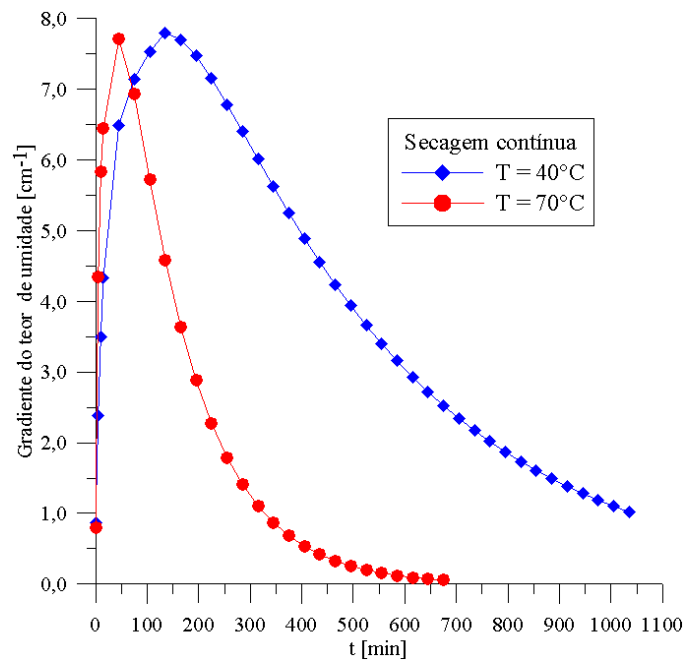
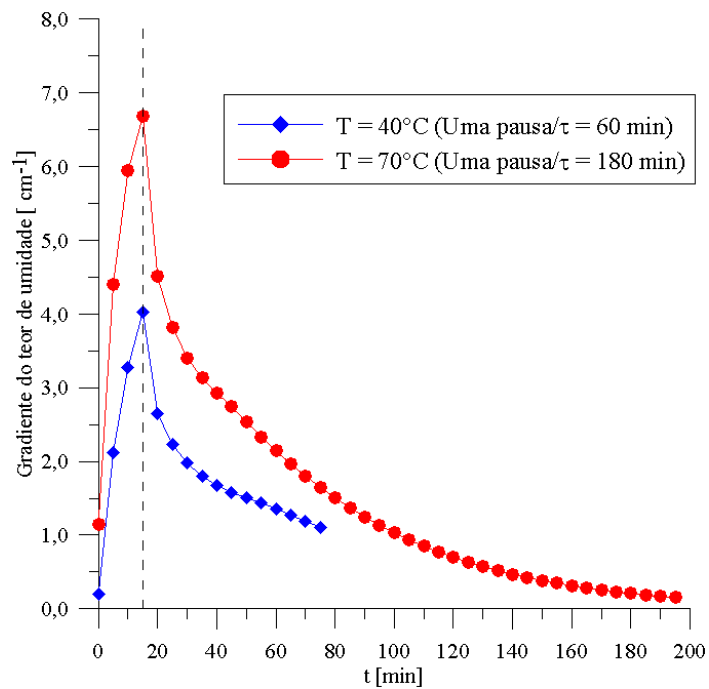


Figura 4.111. Gradiente do teor de umidade na direção radial gerado durante o primeiro período de secagem a 40°C (têmpera de 60 min) e 70°C (têmpera de 180 min) (casos E3 e E13)



Com 60 min de têmpera, foi possível eliminar cerca de 72 e 68% dos gradientes do teor de umidade no interior do grão, quando submetido a 15 min de secagem inicial, nas temperaturas de 40 e 70 C, respectivamente. Com 180 min de têmpera, foi possível eliminar praticamente todos os gradientes do teor de umidade no interior do grão submetido a 15 min de secagem inicial na temperatura de 70 C. Em compara o com o trabalho de Dong et al. (2009), o percentual de redu o dos gradientes do teor de umidade obtido neste trabalho foi maior para um mesmo tempo de têmpera. Uma explica o para este fato é que o período inicial de secagem foi de 15 min neste trabalho e no trabalho de Dong et al. (2009) esse tempo foi de 60 min na temperatura de 50 C, gerando gradientes do teor de umidade bem maiores. Além disso, a têmpera foi realizada em temperaturas variadas, diferentemente deste trabalho que considerou temperatura ambiente.

Na Figura 4.112 é apresentada uma compara o entre a distribui o do teor de umidade radial no interior do grão de arroz, após um tempo arbitrário de opera o efetiva  $t = 195$  min, para secagem contínua e intermitente nas temperaturas 40 e 70 C (casos E1, E2, E3, E11, E12 e E13). Em todos os casos, a têmpera teve início em  $t = 15$  min. Observa-se que, na secagem intermitente, os teores de umidade nas camadas mais internas do grão diminuíram grandemente com o aumento do tempo de têmpera, enquanto que na superfície não teve redu o significativas em rela o à secagem sem têmpera. Assim, as diferenças entre os teores de umidade no centro e na superfície do grão são menores em compara o com a secagem sem têmpera e, conseqentemente, os teores de umidade ao longo de  $r$  diminuíram mais uniformemente com o tempo.

Na Figura 4.113 é ilustrada a evolu o do teor de umidade adimensional no centro ( $r = 0$  cm,  $z = 0$  cm) e na superfície ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$  cm) do grão de arroz, para secagem contínua nas temperaturas 40 e 70 C (casos E1 e E11). Observa-se que o teor de umidade nas camadas internas e externas do grão diminuiram durante todo o processo de secagem contínua. Percebe-se também que o teor de umidade na superfície do grão não assume instantaneamente o seu valor de equilíbrio.

O aumento, não realista, do teor de umidade no centro nos instantes iniciais do processo na Figura 4.113 são inconvenientes da simula o numérica devido ao número de fun o de base considerado para reduzir o tempo de processamento computacional. No entanto, estas falhas não prejudicam a análise do processo, visto que a soluço converge rapidamente para instantes de tempo maiores. Neste trabalho, 16 fun o de base foram consideradas o que gera matrizes de ordem  $16 \times 16$ .

Figura 4.112. Distribuição radial do teor de umidade no interior do grão de arroz durante a secagem contínua e intermitente em  $t = 195$  min: (a)  $T = 40^\circ\text{C}$  (casos E1, E2 e E3) e (b)  $T = 70^\circ\text{C}$  (casos E11, E12 e E13)

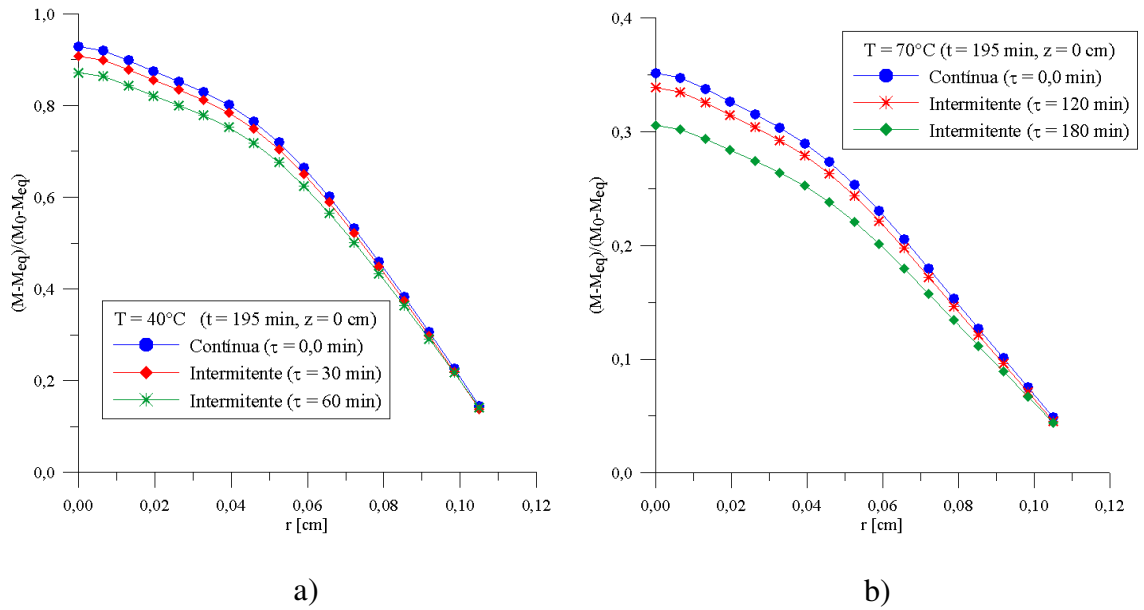
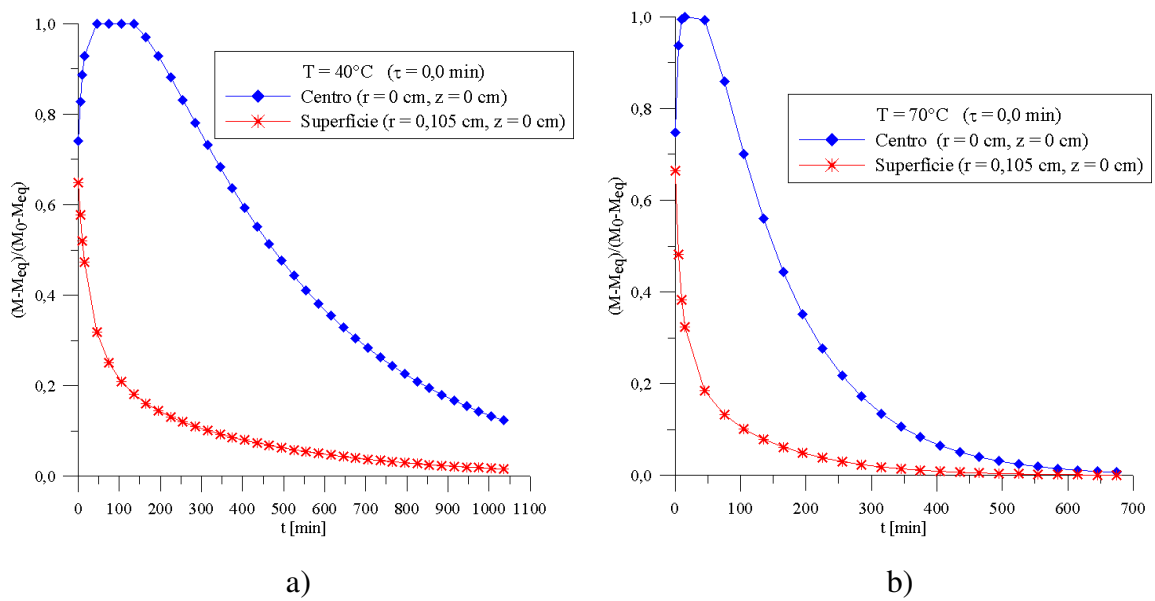
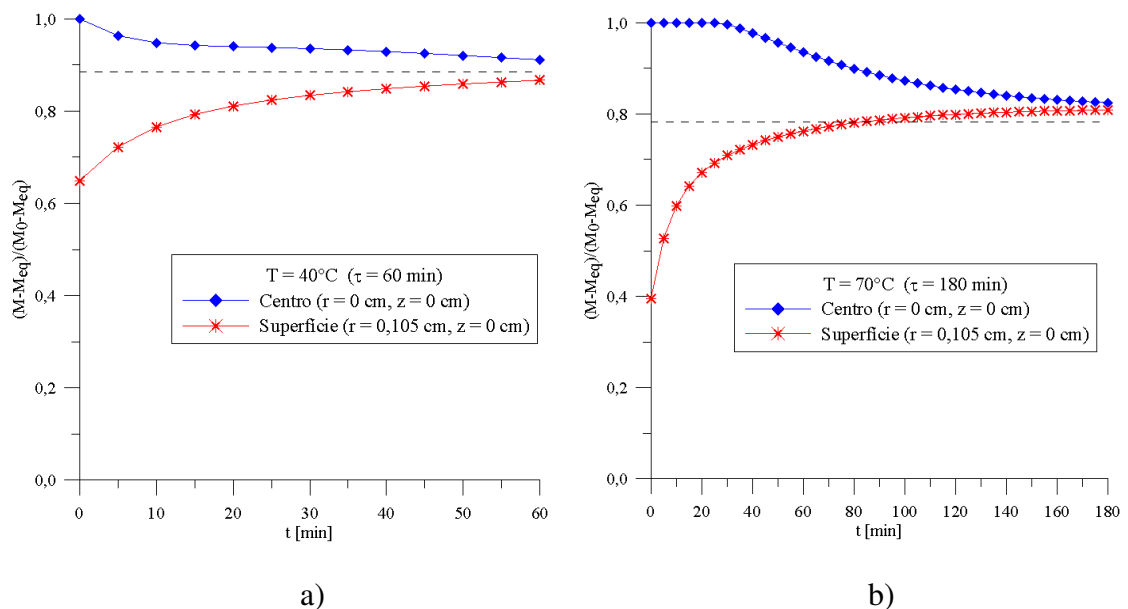


Figura 4.113. Evolução do teor de umidade no centro e na superfície do grão de arroz durante a secagem contínua: (a)  $T = 40^\circ\text{C}$  (caso E1) e (b)  $T = 70^\circ\text{C}$  (caso E11)



A Figura 4.114 mostra a evolução do teor de umidade adimensional no centro ( $r = 0$  cm,  $z = 0$  cm) e na superfície ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$  cm) do grão de arroz, durante o período de têmpera de 60 e 180 min, após 15 min de secagem a 40 e 70°C, respectivamente (casos E3 e E13). O teor de umidade médio adimensional simulado durante o período de têmpera foi 0,88516 e 0,782639, respectivamente, e corresponde a linha tracejada na figura. Observa-se que o teor de umidade nas camadas internas do grão diminuiu, enquanto que nas camadas externas aumentou durante o período de têmpera (NISHIYAMA et al., 2006; DONG et al., 2009). Assim, as camadas mais internas do grão sempre secaram durante todo o processo de de secagem intermitente.

Figura 4.114. Evolução do teor de umidade no centro e na superfície do grão de arroz durante o período de têmpera: (a) após secagem a 40°C ( $\tau = 60$  min/caso E3) e (b) após secagem a 70°C ( $\tau = 180$  min/caso E13)



A Figura 4.115 apresenta a distribuição do teor de umidade adimensional em função das coordenadas cilíndricas ( $r, z$ ) no interior do grão de arroz, durante o período de têmpera de 60 min, após 15 min de secagem a 40°C (caso E3). Os instantes de tempo considerados são: (a)  $t = 15$  min (início), (b)  $t = 45$  min e (c)  $t = 75$  min (fim). O teor de umidade adimensional na superfície do grão ( $r = 0$  cm,  $z = 0,462$  cm) aumentou de 0,64, no início da têmpera, para 0,84 ao final de 30 min de têmpera e, para 0,86 ao final de 60 min de têmpera. Já em ( $r = 0,105$  cm e  $z = 0$  cm), o teor de umidade adimensional aumentou de 0,59 para 0,67 ao final de 30 min de têmpera e, para 0,71 ao final de 60 min de têmpera. Portanto, aumentando o tempo de têmpera,

a concentração de umidade na superfície do grão foi maior. Quando comparado com os resultados obtidos com o Modelo I (Figura 4.89), percebe-se uma maior uniformização do teor de umidade no interior do grão.

As Figuras 4.116 e 4.117 mostram a distribuição do teor de umidade adimensional em função das coordenadas cilíndricas ( $r, z$ ) no interior do grão de arroz no início e no fim das tâmpers de 120 e 180 min, após 15 min de secagem a  $70^{\circ}\text{C}$  (casos E12 e E13). Nos dois casos, o teor de umidade médio adimensional simulado durante a tâmpers foi aproximadamente 0,79.

Observando as Figuras 4.116 e 4.117, tem-se que o teor de umidade adimensional na superfície do grão ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$  cm) aumentou de 0,39, no início da tâmpers, para 0,80 ao final de 120 min de tâmpers, e permaneceu o mesmo valor quando o tempo de tâmpers aumentou para 180 min. No entanto, observa-se que a uniformização continuou na direção do eixo  $z$ , onde o teor de umidade aumentou de 0,59 para 0,63 em ( $r = 0$  cm,  $z = 0,462$  cm) quando o tempo de tâmpers aumentou de 120 para 180 min. Aqui, destaca-se a importância da geometria utilizada neste trabalho, visto que estes resultados não poderiam ser visualizados com a geometria esférica comumente aplicada para grãos de arroz.

Figura 4.115. Distribuições do teor de umidade no interior do grão de arroz em casca no início e no fim do período de tâmpers de 60 min, após 15 min de secagem a  $40^{\circ}\text{C}$  (caso E3): (a)  $t = 15$  min (início); (b)  $t = 45$  min; e (c)  $t = 75$  min (fim)

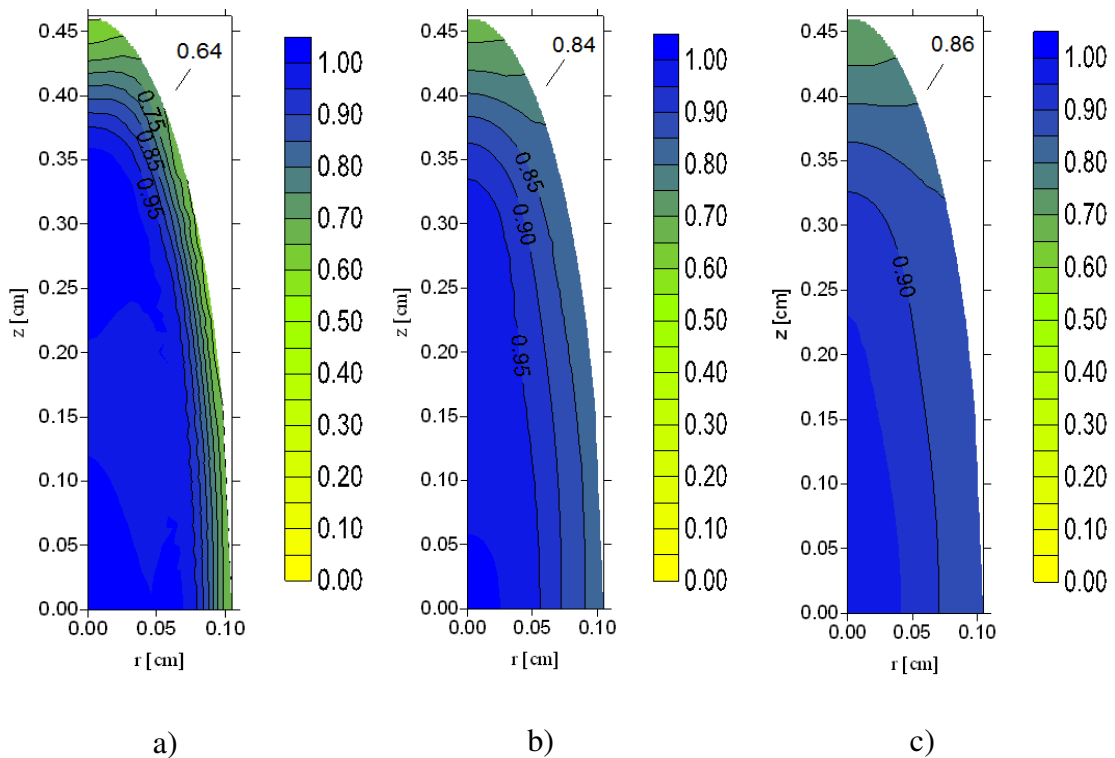


Figura 4.116. Distribuições do teor de umidade no interior do grão de arroz em casca no início e no fim da têmpera de 120 min, após 15 min de secagem a 70°C (caso E12): (a) início (t = 15 min) e (b) fim (t = 135 min)

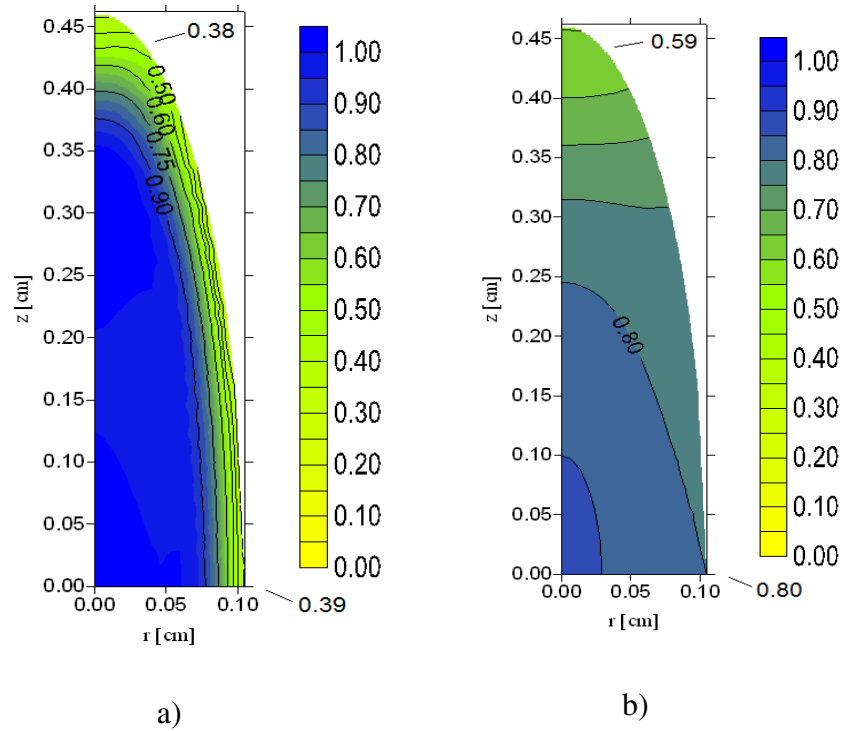
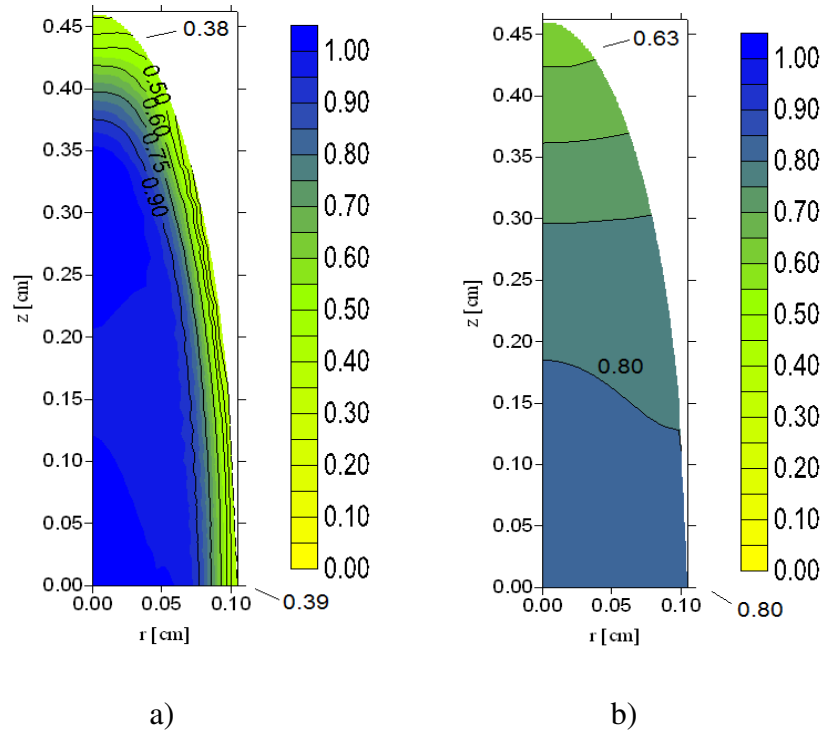
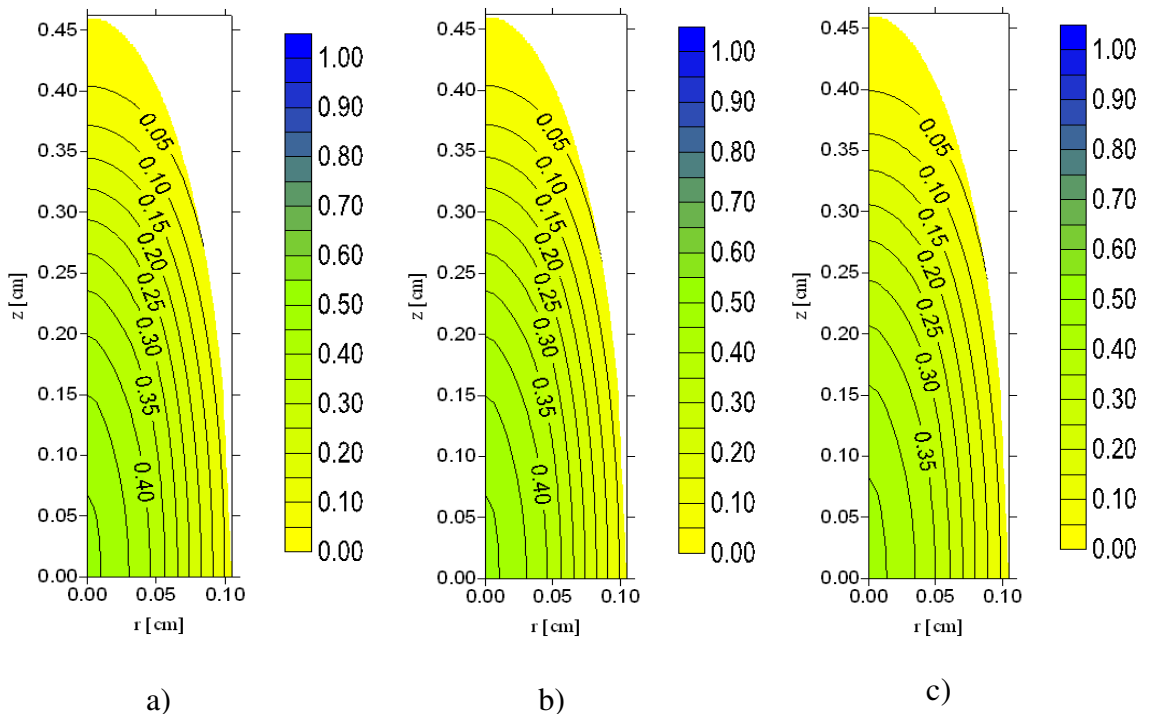


Figura 4.117. Distribuições do teor de umidade no interior do grão de arroz em casca no início e no fim da têmpera de 180 min, após 15 min de secagem a 70 °C (caso E13): (a) início (t = 15 min) e (b) fim (t = 195 min)



A Figura 4.118 ilustra a distribuição do teor de umidade adimensional em função das coordenadas cilíndricas ( $r,z$ ) no interior do grão de arroz para a secagem contínua ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ) e para secagem intermitente, com uma pausa de 30 e 60 min após 15 min de secagem a  $40^{\circ}\text{C}$ , no tempo  $t = 465$  min de operação efetiva, eliminando-se a têmpera (casos E1, E2 e E3). Neste instante, o teor de umidade médio adimensional simulado foi 0,201426; 0,200393 e 0,183281, respectivamente, para secagem contínua e intermitente com pausa de 30 e 60 min. Observa-se que o gr o de arroz está mais seco com a intermitência de 60 min, o que está de acordo com a cinética de secagem (Figura 4.101e). Com 1035 min de opera o total foi possível reduzir o teor de umidade de 23% (b.s) para aproximadamente 6,8% (b.s), sendo que na secagem intermitente o tempo de opera o efetiva foi menor devido ao período de repouso.

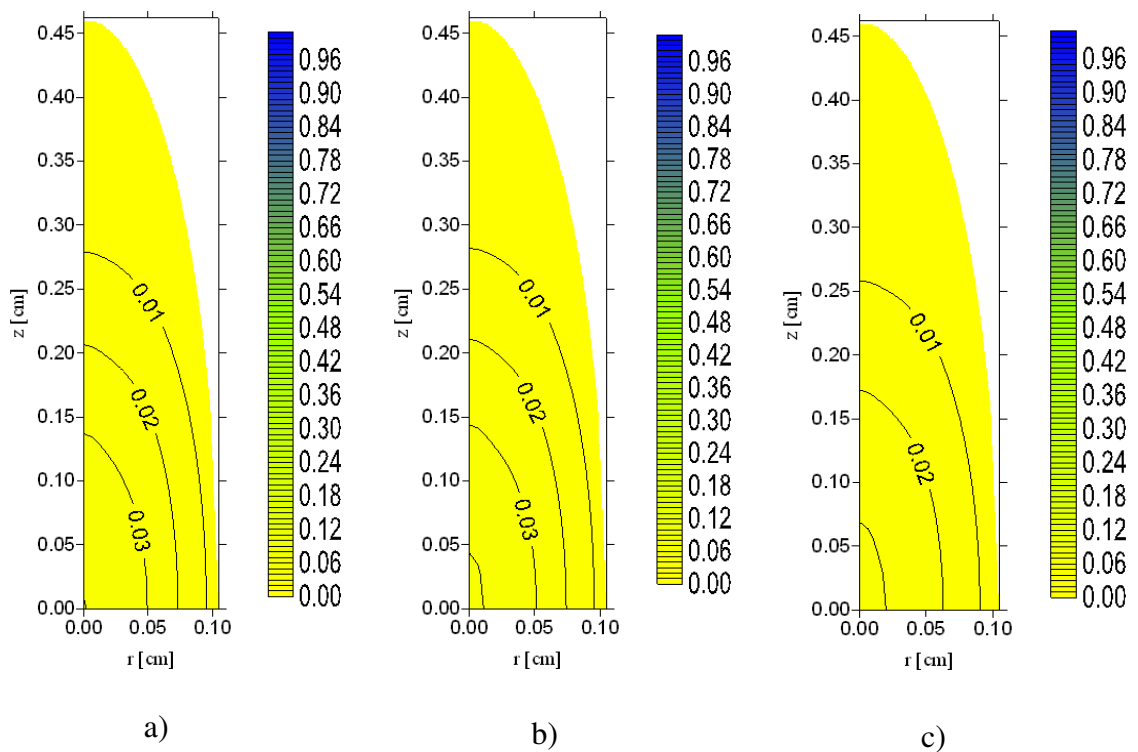
Figura 4.118. Distribui o do teor de umidade adimensional no interior do grão de arroz em casca para secagem contínua ( $T = 40^{\circ}\text{C}$ ) e intermitente (uma pausa) com o mesmo tempo de opera o efetiva  $t = 465$  min (casos E1, E2 e E3): (a) secagem contínua ( $t = 465$  min); (b) intermitência de 30 min ( $t = 495$  min); e (c) intermitência de 60 min ( $t = 525$  min)



Na Figura 4.119 é apresentada a distribui o do teor de umidade adimensional em fun o das coordenadas cilíndricas ( $r,z$ ) no interior do grão de arroz para a secagem contínua ( $T = 70^{\circ}\text{C}$ ) e para secagem intermitente, com uma pausa de 120 e 180 min após 15 min de secagem

a 70°C, no tempo  $t = 465$  min de operação efetiva eliminando-se a têmpera (casos E11, E12 e E13). Neste instante, o teor de umidade médio adimensional simulado foi 0,012602; 0,012907 e 0,010177, respectivamente, para secagem contínua e intermitente com pausa de 120 e 180 min. Observa-se que o grão de arroz está mais seco com a têmpera de 180 min. Com 675 min de operação total foi possível reduzir o teor de umidade de 33% (b.s.), respectivamente, para aproximadamente 3,8; 4,0 e 4,2% (b.s.), sendo que na secagem intermitente, o tempo de operação efetiva foi menor devido ao período de têmpera.

Figura 4.119. Distribuição do teor de umidade adimensional no interior do grão do arroz em casca para secagem contínua ( $T = 70^\circ\text{C}$ ) e intermitente (uma pausa) com o mesmo tempo de operação efetiva  $t = 465$  min (casos E11, E12 e E13): (a) secagem contínua ( $t = 465$  min); (b) intermitência de 120 min ( $t = 585$  min); e (c) intermitência de 180 min ( $t = 645$  min)



Pode-se verificar que, com uma pausa, foi possível acelerar o processo de remoção de água e reduzir o consumo de energia (KOWALSKI e PAWŁOWSKI, 2011a; HOLOWATY et al., 2012).

O modelo que considera condição de contorno de terceira espécie descreve de forma mais real a distribuição de umidade no interior do grão durante o processo de secagem. A utilização da condição de contorno do primeiro tipo para a descrição da cinética de secagem de arroz em



casca em camada fina é uma aceitável aproximação e produz bons resultados. Mas, como exposto na Figura 4.113, não há equilíbrio instantâneo entre a superfície exterior e o ar de secagem. Assim, uma condição de contorno convectiva é mais adequada para descrição rigorosa da secagem de arroz em casca visto que o efeito de resistência ao fluxo de massa na superfície externa é levado em conta. Os indicadores estatísticos do ajuste para condição de contorno convectiva são melhores do que aqueles para a condição de contorno de equilíbrio, o que corrobora a explicação física acima.

#### 4.3.2.3 Cinética de aquecimento e distribuição de temperatura

A distribuição de temperatura dos grãos de arroz durante a secagem foi descrita pela equação diferencial parcial (3.82). As propriedades do grão de arroz em casca, que são condutividade térmica ( $k$ ) e calor específico ( $c_p$ ) foram obtidas a partir do teor de umidade inicial utilizando-se as seguintes equações (BROOKER et al., 1992):

$$k = A + BM_0 \quad (4.1)$$

onde  $A = 0,0863$ ;  $B = 0,00134$  e  $M_0$  (%) é o teor de umidade inicial em base úmida. E

$$c_p = A + BM_0 \quad (4.2)$$

onde  $A = 1110$ ;  $B = 44,8$  e  $M_0$  (%) é o teor de umidade inicial em base úmida. As propriedades do grão de arroz para transferência de calor utilizadas na simulação são dadas na Tabela 4.17, para os dados experimentais de secagem nas temperaturas 40 e 70°C.

Na superfície dos grãos de arroz ocorre tanto o transporte de calor por convecção como a transferência de calor associado com a evaporação da umidade. Levando-se em conta apenas o transporte de calor por convecção na superfície do grão de arroz, considerou-se a condição de contorno de terceira espécie (Equação 3.100), na qual o fluxo de calor na superfície do grão é proporcional à diferença entre a temperatura na superfície do grão e a temperatura do ar de secagem (temperatura de equilíbrio). A constante de proporcionalidade  $h_c$  (coeficiente de transferência de calor convectivo) foi obtida por otimização manual a partir do ajuste da solução analítica do Modelo II (transferência de calor) aos dados experimentais da temperatura dos grãos durante a secagem contínua a 40 e 70°C. O melhor valor de  $h_c$  corresponde ao menor valor de  $\chi^2$  obtido com o refinamento na segunda casa decimal. Na secagem intermitente foi considerado o mesmo valor de  $h_c$  obtido para secagem contínua na temperatura equivalente.

Tabela 4.17. Propriedades termofísicas do grão de arroz em casca nas temperaturas 40 e 70°C

T [°C]	$\tau$ [min]	k [W/m K]	$c_p$ [J/kg K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\alpha$ [m <sup>2</sup> /s ]
40	0,0	0,1108756	1931,632	1172,38792	8,0666 x 10 <sup>-8</sup>
40	30	0,1114250	1950,000	1172,38792	8,1066 x 10 <sup>-8</sup>
40	60	0,1113450	1947,312	1172,38792	8,1008 x 10 <sup>-8</sup>
70	0,0	0,1195190	2220,592	1172,38792	8,6954 x 10 <sup>-8</sup>
70	120	0,1195190	2220,592	1172,38792	8,6954 x 10 <sup>-8</sup>
70	180	0,1195320	2221,040	1172,38792	8,6964 x 10 <sup>-8</sup>

Os resultados do ajuste do Modelo II (transferência de calor) aos dados experimentais são apresentados na Tabela 4.18, juntamente com os indicadores estatísticos.

A partir dos valores obtidos para o coeficiente de transferência de calor convectivo, as curvas de temperatura dos grãos de arroz em casca, juntamente com os valores medidos experimentalmente, são mostradas nas Figuras 4.120 e 4.121.

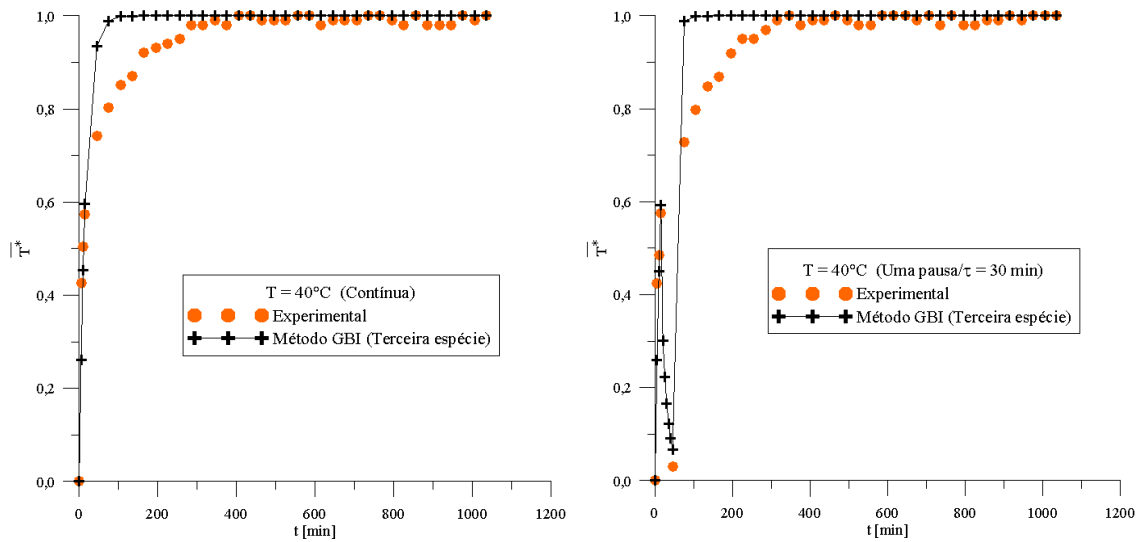
Tabela 4.18. Parâmetros estatísticos obtidos com as simulações do conjunto de experimentos de secagem nas temperaturas 40 e 70°C usando o modelo de difusão para transferência de calor com condição de contorno de terceira espécie.

T [°C]	$\tau$ [min]	$h_c$ [W/m <sup>2</sup> K]	$Bi_c = h_c a/k$	$r^2$	$\chi^2$
40	0,0	1,00	9,47 x 10 <sup>-3</sup>	0,972253	0,161162
40	30	1,00	9,42 x 10 <sup>-3</sup>	0,974587	0,194480
40	60	1,00	9,43 x 10 <sup>-3</sup>	0,968278	0,267943
70	0,0	1,60	14,05 x 10 <sup>-3</sup>	0,940865	0,113651
70	120	1,60	14,05 x 10 <sup>-3</sup>	0,956550	0,127830
70	180	1,60	14,05 x 10 <sup>-3</sup>	0,932586	0,218542

Observando as Figuras 4.120 e 4.121, verifica-se que a temperatura média dos grãos de arroz, na secagem contínua, aumentou rapidamente nos instantes iniciais e evoluiu com o tempo até atingir o equilíbrio. Na secagem intermitente, a temperatura média aumentou nos períodos de secagem e decresceu nos períodos de têmpera. Assim, o aquecimento intermitente produziu

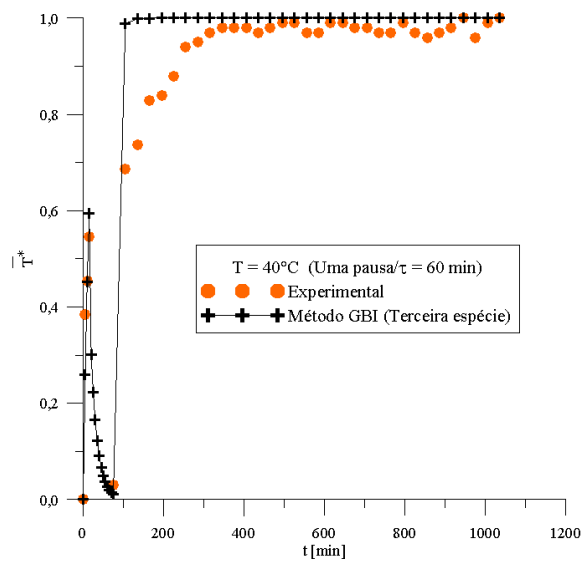
temperatura mais baixa na superfície do grão do que com a temperatura do ar constante, o que é de interesse na secagem de materiais sensíveis.

Figura 4.120. Comparação entre as temperaturas média adimensional teórica (método GBI, Modelo II) e experimental durante a secagem de arroz em casca a 40°C (casos E1, E2 e E3): (a)  $\tau = 0,0$  min (secagem contínua); (b) uma pausa/ $\tau = 30$  min e (c) uma pausa/ $\tau = 60$  min



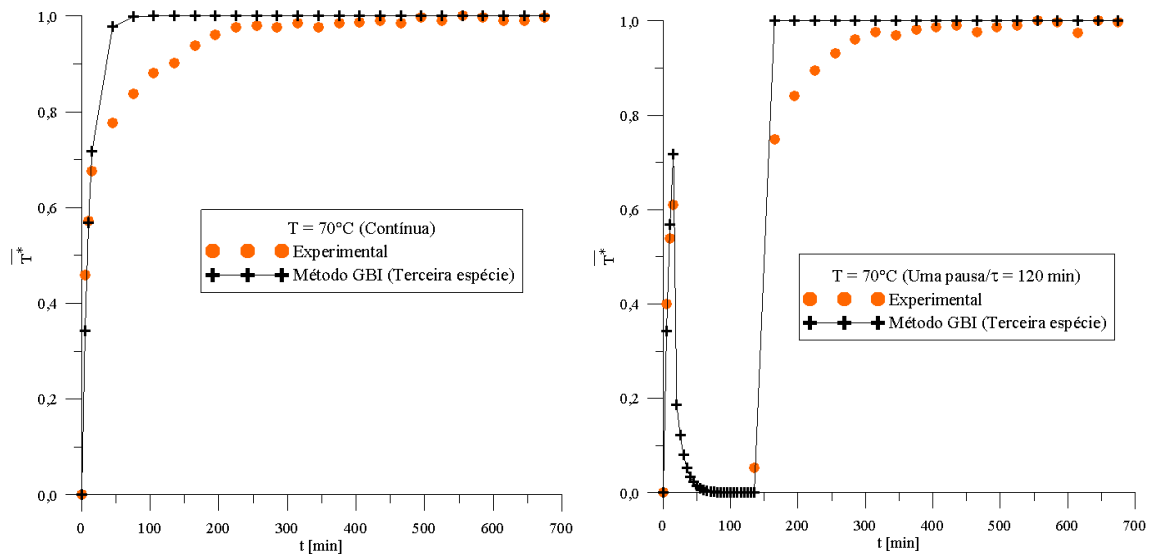
a)

b)



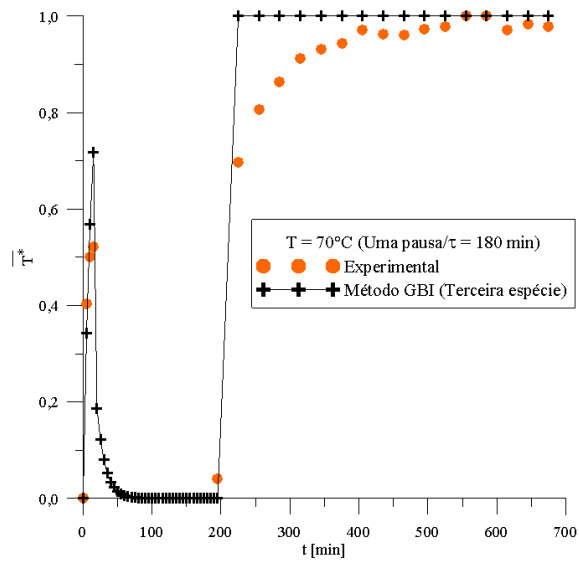
c)

Figura 4.121. Comparação entre as temperaturas média adimensional teórica (método GBI, Modelo II) e experimental durante a secagem de arroz em casca a 70°C (casos E11, E12 e E13): (a)  $\tau = 0,0$  min (secagem contínua); (b) uma pausa/ $\tau = 120$  min e (c) uma pausa/ $\tau = 180$  min



a)

b)



c)

A técnica de secagem intermitente flexibiliza o controle da temperatura na superfície do produto e, por sua vez, pode minimizar os problemas de qualidade do produto, por exemplo, o problema de rachadura na superfície (CHOU et al., 2000). Uma combinação de menor temperatura na superfície com períodos de têmpera mais longos pode ser um método para melhorar a qualidade do produto em relação as condições na superfície.

A temperatura de equilíbrio do grão de arroz em casca foi atingida em aproximadamente 100 e 80 min, respectivamente, na secagem a 40 e 70°C, que é um tempo relativamente menor quando comparado com o observado experimentalmente. Segundo Carmo (2004), o modelo que considera o fluxo de calor e massa acoplados resulta num aquecimento mais lento para o sólido. Neste caso, se o modelo considera a difusividade de massa dependente da temperatura do sólido, o acoplamento entre calor e massa terá também considerada influência nos resultados da cinética de secagem.

A Figura 4.122 mostra a cinética de secagem e o comportamento da temperatura média previstos utilizando-se a condição de contorno de terceira espécie, para secagem contínua de arroz em casca a 40°C. Observa-se que os fenômenos de transferência de calor e massa não são equivalentes. A medida que o teor de umidade diminuiu, a temperatura dos grãos aumentou nos instantes iniciais de secagem e atingiu rapidamente o seu valor de equilíbrio. Sempre que a água dos grãos vai diminuindo no interior do produto, a troca de energia em forma de calor por água decresce e, conseqüentemente, a temperatura da massa dos grãos aumenta (BONAZZI et al., 1997).

A Figura 4.123 mostra o comportamento do teor de umidade e da temperatura na superfície do grão ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$  cm), durante a pausa de 60 min subsequente ao período inicial de secagem contínua de 15 min, na temperatura de 40°C (caso E3). Neste caso, a temperatura de equilíbrio é a temperatura ambiente. Observa-se que a temperatura na superfície do grão diminuiu rapidamente, enquanto que o teor de umidade aumentou lentamente. No período de repouso, o produto não recebeu energia do ar aquecido, permitindo homogeneização da umidade e resfriamento.

A Figura 4.124 apresenta a distribuição de temperatura adimensional no interior do grão de arroz, em função das coordenadas cilíndricas ( $r,z$ ), durante a secagem contínua na temperatura de 40°C nos instantes de tempo: (a)  $t = 5$  min; (b)  $t = 15$  min; e (c)  $t = 45$  min (caso E1). A temperatura média adimensional simulada foi 0,261275; 0,596829 e 0,93446, respectivamente. A Figura 4.125 apresenta a distribuição de temperatura adimensional no interior do grão de arroz durante o período de têmpera de 60 min, após 15 min de secagem

contínua a 40°C (caso E3). Durante o período de têmpera, os tempos considerados são: (a)  $t = 15$  min (início da têmpera), (b)  $t = 25$  min, e (c)  $t = 45$  min. Neste caso, a temperatura média adimensional simulada foi 0,593874; 0,222732 e 0,066921, respectivamente.

Figura 4.122. Cinéticas de secagem e aquecimento previstas utilizando-se a condição de contorno de terceira espécie, para secagem contínua de arroz em casca a 40°C (caso E1)

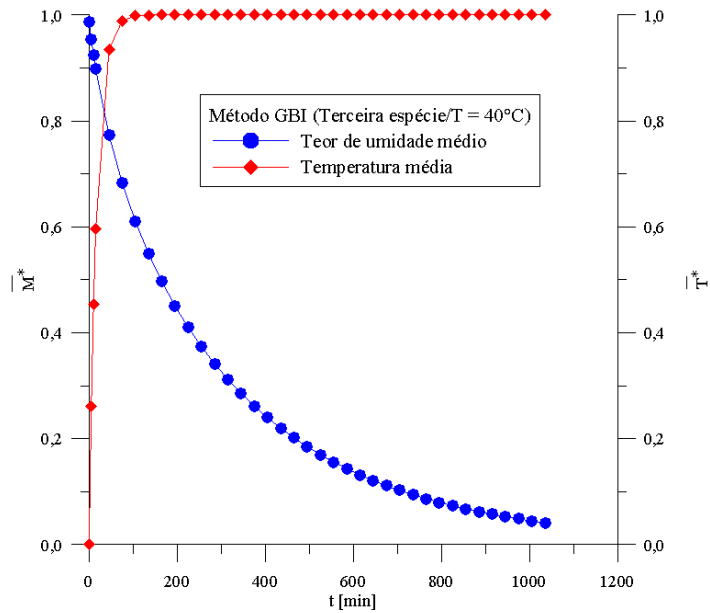


Figura 4.123. Variação do teor de umidade e da temperatura na superfície do grão ( $r = 0,105$  cm,  $z = 0$  cm), durante a pausa de 60 min após o período inicial de secagem contínua de 15 min na temperatura de 40°C (caso E3)

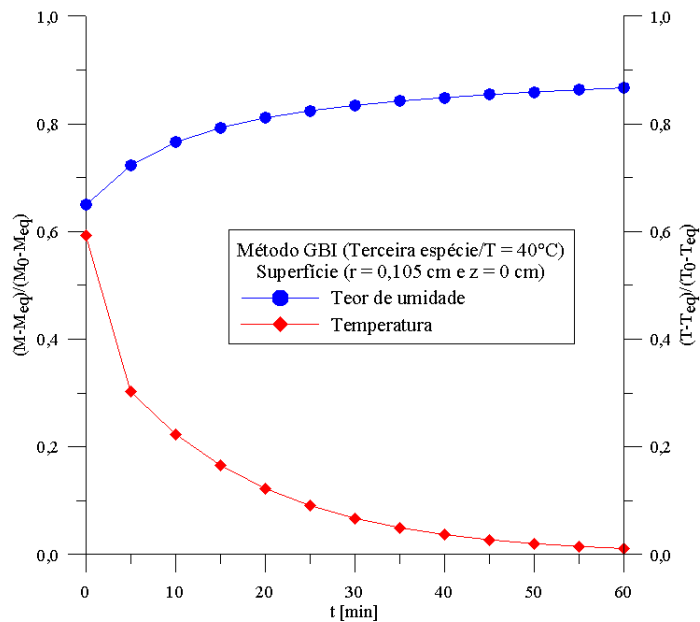
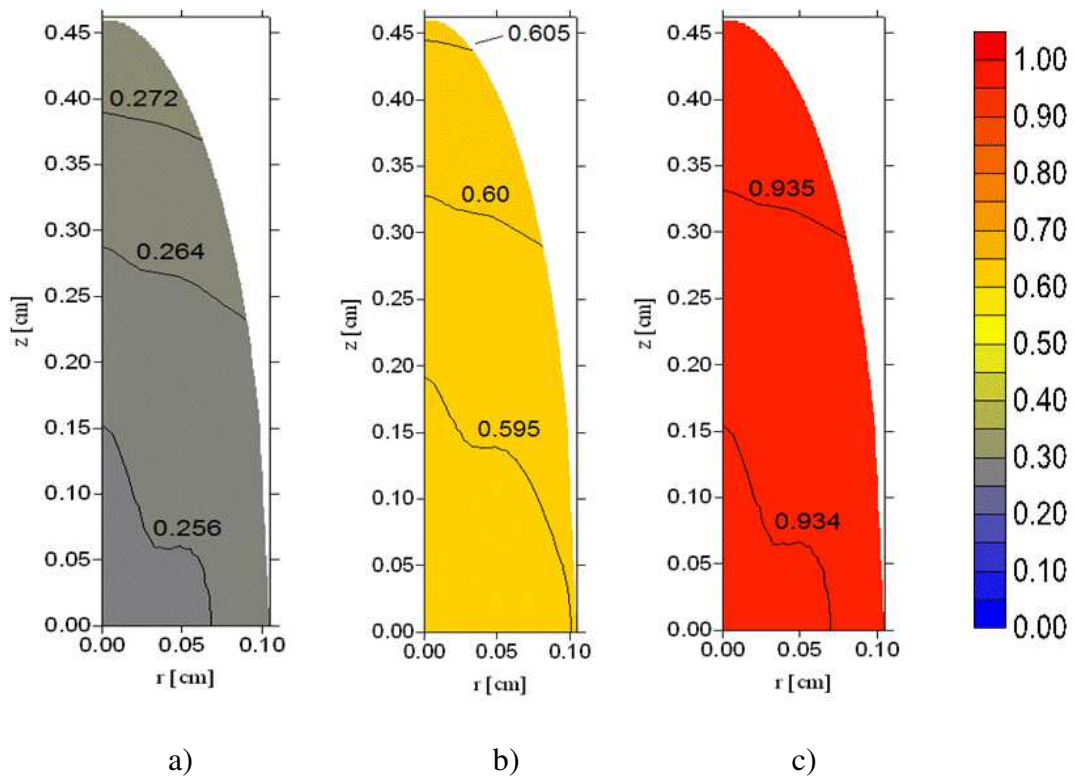
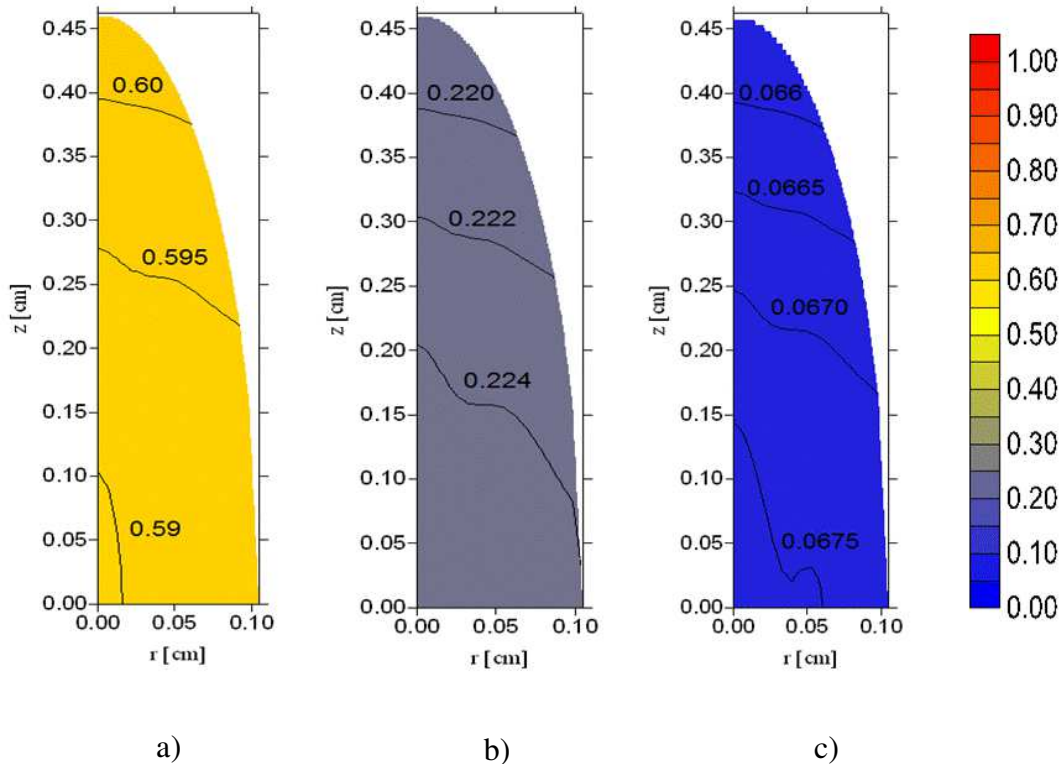


Figura 4.124. Distribuição da temperatura adimensional no interior do grão do arroz em casca para secagem contínua a 40°C (caso E1): (a)  $t = 5$  min; (b)  $t = 15$  min; e (c)  $t = 45$  min



Observando-se as Figuras 4.124 e 4.125, pode-se verificar que a penetração de calor no interior do grão é uniforme e, portanto, os gradientes de temperatura são praticamente nulos tanto no período de secagem (aquecimento) como no período de têmpera (resfriamento). Assim, a temperatura evoluiu com o tempo e, para cada instante de tempo fixo, não apresentou grandes variações com relação à posição ( $r, z$ ), o que está de acordo com o número de Biot obtido para transferência de calor (Tabela 4.15). Mesmo a diferença entre a temperatura no centro e na superfície sendo pequena, observa-se que, durante o período de secagem contínua, a ponta do grão de arroz encontra-se com a temperatura um pouco mais elevada em relação ao centro, sendo essa região a mais afetada por tenões térmicas e, portanto, estando mais suscetível ao surgimento de defeitos, tais como trinca ou quebra do grão. Já durante o período de têmpera, período em que o grão resfria, ocorreu o processo contrário, isto é, a ponta do grão apresenta-se com temperatura menor em relação a parte mais interna do produto, o que favoreceu ao acúmulo de umidade nesta região. Assim, no período subsequente de secagem (período pós-têmpera), a umidade acumulada na ponta do grão é retirada mais facilmente, sem danificar o produto.

Figura 4.125. Distribuição da temperatura adimensional no interior do grão do arroz em casca durante a têmpera de 60 min, após 15 min de secagem a 40°C (caso E3): (a)  $t = 15$  min (início); (b)  $t = 25$  min e (c)  $t = 45$  min



As melhorias na qualidade do produto seco no que diz respeito a redução de trincas e fissuras, podem ser atribuídas à redistribuição de umidade e temperatura durante o período de têmpera, visto que a têmpera ajuda a reduzir a temperatura e os gradientes de umidade e, portanto, as tensões internas dentro do produto (KUMAR et al., 2014). Os experimentos de secagem intermitente realizados nesta pesquisa mostraram que é possível chegar ao teor de umidade final aproximadamente igual ao obtido com a secagem sem têmpera, reduzindo o tempo efetivo de secagem. Assim, reduz o tempo de permanência do produto no secador e ganha-se em energia. Esta análise mostrou as vantagens consideráveis da secagem intermitente e confirma a redução do tempo de secagem (tempo de operação efetiva).

As simulações numéricas da secagem intermitente fornecem informações sobre o que realmente acontece com o produto durante os períodos de interrupção do ar quente. Destaca-se que os modelos desenvolvidos nesta pesquisa, apesar de considerar o coeficiente de difusão constante, são bidimensionais e utiliza a geometria de um elipsoide prolato que representa de forma mais real o grão de arroz (CIHAN et al., 2008; HACIHAFIZOĞLU et al., 2008). Além disso, o método GBI, utilizado para obter solução analítica da equação de difusão para geometria elipsoidal prolata, é um método analítico aproximado com a vantagem de não ser



necessário escrever a equação em coordenadas esferoidais prolatas como acontece no método de separação de variáveis, facilitando demasiadamente a obtenção dos resultados.

A estratégia de intermitência permitiu tempo para transferência de umidade a partir do centro para superfície do produto durante o período de têmpera e, portanto, danos causados pelo calor podem ser minimizados mediante a aplicação de secagem intermitente.

Por fim, observa-se que o coeficiente de difusão de massa efetivo foi obtido por otimização em cada período de secagem contínua, o que diferencia das pesquisas reportadas na literatura para modelagem da secagem intermitente de grãos de arroz em casca, que comumente eliminam o período de têmpera na simulação ou considera modelo de difusão unidimensional com geometria esférica ou cilíndrica para representar o grão de arroz.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

#### **5.1 Conclusões**

De acordo com os resultados obtidos nos testes de validação dos modelos desenvolvidos e testes de simulação de otimização de secagem intermitente, é possível apresentar as seguintes conclusões:

- Os resultados obtidos, neste trabalho, para os teores de umidade apresentam uma boa concordância com os obtidos na literatura, tanto com a solução via método de separação de variáveis como também com outros resultados obtidos com o método GBI;
- A metodologia apresentada tem um grande potencial (versatilidade de utilização e precisão) e pode ser aplicada em fenômenos de difusão transiente (secagem, umidificação, aquecimento e resfriamento) para diferentes geometrias tais como: elipsoide prolato e esfera, alterando, apenas, a razão de aspecto;
- Verifica-se que, secagem intermitente provoca redistribuição de umidade durante o período de têmpera e a quantidade de água removida por unidade de tempo de secagem é consideravelmente maior quando comparada à secagem contínua;
- Os testes teóricos de secagem contínua e intermitente permitem verificar que quanto maior a relação área/volume maior será a velocidade de secagem e a

migração de água do centro para a superfície do sólido durante o período de têmpera;

- É possível acelerar a velocidade de secagem aplicando-se apenas uma pausa e aumentando a duração da têmpera;
- Aplicando-se duas pausas, é possível acelerar o processo de secagem reduzindo a relação de intermitência de 1:1 para 1:2;
- O número de pausas tem influência na taxa de secagem. Observa-se aumento na taxa de secagem com o aumento do número de pausas;
- Verifica-se que, para número de Biot menor que 5,0, o efeito de têmpera produz alterações irrelevantes no teor de umidade do sólido. Este fato é devido aos baixos gradientes de umidade, fazendo com que a migração de umidade do centro para a superfície do sólido seja minimizada.

A partir do conjunto de experimentos de secagem contínua e intermitente nas temperaturas 40, 50, 60 e 70°C, os seguintes resultados foram obtidos:

- A temperatura do ar de secagem e o teor de umidade inicial têm influência na cinética de secagem. Quanto maiores a temperatura e o teor de umidade inicial, maior é a velocidade de secagem;
- Para todos os experimentos de secagem intermitente de grãos de arroz em casca houve redução do tempo de operação efetiva, quando comparada com a secagem contínua. Mantendo a duração da têmpera de 120 min, verifica-se que o aumento da temperatura do ar de secagem de 50 para 70°C reduz o tempo de operação efetiva;
- De acordo com os indicadores estatísticos, o modelo que considera condição de contorno convectiva descreve melhor a secagem contínua de grãos de arroz em casca;
- Incluir o período de têmpera na cinética de secagem é mais adequado para descrever o comportamento de secagem intermitente, produzindo melhores indicadores estatísticos. Neste caso, é possível obter o coeficiente de difusão de massa efetivo em cada período de secagem contínua;
- Para o modelo difusivo com condição de contorno de primeira espécie, a difusividade de massa efetiva aumenta com a elevação da temperatura. A

difusividade de massa efetiva também aumenta no período pós-têmpera, para secagem intermitente com uma pausa, o que pode justificar a redução do tempo de operação efetiva;

- A combinação do modelo II, que considera condição de contorno de terceira espécie nos períodos de secagem contínua, com o modelo III, descreve melhor a secagem intermitente de grãos de arroz em casca;
- Os modelos desenvolvidos permitem observar que a secagem intermitente contribui para uma uniformização da umidade que pode ser responsável pelas melhoras na qualidade do produto pós-secagem;
- Após 15 min de secagem nas temperaturas de 40 e 70°C, seguido de uma pausa de 60 min em temperatura ambiente, é possível reduzir, respectivamente, cerca de 72 e 68% dos gradientes do teor de umidade no interior do grão de arroz. Com 180 min de têmpera é possível eliminar praticamente todos os gradientes do teor de umidade para secagem a 70°C;
- Analisando a distribuição de umidade no final da têmpera de 120 min, após 15 min de secagem nas temperaturas 50, 60 e 70°C, é possível concluir que a homogeneização de umidade pode ser continuada até que os gradientes de umidade tendam a zero, sem gasto de energia;
- O teor de umidade na superfície do grão diminui durante os períodos de secagem e aumenta durante a têmpera. Processo inverso ocorre com a temperatura;
- As camadas mais internas do grão de arroz secam durante todo o processo de secagem intermitente;
- A secagem intermitente produz temperatura mais baixa na superfície do grão, o que é de interesse na secagem de materiais sensíveis. Uma combinação de menor temperatura na superfície com períodos de têmpera mais longos pode ser um método para melhorar a qualidade do produto em relação às condições na superfície.

## 5.2 Sugestões para futuros trabalhos

Como sugestão para futuras pesquisas pode-se citar:

- Aplicar os modelos desenvolvidos neste trabalho a secagem intermitente de outros produtos;

- Desenvolver novos modelos para descrever a secagem intermitente de sólidos elipsoidais, considerando-se difusividade variável e utilizar os dados desta pesquisa para validá-los;
- Realizar testes de simulação de secagem intermitente de sólidos com geometria arbitrária;
- Desenvolver um otimizador a ser acoplado ao programa, visando uma melhor precisão para os parâmetros estimados;
- Realizar estudo sobre a qualidade do grão de arroz quanto à composição química e nutrientes após o processo de secagem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGEITEC – Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 28 de outubro de 2015.

ALONSO, L. F. T. **Algoritmo de seleção e dimensionamento de secadores**. 2001, 241 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, São Paulo.

AQUERRETA, J.; IGUAZ, A.; ARROQUI, C.; VIRSEDA, P. Effect of high temperature intermittent drying and tempering on rough rice quality. **Journal of Food Engineering**, Vol. 80, n. 2, p. 611-618, 2007.

ASSAN, A. E. **Método dos elementos finitos: Primeiros Passos**. 2ª edição. Campinas: UNICAMP, 2003. 304 p.

BAINI, R.; LANGRISH, T. A. G. Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas, **Journal of Food Engineering**, Vol. 79, n. 1, p. 330-343, 2007.

BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática**. São Paulo: Contexto, 2002. 389 p.

BECK, J. V.; COLE, K. D.; HAJI-SHEIKH, A.; LITKOUHI, B. **Heat conduction using green's functions**. New York: Hemisphere Publishing Corporation. Chapter ten: Galerkin-based green's functions and solutions, p. 293-335, 1992.

BEEDIE, M. Energy saving – a question of quality? **Dairy Industries International**, Vol. 60, n. 12, p. 27-29, 1995.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E. and LEIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de transporte**. Segunda edição. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 895 p.

BONAZZI, C.; DUPEUTY, M. A.; HERMELIN, A. Influence of drying conditions on the processing quality of rough rice. **Drying Technology**, Vol.15, n. 3-4, p. 1141-1157, 1997.

BOTHA, G. E., OLIVEIRA, J. C., AHRNE, L. Microwave assisted air drying of osmotically treated pineapple with variable power programmes. **Journal of Food Engineering**, Vol. 108, n. 2, p. 304-311, 2012.

BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C. **Equações diferenciais elementares e problemas e valores de contorno**. 8ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 434 p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.

CARMO, J. E. F. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos esferoidais oblatos. Estudo de caso: Secagem de lentilhas**. 2004. 139 p. (Tese Doutorado). Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

CARMO, J. E. F.; LIMA, A. G. B. Drying of lentil including shrinkage: a numerical simulation. **Drying Technology**, Vol. 23, n. 9-11, p. 1977-1992, 2005.

CARMO, J. E. F.; LIMA, A. G. B. Mass Transfer Inside Oblate Spheroidal Solids: Modelling and simulation. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, Vol. 25, n. 1, p. 19-26, 2008.

CARMO J. E. F.; LIMA, A. G. B. and SILVA, C. J. Continuous and intermittent drying (tempering) of oblate spheroidal bodies: Modeling and simulation. **International Journal of Food Engineering**, Vol. 8, n. 3, p. 1-17, 2012.

CASTRO, E. M.; VIEIRA, N. R. A.; RABELO, R. R.; SILVA, S. A. **Qualidade de grãos em arroz**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 30 p.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos**. Planatina: Embrapa Cerrados, 2010. 51 p.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Numerical methods for engineers**. New York : McGraw-Hill Book Company, 1989. 337 p.

CHOU, S. K.; CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; HAWLADER, M.N.A; HO, J. C. On the intermittent drying of an agricultural product. **Food and Bioproducts Processing**, Vol. 78, n. 4, p. 193-203, 2000.

CHUA, K. J.; CHOU, S. K.; HO, J. C.; MUJUMDAR, A.S.; HAWLADER, M. N. A. Cyclic air temperature drying of guava pieces: effects on moisture and ascorbic acid contents. **Food and Bioproducts Processing**, Vol. 78, n. 2, p. 72-78, 2000a.

CHUA, K. J.; MUJUNDAR, A. S.; CHOU, S. K.; HAWLADER, M. N. A.; HO, J. C. Convective drying of banana, guava and potatoes pieces: effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics on color changes. **Drying Technology**, Vol. 18, n. 4-5, p. 907-936, 2000b.

CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K. Intermittent drying of bioproducts – on overview. **Bioresource Technology**, Vol. 90, n. 3, p. 285-295, 2003.

CIHAN, A; ECE, M. C. Liquid diffusion model for intermittent drying of roug rice. **Journal of Food Engineering**, Vol. 49, n. 2, p. 327-331, 2001.

CIHAN, A.; KAHVECI, K.; HACIHAFIZOĞLU, O. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. **Journal of Food Engineering**, Vol. 79, n. 1, p. 293-298, 2007.

CIHAN, A.; KAHVECI, K.; HACIHAFIZOĞLU, O.; LIMA, A. G. B. A diffusion based model for intermittent drying of rough rice. **Heat Mass Transfer**, Vol. 44, n. 8, p. 905-911, 2008.



CNOSSEN, A. G.; SIEBENMORGEN, T. J. The glass transition temperature concept in rice drying and tempering effect on milling quality. **Transactions of the ASAE**, Vol. 43, n. 6, p. 1661-1667, 2000.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **A cultura do arroz**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 26 de maio de 2016.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; NOGUEIRA, B. L. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, Vol. 8, n. 2, p. 117-126, 2006.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; SOUSA, K. A.; GONÇALVES, D. N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Vol. 15, n. 10, p. 1089-1096, 2011.

COURANT, R.; HILBERT, D. **Methods of mathematical physics**, Vol. 1, New York: Wiley - Interscience, 1953. 174 p.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. New York: Oxford Science Publications, 1992. 414 p.

DAUTRAY, R.; LIONS, J. L. **Mathematical Analysis and Numerical Methods for Science and Technology**, Vol. 1, New York: Springer-Verlag, 1998. 715 p.

DIAMANTE, L. M.; IHNS, R.; SAVAGE, G. P.; VANHANEN, L. A new mathematical model for thin layer drying of fruits. **International Journal of Food Science and Technology**, Vol. 45, n. 9, p. 1956-1962, 2010.

DONG, R.; LU, Z.; LIU, Z.; NISHIYAMA, Y.; CAO, W. Moisture distribution in a rice kernel during tempering drying, **Journal of Food Engineering**, Vol. 91, n. 1, p. 126-132, 2009.

DONG, R.; LU, Z.; LIU, Z.; KOIDE, S.; CAO, W. Effect of drying and tempering on rice fissuring analysed by integrating intra-kernel moisture distribution, **Journal of Food Engineering**, Vol. 97, n. 2, p. 161-167, 2010.

ECE, M. C.; CIHAN, A. A liquid diffusion model for drying rough rice. **Transactions of the ASAE**, Vol. 36, n. 3, p. 837-840, 1993.

ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M.; SCHIAVON, R. A. **Qualidade de arroz na pós-colheita: Ciência, tecnologia e normas**. Pelotas: Santa Cruz, 2010. 543 p.

EMBRAPA: Cultivo do arroz irrigado no Brasil. Impotância econômica, agrícola e alimentar do arroz disponível em <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrigadoBrasil/cap01.htm>. Acesso em: 27 de outubro de 2015.

EPAMIG - Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais. Arroz BRSMG Conai. Disponível em: [www.epamig.br](http://www.epamig.br). Acesso em 11 de agosto de 2016.

FARIAS, V. S. O. **Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. 2011, 265 p. (Tese Doutorado). Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

FARIAS, V. S. O.; SILVA, W. P. S.; SILVA, C. M. D. P. S.; ROCHA, V. P. T.; LIMA, A. G. B. Drying of solids with irregular geometry: numerical study and application using a three-dimensional model. **Heat and Mass Transfer**, Vol. 49, n. 5, p. 695-709, 2013.

FATOUH, M.; METWALLY, M. N.; HELALI, A. B.; SHEDID, M. H. Herbs drying using a heat pump dryer. **Energy Conversion and Management**, Vol. 47, n. 15-16, p. 2629-2643, 2006.

FIGUEIREDO, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2003. 229 p.

FORTES, M.; OKOS, M. R.; BARRETT Jr, J. R. Heat and mass transfer analysis of intra-kernel wheat drying and rewetting. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Vol. 26, n. 2, p. 109-125, 1981.

GARCIA, D. C. **Secagem de sementes**. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/sementes/textos/secagem.pdf>. Acesso em: 25/11/2014.

GOLESTANI, R.; RAISI, A.; AROUJALIAN, A. Mathematical modeling on air drying of apples considering shrinkage and variable diffusion coefficient. **Drying Technology**, Vol. 31, n. 1, p. 40-51, 2013.

HACIHAFIZOĞLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K.; LIMA, A. G. B. A liquid diffusion model for thin-layer drying of rough rice. **European Food Research and Technology**, Vol. 226, n. 4, p. 787-793, 2008.

HAJI-SHEIKH, A.; SPARROW, E. M. Transient heat conduction in a prolate spheroidal solid, **Transactions of the ASME: Journal of Heat Transfer**, Vol. 88, n. 3, p. 331-333, 1966.

HAJI-SHEIKH, A. **Integral methods in science and engineering**. New York: Hemisphere Publishing Corporation. Chapter: On solution of parabolic partial differential equations using Galerkin functions, p. 467-479, 1986.

HAJI-SHEIKH, A.; LAKSHMINARAYANAN, R. Integral Solution of Diffusion Equation: Part 2 – Boundary Conditions of Second and Third Kinds. **Journal of Heat Transfer**, Vol. 109, n. 3, p. 557-562, 1987.

HAJI-SHEIKH, A.; MASHENA, M. Integral Solution of Diffusion Equation: Part 1 – General Solution. **Journal of Heat Transfer**, Vol. 109, n. 3, p. 551-556, 1987.

HAY, G. E. **Vector and tensor analysis**. New York: Dover Publications, 1953. 193 p.

HERRITSCH, A.; DRONFIELD, J.; NIJDAM, J. J. Intermittent and continuous drying of red beech timber from the green conditions. **Drying Technology**, Vol. 28, n. 2, p. 269-277, 2010.

HII, C. L.; LAW, C. L.; CLOKE, M. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. **Journal of Food Engineering**, Vol. 90, n. 2, p. 191-198, 2009.

HO, J. C.; CHOU, S. K.; CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; HAWLADER, M. N. A. Analytical study of cyclic temperature drying: effect on drying kinetics and product quality. **Journal of Food Engineering**, Vol. 51, n. 1, p. 65-75, 2002.

HOLOWATY, S. A.; RAMALLO, L. A.; SCHMALKO, M. E. Intermittent drying simulation in a deep bed dryer of yerba mate, **Journal of Food Engineering**, Vol. 111, n. 1, p. 110-114, 2012.

IGUAZ, A.; RODRÍGUEZ, M.; VÍRSEDA, P. Influence of handling and processing of rough rice on fissures and head rice yields. **Journal of Food Engineering**, Vol. 77, n. 4, p. 803-809, 2006.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. [Fundamentals of heat and mass transfer, 6th ed. (Inglês)]. Tradução e revisão técnica de Eduardo Mach Queiroz e Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 622 p.

JUMAH, R.Y. Flow and drying characteristics of a rotating jet spouted bed. **Drying Technology**, Vol. 13, n. 8-9, p. 2243-2244, 1995.

JUMAH, R.; AL-KTEIMAT, E.; AL-HAMAD, A.; TELFAH, E. Constant and intermittent drying characteristics of olive cake. **Drying Technology**, Vol. 25, n. 9, p. 1421-1426, 2007.

KALETA, A.; GÓRNICKI, K. Evaluation of drying models of apple (var. McIntosh) dried in a convective dryer. **International Journal of Food Science and Technology**, Vol. 45, n. 5, p. 891-898, 2010.

KAPLAN, W. **Advanced calculus**. 2ª Edição. London: Addison-Wesley Publishing Company, 1973. 679 p.

KARIM, M. A.; HAWLADER, M. N. A. Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. **Journal of Food Engineering**, Vol. 70, n. 1, p. 35-45, 2005.

KOWALSKI, S. J.; PAWŁOWSKI, A. Drying of wet materials in intermittent conditions, **Drying Technology**, Vol. 28, n. 5, p. 636-643, 2010.

KOWALSKI, S. J.; PAWŁOWSKI, A. Energy consumption and quality aspect by intermittent drying. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, Vol. 50, n. 4, p. 384-390, 2011a.

KOWALSKI, S. J.; PAWŁOWSKI, A. Intermittent drying of initially saturated porous materials. **Chemical Engineering Science**, Vol. 66, n. 9, p. 1893-1905, 2011b.

KREYSZIG, E. **Matemática superior para engenharia**. Vol. 2. Tradução Luís Antônio Fajardo Pontes. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 270 p.

KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDDER, M. U. H. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering**, Vol. 121, p. 48 – 57, 2014.

KUNZE, O. R. Fissuring of the rice grain after heated air drying. **Transactions of the ASAE**, Vol. 22, n. 5, p.1197-1207, 1979.

LIMA, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas**. 1999, 256 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia Mecânica, UNICAMP, São Paulo.

LIMA, A. G. B.; NEBRA, S. A. Efeito do fenômeno de encolhimento na difusão de umidade em sólidos esferoidais prolatos. In: **Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM, Natal, Brasil, August, 2000**.

LIMA, A. G. B.; LIMA, D. R.; FARIAS, S. N. Transporte de calor e massa em sólidos elipsoidais de revolução: um estudo teórico usando o método de Galerkin. In: **Anais do 3º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Belém, Brasil**. p. 1-8, 2004.

LIMA, A. G. B.; DELGADO, J. M. P. Q.; NETO, S. R. F.; FRANCO, C. M. R. **Drying and Energy Technologies**. Chapter: Intermittent drying: fundamentals, modeling and applications. Springer, Vol. 63, p.19-41, 2015.

LIMA, D. R.; FARIAS, S. N.; LIMA, A. G. B. Mass transport in spheroids using the Galerkin method. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, Vol. 21, n. 4, p. 667-680, 2004a.

LIMA, D. R.; FARIAS, S. N.; LIMA, A. G. B. Heat and mass transfer inside oblate and prolate spheroids: an exact solution. In: **Proceedings of the 14th International Drying Symposium, (IDS 2004), São Paulo, Brasil, August**, p. 22-25, 2004b.

LINS, M. A. A. **Determinação de parâmetros termo-físicos em produtos pastosos durante processos de transferência de calor**. 2013, 262 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande.

LUIKOV, A. V. **Heat and mass transfer in capillary porous bodies**. New York: Pergamon Press Ltd., 1966. 523 p.

LUIKOV, A. V. **Analytical heat diffusion theory**. New York and London: Academic Press, 1968. 684 p.

MABROUK, S. B.; BENALI, E.; OUESLATI, H. Experimental study and numerical modelling of drying characteristics of apple slices. **Food and Bioproducts Processing**, Vol. 90, n. 4, p. 719-728, 2012.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 2004. 453 p.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/arroz>. Acesso em: 28 de outubro de 2015.

MARIANI, V. C.; LIMA, A. G. B.; COELHO, L. S. Apparent thermal diffusivity estimation of the banana during drying using inverse method. **Journal of Food Engineering**, Vol. 85, n. 4, p. 569-579, 2008.

MELO, J. C. S. **Transporte de calor e massa em sólidos esferoidais oblatos via termodinâmica dos processos irreversíveis – Estudo de caso: secagem de lentilha**. 2013. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

MENEGHETTI, V. L.; AOSANI, E.; ROCHA, J. C.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M. C.; POHNDORF, R. S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Vol .16, n. 10, p. 1115-1120, 2012.

MILMAN, M. J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. Pelotas: Ed. Universitária/UFPel, 2002. 206 p.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, Vol. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.

MOHSENIN, N. N. Physical properties of plant and animal materials. Structure, physical characteristics and mechanical properties. **Molecular Nutrition and Food Research**. Vol. 31, n. 7, p. 702-702, 1987.

MORAIS, S. J. S.; DEVILLA, I. A.; FERREIRA, D. A.; TEIXEIRA, I. R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), **Revista Ciência Agrônômica**, Vol. 44, n. 3, p. 455-463, 2013.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 696 p.

MOTTA, W. A.; VILLELA, F. A.; ZIMMER, G. J. Adaptação do método contínuo de secagem para sementes de arroz. **Scientia Agricola**, Vol .56, n.4, p.1019-1025, 1999.

MRAD, N. D.; BOUDHRIOUA, N.; KECHAOU, N.; COURTOIS, F.; BONAZZI, C. Influence of air drying temperature on kinetics, physiochemical properties, total phenolic content and ascorbic acid on pears. **Food and Bioproducts Processing**, Vol. 90, n. 3, p. 433-441, 2012.

MUNEM, M. A.; FOULIS, D. J. **Cálculo**. Vol. 2. Tradução de André Lima Cordeiro, André Vital Pessoa, Evandro Henrique Magalhães e José Miranda Formigli Filho. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1978. 1033 p.

NISHIYAMA, Y.; CAO, W. Y.; LI, B. Grain intermittent drying characteristic analyzed by a simplified model. **Journal of Food Engineering**, Vol. 76, n. 3, p. 272–279, 2006.

OLIVEIRA, V. A. B.; LIMA, A. G. B. Mass diffusion inside prolate spherical solids: an analytical solution. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Vol. 4, n.1, p. 41-50, 2002.

OLIVEIRA, V. A. B. **Transferência de calor e massa no interior do Sólidos com forma esferoidal prolata via termodinâmica dos processos irreversíveis**. 2006. 132 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

OZISIK, M. N. **Heat conduction**, 2ª Edição, New York: John Wiley e Sons, 1993. 692 p.

PAN, Y. K.; ZHAO, L. J.; HU, W. B. The effect of tempering-intermittent drying on quality and energy of plant materials. **Drying Technology**, Vol. 17, n. 9, 1795-1812, 1998.

PARRY, J. L.: Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: a review. **Journal of Engineering Research**, Vol. 32, n. 1, p. 1-29, 1985.



PATANKAR, S. V.: **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 193 p.

PAYNE, F. R.; CORDUNEANU, C. C.; HAJI-SKEIKH, A.; HUANG, T. **Integral methods in Science and engineering**. New York: Hemispheres, 1986.

PESKE, S. T.; NEDEL, J. L.; BARROS, A.C. S. A. **Produção de arroz**. Pelotas: UFPel, 1996. 655 p.

PETRY, V. J. **Desenvolvimento de um modelo para a transferência de calor e massa em meios granulares**. 2007. 93 p. (Tese Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PETROVSKY, I. G. **Lectures on partial differential equations**, New York: Interscience Publishers, 1954.

PUTRANTO, A.; CHEN, X. D.; XIAO, Z.; WEBLEY, P. A. Mathematical modelling of intermittent and convective drying of rice and coffee using the reaction engineering approach (REA), **Journal of Food Engineering**, Vol. 105, n. 4, p. 638-646, 2011a.

PUTRANTO, A.; XIAO, Z.; CHEN, X. D.; WEBLEY, P. A. Intermittent drying of mango tissues: Implementation of the reaction engineering approach, **Journal Industrial and Engineering Chemistry Research**, Vol. 50, n. 2, p. 1089-1098, 2011b.

PUZZI, D. **Conservação de grãos armazenados**. São Paulo: Agrônômica Ceres, 1973. 405 p.

QUEIROZ, M. R. **Estudo teórico experimental da secagem de bananas**. 1994. 176 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas.

QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F. L. P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 643 p.

QUEIROZ, M. R.; NEBRA, S. A. Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. **Journal of Food Engineering**, Vol. 47, n. 2, p. 127-132, 2001.

REEDS, J. S. **Drying**, ASM International Handbook Committee, 1991, p. 131-134.

RÉMOND, R.; PERRÉ, P. High-frequency heating controlled by convective hot air: Toward a solution for on-line drying of softwoods, **Drying Technology**, Vol. 26, n. 5, p. 530-536, 2008.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; MARTINAZZO, A.P.; RIBEIRO, R.M. Contração volumétrica na difusão líquida durante o processo de secagem do arroz em casca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Vol. 30, n.2, p.163-171, 2005.

RODRIGUES, A. F. **Modelagem matemática do estudo experimental das secagens contínua e intermitente de bananas**. 2015. 197 p. (Tese Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande.

SALIN, J.G. A theoretical analysis of timber drying in oscillating climates, **Holzforschung**, Vol. 57, n. 4, p. 427-432, 2003.

SANTOS, I. B.; SILVA, L. P. L.; SILVA, A. A.; LIMA, A. G. B. Transporte de massa em sólidos com forma arbitrária via método integral baseado em galerkin usando condições de contorno convectiva. **Asociación Argentina de Mecánica Computacional**, Vol. 29, n. 2, p. 2865-2881, 2010.

SANTOS, I. B. **Transporte de calor e massa em sólidos com forma arbitrária via método integral baseado em Galerkin: Modelagem e simulação**. 2013. 140 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

SANTOS, J. P. S. **Secagem convectiva de sólidos com forma complexa usando o método integral baseado em Galerkin**. 2013, 91 p. (Dissertação Mestrado) Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande.

SAYKOVA, I.; CWICKLINSKI, G.; CASTELLE, P. Analytical approach for predicting effective diffusion coefficients in multidimensional slab geometry. **Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy**, Vol. 44, n. 1, p. 44-49, 2009.

SCHÖSSLER, K.; JAGER, H.; KNORR, D. Effect of continuous and intermitente ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper. **Journal of Food Engineering**, Vol. 108, n. 1, p. 103-110, 2012.

SHEI, H. J., CHEN, Y. L. Computer simulation on intermittent drying of rough rice, **Drying Technology**, Vol. 20, n. 3, p. 615-636, 2002.

SILVA, C. M. D. P. S. **Ferramentas analíticas e numéricas para a descrição de secagem de sólidos na forma de cilindros e elipsoides**. 2012. 144 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de processos, Universidade Federal de Campina Grande.

SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 560 p.

SILVA, J. V. **Secagem de grãos de arroz em leito fixo: modelagem, simulação e experimentação**. 2016. 120 p. (Tese Doutorado) Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande.

SILVA, V.; FIGUEIREDO, A. R.; COSTA, J. J.; GUINÉ, R. P. F. Experimental and mathematical study of the discontinuous drying kinetics of pears. **Journal of Food Engineering**, Vol. 134, p. 30-36, 2014.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Tratamento de dados estatísticos**. João Pessoa: UFPB/ Editora Universitária, 1998. 197 p.

SILVA, W. P.; PRECKER, J. W.; SILVA, C. M. D. P. S.; GOMES, J. P. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coeficiente for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: Application to the drying of rough rice. **Journal of Food Engineering**, Vol. 98, n. 3, p. 302-308, 2010.

SILVA, W. P.; SILVA, L. D.; SILVA, C. M. D. P. S.; NASCIMENTO, P. L. Optimization and simulation of drying processes using diffusion models: application to wood drying using forced air at low temperature. **Wood Science and Technology**, Vol. 45, n. 4, p. 787–800, 2011a.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P.; LINS, M. A. A. Determination of expressions for the thermal diffusivity of canned foodstuffs by the inverse method and numerical simulations of heat penetration. **International Journal of Food Science and Technology**, Vol. 46, n. 4, p. 811-818, 2011b.

SILVA, W. P.; FARIAS, V. S. O.; NEVES, G. A.; LIMA, A. G. B. Modeling of water transport in roof tiles by removal of moisture at isothermal conditions. **Heat Mass Transfer**, Vol. 48, p. 809-821, 2012.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; SOUSA, J. A. R.; FARIAS, V. S. O. Empirical na diffusion models to describe water transpor tinto chickpea (*Cicer arietinum* L.). **Journal of Food Engineering**, Vol. 48, n. 2, p. 267-273, 2013a.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; Gomes, J. P. O. Drying description of cylindrical pieces of bananas in diferente temperatures using diffusion models. **Journal of Food Engineering**, Vol. 117, n. 3, p. 417-424, 2013b.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Prescrito - Adsorção e Dessorção**, Versão 2.2 (2009a), online, disponível no seguinte sítio: <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Prescribed.htm>, acesso em 15/08/2015.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Convectivo - Adsorção e Dessorção**, Versão 2.2 (2009b), online, disponível no seguinte sítio: <http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/Convective.htm>, acesso em 05/09/2015.

SILVA, W. P.; RODRIGUES, A. F.; SILVA, C. M. D. P. S.; CASTRO, D. S.; GOMES, J. P. Comparison between continuous and intermittent drying of whole bananas using empirical and diffusion models to describe the processes. **Journal of Food Engineering**, Vol. 166, p. 230-236, 2015.

SMITH, S. A.; LANGRISH, T. A. G. Multicomponent solid modeling of continuous and intermittent drying of *Pinus radiata* sapwood below the fiber saturation point, **Drying Technology**, Vol. 26, n. 7, p. 844-854, 2008.

SOUSA, F. A.; ANDRADE, E. T.; FIGUEIRA, V. G.; D'ANDREA, E. M.; FILHO, L. C. C. Estudo da cinética de secagem, contração volumétrica e análise da difusão líquida do morango (*fragaria* sp.), **Engevista**, Vol. 16, n. 1, p. 8-18, 2014.

STORCK, C. R. **Variação na composição química em grãos de arroz submetidos a diferentes beneficiamentos**. 2004. 108 p. (Dissertação Mestrado) Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

THAKUR, A. K.; GUPTA, A. K. Water absorption characteristics of paddy, brown rice and husk during soaking. **Journal of Food Engineering**, Vol. 75, n. 2, p. 252–257, 2006.

THOMAS, J. W. **Numerical partial differential equations: finite difference methods**, New York: Springer-Verlag, 1995. 437 p.

THOMKAPANICH, O.; SUVARNAKUTA, P.; DEVAHASTIN, S. Study of intermittent low-pressure superheated steam and vacuum drying of heat-sensitive material, **Drying Technology**, Vol. 25, n. 1, p. 205-223, 2007.

URIBE, E.; VEGA-GALVEZ, A.; DI SCALA, K.; OYANADEL, R.; TORRICO, J. S.; MIRANDA, M. Characteristics of convective drying of pepino fruit (*Solanum muricatum* Ait.): application of weibull distribution. **Food and Bioprocess Technology**, Vol. 4, n. 8, p. 1349-1356, 2011.

VÁQUIRO, H, A; CLEMENTE, G.; GARCÍA-PÉREZ, J. V; MULET, A.; BON, J. Enthalpy-driven optimization of intermittent drying of *Mangifera indica* L. **Chemical Engineering Research and Design**, Vol. 87, n. 7, p. 885-898, 2009.

WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. Arroz: Composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, Vol. 38, n. 4, p. 1184-1192, 2008.

WU, B.; YANG, W.; JIA, C. A three-dimensional numerical simulation of transient heat and mass transfer inside a single rice kernel during the drying process. **Biosystems Engineering**, Vol. 87, n. 2, p. 191-200, 2004.

YANG, Z.; ZHU, E.; ZHU, Z.; WANG, J.; LI, S. A comparative study on intermittent heat pump drying process of Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp) seeds. **Food and Bioproducts Processing**, Vol. 91, n. 4, p. 381-388, 2013.

YILDIRIM, A.; ÖNER, M. D., BAYRAM, M. Fitting Fick's model to analyze water diffusion into chickpeas during soaking with ultrasound treatment. **Journal of Food Engineering**, Vol. 104, n. 1, p. 134-142, 2011.

ZHOU, Z.; ROBARDS, K.; HELLIWELL, S.; BLANCHARD, C. Composition and functional properties of rice. **International Journal of Food Science and Technology**, Vol. 37, n. 8, p. 849-868, 2002.

ZHU, Y.; PAN, Z.; MCHUGH, T. H.; BARRETT, D. M. Processing and quality characteristics of apple slices processed under simultaneous infrared dry-blanching and dehydration with intermittent heating. **Journal of Food Engineering**, Vol. 97, n. 1, p. 8-16, 2010.